

КАРПЕНКО МАРГАРИТА

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: [0000-0003-3237-4130](https://orcid.org/0000-0003-3237-4130)
e-mail: history1991@ukr.net

РАДОВЕНЧИК В'ЯЧЕСЛАВ

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: [0000-0001-5361-5808](https://orcid.org/0000-0001-5361-5808)
e-mail: dokeco@ukr.net

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗМЕНШЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ДРУГОГО ТА ТРЕТЬОГО ЕТАПІВ ОБРОБКИ ВОДИ В СИСТЕМАХ ЗВОРОТНЬОГО ОСМОСУ

В роботі описано особливості формування другого та третього етапів обробки води в системах зворотного осмосу малої та середньої продуктивності. Проаналізовано склад існуючого обладнання, відходи різного агрегатного стану, що утворюються при реалізації другого та третього етапів обробки води, оцінено можливість повторного використання чи утилізації таких відходів. Запропоновано шляхи вирішення зазначених питань.

Ключові слова: зворотній осмос, обробка води, відходи процесів доочищення води, системи малої та середньої продуктивності, регенерація відходів.

KARPENKO MARGARYTA

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
RADOVENCHYK VYACHESLAV
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF REDUCING THE NEGATIVE IMPACT ON THE ENVIRONMENT OF THE SECOND AND THIRD STAGES OF WATER TREATMENT IN REVERSE OSMOSIS SYSTEMS

Reverse osmosis systems of low and medium productivity include up to 7-9 stages of water treatment to bring its quality to drinking quality. At the same time, the main component of such systems is the membrane, and the first three stages of treatment of the incoming water are designed to protect it from damage and extend the service life. The period of exhaustion of the cartridge resource is 3-6 months, after which the cartridges replenish the volume of solid household waste, increasing the burden on the environment, the content of microplastics in its components, irreversibly losing valuable natural raw materials. The cartridge of the first stage of pre-membrane water treatment is a monolithic polypropylene block and can be successfully regenerated by chemical methods for reuse. Cartridges of the second stage are mainly represented by carbon-containing materials, the regeneration of which is economically impractical today, so such cartridges can be disposed of by thermal methods. Another way to solve the problem can be the manufacture of cartridge housings dismountable, which will allow after the resource is exhausted at service enterprises to replace the contents of the cartridge and restore its properties. Things are much worse with cartridges of the third stage of water treatment. Even within the model range of one manufacturer, materials with different properties are often used, which prevents not only their regeneration, but also makes effective disposal impossible. The problem of using substances capable of transforming at high temperatures (silver blocks) or complex cartridges containing several (three to five) materials with different properties at the same time deepens the problem even more. In this case, the organization of replacing the used cartridges with new ones and returning the used ones to the manufacturing enterprises for disposal in the conditions of their industrial production seems to be the most likely.

Key words: reverse osmosis, water treatment, waste from water purification processes, low and medium productivity systems, waste regeneration.

Постановка проблеми. Ріст чисельності населення збільшує потребу у воді як для сільського господарства, так і для домашнього та промислового використання. При цьому обмежені запаси прісної води зумовлюють гострі екологічні та соціальні проблеми на вододефіцитних територіях. І з часом вони будуть лише зростати та загострюватися. Згідно розрахунків Агенства захисту довкілля (США), у 2030 році поточні ресурси прісної води (грунтові та поверхневі води) на 30 % не задовольнятимуть попит [1]. Крім цього, більшість природних вод мають недостатню якість і потребують додаткової обробки. Доочищення потребують навіть води централізованих систем водопостачання, оскільки містять значні кількості іонів коагулянтів (алюміній чи залізо), домішки флокулянтів, залишкові концентрації хлору, різноманітні біологічні об'єкти, що потрапляють у воду в процесі транспортування. Серед різноманітних систем обробки води найбільшою популярністю побутових споживачів користується зворотний осмос. Однією з переваг систем зворотного осмосу, особливо малої та середньої продуктивності є те, що вони безпосередньо підключаються до централізованої або локальної мережі, забезпечуючи очищення води до параметрів питної. При цьому в процесі експлуатації такі системи практично не потребують складного обслуговування, за виключенням періодичної заміни картриджів (переважно через 3 – 6 місяців). Саме зростаючий потік відпрацьованих картриджів, котрі сьогодні викидаються в потік твердих побутових відходів разом із

вмістом та затриманими забрудненнями і заховуються на полігонах та звалищах, формуватиме в майбутньому нову екологічну та ресурсну проблему. Доки кількість систем зворотного осмосу в приватних користувачів невелика, проблему просто замовчують. Однак, катастрофічне погіршення якості природних вод стимулюватиме лавиноподібне збільшення систем зворотного осмосу із відповідними негативними наслідками. Виникнуть також проблеми при роздільному зборі твердих побутових відходів. Сьогодні ці проблеми потребують ґрунтовних досліджень та наукового обґрунтування можливих шляхів вирішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зворотний осмос (ЗО) забезпечує 1 % світового виробництва питної води [2]. Технологія ЗО має ряд переваг перед звичайною дистиляцією чи осмосом (рис. 1). Для обробки ЗО можна подавати воду з вищою мінералізацією, ніж для дистиляції. Хоча і тут є ряд жорстких умов. Крім того, енергоспоживання ЗО є порівняно низьким, що часто робить опріснювальні установки на базі ЗО -технологій більш прибутковими, ніж дистиляційні за однакових виробничих потужностей. З іншого боку, ЗО вимагає серйозних етапів попередньої обробки вхідної води для забезпечення її високої прозорості та попередження швидкого закупорювання мембран. Це робить попередню обробку води перед опрісненням ЗО життєво важливою передумовою. Традиційно така обробка виконується на етапах механічного, сорбційного, іонообмінного очищення і визначається виробником систем зворотного осмосу.

Вода, котра подається на вхід системи обробки, зазвичай, проходить три етапи попередньої очистки, що виконують видалення механічних домішок (мул, глина, частинки іржі та піску), а також залишкові сполуки активного хлору та органічних речовин. На четвертому етапі працює зворотноосмотична мембрана, яка очищає воду на молекулярному рівні, у тому числі від вірусів і бактерій, таких як сальмонела, шигела, холерний вібріон, синьогнійна паличка. Вугільний постфільтр використовується на заключному, п'ятому етапі. Він включає фільтрування води через високоякісне активоване вугілля зі шкаралупи кокосових горіхів та коригує смак і запах обробленої води. Через низьку вартість картриджів для систем ЗО було проведено небагато досліджень, пов'язаних із їх станом в процесі експлуатації [3 - 5]. Забруднення картриджів призводить до забруднення мембрани та скорочення терміну її експлуатації і може значно знизити продуктивність системи та якість перміату. З іншого боку, забруднення картриджів призводить до необхідності підвищення робочого тиску та високих експлуатаційних затрат у зв'язку із збільшення витрати енергії [6].

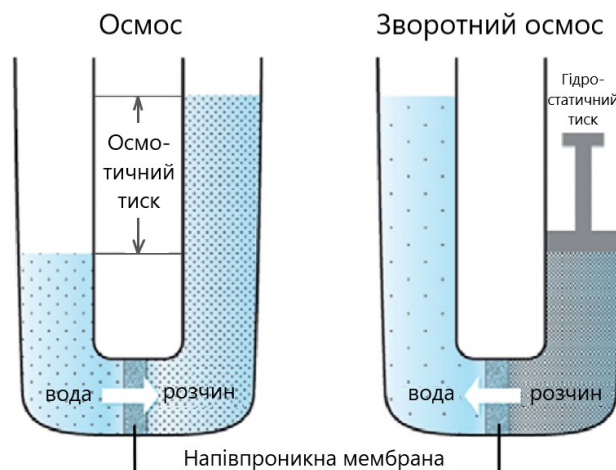


Рис. 1. Принципова схема осмосу та зворотного осмосу

Сьогодні виробниками картриджів до установок ЗО розроблені альтернативи попередньої обробки в різних конфігураціях, включаючи стадії коагуляції, флокуляції та дозрівання або просто стадія коагуляції з наступним двома фільтрами під тиском [7]. В той же час, в цьому випадку виникає ряд додаткових проблем, тому широкого розповсюдження в установках середньої та малої продуктивності ці процеси ще не набули. Неоднорідний склад водопровідної води у різних регіонах України, відсутність єдиного стандарту у поєднанні трьох передмембранних видів картриджів та різні умови їх експлуатації значно ускладнюють проведення вичерпного аналізу в цій області. Проте, той факт, що крім хімічних та механічних забруднювачів на використаних картриджах були виявлені біологічні, досить небезпечні для людини відкладення. Так, дослідження [8] показує, що на використаних фільтрах ЗО було виділено загалом 83 типи штамів біологічних забруднювачів, що належать до 34 родів бактерій. Серед них 27 були ідентифіковані як умовно-патогенні мікроорганізми для людини, які часто пов'язані з багатьма серйозними захворюваннями. Це вказує на те, що ці штами можуть зробити багато сучасних антибіотиків марними при лікуванні інфекцій людей і тварин.

Формулювання цілей статті. Значні витрати різноманітних матеріалів, котрі мало змінюють свої властивості в процесі експлуатації, суттєве поповнення об'ємів твердих побутових відходів, накопичення в картриджах шкідливих забруднень різноманітного характеру змушують шукати шляхи вирішення проблем негативного впливу систем ЗО на довкілля та умови існування людини. Тому метою нашого дослідження

був аналіз складу картриджів другого та третього етапу обробки води в системах ЗО та пошук шляхів зменшення навантаження на навколишнє середовище.

Викладення основного матеріалу. Картриджі призначені для видалення з водного потоку речовин, що можуть зашкодити людині та мембрані. Типова система обробки води на основі ЗО малої продуктивності має, зазвичай, наступні технічні характеристики: середня продуктивність системи складає близько 6 - 12 дм³/год, робочий тиск 3 - 6 атм, матеріал мембрани - нітрат целюлози, ацетат целюлози, поліамідна плівка і т.п., діапазон температур 5 - 45 °С. Суттєвою перевагою систем зворотного осмосу є їх компактність в порівнянні з дистильційними та електродіалізними системами. Вони прості та зручні в експлуатації, забезпечують очищення води від іонів металів та інших хімічних речовин, здійснюють механічне очищення від домішок, вірусів та бактерій. Такі установки є одними з найкращих систем для очищення води у побуті. В загальному вони видаляють більше 98 % шкідливих домішок.

Класичні процеси попередньої обробки води перед подачею її на мембрану системи ЗО можуть включати фільтрування, сорбцію, іонний обмін та інші процеси, що реалізуються в межах трьох основних етапів обробки. Для кожного з цих етапів розроблена конструкція картриджів та їх комбінація в системі. Так, компанія Aquafilter [9] реалізує попередню очистку води комплектом із трьох картриджів у такій конфігурації:

- 1-й картридж із спіненого поліпропілену. Видаляє пісок, мул, окалину і інші механічні домішки з розміром часток більше 5 мкм.
- 2-й картридж Aquafilter FCCST2, заповнений іонообмінною смолою. Знижує вміст у воді солей жорсткості, а також видаляє сполуки заліза.
- 3-тій картридж Aquafilter FCCBKDF, з гранульованого активованого вугілля з шкаралупи кокосових горіхів. Видаляє з води хлороорганічні сполуки і механічні домішки.

Зовнішній вигляд зазначених картриджів представлено на рис. 2. Як видно, 1-й картридж сформований із спіненого поліпропілену і в такому вигляді використовується в системах ЗО. 2-й картридж представляє собою закритий корпус, заповнений іонообмінною смолою. Зважаючи на незначні розміри зерен смоли, для попередження вимивання їх із картриджа, застосовується спеціальна система із пластикових сіток та спеціальних тканин із отворами різного розміру. Картридж представляє собою нерозбірну конструкцію, тому замінити фільтруючий матеріал без пошкодження колби неможливо. Аналогічний за конструкцією і 3-й картридж, з тією лише різницею, що заповнений гранульованим активованим вугіллям.



Рис. 2. Комплект картриджів Aquafilter для попередньої обробки води в системі ЗО

Сьогодні в галузі розробки та виробництва систем ЗО малої та середньої продуктивності працює величезна кількість різноманітних компаній. Найбільш популярні серед них представлені в табл. 1. І кожна з цих компаній намагається надати своїй продукції особливих характеристик, відмінних від конкурентів. Тому навіть одна компанія може виготовляти системи ЗО з різною структурою передмембранної підготовки води. В більшості випадків ця структура визначається складом води, що подається на вхід системи. Так, наприклад, норвежська компанія Saint-Gobain Byggervarer AS продукує лінійку картриджів різних типів для використання в установках зворотного осмосу - Filtralite NC та Filtralite HC. При цьому заповнення картриджів може бути як подрібненими глинистими матеріалами різної дисперсності, так і активованим вугіллям [10].

Найпопулярніші виробники систем зворотного осмосу та комплектуючих до них	
Назва виробника, країна	Опис
Aquafilter, Польща	Найпопулярніший бренд в Європі, термін експлуатації картриджів 6 місяців завдяки високоякісній технології виготовлення
Platinume Waster, Німеччина	Компактні фільтри з насосами, проста комплектація, швидкозмінні картриджі
BWT, Англія	Високий рівень зборки, відсутність браку
Ecosoft, Україна	Представлені три конфігурації картриджів у різних цінових категоріях
Espring, США	Висока якість картриджів, проте вузька спрямованість (видалення хлору і запаху), не видаляє залізо, марганець та інші речовини, тому досить вузька сфера застосування
Aqualine, Тайвань	Класичні фільтри, відмінне поєднання ціни та якості

З іншого боку, позитивним моментом в даній галузі є стандартизація форми та розмірів картриджів, що робить їх універсальними та такими, що підходять до будь-якої побутової системи ЗО. Картридж виготовляється у вигляді щільно запаяного корпусу, заповненого відповідною засипкою. Індивідуальний склад засипки для кожного типу картриджа та для кожного виробника перешкоджає ефективній їх регенерації. В Україні найбільш поширеною схемою передмембранної обробки води є конфігурація із поліпропіленового картриджу, вугільного картриджу та карбон-блоку. Серед лідерів виробництва таких картриджів в Україні є компанія Ecosoft.

Проблему першого механічного картриджа із спіненого поліпропілену чи поліпропіленової нитки нами було запропоновано вирішувати шляхом регенерації на спеціальній установці [11]. Вона передбачає використання розчину сульфатної кислоти з підтриманням рН на рівні 1,5, оскільки основним компонентом осаду на фільтрі є сполуки заліза. При такому водневому показнику весь осад із забруднених пор картриджа впродовж півгодини переходить в розчин кислоти. При цьому доцільно кислоту додавати по мірі росту рН. Відпрацьований розчин заліза найдоцільніше обробляти вапном із подальшим фільтруванням. Відфільтрований маточний розчин із вмістом сульфату кальцію на рівні розчинності ($2,0 \text{ г/дм}^3$) використовується для приготування наступної дози регенераційного розчину шляхом дозування відповідної кількості сірчаної кислоти. Відфільтрована тверда фаза із суміші гідроксиду заліза та гіпсу при накопиченні достатньої кількості може бути використана в технологіях отримання будівельних матеріалів та конструкцій.

Очевидно, що і для картриджів другого та третього етапів необхідно рішення шукати в цьому ж напрямку. Ми вважаємо найбільш прийнятними два шляхи – регенерація та утилізація.

Як показує аналіз, для більшості виробників систем ЗО в Україні другий етап реалізується на основі вугільних картриджів, котрі представляють собою корпус із засипкою із кокосового чи бітумінізованого активованого вугілля або у вигляді вугільного блоку. Термін експлуатації картриджів коливається для різних виробників в межах 3 – 6 місяців. Далі картридж потрапляє в потік твердих побутових відходів. Щодо можливості регенерації таких картриджів варто зауважити наступне. Робоча площа поверхні вугільних гранул, які містяться у картриджах, за 6 місяців експлуатації зменшується приблизно на 60 % від площі первинних і покривається біоплівкою та неорганічними відкладеннями [12-14]. Фільтри зменшують в обробленій воді концентрацію розчинної органіки, головним чином білків, і працюють як ефективна система нітрифікації, також майже повністю видаляючи марганець. Протягом усього терміну експлуатації фільтри стабільно видаляють такі речовини як гідрохлортиазид, метопролол, соталол і триметоприм, принаймні на 70 %. Нарешті, за допомогою аналізу мікробної спільноти було виявлено, що нітрифікуючі та марганцевоокислювальні бактерії розташовуються у значній кількості на поверхні гранул. Макрозйомка поверхні забруднених фільтрів (рис. 3) [15] показує також, що кожен фільтр має своє унікальне сформоване забруднення, яке залежить від режиму експлуатації, складу водопровідної води, пливу сезонних чинників (цвітіння води влітку), стану трубопроводної системи, по якій подається вода в ту чи іншу квартиру, а також від регіону збору досліджуваних матеріалів. Тому цілком очевидно, що єдиної технології регенерації таких картриджів сьогодні не відпрацьовано. Більше того, інтенсивних пошуків таких технологій також не спостерігається. І пов'язана така ситуація, в більшості випадків, із низькою вартістю вуглецевих матеріалів. Тому частковим вирішенням проблеми, на нашу думку, може бути використання розбірних корпусів картриджів, що дозволить сервісним компаніям легко замінювати засипку після вичерпання ресурсу картриджа. Використане завантаження найбільш раціонально піддавати термічній обробці з отриманням додаткової енергії.

Третій картридж має дуже багато варіантів виконання і може містити як глинисті матеріали, так і кремнієві, кварцеві, вугільні, поліпропіленові та ін. речовини. Інколи вони можуть поєднувати кілька відділень з різними матеріалами – іонообмінна смола, активоване вугілля, поліпропіленовий блок. Виходячи із такої великої кількості різноманітних варіантів компонування та заповнення, картриджі третього етапу регенерувати досить важко. Формально деякі типи картриджів можливо регенерувати. Наприклад, не існує проблем в регенерації іонообмінних смол. Однак, в реальних умовах, для регенерації необхідно зібрати економічно доцільну кількість картриджів чи суміші з них одного виробника, оскільки кожен виробник не лише використовує суміші різних катіонітів, а й додає до них матеріали своєї індивідуальної розробки,

кількість котрих може доходити до трьох і більше компонентів. Регенерувати такі суміші навіть з технічної точки зору неможливо. Щодо утилізації картриджів третього етапу обробки води перед мембранами ЗО, то варто зауважити, що навіть тут необхідно підбирати відповідні технології. Наприклад, найбільш універсальний термічний метод не зовсім придатний для утилізації картриджів, заповнених глинистими або іншими негорючими матеріалами. Тому найбільш прийнятним на сьогодні нам видається заміна використаних картриджів на нові та повернення використаних для знешкодження в умовах їх промислового виробництва.

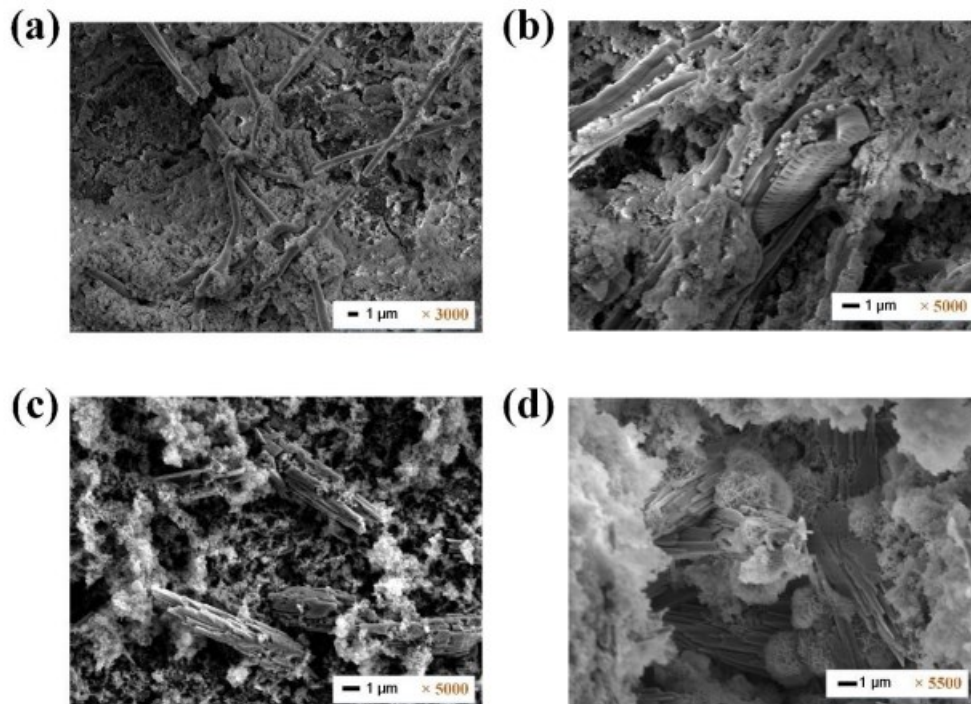


Рис. 2. Зображення структури забруднених фільтрів зворотного осмосу (a, b, c, d - забруднені фільтри)

Висновки. Проведені дослідження показали, що на сьогодні відсутні технології та обладнання для регенерації чи утилізації картриджів другого та третього етапу обробки води в системах ЗО малої та середньої продуктивності. Встановлено, що для картриджів другого етапу, в силу використання, переважно, вуглецевих матеріалів, найбільш вірогідною видається утилізація термічним методом. Зважаючи на невелику вартість заповнення картриджів другого етапу обробки, регенерація їх економічно недоцільна і наукові дослідження в цьому напрямку практично не проводяться. Щодо картриджів третього етапу обробки води, то на сьогодні великий перелік матеріалів, що використовуються в якості заповнення таких картриджів, не дозволяє підібрати єдину технологію для регенерації в промислових масштабах. Більше того, навіть найбільш універсальний термічний метод не завжди може бути застосований для утилізації картриджів цього етапу. Тому найбільш вірогідним на сьогодні видається організація заміни використаних картриджів на нові та повернення використаних на підприємства – виробники для знешкодження в умовах їх промислового виробництва.

Список літератури:

1. Environmental Protection Agency (EPA). Strategic Plan for Homeland Security // Washington, D.C. EPA. – 2002. – 213p.
2. Sauv  S. A review of what is an emerging contaminant / Sauv  S, Desrosiers M. // Chemistry Central Journal. – 2014. – №8(1):15, p. 18-24.
3. Jamison D. Disease Control Priorities in Developing Countries: 2nd edition / Jamison D, Breman J, Measham A, et al. / Washington (DC): The International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank: New York, Oxford University Press, – 2006. – 135p.
4. Kinamura K. Irreversible membrane fouling during ultrafiltration of surface water / Kinamura K., Hane Y., Watanabe Y., Amy G., Ohkuma, N. // Water Research, – 2018. – № 38. – p. 3431–3441.
5. Monnot M. Granular activated carbon filtration plus ultrafiltration as a pretreatment to seawater desalination lines // Impact on water quality and UF fouling. Desalination, – 2016. – № 383, p. 1–11.
6. Кравченко М.В. Застосування методу зворотного осмосу для доочистки питної води / М.В. Кравченко, О.С. Волошкіна, Л.О. Василенко // Екологічна безпека та природокористування: збірник наукових праць / Київський національний університет будівництва і архітектури; відп. ред. О.С. Волошкіна, О.М. Трофимчук. – Київ: КНУБА, 2021. – №4 (40). – С. 32–45.
7. Labry C. Competition for phosphorus between two dinoflagellates: a toxic *Alexandrium minutum* and a non-toxic *Heterocapsa triquetra* / Labry C., Erard-Le Denn E., Chapelle A., Fauchot J., Youenou A., Crassous M., Le grand, J. // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology – 2014. – №358 p. 124–135.

8. Resosudarmo A. Analysis of UF membrane fouling mechanisms caused by organic interactions in seawater / Resosudarmo A., Ye Y., Le-Clech P., Chen V. // *Water Research* – 2008. – №47 – p. 911–921.
9. Комплект картриджів для зворотного осмосу [Електронний ресурс] Режим доступу: https://edobro.com.ua/kartridzhi-i-zasyпки/godovoy-komplekt-kartridzhey-aquafilter-fp3-hj-k1-membrana-tlchf-2?gclid=Cj0KCQjw5f2lBhCkARIsAHeTvlx660o9STex2qry9wZSqVlpN5AZmzhUUcX-QOREU-DHYTBjgqwDAwaAtbFEALw_wcB – (Дата звернення 13.07.2023 р.). – Назва з екрана.
10. Corral, A. Comparison of slow sand filtration and microfiltration as pre-treatments for inland desalination via reverse osmosis / Corral, A. F., Yenal, U., Strickle, R., Yan, D., Holler, E., Hill, C., Ela, W. P. & Arnold, R. G. // *Desalination* – 2014. – №334 – p. 1–9.
11. Карпенко М.В. Видалення сполук заліза із механічних фільтрів побутових зворотноосмотичних систем очищення води. / Карпенко М.В., Радовенчик Я.В., Іваненко О.І. // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, – 2023. – № 2., с. 67-76.
11. Resosudarmo, A., Ye, Y., Le-Clech, P. & Chen, V. Analysis of UF membrane fouling mechanisms caused by organic interactions in seawater / Resosudarmo, A., Ye, Y., Le-Clech, P. & Chen, V. // *Water Research*, – 2017. – №47– p. 911–921.
12. Куликов Н.І. Теоретичні основи очищення води / Н. І. Куликов, Л. Я. Найманов, Н. П. Омельченко, В. Н. Чернишов. – Донецьк: НОУЛІДЖ, – 2009. – 298 с.
13. Первов А.Г. Удосконалення мембранних систем водопідготовки-виключення реагентів та стоків / О.Г. Першов, А.П. Андріанов, Є.Б. Юрчевський // *Водоочищення, водопідготовка, водопостачання*. - 2012 - N5. - С.44-51.
14. Гулієнко С.В. Дослідження процесу зворотного осмосу. Методичні вказівки для проведення науково-дослідної роботи студентів з кредитного модуля «Моделювання процесів мембранного розділення» [Електронний ресурс]: / НТУУ „КПІ”; уклад. Гулієнко С.В. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 14 с.
15. P. Schumanna, J. A. Ordycze Andradec, M. Jekelb, A. S. Ruhla. Packing granular activated carbon into a submerged gravitydriven flat sheet membrane module for decentralized water treatment / P. Schumanna, J. A. Ordycze Andradec, M. Jekelb, A. S. // *Journal of Water Process Engineering* – 2020. – № 38 – p. 56-71.

References

1. Environmental Protection Agency (EPA). Strategic Plan for Homeland Security // Washington, D.C. EPA. – 2002. – 213 p.
2. Sauve S. A review of what is an emerging contaminant / Sauve S, Desrosiers M. // *Chemistry Central Journal*. – 2014. – №8(1):15, p. 18-24.
3. Jamison D. Disease Control Priorities in Developing Countries: 2nd edition / Jamison D, Breman J, Measham A, et al. / Washington (DC): The International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank: New York, Oxford University Press, – 2006. – 135 p.
4. Kinamura K. Irreversible membrane fouling during ultrafiltration of surface water / Kinamura K., Hane Y., Watanabe Y., Amy G., Ohkuma, N. // *Water Research*, – 2018. – № 38. – p. 3431–3441.
5. Monnot M. Granular activated carbon filtration plus ultrafiltration as a pretreatment to seawater desalination lines // *Impact on water quality and UF fouling*. Desalination, – 2016. – № 383, p. 1–11.
6. Kravchenko M.V. Zastosuvannya metodu zворотного осмосу dlya doochistki pitnoyi vodi / M.V. Kravchenko, O.S. Voloshkina, L.O. Vasilenko // *Ekologichna bezpeka ta prirodokoristuvannya: zbirnik naukovih prac / Kiyivskij nacionalnij universitet budivnictva i arhitekturi; vidp. red. O.S. Voloshkina, O.M. Trofimchuk*. – Kiyiv: KNUBA, 2021. – №4 (40). – p. 32–45.
7. Labry C. Competition for phosphorus between two dinoflagellates: a toxic Alexandrium minutum and a non-toxic Heterocapsa triquetra / Labry C., Erard-Le Denn E., Chapelle A., Fauchot J., Youenou A., Crassous M., Le grand, J. // *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* – 2014. – №358 – p. 124–135.
8. Resosudarmo A. Analysis of UF membrane fouling mechanisms caused by organic interactions in seawater / Resosudarmo A., Ye Y., Le-Clech P., Chen V. // *Water Research* – 2008. – №47 – p. 911–921.
9. Комплект картриджів для зворотного осмосу [Електронний ресурс] Режим доступу: https://edobro.com.ua/kartridzhi-i-zasyпки/godovoy-komplekt-kartridzhey-aquafilter-fp3-hj-k1-membrana-tlchf-2?gclid=Cj0KCQjw5f2lBhCkARIsAHeTvlx660o9STex2qry9wZSqVlpN5AZmzhUUcX-QOREU-DHYTBjgqwDAwaAtbFEALw_wcB – (Дата звернення 13.07.2023 р.). – Назва з екрана.
10. Corral, A. Comparison of slow sand filtration and microfiltration as pre-treatments for inland desalination via reverse osmosis / Corral, A. F., Yenal, U., Strickle, R., Yan, D., Holler, E., Hill, C., Ela, W. P. & Arnold, R. G. // *Desalination* – 2014. – №334 – p. 1–9.
11. Karpenko M.V. Vidalennya spoluk zaliza iz mehanichnih filtriv pobutovih zворотногоосмотичних систем ochishennya vodi. / Karpenko M.V., Radovenchik Ya.V., Ivanenko O.I. // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, – 2023. – № 2., p. 67-76.
11. Resosudarmo, A., Ye, Y., Le-Clech, P. & Chen, V. Analysis of UF membrane fouling mechanisms caused by organic interactions in seawater / Resosudarmo, A., Ye, Y., Le-Clech, P. & Chen, V. // *Water Research*, – 2017. – №47– p. 911–921.
12. Kulikov N.I. Teoretichni osnovi ochishennya vodi / N. I. Kulikov, L. Ya. Najmanov, N. P. Omelchenko, V. N. Chernishov. – Doneck: NOULIDZh, – 2009. – 298 p.
13. Pervov A.G. Udokonalennya membrannih sistem vodopidgotovki-viklyuchennya reagentiv ta stokiv / O.G. Pershov, A.P. Andrianov, Ye.B. Yurchevskij // *Vodochishennya, vodopidgotovka, vodopostachannya*. - 2012 - N5. - p.44-51.
14. Guliyenko S.V. Doslidzhennya procesu zворотного осмосу. Metodichni vказivki dlya provedennya naukovo-doslidnoyi roboti studentiv z kreditnogogo modulya «Modelyuvannya procesiv membrannogo rozdilennya» [Електронний ресурс]: / НТУУ „КПІ”; уклад. Guliyenko S.V. – Kiyiv: KPI im. Igorya Sikorskogo, 2017. – 14 p.
15. P. Schumanna, J. A. Ordusez Andradec, M. Jekelb, A. S. Ruhla. Packing granular activated carbon into a submerged gravitydriven flat sheet membrane module for decentralized water treatment / P. Schumanna, J. A. Ordusez Andradec, M. Jekelb, A. S. // *Journal of Water Process Engineering* – 2020. – № 38 – p. 56-71.