

**С.В. Зозуля**

Київський державний технічний університет будівництва і архітектури

Промислове та цивільне будівництво

Денне відділення будівельного факультету, інженер –будівельник

ORCID: 0000-0003-3812-3818

**ЩОДО ПИТАННЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ В УМОВАХ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛУ  
ВИКОРИСТАННЯ**

У статті розкрито принципи очищення води в умовах замкнутого циклу використання. Досліджено необхідність впровадження замкнутого циклу води. Підкреслено, що склад і концентрація вихідних стічних вод, що циркулюють в умовах замкнутого циклу можуть мати значні відмінності в залежності від походження води, що суттєво впливає на вибір застосовуваної технологічної лінії. Визначено основні методи очищення води, до яких віднесено: фізичні, хімічні та біологічні процеси на основі один одного. Описано кожен метод окремо з виділенням переваг та недоліків. Розкрито концепцію підходу до очищення води за допомогою механічного очищення та запропоновано структуру першого етапу очищення (механічне очищення) води в умовах замкнутого циклу використання. Описано підхід до біологічного очищення із відокремлення основних процесів. Схематично зображено реалізацію біологічного процесу очищення води в умовах замкнутого циклу використання. Наголошено, що біологічне очищення води у порівнянні з іншими методами очистки не трансформує забруднення в інші форми, що забезпечує практично безвідходність виробництва. До переваг біологічного методу віднесено: відсутність у технологічному процесі шкідливих хімічних речовин; низьке енергоспоживання; можливість автономної роботи; можливість використання отриманих надлишок активного мулу у якості добрива; відсутність у стоках домішок та суспензій. Описано процеси амоніфікації, нітрифікації та денітрифікації, які складають основу біологічного процесу очищення води. Здійснено опис хімічної очистки та наголошено, що метою її запровадження є видалення фосфору, а також видалення сульфідів, зважених та органічних речовин. Запропоновано схему перетворення фосфору та форми перетворення у процесі очищення води в умовах замкнутого циклу використання. Обґрунтовано необхідність впровадження замкнутого циклу використання води за рахунок вирішення таких проблем, як дефіцит свіжої води, необхідної для забезпечення потреб споживачів, а також зменшення або повне скорочення обсягів скидається води у міський колектор. Підкреслено, що впровадження описаної технології дозволяє реалізувати безвідходність виробництва, що виключає втрати сировини і приносить додаткові вигоди щодо отримання вторинного продукту.

**Ключові слова** :очищення, вода, замкнутий цикл, використання, стічна вода, забруднення, метод, мікроелемент.

**S.V. Zozulia****ON THE ISSUE OF WATER PURIFICATION IN A CLOSED CYCLE OF USE**

The article reveals the principles of water purification in a closed cycle of use. The necessity of introduction of a closed water cycle is investigated. It is emphasized that the composition and concentration of wastewater circulating in a closed cycle can have significant differences depending on the origin of the water, which significantly affects the choice of the technological line used. The main methods of water purification are identified, which include: physical, chemical and biological processes based on each other. Each method is described separately, highlighting the advantages and disadvantages. The concept of the approach to water purification by means of mechanical purification is revealed and the structure of the first stage of water purification (mechanical purification) in the conditions of the closed cycle of use is offered. The approach to biological treatment with separation of the main processes is described. The implementation of the biological process of water purification in the conditions of a closed cycle of use is schematically represented. It is emphasized that biological water purification in comparison with other methods of purification does not transform pollution into other forms, which provides almost zero production waste. The advantages of the biological method include: the absence of harmful chemicals in the technological process; low energy consumption; possibility of autonomous work; the possibility of using the resulting excess activated sludge as fertilizer; absence of impurities and suspensions in effluents. The processes of ammonification, nitrification and denitrification, which form the basis of the biological process of water purification, are described. The description of chemical purification is made and it is emphasized that the purpose of its introduction is the removal of phosphorus, as well as the removal of sulfides, suspended and organic substances. The scheme of phosphorus conversion and transformation forms in the process of water purification in the conditions of a closed cycle of use is offered. The necessity of introducing a closed cycle of water use by solving such problems as the shortage of fresh water needed to meet the needs of consumers, as well as the reduction or complete reduction of water discharged into the city collector is substantiated. It is emphasized that the introduction of the described technology allows to realize the waste of production, which eliminates the loss of raw materials and brings additional benefits for the production of secondary products.

**Key words**: purification, water, closed loop, use, wastewater, pollution, method, trace element.

**Вступ та постановка завдання.** Концепція повторного використання води в умовах споживання є не новою. В її основі лежить гострий дефіцит водних ресурсів по всій планеті. Процедура очищення стічних вод сприяє значному скороченню забруднення водних об'єктів, проте процес очищення є енерговитратним та веде до збільшення енергоспоживання. Однак

інноваційні розробки у даній сфері дозволяють поєднати кілька підходів та методів для досягнення максимально ефективного кінцевого результату.

Формування єдиної ефективної системи на базі різних методів повинно бути як екологічно, економічно та і енергетично вигідно. Будівництво систем очищення води в умовах замкнутого циклу використання передбачає: впровадження ефективних насамперед фізико-хімічних методів очищення стічних вод; встановлення науково-обґрунтованих гранично допустимих концентрацій солей, фосфатів, мікроелементів та інших компонентів в оборотній воді з урахуванням її сфери повторного застосування та вимог що пред'являються до неї; створення максимально можливої кількості локальних замкнутих циклів з багаторазовим використанням води у них; фільтрацію стічних вод; переробку виділених компонентів та направлення їх на подальше використання, наприклад у якості добрива. Замкнуті системи водокористування це обов'язкова наявність хіміко-технологічного комплексу робота якого направлена на виробництво якісного кінцевого продукту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Формування наукової думки стосовно очищення води в умовах замкнутого циклу використання ґрунтується на роботах як зарубіжних так і вітчизняних вчених.

Л.В. Халанчук та А.О. Коротун [1] описали принципи оптимального вбору методів очищення стічних поверхневих вод. Г. В. Сакалова та Т. М. Василінич [2] провели дослідження ефективності очищення стічних вод від іонів важких металів з використанням природних адсорбентів.

Низка авторів А.В. Іванченко, В. І. Карлаш, Д.О. Слатонцев та А.С. Данельська [3] розкрили принципи застосування кислотно-активованого цеоліту в технології очищення стічних вод від нітратів. Стосовно циркуляційної економіки варто наголосити на роботі О.Я. Твердої, М.В. Репіна, К.К. Ткачука та К.Ю. Горбачової [4], які підійшли до вирішення питання впровадження моделі циркулярної або кругової економіки у гірничовидобувній галузі.

Також цінною є робота О. О. Безцінного [5], автор здійснив огляд механізмів відтворення відпрацьованих стічних вод, забруднених іонами важких металів.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Bahaa Zainab [6], Verma Subhash & Kanwar Varinder & John Siby [7, 8], Ajala Oluwaseun & Tijani Jimoh & Mercy Temitope Bankole & Abdulkareem A. [9], Reham abu shmeis [10], Kuzin Evgenii & Kruchinina Natalia & Nosova T. [11], Farahat Laila & Mahmoud Eman [12], Biniiaz Parisa & Shirazi Nazanin & Roostaei Tayebe & Rahimpour Mohammad [13], Halysh Vita & Trus Inna & Viacheslav Radovenchyk & Gomelya Mykola [14], Afreen Gul & Upadhyayula Sreedevi [15] Sengupta Sonali & Pal Chandan [16], Magalhães Luciano & Silva Gilberto & Peres A.E.C. [17], Bwapwa J.K. & Bakare B.F. [18], Gopinath Ashitha & Swaminathan Jiji & Singh Seema & P.V. Nidheesh & Kumar M Suresh [19] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання розкриття принципів очищення води в умовах замкнутого циклу використання залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Розкрити принципи очищення води в умовах замкнутого циклу використання.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Використання води в умовах замкнутого циклу направлено на повторне використання води, яка вже була у застосуванні з метою економії ресурсів. Звісно вода, яка була у використанні потребує очищення від забруднень, якість та рівень очищення залежить від сфери використання та вимагає застосування спеціалізованого обладнання.

Склад і концентрація вихідних стічних вод, що циркулюють в умовах замкнутого циклу можуть мати значні відмінності в залежності від походження води, що суттєво впливає на вибір застосовуваної технологічної лінії. При очищенні стічних вод використовуються фізичні, хімічні та біологічні процеси на основі один одного.

Фундаментальним методом очищення води повторного використання є механічний метод очистки. Інженерні конструкції направлені на реалізацію даного методу побудовані з урахуванням динаміки рідини, на яку впливають фізичні сили (інерція, гравітація, сили тертя та зчеплення).

В основі механічного очищення лежить принцип видалення забруднень великого розміру, захист обладнання, що входить у комплекс наступного рівня очищення та забезпечення можливості використання стічної води для наступних технологічних кроків (наприклад, видалення крупнозернистих частинок і жирів).

Структура першого етапу очищення води в умовах замкнутого циклу використання показана на рисунку 1, який відповідає послідовності загального процесу механічного очищення стічної води.

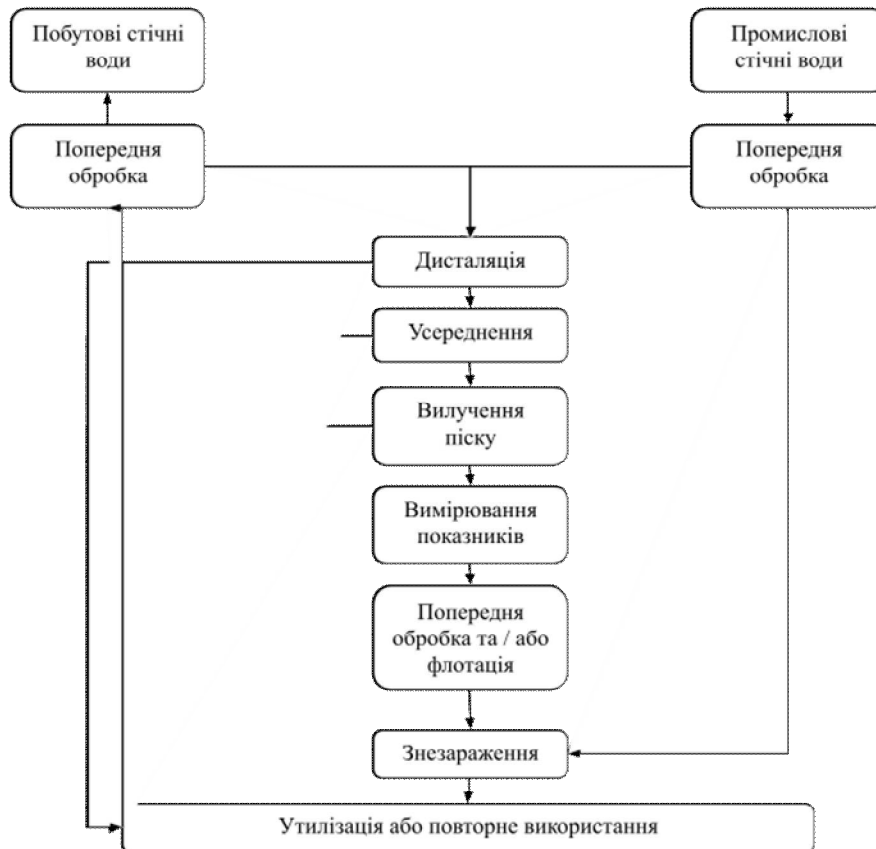


Рис. 1. Структура першого етапу очищення води в умовах замкнутого циклу використання

Біологічний процес очищення ґрунтується на використанні певної групи бактерій, які у своїй життєдіяльності поїдають дрібні залишки зважених та розчинених у воді органічних з'єднань, чим здійснюють очищення води. Схема реалізації біологічного процесу очищення води в умовах замкнутого циклу використання наведена на рисунку 2.

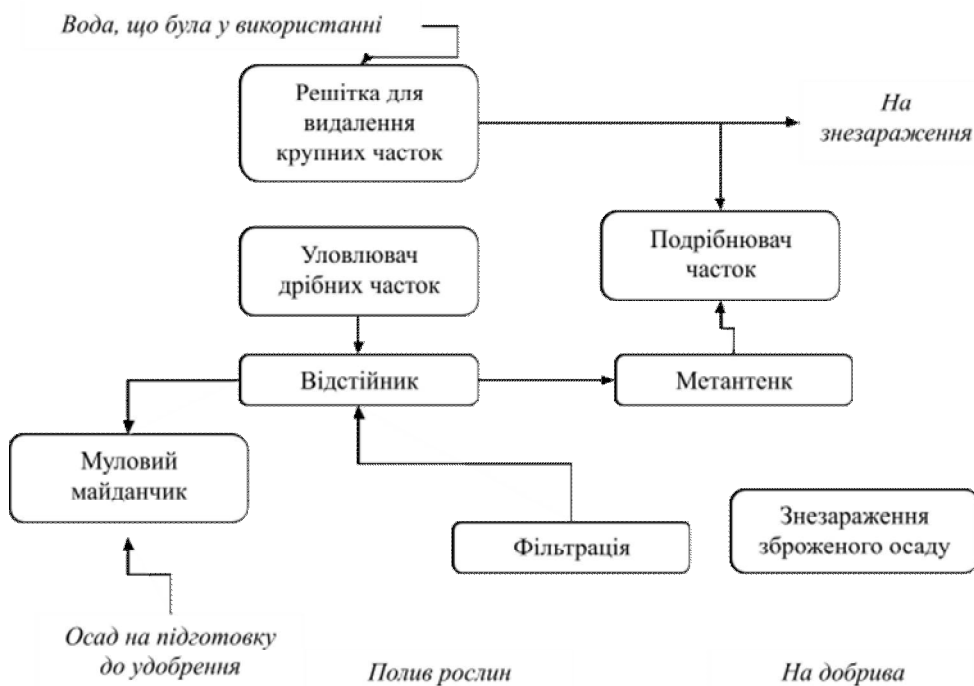


Рис. 2. Схема реалізації біологічного процесу очищення води в умовах замкнутого циклу використання

Застосування механізмів біологічної очистки води володіє значними перевагами у порівнянні з іншими методами. Бактерії є мікроорганізмами, які здійснюють повне розкладання побутових стоків до нейтральних продуктів (газ та вода), забезпечуючи при цьому кругообіг речовин у природі. Таким чином, біологічне очищення води у порівнянні з іншими методами очистки не трансформує забруднення в інші форми, що забезпечує практично безвідходність виробництва. У той же час біологічні методи менш затратні, оскільки крім капітальних вкладень вони майже не вимагають експлуатаційних витрат. А головний активний компонент за умови створення сприятливих умов регенерується.

Процес біологічного очищення, заснований на здатності мікроорганізмів, знищувати органічні речовини, які знаходяться у стічних водах. Процес розмноження бактерій та їх життєдіяльність мають прямий вплив на інтенсивність та ефективність біологічного очищення.

До переваг використання біологічних методів очищення стічних вод в умовах замкнутого циклу використання варто віднести: відсутність у технологічному процесі шкідливих хімічних речовин; низьке енергоспоживання; можливість автономної роботи; можливість використання отриманих надлишок активного мулу у якості добрива; відсутність у стоках домішок та суспензій.

Методи біологічного процесу очищення води в умовах замкнутого циклу використання, за принципом дії, поділяються на аеробні та анаеробні. При аеробних методах мікроорганізми використовують розчинений у стічних водах кисень, а при анаеробному варіанті доступу до кисню мікроорганізми не мають. Під час очищення ключовим є видалення трьох основних компонентів: органічних речовин, азоту і фосфору.

Біологічне видалення фосфору називається елімінацією біофосфору, при якому бактерії захоплюють фосфор у своїх клітинах. Крім біологічного видалення фосфору, очисні споруди часто використовують хімічне видалення фосфору за допомогою неорганічного коагулянту. У замкнутому циклі обробки мулу в аеробних та анаеробних умовах є можливість заставити певні групи мікроорганізмів поглинати значно більшу кількість фосфору і, таким чином, видаляти його разом із надлишком мулу. В аеробній фазі правильно розвинені бактерії, здатні видаляти надлишок фосфору та зберігати високі концентрації фосфору у своєму міжклітинному запасі у вигляді поліфосфату. Однак в анаеробному середовищі поліфосфат, що зберігається, деполімеризується і виділяється в розчин, тоді як клітина здатна поглинати прості органічні поживні речовини, використовуючи енергію, отриману в результаті деполімеризації.

Азот видаляється шляхом розкладання азотовмісних органічних сполук, через що утворюються неорганічні сполуки азоту і в кінцевому підсумку газоподібний азот (N<sub>2</sub>). Процес складається з трьох послідовних біореакцій:

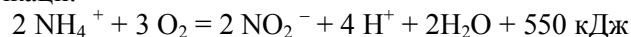
- амоніфікації,
- нітрифікації;
- денітрифікації.

Вміст азоту, що надходить до поверхневих реципієнтів, значною мірою завдає шкоди водним екосистемам, тому ефективне видалення азоту зі стічних вод є важливою вимогою сучасних технологій очищення стічних вод.

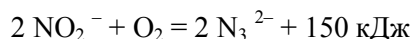
Амоніфікація відбувається при розщепленні органічних азотовмісних сполук; у стічних водах процес зазвичай характеризується бактеріальними ферментами.

Нітрифікація – це окислення аміаку до нітрату в двостадійному процесі, що здійснюється нітрифікуючими бактеріями. На першому етапі нітрифікуючі бактерії перетворюють амоній у нітрит, а потім на другому – нітрит у нітрат.

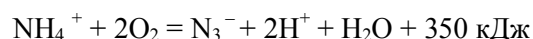
Перший етап нітрифікації:



Другий етап нітрифікації:



Загальна реакція:



Нітрифікація є безперервним процесом за умови підтримки відповідних екологічних умов.

Зазначені умови полягають у:

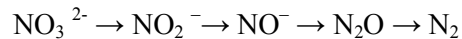
- забезпеченні стабільного часу процесу: максимальна питома швидкість росту нітрифікуючих бактерій приблизно на порядок нижча, ніж у мікрофлори, яка використовує органічні речовини, що піддаються біологічному розкладанню; при температурі води 15-20°C необхідно підтримувати сталість мулу 5-7 днів, а взимку при 10-15°C – 15-21 діб, розкид часу залежить від розміру очисної споруди;

- підтримці відповідного рН: рН 8–8,5 є оптимальним; ефективність нітрифікації різко знижується за умови зміни діапазону рН;
- наявності достатньої кількості доступного розчиненого кисню: для ефективної нітрифікації потрібно щонайменше 1 мг/л розчиненого кисню і щонайбільше 3 мг/л можна використовувати для підвищення ефективності нітрифікації;
- підтримці температурного спектру: оптимальна температура для нітрифікації 20°C; при нижчих або вищих температурах ефективність нітрифікації знижується – найнижча межа становить 12°C, нижче цього значення нітрифікуючі бактерії більше не здатні розмножуватися.

Денітрифікація – клас процесів, що належать до мікробіологічних, та здійснюють відновлення нітратів до нітритів і далі до газоподібних оксидів та молекулярного азоту<sup>1</sup>. Організми, що здійснюють денітрифікацію, не належать до однієї групи ні морфологічно, ні біохімічно.

У умовах обробки активного мулу денітрифікація вимагає умов без застосування кисню. Спеціальні резервуари без кисню є максимально економічно ефективними засобами для здійснення розщеплення високого вмісту органічної речовини в сирих стічних водах.

Процес денітрифікації:



Рівняння денітрифікації:



Головними умовами денітрифікації є:

- ↓ азот повинен бути у формі нітратів (або нітритів);
- ↓ середовище проведення без наявності кисню;
- ↓ присутність органічних речовин, що розкладаються, як основного джерела вуглецю.

Припинити процес денітрифікації є можливість шляхом введення високої концентрації розчиненого кисню в осаді.

Крім біологічного методу очищення води в умовах замкнутого циклу використання, використовується хімічна очистка. Метою хімічної очистки стічних вод є видалення фосфору, а також видалення сульфідів, зважених та органічних речовин.

Процес перетворення фосфору та форми перетворення на рисунку 3.

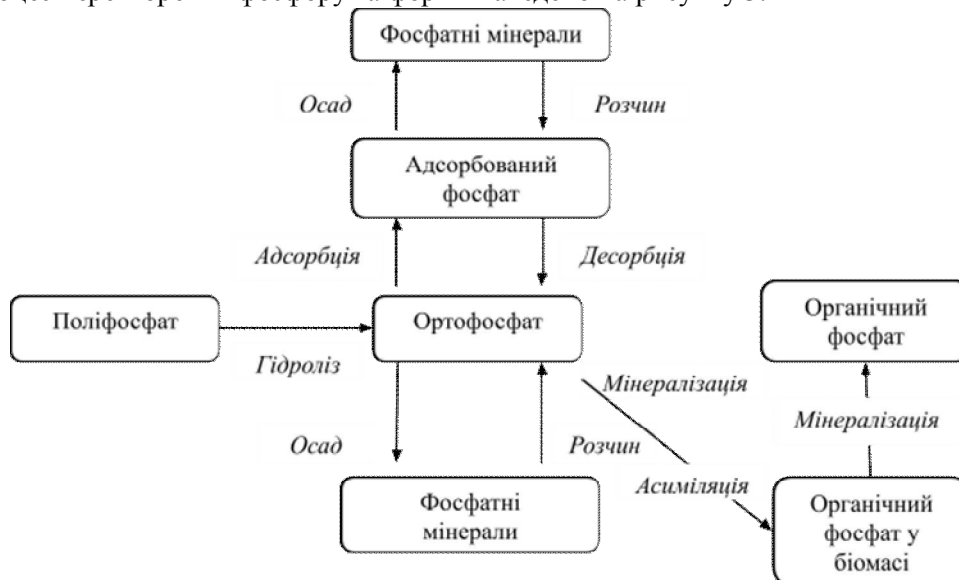


Рис. 3. Схема перетворення фосфору та форми перетворення у процесі очищення води в умовах замкнутого циклу використання

Хімічна обробка в основному використовується для видалення фосфору, що є більш економічно ефективним, ніж біологічне очищення. Після біологічного очищення органічні речовини розкладаються, і велика частина фосфору знаходиться в розчинній формі.

<sup>1</sup>

<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B5%D0%BD%D1%96%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%84%D1%96%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F>

**Висновки.** У роботі розкрито принципи очищення води в умовах замкнутого циклу використання. Впровадження замкнутого циклу використання води вирішує такі проблеми, як дефіцит свіжої води, необхідної для забезпечення потреб споживачів, а також зменшення або повне скорочення обсягів скидається води у міський колектор. Також, використання води в умовах замкнутого циклу є актуальним, коли витрати очищення стічної води є меншими у порівнянні з переробкою речовин до основного продукту, або вторинної сировини. Впровадження замкнутого циклу використання води дозволяє реалізувати безвідходні технології, що виключають втрати сировини і приносять додаткові вигоди щодо отримання вторинного продукту.

Перспективами подальших досліджень є огляд питань застосування композитних та наноматеріалів у процесі очищення води вторинного використання.

### Список літератури

1. Халанчук Л. В., Коротун А.О. Оптимальний вибір методів очищення стічних та поверхневих вод. Збірник наукових праць за матеріалами Дистанційної всеукр. наук. конф. «Математика у технічному університеті XXI сторіччя». Краматорськ: ДДМА, 2017. С. 275-277.
2. Сакалова Г. В., Василінич Т. М. Дослідження ефективності очищення стічних вод від іонів важких металів з використанням природних адсорбентів : монографія. Вінниця: Твори, 2019. 92 с.
3. Іванченко А.В., Карлаш В. І., Єлатонцев Д.О., Данельська А.С. Застосування кислотно-активованого цеоліту в технології очищення стічних вод від нітратів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2018. № 5. С. 1–6
4. Тверда, О.Я., Репін, М.В., Ткачук, К.К., Горбачова, К.Ю. Впровадження моделі циркулярної або кругової економіки у гірничовидобувній галузі. Екологія і виробництво. 2020. №7, с. 54-57.
5. Безцінний О. О. Відтворення відпрацьованих стічних вод, забруднених іонами важких металів / О. О. Безцінний // Комунальне господарство міст. Серія : Технічні науки та архітектура, 2018. Вип. 142. С. 45-48. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm\\_tech\\_2018\\_142\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm_tech_2018_142_10).
6. Bahaa, Zainab. (2021). Wastewater Treatment. 10.13140/RG.2.2.23729.30569.
7. Verma, Subhash & Kanwar, Varinder & John, Siby. (2022). Industrial Wastewater Treatment. 10.1201/9781003231264-30.
8. Verma, Subhash & Kanwar, Varinder & John, Siby. (2022). Advanced Wastewater Treatment. 10.1201/9781003231264-29.
9. Ajala, Oluwaseun & Tijani, Jimoh & Mercy Temitope, Bankole & Abdulkareem, A.. (2022). Wastewater Treatment Technologies. 10.1007/978-981-16-5916-4\_1.
10. Reham abu shmeis (2021). Nanotechnology in Wastewater Treatment. 10.1016/bs.coac.2021.11.002.
11. Kuzin, Evgenii & Kruchinina, Natalia & Nosova, T.. (2021). Electroplating wastewater treatment. Tsvetnye Metally. 50-54. 10.17580/tsm.2021.10.07.
12. Farahat, Laila & Mahmoud, Eman. (2021). Wastewater treatment. 10.1016/B978-0-12-822956-9.00001-5.
13. Biniiaz, Parisa & Shirazi, Nazanin & Roostaei, Tayebe & Rahimpour, Mohammad. (2021). Wastewater treatment. 10.1016/B978-0-12-821601-9.00012-1.
14. Halysh, Vita & Trus, Inna & Viacheslav, Radovenchyk & Gomelya, Mykola. (2021). Biosorbents for wastewater treatment. Proceedings of the NTUU “Igor Sikorsky KPI” Series Chemical engineering ecology and resource saving. 51-57. 10.20535/2617-9741.3.2021.241049.
15. Afreen, Gul & Upadhyayula, Sreedevi. (2021). Ultrasonic Wastewater Treatment. 10.1201/9781003138303-6.
16. Sengupta, Sonali & Pal, Chandan. (2021). Chemistry in Wastewater Treatment. 10.1201/9781003138303-7.
17. Magalhães, Luciano & Silva, Gilberto & Peres, A.E.C.. (2022). Zeolite Application in Wastewater Treatment. Adsorption Science & Technology. 2022. 1-26. 10.1155/2022/4544104.
18. Bwapwa, J.K. & Bakare, B.F.. (2021). Industrial Wastewater Treatment. 10.1201/9781003204442-2.
19. Gopinath, Ashitha & Swaminathan, Jiji & Singh, Seema & P.V., Nidheesh & Kumar, M Suresh. (2022). Impact of nanoparticles in wastewater treatment. 10.1016/bs.coac.2021.12.003.