

СТАЛЕ УПРАВЛІННЯ ПРОМИСЛОВИМИ СТІЧНИМИ ВОДАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЇ НУЛЬОВОГО СКИДУ РІДИНИ

Ковров О.С., Кулікова Д.В.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

пр. Д. Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро

kovrov.o.s@nmu.one, kulikova.d.v@nmu.one

Посилення урбанізації та індустріалізації призвели до високого попиту на прісну воду в багатьох регіонах світу. Дефіцит прісної води є однією з головних міжнародних проблем, яка становить значну загрозу якості води, здоров'ю, екосистемам та економічному розвитку. Прісна вода широко використовується в багатьох галузях промисловості, що призводить до утворення великої кількості стічних вод. Стічні води, потрапляючи у водойми без належного очищення, можуть спричинити значне забруднення, яке негативно впливає на водне середовище, а, отже, й на здоров'я населення. Солоні стічні води (розсоли), що надходять із різних джерел, є основною причиною забруднення та загрози для водних екосистем. В даний час для управління розсолом застосовано кілька методів утилізації, тим не менш ці стратегії вважаються нежиттєздатними через негативний вплив на навколишнє середовище, жорсткі стандарти скиду та збільшення спроб відновити корисні компоненти з розсолу. Стратегія нульового скиду рідини (ZLD) стає все більш популярною в промислових умовах як екологічний підхід до очищення стічних вод. Технологія спрямована на зменшення забруднення води, збереження водних ресурсів і розширення водопостачання шляхом зменшення об'єму рідких відходів, що утворюються в промисловому процесі. Її основна мета полягає в економічному скороченні утворення стічних вод, одночасно виробляючи чисту воду, придатну для повторного використання, що призводить до економії коштів і значних переваг для навколишнього середовища. Промислова очистка води має значну користь від впровадження технології ZLD, дозволяючи підприємствам відповідати суворим державним стандартам щодо скиду стічних вод і досягати вищих показників відновлення води. Крім того, ці системи полегшують обробку та відновлення цінних компонентів зі стічних вод. *Ключові слова:* дефіцит прісної води, забруднення водойм, стаке управління стічними водами, нульовий скид рідини (ZLD), безпека водного середовища.

Sustainable management of industrial wastewater using zero-fluid discharge technology. Kovrov O., Kulikova D.

Increasing urbanization and industrialization have led to a high demand for freshwater in many world regions. Freshwater scarcity is a major international problem, posing a significant threat to water quality, health, ecosystems, and economic development. Freshwater is widely used in many industries, leading to large amounts of wastewater being generated. When discharged into water bodies without proper treatment, wastewater can cause significant pollution, which negatively affects the aquatic environment and, consequently, human health. Saline wastewater (brines), originating from various sources, is a main cause of pollution and a threat to marine ecosystems. Currently, several disposal methods have been applied to manage brine. However, these strategies are considered unsustainable due to adverse environmental impacts, strict discharge standards, and increasing attempts to recover useful components from brine. Zero Liquid Discharge (ZLD) is becoming increasingly popular in industrial settings as an environmentally friendly approach to wastewater treatment. The technology aims to reduce water pollution, conserve water resources, and expand water supplies by reducing the volume of liquid waste generated in industrial processes. Its primary goal is to economically reduce wastewater generation while producing clean water suitable for reuse, resulting in cost savings and significant environmental benefits. Implementing ZLD technology promotes industrial water treatment, allowing enterprises to meet strict government wastewater discharge standards and achieve higher water recovery rates. In addition, these systems facilitate the treatment and recovery of valuable components from wastewater. *Key words:* freshwater scarcity, water pollution, sustainable wastewater management, zero liquid discharge (ZLD), aquatic safety.

Постановка проблеми. Дефіцит прісної води є однією з найважливіших глобальних проблем сьогодення, яка становить серйозну загрозу економічному зростанню, безпеці води та здоров'ю екосистем у всьому світі.

Наявність чистої води – необхідна умова існування всіх живих організмів. Незважаючи на це, людина в процесі своєї життєдіяльності забруднює її. Таким чином, дуже великий об'єм прісних вод наразі став зовсім непридатним для використання. На сьогоднішній день існує ціла низка політичних рішень, спрямованих на скорочення втрат води, вдосконалення методів управління водними ресурсами та скорочення потреби населення у воді.

Актуальність дослідження. Відновлення та повторне використання стічних вод стало зростаючою

тенденцією за останнє десятиліття через збільшення попиту на чисту воду. Повторне використання стічних вод не тільки зменшує їхній об'єм і екологічні ризики, але й зменшує тиск на екосистему через дефіцит прісної води. Завдяки повторному використанню стічні води більше не розглядаються як потенційно шкідливі відходи для навколишнього середовища, а як додатковий ресурс, який можна використати для досягнення стійкості води.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження пов'язане з важливими науковими та практичними завданнями в сфері раціонального використання, охорони та відтворення водних ресурсів, що закріплені у Водному кодексі України, Законах України «Про питну воду, питне водопо-

стачання та водовідведення», «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», в Указі Президента України «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» та у «Водній стратегії України на період до 2050 року». Отримані результати є важливими в контексті сталого управління водними ресурсами в рамках узятих Україною міжнародних зобов'язань у сфері «водної» безпеки, Угоди про асоціацію між Україною та ЄС та Резолюції Генеральної асамблеї ООН: Глобальні цілі сталого розвитку до 2030 року.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблеми сталого управління водними ресурсами розглядаються в наукових працях Залеського І.І., Гребіня В.В., Клименка М.О., Мокіна В.Б., Сташука В.А., Томільцева А.І., Хвесика М.А., Хільчевського В.К., Яцика А.В. та інших. Більшість досліджень присвячена питанням техніко-технологічних аспектів сталого управління водними ресурсами, охорони та екологічно безпечного водокористування, спрямованих на мінімізацію забруднення та виснаження водних об'єктів і забезпечення населення водою належної якості. В роботах [1-8] розглядається широкий спектр технологій очищення стічних вод, починаючи від усталених традиційних методів і закінчуючи інноваційними, ефективними підходами, які можуть сприяти екологічній стійкості водного середовища. Мета цих досліджень полягає в тому, щоб представити комплексне уявлення про останні здобутки в обробці стічних вод, наголошуючи на потенціалі нових підходів у досягненні цілей сталого управління водними ресурсами.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Актуальна проблема дефіциту води має далекосяжні наслідки для глобальної стійкості майбутнього людства. Широко визнаною стратегією вирішення цієї водної проблеми є опріснення та очищення води. Відходи від опріснення стають занадто великими, щоб їх ігнорувати. Розсіл є побічним продуктом процесу опріснення, який має негативний вплив на навколишнє середовище через високу солоність. Скид розсолів у відкриті водойми разом з іншими методами утилізації є екологічно не вигідним і не завжди доступним. Неналежна утилізація розсолу може призвести до серйозних екологічних наслідків, включаючи шкоду водним екосистемам, деградацію ґрунтів та ресурсів прісної води. Як наслідок, інноваційні підходи до управління розсолу є важливими для забезпечення сталої практики опріснення. Поєднання нових технологій зі звичайними методами очистки допоможуть усунути скид забрудненої рідини та створити замкнуті цикли для води, яку можна було б використовувати у виробничих процесах.

Новизна. Розробка мультидисциплінарних систем, так як ZLD, сприяє інтеграції різноманітних технологій і процесів для оптимізації обробки розсолу

та покращення відновлення ресурсів. Ці системи спрямовані не лише на зменшення об'єму виробленого розсолу, але й на вилучення цінних матеріалів, таких як вода, солі та інші поживні речовини, які можна використовувати для промислового чи сільськогосподарського застосування. Регенерація води з розсолу також може сприяти досягненню шостої Цілі сталого розвитку ООН.

Методологічне або загальнонаукове значення базується на теоретичному аналізі досвіду застосування технологій нульового скиду рідини (ZLD) для досягнення енергетичної та кліматичної нейтральності в сфері управління стічними водами та відновлення ресурсів, узагальненні та інтерпретації отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу. В останні роки проблема стічних вод набуває все більшу актуальність у всьому світі, в тому числі й в Україні. В процесі господарської діяльності сучасне суспільство споживає велику кількість води, більша частина якої стає забрудненою різноманітними речовинами. Їхнє потрапляння в навколишнє середовище наносить суттєву шкоду, тому вони підлягають обов'язковому очищенню. Для забезпечення вискоелективного процесу очищення необхідно використовувати спеціальне обладнання та технологічні комплекси, за допомогою яких можна досягти встановлених нормативів забруднення стоків, визначених у відповідних документах. Це обладнання дозволяє довести ступінь забруднення стоків до тих показників, при яких їх можна скидати у водойми без нанесення їм шкоди.

Технології нульового скиду стічних вод (ZLD) являють собою важливий напрямок в галузі екологічної безпеки та водоочищення. Ці нові технології повністю виключають скид забруднених стічних вод у поверхневі водойми, що дозволяє промисловим підприємствам відповідати жорстким екологічним нормам скиду та досягати найвищого ступеня відтворення води (90-98% очищеної води придатне для повторного використання, наприклад зрошення), а також очищувати та відновлювати цінні компоненти з потоків стічних вод, такі як сульфат і хлорид натрію, сульфати калію, каустична сода, гіпс, літій тощо.

Слід зазначити, що ZLD-технології є особливо корисними для управління потоками з високим ступенем мінералізації, оскільки дозволяють повторно використовувати воду, зменшують вплив на довкілля та ризики забруднення, а також вилучають цінні компоненти у вигляді залишків твердих речовин (солі) перед їхньою утилізацією для отримання додаткового доходу.

Зазвичай, процес ZLD включає в себе 3 основні стадії (рис. 1):

1. **Попередня обробка.** Застосовується для зменшення кількості нерозчинних домішок, каламутності та вмісту органічних речовин для забезпечення

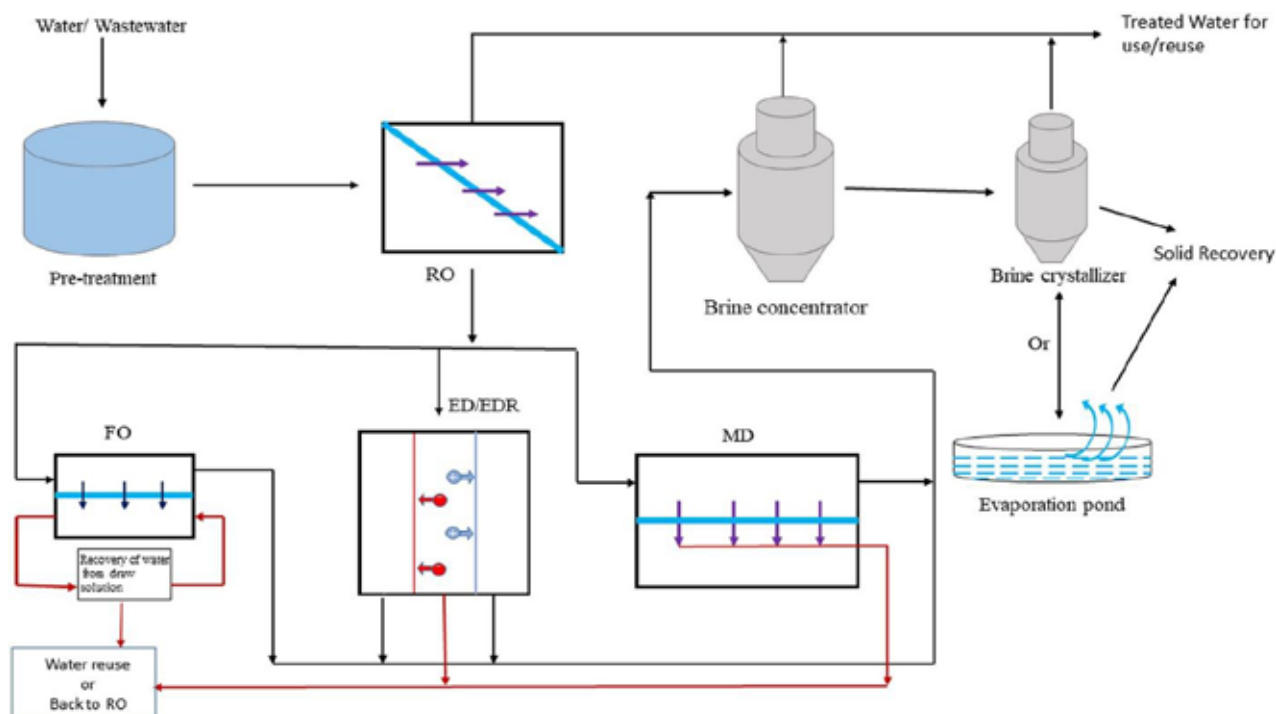


Рис. 1. Типова схема очистки промышленных сточных вод за ZLD-технологією

Джерело: <https://images.app.goo.gl/4VAXM7f5MUfJD3rYA>

надійної роботи наступного обладнання, що застосовується в технологічній схемі.

2. Концентрація розчинних речовин. Останні десятиліття все більшого розвитку набули технології мембранного опріснення солоної води (зворотний осмос RO, електродіаліз ED або комбінація RO+ED). Серед них опріснення солоної води за рахунок зворотного осмосу розглядається як одна з найбільш перспективних технологій сталого забезпечення ресурсами прісної води.

Найголовнішою перевагою методу RO є низьке споживання енергії. Питоме енергоспоживання процесу опріснення солоної води було зменшено з 20 кВт·годину/м³ (1980 рік) до менш ніж 3-4 кВт·годину/м³ шляхом розробки високоефективних пристроїв (насосів високого тиску, високопродуктивних RO мембран тощо). Ці технології концентрують потік вхідної води до високої солоності та здатні відновити до 40-55% дистилату при тиску 55-70 бар при опрісненні солоної (морської) води [9].

Завдяки видаленню забруднень і зниженню концентрації солі вода, оброблена методом зворотного осмосу, може відповідати необхідним стандартам для повторного використання.

Таким чином, зворотний осмос дозволяє відокремлювати, концентрувати та відновлювати цінні хімічні речовини, присутні в стічних водах. Це може призвести до значної економії коштів і зменшити вплив галузі на довкілля.

3. Теплова обробка. Система випаровування дозволяє ефективно та доступно перетворювати

частину відходів на водній основі у водяну пару, залишаючи забруднюючі речовини з вищою температурою кипіння. Це може усунути потребу скиду стічних вод та/або значно мінімізує кількість відходів, які потрібно вивозити за межі підприємства.

Випаровування є чистим процесом, який не додає забруднювачів до тих, які вже присутні в рідині, що підлягає обробці. Техніка займає мало місця, відносно проста в обслуговуванні і служить довго. Крім того, отриманий конденсат має високу якість, що дозволяє його повторно використовувати.

Запропонована система подвійного ефекту (випаровування + кристалізація) може заощаджувати більше енергії, ніж система з одним ефектом (випаровування).

В даний час для опріснення води використовуються методи механічного випаровування. Механічна рекомпресія пари (MVR) – це передова енергозберігаюча технологія розділення великих об'ємів стічних вод з високою швидкістю потоку та низьким рівнем енергоспоживання.

Технологія MVR дозволяє стиснути пару, що утворюється внаслідок випаровування розчину до більш високого рівня тиску і температури за допомогою тільки електричної енергії, і повторно використовувати її як джерело енергії. Здатність технології MVR рекуперувати тепло для повторного використання означає, що вона відіграватиме ключову роль у декарбонізації технологічного тепла [10].

Для цього вторинна пара, що утворюється у випарнику, стискається за допомогою компресора,

внаслідок чого її температура і тиск підвищуються. По мірі підвищення тиску, підвищується й температура насичення. Це підвищення температури призводить до різниці температур між відпрацьованою парою і робочою рідиною. Різниця температур дозволяє передавати тепло через теплообмінник для кип'ятіння стічної води, що надходить на обробку. Оскільки система працює в замкнутому циклі, де пара повторно стискається, а не викидається в атмосферу, конструкція випарника підвищує екологічність і мінімізує втрати тепла.

Головна перевага системи випаровування MVR полягає в тому, що випарники відомі своєю високою енергоефективністю. На відміну від альтернативної термічної рекомпресії пари (TVR), механічна не потребує додаткової подачі свіжої пари. Оскільки змішування рідин відсутнє, вся існуюча пара може бути стиснута для рекуперації енергії. В цьому випадку загальне споживання енергії зменшується на 90% і більше (ротаційний компресор, рециркуляційні насоси споживають 30-50 кВт·годину/тонну дистилату). Зниження споживання енергії перетворюється на економічну вигоду для промислових процесів. Завдяки своїй енергоефективності конструкції випарників MVR можуть призвести до зниження експлуатаційних витрат у довгостроковій перспективі. Саме тому, випарники MVR стають все більш популярними по мірі росту цін на енергію.

Кристалізація відіграє ключову роль у ZLD системах, в яких рідкі стоки піддаються ряду процесів для отримання сухих відходів та потоку чистої води шляхом охолодження, випаровування або хімічної реакції [11].

За допомогою цієї технології можна виробляти твердий концентрат з його подальшим використанням в якості побічних продуктів або сировини (солі, кислоти, мінерали, метали, олії, добрива тощо), яку в багатьох випадках можна переробити. До головних переваг кристалізаційної установки можна віднести:

- мінімізація обсягу відходів, якими потрібно управляти;
- значне зниження витрат на поводження з відходами, в тому числі на їхнє транспортування та управління;
- зменшення викидів парникових газів при транспортуванні відходів.

Кристалізатори вакуумного випаровування з механічною рекомпресією пари (MVR) і примусовою циркуляцією (FC), що працюють на електричній енергії, найбільш підходять для обробки концентратів стічних вод з високим ступенем мінералізації, наприклад, відновлення хлориду натрію, сульфату натрію, хлориду амонію, сульфату амонію тощо [12].

Кристалізатор – циліндрична випарна ємність вертикального типу з конічним дном для полег-

шення відділення твердих частинок. Випарна ємність містить теплообмінник із зовнішньою сорочкою для забезпечення невеликої кількості пари під час фази нагріву, а також під час роботи для підтримки температури. Крім того, ємність оснащена зовнішнім кожухотрубним теплообмінником. Завдяки рециркуляційному насосу технологічна рідина тече всередині трубного пучка з високою швидкістю, отримуючи енергію, необхідну для кристалізації. Це дозволяє уникнути розшарування на поверхні обміну.

Вакуумний насос відбирає водяну пару з випарної ємності, стискає її до атмосферного тиску і перекачує стиснуту пару в зону конденсації випарника. Ця пара використовується як джерело нагріву для повторного випаровування концентрату стічної води, що надходить з випарника.

Таким чином, впровадження запропонованої ZLD-технології опріснення промислових стоків сприятиме сталому використанню води, зменшуватиме навантаження на природні водні ресурси та підвищуватиме ефективність виробничих процесів. Це може стати важливим кроком у вирішенні проблем водного дефіциту та екологічних викликів.

Головні висновки. На теперішній час людство стикається з нестачею прісної води через її солоність і солонуватість. Процеси дистилляції та мембрани були звичайною практикою протягом багатьох років для отримання прісної води. Незалежно від технології, що використовується для опріснення, утилізація розсолу та його вплив на довкілля є основними проблемами. Експоненціальне зростання опріснювальних установок спонукає до пошуку та впровадження альтернативних стійких технологій утилізації зростаючої кількості відходів. Нульовий скид рідини (ZLD) є однією з таких концепцій виробництва прісної води з використанням технології опріснення, яка є альтернативою всім існуючим методам утилізації розсолів.

Перспективи використання результатів дослідження. Переробка за допомогою очисних споруд з нульовим скидом рідини дозволяє зменшити споживання води шляхом повторного використання очищеної води в технологічних процесах. Ця практика значно зменшує попит на прісну воду для промислових операцій, що призводить до зменшення витрат на придбання води та зниження зовнішніх ризиків. Рециркуляція води на місці може призвести до менших потреб в обробці, порівняно з дотриманням суворих екологічних стандартів скидів. Застосування технології ZLD дозволяє промисловості оптимізувати водні ресурси, скоротити експлуатаційні витрати та зменшити вплив на довкілля за рахунок ефективної переробки води в своїх процесах.

Література

1. Saravanan A., Senthil Kumar P., Jeevanantham S., Karishma S., Tajsabreen B., Yaashikaa P.R., Reshma B. Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*. 2021. 280:130595.
2. Kwaku Armah E., Chetty M., Adedeji J., Kukwa D.T., Mutsvene B., Shabangu K.P., Bakare B.F. Emerging trends in wastewater treatment technologies: the current perspective. *Promising Techniques for Wastewater Treatment and Water Quality Assessment*. 2021. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.93898>.
3. Singh B.J., Chakraborty A., Sehgal R. A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers. *Journal of Environmental Management*. 2023. 348:119230.
4. Ganesan S. Promising Technologies in Wastewater Treatment: The Current Standpoint. In book: *Sustainable Water Treatment and Ecosystem Protection Strategies*. 2024. P. 313-325.
5. Chaudhary J.P., Jhajharia P. Recent Advances in Wastewater Treatment. In book: *Integrated Waste Management: A Sustainable Approach from Waste to Wealth*. 2024. P. 289-302.
6. Wani N.A., Malik N.A., Tantary Y.R., Jan I., Ahmad T., Wani M.S. Emerging Techniques for Treatment of Wastewater. In book: *Aquatic Contamination: Tolerance and Bioremediation*. 2024. P. 1-23.
7. Sangamnere R., Misra T., Bherwani H., Kapley A., Kumar R. A critical review of conventional and emerging wastewater treatment technologies. *Sustainable Water Resources Management*. 2023. 9(2):58.
8. Poornima S., Manikandan S., Karthik V., Balachandar R., Subbaiya R., Saravanan M., Lan Chi. N.T., Pugazhendhi A. Emerging nanotechnology based advanced techniques for wastewater treatment. *Chemosphere*. 2022. 303:135050.
9. Seawater Reverse Osmosis (SWRO) Desalination: Energy consumption in plants, advanced low-energy technologies, and future developments for improving energy efficiency. *IWA Publishing*, 2023. <https://doi.org/10.2166/9781789061215>.
10. Liu L., Zhang J.-J., Liu Y., Zhang S.-F. Application of mechanical vapor recompression technology in evaporation. *Huaxue Gongcheng/Chemical Engineering (China)*. 2014. 42. P. 1-5.
11. Desarnaud J., Noushine S. Salt crystal purification by deliquescence/crystallization cycling. *EPL (Europhysics Letters)*. 2011. 95(4):48002.
12. DESALT MVR FC crystallizer : веб-сайт. URL: <https://condorchem.com/en/evaporators/desalt-mvr-fc-1500-2500/> (дата звернення: 27.02.2025).