

Технології знесолення води для потреб міського водопостачання

Мар'яна Фігуренко, студентка¹¹ (ORCID: 0009-0002-3747-7411)

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

Представлено порівняльний аналіз технологій знесолення та опріснення природних вод. Розглянуто економічні та екологічні аспекти застосування різних методів видалення солей. Приведено приклади найбільш успішної реалізації технологій опріснення води для потреб комунального господарства та зрощення на основі зворотного осмосу і дистиляції.

Ключові слова: знесолення природних вод, технології знесолення, зворотний осмос, дистиляція, екологічний вплив.

1. ВСТУП

Забезпечення населення водою питної якості стало останнім часом однією з найважливіших задач міського господарства. Кліматичні зміни, зростання населення, урбанізація, збільшення виробничих потреб – усе це призводить до загострення водної кризи у світі. В Україні, яка є країною з низькою водозабезпеченістю, особливого значення набувають технології знесолення природних, зокрема морських та солонуватих підземних вод [1].

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЗНЕСОЛЕННЯ

2.1. Загальна характеристика та поширеність

У світі існує понад 20 тисяч установок для опріснення води різної потужності [2]. Найбільше розповсюдження мають два типи технологій: мембранні (переважно зворотний осмос), які становлять 60% потужностей, та термічні (зокрема багатостадійна дистиляція) — 34%. Решта методів, таких як електродіаліз та іонний обмін, займають лише 6%.

Зворотний осмос

Цей метод ґрунтується на селективному розділенні розчинів під тиском, що перевищує осмотичний, за допомогою напівпроникної мембрани [1, 2]. Вона пропускає воду і затримує розчинені речовини. Вихідна вода розділяється на два потоки: пермеат (очищена вода) та концентрат (розчин із підвищеною концентрацією солей). Основу технології становлять поліамідні або ацетатцелюлозні мембрани, виготовлені у вигляді порожнистих волокон або рулонних елементів. Головним недоліком є схильність мембран до забруднення, що вимагає ретельної попередньої підготовки води.

Термічні методи (дистиляція)

Ці методи базуються на фазовому переході води з рідкого стану в пару з подальшою конденсацією. Розчинені солі не переходять у пару і залишаються у вихідному розчині. Найпоширенішим термічним методом є багатостадійна дистиляція (БСД) [2], яка використовує низку випарних апаратів, що працюють при знижуваних тисках і температурах. Це дозволяє утилізувати тепло конденсації пари з попереднього ступеня для нагрівання води в наступному. Недолік — висока енергоємність.

Електродіаліз

Метод ґрунтується на розділенні іонів розчинених речовин за допомогою іонообмінних мембран у зовнішньому електричному полі. Під дією струму катіони рухаються до катода, а аніони — до анода. Чергуючи катіоно- та аніонообмінні мембрани, створюють камери, з яких видаляються іони солей. Електродіаліз ефективний для опріснення слабкосолоних вод (до 5–6 г/л).

2.2. Порівняння методів

Головна мета опріснення — отримання прісної води з морської або солонуватої шляхом видалення розчинених солей. Найпопулярнішими методами є дистиляція та зворотний осмос. Вони відрізняються принципом дії: дистиляція використовує теплову енергію для випаровування та конденсації, тоді як зворотний осмос — механічний тиск для фільтрації крізь мембрану.

Дистиляція імітує природний кругообіг води і видаляє практично всі домішки, включаючи важкі метали, віруси та бактерії. Однак вона є енергоємною та повільною. Зворотний осмос не вимагає кип'ятіння і є менш енерговитратним, але потребує якісної попередньої обробки води для запобігання засміченню мембран.

За ефективністю очищення дистиляція вважається «золотим стандартом», оскільки забезпечує майже повне видалення забруднень. Зворотний осмос видаляє до 98–99% солей та більшість інших домішок, що є достатнім для отримання якісної питної води.

Електродіаліз застосовується переважно для опріснення солонуватих вод із низькою солоністю, оскільки його ефективність значно падає із збільшенням концентрації солей.

Загалом, мембранні та термічні методи залишаються найбільш поширеними та перспективними у галузі опріснення води.

2.3. Економічна доцільність та екологічні аспекти опріснення

Економічна сторона:

Економічна ефективність опріснення залежить від низки факторів, таких як рівень солоності вихідної води, потужність установки, вимоги до якості очищеної води, вартість енергії та обладнання. Найбільш енерговитратними є термічні методи (наприклад, багатостадійна дистиляція), тоді як зворотний осмос споживає менше енергії.

Опріснення морської води (з солоністю 35–45 г/л) економічно виправдане в регіонах з гострою нестачею

прісної води, але з доступом до дешевих джерел енергії (наприклад, країни Перської затоки), або для забезпечення військових об'єктів та суден. Опріснення солонуватих вод (1–10 г/л) значно дешевше і застосовується набагато ширше.

Зворотний осмос є енергоефективнішим за дистиляцію, оскільки не вимагає нагрівання великих обсягів води. Саме тому він став промисловим стандартом для опріснення морської води у всьому світі, забезпечуючи великі обсяги води з меншими експлуатаційними витратами.

Загалом, вартість опрісненої воли залежить від цін на енергоносії, технології та солоності вихідної води. Найменші енерговитрати серед основних методів має зворотний осмос, що робить його найбільш привабливим для міського водопостачання.

Екологічні аспекти:

Найсерйознішою екологічною проблемою опріснення є утворення та скидання гіперсолоненого розсолу (концентрату) – побічного продукту, що містить високу концентрацію солей, а іноді й залишки реагентів попередньої обробки (антискалантів, коагулянтів) або важкі метали. Пряме скидання такого розчину у водойми призводить до локального підвищення солоності, зміни щільності води та гідродинамічного режиму, що може завдати шкоди морським екосистемам і донним біоценозам [2, 3].

Для зменшення негативного впливу необхідно застосовувати такі заходи: розведення розсолу до безпечних концентрацій, використання спеціальних дифузорних випусків для його розсіювання, видалення у глибокі водоносні горизонти або пошук способів утилізації (наприклад, виділення корисних мінералів).

Крім того, опріснювальні установки, особливо великі, пов'язані зі значними енерговитратами.

Порівняно з дистиляцією, сучасні системи зворотного осмосу мають вищий відсоток виходу чистої води, що дещо зменшує обсяг концентрату, який потрібно утилізувати. Однак питання екологічно безпечного поводження з розсолами залишається одним з найважливіших у галузі опріснення.

3. ПРИКЛАДИ УСПІШНИХ ПРОЄКТІВ ТА РЕГІОНИ ЗАСТОСУВАННЯ

3.1. Регіони-лідери у сфері опріснення

Світовими лідерами у використанні технологій опріснення є країни Близького Сходу, такі як Саудівська Аравія, Об'єднані Арабські Емірати (ОАЕ) та Кувейт [2]. Це зумовлено гострим дефіцитом прісних водних ресурсів у цих регіонах при наявності розвиненої енергетичної інфраструктури та доступу до дешевих джерел енергії (нафта, газ).

Потужні опріснювальні комплекси також активно функціонують у посушливих регіонах інших частин світу: США (Каліфорнія, Флорида), Ізраїлі, Австралії, Іспанії та Китаї.

3.2. Конкретні приклади та масштаби

Яскравим прикладом успішного застосування технологій є Ізраїль. Країна є світовим лідером у використанні зворотного осмосу і отримує більше половини (близько 70%) питної води для комунального господарства та сільського господарства шляхом опріснення, що є одним з найвищих показників у світі [4].

Потужності сучасних промислових установок зворотного осмосу сягають сотень тисяч кубічних метрів води на добу. Наприклад, потужність заводу в Ашкелоні (Ізраїль) становить 320 тис. м³/добу, а станції Хадіта в ОАЕ – 240 тис. м³/добу. Такі гігантські комплекси, як Sorek в Ізраїлі або Ras Al-Khaim в Саудівській Аравії, здатні забезпечувати чистою водою цілі мільйонні міста.

У ОАЕ (Дубай), на відміну від Ізраїля, значною мірою покладаються на великі заводи з термічного опріснення (переважно багатостадійну дистиляцію), які часто поєднують з виробництвом електроенергії [3].

Таким чином, зворотний осмос став основною технологією для великих муніципальних станцій по всьому світу, тоді як термічні методи також залишаються важливими в регіонах з доступом до дешевої теплової енергії.

4. ВИСНОВОК

Обидва основні методи опріснення – зворотний осмос та дистиляція – мають вирішальне значення для подолання світової кризи водних ресурсів. Вибір оптимальної технології залежить від низки умов: якості вихідної води, доступності та вартості енергії, екологічних вимог і необхідних обсягів очищеної води.

Для побутового використання зворотний осмос є кращим вибором завдяки енергоефективності, швидкості роботи та зручності. Дистиляція, у свою чергу, більше підходить для лабораторних умов, де потрібна вода високої чистоти (наприклад, «вода 1-го класу»), або для невеликих обсягів, коли енерговитрати не є вирішальним фактором.

У сфері міського водопостачання та промислового опріснення зворотний осмос не має собі рівних за співвідношенням ефективності та вартості, що робить його основним методом у цих галузях.

У майбутньому опріснення стане ще більш стратегічно важливим напрямом для забезпечення водної безпеки в умовах кліматичних змін і зростання населення.

Список літератури

- [1] Хільчевський В.К., Забокрицька М.Р., Стельмах В.Ю. Гідрокологічні аспекти водопостачання та водовідведення: навч. посібник. – К.: ДІА, 2023. – 228 с. ISBN 978-617-7785-40-7
- [2] Behnam, P., Faegh, M., & Khiadani, M. (2022). A review on state-of-the-art applications of data-driven methods in desalination systems. *Desalination*, 532, 115744. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115744>
- [3] Water Desalination: Desalination Technologies [Електронний ресурс]. URL: <https://www.swcc.gov.sa/en/ProductionSystems/DesalinationTechnologies> (дата звернення 05.09.2025)
- [4] Guangzhou Chunke Environmental Technology: What are the 5 seawater desalination plants in Israel? [Електронний ресурс]. URL: <https://www.chunkerowaterplant.com/news/water-desalination-company-israel> (дата звернення 05.09.2025)

ⁱ Робота виконана під керівництвом канд. техн. наук, доц. Тетяни Аргатенко.