

**Сав'як В.В., студент 2 курсу,
спеціальності «Гідротехнічне будівництво,
водна інженерія та водні технології»
Науковий керівник: Козішкурт С.М., к.т.н., доцент
Національний університет водного господарства
та природокористування, м. Рівне**

АДАПТАЦІЯ ІЗРАЇЛЬСЬКИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ ВОДИ ДЛЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ УКРАЇНИ

В умовах глобального потепління, деградації водних екосистем та зростання водоспоживання питання ефективного управління водними ресурсами набуває пріоритетного значення. Протягом останніх років Україна стикається зі збільшенням частоти посух, зменшенням річкового стоку та загостренням проблеми водного дефіциту у південних регіонах. Ситуація істотно ускладнилася після руйнування Каховської гідроелектростанції у червні 2023 року, що призвело до втрати одного з основних джерел водопостачання півдня країни, зокрема зрошувальних систем Причорноморського регіону. За даними Світового банку, значна частина меліоративної інфраструктури в Україні зазнала серйозних пошкоджень, а окремі системи залишилися неробочими через воєнні дії (Світовий банк, 2023).

У світі є успішні приклади побудови високоефективних гідротехнічних систем в умовах водного дефіциту. Найбільш показовим є досвід Ізраїлю, який досяг одного з найвищих у світі рівнів повторного використання очищених стічних вод – 85–90 %. Такий підхід дозволив країні забезпечувати стабільне водопостачання незалежно від природних ресурсів, що сприяло розвитку агропромислового комплексу.

Адаптація ізраїльських практик повторного використання води до умов України може стати ефективним інструментом подолання структурної водної кризи, модернізації систем водопостачання та зрошення, зменшення антропогенного навантаження на водні об'єкти та підвищення стійкості водогосподарського комплексу. Успішність ізраїльської моделі зумовлена широким застосуванням сучасних технологій водоочищення та організованою системою транспортування технічної води.

Мембранні біореактори (MBR) поєднують переваги активного мулу та мембранної фільтрації, забезпечуючи отримання води високої якості з мінімальним вмістом завислих часток і патогенних мікроорганізмів.

Ультрафільтрація (UF) виконує роль додаткової стадії очищення, що гарантує стабільність параметрів води, необхідних для ефективного функціонування краплинних систем зрошення.

Технологія зворотного осмосу (RO) дозволяє контролювати рівень мінералізації, що є критично важливим під час зрошення культур, чутливих до солевмісту.

Багатоступенева дезінфекція яка включає хлорування, ультрафіолетове опромінення та озонування, забезпечує санітарну безпеку води та підтримує стабільність її якості під час транспортування.

Не менш важливою складовою ізраїльської моделі повторного використання води є впровадження високоефективних систем краплинного зрошення, що забезпечують раціональне та контрольоване подання очищених стічних вод. Краплинне зрошення дозволяє мінімізувати втрати вологості на випаровування та інфільтрацію, а також локалізувати її подачу безпосередньо в кореневмісний шар ґрунту, що особливо важливо при використанні води нижчої якості. В Ізраїлі понад 80% повторно використаних стічних вод подається саме через краплинні системи, що робить їх ключовим елементом циркулярної водної економіки країни. Компанії Netafim та Rivulis виступили глобальними інноваторами у розвитку цих технологій, сформувавши інженерні рішення, які можуть бути адаптовані для модернізації українських гідротехнічних систем зрошення.

Важливою інженерною інновацією є система фіолетових трубопроводів (purple pipelines) – спеціалізованих мереж для транспортування повторно очищеної води. Фізичне відокремлення цих мереж від питних систем водопостачання виключає можливість змішування потоків і забезпечує безпечне використання очищених стоків у сільському господарстві. Purple pipelines інтегровані у єдину національну структуру розподілу води, що дозволяє ефективно маневрувати потоками залежно від сезонних та регіональних потреб.

В Ізраїлі також створено єдину національну мережу розподілу водних ресурсів, яка забезпечує гнучке перенаправлення очищеної води між регіонами. Така система дозволяє мобілізувати надлишкові об'єми у одних районах і ефективно використовувати їх у інших, де спостерігається піковий попит, особливо у сільському господарстві.

Регулювання та контроль якості води здійснює Israel Water Authority. До ключових інструментів управління належать національні стандарти повторного використання води (аналогічні до GWR), єдині тарифні підходи, які стимулюють раціональне водокористування, а також багаторівнева система моніторингу, що охоплює всі етапи руху води – від виходу з очисних споруд до кінцевого споживача.

Основним інженерним викликом при адаптації ізраїльських технологій є забезпечення дотримання двох основних параметрів якості очищеної води: санітарної безпеки та мінімізації ризику засмічення (клогінгу)

зрошувальних систем. Для ефективної та довгострокової роботи краплинних емітерів вміст завислих часток у воді не повинен перевищувати 50 мг/л, а для систем мікрозрошення – 10 мг/л. Саме тому впровадження високоточних фільтраційних технологій, таких як ультрафільтрація (UF) та механічна фільтрація до 100 мікрон, є невід'ємним елементом гідротехнічного проекту. Крім того, критичною характеристикою є показник загальної мінералізації (TDS), який при застосуванні зворотного осмосу (RO) контролюється до рівня, безпечного для ґрунтів та рослин, зазвичай менше 500 мг/л.

В умовах України, де значна частина меліоративної інфраструктури, за оцінками Світового банку, зношена на 60–70%, інтеграція ізраїльських технологій потребує не лише будівництва модульних очисних блоків, а й комплексної реконструкції розподільчих мереж. Найбільш раціональним інженерним рішенням для відновлення зрошення у постраждалих південних регіонах є створення локальних автономних гідротехнічних комплексів. До складу таких комплексів мають входити нові або модернізовані водозабірні споруди, модульні блоки доочищення (MBR/UF) та автономні насосні станції. Для живлення насосних станцій доцільно інтегрувати відновлювані джерела енергії (ВДЕ), зокрема сонячні панелі, що забезпечить енергетичну стійкість об'єктів та зменшить експлуатаційні витрати, компенсуючи високу енергоємність мембранних технологій (3–4 кВт·год/м³ при застосуванні зворотного осмосу).

Україна, володіючи розвинутою мережею очисних споруд та значними потребами у воді для зрошення, має потенціал для впровадження аналогічних технологічних рішень. Південні області (Одещина, Миколаївщина, Запоріжжя) залишаються зонами найбільшого водного ризику. Застосування мембранних технологій на базі міських та районних очисних споруд може забезпечити стабільні джерела технічної води для зрошення культур, відновлення деградованих земель, компенсації дефіциту води у локальних системах водопостачання, а також у промислових та технологічних циклах підприємств.

Промислові агломерації України володіють значним потенціалом для повторного використання очищеної води у системах охолодження, промислових технологічних циклах та штучних водоймах-випаровувачах. Використання таких ресурсів дозволить зменшити забір прісної води, знизити навантаження на річкові екосистеми та скоротити обсяги скиду недостатньо очищених стічних вод.

У межах малих і середніх громад доцільним є впровадження модульних очисних споруд на основі технологій MBR, які забезпечують компактність, високу якість очищення та можливість відбору значних обсягів води для технічних і господарських потреб. Очищена вода може використовуватися для поливу зелених зон, миття вулиць, підтримання протипожежних резервуарів, а також для поповнення підземних водоносних горизонтів через інфільтраційні системи.

Таблиця 1

Потенційний ефект адаптації ізраїльських технологій повторного використання води для водогосподарського комплексу України

Параметр	Потенційний ефект для України
Відсоток повторного використання води	Можливі 70–90 % залежно від масштабу та технологій
Економія прісної води	Зменшення заборів з річок та зниження навантаження на природні водні джерела
Використання агросекторі	Зрошення культур, відновлення деградованих земель, забезпечення стабільного водопостачання
Інфраструктурні інвестиції	Модернізація очисних споруд (MBR, UF, RO), будівництво purple pipelines
Санітарна безпека	Підвищений контроль якості води, багатоетапна дезінфекція, дотримання стандартів якості
Економічна вигода	Зниження витрат на водозабір, скорочення збитків від водної кризи, підвищення продуктивності агросектору
Екологічний ефект	Стабілізація гідрорежиму, покращення якості води та підтримка циркулярної водної економіки

Реалізація моделі повторного використання води сприятиме: оптимізації роботи гідротехнічних систем; створенню альтернативних джерел водопостачання; розвитку зрошувального землеробства; стабілізації функціонування гідроекосистем. Це забезпечить підвищення продовольчої безпеки, зменшення навантаження на очисні споруди та поступовий перехід України до принципів циркулярної водної економіки, орієнтованої на сталий розвиток і ефективне використання водних ресурсів.

Ізраїльська модель продемонструвала високу ефективність комплексних рішень, які поєднують сучасні технології, розвинену інфраструктуру та системну державну політику. Для України адаптація такого досвіду є перспективною та необхідною. Впровадження мембранних технологій, розвиток локальних систем транспортування очищеної води, а також створення національних стандартів і системи контролю якості стане основою для відновлення та модернізації водогосподарського комплексу держави, підвищуючи його стійкість до кліматичних та антропогенних викликів.