УДК 620.92:631.234
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).32

ANALYSIS OF GROUND AND SURFACE WATER TREATMENT METHODS FOR GREENHOUSE COMPLEXES IN THE BLACK SEA REGION OF UKRAINE

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ГРУНТОВИХ І ПОВЕРХНЕВИХ ВОД ДЛЯ ТЕПЛИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ПРИЧОРНОМОР'Я УКРАЇНИ

Yuriy O. Shapovalov
yuriy.shapovalov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0003-2324-0317

Ievgen N. Romaniukin
romaniukin.nuk@gmail.com
ORCID: 0009-0007-2087-7247

Andriy P. Golovnya
holovnia981@gmail.com
ORCID: 0009-0002-0095-6232

Ю. О. Шаповалов,
канд. техн. наук, доцент

Є. М. Романюкін,
аспірант

А. П. Головня,
аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of modern methods for the treatment of surface and groundwater intended for greenhouse complexes in the Black Sea region of Ukraine. Physical, chemical, biological, membrane, sorption and thermal methods of water treatment are considered, as well as the features of their application in water supply systems of modern greenhouse farms. *Purpose*. The aim of the study is to evaluate the efficiency of modern water treatment technologies for greenhouse complexes taking into account the quality of source water, energy efficiency of technological processes, investment costs and the possibilities of integrating water treatment systems into the overall energy infrastructure of greenhouses. *Method*. The study employs methods of system analysis, comparison of physicochemical water quality indicators and purification technologies, generalization of modern scientific research in the field of water treatment, greenhouse technologies and energy-efficient water supply systems, as well as methods of analytical assessment of energy consumption and techno-economic characteristics of water treatment systems. *Results*. The quality of surface and groundwater of the Black Sea region of Ukraine was assessed and it was found that they are characterized by increased mineralization, high hardness, significant chloride content and periodic pollution by organic and man-made components. It was shown that traditional physical and chemical methods provide effective removal of suspended solids and partial softening of water, but do not allow to fully solve the problem of preparing irrigation water of the required quality. It was found that the most promising for greenhouse complexes are combined water treatment systems. *Scientific novelty*. The scientific novelty of the work lies in the comprehensive comparative analysis of modern methods for the treatment of surface and groundwater under the conditions of the Black Sea region of Ukraine, taking into account energy efficiency, techno-economic indicators and suitability for all-season greenhouse complexes. *Practical importance*. The practical significance of the obtained results lies in the possibility of their application in the design of greenhouse water treatment systems, selection of rational technological schemes for water purification, reduction of energy consumption for irrigation water preparation and improvement of water resource efficiency in greenhouse farming.
Key words: greenhouse complexes; water treatment; groundwater; surface water; drip irrigation; energy efficiency; vacuum distillation.

Анотація. У статті проведено комплексний аналіз сучасних методів обробки поверхневих та ґрунтових вод для тепличних комплексів Причорномор'я України. Розглянуто фізичні, хімічні, біологічні, мембранні, сорбційні та теплові методи водопідготовки, а також особливості їх застосування у системах водопостачання сучасних тепличних господарств. *Мета*. Метою дослідження є оцінка ефективності сучасних технологій підготовки води для тепличних комплексів з урахуванням якості вихідної води, енергоефективності процесів, інвестиційних витрат та можливостей інтеграції систем водопідготовки у загальну енергетичну інфраструктуру теплиць. *Методика*. У роботі використано методи системного аналізу, порівняння фізико-хімічних характеристик води та технологій її очищення, а також узагальнення сучасних наукових досліджень у сфері водопідготовки

та тепличних технологій. *Результати*. Проведена оцінка якості поверхневих і ґрунтових вод Причорноморського регіону України та встановлено, що вони характеризуються підвищеною мінералізацією, високою жорсткістю, значним вмістом хлоридів та періодичним забрудненням органічними й техногенними компонентами. Показано, що традиційні фізичні та хімічні методи забезпечують ефективне видалення зважених речовин і часткове пом'якшення води, однак не дозволяють повною мірою вирішити проблему підготовки поливної води необхідної якості. Встановлено, що найбільш перспективними для тепличних комплексів є комбіновані системи водопідготовки. *Наукова новизна* роботи полягає у комплексному порівнянні сучасних методів обробки поверхневих та ґрунтових вод для умов Причорномор'я України з урахуванням їх енергоефективності, техніко-економічних показників та придатності для всесезонних тепличних комплексів. *Практична значимість* отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проектуванні систем водопідготовки тепличних господарств, виборі раціональних технологічних схем очищення та зниженні енерговитрат на підготовку поливної води.

Ключові слова: тепличні комплекси; водопідготовка; ґрунтові води; поверхневі води; краплинне зрошення; енергоефективність; вакуумна дистиляція.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Південні регіони України, зокрема Причорномор'я, характеризуються дефіцитом якісних водних ресурсів, підвищеною мінералізацією поверхневих і ґрунтових вод, а також значним антропогенним навантаженням на водні екосистеми. Для сучасних всесезонних тепличних комплексів проблема забезпечення стабільного водопостачання необхідної якості є одним із ключових факторів врожайності, енергоефективності та довговічності систем краплинного зрошення. Складність проблеми полягає у необхідності одночасного забезпечення: нормативної якості поливної води; мінімізації енергетичних витрат; зниження ризиків засолення ґрунтів; запобігання засміченню систем поливу; можливості повторного використання дренажних вод.

Особливої актуальності набуває застосування комбінованих технологій обробки води, які поєднують механічні, реагентні, мембранні, сорбційні та теплові методи з інтеграцією у загальну систему енергозабезпечення тепличного комплексу.

У зв'язку з цим виникає необхідність комплексного аналізу сучасних методів підготовки поверхневих та ґрунтових вод для тепличних комплексів Причорномор'я України з урахуванням їх ефективності, енергоспоживання, інвестиційних витрат та придатності до експлуатації у всесезонних тепличних господарствах.

Метою дослідження є проведення комплексного аналізу сучасних методів обробки поверхневих та ґрунтових вод, оцінка їх енергоефективності, техніко-економічних характеристик та визначення найбільш перспективних технологічних схем підготовки поливної води для всесезонних тепличних господарств Причорномор'я України.

Об'єктом дослідження є процеси обробки поверхневих та ґрунтових вод, що використовуються у системах водопостачання сучасних тепличних комплексів.

Предметом дослідження є фізико-хімічні, енергетичні та експлуатаційні характеристики сучасних методів підготовки поливної води для всесезонних тепличних комплексів Причорномор'я України.

Використано методи системного аналізу, порівняння фізико-хімічних показників якості води та технологій її очищення, узагальнення сучасних наукових досліджень у сфері водопідготовки, тепличних технологій та енергоефективних систем водопостачання, а також методи аналітичної оцінки енергоспоживання й техніко-економічних показників систем обробки води.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному порівняльному аналізі сучасних методів обробки поверхневих та ґрунтових вод для умов Причорномор'я України з урахуванням якості вихідної води, енергоефективності технологічних процесів, техніко-економічних показників та можливості інтеграції систем водопідготовки у енергетичну інфраструктуру всесезонних тепличних комплексів.

Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості використання наведених рекомендацій та аналітичних матеріалів при проектуванні систем водопідготовки тепличних комплексів, виборі раціональних технологічних схем очищення поверхневих та ґрунтових вод, зниженні енергетичних витрат на підготовку поливної води та підвищенні ефективності використання водних ресурсів у тепличному господарстві.

ВСТУП

Раціональний вибір методів обробки ґрунтових та поверхневих вод для тепличних комплексів є одним з ключових чинників забезпечення високої продуктивності, стабільної роботи систем краплинного зрошення, підвищеної ефективності технологічних процесів та зниженого антропогенного навантаження на екосистеми. У сучасних умовах дефіциту якісних водних ресурсів і зростання вартості енергоносіїв може бути доцільним використання комбінованих схем обробки води, які поєднують різні способи, методи, технології та процеси, що дозволяє адаптувати систему водопідготовки до конкретних гідрогеологічних та гідрохімічних умов джерел ґрунтових

або поверхневих вод [1, 2]. У високотехнологічних тепличних господарствах усе ширше застосовуються замкнені та напівзамкнені контури водопостачання з повторним використанням дренажних і стічних вод, що потребує глибокої та селективної їх обробки з урахуванням сольового балансу та можливого накопичення токсичних компонентів [3]. Додатковим трендом розвитку є зменшення енергетичних витрат на одиницю підготовленої води завдяки інтеграції систем водопідготовки із загальними енергетичними комплексами тепличних споруд, у тому числі з використанням відновлюваних джерел енергії та низькопотенційної теплоти [4, 5].

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Аналіз методів обробки ґрунтових та поверхневих вод

1.1 Класифікація методів обробки ґрунтових та поверхневих вод

Всі методи обробки ґрунтових та поверхневих вод для зрошення за фізико-хімічною природою процесів доцільно умовно розділити на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні, мембранні, сорбційні, теплові, а також комбіновані [6]. До фізичних методів належать механічна фільтрація (сітчасті, дискові, картриджні, піщані фільтри), відстоювання, флотація, а також ультразвукова обробка, що орієнтована на видалення зважених частинок, колоїдів і частини органічних домішок, які є основною причиною засмічення емітерів у системах краплинного зрошення [7]. Хімічні методи охоплюють коагуляцію і флокуляцію, реагентне окиснення (хлор, гіпохлорит, озон, пероксид водню), корекцію кислотно-лужного стану та реагентне пом'якшення для переведення розчинених солей жорсткості у нерозчинні форми з подальшим видаленням осаду [8]. Біологічні методи ґрунтуються на використанні мікроорганізмів у біореакторах, біофільтрах, спорудах типу штучних заболочених територій для розкладання органічних забруднень, зменшення біохімічного споживання кисню та часткового знезараження, що особливо актуально при повторному використанні очищених стічних вод для зрошення. Мембранні технології (мікрофільтрація, ультрафільтрація, нанофільтрація, зворотний осмос) забезпечують селективне вилучення розчинених солей, органічних сполук і патогенних мікроорганізмів та дозволяють отримувати воду стабільної якості, придатну для краплинного поливу і приготування живильних розчинів у закритих ґрунтових і безґрунтових системах [9, 10]. Сорбційні методи передбачають застосування природних і модифікованих сорбентів (природні цеоліти, активоване вугілля, композиційні матеріали на основі графену тощо) для селективного вилучення амонію, важких металів, органічних мікрозабруднювачів та частини надлишкової мінералізації, що підвищує придатність солонуватих ґрунтових вод до використання у зрошенні сільськогосподарських культур [11, 12]. Теплові методи включають підігрів, кип'ятіння, випаровування та конденсацію (включно з вакуумною дистиляцією), наприклад сонячні опріснювачі та інші варіанти термічної дистиляції, які дають змогу одночасно здійснювати дезінфекцію та знесолення води [13, 14]. На практиці найбільш поширені комбіновані схеми, що поєднують механічну фільтрацію, знезараження (ультрафіолет, окисники) і глибинну обробку (мембранну, сорбційну або теплову), що забезпечує оптимальний баланс між якістю води, енергоспоживанням і капітальними витратами.

1.2 Характеристика, переваги та недоліки основних методів обробки води

Фізичні методи фільтрації є базовим елементом практично всіх систем підготовки поливної води. Вони відзначаються конструктивною простотою, порівняно низькою вартістю, можливістю автоматизації процесів промивки та невисокими питомими енерговитратами, що зумовлює їх широке застосування у тепличних господарствах. Основним недоліком є неможливість видалення розчинених солей, значної частини колоїдних частинок і бактерій, а також потреба в регулярному обслуговуванні (промивка, заміна фільтруючого завантаження), особливо при підвищеному вмісті заліза, марганцю та органіки у вихідній воді. Хімічні методи дозволяють ефективно знижувати мутність і кольоровість, здійснювати дезінфекцію й запобігати утворенню карбонатних відкладень у трубопроводах і обладнанні за рахунок корекції кислотно-лужного балансу та переведення гідрокарбонатів кальцію і магнію у нерозчинні карбонати. Їх перевагами є відносно невеликі капітальні витрати, технологічна гнучкість і можливість адаптації до змін складу води в процесі експлуатації. Водночас використання реагентів потребує точного дозування, постійного контролю залишкових концентрацій, а надмірні дози окисників і дезінфектантів можуть бути токсичними для рослин, погіршувати мікробіологічний стан ґрунту та сприяти утворенню небажаних побічних продуктів [15, 16]. Мембранні технології забезпечують високий ступінь знесолення і видалення широкого спектра забруднювачів, що робить їх особливо привабливими у випадку використання ґрунтових та поверхневих вод з підвищеною мінералізацією, а також у замкнених системах з повторним використанням дренажних вод. Вони характеризуються компактністю, можливістю повної автоматизації та стабільною якістю пермеату, однак потребують значних енергетичних затрат на створення робочого тиску, є чутливими до забруднення поверхні мембран і потребують наявності розвиненого блоку попередньої підготовки (фільтрація, усунення накипоутворення). Додатковою проблемою є утворення концентрованих розсолів, утилізація яких у межах агроландшафтів Причорномор'я повинна здійснюватися

з урахуванням ризиків вторинного засолення ґрунтів [17]. Сорбційні методи на основі природних цеолітів, активованого вугілля, а також сучасних наноструктурованих матеріалів дозволяють вибірково вилучати певні групи забруднювачів, у першу чергу іони амонію, важкі метали та частину органічних речовин. Їх перевагою є можливість роботи при низьких тисках і температурах, відносно просте обладнання та порівняно невеликі енерговитрати, що важливо для малих і середніх тепличних господарств. До недоліків належать обмежена сорбційна ємність, необхідність періодичної регенерації або заміни завантаження, а також чутливість до конкурентних іонів, що потребує детального аналізу хімічного складу води на етапі проектування [18]. Біологічні методи мають високий потенціал щодо обробки стічних і дренажних вод із значним вмістом органіки та азотовмісних сполук, забезпечуючи зниження екологічного навантаження на водні об'єкти і можливість часткового повторного використання очищеної води у зрошенні. Водночас для їх реалізації потрібні значні площі, час на формування та підтримання активної біоти, а ефективність суттєво залежить від температурних умов, що може обмежувати використання традиційних біометодів у інтенсивних тепличних комплексах з обмеженою територією. Теплові методи (підігрів, випаровування, дистиляція) забезпечують надійне знезараження та видалення солей жорсткості, однак у класичному виконанні характеризуються високою енергоємністю. Цей недолік може бути частково компенсований шляхом застосування низькотемпературної теплової енергії, багатоступеневих схем випаровування з рекуперацією теплоти та інтеграції процесів водопідготовки з системами теплопостачання тепличних комплексів [19].

1.3 Показники енергоефективності методів обробки води

В умовах зростання вартості паливно-енергетичних ресурсів одним із ключових критеріїв вибору технології підготовки ґрунтових або поверхневих вод для тепличних комплексів є її енергоефективність. До основних показників належать питомі енерговитрати на обробку одиниці об'єму води (кВт · год/м^3), а також інтегральні економічні показники, такі як приведена собівартість підготовленої води протягом життєвого циклу системи [20]. Аналіз роботи очисних споруд і станцій водопідготовки свідчить, що механічні фільтраційні системи та більшість сорбційних установок характеризуються відносно низькими питомими енерговитратами, основна частина яких пов'язана з роботою насосного обладнання та періодичною промивкою фільтрів. Мембранні системи зворотного осмосу та нанофільтрації, навпаки, потребують значних витрат електроенергії для створення робочого тиску, але при цьому забезпечують високий ступінь знесолення, що може компенсувати енергозатрати за рахунок зменшення ризику засолення ґрунтів та підвищення врожайності культур [21]. Теплові методи без використання рекуперації теплоти зазвичай мають найбільші питомі енерговитрати, однак їх інтеграція з низькопотенційними та відновлювальними джерелами теплоти (сонячна енергія, теплова енергія ґрунту, теплова енергія відпрацьованих потоків теплиці тощо) дозволяє суттєво підвищити загальну енергоефективність системи. Дослідження сучасних водозберігаючих стратегій для теплиць показують, що поєднання енергоощадних схем кліматичного контролю (теплові насоси, рекуперація вологи) з локальними технологіями опріснення та доочистки поливної води дає змогу одночасно зменшити витрати енергії та води на одиницю виробленої продукції [22, 23].

1.4 Використання теплової енергії для обробки ґрунтових та поверхневих вод

Використання теплової енергії для обробки ґрунтових та поверхневих вод є перспективним напрямком для тепличних комплексів, які вже мають розвинені системи теплопостачання та можуть залучати низькопотенційні та відновлювальні джерела теплоти. Вакуумна дистиляція належить до найбільш ефективних теплових методів опріснення, оскільки дає змогу здійснювати випаровування при понижених температурах за рахунок зниження тиску, що спрощує інтеграцію з системами низькотемпературного теплопостачання [24]. Сучасні промислові установки вакуумної дистиляції, створені для очищення промислових стічних вод і високомінералізованих розсолів, демонструють можливість досягнення високого ступеня знесолення та видалення органічних забруднювачів, що відкриває перспективи їх адаптації до умов тепличних господарств [25]. Окрему групу становлять системи сонячного опріснення і випаровування з подальшою конденсацією водяної пари, які можуть одночасно виконувати функції охолодження внутрішнього повітря теплиці, регулювання відносної вологості та отримання додаткової кількості прісної води. Такі системи органічно вписуються в концепцію «водно-енергетичного зв'язку» [26] і особливо актуальні для посушливих регіонів з високою сонячною радіацією, до яких належить Причорномор'я України. У цьому разі теплова обробка води розглядається не ізольовано, а як складова частина інтегрованого енерготехнологічного комплексу, де процеси опалення, охолодження і водопідготовки взаємопов'язані на основі єдиного теплового контуру [27].

1.5 Підігрів, випаровування, кип'ятіння та вакуумна дистиляція води

Підігрів ґрунтової або поверхневої води до температур 60–80 °С застосовуються, насамперед, для зниження карбонатної жорсткості шляхом термічного розкладання гідрокарбонатів кальцію та магнію з утворенням нерозчинних карбонатів, які можуть

бути видалені відстоюванням або фільтрацією [28]. Такий підхід одночасно зменшує ризик утворення накипу в трубопроводах, теплообмінниках і краплинних емітерах та частково покращує мікробіологічні показники води. Однак для повної дезінфекції, як правило, доцільно комбінувати підігрів із ультрафіолетовим опроміненням або дозуванням малих кількостей окисників [29, 30]. Кип'ятіння забезпечує високий рівень знезараження, але є найенергоємнішим способом обробки, якщо не застосовувати багатоступеневу рекуперацію теплоти. У зв'язку з цим сучасні системи орієнтуються на застосування вакуумної дистиляції, яка дозволяє знизити температуру фазового переходу та поєднати процес опріснення з використанням низькопотенційної теплоти [31]. Патентні та дослідницькі розробки у цій сфері підтверджують можливість отримання високоякісного дистиляту для технологічних потреб при порівняно невисоких температурах теплоносія. У контексті тепличних комплексів вакуумна дистиляція може також відігравати роль елемента кліматичного контролю, забезпечуючи кероване випаровувальне охолодження та регулювання вологості, що підвищує загальну енергетичну ефективність об'єкта [32, 33].

Перспективним напрямком для тепличних комплексів регіону є інтеграція блоків теплової обробки води (підігрів, термічне пом'якшення, вакуумна дистиляція, сонячне опріснення) у загальну систему енергозабезпечення об'єкта. Такий підхід дозволяє використовувати низькопотенційну теплоту від енергетичних установок, теплових насосів, сонячних колекторів, вентиляційних викидів і конденсату для реалізації процесів водопідготовки без істотного збільшення сумарних витрат палива, що є важливою передумовою підвищення енергетичної та економічної ефективності всесезонних тепличних комплексів Причорномор'я України.

1.6 Порівняння методів обробки води за наявністю промислового обладнання, вартістю, енергоспоживанням та інвестиційними витратами

Об'єктивна оцінка методів обробки ґрунтових та поверхневих вод для поливу вирощуваних культур потребує порівняння не лише за ефективністю видалення забруднювачів, але й за наявністю серійного промислового обладнання, рівнем капітальних (інвестиційних) витрат, питомим енергоспоживанням та приведеною собівартістю підготовленої води. За даними ФАО (Продовольча та сільськогосподарська організація ООН) та профільних оглядів, собівартість води для традиційних схем питного водопостачання зазвичай становить десяті частки долара США за 1 м^3, тоді як для знесоленої води – орієнтовно 0,3–0,6 дол./м^3 у разі опріснення солонуватих вод, і 0,7–1,0 дол./м^3 або більше для морської води. Додатково на капітальні витрати впливають глибина залягання водоносного горизонту, спосіб утилізації концентрату та локальні тарифи на енергоносії, які можуть змінювати сумарні витрати в рази [34–37]. Фізичні та хімічні методи (механічна фільтрація, коагуляція, реагентне пом'якшення, дезінфекція) є технологічно випробуваними та широко впровадженими. Відповідні фільтри, камери реакції, ультрафіолетові реактори і дозувальні станції випускаються серійно у широкому діапазоні продуктивностей, а типові питомі енерговитрати для таких систем складають близько 0,2–0,5 кВт · год/м^3, забезпечуючи собівартість води здебільшого нижче 0,1–0,2 дол./м^3 для ґрунтових та поверхневих вод з помірною мінералізацією [38]. Біологічні методи (біофільтри, аеротенки, штучні заболочені території) добре відпрацьовані для очищення стічних і дренажних вод, мають помірні інвестиційні витрати та питомі енерговитрати порядку 0,3–0,6 кВт · год/м^3, але потребують значних площ, що обмежує їх використання у високотехнологічних тепличних комплексах [39]. Мембранні технології (мікрофільтрація, ультрафільтрація, нанофільтрація, процеси зворотного осмосу та електродіалізу) повністю комерціалізовані і активно застосовуються для опріснення солонуватих ґрунтових вод (так для сільськогосподарських станцій у Йорданській долині, Європі та Сполучених Штатах капітальні витрати на зворотноосмотичні установки становлять орієнтовно 500–1000 дол. США на 1 м^3/добу продуктивності, а собівартість води – 0,2–0,6, іноді до 0,7–1,0 дол./м^3 при питомому енергоспоживанні 0,3–1,5 кВт·год/м^3 залежно від мінералізації) [40–42]. Сорбційні технології (активоване вугілля, природні цеоліти, поліфункціональні композитні сорбенти) мають середній рівень капітальних витрат і низьке енергоспоживання, проте експлуатаційні витрати помітно зростають унаслідок періодичної регенерації або заміни завантаження, що зумовлює їхнє використання переважно як селективних ступенів доочистки, а не як самостійного методу підготовки поливної води [43]. Теплові технології (багатоступенева випарна дистиляція, мембранна дистиляція, схеми зволоження–осушення) забезпечують практично повне знесолення (ступені видалення солей понад 99–99,9 %) і високий рівень знезараження, але вирізняються підвищеною енергоємністю порівняно з іншими методами. Сучасні техніко-економічні дослідження для багатоступеневої випарної дистиляції вказують на потребу в тепловій енергії у межах 50–80 кВт · год/м^3 дистиляту при додатковому електроспоживанні близько 2–3 кВт · год/м^3, що трансформується в собівартість води для великих багатоступеневих випарних систем на рівні 0,7–1,2 дол./м^3 [44–47].

У підсумку фізичні та хімічні методи мають найнижчі капітальні й експлуатаційні витрати, але не забезпечують глибокого знесолення; біологічні та сорбційні технології ефективні для органічних забруднювачів і окремих іонів, проте обмежені вимогами до

площі та витратами на сорбент; мембранні процеси становлять компроміс між інвестиціями, енергоємністю й гнучкістю контролю мінералізації, що робить їх базовим інструментом для підготовки солонуватих ґрунтових вод; теплові схеми доцільні переважно в спеціалізованих або інтегрованих енерготехнологічних системах, де є доступ до дешевого або відновлюваного джерела теплоти.

2. Якість поверхневих та ґрунтових вод Причорномор'я України

Причорномор'я охоплює південну частину України, що прилягає до Чорного та Азовського морів. Регіон характеризується посушливим кліматом, низьким коефіцієнтом зволоження та значним антропогенним навантаженням, що визначає специфіку його гідрографії та гідрохімії.

Поверхневі води регіону представлені нижніми течіями великих річок (Дніпро, Дунай, Дністер, Південний Буг), малими річками, а також лиманами та озерами.

Через високу випаровуваність та специфіку ґрунтів мінералізація річкових вод зростає з півночі на південь. Якщо в середній течії річок вона становить 0,3–0,8 г/дм^3, то в гирлових ділянках та малих річках може сягати 1,5–3,0 г/дм^3 і більше. За хімічним складом переважають сульфатно-хлоридні та хлоридно-натрієві води, особливо в маловодні періоди. Якість води річки Південний Буг біля Миколаєва представлена у таблиці 1 [48].

У лиманах та озерах Причорномор'я солоність варіюється від майже прісних (Дніпро-Бузький) до високо концентрованих розсолів (Куяльник – понад 200 г/дм^3).

Поверхневі води подекуди також насичені скидами промислових стічних вод та сільськогосподарськими стоками (пестициди, нітрати), що є наслідком інтенсивного зрошення земель та змивання дощовими стоками агрохімікатів.

Південь України розташований у межах Причорноморського артезіанського басейну. Рівень залягання підземних (ґрунтових) вод у ньому наступний – перший від поверхні горизонт залягає на глибинах від 1–3 м у заплавах річок та поблизу морів та до 15–30 м на плато. Прісні підземні води з мінералізацією до 1 г/дм^3 у регіоні є дефіцитними. Більшість горизонтів мають підвищену мінералізацію 2–5 г/дм^3, що робить їх непридатними для використання без попереднього очищення. За типом води це переважно хлоридно-натрієві та сульфатно-кальцієві. Глибокі водоносні горизонти (неогенового, палеогенового періодів) використовуються для централізованого водопостачання, проте часто мають підвищений вміст заліза, фтору та солей жорсткості [49].

Водні ресурси Причорномор'я України характеризуються високою природною мінералізацією та значним впливом господарської діяльності, що потребує суворого контролю якості та впровадження технологій обробки вихідної води для подальшого використання її у тепличних комплексах.

3. Якість поливної води для тепличних комплексів

Якість поливної води для систем зрошення в агровиробництві оцінюється за агрономічними, екологічними та технічними критеріями. Агрономічні критерії якості води визначають придатність її для отримання якісної сільськогосподарської продукції та мінімізації впливу на родючість ґрунтів (запобігання процесам підлуження, засолення, осолонцювання тощо). Екологічні критерії якості води оцінюють її придатність для зрошення з урахуванням забезпечення безпечного санітарно-гігієнічного (еколого-токсикологічного) стану й охорони навколишнього природного середовища від забруднення. Технічні критерії пов'язані з впливом води на роботоздатність та надійність елементів систем зрощення на які впливають процеси корозії, засмічення, замулення, біологічного зростання тощо [3]. Вони можуть відрізнятися в залежності від конструктивного виконання системи. Нормативні вимоги до якості поливної води на тепличних комбінатах представлені у таблиці 2.

Однією з основних проблем якості води в Причорноморському регіоні є її підвищена солоність. Вона майже завжди негативно впливає на продуктивність культури, але деякі культури більш стійкі до підвищення солевмісту. Це дозволяє розробляти певні агрономічні стратегії для вирощування з відбором культури та сорту для досягнення кращої врожайності при зменшенні витрат на обробку вихідної води [7]. Вплив солоності води на вирощування різних овочевих культур представлено у таблиці 3.

Таблиця 1. Якість води р. Південний Буг (Миколаїв)

Показник	Значення (Південний Буг, Миколаїв)	Норма для поливу (ДСТУ 2730:2015)	Оцінка придатності
Мінералізація (сухий залишок)	0,6–1,2 г/дм^3 (може зростати до 1,5)	< 1,0 г/дм^3	Обмежено придатна (ризик засолення)
Вміст хлоридів (Cl^-)	180–680 мг/дм^3	< 350 мг/дм^3	Перевищення (токсичне для деяких культур)
Вміст сульфатів (SO_4^{2-})	150–300 мг/дм^3	< 500 мг/дм^3	У межах норми
Водневий показник (pH)	7,8–8,5	6,5–8,5	У межах норми (лужна)
Каламутність	0,8–5,0 мг/дм^3	< 2,0 мг/дм^3	Часте перевищення (забиває крапельний полив)
Твердість загальна	7,0–12,0 ммоль/дм^3	<7,0 ммоль/дм^3	Висока (ризик вапнування ґрунту)

Таблиця 2. Вимоги до якості поливної води на тепличних комбінатах [50]

Показник	Допустимий вміст у воді
pH	6–8
Загальний вміст солей, кг/м^3	1,0–1,2
Оксид калію, оксид магнію, кг/м^3 (K_2O)	0,02
Сульфати, кг/м^3 (SO_4)	0,35
Оксид натрію, кг/м^3 (Na_2O)	0,15–0,18
Хлор, кг/м$_3$ (Cl)	0,15–0,18
Залізо, мг/л (Fe)	1
Бор, мг/л (B)	0,3–0,6
Фтор, мг/л (F)	0,6–1,0
Цинк, мг/л (Zn)	1,0–2,0
Загальна жорсткість, мг-екв/л	4–4,5
Феноли і діючі на смак сполуки	не допускаються
БПК повн. мг O_2/л	3,0–6,0

Таблиця 3. Вплив значення солоності зрошувальної води для різних овочевих культур [7]

Овочева культура	Показник електропровідності ЕС, мСм/см		
	Втрата врожайності 0 %	Втрата врожайності 10 %	Втрата врожайності 25 %
Квасоля	0,7	1,0	1,5
Буряк	2,7	3,4	4,5
Броколі	1,9	2,6	3,7
Капуста	1,2	1,9	2,9
Диня	1,7	2,6	5,5
Стручковий перець	1,0	1,5	2,2
Морква	0,7	1,1	1,9
Селера	1,2	2,3	3,9
Огірок	1,7	2,2	2,9
Салат-латук	0,9	1,4	2,1
Цибуля	0,8	1,2	1,8
Картопля	1,1	1,7	2,5
Редиска	0,8	1,3	2,1
Шпинат	1,3	2,2	3,5
Гарбуз	2,1	2,6	3,2
Солодка картопля	1,0	1,6	2,5
Помідор	0,5	2,3	4,4
Кавун	1,5	2,4	3,8

Також важливою проблемою для деяких ділянок Причорноморського регіону є забруднення води іншими елементами, у тому числі важкими металами, внаслідок надходження викидів від промисловості та транспорту. Ці елементи по різному впливають на культури та реагують з ґрунтом. Деякі з них у невеликих кількостях потрібні рослинам, а при перевищенні стають токсичними. Деякі реагують з ґрунтом і накопичуються, та не можуть бути видалені шляхом промивання ґрунту, а потім негативно впливають на рослини або надходять до рослин.

4. Оцінка потреб води для тепличного господарства

Промислові тепличні комплекси мають декілька систем водопостачання, які поділяються на дві основні групи – системи виробничого водопостачання та санітарно-побутові системи водопостачання. Переважна кількість води витрачається саме на задоволення потреб виробничого водоспоживання.

Витрата води на виробниче водоспоживання у теплиці залежить від кількох факторів – вирощуваної культури та застосованої агротехніки, конструктивного виконання теплиці, прийнятої технології поливу тощо. Але основним фактором є кліматичні та погодні умови, а саме надходження сонячної радіації, температура зовнішнього повітря та його вологість, швидкість вітру та його вплив на теплицю.

До систем виробничого водоспоживання відносяться системи поливу рослин, системи випарного охолодження та дозволоження повітря, а також системи розчинів отрутохімікатів, витрата води у яких незначна у порівнянні з попередніми системами.

Для оцінці продуктивності системи обробки вихідної води розраховуються помісячні потреби теплиці у водоспоживанні, що було виконано для кліматичних умов півдня Миколаївської області. У розрахунку прийнята однопрогонова теплиця з двосхилим покриттям шириною 18 м між осями та довжиною – 86,45 між осями. Загальна площа теплиці складає 1556 м^2, посадкова площа 1060 м^2. Вирощувана культура – огірок.

Згідно нормативного документа [50] були розраховані помісячні максимальні потреби на полив огірка при дощуванні для вирощування у зимово-весняний і осінньо-літній сезони. Результати розрахунку представлені у таблиці 4. При краплинному поливі потреба у воді буде на 30 % менша.

Аналогічно згідно з [50] було визначені помісячні потреби води на роботу системи випарного охолодження та дозволоження повітря обраної теплиці, які представлені у таблиці 5.

В умовах дефіциту якісної води для поливання, та в наслідок цього необхідності витрат на побудову і експлуатацію систем обробки води для тепличних комплексів, постає питання вибору раціональної продуктивності системи обробки вихідної води, оскільки помісячне водоспоживання не є постійним, а також конструктивне виконання сучасних систем вентиляції, які необхідні для видалення надлишку вологи з теплиці, дозволяють повертати частину води з вентильованого повітря.

У таблиці 6 представлені: загальна кількість води, яка необхідна для виробничого процесу у обраній теплиці за умови видалення усієї вологи вентиляцією без засобів її повернення; кількість вологи яка

Таблиця 4. Потреби на полив огірка при дощуванні з вирощуванням у зимово-весняний і осінньо-літній сезони

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	За рік
Питома витрата води, л/м^2	25	35	45	96	120	200	200	120	80	48	25	15	
Місячна витрата, т	26,5	37,1	47,7	101,8	127,2	212,0	212,0	127,2	84,8	50,9	26,5	15,9	1069,5

Таблиця 5. Потреби води на роботу системи випарного охолодження та дозволоження повітря теплиці

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	За рік
Питома витрата води для фактичного приходу сонячної радіації, л/м^2	0,0	0,0	53,2	100,4	160,5	216,8	250,2	200,7	130,5	66,6	0,0	0,0	
Місячна витрата, т	0,0	0,0	82,9	156,2	249,8	337,4	389,3	312,2	203,1	103,6	0,0	0,0	1834,5

Таблиця 6. Помісячні баланси виробничого водоспоживання для обраної теплиці

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	За рік
Загальна потреба виробничого водопостачання, т	26,5	37,1	130,6	258,0	377,0	549,4	601,3	439,4	287,9	154,5	26,5	15,9	2904,0
Втрати вологи при інфільтрації повітря, т	23,9	33,4	101,3	80,3	60,3	37,4	27,9	34,3	53,1	77,5	23,9	14,3	567,5
Дренаж води, т	2,7	3,7	4,8	10,2	12,7	21,2	21,2	12,7	8,5	5,1	2,7	1,6	107,0
Кількість вологи, яка повинна бути видалена системою вентиляції, т	0,0	0,0	24,5	167,5	304,0	490,8	552,3	392,4	226,3	71,8	0,0	0,0	2229,6

втрачається при інфільтрації зовнішнього повітря через огороджувальні конструкції (дані отримані при теплотехнічному розрахунку теплиці) та не може бути повернена; кількість дренажу; а також кількість вологи для якої можуть бути розглянуті технології її часткової конденсації та повернення до системи водопостачання (волога, що видаляється системою вентиляції). Це дозволяє планувати помісячний баланс водоспоживання.

Суттєвий вплив на потреби виробничого водопостачання чинить вибір культури вирощування, агротехніки, конструкції теплиці, технології поливу та конструктивного виконання системи вентиляції. Це потребує комплексного підходу для збалансованого проектування тепличних комплексів з урахуванням якості вихідної води та можливостей її доведення до якості поливної води.

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

Проведений аналіз показав, що якість поверхневих та ґрунтових вод Причорноморського регіону України характеризується підвищеною мінералізацією, значним вмістом солей жорсткості, хлоридів, органічних домішок та періодичним забрудненням агрохімікатами й техногенними компонентами. У більшості випадків такі води не можуть використовуватись у сучасних системах зрошення без попередньої підготовки.

Встановлено, що традиційні фізичні та хімічні методи водопідготовки забезпечують ефективне видалення зважених речовин, корекцію жорсткості та часткове знезараження, проте не дозволяють повною мірою вирішити проблему підвищеної мінералізації води. Найбільш ефективними для обробки солонуватих ґрунтових вод є мембранні технології, зокрема нанофільтрація та зворотний осмос, які забезпечують стабільну якість підготовленої води та високий ступінь знесолення. Показано, що теплові методи, включаючи вакуумну дистиляцію та сонячне опріснення, мають значний потенціал для інтеграції у системи енергозабезпечення тепличних комплексів, особливо за умови використання низькопотенційної та відновлюваної теплоти. Водночас їх широке впровадження стримується високою енергоємністю та значними інвестиційними витратами.

Визначено, що найбільш перспективними для тепличних комплексів Причорномор'я України

є комбіновані системи водопідготовки. Такий підхід дозволяє забезпечити необхідну якість поливної води, знизити навантаження на природні водні ресурси та підвищити енергетичну ефективність тепличних господарств.

Отримані результати можуть бути використані як наукова основа для подальшого проектування енергоефективних систем водопідготовки всесезонних тепличних комплексів південних регіонів України.

ВИСНОВКИ

1. Визначено, що поверхневі та ґрунтові води Причорномор'я України у більшості випадків характеризуються підвищеною мінералізацією, жорсткістю та вмістом хлоридів, що обмежує їх використання у тепличних комплексах без попередньої підготовки.

2. Сучасні найбільш розповсюджені методи обробки води є найбільш доступними та енергоощадними, однак не дозволяють повною мірою вирішити проблему підготовки поливної води необхідної якості.

3. Мембранні технології забезпечують найвищу якість підготовленої води та є найбільш перспективними для обробки солонуватих ґрунтових вод для систем краплинного зрошення.

4. Теплові методи обробки води є перспективними при інтеграції їх з енергетичними системами тепличних комплексів за умов використання відновлюваних та низькопотенційних джерел енергії.

5. Найбільш ефективними для тепличних комплексів Причорномор'я є комбіновані системи водопідготовки, що поєднують декілька методів очищення в залежності від якості вихідної води.

REFERENCES

[1] Kovalov, M. M., Zviezdun, O. M., Mykhailova, D. (2020). Ahroekolohichna otsinka yakosti pidzemnykh vod dlia system mikrozroshennia v umovakh Pivnichnoho Stepu Ukrainy [Agroecological assessment of groundwater quality for microirrigation systems in the Northern Steppe of Ukraine]. *Vodni bioresursy ta akvakultura*. *1*. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32851/wba.2020.1.2

[2] Snizhko, S., Shevchenko, O., & Didovets, Yu. (2021). *Analiz vplyvu klimatychnykh zmin na vodni resursy Ukrainy [Analysis of the impact of climate change on Ukraine's water resources]*. Tsentr ekolohichnykh initsiatyv «Ekodiia». [in Ukrainian]. https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/analiz-vplyvu-vodni-resursy-full.pdf

[3] IVPiM NAAN, NUBiP Ukrainy. (2015). *Zroshennia. Yakist vody dlia system kraplynnoho zroshennia. Ahronomichni, ekolohichni ta tekhnichni kryterii [Irrigation. Water quality for systems of a drip irrigation. Agronomical, ecological and technical criteria]. (DSTU 7591:2014)*. Minekonomrozvytku Ukrainy. [in Ukrainian]. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10449-dstu_7591_2014_zroshennya._yakist_vody_dlya_system_kr.pdf

[4] Barzigar, A., Edalatpour, A., Mujumdar, A. S., & Hosseinalipour, S. M. (2025). Integrating renewable energy technologies into seawater greenhouses for sustainable water and food production. *Energy Conversion and Management: X*, *28*, 101353. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101353

[5] Guleria, T., van den Broeke, J., Platteau, I., Rijnaarts, T., Alhadidi, A., Gutierrez, L., & Cornelissen, E. (2024). Water reuse and resource recovery from greenhouse wastewater by capacitive electrodialysis at pilot scale. *Desalination*, *583*, 117669. https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117669

[6] Zapolskyi, A. K. (2005). *Vodopostachannia, vodovidvedennia ta yakist vody [Water supply, drainage and water quality]*. Vyshcha shkola. [in Ukrainian].

[7] De Pascale, S., Orsini, F., & Pardossi, A. (2013). *Irrigation water quality for greenhouse horticulture*. In *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas* (FAO Plant Production and Protection Paper No. 217, pp. 169–204). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.researchgate.net/publication/255723773_Irrigation_water_quality_for_greenhouse_horticulture

[8] Jafari, M., Asadi, E., & Fakheri Fard, A. (2024). Operational management of water quality to prevent physical, chemical, and microbial contaminations in hydroponic cultivation. *Water Supply*, *24*(9), 3046–3060. https://doi.org/10.2166/ws.2024.192

[9] Akinyemi, B. T., Ogundele, O. D., & Afolabi, A. B. (2023). Advancements in Sustainable Membrane Technologies for Enhanced Remediation and Wastewater Treatment: A Comprehensive Review. *Acadlore Transactions on Geosciences*, *2*(4), 196–207. https://doi.org/10.56578/atg020402

[10] Al-Hashimi, O., Hashim, K., Loffill, E., Marolt Čebašek, T., Nakouti, I., Faisal, A. A. H., & Al-Ansari, N. (2021). A Comprehensive Review for Groundwater Contamination and Remediation: Occurrence, Migration and Adsorption Modelling. *Molecules*, *26*(19), 5913. https://doi.org/10.3390/molecules26195913

[11] Trus, I. M., Vorobiova, V. I., Halysh, V. V., & Skyba, M. I. (2021). *Rozrobka polifunktsionalnykh materialiv dlia resursozberihaiuchykh ekolohichno bezpechnykh tekhnolohii [Development of multifunctional materials for resource-saving, environmentally friendly technologies]*. Vydavnychyi dim "Kondor". [in Ukrainian].

[12] Halysh, V. V., Trus, I. M., Radovenchyk, Ya. V., Fleisher, H. Yu., & Homelia, M. D. (2020). *Kompleksni tekhnolohii sorbtsiinoho ochyshchennia vody vid yoniv vazhkykh metaliv [Complex technologies for sorption water purification from heavy metal ions]*. Vydavnychyi dim "Kondor". [in Ukrainian].

[13] Rajesh, S., & Chiranjeevi, C. (2024). Hybrid thermal desalination systems for sustainable development – A critical review. *Solar Energy*, *270*, 112364. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112364

[14] Zou, H., Wang, F., Zeng, Z., Zhu, J., Zha, L., Huang, D., Li, J., & Wang, R. (2025). Next-generation water-saving strategies for greenhouses using a nexus approach with modern technologies. *Nature Communications*, *16*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-025-57388-3

[15] Homelia, M. D., Shablii, T. O., & Radovenchyk, Ya. V. (2019). *Fizyko-khimichni osnovy protsesiv ochyshchennia vody [Physico-chemical foundations of water purification processes]*. Vydavnychyi dim «Kondor». [in Ukrainian].

[16] Petruk, V. H., Severyn, L. I., Vasylkivskyi, I. V., & Bezvoziuk, I. I. (2016). *Pryrodookhoronni tekhnolohii. Chastyna druha: Metody ochyshchennia stichnykh vod [Environmental protection technologies. Part two: Wastewater treatment methods]*. Vinnytskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. [in Ukrainian].

[17] Baker, R. W. (2023). *Membrane technology and applications* (4th ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119686026

[18] Hardyanti, N., Susanto, H., Kusuma, F., & Budihardjo, M. (2023). A Bibliometric Review of Adsorption Treatment with an Adsorbent for Wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies*, *32*(2), 981–989. https://doi.org/10.15244/pjoes/156472

[19] Wang, Q., Guo, S., Ali, M., Song, X., Tang, Z., Zhang, Z., Zhang, M., & Luo, Y. (2022). Thermally enhanced bioremediation: A review of the fundamentals and applications in soil and groundwater remediation. *Journal of Hazardous Materials*, *433*, 128749. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128749

[20] Dimitropoulou, A.-M. N., Maroulis, V. Z., & Giannini, E. N. (2023). A Simple and Effective Model for Predicting the Thermal Energy Requirements of Greenhouses in Europe. *Energies*, *16*(19), 6788. https://doi.org/10.3390/en16196788

[21] Burtna, I. A., & Lytvynenko, D. V. (2012). Ohliad membrannikh tekhnolohii ochystky vody u vodopostachanni ta vodopidhotovtsi [Membrane technologies of water purification at water treatment processes]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *6*(10(60), 4–6. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.5594

[22] Soussi, A., Zero, E., Ouammi, A., Zejli, D., Zahmoun, S., & Sacile, R. (2025). Smart greenhouse farming: a review towards near zero energy consumption. *Discover Cities*, *2*(1). https://doi.org/10.1007/s44327-025-00096-w

[23] Soussi, M., Chaibi, M. T., Buchholz, M., & Saghrouni, Z. (2022). Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions. *Agronomy*, *12*(3), 626. https://doi.org/10.3390/agronomy12030626

[24] ElKasaby, M. M., Hassan, M. A., & Khalil, A. (2023). Energy and economic performance assessment of a solar-assisted regenerative vacuum membrane desalination system. *Applied Thermal Engineering*, *225*, 120181. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120181

[25] Khedher, M., Phogat, V., Chow, C. W. K., Palmer, N., Anese, J., Tucker, A., Petrie, P., van den Akker, B., & Rameezdeen, R. (2025). Evaluation of current inland desalination of moderately saline brackish groundwater for expansion of irrigated agriculture. *Groundwater for Sustainable Development*, *29*, 101449. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101449

[26] Zagorodny, A., Bogdanov, V., Ermolieva, T., Komendantova, N., Havlik, P. (2026). *Integrated Solutions to Food–Energy–Water–Environmental NEXUS Security Modeling and Management: Robust Downscaling and Models' Linkage Procedures*. In: Zagorodny, A., Bogdanov, V., Zaporozhets, A., Ermolieva, T. (eds) Nexus of Sustainability. Studies in Systems, Decision and Control, vol 627. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-03616-2_1

[27] El-Awady, M. H., & El-Ghetany, H. H. (2014). Integrated solar green house for water desalination and plantation in remote arid Egyptian communities: modeling and analysis. *International Journal of Energy and Environmental Research*, *2*(4), 37–50. https://eajournals.org/wp-content/uploads/Integrated-Solar-Green-House-For-Water-Desalination-And-Plantation-In-Remote-Arid-Egyptian-Communities-.pdf&ved=2ahUKEwi_ocXQitOVAxXcHBAIHXvpLkYQFnoECBgQAQ&usg=AOvVaw2k9CymSkloTXXgoBuk8wDw

[28] Homelia, M. D., Shablii, T. O., Vember, V. V., & Tverdokhlib, M. M. (2022). *Kondytsiiuvannia vody dlia promyslovosti. Laboratornyi praktykum [Water Conditioning for Industry. Laboratory Workshop]*. Kyivskyi politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho. [in Ukrainian]. https://ela.kpi.ua/bitstreams/0e4b170f-efe5-4ae7-9c11-8f9322172ff1/download

[29] Vivar, M., Pichel, N., & Fuentes, M. (2017). Solar disinfection of natural river water with low microbiological content (10–103CFU/100ml) and evaluation of the thermal contribution to water purification. *Solar Energy*, *141*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.019

[30] Afitiri, A.-R., Appah Aram, S., & Martienssen, M. (2024). Systematic review of the effects of advanced oxidation processes integration with solar water disinfection for improved drinking water production. *Waste Management Bulletin*, *1*(4), 52–59. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.08.005

[31] Peters, C. D., & Hankins, N. P. (2021). Making zero-liquid discharge desalination greener: Utilising low-grade heat and vacuum membrane distillation for the regeneration of volatile draw solutes. *Desalination*, *507*, 115034. https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115034

[32] Hijjaji, K., Frikha, N., Gabsi, S., & Kheiri, A. (2022). Study of a solar HDH desalination unit powered greenhouse for water and humidity self-sufficiency. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, *14*(3), 335–351. https://doi.org/10.1007/s40095-022-00520-6

[33] Mamouri, S. J., Tan, X., Klausner, J. F., Yang, R., & Bénard, A. (2020). Performance of an integrated greenhouse equipped with Light-Splitting material and an HDH desalination unit. *Energy Conversion and Management*: *X*, *7*, 100045. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100045

[34] Khedher, M., Phogat, V., Chow, C. W. K., Palmer, N., Anese, J., Tucker, A., Petrie, P., van den Akker, B., & Rameezdeen, R. (2025). Evaluation of current inland desalination of moderately saline brackish groundwater for expansion of irrigated agriculture. *Groundwater for Sustainable Development*, *29*, 101449. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101449

[35] Butt, A. Q., Yaseen, G., Bachaya, A., & Latif, A. (2025). Unlocking water sustainability by addressing SDG 6: Macrophyte-based wastewater treatment for agricultural irrigation in Pakistan. *Physics and Chemistry of the Earth*, *Parts A/B/C*, *141*, 104099. https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.104099

[36] World Bank. (n.d.). *Annual freshwater withdrawals, agriculture (% of total freshwater withdrawal)*. World Development Indicators. Retrieved February 27, 2026, from https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWAG.ZS

[37] Shokri, A., & Sanavi Fard, M. (2023). Techno-economic assessment of water desalination: Future outlooks and challenges. *Process Safety and Environmental Protection*, *169*, 564–578. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.007

[38] Magni, M., Jones, E. R., Bierkens, M. F. P., & van Vliet, M. T. H. (2025). Global energy consumption of water treatment technologies. *Water Research*, *277*, 123245. https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123245

[39] Cardoso, B. J., Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2021). Energy performance factors in wastewater treatment plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, *322*, 129107. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129107

[40] Pearson, J. L., Michael, P. R., Ghaffour, N., & Missimer, T. M. (2021). Economics and Energy Consumption of Brackish Water Reverse Osmosis Desalination: Innovations and Impacts of Feedwater Quality. *Membranes*, *11*(8), 616. https://doi.org/10.3390/membranes11080616

[41] Montano, B. (2024). Historical Analysis of Resilience in Spanish Desalination Companies: Period 1980–2024. *Water*, *16*(22), 3318. https://doi.org/10.3390/w16223318

[42] Thiloka Edirisooriya, E. M. N., Wang, H., Banerjee, S., Longley, K., Wright, W., Mizuno, W., & Xu, P. (2024). Economic feasibility of developing alternative water supplies for agricultural irrigation. Current Opinion in Chemical Engineering, *43*, 100987. https://doi.org/10.1016/j.coche.2023.100987

[43] Mkilima, T., Devrishov, D., Assel, K., Ubaidulayeva, N., Tleukulov, A., Khassenova, A., Yussupova, N., & Birimzhanova, D. (2022). Natural Zeolite for The Purification of Saline Groundwater and Irrigation Potential Analysis. *Molecules*, *27*(22), 7729. https://doi.org/10.3390/molecules27227729

[44] ElKasaby, M. M., Hassan, M. A., & Khalil, A. (2023). Energy and economic performance assessment of a solar-assisted regenerative vacuum membrane desalination system. *Applied Thermal Engineering*, *225*, 120181. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120181

[45] Rajesh, S., & Chiranjeevi, C. (2024). Hybrid thermal desalination systems for sustainable development – A critical review. *Solar Energy*, *270*, 112364. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112364

[46] Baniasad Askari, I., & Ameri, M. (2021). A techno-economic review of multi effect desalination systems integrated with different solar thermal sources. *Applied Thermal Engineering*, *185*, 116323. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116323

[47] Zubair, M. I., Al-Sulaiman, F. A., Antar, M. A., Dini, S., & Ibrahim, N. I. (2020). Performance and cost assessment of a solar HDH desalination system integrated with thermal storage: a case study. *Desalination and Water Treatment*, *173*, 86–104. https://doi.org/10.5004/dwt.2020.24686

[48] Khilchevskyi, V. K., Chunarov, O. V., Romas, M. I., ta in. (2009). *Vodni resursy ta yakist richkovykh vod baseinu Pivdennoho Buhu [Water resources and river water quality of the Southern Bug basin]*. Nika-Tsentr. [in Ukrainian].

[49] Upravlinnia ekolohii ta pryrodnykh resursiv Mykolaivskoi oblasnoi derzhavnoi administratsii. (2025). *Dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Mykolaivskii oblasti u 2024 rotsi [Report on the state of the environment in the Mykolaiv region in 2024]*. [in Ukrainian]. https://ecolog.mk.gov.ua/store/files/1758180655.pdf

[50] UkrNDIahroproekt. (2007). *Teplychni i oranzhereini pidpryiemstva, sporudy zakhyshchenoho gruntu dlia fermerskykh (selianskykh) hospodarstv [Greenhouse and orangery enterprises, protected soil structures for farms (peasant farms)]. (VNTP APK–19–07)*. Ministerstvo ahrarnoi polityky Ukrainy. [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Ковальов, М. М., Звєздун, О. М., Михайлова, Д. (2020). Агроекологічна оцінка якості підземних вод для систем мікрозрошення в умовах Північного Степу України. *Водні біоресурси та аквакультура*. *1*. https://doi.org/10.32851/wba.2020.1.2

[2] Сніжко, С., Шевченко, О., & Дідовець, Ю. (2021). *Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України*. Центр екологічних ініціатив «Екодія». https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/analiz-vplyvu-vodni-resursy-full.pdf

[3] ІВПіМ НААН, НУБіП України. (2015). *Зрошення. Якість води для систем краплинного зрошення. Агрономічні, екологічні та технічні критерії*. (*ДСТУ 7591:2014*). Мінекономрозвитку України. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10449-dstu_7591_2014_zroshennya._yakist_vody_dlya_system_kr.pdf

[4] Barzigar, A., Edalatpour, A., Mujumdar, A. S., & Hosseinalipour, S. M. (2025). Integrating renewable energy technologies into seawater greenhouses for sustainable water and food production. *Energy Conversion and Management*: *X*, *28*, 101353. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101353

[5] Guleria, T., van den Broeke, J., Platteau, I., Rijnaarts, T., Alhadidi, A., Gutierrez, L., & Cornelissen, E. (2024). Water reuse and resource recovery from greenhouse wastewater by capacitive electrodialysis at pilot scale. *Desalination*, *583*, 117669. https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117669

[6] Запольський, А. К. (2005). *Водопостачання, водовідведення та якість води*. Вища школа.

[7] De Pascale, S., Orsini, F., & Pardossi, A. (2013). *Irrigation water quality for greenhouse horticulture*. In *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas* (FAO Plant Production and Protection Paper No. 217, pp. 169–204). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.researchgate.net/publication/255723773_Irrigation_water_quality_for_greenhouse_horticulture

[8] Jafari, M., Asadi, E., & Fakheri Fard, A. (2024). Operational management of water quality to prevent physical, chemical, and microbial contaminations in hydroponic cultivation. *Water Supply*, *24*(9), 3046–3060. https://doi.org/10.2166/ws.2024.192

[9] Akinyemi, B. T., Ogundele, O. D., & Afolabi, A. B. (2023). Advancements in Sustainable Membrane Technologies for Enhanced Remediation and Wastewater Treatment: A Comprehensive Review. *Acadlore Transactions on Geosciences*, *2*(4), 196–207. https://doi.org/10.56578/atg020402

[10] Al-Hashimi, O., Hashim, K., Loffill, E., Marolt Čebašek, T., Nakouti, I., Faisal, A. A. H., & Al-Ansari, N. (2021). A Comprehensive Review for Groundwater Contamination and Remediation: Occurrence, Migration and Adsorption Modelling. *Molecules*, *26*(19), 5913. https://doi.org/10.3390/molecules26195913

[11] Трус, І. М., Воробйова, В. І., Галиш, В. В., & Скиба, М. І. (2021). *Розробка поліфункціональних матеріалів для ресурсозберігаючих екологічно безпечних технологій*. Видавничий дім «Кондор».

[12] Галиш, В. В., Трус, І. М., Радовенчик, Я. В., Флейшер, Г. Ю., & Гомеля, М. Д. (2020). *Комплексні технології сорбційного очищення води від йонів важких металів*. Видавничий дім «Кондор».

[13] Rajesh, S., & Chiranjeevi, C. (2024). Hybrid thermal desalination systems for sustainable development – A critical review. *Solar Energy*, *270*, 112364. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112364

[14] Zou, H., Wang, F., Zeng, Z., Zhu, J., Zha, L., Huang, D., Li, J., & Wang, R. (2025). Next-generation water-saving strategies for greenhouses using a nexus approach with modern technologies. *Nature Communications*, *16*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-025-57388-3

[15] Гомеля, М. Д., Шаблій, Т. О., & Радовенчик, Я. В. (2019). *Фізико-хімічні основи процесів очищення води*. Видавничий дім «Кондор».

[16] Петрук, В. Г., Северин, Л. І., Васильківський, І. В., & Безвозюк, І. І. (2016). *Природоохоронні технології. Частина друга: Методи очищення стічних вод*. Вінницький національний технічний університет.

[17] Baker, R. W. (2023). *Membrane technology and applications* (4th ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119686026

[18] Hardyanti, N., Susanto, H., Kusuma, F., & Budihardjo, M. (2023). A Bibliometric Review of Adsorption Treatment with an Adsorbent for Wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies*, *32*(2), 981–989. https://doi.org/10.15244/pjoes/156472

[19] Wang, Q., Guo, S., Ali, M., Song, X., Tang, Z., Zhang, Z., Zhang, M., & Luo, Y. (2022). Thermally enhanced bioremediation: A review of the fundamentals and applications in soil and groundwater remediation. *Journal of Hazardous Materials*, *433*, 128749. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128749

[20] Dimitropoulou, A.-M. N., Maroulis, V. Z., & Giannini, E. N. (2023). A Simple and Effective Model for Predicting the Thermal Energy Requirements of Greenhouses in Europe. *Energies*, *16*(19), 6788. https://doi.org/10.3390/en16196788

[21] Буртна, І. А., & Литвиненко, Д. В. (2012). Огляд мембранних технологій очистки води у водопостачанні та водопідготовці. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *6*(10(60), 4–6. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.5594

[22] Soussi, A., Zero, E., Ouammi, A., Zejli, D., Zahmoun, S., & Sacile, R. (2025). Smart greenhouse farming: a review towards near zero energy consumption. *Discover Cities*, *2*(1). https://doi.org/10.1007/s44327-025-00096-w

[23] Soussi, M., Chaibi, M. T., Buchholz, M., & Saghrouni, Z. (2022). Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions. *Agronomy*, *12*(3), 626. https://doi.org/10.3390/agronomy12030626

[24] ElKasaby, M. M., Hassan, M. A., & Khalil, A. (2023). Energy and economic performance assessment of a solar-assisted regenerative vacuum membrane desalination system. *Applied Thermal Engineering*, *225*, 120181. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120181

[25] Khedher, M., Phogat, V., Chow, C. W. K., Palmer, N., Anese, J., Tucker, A., Petrie, P., van den Akker, B., & Rameezdeen, R. (2025). Evaluation of current inland desalination of moderately saline brackish groundwater for expansion of irrigated agriculture. *Groundwater for Sustainable Development*, *29*, 101449. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101449

[26] Zagorodny, A., Bogdanov, V., Ermolieva, T., Komendantova, N., Havlik, P. (2026). *Integrated Solutions to Food–Energy–Water–Environmental NEXUS Security Modeling and Management: Robust Downscaling and Models' Linkage Procedures*. In: Zagorodny, A., Bogdanov, V., Zaporozhets, A., Ermolieva, T. (eds) Nexus of Sustainability. Studies in Systems, Decision and Control, vol 627. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-03616-2_1

[27] El-Awady, M. H., & El-Ghetany, H. H. (2014). Integrated solar green house for water desalination and plantation in remote arid Egyptian communities: modeling and analysis. *International Journal of Energy and Environmental Research*, *2*(4), 37–50. https://eajournals.org/wp-content/uploads/Integrated-Solar-Green-House-For-Water-Desalination-And-Plantation-In-Remote-Arid-Egyptian-Communities-.pdf&ved=2ahUKEwi_ocXQitOVAxXcHBAIHXvpLkYQFnoECBgQAQ&usg=AOvVaw2k9CymSkloTXXgoBuk8wDw

[28] Гомеля, М. Д., Шаблій, Т. О., Вембер, В. В., & Твердохліб, М. М. (2022). *Кондиціювання води для промисловості. Лабораторний практикум*. Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського. https://ela.kpi.ua/bitstreams/0e4b170f-efe5-4ae7-9c11-8f9322172ff1/download

[29] Vivar, M., Pichel, N., & Fuentes, M. (2017). Solar disinfection of natural river water with low microbiological content (10–103CFU/100ml) and evaluation of the thermal contribution to water purification. *Solar Energy*, *141*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.019

[30] Afitiri, A.-R., Appah Aram, S., & Martienssen, M. (2024). Systematic review of the effects of advanced oxidation processes integration with solar water disinfection for improved drinking water production. *Waste Management Bulletin*, *1*(4), 52–59. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.08.005

[31] Peters, C. D., & Hankins, N. P. (2021). Making zero-liquid discharge desalination greener: Utilising low-grade heat and vacuum membrane distillation for the regeneration of volatile draw solutes. *Desalination*, *507*, 115034. https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115034

[32] Hijjaji, K., Frikha, N., Gabsi, S., & Kheiri, A. (2022). Study of a solar HDH desalination unit powered greenhouse for water and humidity self-sufficiency. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, *14*(3), 335–351. https://doi.org/10.1007/s40095-022-00520-6

[33] Mamouri, S. J., Tan, X., Klausner, J. F., Yang, R., & Bénard, A. (2020). Performance of an integrated greenhouse equipped with Light-Splitting material and an HDH desalination unit. *Energy Conversion and Management*: *X*, *7*, 100045. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100045

[34] Khedher, M., Phogat, V., Chow, C. W. K., Palmer, N., Anese, J., Tucker, A., Petrie, P., van den Akker, B., & Rameezdeen, R. (2025). Evaluation of current inland desalination of moderately saline brackish groundwater for expansion of irrigated agriculture. *Groundwater for Sustainable Development*, *29*, 101449. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101449

[35] Butt, A. Q., Yaseen, G., Bachaya, A., & Latif, A. (2025). Unlocking water sustainability by addressing SDG 6: Macrophyte-based wastewater treatment for agricultural irrigation in Pakistan. *Physics and Chemistry of the Earth*, *Parts A/B/C*, *141*, 104099. https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.104099

[36] World Bank. (n.d.). *Annual freshwater withdrawals, agriculture (% of total freshwater withdrawal)*. World Development Indicators. Retrieved February 27, 2026, from https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWAG.ZS

[37] Shokri, A., & Sanavi Fard, M. (2023). Techno-economic assessment of water desalination: Future outlooks and challenges. *Process Safety and Environmental Protection*, *169*, 564–578. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.007

[38] Magni, M., Jones, E. R., Bierkens, M. F. P., & van Vliet, M. T. H. (2025). Global energy consumption of water treatment technologies. *Water Research*, *277*, 123245. https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123245

[39] Cardoso, B. J., Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2021). Energy performance factors in wastewater treatment plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, *322*, 129107. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129107

[40] Pearson, J. L., Michael, P. R., Ghaffour, N., & Missimer, T. M. (2021). Economics and Energy Consumption of Brackish Water Reverse Osmosis Desalination: Innovations and Impacts of Feedwater Quality. *Membranes*, *11*(8), 616. https://doi.org/10.3390/membranes11080616

[41] Montano, B. (2024). Historical Analysis of Resilience in Spanish Desalination Companies: Period 1980–2024. *Water*, *16*(22), 3318. https://doi.org/10.3390/w16223318

[42] Thiloka Edirisooriya, E. M. N., Wang, H., Banerjee, S., Longley, K., Wright, W., Mizuno, W., & Xu, P. (2024). Economic feasibility of developing alternative water supplies for agricultural irrigation. *Current Opinion in Chemical Engineering*, *43*, 100987. https://doi.org/10.1016/j.coche.2023.100987

[43] Mkilima, T., Devrishov, D., Assel, K., Ubaidulayeva, N., Tleukulov, A., Khassenova, A., Yussupova, N., & Birimzhanova, D. (2022). Natural Zeolite for The Purification of Saline Groundwater and Irrigation Potential Analysis. *Molecules*, *27*(22), 7729. https://doi.org/10.3390/molecules27227729

[44] ElKasaby, M. M., Hassan, M. A., & Khalil, A. (2023). Energy and economic performance assessment of a solar-assisted regenerative vacuum membrane desalination system. *Applied Thermal Engineering*, *225*, 120181. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120181

[45] Rajesh, S., & Chiranjeevi, C. (2024). Hybrid thermal desalination systems for sustainable development – A critical review. *Solar Energy*, *270*, 112364. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112364

[46] Baniasad Askari, I., & Ameri, M. (2021). A techno-economic review of multi effect desalination systems integrated with different solar thermal sources. *Applied Thermal Engineering*, *185*, 116323. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116323

[47] Zubair, M. I., Al-Sulaiman, F. A., Antar, M. A., Dini, S., & Ibrahim, N. I. (2020). Performance and cost assessment of a solar HDH desalination system integrated with thermal storage: a case study. *Desalination and Water Treatment*, *173*, 86–104. https://doi.org/10.5004/dwt.2020.24686

[48] Хільчевський, В. К., Чунарьов, О. В., Ромась, М. І., та ін. (2009). *Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу*. Ніка-Центр.

[49] Управління екології та природних ресурсів Миколаївської обласної державної адміністрації. (2025). *Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області у 2024 році*. https://ecolog.mk.gov.ua/store/files/1758180655.pdf

[50] УкрНДІагропроект. (2007). *Тепличні і оранжерейні підприємства, споруди захищеного ґрунту для фермерських (селянських) господарств. (ВНТП АПК–19–07)*. Міністерство аграрної політики України.

© Шаповалов Ю. О., Романюкін Є. М., Головня А. П.
Дата першого надходження статті до видання: 26.06.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.07.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)