

УДК 628.16

# DEVELOPMENT OF A MODULAR PLANT FOR THE PURIFICATION OF GROUNDWATER WITH HIGH MINERALIZATION

**D. Stryzhak, N. Husiatynska***National University of Food Technologies***Key words:**

drinking water,  
groundwater,  
total salt content,  
purification,  
desalination,  
filtration,  
filter loads

**Article history:**

Received 17.09.2024  
Received in revised form  
28.09.2024  
Accepted 14.10.2024

**Corresponding author:**

ngusyatinaska@ukr.net

**ABSTRACT**

The issue of proper provision of drinking water supply in Ukraine is relevant, which is confirmed by the constant attention of state bodies and the development and implementation of a number of important documents. Ukraine, like many other countries, faces a number of challenges in the field of water supply, including aging infrastructure, pollution of water sources and insufficient wastewater treatment. Traditional water treatment systems are not always effective, in particular, in remote settlements and during emergencies, such as floods, military conflicts or man-made disasters. In these conditions, the need for local solutions for water treatment becomes especially relevant, which necessitates further research to develop domestically produced mobile plants for obtaining drinking water from various alternative sources.

Based on the analysis of modern solutions for the creation of modular plants for the purification of drinking water from natural sources, the main technological stages that can be used in such systems have been identified. A basic hardware and technological scheme for purifying water of different chemical composition has been proposed and an industrial sample of a modular installation has been manufactured.

The results of the study of the influence of the total salt content in the incoming water, the temperature regime and the membrane fouling coefficient on the indicators of the total salt content of purified water and specific electricity consumption are presented.

Experimental studies have been conducted and it has been shown that in the case of purifying water of high mineralization (up to 3000 mg/l), the efficiency of removing the main chemical components from water was within 90—97%, which ensures compliance with these indicators of drinking water quality. The efficiency of removing total iron (80%) and permanganate oxidation compounds (50%) was somewhat lower.

From a technological point of view, the use of modular installations allows optimizing the stages of water purification taking into account the features of the chemical composition of the incoming water, provided that the water purification system is compact, mobile and autonomous.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-11

---

## РОЗРОБЛЕННЯ МОДУЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД З ВИСОКОЮ МІНЕРАЛІЗАЦІЄЮ

Д. В. Стрижак, аспірант, ORCID ID: 0009-0008-5562-7253

Н. А. Гусятинська, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-9999-6650

Національний університет харчових технологій

*Визначено основні технологічні стадії та розроблено апаратурно-технологічну схему для промислового зразка модульної установки. Наведено результати дослідження впливу загального солевмісту у вхідній воді, температурного режиму і коефіцієнта забруднення мембрани зворотного осмосу на показники солевмісту очищеної води та питоме споживання електроенергії. У разі очищення води високої мінералізації ефективність видалення хімічних сполук з води становила 90—97%, що забезпечує її відповідність якості питної води.*

**Ключові слова:** питна вода, підземна вода, загальний солевміст, очищення, зне-солоння, фільтрування, фільтрувальні завантаження.

**Вступ.** Забезпечення чистою водою є важливим фактором здоров'я населення. У 2022 р. була прийнята «Водна стратегія України на період до 2050 року», де зазначається, що стан якості поверхневих вод, які є джерелом питної води для 80% населення України, є незадовільним і характеризується підвищеним вмістом органічних та біогенних речовин, а підземні води, відповідно, підвищеною жорсткістю і мінералізацією, а також наднормативним вмістом сполук заліза і марганцю [1]. Узагальнена на національному та обласному рівнях інформація щодо доступу і якості питної води щорічно публікується в Національній доповіді про якість питної води та стан питного водопостачання і водовідведення. Так, за даними «Національної доповіді про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2022 р.» зазначалося, що за період 2016—2021 рр. збільшився доступ населення до централізованого водопостачання у селища міського типу: з 87,2% (2016 р.) до 91,2% (2020 р.); в містах рівень охоплення централізованим водопостачанням трохи зменшився: з 99,3% (2016 р.) до 99,0% (2020 р.). В той же час доступ сіл до централізованого водопостачання має регресійний характер зниження з 29,2% у 2016 р. до 26,8% у 2020 р., до того ж станом на 2020 р. у 8 областях 252,7 тис. осіб у 790 населених пунктах користувалось привізною водою [2]. Протягом 2023 р., за даними [3], внаслідок атак на критичну інфраструктуру, зазнали руйнувань об'єкти водопостачання та водовідведення у 8 областях України.

Отже, в умовах зростаючої урбанізації, глобальних змін клімату, екологічних проблем, викликів воєнних дій, забезпечення населення якісною питною водою стає однією з найгостріших глобальних проблем. Україна, як і багато інших країн, стикається з низкою викликів у сфері водозабезпечення, включаючи старіння інфраструктури, забруднення джерел води та недостатнє очищення стічних вод. Традиційні водоочисні системи не завжди ефективні через їх високу вартість, складність у транспортуванні та необхідність використання великої кількості ресурсів. Зокрема, у віддалених населених пунктах та під час надзвичайних ситуацій, таких як паводки, військові конфлікти або техногенні катастрофи, відбувається погіршення якості води, що загрожує здоров'ю населення. В цих умовах необхідність у локальних рішеннях для очищення води стає особливо актуальною, що зумовлює необхідність подальших

досліджень з метою розробки мобільних установок вітчизняного виробництва для одержання питної води з різних джерел.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Мінералізація води безпосередньо пов'язана з рівнем розчинених в ній солей. Останнім часом дослідники реєструють збільшення солоності води артезіанських свердловин, що є наслідком засолення ґрунтів мінеральними добривами та іншими хімічними речовинами внаслідок антропогенної діяльності людини. Постійне вживання води з підвищеною мінералізацією, зокрема зумовленої вмістом сульфатів, призводить до розвитку і прогресування ряду захворювань [4]. Характерним для води з артезіанських свердловин є підвищений вміст заліза, який може сягати до 10—15 мг/дм<sup>3</sup> (при допустимому показнику за ДСанПін 0,02 мг/дм<sup>3</sup>), що вимагає застосування спеціальних методів з метою його видалення до нормативних значень [5].

На сьогодні зворотний осмос (RO) є найпоширенішим і широко використовуваним методом знесолення води. В науковій праці [6] наведено результати досліджень очищення води методами зворотного осмосу (RO) та перапарації (PV), зокрема визначено ефективність і селективність мембран PERVAP 2210, 4510 для PV та AG-RO для експериментів RO. Показано, що зниження температури процесу може бути важливим фактором у зменшенні споживання енергії.

Слід зазначити, що робота установок RO значно ускладнюється у разі забруднення мембрани RO. Науковцями [7] досліджувався вплив умов експлуатації на продуктивність мембрани при різних рівнях забруднення. Використовувалися два типи мембран: мембрана SW30ULE-440 від Filmtec і мембрана SW-440R від LG. Продуктивність мембрани Filmtec аналізували за допомогою прикладної комп'ютерної програми системного аналізу зворотного осмосу (ROSA 9.1), а для оцінки мембрани LG використовували програмне забезпечення LG Q-V2.3.2. Результати показали, що забруднення мало значний вплив на швидкість потоку пермеату, солоність і питоме споживання енергії (SEC).

Наразі виробниками систем водоочищення пропонується ряд мобільних установок для очищення вод. Так, виробниками [8] пропонується чотириступенева установка фільтрації Membrane Solutions WS02 Survival Emergency Straw Water Filter, яка поєднує стадії: грубого очищення, мікрофільтрації із застосуванням поліпропіленового картриджу, адсорбційного очищення у вугільному фільтрі, фільтрування з використанням ультрафільтраційної мембрани. Така система забезпечує практично повне видалення бактеріальної мікрофлори та каламуті, зумовленої речовинами колоїдної дисперсності, з води. Продуктивність установки становить 500 см<sup>3</sup>/хв, вона є портативною та не потребує додаткового джерела живлення. Фільтр грубої очистки призначений для видалення бруду, піску та інших твердих частинок. Активоване вугілля є ефективним для зменшення неприємних смаків, запахів, видалення органічних сполук з води. Застосування порожнисто-волоконистої ультрафільтраційної мембрани забезпечує видалення домішок з розмірами більше 0,1 мікрона [6]. Поряд з перевагами запропонованого модуля для очищення води слід визначити ряд проблем, що потребують подальшого вирішення при їх експлуатації, зокрема: обмеженість у використанні для потреб водозабезпечення у більших обсягах; труднощі з обслуговуванням та регенерацією; відсутність захисту від вірусів, що обмежує його безпеку для різних типів води і є надзвичайно актуальним у випадку надзвичайних ситуацій.

Представляє практичний інтерес мобільна установка Kärcher WTC 700, яка забезпечує можливість очищення води на основі зворотного осмосу, затримуючи час-

тинки, бактерії, віруси, а розчинені солі і хімічні речовини, потужність якої забезпечує очищення до 700 дм<sup>3</sup>/год питної води. Серед позитивних характеристик установки слід визнати можливість очищати воду різного хімічного складу (прісну, солону, хімічно забруднену воду); використання високоякісних матеріалів, що гарантує її високу надійність. У процесі очищення не використовують хімічні речовини, а хлор додається лише до очищеної води, щоб мінімізувати ризик повторного забруднення під час зберігання [9]. Установка може представляти як окремий модуль або на причепі з електрогенератором.

Серед подібних установок слід виділити гібридну мобільну систему очищення води WTC 8000/15000 RO/UF C, в якій передбачено можливість очищення води з урахуванням особливості її складу та якості за рахунок використання мембран ультрафільтрації та/або зворотного осмосу.

Використання мембран ультрафільтрації забезпечує продуктивність до 15000 дм<sup>3</sup> питної води на годину. У разі роботи установки із використанням мембрани зворотного осмосу продуктивність становить до 8000 дм<sup>3</sup> питної води на годину. Поєднання методів баромембранної фільтрації забезпечує високу ефективність очищення води за мікробіологічними показниками, з високим солемістом (солонуватої та солоної води), а також хімічно забрудненої води. Серед переваг слід відзначити високу адаптивність системи до різної якості вхідної води, зручність і безпечність експлуатації [10].

Серед вітчизняних розробок слід відзначити мобільну установку «ОАЗИС С-300» продуктивністю до 5000 дм<sup>3</sup> на добу. Установка включає такі стадії очищення води: груба механічна фільтрація; первинне хлорування з метою окиснення органічних і неорганічних домішок та знезараження води; фільтрування на фільтрі тонкої очистки для видалення завислих речовин, освітлення води; двоступенева фільтрація на вугільних фільтрах забезпечує видалення органічних сполук, дехлорування та видалення хлорпохідних речовин; вторинне хлорування за потреби зберігання води та забезпечення тривалої дезінфекції очищеної води; заключна фільтрація на картриджному фільтрі [11]. В той же час запропонована установка, у разі використання вхідної води з високим ступенем забруднення або солемісту, може потребувати додаткової попередньої фільтрації.

На основі аналізу сучасних підходів до розроблення модульних систем очищення води можна зробити висновок, що вони ґрунтуються на застосуванні ряду основних стадій, які комбінують залежно від якості вихідної води та особливостей технологічних вимог:

- застосування хімічних реагентів для окиснення та коагуляції речовин колоїдної дисперсності;
- застосування сучасних фільтрувальних завантажень для видалення з води заліза, марганцю, осаду тощо;
- пом'якшення води з використанням іонного обміну для видалення солей магнію, кальцію;
- мембранне фільтрування (мікрофільтрація, ультрафільтрація, зворотний осмос);
- сорбційне очищення з використанням активованого вугілля для видалення органічних сполук і знебарвлення води;
- знезараження води (УФ-знезараження, хлорування, озонування тощо).

Отже, на основі аналізу існуючих методів очищення води можна зробити висновок, що на сьогодні існує висока потреба в удосконаленні та розробленні сучасних

модульних установок, які б забезпечували можливість високої продуктивності та ефективності очищення вихідної води різного хімічного складу та ступеня забрудненості.

**Мета досліджень:** на основі визначення світових і вітчизняних тенденцій щодо застосування модульних установок для очищення питної води з природних джерел, а також експериментальних досліджень знесолення води з використанням мембран зворотного осмосу розробити та апробувати установку для очищення підземних вод з високою мінералізацією для питних потреб.

**Матеріали і методи.** Методи досліджень — аналітичні, методи комп'ютерного моделювання, хімічні, фізико-хімічні з використанням приладів та методик досліджень якості води згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10 та ДСТУ 7525:2014.

Під час експериментальних досліджень використовували завантаження для фільтрування Turbidex, що складається з гранул силікату алюмінію (цеоліту) з високою пористістю [12].

Моделювання процесу зворотного осмосу проводили за допомогою програмного забезпечення Toqua DS2.0 для мембран ТМН20А-400С та ТМН20А-440С (TORAY). Питоме споживання енергії на опріснення води (SEC, кВт·год/м<sup>3</sup>) розраховували за формулою [6]:

$$SEC = \frac{P}{Q_p},$$

де  $P$  — споживання енергії для отримання пермеату, кВт·год;  $Q_p$  — об'єм отриманого пермеату за годину роботи установки, м<sup>3</sup>.

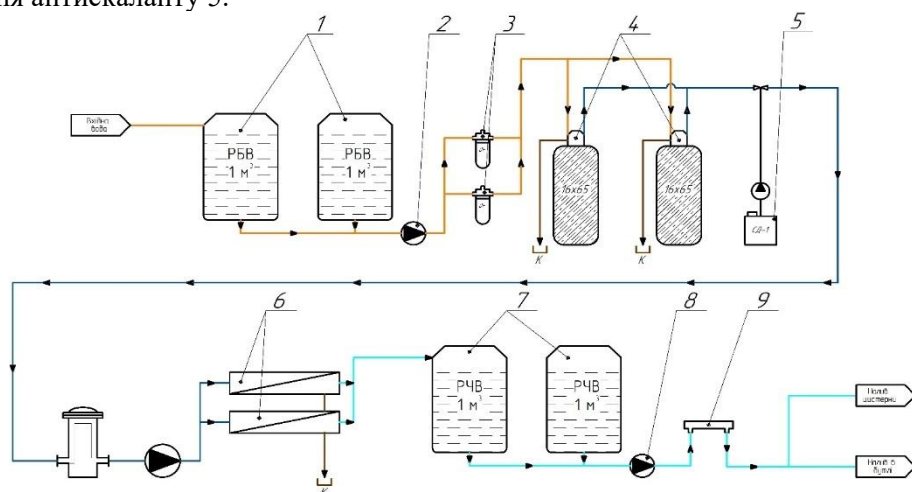
Математичну обробку результатів досліджень проведено за методиками [13] з використанням прикладних програм MathCad Professional. Для побудови графіків використовували програмне забезпечення Microsoft Excel.

**Результати досліджень.** З огляду на актуальність подальших досліджень ефективності застосування модульних систем водоочищення для забезпечення питною водою окремих населених пунктів чи територій в умовах надзвичайних ситуацій або неможливості забезпечення централізованим водопостачанням, запропоновано принципovu апаратурно-технологічну схему (рис. 1) очищення води, що характеризується високим показником солевмісту.

Вхідна вода подається з резервуару брудної води 1 за допомогою насосної станції 2 на блок дискових фільтрів 3 для видалення зважених домішок, мулу, піску, що частково забезпечує і зниження мутності води. Блок складається з двох дискових фільтрів з рейтингом фільтрації 125 мкм. Далі вода надходить на установку мультимедійної фільтрації 4, де з води видаляються окиснене залізо (III), частково органічні сполуки, а також сполуки, що обумовлюють кольоровість і каламутність води. Установка складається з двох фільтрів 16"х65" зі скловолокна PWG, завантажених мультимедійним матеріалом Turbidex, що забезпечує очищення води від осаду до рівня 3—5 мікронів. Всі фільтри працюють паралельно, на промивку виводяться по чергово. Установка управляється автоматично за програмою керуючих клапанів Run-xin. До переваг завантаження Turbidex слід віднести у 2—3 рази вищу брудоемність порівняно з кварцовим піском. Використання Turbidex в ланцюзі перед іншими методами фільтрації, такими як іонний обмін, зворотний осмос, ультрафільтрація, озонування тощо, дає змогу отримати значне поліпшення якості очищеної води [12].

Після фільтрування на завантаженні Turbidex вода надходить на установку зворотного осмосу (RO), де видаляються іони жорсткості, а також знижується загальна лужність і вміст сухого залишку. Для запобігання утворенню відкладень кальцію і

магнію на мембранних елементах установки зворотного осмосу здійснюється дозування антискалтанту 5.



**Рис. 1.** Апаратурно-технологічна схема системи водоочищення модульної установки: 1 — резервуар брудної води; 2 — насосна станція подачі; 3 — дисковий фільтр; 4 — мультимедійний фільтр; 5 — станція дозування антискалтанту; 6 — установка зворотного осмосу; 7 — резервуар чистої води; 8 — насосна станція подачі пермеату; 9 — ультрафіолетова лампа

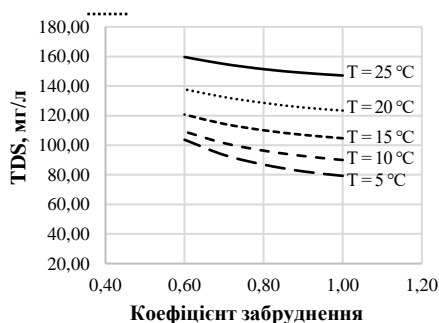
Установка (RO) складається з двох мембранних елементів ТМН20А, насоса високого тиску та контролера. Вода, проходячи через напівпроникні мембранні елементи, розділяється на два потоки: 25% концентрат (сконцентрований розчин вихідних солей) та 75% пермеат (очищена вода). Пермеат надходить в резервуар чистої води 7. У разі визначеного співвідношення 1:3 (концентрат-пермеат) досягається висока продуктивність роботи установки за меншої селективності щодо видалення розчинних мінеральних солей, що забезпечує її відповідність ДСанПін відповідно до повноцінності складу питної води. Очищена вода із резервуару за допомогою насосної станції 8 надходить на блок ультрафіолетового знезараження води 9 з метою її дезінфекції.

Важливим аспектом при моделюванні та виборі апаратурно-технологічної схеми для модульних систем очищення води з високим солевмістом є підбір мембран зворотного осмосу для забезпечення оптимальних параметрів роботи установки (RO), зокрема за показниками стабільності очищення води та споживання енергії протягом експлуатаційного періоду, що характеризується зміною ступеня забрудненості мембрани. Для досліджень обрано мембрани ТМН20А-400С та ТМН20А-440С (ТО-RAY), які представлені на вітчизняному ринку та відповідають поставленому завданню знесолення води для отримання води питного гатунку.

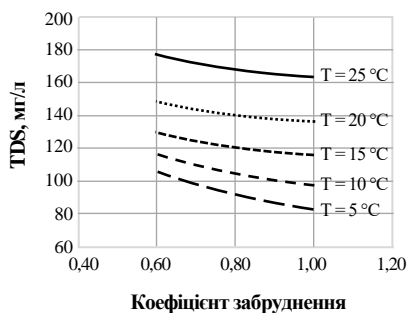
На рис. 2 наведено залежності загального солевмісту (TDS) в очищеній воді (пермеаті) та питомого споживання енергії (SEC) при зміні коефіцієнта забруднення мембран за температурного режиму 5—25 °С, що відповідає діапазону температури вхідної води. Коефіцієнт забруднення (КЗ) використовується для оцінки проникності мембрани та становить  $K_3 = 1$  для умов повної проникності відповідно до технічної характеристики. Під час експлуатації  $K_3$  знижується  $< 1$ , що потребує очищення мембрани. Тривалість роботи мембрани визначається кількісними характеристиками

та типом забруднення води, яка надходить на зворотний осмос, а також від дотримання виробничого режиму очищення та обслуговування системи [6, 7].

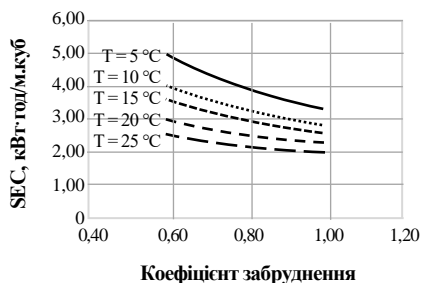
Залежність TDS від коефіцієнта забруднення для мембрани ТМН20А-400С, LP



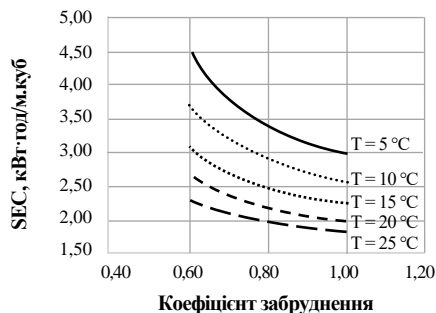
Залежність TDS від коефіцієнта забруднення для мембрани ТМН20А-440С, LP



Залежність питомого споживання енергії від коефіцієнта забруднення для мембрани ТМН20А-400С, LP



Залежність питомого споживання енергії від коефіцієнта забруднення для мембрани ТМН20А-440С, LP



**Рис. 2.** Вплив фактора забруднення мембран зворотного осмосу (RO) на загальний солеміст пермеату (TDS) та питоме споживання енергії при різних температурних режимах (5—25 °C)

Моделювання процесу зворотного осмосу (RO) за допомогою програмного забезпечення Toya DS2.0 проводили за таких умов:

- 1) початковий загальний солеміст (TDS) води — 3680 мг/дм<sup>3</sup>;
- 1) вихід пермеату 65% (2 м<sup>3</sup>/год);
- 2) скид концентрату 35% (1,08 м<sup>3</sup>/год);
- 3) кількість рециклу 3 (м<sup>3</sup>/год).

Розрахунок проводився для установки, що складається з двох мембран, що встановлені послідовно.

На основі одержаних результатів показано, що зниження коефіцієнта забруднення від 1 до 0,6 під час експлуатації мембран зворотного осмосу значно впливає на ефективність роботи та енергоємність процесу. Зі зменшенням температури вихідної води покращується якість пермеату, в той же час збільшуються питоме споживання електроенергії.

Також проведено дослідження з використанням методів планування експерименту та математичного моделювання [13] для визначення сукупного впливу факторів

(початкового солемісту, температури води і коефіцієнта забруднення мембрани) на показники процесу RO: загального солемісту (TDS) в очищеній воді та питомого споживання енергії (SEC). В результаті математично-статистичного оброблення одержано такі рівняння регресії:

для мембрани ТМН20А-440С:

$$F1(x_1, x_2, x_3) = 9,44x_1^2 + 2,5x_1x_2 + 19,01x_1x_3 - 0,128x_1 + 0,0882x_2^2 + 0,49x_2x_3 - 5,125x_2 + 46,843x_3^2 - 71,6x_3 + 75,4;$$

$$F2(x_1, x_2, x_3) = 0,429x_1 + 0,0035x_1x_2 - 0,067x_1x_3 - 0,002x_1^2 + 0,0016x_2^2 + 0,0883x_2x_3 - 0,18x_2 + 2,74x_3^2 - 7,71x_3 + 6,98;$$

для мембрани ТМН20А-400С:

$$F1(x_1, x_2, x_3) = 8,89x_1^2 + 2,15x_1x_2 - 20,1x_1x_3 + 4,1x_1 + 0,082x_2^2 + 0,54x_2x_3 - 4,69x_2 + 50,23x_3^2 - 75,86x_3 + 71,2;$$

$$F2(x_1, x_2, x_3) = 0,483x_1 + 0,00437x_1x_2 - 0,075x_1x_3 - 0,002x_1^2 + 0,00186x_2^2 + 0,1042x_2x_3 - 0,209x_2 + 3,144x_3^2 - 8,9x_3 + 7,99,$$

де:  $F1$  — функція загального солемісту у пермеаті (мг/дм<sup>3</sup>);  $F2$  — функція питомого споживання енергії установки зворотного осмосу, кВт·год/м<sup>3</sup>;  $x_1$  — загальний солеміст у вхідній воді, (TDS), г/дм<sup>3</sup> (0,3—3,6 г/дм<sup>3</sup>);  $x_2$  — температура води, °С (5—35 °С);  $x_3$  — коефіцієнт забруднення (0,5—1).

Отже, за результатами проведених досліджень показано, що мембрани ТМН20А-400С та ТМН20А-440С забезпечують високу ефективність знесолення, що дає змогу застосовувати їх для очищення підземних вод з високим солемістом при підготовці питної води. В той же час слід зазначити, що мембрана марки ТМН20А-440С характеризується дещо нижчими експлуатаційними витратами електроенергії, однак і дещо меншою ефективністю щодо видалення загального вмісту солей порівняно з мембраною ТМН20А-400С.

Промислову реалізацію модульної установки для очищення води здійснено ТОВ «Смарт Вотер Груп». Розроблена установка для очищення води, що складається з головного модуля готової будівельної конструкції, з розміщеним усередині необхідним технологічним устаткуванням, та вузла водозабору вхідної води, здійснює повне очищення води та призначена для забезпечення населення питною водою. На рис. 3 представлено промисловий зразок модульної установки для очищення питної води (ТОВ «Смарт Вотер Груп»).

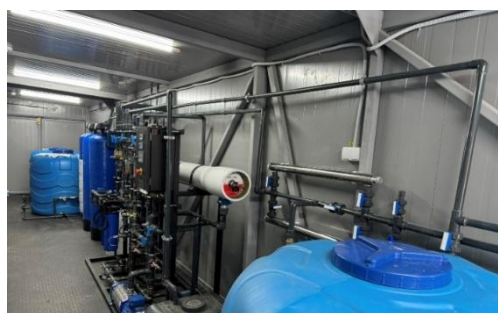


Рис. 3. Модульна установка водоочищення

У табл. 1 наведені показники якості води з артезіанського джерела та води, очищеної з використанням розробленої модульної установки. Вхідна вода відбиралась на території Снігурівської міської територіальної громади Миколаївської області.

Результати, наведені в табл. 1, свідчать, що вода після очищення відповідає нормативним показникам питної води за ДСанПіН2.2.4-171-10.

Таблиця 1. Показники якості води до та після очищення

Показники якості	Одиниці виміру	Вхідна вода	Очищена вода	Ефект очищення, %	Норма ДСанПіН2.2.4-171-10
Каламутність	мг/дм <sup>3</sup>	15,7	0,5	96,8	≤0,58
Кольоровість	Градуси	12	3	75	≤10
Нітрати	мг/дм <sup>3</sup>	35,00	0,01	99,9	<50
Загальна жорсткість	мг-екв/дм <sup>3</sup>	31,00	1,10	96,7	<7
Сухий залишок	мг/дм <sup>3</sup>	2931,00	150,00	94,8	<1000
Хлориди	мг/дм <sup>3</sup>	804,00	85,45	89,3	≤250
Сульфати	мг/дм <sup>3</sup>	1088,00	100,60	90,7	≤250
Залізо загальне	мг/дм <sup>3</sup>	0,5	0,1	80,0	0,2
Перманганатна окиснюваність	мг/дм <sup>3</sup>	8,00	4,00	50,0	5,0

Слід зазначити, що вода зі свердловини характеризувалася достатньо високим показником вмісту сухого залишку, що є свідченням її високої мінералізації. Зокрема, вміст сульфатів становив порядку 1088 мг/дм<sup>3</sup>, хлоридів 804 мг/дм<sup>3</sup>.

Важливим завданням при очищенні води є забезпечення нормативного вмісту жорсткості води, що зумовлюється наявністю в ній розчинених солей кальцію і магнію. За вимогами до фізіологічної повноцінності води величина цього показника варіює в межах 1,5—7 мг-екв/дм<sup>3</sup>. В природних водах, особливо з артезіанських свердловин, досить часто спостерігається перевищення нормативного значення за цим показником. Так, у наших дослідженнях жорсткість вихідної води становила 31 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Застосування баромембранних фільтрів зворотного осмосу забезпечує практично повне видалення солей жорсткості, проте така вода не відповідає фізіологічній повноцінності для споживання людиною. Шляхом встановлення раціонального співвідношення пермеат-концентрат у межах 3:1 забезпечується жорсткість води порядку 1,1 мг-екв/дм<sup>3</sup>. При цьому досягаються нормативні показники за вмістом сульфатів і хлоридів у воді.

Доведено, що ефективність видалення основних хімічних складових з води, з використанням запропонованої апаратурно-технологічної схеми, знаходилась в межах 90—97%. Дещо нижчими були показники ефективності видалення загального заліза (80%) та сполук перманганатної окиснюваності (50%).

Проведені дослідження показали, що запропонована система з використанням комплексу фільтраційного обладнання з різним рейтингом фільтрації (дисковий фільтр, мультимедійний фільтр із завантаженням Turbidez, установка зворотного осмосу) дає змогу очищати малокаламутні води з солевмістом до 5000 мг/дм<sup>3</sup> без застосування хімічних реагентів. У разі використання поверхневих вод установка потребує встановлення модуля хімічної обробки. У разі очищення підземних вод з високим вмістом заліза та сполук перманганатної окиснюваності рекомендується встановлення додаткових модулів для каталітичного окиснення заліза із застосуванням відповідних завантажень.

Водночас слід відзначити, що порівняно зі стаціонарними рішеннями такі модульні системи для очищення води характеризуються рядом переваг: гнучкістю використання технологічних стадій з урахуванням якості вхідної води, компактністю,

можливістю швидкого транспортування, що особливо важливо під час надзвичайних ситуацій або у віддалених регіонах.

Також слід звернути увагу на можливість працювати в автономному режимі, використовуючи генератори або сонячну енергію, що дає змогу забезпечувати очищення води навіть за відсутності централізованого енергопостачання. Розроблена система характеризується потребою у менших інвестиціях порівняно з великими стаціонарними установками, що особливо важливо для регіонів з обмеженим бюджетом. Встановлення мобільної системи може відбуватися швидко, що дає змогу реагувати на непередбачені ситуації та оперативно забезпечити населення питною водою. До переваг модульних установок також відноситься автоматизована система управління надходження, очищення та розподілу води населенню.

**Висновки.** Розробка мобільної установки вітчизняного виробництва для очищення води є важливим кроком для забезпечення населення чистою водою у будь-яких умовах, включаючи надзвичайні ситуації та віддалені регіони. Це рішення є економічно ефективним, екологічним і технологічно доцільним. Вітчизняне виробництво таких установок не лише підвищить рівень водозабезпечення в Україні, але й сприятиме розвитку промисловості та підвищенню експортного потенціалу країни.

Запропоновано апаратно-технологічну схему для реалізації модульної системи очищення питної води, що включає дисковий фільтр, мультимедійний фільтр із завантаженням Turbidex, установка зворотного осмосу, ультрафіолетова лампа та дає змогу очищати малокаламутні води з солемістом до 5000 мг/дм<sup>3</sup> без застосування хімічних реагентів. На основі комп'ютерного моделювання встановлено залежності показників роботи установок зворотного осмосу, зокрема загального солемісту в очищеній воді та питомого споживання енергії, від коефіцієнта забруднення для мембран марок ТМН20А-400С та ТМН20А-440С.

Промислові випробування запропонованої апаратно-технологічної схеми показали високу ефективність видалення основних хімічних складових з підземних вод, що характеризувалися високим солемістом. З технологічної точки зору застосування модульних установок дає змогу оптимізувати стадії очищення води з урахуванням особливостей хімічного складу вхідної води за умови компактності, мобільності та автономності системи водоочищення.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року: Розпорядж. Каб. Міністрів України від 09.12.2022 № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-p#Text> (дата звернення: 02.12.2024).
2. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2022 році. Київ, 2023.
3. Міністерство розвитку громад та територій України. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2023 році. Київ, 2024.
4. Андрусишина, І. М., Бурлакова, В. С., Василюк, С. Л., Дрікер, Ю. Д., Косогін, О. В., Косогіна, І. В., Мігченко, Т. Є., Мудрик, Р. Я., Орестов, Є. О., Поляков, В. Р., Стеценко, В. В., Шахновський, А. М. (2024). *Сучасні шляхи до чистої води: колективна монографія*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
5. Долінський, А. А., Ободович, О. М., Сидоренко, В. В., Гусятинська, Н. А. (2018). Реалії сьогодення та перспективи майбутнього підготовки питної і технологічної води. *Наукові праці НУХТ*, 24(2), 247—255.
6. Gortat, I., Marszałek, J., Wawrzyniak, P. (2024). Energy analysis of a laboratory process of water desalination by pervaporation and reverse osmosis. *Chemical and Process Engineering: New Frontiers*, 45(1), e48. <https://doi.org/10.24425/cpe.2023.147407>.

7. Loula, A. Shouman , Ramadan, M. Afify , Dalia A. Fadel , Mohamed, H. Esawy (2024). Fouling effect on Reverse Osmosis (RO) membranes performance in desalination plant. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100502. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100502>.

8. Membrane Solutions WS02 Survival Emergency Straw Water Filter. MS Pure By Membrane Solutions. URL: <https://www.msPURElife.com/products/personal-water-filter-straw-1> (дата звернення: 22.10.2024).

9. Kärcher WTC 700. Mobile Systeme für Ihren Einsatz | Kärcher Futuretech. URL: <https://www.karcher-futuretech.com/en/products/mobile-water-supply/mobile-water-treatment-plants/mobile-reverse-osmosis-systems/wtc-700-10372010.html> (дата звернення: 22.10.2024).

10. Kärcher WTC 8000/15000 RO/UF C. Mobile Systeme für Ihren Einsatz | Kärcher Futuretech. URL: <https://www.karcher-futuretech.com/en/products/mobile-water-supply/mobile-water-treatment-plants/mobile-reverse-osmosis-systems/wtc-8000-15000-ro-uf-c-13431300.html> (дата звернення: 22.10.2024).

11. Унікальна мобільна установка для очищення та знезараження води «ОАЗИС С-300». Ecosoft Water Filters: Innovative and Sustainable Water Treatment Solutions for Homes and Businesses. URL: <https://www.ecosoft.com/product-uk/ms-oazisc300> (дата звернення: 08.11.2024).

12. Фільтрувальний матеріал Turbidex — матеріал для очищення води від механічних домішок. URL: <https://watersoft.com.ua/ua/p718709997-filtruyuschij-material-turbidex.html> (дата звернення: 02.12.2024).

13. Теорія планування експериментів: виконання розрахунково-графічної роботи [Ел. ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / С. М. Лапач. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020, 86. URL: <https://ela.kpi.ua/items/35197414-052b-403d-b108-8fe4ef49ec43>.