

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Мудрик Ростислав Ярославович

УДК 628.16, 628.1.033, 66.067.123.3, 681.5

ДИСЕРТАЦІЯ

Сучасні підходи до підготовки питної води стабільно високої якості

161 хімічні технології та інженерія

16 Хімічна та біоінженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використані ідеї,
результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідні джерела

Р.Я. Мудрик

Науковий керівник Мітченко Тетяна Євгенівна, професор, доктор технічних наук,
професор кафедри технології неорганічних речовин, водопідготовки та загальної
хімічної технології.

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Мудрик Р.Я. Сучасні підходи до підготовки питної води стабільно високої якості. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розробці сучасних підходів до виробництва питної води стабільно високої якості.

Мета роботи - розробити процес підготовки питної води стабільно високої якості за показниками безпечності та фізіологічної повноцінності з водопровідної різного складу з використанням мембранних систем очищення води.

В першому розділі наведений аналітичний огляд процесів підготовки питної води. Показано, що якість водопровідної води в Україні погіршується. Частка нестандартних проб, таких що не відповідають ДСанПіН 2.2.4-171-10, зростає. Характерними показниками якості водопровідної води, що не відповідають вимогам, є забарвленість, окиснюваність, каламутність та жорсткість. В останні роки до цього переліку додалися сухий залишок, вміст заліза та марганцю. У містах рівень забезпечення населення централізованим водопостачанням становить 99%. Проте, зважаючи на погіршення якості водопровідної води, люди все частіше обирають інші джерела питної води. Зроблено порівняльний аналіз альтернативних джерел питної води: бутильована вода, домашні фільтри та колективні системи очищення води. Аргументовано, що колективні системи, зокрема водні вендингові автомати, є найбільш раціональним способом забезпечити населення питною водою. Водні вендингові автомати – це міні-заводи з доочищення водопровідної води та розливу питної води в пляшку користувача. Основною технологією доочищення є зворотний осмос. Продемонстровано, що ця технологія є

найпопулярнішою для одержання безпечної питної води. Але очищена таким чином вода не відповідає вимогам фізіологічної повноцінності. На основі державних та галузевих нормативів до питної води в роботі були сформульовані вимоги до питної води стабільно високої якості. В розділі зроблений огляд наявних способів одержання води такої якості. Обґрунтовано, що найбільш доцільним є використання зворотноосмотичних елементів із різною селективністю, які виготовляють з поліамідних мембранних полотен. В розділі наведений перелік фізико-хімічних характеристик полотен, за якими визначають їх властивості, зокрема, селективність, кут змочування, дзета-потенціал та радіус пор.

В другому розділі роботи наведено інформацію щодо об'єктів та методів дослідження. Серед об'єктів – 7 зразків поліамідних полотен: нанофільтраційні, зворотноосмотичні та модифіковані, а також зразки водопровідної води м. Київ, м. Луцьк, м. Кривий Ріг, з якими проводились лабораторні, пілотні або дослідно-промислові випробування. В методах дослідження описано лабораторне обладнання для визначення характеристик мембранних полотен, а саме – селективності, радіусу пор, кута змочування, дзета-потенціалу. Перераховані методики визначення показників якості води. Описано стенд для дослідження мембранних елементів та принцип його роботи. Продемонстрована установка для проведення пілотних та дослідно-промислових випробувань та описані умови їх проведення. Зазначені формули для обробки отриманих результатів.

В третьому розділі викладені результати проведених досліджень з їх поясненнями та висновками.

Проаналізована база даних «Карта якості води», зроблена класифікація водопровідної води за рівнем та типом мінералізації. Для кожного типу розрахований ступінь зниження показників сухий залишок та жорсткість до рівня вимог питної води стабільно високої якості.

Визначені фізико-хімічні властивості мембранних полотен. Встановлена залежність між їх селективністю за показниками гідрокарбонат та сульфат натрію, сухий залишок, жорсткість та забарвленість, кутом змочування, дзета-потенціалом і радіусом пор. Обрані найбільш ефективні полотна для одержання питної води заданої якості.

З обраних полотен різної селективності були виготовлені два мембранні елементи та визначені їх властивості: селективність по відношенню до сухого залишку і жорсткості та продуктивність.

Розроблено алгоритм вибору мембранних елементів або їх комбінації для кожного з трьох типів водопровідної води. Запропонована формула розрахунку співвідношення потоків пермеатів одержаних з мембранних елементів різної селективності.

Згідно розробленого алгоритму проведені пілотні випробування процесу одержання питної води стабільно високої якості з водопровідної різних типів. Показано, що випробування підтвердили правильність вибору мембранних полотен та адекватність запропонованого алгоритму.

На основі результатів пілотних випробувань, була запропонована вдосконалена технологічна схема підготовки питної води у водному вендинговому автоматі. Зокрема, стадії зворотний осмос та домінералізація замінені на одну стадію – зворотний осмос із різною селективністю.

Для віддаленого контролю якості та об'єму очищеної води запропоновано використання засобів цифровізації вендингового автомату, що включає сенсори, датчики, контролер з мікропроцесором та програмне забезпечення.

Проведено дослідно-промислові випробування на водопровідній воді міста Києва. Встановлено, що в процесі очищення протягом дослідно-промислової експлуатації вдосконаленого водного вендингового автомату індикаторні показники якості питної води, а саме сухий залишок, жорсткість, рН, забарвленість,

відповідають вимогам до питної води стабільно високої якості. Визначено ресурс мембранних елементів із різною селективністю, який складає 105 м³. Продемонстровано, що поєднання вдосконаленої технологічної схеми та цифровізації у водному вендинговому автоматі дає можливість знизити частоту сервісного обслуговування автоматів з 4 разів до 2 разів на рік.

В четвертому розділі обґрунтовано економічну доцільність впровадження сучасного підходу до підготовки питної води стабільно високої якості у мембранний водний вендинговий автомат. Здійснено порівняння річних витрат на експлуатацію мереж існуючих та вдосконалених автоматів і продемонстрована економія 39 %. Оцінена екологічна доцільність впровадження водних вендингових автоматів, показана можливість зниження кількості пластикових відходів на 100 000 кг на рік при роботі мережі з 50 одиниць.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

Вперше показано, що отримання питної води стабільно високої якості з водопровідної води різного складу досягається за рахунок застосування мембранних елементів, виготовлених з полотен, що характеризуються кутом змочування 55 ± 5 і 45 ± 5 градусів та дзета потенціалом при рН 7 - 22 ± 2 і -25 ± 2 мВ.

Вперше встановлено, що кут змочування та дзета потенціал є маркерами фізико-хімічних властивостей мембранних полотен, які дозволяють прогнозувати їх селективність по відношенню до іонів жорсткості, сухого залишку, гідрокарбонатів та забарвленості.

Вперше запропонована формула розрахунку співвідношення потоків пермеату з мембранних полотен, яка прогнозує якість одержаної води в залежності від складу водопровідної, що може бути покладено в основу цифровізації процесу підготовки питної води.

Теоретичне та практичне значення результатів роботи полягає в наступному: в роботі описані властивості модифікованих мембранних полотен щодо зниження

показників сухий залишок, жорсткість, забарвленість та вмісту сульфатів, гідрокарбонатів, інших сполук. Показано, що модифіковані версії зворотноосмотичних полотен, можуть частково знижувати показники сухий залишок, жорсткість і вміст гідрокарбонатів, та практично повністю знижувати забарвленість води, вміст сульфатів, іонів заліза, марганцю. На відміну від зворотноосмотичних, які практично повністю знижують всі зазначені показники. Це означає, що модифіковані зворотноосмотичні полотна можна використовувати в процесах підготовки питної води, що відповідає і вимогам щодо безпечності, і рекомендаціям щодо фізіологічної повноцінності.

Запропоновані маркери фізико-хімічних властивостей полотен, за якими можна передбачити селективність полотен по відношенню до жорсткості, сухого залишку, сульфатів, гідрокарбонатів, забарвленості. Такий підхід суттєво сприятиме подальшим дослідженням модифікованих зворотноосмотичних полотен.

В ході пілотних та дослідно-промислових випробувань мембранних елементів, виготовлених з різних полотен, одержано питну воду стабільно високої якості із водопровідної різного складу. Завдяки отриманим результатам вдосконалено існуючу технологію отримання питної води за рахунок заміни двох стадій зворотний осмос та домінералізація на одну стадію зворотний осмос із різною селективністю. Це підтверджується актом впровадження розроблених технологічних рішень на ТОВ «НВО «Екософт».

В роботі обґрунтовано використання двох паралельно встановлених мембранних елементів, виготовлених з полотен із різною селективністю, для одержання питної води заданої якості із водопровідної різного складу. Розроблена формула розрахунку співвідношення потоків пермеату одержаного з двох різних елементів в залежності від складу водопровідної води.

В роботі сформульовані пропозиції щодо цифровізації систем підготовки води (на прикладі водного вендингового автомату) з метою віддаленого контролю якості одержаної води та продуктивності.

Показано, що зниження експлуатаційних витрат за рахунок використання модифікованих мембранних елементів та впровадження цифровізації становить 39 %. Це створює комерційне підґрунтя для широкого впровадження запропонованих підходів.

Розроблений підхід створюватиме умови для ширшого впровадження водних вендингових автоматів, що в свою чергу матиме позитивний вплив на екологію, сприятиме виконанню цілей сталого розвитку ООН та реалізації вимог директиви ЄС щодо зменшення впливу одноразових пластикових пляшок.

Ключові слова: Питна вода, Технології водопідготовки, Зворотний осмос, Домінералізація, Адсорбція, Фільтр, Модифіковані мембранні полотна, Фізико-хімічні властивості мембран, Селективність, Водні вендингові автомати, Цифровізація

Список публікацій здобувача:

- За результатами досліджень опубліковано 8 наукових публікацій, у тому числі:
- 1 одноосібний розділ у колективній монографії;
 - 2 статті у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія»;
 - 1 стаття у періодичному науковому фаховому виданні проіндексованому у базі Scopus (квартиль Q3)
 - 4 тези виступів на міжнародних наукових конференціях;

Перелік публікацій:

1. Сучасні шляхи до чистої води: колективна монографія / Андрусишина І. М., Бурлакова В. С., Василюк С. Л., Дрікер Ю. Д., Косогін О. В., Косогіна І. В., Мітченко Т. Є., **Мудрик Р. Я.**, Орестов Є. О., Поляков В. Р., Стеценко В. В., Шахновський А. М. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 376 с. **Мудрик Р.Я.**

Розділ 8. Комерційні системи водопідготовки, С. 193-227. ISBN 978-966-97940-7-9. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67094>. *Наукове фахове видання України (Здобувачем підготовлено увесь матеріал розділу монографії).*

2. **Mudryk R.**, Mitchenko T. Shared automatic drinking water treatment and dispensing systems and methods of their optimization Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News. 2023, 35(1), P. 9-25. URL: <https://doi.org/10.20535/2218-930012023281111>. *Наукове фахове видання України категорії Б (Здобувачем проведено експериментальні дослідження процесів, опис методики досліджень, здійснено оформлення результатів та подання статті до редакції. Мітченко Т. узагальнено результати досліджень та висновки, розроблено концепцію статті).*

3. **Mudryk R.**, Orestov, Y. Digitalization of water vending machines. Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News., 2023, 37(3), 28–39. URL: <https://doi.org/10.20535/2218-930032023302842>. *Наукове фахове видання України категорії Б (Здобувачем проведено експериментальні дослідження процесів, виконано розрахунки, здійснено оформлення результатів та подання статті до редакції. Орестовим Є. здійснено розробку та перевірку адекватності алгоритму для проведення розрахунків).*

4. Tyvonenko, A., Mitchenko, T., Homaniuk, O., Vasilyuk, S., Kosogina, I., **Mudryk, R.** Production of physiologically complete drinking water using modified reverse osmosis membrane elements. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(10-122), 2023, P. 6–13. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277491>. *Журнал цитується наукометричними базами даних Scopus і Web of Science. За даними SCImago Journal and Country Rank на момент публікації належить до квартиля Q3. (Здобувачем здійснено частину експериментальних досліджень та опис методик. Тивоненком А. здійснено експериментальні дослідження процесів, представлення отриманих даних у вигляді закономірностей та їх аналіз. Мітченко Т. здійснено узагальнення результатів та висновків. Гоманюком О. здійснено експериментальні дослідження процесів. Василюком С. виконано аналіз отриманих результатів досліджень та оброблення даних. Косогіною І. здійснено аналіз отримання даних, подання статті до редакції).*

5. **Mudryk R.**, Orestov Y., Mitchenko T. Digitalization of reverse osmosis water vending machines. International Conference on Desalination for the Environment, Clean Water and Energy - Limassol (Cyprus), 22nd – 26th May 2023 *(Здобувачем виконано експериментальну частину досліджень та підготовано тези доповідей. Орестовим Є. Здійснено перевірку адекватності алгоритму для проведення розрахунків. Мітченко Т. здійснено узагальнення результатів та висновків).*

6. **Mudryk R.**, Driker E., Mitchenko T. Optimization of water treatment technology. International Conference on Chemistry, Chemical Technology and Ecology. – Kyiv (Ukraine), 26th – 29th September 2023 *(Здобувачем виконано експериментальну частину досліджень та підготовано тези доповідей. Дрикером Є. здійснено розробку алгоритму оптимізації та перевірку його адекватності. Мітченко Т. здійснено узагальнення результатів та висновків).*

7. **Mudryk R.**, Driker E., Homaniuk O., Halkina K. Membrane module optimization for water vending machines. International Scientific conference, Resources of natural waters of the Carpathian region. – Lviv (Ukraine), 23rd – 24th May 2024 *(Здобувачем виконано аналіз експериментальних даних та підготовано тези доповідей. Дрикером Є. здійснено розробку алгоритму оптимізації та перевірку його адекватності. Гоманюком О. здійснено польові дослідження. Галкіною К. здійснено лабораторні дослідження. Мітченко Т. здійснено узагальнення результатів та висновків).*

8. **Mudryk R.**, Driker E., Classification of tap water in Ukraine by level and type of mineralization according to water quality monitoring. International conference. “Water technologies: traditional to modern trends”. – Kyiv (Ukraine), 28th-30th October 2025 *(Здобувачем виконано аналіз експериментальних даних та підготовано тези доповідей. Дрикером Є. здійснено аналіз бази даних).*

ANNOTATION

Mudryk R. Modern Approaches to the Production of Drinking Water of Consistently High Quality. – Qualification research work (manuscript). Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 161 “Chemical Technologies and Engineering.” – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,” Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

This dissertation is devoted to developing modern approaches to the production of drinking water with consistently high quality.

The aim of the research is to develop a process for producing drinking water of consistently high quality—meeting safety and physiological adequacy requirements—from tap water of various compositions using membrane purification systems.

The first chapter presents an analytical review of drinking water treatment processes. It is demonstrated that the quality of tap water in Ukraine is deteriorating, and the proportion of non-compliant samples that do not meet the requirements of DSanPiN 2.2.4-171-10 is increasing. Typical non-compliant indicators include color, oxidizability, turbidity, and hardness. In recent years, this list has expanded to include total dissolved solids, iron, and manganese. While 99% of the urban population is supplied with centralized water services, the declining water quality leads consumers to increasingly choose alternative drinking water sources. A comparative analysis of such alternatives—bottled water, household filters, and collective water treatment systems—is provided. It is substantiated that collective systems, particularly water vending machines, represent the most rational means of providing the population with drinking water. These machines function as mini-plants that further purify tap water and dispense drinking water into the user’s bottle. Reverse osmosis is the main purification technology employed, and although widely used, RO-treated water typically does not meet requirements of physiological adequacy. Based on state and industry regulations, the dissertation

formulates requirements for drinking water of consistently high quality. Available methods for producing such water are reviewed, and the feasibility of using reverse osmosis elements of various rejection—manufactured from polyamide membrane sheets—is justified. A list of physico-chemical characteristics of these sheets is provided, including rejection for indicator substances, contact angle, zeta potential, and pore radius.

The second chapter describes the research objects and methodology. The objects include seven samples of polyamide membrane sheets—nanofiltration, reverse osmosis, and modified types—and samples of tap water from Kyiv, Lutsk, and Kryvyi Rih used in laboratory, pilot, and semi-industrial trials. The research methods encompass laboratory equipment and procedures for determining membrane properties such as rejection, pore radius, contact angle, and zeta potential. Methods for determining water quality indicators are listed. A test stand for membrane element evaluation and the principle of its operation are described. A pilot and semi-industrial testing unit is presented alongside operating conditions. Relevant formulas for processing experimental data are provided.

The third chapter presents the research results, interpretations, and conclusions. The “Water Quality Map” database is analyzed, and a classification of tap water by type and mineralization level is proposed. For each water type, the required reduction in total dissolved solids and hardness levels to meet the requirements of consistently high-quality drinking water is calculated.

The physico-chemical properties of the membrane sheets are determined. The relationship between their rejection toward indicator and mineral quality parameters and their contact angle, zeta potential, and pore radius is established. The most effective sheets for producing water of the required quality are identified.

Two membrane elements were manufactured from sheets of different rejection, and their properties—selectivity toward total dissolved solids, hardness, and productivity—were determined.

An algorithm for selecting membrane elements or their combinations for each of the three tap water types is developed. A formula for calculating the ratio of permeate flows obtained from membrane elements of different rejection is proposed.

Pilot tests of the process for producing consistently high-quality drinking water from tap water of different types were conducted using the developed algorithm. The tests confirmed the correctness of membrane flat sheet selection and the adequacy of the proposed algorithm.

Based on pilot test results, an improved technological scheme for water vending machines was proposed. In the new configuration, the stages of reverse osmosis and remineralization are replaced by a single stage—reverse osmosis with elements of different selectivity.

A concept for the digitalization of vending machines is also proposed, including sensors, detectors, a microprocessor-based controller, and software for remote monitoring of water quality and production volume.

Semi-industrial trials using Kyiv tap water demonstrated that throughout operation, the indicator parameters of drinking water quality—total dissolved solids, hardness, pH, and color—met the requirements of consistently high-quality drinking water. The service life of membrane elements with different rejection was determined to be 105 m³. It is shown that combining the improved technological scheme with digitalization reduces service frequency from four times to twice per year.

The fourth chapter substantiates the economic feasibility of implementing the modern approach to preparing consistently high-quality drinking water in membrane-based vending machines. Annual operating costs of current and improved vending machine networks are compared, demonstrating a 39% reduction in expenses. The environmental benefits of water vending machines are assessed, showing that a network of 50 units can reduce plastic waste by 100,000 kg per year.

Scientific novelty:

For the first time, it has been demonstrated that the production of drinking water of consistently high quality from tap water of varying composition can be achieved by using membrane elements fabricated from membrane sheets characterized by a water contact angle of $55 \pm 5^\circ$ and $45 \pm 5^\circ$, and a zeta potential at pH 7 of -22 ± 2 mV and -25 ± 2 mV, respectively.

For the first time, it has been established that the water contact angle and zeta potential serve as markers of the physicochemical properties of membrane sheets, enabling the prediction of their selectivity with respect to hardness ions, total dissolved solids (TDS), bicarbonates, and color.

For the first time, a formula has been proposed to calculate the ratio of permeate flow rates from different membrane sheets; this formula predicts the quality of the produced water as a function of tap-water composition and can serve as a basis for the digitalization of drinking-water treatment processes.

Practical significance:

The study describes the performance of modified membrane sheets with respect to reducing total dissolved solids (TDS), hardness, color, and the concentrations of sulfates, bicarbonates, and other constituents. It is shown that modified reverse-osmosis (RO) sheets can partially reduce TDS, hardness, and bicarbonate content, while almost completely removing water color as well as sulfate, iron, and manganese ions. In contrast, conventional RO membranes almost completely remove all of the above parameters. This indicates that modified RO sheets can be applied in drinking-water treatment processes in a manner that satisfies both safety requirements and recommendations regarding physiological adequacy of drinking water.

Markers of the physicochemical properties of membrane sheets are proposed, enabling prediction of membrane selectivity with respect to hardness, TDS, sulfates,

bicarbonates, and color. This approach will substantially facilitate further research on modified RO sheets.

During pilot-scale and demonstration-scale testing of membrane elements fabricated from different membrane sheets, drinking water of consistently high quality was produced from tap water of varying composition. Based on these results, the existing drinking-water production technology was improved by replacing the two-stage sequence of reverse osmosis followed by remineralization with a single reverse-osmosis stage employing membranes of different selectivity. This improvement is confirmed by an implementation act documenting the deployment of the developed technological solutions at LLC “SPC ‘Ecosoft’.”

The study substantiates the use of two membrane elements installed in parallel and fabricated from membrane sheets with different selectivity to obtain drinking water of a specified quality from tap water of varying composition. A formula was developed to calculate the ratio of permeate flow rates from the two different elements as a function of tap-water composition.

The study also formulates proposals for the digitalization of water-treatment systems (using a water vending machine as an example) to enable remote monitoring of produced-water quality and system productivity.

It is shown that the reduction in operating costs achieved through the use of modified membrane elements and the implementation of digitalization amounts to 39%, thereby providing a commercial rationale for the widespread adoption of the proposed approaches.

The developed approach promotes broader adoption of water vending machines, which contributes to environmental sustainability, supports the achievement of UN Sustainable Development Goals, and aligns with EU directives aimed at reducing the impact of single-use plastic bottles.

Keywords: Drinking water, Water treatment technologies, Reverse osmosis, Remineralization, Adsorption, Filter, Modified membrane elements, Physico-chemical properties of membranes, Rejection, Water vending machines, Digitalization.

List of the applicant's publications is as follows.

Based on the research results, 8 scientific publications have been published, including:

- 1 single-authored chapter in a collective monograph;
- 2 articles in Ukrainian professional scientific journals in specialty 161 "Chemical Technologies and Engineering";
- 1 article in a peer-reviewed scientific journal indexed in Scopus (Q3 quartile);
- 4 conference abstracts presented at international scientific conferences.

List of publications:

1. Suchasni shliakhy do chystoi vody: kolektyvna monohrafiia / Andrusyshyna I., Burlakova V., Vasyliuk S., Driker E., Kosohin O., Kosohina I., Mitchenko T., **Mudryk R.**, Orestov Y., Poliakov V., Stetsenko V., Shakhnovskyi A. – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2024. – 376 p. **Mudryk R.** Rozdil 8. Komertsiiini systemy vodopidhotovky, p.193–227. ISBN 978-966-97940-7-9.

URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67094>. *Ukrainian professional scientific journal (the applicant prepared the entire content of the monograph chapter).*

2. **Mudryk R.**, Mitchenko T. Shared automatic drinking water treatment and dispensing systems and methods of their optimization Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News. 2023, 35(1), P. 9-25. URL: <https://doi.org/10.20535/2218-930012023281111>. *Ukrainian professional scientific journal (Category B) (the applicant conducted experimental studies of the processes, described the research methodology, prepared the presentation of the results, and submitted the manuscript to the editorial office. T. Mitchenko summarized the research results and conclusions and developed the concept of the paper).*

3. **Mudryk R.**, Orestov, Y. Digitalization of water vending machines. Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News., 2023, 37(3), 28–39.

URL: <https://doi.org/10.20535/2218-930032023302842>. *Ukrainian professional scientific journal (Category B) (The applicant conducted experimental studies of the processes, performed the calculations, prepared the presentation of the results, and submitted the manuscript to the editorial office. Orestov Y. developed and verified the adequacy of the calculation algorithm).*

4. Tyvonenko, A., Mitchenko, T., Homaniuk, O., Vasilyuk, S., Kosogina, I., **Mudryk, R.** Production of physiologically complete drinking water using modified reverse osmosis membrane elements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10-122), 2023, P. 6–13. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277491>. The journal is indexed in the bibliometric databases Scopus and Web of Science. According to SCImago Journal and Country Rank, at the time of publication it belonged to the Q3 quartile. *(The applicant carried out part of the experimental studies and described the methodologies. Tyvonenko A. conducted the experimental studies of the processes, presented the obtained data as patterns, and performed their analysis. Mitchenko T. summarized the results and conclusions. Homaniuk O. conducted experimental studies of the processes. Vasyliuk S. performed the analysis of the obtained research results and data processing. Kosohina I. analyzed the obtained data and submitted the manuscript to the editorial office).*

5. **Mudryk R.**, Orestov Y., Mitchenko T. Digitalization of reverse osmosis water vending machines. International Conference on Desalination for the Environment, Clean Water and Energy - Limassol (Cyprus), 22nd – 26th May 2023 *(The applicant carried out the experimental part of the research and prepared the conference abstracts. Orestov Ye. verified the adequacy of the calculation algorithm. Mitchenko T. summarized the results and conclusions).*

6. **Mudryk R.**, Driker E., Mitchenko T. Optimization of water treatment technology. International Conference on Chemistry, Chemical Technology and Ecology. – Kyiv (Ukraine), 26th – 29th September 2023 *(The applicant carried out the experimental part of the research and prepared the conference abstracts. Driker E. developed the optimization algorithm and verified its adequacy. Mitchenko T. summarized the results and conclusions).*

7. **Mudryk R.**, Driker E., Homaniuk O., Halkina K. Membrane module optimization for water vending machines. International Scientific conference, Resources of natural waters of the Carpathian region. – Lviv (Ukraine), 23rd – 24th May 2024 (*The applicant analyzed the experimental data and prepared the conference abstracts. Driker Ye. developed the optimization algorithm and verified its adequacy. Homaniuk O. conducted field studies. Halkina K. conducted laboratory studies. Mitchenko T. summarized the results and conclusions*).

8. **Mudryk R.**, Driker E., Classification of tap water in Ukraine by level and type of mineralization according to water quality monitoring. International conference. “Water technologies: traditional to modern trends”. – Kyiv (Ukraine), 28th-30th October 2025 (*The applicant analyzed the experimental data and prepared the conference abstracts. Driker E. analyzed the database.*)

ЗМІСТ

<i>ВСТУП</i>	21
<i>РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОЦЕСІВ ПІДГОТОВКИ ПИТНОЇ ВОДИ</i>	28
1.1 Питна вода та способи її отримання	28
1.1.1 Стан водопровідної води в різних регіонах України	29
1.1.2 Бутильована питна вода	32
1.1.3 Локально доочищена водопровідна вода	33
1.2 Принцип роботи водних вендингових автоматів	36
1.3 Теоретичні основи технології зворотного осмосу	39
1.4 Методи домінералізації зворотноосмотичної води	41
1.5 Зворотноосмотичні мембранні елементи з різною селективністю	44
1.6 Цифровізація систем підготовки питної води	45
Висновки розділу 1	46
<i>РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ</i>	47
2.1 Об'єкти дослідження	47
2.2 Методи дослідження	48
2.3 Пілотні випробування мембранних елементів з різною селективністю	54
2.4 Методи обробки та розрахунків одержаних результатів	57
Висновки розділу 2	58
<i>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ</i>	59
3.1 Аналіз інформації щодо складу водопровідної води України	59
3.2 Дослідження фізико-хімічних властивостей поліамідних мембранних полотен	62
3.3 Дослідження властивостей мембранних елементів виготовлених з обраних полотен.	68
3.4 Розробка алгоритму вибору мембранних елементів із різною селективністю	70
3.5 Проведення пілотних випробувань процесу підготовки питної води	76
3.6 Розробка технологічної схеми процесу підготовки питної води стабільно високої якості	79
3.7 Дослідно-промислові випробування процесу підготовки питної води	87
Висновки розділу 3	95

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ПІДГОТОВКИ ПИТНОЇ ВОДИ 97

 4.1 Економічна доцільність впровадження сучасних підходів до підготовки питної води 97

 4.2 Екологічна доцільність впровадження водних вендингових автоматів.....100

 Висновки розділу 4.....102

ВИСНОВКИ..... 103

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 105

Додаток 1..... 117

Додаток 2..... 118

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА СИМВОЛІВ

ЗО – зворотний осмос;

НФ – нанофільтрація;

МП – модифіковане полотно;

МЕ – мембранний елемент;

R_C – селективність мембранного елемента за певним компонентом, %;

N_{ME2} – частка пермеату мембранного елемента ME2 в суміші, %;

S_d – сухий залишок суміші пермеатів, мг/дм³;

H_d – жорсткість суміші пермеатів, ммоль/дм³;

ВВА – водний вендинговий автомат.

ВСТУП

Доступ до безпечної питної води є однією з основних проблем людства. В наш час на водну галузь негативно діють три глобальних фактори: зменшення запасів прісної води на планеті; погіршення якості води через зміну клімату, антропогенний вплив, виявлення нових забруднень; старіння інфраструктури централізованого водопостачання. Як наслідок, якість водопровідної води все частіше не відповідає встановленим вимогам. Це, своєю чергою, сприяє розвитку технологій доочищення водопровідної води та способів її доставки до споживачів.

Поширеними методами доочищення води є адсорбція, іонний обмін, зворотний осмос, механічна фільтрація, ультрафіолетове знезараження. Найкращою для отримання саме безпечної питної води є технологія зворотного осмосу. Її застосування засноване на використанні мембранних елементів виготовлених із поліамідних полотен. Проте, очищена з використанням комерційно доступних зворотноосмотичних елементів, вода не відповідає вимогам фізіологічної повноцінності. Тому наукові дослідження властивостей поліамідних полотен є необхідними для пошуку нових підходів з одержання води стабільно високої якості за показниками і безпечності, і фізіологічної повноцінності.

Щодо шляхів доставки, питна вода може розливатись в пляшки, в цьому випадку процес доочищення відбувається на заводі, або доочищатись безпосередньо в місці її споживання шляхом встановлення домашніх фільтрів чи в колективних пунктах розливу води. Зважаючи на високий рівень забезпечення населення централізованим водопостачанням в містах, колективні системи доочищення водопровідної води та її розливу є найбільш раціональним способом забезпечення питною водою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Роботу було виконано в рамках договору № ДНДЧ/27.00/244/24 від 10.12.2024 р. «Дослідження показників якості води, матеріалів та пристроїв для її

очищення» на замовлення громадської організації «Всеукраїнське водне товариство «Вотернет» (Державний реєстраційний номер 0125U000162), період виконання: 01.01.2025 – 31.12.2025 рр.

Мета: розробити процес підготовки питної води стабільно високої якості за показниками безпечності та фізіологічної повноцінності з водопровідної різного складу з використанням мембранних систем очищення води.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати інформацію щодо складу водопровідної води України та провести класифікацію за рівнем та типом мінералізації.

2. Визначити фізико-хімічні властивості ряду поліамідних мембранних полотен, оцінити їхній вплив на селективність по відношенню до індикаторних та мінеральних показників якості води і обрати найбільш ефективні.

3. Дослідити процес одержання питної води стабільно високої якості з водопровідної різного складу при використанні мембранних елементів, виготовлених з обраних полотен з різною селективністю, та їх комбінацій. Запропонувати формулу розрахунку співвідношення потоків пермеатів, одержаних з елементів з різною селективністю, в залежності від складу вихідної води. Провести пілотні випробування процесів підготовки водопровідної води різного складу.

4. Запропонувати технологічну схему процесу підготовки питної води стабільно високої якості з водопровідної різного складу та провести дослідно-промислові випробування з використанням мембранного водного вендингового автомату

5. Оцінити економічну та екологічну доцільність використання запропонованого процесу підготовки високоякісної питної води у мережі водних вендингових автоматів.

Методи дослідження

В ході досліджень визначались наступні фізико-хімічні характеристики поліамідних мембранних полотен: селективність по відношенню до гідрокарбонату та сульфату натрію, показників жорсткості, сухий залишок, забарвленість; кут змочування, дзета-потенціал та радіус пор. Селективність по відношенню до зазначених сполук та показників визначалась на установці тестування мембранних полотен з використанням комірки Sterlitech CF042 (США). Також на ній визначався радіус пор за методом Сарболукі. Контактний кут змочуваності поверхні поліамідних шарів вимірювався за допомогою гоніометра Dataphysics OCA15 EC (Німеччина). Дзета-потенціал поліамідних шарів мембран визначався за допомогою електрокінетичного аналізатора Anton Paar Surpass3 (Австрія). Випробування мембранних елементів проводили на стенді визначення характеристик мембранних елементів. Пілотні та дослідно-промислові випробування проводили на водному вендинговому автоматі Ecosoft KA-150 (Україна) з вдосконаленою технологічною схемою підготовки води.

Наукова новизна отриманих результатів

Вперше показано, що отримання питної води стабільно високої якості з водопровідної води різного складу досягається за рахунок застосування мембранних елементів, виготовлених з полотен, що характеризуються кутом змочування 55 ± 5 і 45 ± 5 градусів та дзета потенціалом при рН 7 -22 ± 2 і -25 ± 2 мВ.

Вперше встановлено, що кут змочування та дзета потенціал є маркерами фізико-хімічних властивостей мембранних полотен, які дозволяють прогнозувати їх селективність по відношенню до іонів жорсткості, сухого залишку, гідрокарбонатів та забарвленості.

Вперше запропонована формула розрахунку співвідношення потоків пермеату з мембранних полотен, яка прогнозує якість одержаної води в залежності від складу

водопровідної, що може бути покладено в основу цифровізації процесу підготовки питної води.

Теоретичне та практичне значення отриманих результатів:

В роботі описані властивості модифікованих мембранних полотен щодо зниження показників сухий залишок, жорсткість, забарвленість та вмісту сульфатів, гідрокарбонатів, інших сполук. Показано, що модифіковані версії зворотноосмотичних полотен, можуть частково знижувати показники сухий залишок, жорсткість і вміст гідрокарбонатів, та практично повністю знижувати забарвленість води, вміст сульфатів, іонів заліза, марганцю. На відміну від зворотноосмотичних, які практично повністю знижують всі зазначені показники. Це означає, що модифіковані зворотноосмотичні полотна можна використовувати в процесах підготовки питної води, що відповідає і вимогам щодо безпечності, і рекомендаціям щодо фізіологічної повноцінності.

Запропоновані маркери фізико-хімічних властивостей полотен, за якими можна передбачити селективність полотен по відношенню до жорсткості, сухого залишку, сульфатів, гідрокарбонатів, забарвленості. Такий підхід суттєво сприятиме подальшим дослідженням модифікованих зворотноосмотичних полотен.

В ході пілотних та дослідно-промислових випробувань мембранних елементів, виготовлених з різних полотен, одержано питну воду стабільно високої якості із водопровідної різного складу. Завдяки отриманим результатам вдосконалено існуючу технологію отримання питної води за рахунок заміни двох стадій зворотний осмос та домінералізація на одну стадію зворотний осмос із різною селективністю. Це підтверджується актом впровадження розроблених технологічних рішень на ТОВ «НВО «Екософт».

В роботі обґрунтовано використання двох паралельно встановлених мембранних елементів, виготовлених з полотен із різною селективністю, для одержання питної води заданої якості із водопровідної різного складу. Розроблена формула розрахунку співвідношення потоків пермеату одержаного з двох різних елементів в залежності від складу водопровідної води.

В роботі сформульовані пропозиції щодо цифровізації систем підготовки води (на прикладі водного вендингового автомату) з метою віддаленого контролю якості одержаної води та продуктивності.

Показано, що зниження експлуатаційних витрат за рахунок використання модифікованих мембранних елементів та впровадження цифровізації становить 39 %. Це створює комерційне підґрунтя для широкого впровадження запропонованих підходів.

Розроблений підхід сприятиме популяризації водних вендингових автоматів, які в свою чергу мають позитивний вплив на екологію, виконання цілей сталого розвитку ООН та реалізацію вимог директиви ЄС щодо зменшення впливу одноразових пластикових пляшок на довкілля.

Особистий внесок здобувача:

Результати дисертаційної роботи отримані самостійно автором та опубліковані у кооперації з науковим керівником та науковцями, що були співавторами, з якими також проводились обговорення результатів. Співавторами наукових праць виступають науковий керівник та інші дослідники, які взяли участь у спільних дослідженнях. Обговорення та планування експериментів, визначення завдань дослідження та формулювання висновків були розроблені у співпраці з науковим керівником д.т.н., професором кафедри неорганічної хімії, водоочищення та загальної хімічної технології Мітченко Т.Є. Безпосередньо автором здійснено: 1) пошук та аналіз літературних джерел за тематикою

дисертації; 2) аналіз бази даних «Карта якості води» та класифікація водопровідної води; 3) встановлення зв'язку між фізико-хімічними характеристиками полотен та їх селективністю; 4) вибір мембранних полотен та визначення характеристик мембранних елементів; 5) розробка алгоритму вибору мембранних елементів в залежності від складу водопровідної води; 6) планування пілотних випробувань та обробка результатів; 7) розробка вдосконаленої технологічної схеми підготовки питної води та пропозицій щодо цифровізації на основі водного вендингового автомату; 8) планування дослідно-промислових випробувань та обробка результатів; 9) оцінка економічної та екологічної доцільності запропонованих підходів до процесу підготовки питної води.

Апробація результатів дисертації

Основні положення і наукові здобутки дисертаційного дослідження представлені та винесені на обговорення на 4 міжнародних конференціях, серед яких Desalination for the Environment, Clean Water and Energy - Limassol (Cyprus), 22nd – 26th May 2023, International Conference on Chemistry, Chemical Technology and Ecology. – Kyiv (Ukraine), 26th – 29th September 2023, International Scientific conference, Resources of natural waters of the Carpathian region. – Lviv (Ukraine), 23rd – 24th May 2024, International conference. “Water technologies: traditional to modern trends”. – Kyiv (Ukraine), 28th-30th October 2025.

Публікації

За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, що включають: 3 статті у наукових фахових виданнях (з них 1 цитується наукометричною базою даних SCOPUS, 2 статті входять до переліку фахових видань України категорії Б), 1 розділ в колективній монографії та 4 тези доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота обсягом 119 сторінок машинописного тексту включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел та 2 додатки. Робота містить 17 таблиць та 26 рисунків. У списку використаних джерел наведено 106 найменувань, з яких 77 написані латиницею.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОЦЕСІВ ПІДГОТОВКИ ПИТНОЇ ВОДИ

1.1. Питна вода та способи її отримання

Питною може вважатись вода, що відповідає встановленим державою вимогам. В Україні документом, що визначає якість питної води, є ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» [1]. Згідно з цим документом якість питної води нормується за 86 показниками, з яких 11 санітарно-бактеріологічних та 75 санітарно-хімічних. За цими показниками документ встановлює максимально допустимі концентрації.

Проте окрім вимог до безпечності питної води є рекомендації щодо її фізіологічної повноцінності. Згідно з ними встановлені мінімально допустимі концентрації за деякими показниками, зокрема жорсткості, лужності, кальцію, магнію, натрію, сухому залишку, тощо [1]. Фізіологічно повноцінна вода – це вода, яка містить збалансований склад макро- і мікроелементів, необхідних для нормального функціонування організму. Вона не тільки безпечна для споживання, а також забезпечує оптимальне засвоєння поживних речовин [2].

Споживаючи два літри питної води на добу, людина може отримати до 20% необхідної добової норми кальцію, до 25% магнію, до 50–80% фтору та до 50% йоду. Однак важливо, щоб концентрація солей у воді не перевищувала допустимі норми. Надмірно жорстка вода може сприяти утворенню сечових каменів, що викликає проблеми з нирками. З іншого боку, постійне вживання знесоленої води може збільшити ризик серцево-судинних захворювань та гіпертонії [3,4].

Згідно з українським законодавством питна вода вважається фізіологічно повноцінною, якщо її солевміст становить не менше 100 мг/дм³, а загальна жорсткість знаходиться в діапазоні від 1 до 7 ммоль/дм³ [1].

Згідно з вимогами асоціації Specialty coffee association (SCA) [5] щодо води для приготування напоїв сухий залишок має бути в межах $75 - 150 \text{ мг/дм}^3$, жорсткість $0,35 - 1,7 \text{ ммоль/дм}^3$.

На сьогодні є декілька способів забезпечити людей питною водою: водопровідна вода, бутильована вода, локально доочищена водопровідна вода.

1.1.1. Стан водопровідної води в різних регіонах України

Централізоване водопостачання охоплює лише 31% населених пунктів України. При цьому кількість людей, що користуються водою централізованого водопостачання становить 75,6%, решта використовують воду з артезіанських свердловин, колодязів та каптажів. Згідно з даними наведеними в Національній доповіді 2022-2023 року рівень забезпечення централізованим водопостачанням у містах становить 99,0%, у селищах міського типу – 91,2%, а в селах – 26,8% [6,7].

Водопостачання в усіх регіонах України забезпечується за рахунок підземних та поверхневих вод. Більшість поверхневих водойм зазнають антропогенного та техногенного забруднення [8,9]. На погіршення якості водопровідної води головним чином впливають застарілі технології очищення та незадовільний технічний стан водопроводу. Існує проблема вторинного забруднення води при її транспортуванні продуктами корозії, а також мікробіологічними забрудненнями за рахунок деструкції біоплівки, що утворюється на внутрішніх поверхнях трубопроводів [8].

З 2010 року Громадська організація Всеукраїнське водне товариство «WaterNet» активно проводить моніторинг якості питної води в рамках проєкту «Карта якості води» [11]. Основним виконавцем є сертифікована лабораторія іонного обміну та адсорбції Хіміко-технологічного факультету КПІ імені Ігоря Сікорського, в якій за період з 2010 по 2025 роки було виконано аналіз понад 72,3 тис. проб води. Карта якості води – це єдиний в Україні інтерактивний

моніторинговий проект, яка надає актуальні дані про якість питної води з різних джерел, включаючи централізоване водопостачання, колодязі та свердловини у всіх областях України [10]. Сьогодні в Україні це найбільш об'ємна відкрита база даних про якість води. Вона оновлюється регулярно та дозволяє отримувати актуальну інформацію. На її основі можна проводити дослідження для покращення роботи централізованих станцій та локальних систем водопідготовки [13,14].

Постійний контроль якості водопровідної води здійснюється водоканалами не за всім переліком показників, а лише за індикаторними [7]. Індикаторні показники якості води — це такі показники, які самі по собі, зазвичай, не мають прямого токсичного впливу на людину, однак перевищення їхніх нормативів може свідчити про погіршення якості води. Ці показники є важливими для загальної оцінки якості води. Перелік індикаторних показників якості водопровідної води та їх нормативи наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Перелік індикаторних показників якості водопровідної води та нормативи до них

Показник	Норматив
Каламутність, мг/дм ³	≤ 0,58
Запах, бали	≤ 2
Забарвленість, градуси	≤ 20
Залізо, мг/дм ³	≤ 0,2
Марганець, мг/дм ³	≤ 0,05
Жорсткість, ммоль/дм ³	1 - 7
Сухий залишок, мг/дм ³	100 - 1000
pH	6,5 – 8,5

На рисунку 1.1 показана частка нестандартних проб (в яких хоча б один з показників не відповідає нормативу [1]) водопровідної води в Україні [13].

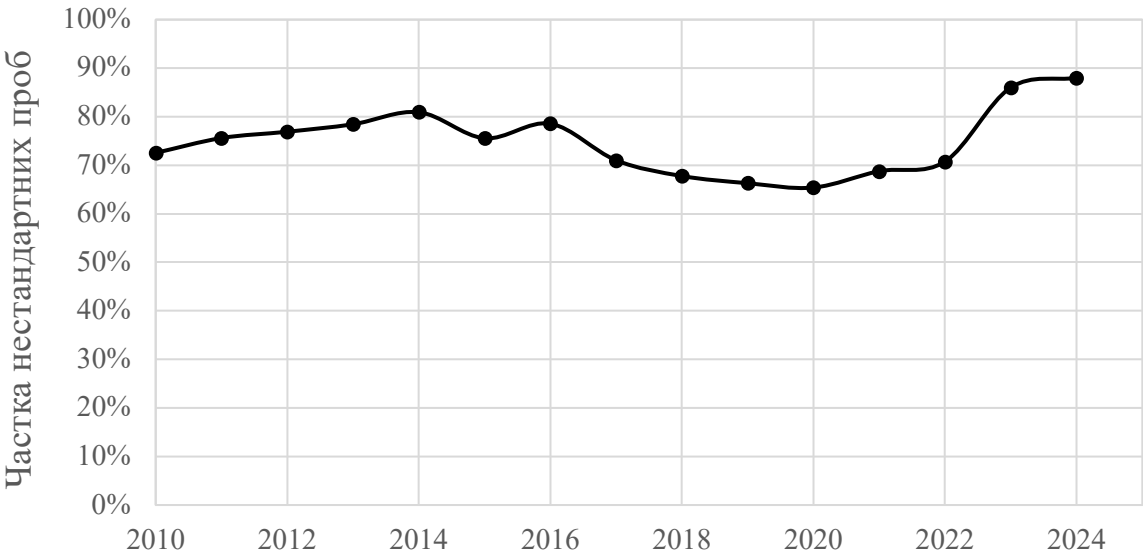


Рисунок 1.1 – Динаміка зміни частки нестандартних проб водопровідної води в Україні [13]

В таблиці 1.2 наведений перелік індикаторних показників якості водопровідної води, а також динаміка зміни частки нестандартних проб по роках [13].

Таблиця 1.2 – Динаміка зміни частки нестандартних проб [13]

	2021	2023/2024	Різниця
Каламутність, мг/дм³	20%	48%	28%
Запах, бали	4%	14%	10%
Забарвленість, градуси	37%	36%	-1%
Залізо, мг/дм³	23%	32%	9%
Марганець, мг/дм³	4%	17%	13%
Жорсткість, ммоль/дм³	19%	29%	10%
Сухий залишок, мг/дм³	4%	11%	7%
рН	5%	5%	0
Всього*	68%	88%	20%

* - не відповідає ДСанПіН 2.2.4-171-10 хоча б за одним показником

Аналіз даних про склад водопровідної води в Україні показав, що найчастіше її якість не відповідає встановленому нормативу за такими санітарно-хімічними показниками як: каламутність, забарвленість, вміст марганцю та заліза. Крім того, як показано в таблиці 1.2 якість водопровідної води за показниками сухий залишок, жорсткість, каламутність та залізо з плином часу погіршується. Таким чином, дослідження технологій доочищення водопровідної води від зазначених домішок є важливим завданням для забезпечення населення питною водою стабільно високої якості.

1.1.2. Бутильована питна вода

Велика кількість людей для щоденного споживання обирає бутильовану воду. Згідно з даними Європейської федерації бутильованих вод обсяг світового ринку бутильованої води становить 437,3 млрд літрів [15,16]. Зростання попиту на бутильовану воду визначається, окрім погіршення якості водопровідної води, також збільшенням платоспроможності населення та зміною способу життя, зокрема частими переїздами. При цьому слід відзначити, що більшість людей надають перевагу воді в пластиковій тарі, що легко пояснюється доступністю, дешевизною, легкістю та міцністю останньої [15,17].

Проте, є декілька причин, через які не можна вважати використання бутильованої води найкращим рішенням. По-перше – це невідоме джерело походження води. Так, наприклад, вода, нібито із гірських джерел чи струмків, може виявитись доочищеною водопровідною. Це є можливим тому, що інформацію про якість бутильованої води набагато складніше знайти ніж водопровідної, яка постійно контролюється різними спеціальними службами та оприлюднюється. Тому, можна сказати, що бутильована вода, може бути навіть менш безпечною, ніж водопровідна [17].

По-друге – використання пластикової тари. Згідно з нещодавніми дослідженнями вода із пластикових пляшок містить мікропластики, які є джерелом

таких токсичних хімічних речовин, як бісфенол А, поліхлоровані біфеніли, ароматичні поліциклічні вуглеводні та інші [18,19,20]. Суттєвою також є проблема з утворенням біоплівки на поверхнях пластику, що сприяє переносу бактерій та вірусів на великі відстані [21].

По-третє – проблема пластикового сміття. Чи не найбільшою проблемою використання бутильованої води, є забруднення довкілля пластиком [20]. Дуже мала кількість пляшок утилізується, а ще менша – переробляється на нові. Через це більшість пластикових пляшок опиняється на звалищі та в океані [21]. Тенденція вторинного перероблення пластику, хоч і активно набирає обертів, проте не настільки, щоб забезпечити, хоча б половину перероблення існуючих пластикових відходів [22]. Найбільш ефективний вихід з ситуації, що склалася, полягає саме в скороченні споживання бутильованої води за рахунок переходу на очищену воду, надану альтернативними методами.

1.1.3. Локально доочищена водопровідна вода

Популярним способом отримання питної води високої якості є доочищення водопровідної води локально, тобто в місці її споживання. Вода може доочищатись домашніми фільтрами, встановленими в приватних помешканнях для індивідуального користування, або системами для колективного користування, встановленими в густонаселених кварталах міст.

Домашні фільтри для очищення води в Україні згідно статистики використовують близько 20% громадян. В цьому випадку доочищення водопровідної води до встановлених норм відбувається безпосередньо в місці її споживання, що виключає необхідність використовувати одноразову пластикову тару. Воду найвищої якості забезпечують фільтри на основі технології зворотного осмосу (ЗО) [3]. Вони досить широко розповсюджені, як у світі [23], так і в Україні [17], і їх популярність зростає, що показано на рисунку 1.2.

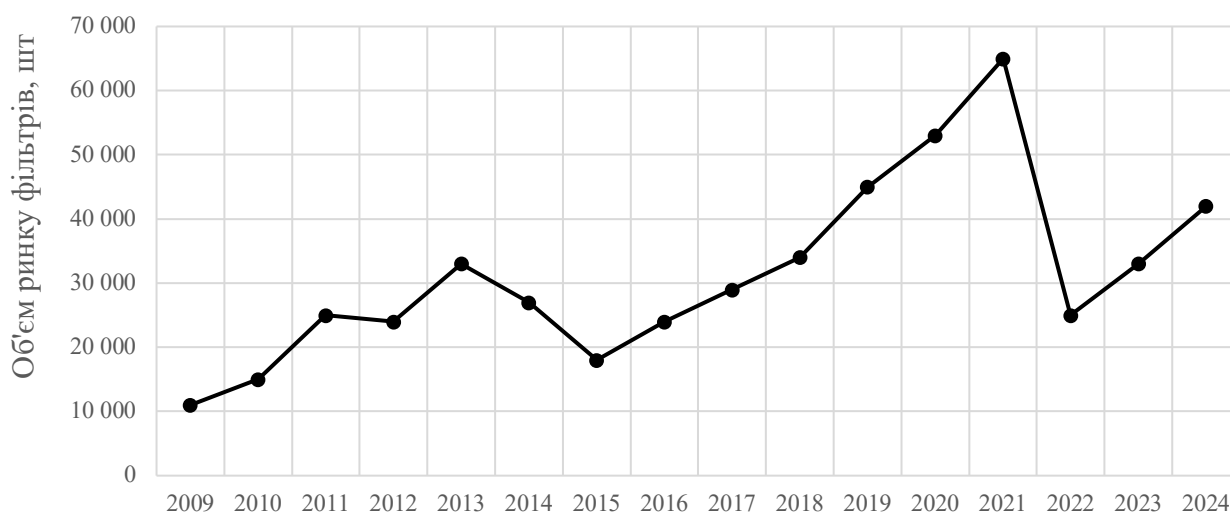


Рисунок 1.2 - Об'єм ринку домашніх фільтрів зворотного осмосу в Україні [23]

Проте не завжди та не у всіх є можливість встановлювати такі фільтри через високу вартість. Крім того ці фільтри є стаціонарними, їх важко переміщувати в інше помешкання, що стає суттєвим недоліком при регулярній зміні місця проживання [24].

Системи очищення та розливу води колективного використання – це апарати чи кіоски, що встановлюються поблизу місць проживання великої кількості людей: в продуктових магазинах, на прибудинкових територіях, в торговельних центрах, тощо. Прикладом такої системи є водні вендингові автомати (ВВА). Вони підключаються до джерел муніципального водопостачання та забезпечують доочищення водопровідної води та її розлив в тару споживача в автоматичному режимі [25,26].

В таблиці 1.3 наведені переваги, недоліки та вартість питної води з різних джерел [27 – 30].

Таблиця 1.3 – Порівняння властивостей питної води з різних джерел

Джерело	Переваги	Недоліки	Ціна води, грн/дм ³
1	2	3	4
Водопровідна вода	• найдоступніший спосіб отримання питної води; • найнижча вартість.	• показники якості води не завжди відповідають вимогам нормативів; • якість води постійно погіршується через появу нових забруднювачів, використання застарілих технологій очищення, вторинне забруднення води в трубопроводах.	0,03 – 0,06
Бутильована вода	• якість відповідає нормам до безпечної води • легко придбати	• мікроорганічні домішки у воді • якість води нерегулярно перевіряється • джерело пластикових відходів • висока ціна	8 – 17
Вода після домашнього фільтру	• якість відповідає нормам до безпечної води • зручно користуватись • доступна ціна води	• якість води не завжди відповідає вимогам до фізіологічної повноцінності • відсутній поточний контроль якості води • висока вартість фільтра (від 5 000 грн)	3 - 5

1	2	3	4
Вода після ВВА	• якість відповідає нормам до безпечної води • легко придбати • для великої кількості людей • низька ціна	• якість води не завжди відповідає вимогам до фізіологічної повноцінності • потребують постійного контролю, заміни картриджів та обслуговування	1,5 – 2,0

Такі переваги ВВА як якість води, зручність використання, екологічність та низька ціна, роблять їх найбільш перспективним джерелом питної води для користувачів. Проте на сьогодні кількість таких апаратів у містах не значна. На низьке поширення ВВА впливають їх недоліки. Через недосконалість технології очищення вода не відповідає вимогам фізіологічної повноцінності, а сам автомат потребує частого обслуговування. Тому детальне вивчення ВВА та їх вдосконалення є актуальним завданням на шляху забезпечення користувачів питною водою високої якості.

1.2. Принцип роботи водних вендингових автоматів

Серед колективних систем саме ВВА розвиваються найшвидше як у світі, так і в Україні. На рисунку 1.3 зображений популярний в Україні апарат [25].



Рисунок 1.3 - Зовнішній вигляд та внутрішня компоновка водного вендингового автомату

ВВА – це міні-завод з виробництва питної води високої якості. Такі апарати підключаються до водопроводу, вода проходить 7 ступенів очищення: механічна фільтрація, дехлорування на активованому вугіллі[31,32], дозування антискаланту, зворотний осмос, адсорбція на активованому вугіллі [33 – 35], збагачення очищеної води мінеральними сполуками, зокрема магнію і кальцію, та ультрафіолетове знезараження[36 – 38]. Користувачі купують воду через вбудовані платіжні системи та наливають у свої багаторазові пляшки об’ємом від 1 до 19 л.

На рисунку 1.4 зображена блок-схема процесу доочищення водопровідної води та її продажу за допомогою водного вендингового автомату [39 – 41].

Основною технологією для отримання питної води у ВВА є метод зворотного осмосу [44,45]. В таблиці 1.4 наведений склад водопровідної води міста Києва за індикаторними показниками, склад очищеної води мембранним вендинговим автоматом та рекомендації щодо якості питної води.

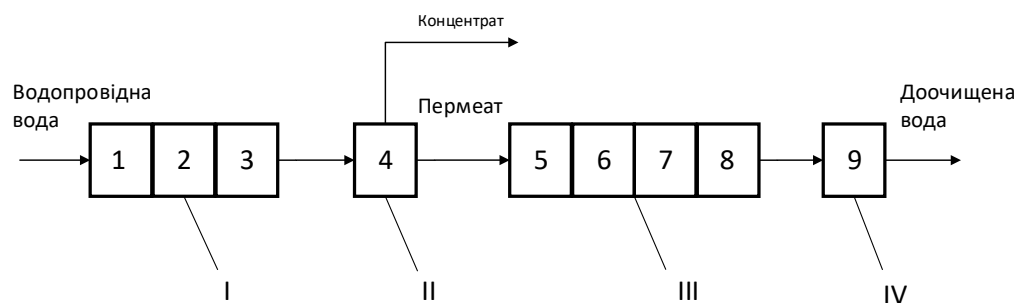


Рисунок 1.4 – Блок-схема процесу підготовки та продажу води в вендинговому автоматі [32,38,42,43]:

I – Попередня підготовка води; II – Зворотний осмос; III – Постобробка води; IV – Платіжна система; 1 – Механічна фільтрація; 2 – Дехлорування на активованому вугіллі; 3 – Дозування антискаланту; 4 – Зворотний осмос; 5 – Ємність пермеату; 6 – Адсорбція на активованому вугіллі; 7 – Домінералізація; 8 – Знезараження; 9 – Платіжна система

Таблиця 1.4 – Склад води за індикаторними показниками та рекомендації щодо її якості

Показник	Водопровідна вода ¹⁾	Вода, очищена мембранною системою	Рекомендації ²⁾	Рекомендації ³⁾	Цільові значення
Каламутність, мг/дм ³	0,4 – 1,5	≤ 0,58	≤ 0,58	-	≤ 0,58
Запах, бали	1	≤ 2	≤ 2	1	≤ 2
Забарвленість, градуси	22 - 45	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20
Залізо, мг/дм ³	0,1 – 0,25	≤ 0,2	≤ 0,2	-	≤ 0,2
Марганець, мг/дм ³	0,05 – 0,4	≤ 0,05	≤ 0,05	-	≤ 0,05
Жорсткість, ммоль/дм ³	4,5 – 4,8	0,1 – 0,25	1,5 – 7,0	0,35 – 1,7	0,5 – 2,0
Сухий залишок, мг/дм ³	320 - 430	5 - 10	200 - 500	75 – 275	100 - 200
Водневий показник рН	7,9 – 8,1	5,7 – 6,3	6,5 – 8,5	6,5 – 7,5	6,5 – 8,5
ЗМЧ, КОЕ/см ³	5 - 10	1 - 3	≤ 50	-	≤ 50

¹⁾ наведені показники якості водопровідної води м. Київ

²⁾ згідно з рекомендаціями ДСанПіН2.2.4-171-10 до фізіологічно-повноцінної води

³⁾ згідно SCA Water Quality Handbook

На основі нормативів [1,5] запропоновані цільові значення показників питної води стабільно високої якості та наведені в таблиці 1.4. Порівняльний аналіз складу очищеної води та цільових вимог показує невідповідність за показниками сухий залишок, жорсткість та водневий показник рН.

1.3. Теоретичні основи технології зворотного осмосу

В основі технології зворотного осмосу (ЗО) лежить процес розділення розчинів на мембрані. Мембрана пропускає воду і затримує розчинені домішки[46,47,48]. Класична фільтруюча перегородка має пори і затримує домішки, розмір яких перевищує діаметр пор. У зворотноосмотичній мембрані поняття пор відносно, вода і деякі інші речовини можуть проходити через мембрану завдяки дифузії всередині матеріалу. Максимальна ефективність розділення досягається при тангенціальному способі фільтрації, в результаті якого утворюються два потоки: пермеат — очищена вода і концентрат — вода, що містить затримані домішки. Концентрат, який є рідким відходом процесів очистки води, не містить ніяких домішок, крім присутніх у вихідній воді, але в більшій концентрації [49 – 51].

Раціональний спосіб організації фільтруючого елемента з мембранного полотна — рулон. Будова рулонного мембранного елемента показана на рисунку 1.5.

Рулонні елементи більш практичні: їх зручно транспортувати і зберігати, системи, на основі таких елементів, прості в проектуванні та обслуговуванні.

Отже, зворотний осмос доцільно розглядати як технологію знесолення води для найрізноманітніших завдань, тоді як нанофільтрацію — як безреагентну технологію пом'якшення води та видалення органічних домішок [9]. В таблиці 1.5

наведене порівняння ЗО та НФ мембранних елементів за селективністю по відношенню до різних сполук.

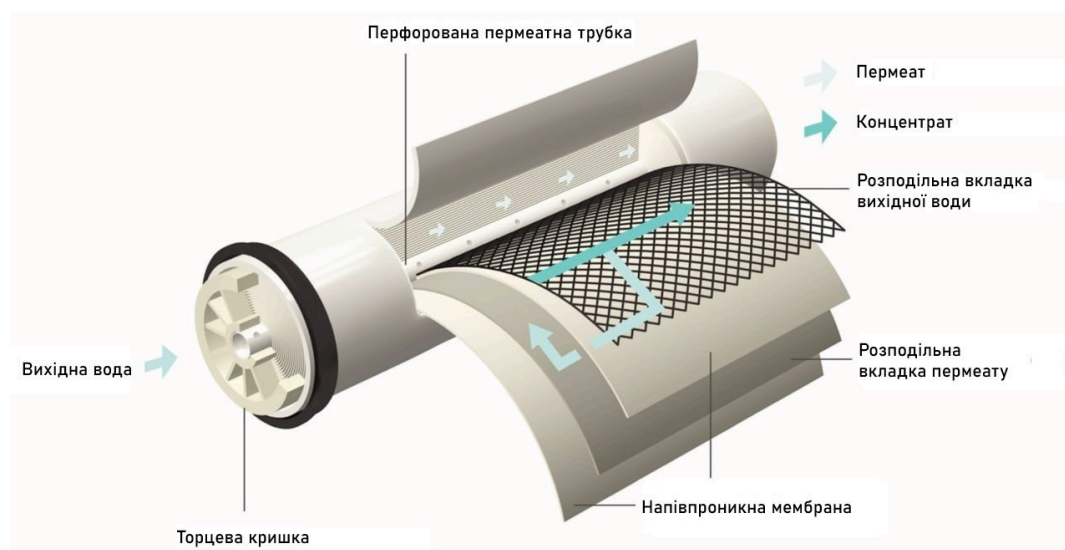


Рисунок 1.5 – Будова зворотноосмотичного мембранного елементу рулонного типу [53,55]

Напівпроникна мембрана (мембранне полотно) складається з активного шару поліаміду товщиною 0,2 мкм, що підтримується на підкладці з полісульфону товщиною 40 мкм, та поліефірного нетканого матеріалу товщиною 120 мкм (рисунок 1.6).

Таблиця 1.5 – Селективність нанофільтраційних та зворотноосмотичних мембранних елементів [47,48]

Домішки	Селективність, %	
	нанофільтрація	зворотний осмос
NaCl	20-85	96 - 99
Na ₂ SO ₄	99	>99
CaCl ₂	30-60	97 - 99
MgSO ₄	> 99	>99

Селективним шаром мембрани є саме поліамідний шар [52, 53]. Полісульфоновий прошарок слугує як підтримуючий, внаслідок чого мембрана може витримувати високі тиски без розриву. Матеріал з поліефіру забезпечує міцність мембранної плівки в цілому при технологічній обробці і складанні елементів [54,55].



Рисунок 1.6 – Будова поліамідної тонкошарової композитної мембрани [53]

Характеристики мембранних полотен можна поділити на дві групи. Експлуатаційні - характеризують властивості очищення води: питома продуктивність, селективність по відношенню до різних сполук. Фізико-хімічні – характеризують властивості самого полотна: тип полотна, контактний кут змочування, дзета-потенціал, радіус пор [56,57].

1.4. Методи домінералізації зворотноосмотичної води

В системах очищення води, де застосовують технологію зворотного осмосу, сухий залишок очищеної води становить близько 5–10 мг/дм³, що не відповідає нормам фізіологічної повноцінності. Для вирішення цієї проблеми в системах очищення води передбачають стадію домінералізації, тобто збагачення мінеральними речовинами [58,59].

Існує кілька методів домінералізації, серед яких: додавання хімічних речовин, що містять кальцій та магній; змішування знесоленої води з частиною вихідної води; розчинення у знесоленій воді природних мінералів [60,61].

Метод додавання хімічних речовин включає дозування мінеральних солей, таких як хлорид кальцію або магнію, у знесолену воду. Домінералізацію у такий спосіб здійснюють за допомогою насосів-дозаторів, які подають готовий сольовий розчин у пермеат, отриманий після зворотноосмотичного елемента [62]. Це дозволяє корегувати мінеральний склад води залежно від потреб споживачів. Однак такий метод потребує ретельного контролю [63,64]. Хімічні розчини, які використовуються для мінералізації, повинні бути високої якості. Якщо під час обслуговування або приготування сольових розчинів допустити помилки, це може призвести до мікробіологічного забруднення води [65,66]. Також необхідно постійно контролювати склад сольового розчину та його концентрацію. Порушення пропорцій може призвести до надмірної концентрації мінералів, що негативно вплине на смак та безпеку води. Хімічний метод домінералізації є досить затратним, потребує постійного контролю якості і наявності солей, характеризується не стабільною роботою систем очищення [67].

Ще один метод домінералізації – це змішування знесоленої води з вихідною водою, також відомий як «байпас» [68,69]. Однак він ефективний лише за умови високої якості вихідної води і вимагає постійного контролю її складу. Найчастіше для забезпечення мікробіологічної чистоти вихідної води, що підмішується застосовують установки мікро- або ультрафільтрації. Залежність від якості вихідної води робить цей метод менш надійним, оскільки її склад може змінюватися залежно від сезону. Тому недоліком даного методу є необхідність постійного контролю якості та регулювання співвідношення змішуваних потоків у відповідності з сезонними змінами складу водопровідної води [70 – 72].

Один з найбільш популярних способів домінералізації – це збагачення води мінералами шляхом її пропускання через картридж, який містить природні речовини такі як карбонат кальцію та оксид магнію [67,73]. У цьому випадку вода поступово насичується мінеральними компонентами завдяки фізичному контакту з природними речовинами [74,75]. Однак, ефективність процесу залежить від тривалості контакту води з мінералами та фізико-хімічних властивостей води (температури, рН). Наприклад, карбонат кальцію ефективно розчиняється лише при значеннях рН нижче 6,5. Якщо ці умови не підтримуються, домінералізація буде неповною [59]. Картриджі для домінералізації, які використовуються у домашніх фільтрах або мембранних ВВА, часто мають занадто малий об'єм, що приводить до недостатнього часу контакту мінералів з водою, що обмежує їх ефективність. Це призводить до того, що кінцевий рівень мінералізації не перевищує 60–80 мг/дм³, а найчастіше складає 30–50 мг/дм³, що не є достатньо. На розчинність мінералів також впливають температурні коливання. Тому такий спосіб домінералізації можна охарактеризувати як нестабільний [32, 61].

Кожен із перелічених методів домінералізації води після зворотного осмосу має свої переваги, але супроводжується значними недоліками, такими як залежність від якості вихідної води, необхідність технічного контролю та висока вартість обслуговування. Крім того отримання безпечної та фізіологічно повноцінної води переліченими методами вимагає двоетапного процесу: повне знесолення і подальша домінералізація.

Більш раціональним виглядає новий метод, заснований на застосуванні 30 мембранних елементів з різною селективністю.

1.5. Зворотноосмотичні мембранні елементи з різною селективністю

Одним із новітніх методів отримання питної води стабільно високої якості є використання зворотноосмотичних мембранних елементів з різною селективністю [61, 78]. Створення мембранних елементів із заданою селективністю шляхом модифікування зворотноосмотичних на сьогодні є одним із найперспективніших напрямків наукових досліджень, які проводяться в провідних наукових центрах світу [79,80]. Кількість публікацій за цією темою зросло зі 100 на рік у 2010 до 1700 у 2024 [56]. Зокрема, такі дослідження проводяться в Центрі сучасних водних технологій на Хіміко-технологічному факультеті КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Принцип роботи таких елементів аналогічний звичайним зворотноосмотичним [81,82]. Вони мають високу селективність по відношенню до шкідливих домішок: органічних речовин природного походження, заліза, марганцю. А мінеральні сполуки, зокрема іони кальцію, магнію та натрію, хлориди, гідрокарбонати, затримують лише частково [83,84].

Зокрема в роботі [61] проведено порівняльний аналіз робочих характеристик зворотноосмотичних мембран з селективністю 97% та модифікованих мембранних елементів із селективністю по відношенню до сухого залишку та жорсткості від 45 до 70%. Досліджено ступінь зниження сухого залишку, жорсткості, лужності та забарвленості. Показано, що модифіковані мембранні елементи пропускають контрольовану кількість солей, зокрема кальцію та магнію, та практично повністю видаляють органічні речовини. Тобто потенційно такі елементи можуть виробляти фізіологічно повноцінну та безпечну воду в одну стадію. В роботі показано можливість використання модифікованих мембранних елементів в діапазоні сухого залишку від 250 до 1500 мг/дм³, температурі від 5 до 25 °С, тиску від 3,5 до 6,5 бар. Досліджені властивості модифікованих мембранних елементів роблять їх

потенційною альтернативою комбінації методів зворотного осмосу та домінералізації води в процесах підготовки питної води стабільно високої якості.

1.6. Цифровізація систем підготовки питної води

Розповсюдження мережі інтернет, збільшення швидкості передачі та обробки даних, доступність сенсорів та мікроконтролерів дало поштовх до цифровізації різноманітних пристроїв [85,86]. Суть цифровізації полягає в обладнанні інженерних систем сенсорами та мікроконтролерами для збору та передачі технологічних параметрів з метою подальшої їх обробки та аналізу [87,88]. Завдяки цифровізації оператори отримують значно більше інформації про роботу обладнання. Аналіз технологічних параметрів відкриває можливості до оптимізації процесів завдяки кращому розумінню їх функціонування протягом часу [89,90]. Крім того вимірювання параметрів на відстані та їх аналіз дозволяють передбачити та попередити можливі аварії [91]. Цифровізація систем очищення води полягає в обладнанні їх сенсорами якості води, витратомірами, датчиками стану технологічного обладнання [92,93]. Це дозволяє отримувати інформацію про фактичні показники роботи кожної системи та визначати частоту обслуговування на основі об'єму одержаної води, а не на основі часу як це відбувається зазвичай. Нові можливості, що надає цифровізація, дозволять контролювати якість очищеної води в режимі реального часу та суттєво скоротити витрати на сервісне обслуговування. Це відкриває можливості поширення локальних систем очищення питної води, в тому числі і мембранних ВВА [94,95].

Висновки розділу 1

В розділі наведений аналітичний огляд процесів підготовки питної води. Показано, що якість водопровідної води в Україні погіршується. Зважаючи на погіршення якості водопровідної води, люди все частіше обирають інші джерела питної води. Аргументовано, що колективні системи, зокрема мембранні водні вендингові автомати, є найбільш раціональним способом забезпечити населення питною водою. Основною технологією доочищення є зворотний осмос. Продемонстровано, що ця технологія є популярною для одержання безпечної питної води, але очищена таким чином вода не відповідає вимогам фізіологічної повноцінності. В розділі зроблений огляд наявних способів одержання питної води. Обґрунтовано, що найбільш доцільним є використання зворотноосмотичних елементів різної селективності, які виготовляються з поліамідних мембранних полотен.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Об'єкти дослідження

Об'єктами дослідження в даній роботі є зразки поліамідних нанофільтраційних, зворотноосмотичних та модифікованих мембранних полотен. Їх перелік та опис зазначені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Перелік поліамідних мембранних полотен

№	Тип полотна	Марка полотна	Виробник
1	поліамідне	NF-1	Bangtec (Китай)
2	нанофільтраційне	Filmtec NF-270	Dupont (США)
3	поліамідне	Filmtec TW-60	Dupont (США)
4	зворотноосмотичне	TU-14	Bangtec (Китай)
5	поліамідне	МП-1	Дослідний зразок
6	зворотноосмотичне	МП-2	
7	модифіковане	МП-3	

З мембранними полотнами та елементами проводились лабораторні, пілотні та дослідно-промислові випробування з використанням водопровідної води м. Київ, м. Луцьк та м. Кривий Ріг, склад води в містах наведений в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Склад водопровідної води в містах проведення лабораторних, пілотних або дослідно-промислових випробувань.

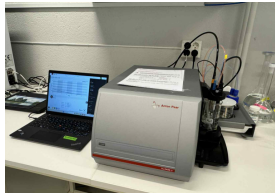
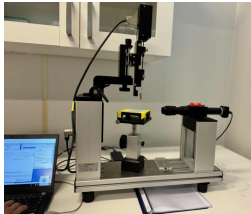
Показник	м. Київ	м. Луцьк	м. Кривий Ріг
Забарвленість, градуси	27 - 33	5 - 10	21 - 26
Жорсткість, ммоль/дм ³	3,5 – 3,8	8,4 – 8,6	12,2 – 12,5
Залізо, мг/дм ³	0,06 – 0,16	0,05 – 0,1	0,1 – 0,2
Марганець, мг/дм ³	0,03 – 0,07	<0,03	0,03 – 0,04
Лужність, ммоль/дм ³	3,6 – 3,8	6,4 – 6,6	3,6 – 3,8
Сульфати, мг/дм ³	35 - 40	30 - 35	325 - 375
Сухий залишок, мг/дм ³	320 - 330	515 – 525	1 400 – 1 682
Водневий показник рН	7,9 – 8,1	6,9 – 7,3	7,6 – 7,8

2.2. Методи дослідження

Визначення фізико-хімічних властивостей мембранних елементів

В ході досліджень визначались наступні фізико-хімічні властивості мембранних полотен: селективність по відношенню до різних сполук, радіус пор, контактний кут змочування та дзета-потенціал. Їх перелік та лабораторне обладнання, за допомогою якого вони визначались, показане в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Фізико-хімічні показники мембранних полотен та лабораторне обладнання

Показник	Обладнання	Фото
Селективність, % Радіус пор*, Å	Комірка для визначення властивостей мембранного полотна Sterlitech CF042 (США) *За методом Сарболюкі	
Дзета потенціал, мВ	Прилад визначення дзета потенціалу Anton Paar SurPASS 3 (Австрія)	
Кут змочування, градуси	Прилад для визначення крайового кута змочування Dataphysics OCA15 EC (Німеччина)	

Для визначення селективності по відношенню до гідрокарбонату натрію, сульфату натрію, показників сухий залишок, жорсткість, забарвленість та радіусу пор зразків полотен використовувалась комірка перехресного потоку Sterlitech CF042 (США). Площа зразка полотна для досліджень становила 42 см².

У ході роботи було розроблено установку для тестування мембранних полотен, схема якого зображена на рисунку 2.1.

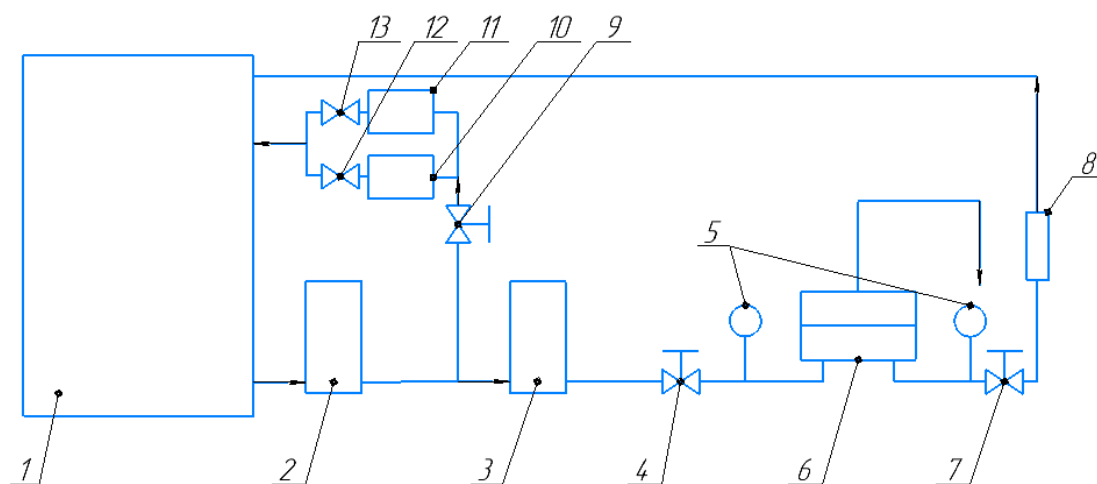


Рисунок 2.1 – Принципова схема установки для тестування мембранних полотен: 1 – бак з розчином; 2 – насос; 3 – насос високого тиску; 4, 7, 9 – гольчатий вентиль; 5 – манометри; 6 – комірка тестування мембранних полотен; 8 – ротаметр; 10 – проточний нагрівач; 11 – проточний охолоджувач з датчиком температури; 12, 13 – кульовий кран

Розчин з баку 1 направляється на насос 2 звідки розчин може йти двома контурами:

1. Контур контролю та регулювання температури: розчин через гольчатий вентиль подається або на проточний нагрівач 10 або на проточний охолоджувач 11 з датчиком контролю температури, що знаходиться в баці 1 (нагрів або охолодження регулюється кранами 12, 13). Температура за якої проводиться тестування становила 25 ± 1 °C.

2. Контур випробувань: розчин подається на насос високого тиску 3, та через гольчатий вентиль 4, направляється на комірку тестування мембранного полотна Sterlitech CF042 6. Тиск контролюється манометрами 5, та регулюється вентилем 4. Після комірки концентрат проходить через регулюючий вентиль 7, ротаметр контролю швидкості потоку 8, та повертається у бак.

Необхідний тиск для тестування 8 бар. Пермеат, що виходить з верхньої частини комірки 6, збирається та аналізується після 1 години роботи установки.

Визначення розміру пор мембранних полотен проводилось за методикою Сарболукі [96]. Згідно з даним способом, використовується модель щілинного сита, де відторгнення (селективність) розчиненої речовини на понад 80 % використовується для розрахунку середнього радіусу пор. Оскільки поверхня мембранного полотна має заряд як і більшість розчинених речовин, то їх взаємодія може впливати на вимірюваннях, спричиняючи похибку. Тому необхідно використовувати розчинні у воді електронеутральні речовини. Для даного експерименту в якості таких електронеутральних водорозчинних речовин було обрано гліцерин, глюкозу та сахарозу.

Вимірювання дзета-потенціалу поверхні поліамідних мембран проводились за допомогою аналізатора Anton Paar Surpass3 (Австрія). Дослідження проводилось за різних значень рН, який змінювався за допомогою автоматичної установки дозування.

Визначення контактного кута змочування проводилось за допомогою гоніометра Dataphysics OCA15 EC (Німеччина). Об'єм краплі води становив 3 мм^3 з величиною поверхневого натягу води $72,7 \text{ мН} \cdot \text{м}^{-1}$ за кімнатної температури. Кожне вимірювання повторювали не менше 10 разів, та розраховували середні значення.

Визначення показників якості води

Для визначення показників якості води застосовувалось обладнання та методики наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Показники якості води та прилади і методики для їх визначення

Показник	Розмірність	Прилад	Методика
Сухий залишок	мг/дм ³	Multi-parameter meter Bante 900 Водяна лазня DZKW-D-4 Сушильна шафа СНОЛ 24/200 Аналітичні ваги Radwag XAS100/C	- MBB №081/12-0109-03
рН	-	Multi-parameter meter Bante 900	ДСТУ 4077-2001
Жорсткість	ммоль/дм ³	-	ДСТУ ISO 6059:2003
Лужність	ммоль/дм ³	-	ДСТУ ISO 9963-2:2007
Сульфати	мг/дм ³		MBB № 081/12-0177-05
Нітрати	мг/дм ³	Спектрофотометр V-1200	MBB № 081/12-0177-05
Забарвленість	градуси	Спектрофотометр V-1200	ДСТУ ISO 7887:2003
Каламутність	мг/дм ³	Спектрофотометр V-1200	ДСТУ ISO 7027:2003
Загальне залізо	мг/дм ³	Спектрофотометр V-1200	ДСТУ ISO 6332:2003
Марганець	мг/дм ³	Спектрофотометр V-1200	ДСТУ ГОСТ 4974:2019
Перманганатна окиснюваність	мгО ₂ /дм ³	-	ДСТУ ISO 8467:2021
Вміст тригалоген-метанів (ТГМ)	мкг/дм ³	Газовий хроматограф Nexis GC-2030	ДСТУ ISO 6468-2002
Загальне мікробне число	КУО/см ³	—	МР 10.10.2.1-155-2008

Стенд дослідження характеристик мембранних елементів

Визначення характеристик мембранних елементів на водопровідній воді м. Київ проводили на спеціальному стенді, який зображена на рисунку 2.2.

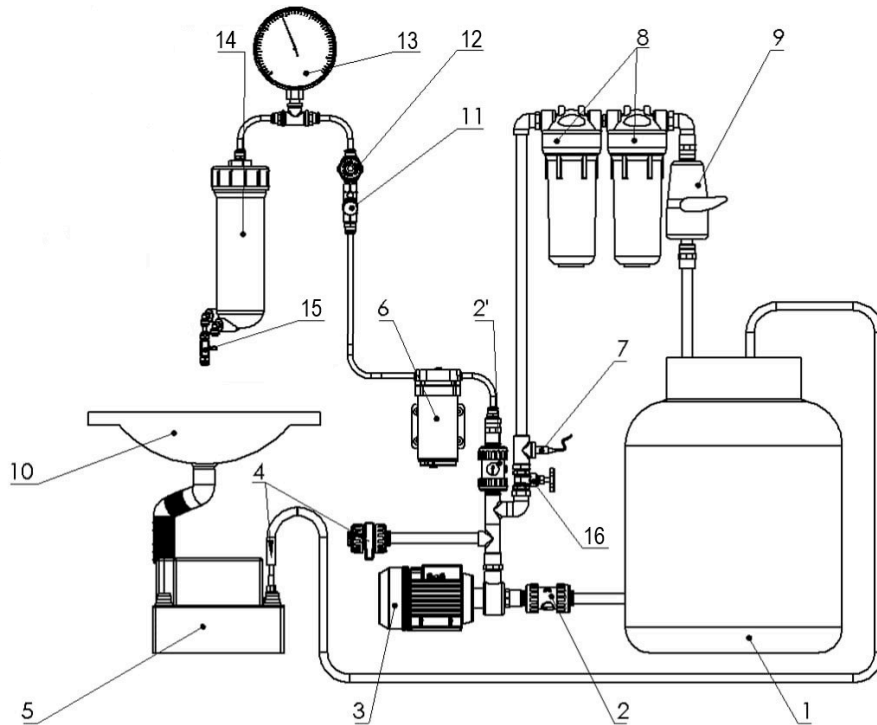


Рисунок 2.2 – Принципова схема стенду для тестування мембранних елементів: 1

– бак з розчином; 2, 2' – зворотний клапан; 3 – насос;

4 – вентиль скидання; 5 – дренажний насос; 6 – насос високого тиску;

7 – датчик температури; 8 – фільтри механічного очищення та вугільний; 9 –

проточний нагрівач; 10 – збірник розчину; 11 – регулятор тиску; 12 –
регулювальний вентиль; 13 – манометр; 14 – мембранотримач типорозміру 3012;

15 – обмежувач потоку; 16 – регулювальний вентиль.

Розчин, що міститься в баці 1, через зворотний клапан 2 подається на насос 3. Далі розчин може рухатись трьома контурами:

- контур скидання розчину – при відкритому вентилі скидання 4, розчин зливається в каналізацію;

- контур регулювання температури – при відкритому регулювальному вентилі 16, розчин проходить через датчик температури 7, механічні фільтри 8 на проточний нагрівач 9 та повертається до баку 1;

- контур випробування – розчин проходить через зворотний клапан 2', насос високого тиску 6 та через регулятори тиску 11 та регулювальний ventиль 12 подається на мембранотримач типорозміру 3012, в якому встановлено мембранний елемент. Пермеат та концентрат після обмежувачів потоку скидається в проточний збірник розчину 10 та за допомогою дренажного насосу 5 повертається назад до баку 1. Внаслідок цього не змінюється температура та вміст забруднюючих речовин у баці 1.

В даному стенді можливо підтримувати заданий тиск, в діапазоні від 1 до 7 бар, та температуру, від 5 до 35 °C, протягом тривалого часу.

Характеристики мембранних елементів та склад очищеної води визначались після 60 хвилин роботи мембранного елемента на стенді.

2.3. Пілотні випробування мембранних елементів з різною селективністю

Пілотні випробування процесу доочищення водопровідної води з використанням зворотноосмотичних мембранних елементів з різною селективністю проводились на вендинговому автоматі розливу води виробництва компанії «Ecosoft-BWT» (Україна) [97]. В стандартному автоматі була змінена технологічна схема підготовки води і передбачена можливість підключення двох мембранних елементів паралельно (рисунки 2.3 та 2.4).



Рисунок 2.3 – Вендинговий автомат розливу води виробництва компанії «Ecosoft-BWT» (Україна)



Рисунок 2.4 – Експериментальний вендинговий автомат розливу води

Пілотні випробування проводились в період з серпня 2023 року по липень 2024 року на експериментальному вендинговому автоматі. Середньодобовий об'єм пермеату складав не менше 300 дм³. Відбір проб для аналізів проводився через кожні 1000 дм³.

На рисунку 2.5 наведено технологічну схему пілотного вендингового автомату розливу води, яка передбачає можливість встановлення зворотноосмотичних мембранних елементів із різною селективністю, позиції 5.1 та 5.2 на схемі.

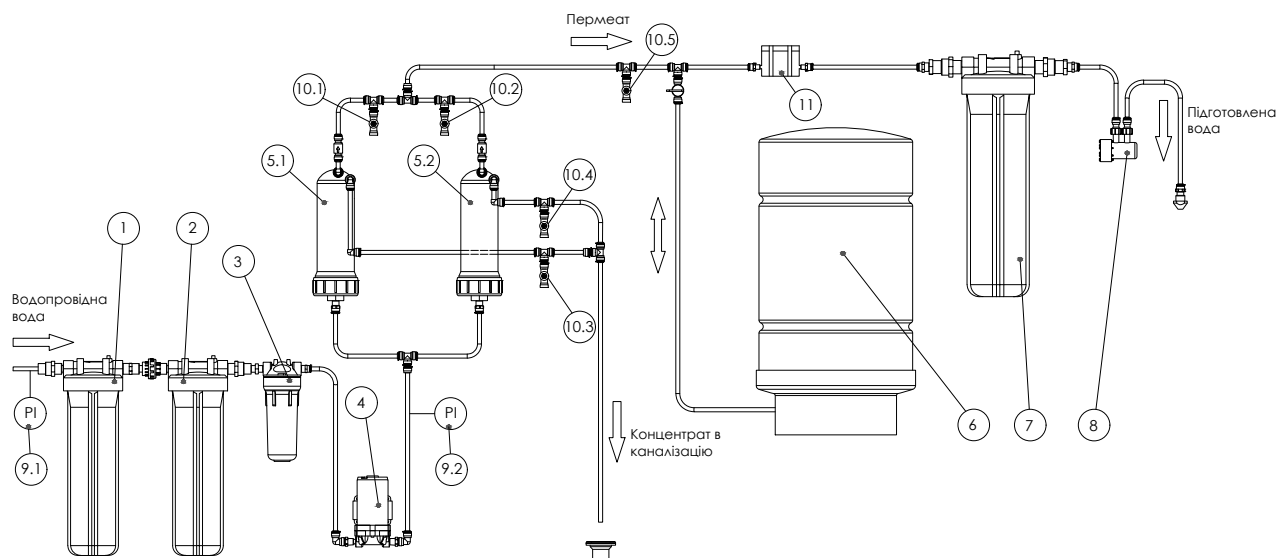


Рисунок 2.5 – Технологічна схема пілотного автомату розливу води
 1 – Фільтр механічного очищення; 2 – вугільний фільтр; 3 – картридж-дозатор антискаланту; 4 – насос високого тиску; 5.1, 5.2 – мембранний елемент зворотноосмотичний; 6 – ємність чистої води; 7 – вугільний фільтр; 8 – ультрафіолетовий знезаражувач води; 9.1 – манометр тиску вихідної води; 9.2 – манометр робочого тиску в мембранних елементах; 10.1 – 10.5 – крани відбору проб води; 11 – електронний витратомір.

Вихідна вода надходить з водопровідної мережі через вхідний штуцер і поступає на механічний (1) та вугільний (2) фільтри для видалення механічних домішок і хлору. Далі за допомогою картриджа-дозатора (3) у воду додається антискалант для запобігання утворенню кристалів на поверхні мембранних елементів.

Під тиском 6–7 бар, створеним насосом високого тиску (4), вода проходить через мембранний осмотичний модуль, який включає два мембранних елементи з різною селективністю (5.1 та 5.2). Робочий тиск у мембранному модулі вимірюється манометром 9.2. Пермеат спрямовується на вихід модуля після чого потрапляє в ємність чистої води (6) та вугільний постфільтр (7). Концентрат скидається в напірну каналізацію. Перед наливом очищеної води в тару споживача, вона проходить через ультрафіолетовий знезаражувач (8).

2.4. Методи обробки та розрахунків одержаних результатів

Розрахунок продуктивності, селективності та концентрації домішок у пермеаті визначали за наступними формулами:

$$Q_p = \frac{V}{\tau}, \quad (2.1)$$

де Q_p – потік пермеату, $\text{дм}^3/\text{год}$;

V – об'єм пермеату, дм^3 ;

τ – час, за який набирається об'єм V , год;

$$R_c = \frac{C_f - C_p}{C_f} \cdot 100 \quad (2.2)$$

$$C_p = C_f \cdot \left(1 - \frac{R_s}{100}\right) \quad (2.3)$$

де R_s – селективність мембранного елемента за певним компонентом, %;

C_f – вміст домішки у вихідній воді, мг/дм³;

C_p – вміст домішки в пермеаті, мг/дм³;

Висновки розділу 2

В другому розділі роботи наведено інформацію щодо об'єктів та методів дослідження. Серед об'єктів - 7 зразків поліамідних полотен: нанофільтраційні, зворотноосмотичні та модифіковані, а також зразки водопровідної води м. Київ, м. Луцьк та м. Кривий Ріг, з якими проводились лабораторні, пілотні або дослідно-промислові випробування. В методах дослідження описано лабораторне обладнання для визначення характеристик мембранних полотен, а саме селективності, радіусу пор, кута змочування, дзета-потенціалу. Перераховані методики визначення показників якості води. Показаний стенд для дослідження мембранних елементів та описаний принцип його роботи. Продемонстрована установка для проведення пілотних випробувань та описані умови їх проведення. Наведені формули для обробки отриманих результатів.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Аналіз інформації щодо складу водопровідної води України

Проаналізовані показники якості водопровідної води в Україні за результатами моніторингового проекту «Карта якості води», який включає понад 2700 аналізів водопровідної води, виконаних у 2022–2025 роках. Для кожної області було визначено середні значення сухого залишку, жорсткості, концентрацій гідрокарбонатів, хлоридів і сульфатів. На основі цих даних були розраховані частки досліджуваних аніонів як відношення концентрації окремого аніону до суми концентрацій гідрокарбонатів, хлоридів та сульфатів.

Таблиця 3.1 – Класифікація складу водопровідної води України за рівнем та типом мінералізації

	Адміністративно-територіальна одиниця	Середні значення показників якості		Частка від суми аніонів, %			Тип вихідної води	Необхідний ступінь зниження	
		Сухий залишок, мг/дм ³	Жорсткість, ммоль/дм ³	Гідрокарбонатів	Хлоридів	Сульфатів		сухого залишку, %	жорсткості, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Івано-Франківська	260	2,6	72	8	20	I Сухий залишок 250-500мг/дм ³ Жорсткість 2 - 6 ммоль/дм ³ Гідрокарбонати 80%±10 Сульфати 15%±5	55±5	55±5
2	Закарпатська	260	3,5	75	10	15			
3	Полтавська	320	4	81	9	10			
4	м. Київ	325	4	75	9	16			
5	Запорізька	350	3,8	72	10	18			
6	Чернігівська	360	3,3	90	5	5			
7	Рівненська	370	3,5	82	8	10			
8	Львівська	410	5,9	81	4	15			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	Чернівецька	430	4,8	70	10	20			
10	Сумська	440	5,5	84	5	11			
11	Хмельницька	452	5,9	85	5	10			
12	Вінницька	469	5,7	72	10	18			
13	Київська	480	4,8	87	5	8			
	Середнє значення	375	4,4	78	8	14			
14	Дніпропетровська	504	6	76	9	15	II Сухий залишок 500 – 1200 мг/дм ³ Жорсткість 6 – 12 ммоль/дм ³ Гідрокарбонати 75%±10 Сульфати 15%±5	65-85	65-85
15	Одеська	504	6,4	67	10	23			
16	Тернопільська	504	7,8	74	10	16			
17	Волинська	520	8,5	85	7	8			
18	Черкаська	565	7,8	80	8	12			
19	Кіровоградська	655	7,8	74	10	18			
20	Житомирська	660	7,5	75	11	14			
21	Херсонська	680	4,8	50	46	4			
22	Харківська	750	7,2	73	12	15	III Сухий залишок 1200–2000 мг/дм ³ Жорсткість 12 - 18 ммоль/дм ³ Гідрокарбонати 20%±5 Сульфати 50%±10	90±5	90±5
	Середнє значення	594	7,3	74	11	15			
23	м. Кривий Ріг	1682	15,2	21	25	53			
24	Миколаївська	1750	13,5	18	41	41			
	Середнє значення	1715	14	20	33	47			

В результаті аналізу усі зразки було класифіковано за рівнем та типом мінералізації. Дані наведені в таблиці 3.1.

Результати показали, що вода Тип I характеризується сухим залишком 250 – 500 мг/дм³, жорсткістю 1,5 – 6 ммоль/дм³; Тип II - сухим залишком 500 – 1200 мг/дм³, жорсткістю 6 – 12 ммоль/дм³; Тип III - сухим залишком 1200 – 2000 мг/дм³, жорсткістю 12 – 18 ммоль/дм³.

Мінімальний рівень сухого залишку водопровідної води становить 250 мг/дм³, максимальний - 2000 мг/дм³. Для жорсткості аналогічні величини становлять 1,5 та 18 ммоль/дм³ відповідно.

Води Тип I та II характеризуються високим вмістом гідрокарбонатів (приблизно 75%) і невисокими концентраціями хлоридів (близько 10%) та сульфатів (близько 15%). Натомість для вод з високим солевмістом спостерігається зменшення частки гідрокарбонатів до 50% і підвищення вмісту хлоридів та сульфатів до 25% кожного.

Вода Типу I характерна для найбільшої кількості регіонів – 56 %, Типу II - 36 %, вода з найвищою мінералізацією, Тип III характерна 8 % регіонів.

Результати класифікації були співставленні з цільовими значеннями щодо якості питної води, зазначені в таблиці 1.4. На основі співставлення визначені ступені зниження сухого залишку та жорсткості води для кожного типу. Так сухий залишок та жорсткість води типу I потрібно знизити на 55±5 %, Типу II на 65 – 85 %, Типу III - 90±5 %.

Висновки підрозділу 3.1

На основі даних моніторингового проекту «Карта якості води» узагальнено дані з 2700 аналізів водопровідної води України. Визначені середньостатистичні значення показників сухий залишок, жорсткість, вміст гідрокарбонатів, хлоридів та сульфатів в кожній адміністративно-територіальній одиниці. Здійснено класифікацію водопровідної води та виділено три типи води за рівнем мінералізації. Визначено мінімальні та максимальні значення показників сухий залишок та жорсткість. Розраховано ступені зниження цих показників до рівня вимог питної води стабільно високої якості для трьох типів води. Отримані результати будуть

використані для вибору найбільш ефективних мембранних полотен для очищення водопровідної води та прогнозування якості очищеної води.

3.2. Дослідження фізико-хімічних властивостей поліамідних мембранних полотен

З метою обґрунтованого вибору мембранних полотен для одержання питної води стабільно високої якості були досліджені фізико-хімічні властивості поліамідних мембранних полотен (табл. 3.2). Також була визначена селективність досліджуваних полотен щодо індикаторних і мінеральних показників якості води.

Таблиця 3.2 – Фізико-хімічні властивості поліамідних мембранних полотен

Тип полотна	Марка полотна	Селективність за різними сполуками, %					Кут змочування, градуси	Дзета потенціал ²⁾ , мВ	Радіус пор, Å
		NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	Жорсткість ¹⁾	Сухий залишок ¹⁾	Забарвленість ¹⁾			
Поліамідне нано-фільтраційне	NF-1	51	92	45	39	99	27±5	-40±2	4,5
	NF-270	39	92	29	25	97	5±5	-50±2	4,72
Поліамідне зворотно осмотичне	TU-14	95	99	94	93	100	53±5	-22±2	4,05
	TW-60	96	99	98	95	98	55±5	-22±2	3,93
Поліамідне зворотно осмотичне модифіковане	МП-1	64	98	61	58	100	44±5	-24±2	4,45
	МП-2	57	98	57	53	100	42±5	-25±2	4,64
	МП-3	49	98	49	46	100	35±5	-31±2	4,72

1) визначались на водопровідній воді Київського водопроводу;

2) визначався при рН 7.

Селективність визначали за зниженням концентрацій гідрокарбонату натрію та сульфату натрію, а також за індикаторними показниками якості води — жорсткістю, сухим залишком та забарвленістю.

Цільовим критерієм вибору найбільш ефективних полотен є зниження показника жорсткості на 55 ± 5 % та сухий залишок на 90 ± 5 %.

Як видно з таблиці 3.2, нанофільтраційні полотна NF-1 та NF-270 характеризуються помірним ступенем зниження гідрокарбонату натрію (39–51 %) і жорсткості (29–45 %), при цьому забезпечують досить високий ступінь видалення сульфат-іонів (92 %) та забарвленості (97–99 %). Радіус пор для цих полотен становить $4,50\text{--}4,72$ Å, що відповідає більш «відкритій» структурі порівняно із зворотноосмотичними мембранами. Кут змочування складає $27 \pm 5^\circ$ для NF-1 та лише $5 \pm 5^\circ$ для NF-270, що свідчить про дуже високу гідрофільність останнього. Обидва нанофільтраційні полотна мають виражено негативний дзета-потенціал (-40 ± 2 та -50 ± 2 мВ при pH 7).

Зворотноосмотичні полотна TU-14 та TW-60 демонструють суттєво вищу селективність: ступінь видалення гідрокарбонату натрію становить 95–96 %, сульфату натрію — 99 %, жорсткості — 94–98 %, сухого залишку — 93–95 %, забарвленості — 98–100 %. Радіус пор для цих мембран є мінімальним серед усієї вибірки ($3,93\text{--}4,05$ Å), що вказує на більш «щільну» структуру поліамідного шару. Кут змочування є вищим ($53\text{--}55^\circ$), тобто поверхня є менш гідрофільною, ніж у нанофільтраційних полотен. Дзета-потенціал у цих мембран становить -22 ± 2 мВ.

Модифіковані зворотноосмотичні полотна (МП-1, МП-2, МП-3) займають проміжне положення між нанофільтраційними та зворотноосмотичними полотнами. Для них селективність за гідрокарбонатом натрію змінюється від 49 до 64 %, за жорсткістю — від 49 до 61 %, за сухим залишком — від 46 до 58 %, при цьому селективність щодо сульфату натрію залишається дуже високою і становить 98 % для всіх трьох полотен. Забарвленість видаляється практично повністю (100 %). Радіус пор у цих мембран більший, ніж у TU-14 та TW-60 ($4,45\text{--}4,72$ Å), а кути змочування ($35\text{--}44^\circ$) є меншими, тобто поверхня більш гідрофільна. Дзета-потенціал знаходиться в інтервалі від -24 ± 2 до -31 ± 2 мВ.

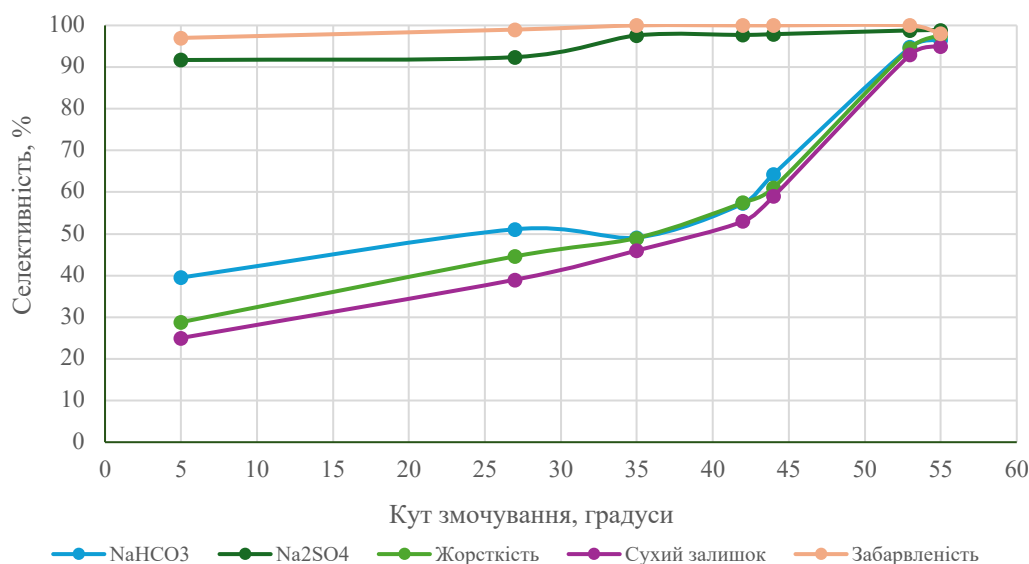


Рисунок 3.1 – Графік залежності селективності мембранных елементів від кута змочування їх поверхні

На основі експериментальних даних було проаналізовано залежність селективності полотен від кута змочування їх поверхні (рис. 3.1). Загалом кут змочування змінюється в діапазоні від $5\pm 5^\circ$ (NF-270) до $55\pm 5^\circ$ (TW-60).

Аналіз графічної залежності показав, що для дослідженої вибірки зростання кута змочування (тобто зменшення гідрофільності) супроводжується підвищенням селективності за жорсткістю та сухим залишком. Найвищі значення цих показників спостерігаються для полотен TW-60 та TU-14 з найбільшими кутами змочування.

Як показано на рисунку 3.2, дзета-потенціал мембранных полотен при рН 7 змінюється від -22 ± 2 мВ (TU-14, TW-60) до -50 ± 2 мВ (NF-270). Усі зразки мають негативно заряджену поверхню, що є типовим для ароматичних поліамідних мембран у нейтральному середовищі.

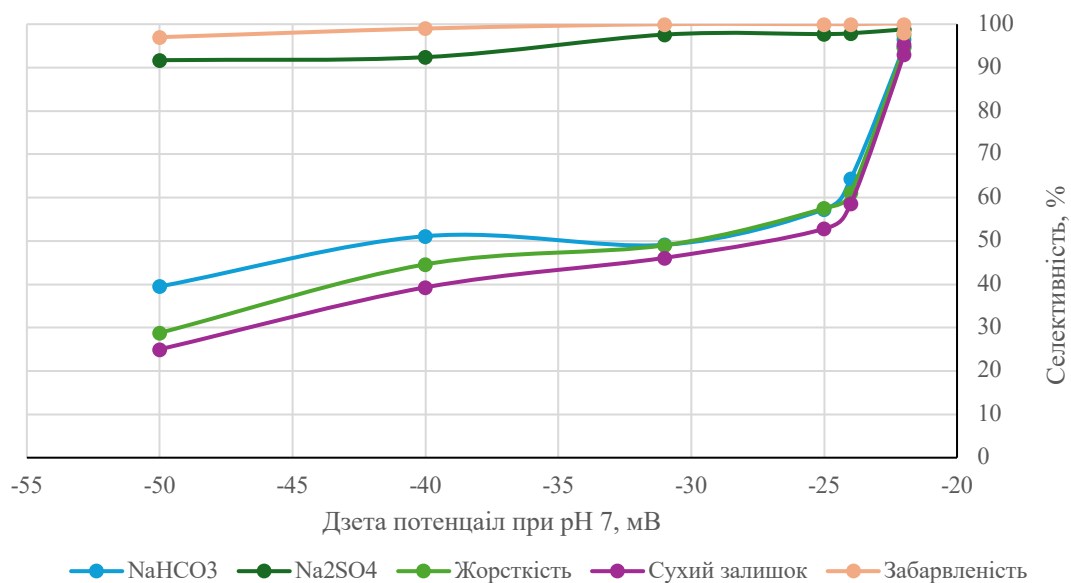


Рисунок 3.2 – Графік залежності селективності мембранных елементів від дзета-потенціалу при рН 7

Основний вплив дзета-потенціалу простежується на прикладі співвідношення селективності за NaHCO_3 і Na_2SO_4 . Для нанофільтраційного полотна NF-270 із найбільш негативним дзета-потенціалом (-50 ± 2 мВ) спостерігається значна різниця між видаленням двозарядних і однозарядних аніонів (92 % за Na_2SO_4 проти 39 % за NaHCO_3). Для полотен із меншим за модулем дзета-потенціалом (-22 ± 2 мВ, TU-14 та TW-60) селективність за NaHCO_3 та Na_2SO_4 є одночасно високою (95–96 % і 99 % відповідно), що свідчить про переважний вплив радіусу пор на селективність.

На рисунку 3.3 показано залежність селективності від радіуса пор мембранных полотен. Радіус пор змінюється в інтервалі 3,93–4,72 Å. Виявлено залежність між радіусом пор та селективністю за жорсткістю й сухим залишком: зі збільшенням радіуса пор від 3,93 (TW-60) до 4,72 Å (NF-270, МП-3) селективність за жорсткістю знижується з 98 до 29–49 %, а за сухим залишком — з 95 до 25–46 %.

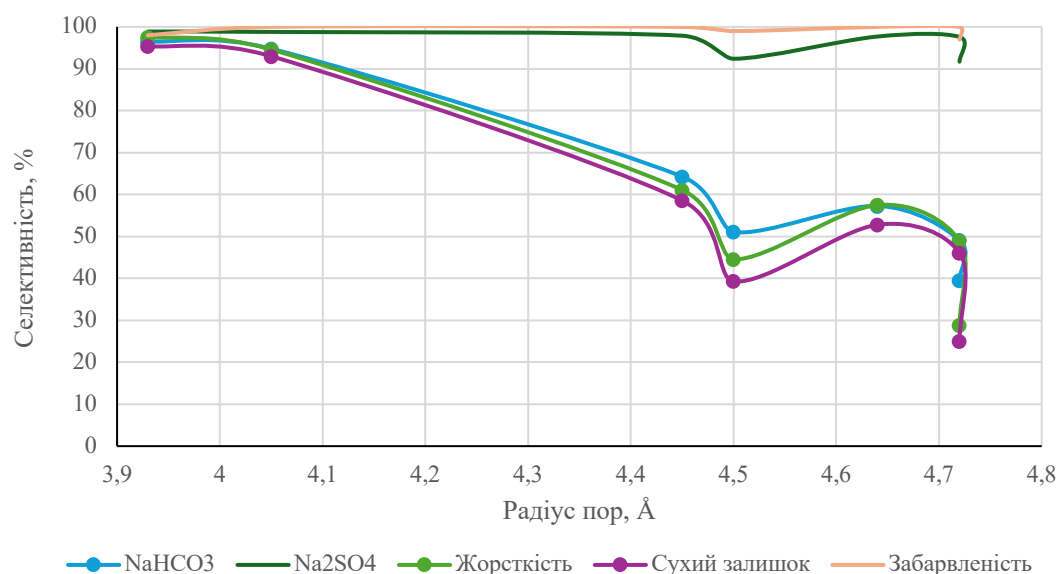


Рисунок 3.3 – Графік залежності селективності мембранных елементів від радіусу пор

Мембрани з найменшими значеннями радіуса пор (3,93–4,05 Å, полотна TW-60 та TU-14) забезпечують селективність, що відповідає зоні вищого ступеня зниження мінеральних домішок (жорсткість 94–98 %, сухий залишок 93–95 %).

Модифіковані полотна з дещо більшими радіусами пор (МП-1, МП-2; 4,45–4,64 Å) забезпечують селективність на рівні 57–61 % за жорсткістю та 53–58 % за сухим залишком, що відповідає зоні цільового зниження мінеральних домішок (50–60 %) з урахуванням експериментальної похибки.

Нанофільтраційні полотна та полотно МП-3 з найбільшими радіусами пор (4,5–4,72 Å) не досягають нижньої межі 50 % за жорсткістю та сухим залишком і тому не відповідають сформульованим вимогам до селективності.

Враховуючи цільові інтервали селективності за показниками сухого залишку та жорсткості (50–60 % і 85–95 %), було здійснено ранжування досліджених полотен і відбір найбільш ефективних для подальших експериментів.

Аналіз таблиці 3.2 показав, що із семи досліджених полотен чотири відповідають заданим вимогам. Узагальнений перелік найбільш ефективних мембранних полотен та їх характеристики наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Перелік найбільш ефективних мембранних полотен для отримання питної води стабільно високої якості

№	Тип полотна	Дзета потенціал ¹⁾ , мВ	Кут змочування, град	Радіус пор, Å	Селективність, %	
					Жорсткість	Сухий залишок
1	TW-60	-22±2	55±5	3,93	97	95
2	TU-14	-22±2	53±5	4,05	94	93
3	МП-1	-24±2	44±5	4,45	61	59
4	МП-2	-25±2	42±5	4,64	57	53

1) визначався при рН 7.

Висновки до підрозділу 3.2

Досліджено фізико-хімічні властивості семи поліамідних мембранних полотен, включно з селективністю за NaHCO_3 , Na_2SO_4 , жорсткістю, сухим залишком та забарвленістю, а також кутом змочування, дзета-потенціалом при рН 7 і радіусом пор.

Показано, що кут змочування впливає на селективність опосередковано: мембрани з більшим кутом змочування демонструють більшу селективність за жорсткістю та сухим залишком, але цей ефект реалізується лише в поєднанні з малими значеннями радіуса пор. Надзвичайно гідрофільні полотна характеризуються низьким ступенем знесолення при збереженні високого ступеня видалення забарвленості та сульфату натрію.

Встановлено, що всі мембранні полотна мають негативний дзета-потенціал. Для полотен з більш «відкритою» структурою зростання за модулем дзета-потенціалу посилює різницю між селективністю щодо дво- й однозарядних аніонів, тоді як при малих радіусах пор (TU-14, TW-60) більший вплив має радіус пор і селективність за NaHCO_3 та Na_2SO_4 є одночасно високою.

Показано, що зменшення радіуса пор від 4,72 до 3,93 Å супроводжується систематичним зростанням селективності за жорсткістю і сухим залишком.

Встановлено, що для всіх досліджуваних мембранних полотен характерний високий ступінь видалення забарвленості, що підтверджує можливість їх використання в процесах підготовки питної води стабільно високої якості.

Виявлено, що всі досліджувані полотна видаляють сульфат натрію на 92 – 99 %, що необхідно враховувати при прогнозуванні складу очищеної води.

На основі відповідності заданим інтервалам селективності з семи досліджених полотен відібрано чотири найбільш ефективні — TU-14, TW-60, МП-1 і МП-2 та показані їх фізико-хімічні властивості.

3.3. Дослідження властивостей мембранних елементів виготовлених з обраних полотен

З обраних полотен різної селективності, а саме TU-14 та МП-2, були виготовлені два мембранні елементи рулонного типу. Довжина елемента становить 297 мм, діаметр – 76 мм. Це стандартні розміри елементів, що виготовляються серійно. Тому досліджувані елементи можна буде встановити в наявні корпуси та системи очищення води для проведення пілотних та дослідно-промислових випробувань.

Селективність по відношенню до сухого залишку і жорсткості та продуктивність були визначені на воді київського водопроводу за стандартних

умов: температурі 25 °С, тиску 4,8 бар, ККД 50 %. Характеристики мембранних елементів наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Характеристики мембранних елементів виготовлених з обраних полотен

Мембранний елемент	Полотно	Площа мембранного полотна, м ²	Селективність за жорсткістю, %	Селективність за сухим залишком, %	Продуктивність, дм ³ /год
ME1	TU-14	1,6	97 %	92 %	80
ME2	МП-2	1,6	64 %	55 %	114

Як видно із таблиці 3.4, селективність виготовлених мембранних елементів корелюють із селективністю полотен. Тому подальші дослідження процесу підготовки питної води стабільно високої якості з використанням елементів є доцільними.

Продуктивність елементу ME2, виготовленого з модифікованого зворотноосмотичного полотна МП-2, становить 114 дм³/годину, що на 43 % вище ніж продуктивність елементу ME1, виготовленого зі зворотноосмотичного полотна TU-14. Отримані результати відповідають раніше проведеним дослідженням [61]. Збільшена продуктивність ME2 у порівнянні з ME1 корелює з властивостями полотен, з яких виготовлені обидва елементи. Зокрема полотно МП-2 характеризується меншим кутом змочування (більш гідрофільне) та більшим радіусом пор у порівнянні з TU-14, тому є більш проникним для води та розчинених мінеральних домішок, як наслідок забезпечує вищу продуктивність елементу ME2.

Висновки підрозділу 3.3

З обраних поліамідних мембранних полотен були виготовлені два мембранні елементи, ME1 та ME2, рулонного типу стандартних розмірів для подальшого застосування в наявних системах очищення води. Визначені характеристики мембранних елементів: селективність по відношенню до жорсткості та сухого залишку, продуктивність. Селективність виготовлених елементів корелює із селективністю обраних полотен, тому їх подальші дослідження в процесах одержання питної води стабільно високої якості є доцільними.

3.4. Розробка алгоритму вибору мембранних елементів із різною селективністю

Вихідними даними для розробки алгоритму вибору мембранних елементів є:

- діапазон якості водопровідної води за показниками сухий залишок, 250 – 2000 мг/дм³, та жорсткість, 1,5 – 18 ммоль/дм³;
- вимоги до питної води стабільно високої якості за показниками сухий залишок, 100 – 200 мг/дм³, та жорсткість, 0,5 – 2.0 ммоль/дм³;
- селективність за показниками сухий залишок і жорсткість мембранних елементів ME1, 92 % і 97 %, та ME2, 55 % і 64 %.

Як видно з таблиць 3.1 та 3.4 з водопровідної води Тип I можливо отримати питну заданої якості при використанні елементу ME2, а з водопровідної води Тип III – елементу ME1. Отримання питної води з водопровідної Тип II можливе за рахунок використання комбінації елементів ME1 та ME2. Комбінація передбачає паралельне встановлення елементів, пермеати кожного з'єднуються в один потік. Схема паралельного підключення показана на рисунку 2.5, елементи з різною селективністю встановлюються в позиціях 5.1 та 5.2. Універсальним підходом є використання саме комбінації елементів ME1 та ME2 у всьому діапазоні якості

водопровідної води. Такий підхід дасть можливість одержувати питну воду із наперед заданим мінеральним складом. Для цього необхідно визначити співвідношення потоків пермеатів елементів ME1 та ME2 в залежності від складу вихідної води. Щоб визначити частку пермеату ME2 в загальному потоці пермеатів після ME1 та ME2 була розроблена формула 3.1.

$$N_{ME2} = \frac{C_D - C_f \cdot (1 - R_{CME1})}{C_f \cdot (1 - \alpha_{SO4}) \cdot (R_{CME1} - R_{CME2})} \cdot 100 \quad (3.1)$$

де N_{ME2} – частка пермеату мембранного елементу ME2 в суміші, %

C_d – концентрація сухого залишку чи жорсткості в суміші пермеатів, мг/дм³

C_f – концентрація сухого залишку чи жорсткості у вихідній воді, мг/дм³;

R_{CME1} – селективність за сухим залишком чи жорсткістю ME1, частка

R_{CME2} – селективність за сухим залишком чи жорсткістю ME2, частка

α_{SO4} – частка сульфатів від суми аніонів у вихідній воді, частка

Формула 3.1 є узагальненою для розрахунку частки пермеату ME2 за показниками сухий залишок та жорсткість води. Підставивши у формулу 3.1 значення селективності мембранних елементів із таблиці 3.4, а також частку сульфатів з таблиці 3.1, отримаємо формули 3.2 та 3.3, згідно яких розраховуються співвідношення потоків пермеату за показниками сухий залишок та жорсткість відповідно.

$$N_{SME2} = \frac{S_D - 0,08 S_f}{0,32 S_f} \cdot 100 \quad (3.2)$$

$$N_{HME2} = \frac{H_D - 0,03 H_f}{0,28 H_f} \cdot 100 \quad (3.3)$$

де N_{SME2} – частка пермеату мембранного елементу ME2 в суміші за сухим залишком, %

N_{HME2} – частка пермеату мембранного елементу ME2 в суміші за жорсткістю, %

S_d – сухий залишок суміші пермеатів, мг/дм³

S_f – сухий залишок у вихідній воді, мг/дм³;

H_d – жорсткість суміші пермеатів, ммоль/дм³

H_f – жорсткість у вихідній воді, ммоль/дм³.

За формулою 3.2 були розраховані частки пермеату ME2 для одержання питної води із сухим залишком 100 та 200 мг/дм³ для всього діапазону водопровідної води. На рисунку 3.4 наведений графічний результат розрахунку.

Крива «ME1+ME2 Сухий залишок 100 мг/дм³» показує значення частки пермеату ME2, при якій досягається сухий залишок суміші пермеатів 100 мг/дм³ в залежності від вихідного сухого залишку. Крива «ME1+ME2 Сухий залишок 200 мг/дм³» показує значення частки пермеату ME2, при якій досягається сухий залишок суміші пермеатів 200 мг/дм³. Крива ME2 показує діапазон сухого залишку вихідної води, при якому можливо досягти цільових показників сухого залишку питної води, використовуючи лише мембранний елемент ME2. Крива ME1 показує діапазон сухого залишку вихідної води, при якому можливо досягти цільових показників сухого залишку питної води, використовуючи лише мембранний елемент ME1.

За формулою 3.3 були розраховані частки пермеату ME2 для одержання питної води із жорсткістю 0,5 та 2,0 ммоль/дм³ для всього діапазону водопровідної води.

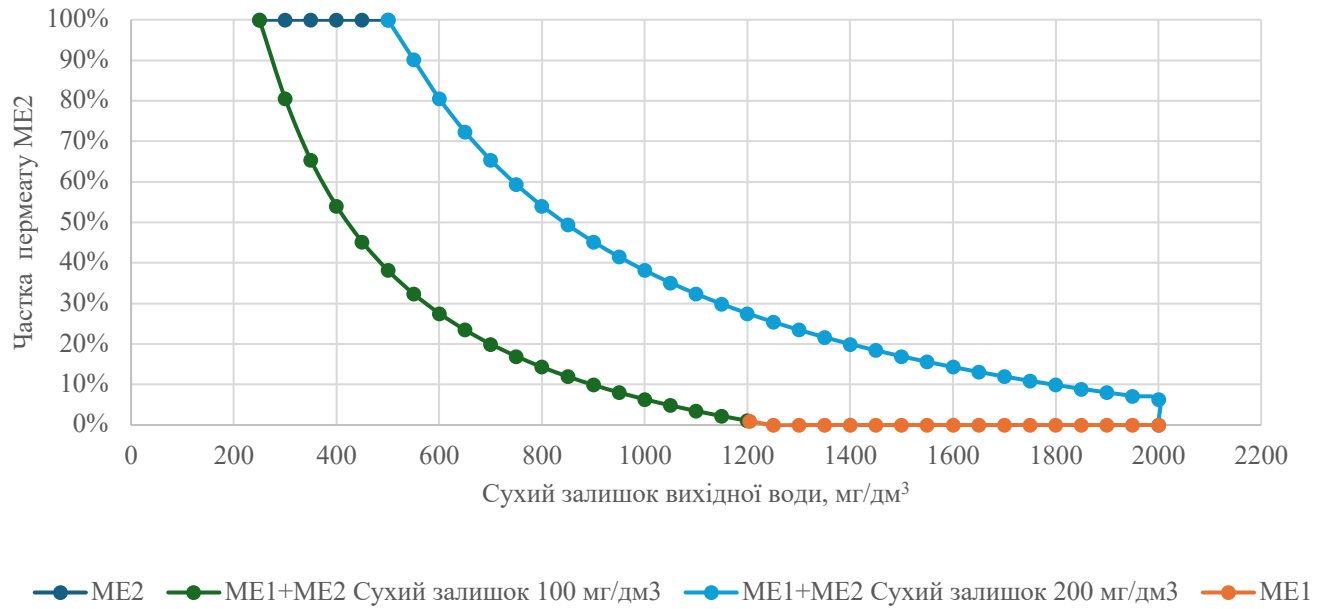


Рисунок 3.4 - Значення частки пермеату ME2 в залежності від величини показника "Сухий залишок" вихідної води

На рисунку 3.5 наведений графічний результат розрахунку.

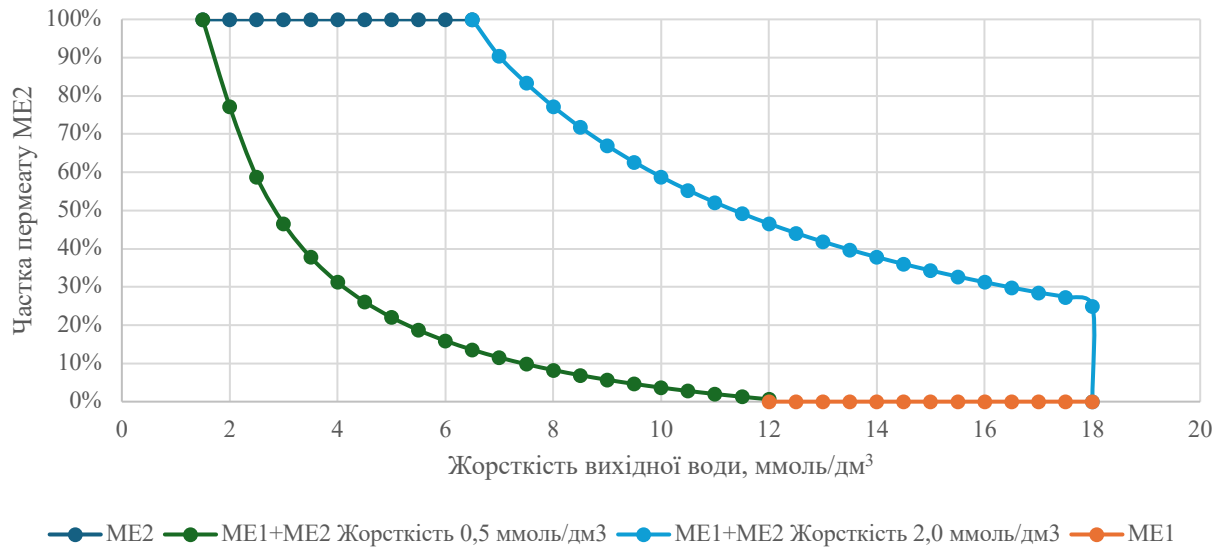


Рисунок 3.5 – Значення частки пермеату ME2 в залежності від величини показника "Жорсткість" вихідної води

Крива «ME1+ME2 Жорсткість 0,5 ммоль/дм³» показує значення частки пермеату ME2, при якій досягається жорсткість суміші пермеатів 0,5 ммоль/дм³ в залежності від вихідної жорсткості. Крива «ME1+ME2 Жорсткість 2,0 ммоль/дм³» показує аналогічні значення для досягнення жорсткості пермеатів 2,0 ммоль/дм³. Крива ME2 показує діапазон жорсткості вихідної води, при якому можливо досягти цільових показників жорсткості питної води, використовуючи лише мембранний елемент ME2. Крива ME1 показує діапазон жорсткості вихідної води, при якому можливо досягти цільових показників жорсткості питної води, використовуючи лише мембранний елемент ME1.

Для визначення співвідношення потоків пермеатів на основі обох показників: сухого залишку та жорсткості розроблений алгоритм, що наведений на рисунку 3.6.

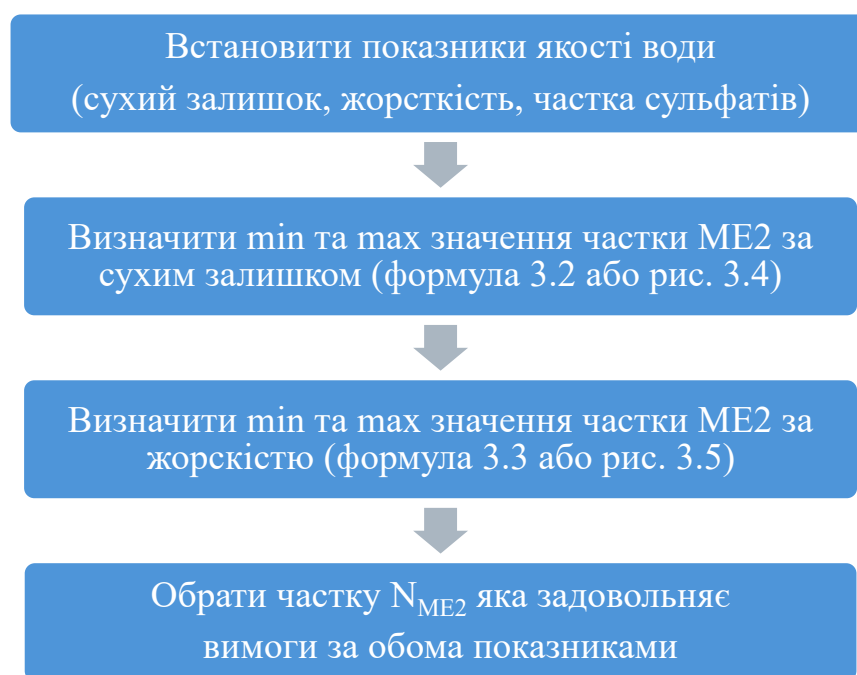


Рисунок 3.6 – Алгоритм вибору співвідношення потоків пермеатів елементів ME1 та ME2 для одержання питної води стабільно високої якості

Суть алгоритму полягає у визначенні складу водопровідної води за показниками сухий залишок, жорсткість, частка сульфатів. Використовуючи

формулу 3.2 чи рисунок 3.4 визначити мінімальне та максимальне значення частки пермеату ME2 за показником сухий залишок. Використовуючи формулу 3.3 чи рисунок 3.5 визначити мінімальне та максимальне значення частки пермеату ME2 за показником жорсткість. Обрати частку пермеату ME2, яка відповідає обом значенням.

Висновки до підрозділу 3.4

На основі даних про склад вихідної води, цільових показників питної води стабільно високої якості, а також характеристик виготовлених мембранних елементів запропоновано для кожного типу водопровідної води використати елементи ME1, ME2 або їх комбінацію. Аргументовано, що найбільш раціональним рішенням є використання саме комбінації елементів з різною селективністю: ME1 та ME2, встановлених паралельно. Такий підхід дозволить отримати питну воду заданого мінерального складу з водопровідної всіх трьох типів. Показано, що на якість одержаної води впливає співвідношення потоків пермеатів в їх загальному потоці. Запропонована формула розрахунку частки пермеату елемента ME2 в залежності від якості вихідної води та вимог до одержаної. Проведені розрахунки частки пермеату ME2 для всього діапазону складу водопровідної води за обома показниками: сухий залишок та жорсткість. Представлені графічні результати розрахунків. Сформульований алгоритм вибору співвідношення потоків пермеату елементів різної селективності. Запропоновано формулу розрахунку співвідношення потоків пермеату мембранних елементів з різною селективністю в залежності від складу вихідної води. Створено програму автоматизованих розрахунків в MS Excel.

3.5. Проведення пілотних випробувань процесу підготовки питної води

Пілотні випробування були проведені з метою експериментальної перевірки коректності вибору мембранних полотен, обраних у попередніх підрозділах, а також оцінки адекватності розробленого алгоритму підбору мембранних елементів для одержання питної води стабільно високої якості. Проведення тестувань дозволило перевірити працездатність мембранних елементів різної селективності в умовах, наближених до реальної експлуатації, та оцінити відповідність фактичних показників очищеної води як розрахунковим значенням, так і цільовим параметрам, установленим у роботі.

Для проведення випробувань були обрані три міста — Київ, Луцьк і Кривий Ріг — водопровідна вода яких відрізняється за сухим залишком, жорсткістю та вмістом сульфатів. Такий вибір міст дозволив оцінити роботу мембранних елементів у різних умовах вихідного складу води та підтвердити універсальність запропонованого алгоритму вибору мембранних полотен. Для проведення пілотних випробувань обрані мембранні водні вендингові автомати (рисунки 2.3 та 2.4). Технологічна схема підготовки питної води представлена на рисунку 2.5. Відповідно до схеми мембранні елементи ME1 та ME2 встановлювались у позиціях 5.1 та 5.2 згідно з рисунком.

Залежно від типу вихідної води застосовувалися мембранні елементи ME1 (м. Кривий Ріг) та ME2 (м. Київ). У випадку Луцька використовувалася комбінація ME1–ME2 зі співвідношенням потоків пермеату 50 % – 50 %, що було визначено алгоритмом вибору на основі бажаних цільових характеристик очищеної води (рис. 3.6).

У таблиці 3.5 наведено вихідні характеристики водопровідної води, тип застосованих мембранних елементів, співвідношення потоків, а також розрахункові

та фактичні значення якості очищеної води. Розрахункові показники визначалися за допомогою програми автоматизованих розрахунків (додаток 1).

Таблиця 3.5 – Результати пілотних випробувань процесу одержання питної води з використанням мембранних елементів різної селективності

Параметри випробувань			м. Київ	м. Луцьк	м. Кривий Ріг
Вихідна вода		Жорсткість, ммоль/дм ³	3,8 – 4,0	8,4 – 8,6	12,2 – 12,5
		Сухий залишок, мг/дм ³	320 – 330	515 – 525	1 400 – 1 682
		Сульфати, мг/дм ³	35 - 40	30 - 35	325 - 375
Тип мембранного елементу (співвідношення потоків)			ME2	ME1 - ME2 (50 % - 50 %)	ME1
Очищена вода	Розрахункові значення	Жорсткість, ммоль/дм ³	1,4	1,6 - 1,7	0,4
		Сухий залишок, мг/дм ³	140 - 145	136 - 139	112 - 132
		Сульфати, мг/дм ³	< 1,0	< 1,0	3,0 – 4,0
	Фактичні значення	Жорсткість, ммоль/дм ³	1,5 – 1,7	1,3 – 1,4	0,5 – 0,6
		Сухий залишок, мг/дм ³	125 – 145	120 – 140	115 – 130
		Сульфати, мг/дм ³	< 1,0	< 1,0	3,0 – 4,0
	Цільові значення	Жорсткість, ммоль/дм ³	0,5 – 2,0		
		Сухий залишок, мг/дм ³	100 – 200		

Для водопровідної води м. Київ застосовувався мембранний елемент ME2, що забезпечує селективність за жорсткістю та сухим залишком в межах 50 – 60 %, тобто достатнє для отримання пермеату з мінеральним складом до цільових значень. Отримані наступні результати:

- Розрахункова жорсткість очищеної води: 1,4 ммоль/дм³;
- Фактична жорсткість: 1,5–1,7 ммоль/дм³;
- Розрахунковий сухий залишок: 144–149 мг/дм³;

- Фактичний сухий залишок: 125–145 мг/дм³.

Отримані фактичні значення повністю відповідають цільовим показникам. Сульфати були практично повністю видалені (< 1 мг/дм³). Пілотні випробування показали відхилення фактичних результатів від розрахункових за показником жорсткість на 6 %. Фактичні значення сухого залишку відповідають розрахунковим.

Вихідна вода м. Луцьк характеризується підвищеною жорсткістю (8,4–8,6 ммоль/дм³) та солевмістом (515 – 525 мг/дм³), що вимагало поєднання мембран різної селективності для отримання пермеату з якісними показниками в межах цільових значень. Отримані наступні результати:

- Розрахункова жорсткість: 1,6–1,7 ммоль/дм³;
- Фактична жорсткість: 1,3–1,4 ммоль/дм³;
- Розрахунковий сухий залишок: 136–139 мг/дм³;
- Фактичний сухий залишок: 120–140 мг/дм³.

Отримані фактичні значення повністю відповідають цільовим показникам (жорсткість 0,5–2,0 ммоль/дм³; сухий залишок 100–200 мг/дм³). Сульфати були практично повністю видалені (< 1 мг/дм³). Пілотні випробування показали відхилення фактичних результатів від розрахункових за показником жорсткість на 11 %. Фактичні значення сухого залишку відповідають розрахунковим.

Водопровідна вода м. Кривий Ріг характеризувалася високою жорсткістю (12,2–12,5 ммоль/дм³), високим сухим залишком (1400–1682 мг/дм³) та значним вмістом сульфатів (325–375 мг/дм³). У таких умовах був використаний елемент ME1 із селективністю 85 – 95 % за показниками сухий залишок та жорсткість. Отримані наступні результати:

- Розрахункова жорсткість пермеату: 0,4 ммоль/дм³;
- Фактична жорсткість: 0,5–0,6 ммоль/дм³;
- Розрахунковий сухий залишок: 112–132 мг/дм³;

- Фактичний сухий залишок: 115–130 мг/дм³.

Отримані фактичні значення повністю відповідають цільовим показникам. Сульфати були знижені до 3–4 мг/дм³, що означає видалення понад 99 %. Пілотні випробування показали відхилення фактичних результатів від розрахункових за показником жорсткість на 16 %. Фактичні значення сухого залишку відповідають розрахунковим.

Висновки підрозділу 3.5

Проведено пілотні випробування з використанням мембранних елементів ME1 та ME2 у трьох містах із різним складом водопровідної води — Києві, Луцьку та Кривому Розі. Вибір мембранних елементів було зроблено відповідно до розробленого алгоритму. Фактичні значення показників очищеної води (жорсткість, сухий залишок, сульфати) у всіх містах повністю відповідали цільовим значенням, установленим для питної води стабільно високої якості. Порівняння розрахункових та фактичних значень показало повну відповідність за показником сухий залишок та відхилення на 6 – 16 % за показником жорсткість. Це відхилення було враховане для коригування програми автоматичних розрахунків. Результати випробувань доводять коректність вибору мембранних полотен МП-2 та TU-14 для отримання питної води стабільно високої якості із водопровідної різного складу. Крім того, результати підтверджують адекватність розробленого алгоритму вибору мембранних елементів з різною селективністю для очищення водопровідної води.

3.6. Розробка технологічної схеми процесу підготовки питної води стабільно високої якості

Результати пілотних випробувань підтвердили можливість отримання питної води стабільно високої якості з використання мембранних елементів різної

селективності. Для впровадження розробленого підходу була проаналізована існуюча технологія підготовки питної води у ВВА, рисунок 3.7.

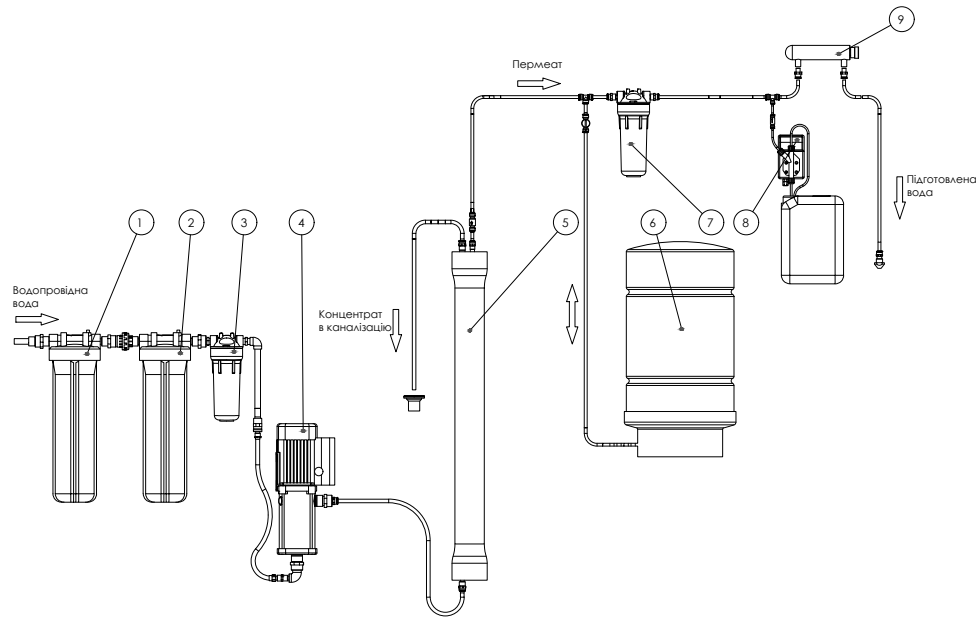


Рисунок 3.7 – Технологічна схема підготовки питної води в існуючому водному вендинговому автоматі виробництва «Ecosoft-BWT»:

1 – фільтр механічного очищення; 2 – фільтр вугільний; 3 – картридж - дозатор антискаленту; 4 – насос високого тиску; 5 – зворотноосмотичний модуль; 6 – бак чистої води закритого типу; 7 – вугільний фільтр ; 8 – модуль дозування розчину солей; 9 – ультрафіолетовий знезаражувач.

Існуюча технологія підготовки води у ВВА включає 7 стадій очищення. Вода проходить через фільтри механічного та вугільного очищення. Далі вода проходить через картридж з антискалентом для запобігання утворенню кристалів на поверхні мембрани. Далі вода з тиском 7-8 бар подається на мембранний елемент, де утворюється пермеат із сухим залишком $5-10 \text{ мг/дм}^3$ та концентрат. Пермеат накопичується в ємності чистої води, яка передбачена для компенсації продуктивності мембранного елементу у години максимального розливу води.

Пермеат з ємності подається на фільтр з активованим вугіллям для покращення органолептичних показників якості води. Далі відбувається домінералізація води розчинами солей за допомогою насоса-дозатора. Безпосередньо перед розливом води відбувається її знезараження за допомогою ультрафіолетового випромінювання [98,99].

Для забезпечення безперебійної роботи ВВА та стабільної якості очищеної води необхідно своєчасно замінювати витратні матеріали. В таблиці 3.6 наведений перелік фільтрів, їх технічні характеристики та їх вартість. В існуючих ВВА заміна організована за часовою логікою. Тобто для кожного елементу встановлений часовий інтервал до його заміни. Така логіка веде до перевитрати фільтрів для одних ВВА та ризику погіршення якості води для інших.

Як показано в роботі [59], якість одержаної води у мембранних водних вендингових автоматах відповідає нормам за показниками безпечності, але не відповідає вимогам фізіологічної повноцінності за показниками сухий залишок, жорсткість та водневий показник рН.

Згідно з дослідженнями [87] 80 % існуючих ВВА розливають не більше 300 дм³ на добу. А максимальна годинна продуктивність становить 40 дм³/год.

Наведений вище аналіз роботи існуючих ВВА показує, що вдосконалення потребує і технологія підготовки води і зміна логіки обслуговування. Останнє можливо за рахунок цифровізації ВВА.

Таблиця 3.6 – Перелік витратних елементів існуючого вендингового автомату, їх характеристики, частота заміни та вартість на рік

Позиція на рис. 3.7	Змінні фільтри	К-сть	Технічні характеристики	Частота заміни, разів на рік	Ціна*, грн	Сума, грн
1	2	3	4	5	6	7
1	Картридж зі спіненого поліпропілену 5 мкм, типорозмір 4.5"x10"	1	Продуктивність: 900 дм ³ /год Тип матеріалу: поліпропіленове волокно Номінальний рейтинг фільтрації: 5 мкм Ресурс: 40 000 дм ³	4	210	840
2	Картридж із гранульованим вугіллям, типорозмір 4.5"x10"	1	Продуктивність: 300 дм ³ /год Тип матеріалу: гранульоване активоване вугілля Ресурс 40 000 дм ³	4	1 050	4 200
3	Картридж антискалант, типорозмір 2.5"x10"	1	Продуктивність: 360 дм ³ /год Діюча речовина: поліфосфонати Ресурс: 40 000 дм ³	4	984	3 936
5	Зворотноосмотичний мембранний елемент типорозмір 4"x40"	1	Продуктивність: 250 дм ³ /год Тип матеріалу: поліамідне мембранне полотно Селективність 99,0% ККД: 75 % Ресурс: 150 000 дм ³	2	19 630	39 260
7	Картридж вугільний карбон блок, типорозмір 2.5"x10"	1	Продуктивність: 300 дм ³ /год Тип матеріалу: спресоване активоване вугілля із шкаралупи коксового горіху Номінальний рейтинг фільтрації: 10 мкм Ресурс : 40 000 дм ³	4	243	972
8	Суміш мінералів, фасування 1 кг	4	Тип матеріалу: хлорид калію, хлорид магнію Витрата на 1 дм ³ питної води: 100 - 150 мг	4	504	8 064

1	2	3	4	5	6	7
9	Випромінювач до УФ-лампи накаливання	1	Продуктивність: 300 дм ³ /год Тип випромінювача: ртутна лампа накаливання Ефективність знезараження: 99,999 % Ресурс: 1 рік	1	1 386	1 386
	Загальна вартість витрат на рік					58 658

* - ціни на картриджі та витратні матеріали вказані згідно [29, 100].

Цифровізація водних вендингових автоматів

Суть цифровізації полягає в обладнанні інженерних систем сенсорами та мікроконтролерами для збору та передачі технологічних параметрів з метою подальшої їх обробки та аналізу [87]. Завдяки цифровізації оператори отримують значно більше інформації про роботу обладнання. Аналіз технологічних параметрів відкриває можливості до оптимізації процесів завдяки кращому розумінню їх функціонування протягом часу. Цифровізація ВВА полягає в обладнанні їх сенсорами якості води, витратомірами, датчиками стану технологічного обладнання.

Для збору та обробки даних була створена серверна інфраструктура та програмне забезпечення, схематичне зображення яких наведено на рисунку 3.8.

Серверне програмне забезпечення (СПЗ) збирає та обробляє дані від вендингових апаратів. ВВА (1) відправляє дані на сервер, де вони обробляються та зберігаються в базі даних (3). Дані можуть бути отримані та переглянуті різними користувачами – наприклад, у вигляді онлайн звіту (4) або мобільного застосунку.

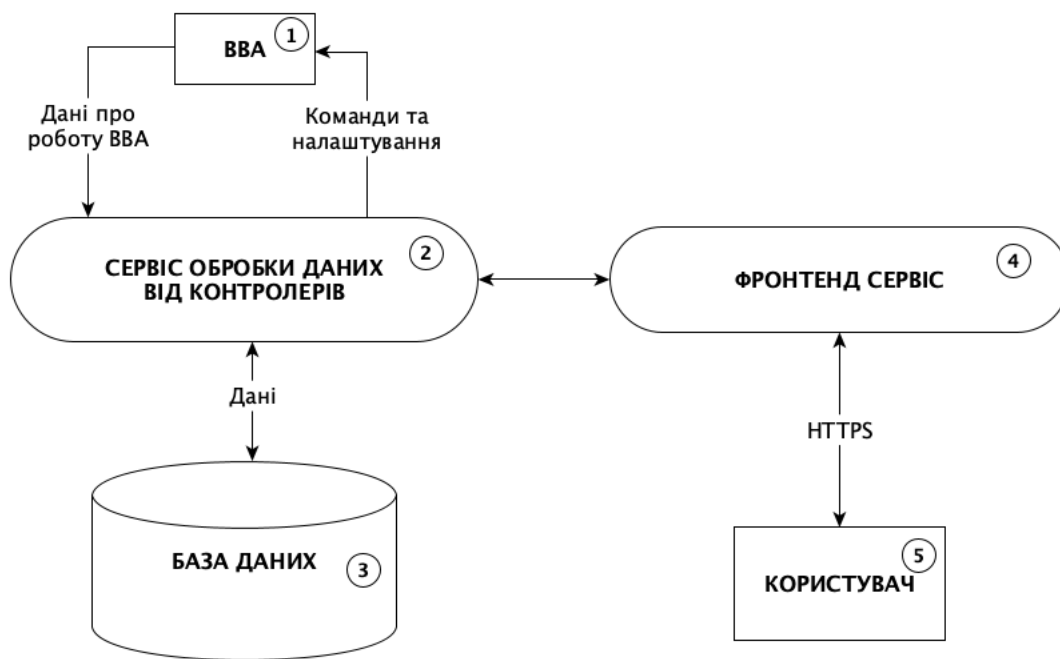


Рисунок 3.8 – Структура серверного програмного забезпечення

Вбудоване програмне забезпечення контролера ВВА (ПЗК) виконує наступні функції:

1. Керування обладнанням з очищення води ВВА;
2. Керування процесом оплати та наливу води споживачам;
3. Відстеження технічного стану ВВА;
4. Запис інформації про всі події в роботі ВВА у внутрішню пам'ять контролера;
5. Обмін даними із СПЗ на серверах.

Для переходу від часової логіки обслуговування до об'ємної в програмне забезпечення будуть задані ресурси змінних фільтрів замість часового інтервалу їх заміни. Розрахунок кількості змінних фільтрів здійснювався на основі фактичного об'єму розливої води. А кількість сервісних обслуговувань – на основі частоти заміни кожного фільтра.

Вдосконалена технологічна схема підготовка питної води у ВВА

Таким чином, враховуючи результати пілотних випробувань та розроблені пропозиції щодо цифровізації ВВА, була запропонована вдосконалена технологічна схема підготовки питної води, рисунок 3.9.

Вдосконалена технологічна схема (рисунок 3.9) відрізняється від існуючої схеми (рисунок 3.7) тим, що стадії зворотного осмосу та домінералізації були замінені на одну стадію – зворотний осмос із різними селективностями.

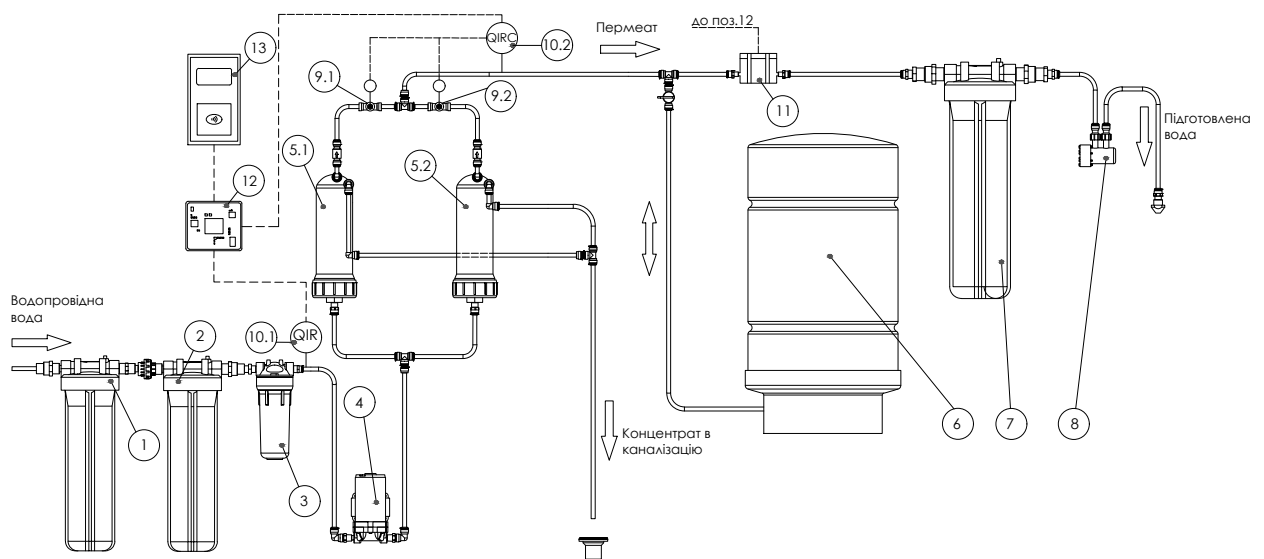


Рисунок 3.9 – Вдосконалена технологічна схема підготовки води у мембранному водному вендинговому автоматі:

1 – Фільтр механічного очищення; 2 – фільтр вугільний; 3 – картридж-дозатор антискаланту; 4 – насос високого тиску; 5.1 – мембранний елемент зворотноосмотичний; 5.2 – мембранний елемент модифікований із заданою селективністю; 6 – ємність чистої води; 7 – фільтр вугільний; 8 – ультрафіолетовий знезаражувач; 9.1, 9.2 – крани регулювання потоку води; 10.1, 10.2 – сенсори електропровідності води; 11 – електронний витратомір; 12 – контролер з мікропроцесором; 13 – платіжний модуль.

Вдосконалена схема оснащена засобами цифровізації: крани регулювання співвідношення потоків з кожного мембранного елементу (9.1 та 9.2); сенсори електропровідності води (10.1 та 10.2) для вимірювання сухого залишку вихідної та очищеної води; електронний витратомір очищеної води (11). Засоби цифровізації підключені до контролера з мікропроцесором (12). Оплата здійснюється через платіжний модуль безготівкових розрахунків, що усуває необхідність інкасацій.

Це дозволить отримувати інформацію про фактичні показники роботи кожного апарату та визначати частоту обслуговування на основі об'єму розливої води, а не на основі часу як це відбувається сьогодні. Нові можливості, що надає цифровізація, дозволять суттєво скоротити витрати на сервісне обслуговування, що є необхідним на шляху до більш масштабного впровадження ВВА [94].

Висновки підрозділу 3.6

З метою впровадження результатів пілотних випробувань мембранних елементів з різною селективністю була досліджена існуюча технологія підготовки води у мембранних водних вендингових автоматах. Показано, що якість питної води у ВВА відповідає вимогам безпечності, але не відповідає вимогам фізіологічної повноцінності за показниками сухий залишок, жорсткість та водневий показник рН. Крім того, в існуючих ВВА заміна витратних матеріалів відбувається за часовою логікою. Через нерівномірність щоденного об'єму розливої води на різних ВВА така логіка веде до погіршення якості води та перевитрати змінних елементів. Запропонована вдосконалена технологія підготовки питної води з використанням мембранних елементів з різною селективністю. Такий підхід забезпечить одержання питної води стабільно високої якості. Для зміни логіки обслуговування з часової на об'ємну сформульовані підходи до цифровізації ВВА. Вона включає сенсори якості та об'єму води,

контролер з мікропроцесором та серверне програмне забезпечення. Сукупність апаратно-програмних компонентів дозволяє в режимі реального часу контролювати якість питної води та здійснювати обслуговування ВВА на основі актуальної інформації.

3.7. Дослідно-промислові випробування процесу підготовки питної води

Щоб перевірити на практиці розроблену технологію підготовки питної води з використанням мембранних елементів з різною селективністю були проведені дослідно-промислові випробування. Технологія стандартного ВВА, виробництва «Екософт», була змінена відповідно до рисунку 3.9.

Випробування проводились на водопровідній воді міста Києва, склад якої наведений в таблиці 2.2. Згідно алгоритму вибору мембранних елементів з різною селективністю, описаному в розділі 3.4, для отримання питної води стабільно високої якості з водопровідної із сухим залишком 320 – 330 мг/дм³ можна використати два мембранних елементи ME2 або комбінацію ME1 та ME2 із співвідношенням потоків води 25 % : 75 % відповідно.

Експлуатація зворотноосмотичних елементів, яким є ME1, добре досліджена, на відміну від елементів виготовлених із модифікованих полотен, яким є елемент ME2. Тому для дослідно-промислової експлуатації були обрані два елементи ME2. Такий варіант є більш критичним сценарієм випробування для перевірки стабільності якості очищеної води та продуктивності ніж сценарій використання комбінації елементів ME1 та ME2. Тому отримані результати можуть бути застосовані у майбутньому до обох варіантів.

В ході випробувань досліджуваний ВВА очищував 300 дм³ води на добу, всього було одержано 56 м³ питної води, а випробування тривали близько 6 місяців. Відбір зразків вихідної та очищеної води, а також вимірювання продуктивності

відбувалось регулярно з інтервалом 1000 дм³. Зразки води досліджувались за показниками: сухий залишок, жорсткість, водневий показник рН, забарвленість.

На рисунку 3.10 показана динаміка якості вихідної та одержаної води за показником сухий залишок.

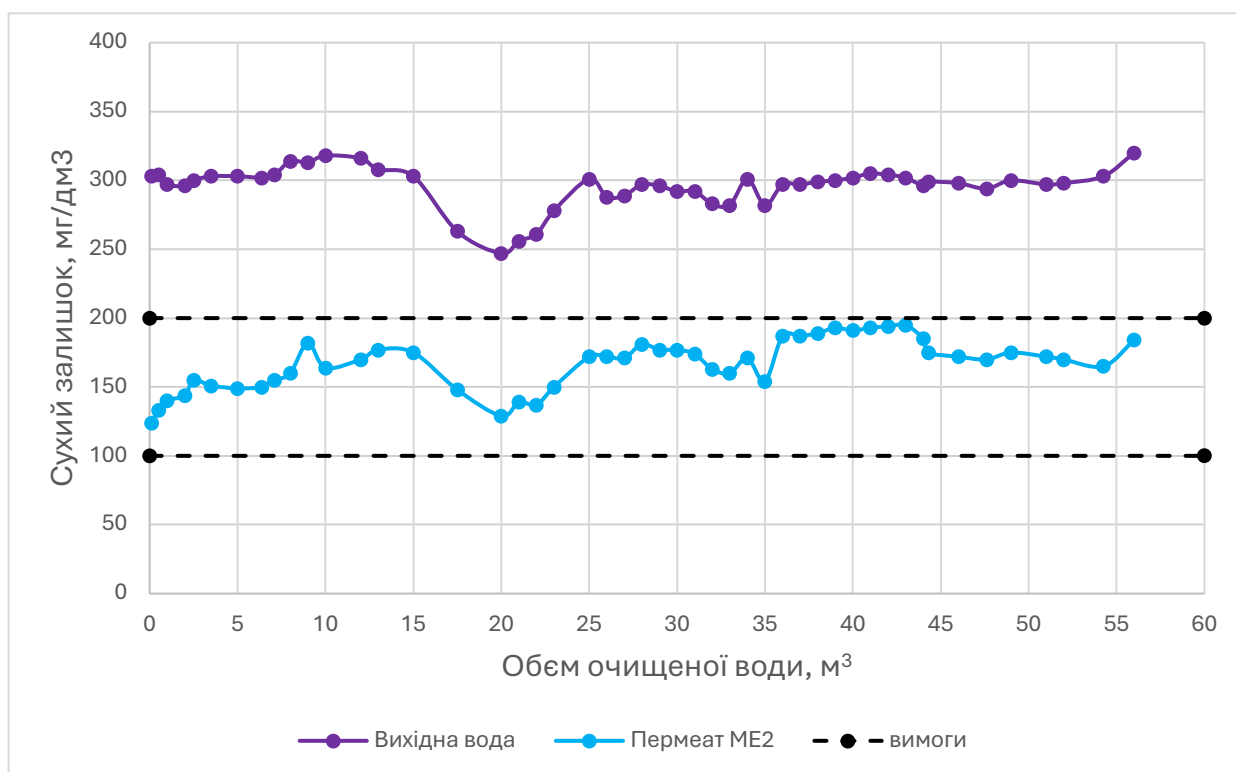


Рисунок 3.10 – Динаміка зміни сухого залишку від об'єму одержаного пермеату

З рисунку 3.10 видно, що сухий залишок вихідної води варіюється в межах 250 – 320 мг/дм³, а очищеної води – 124 – 195 мг/дм³. Протягом всього періоду випробувань питна вода відповідає вимогам за показником сухий залишок.

На рисунку 3.11 показана динаміка зміни жорсткості вихідної та очищеної води. З рисунку видно, що жорсткість вихідної води варіюється в межах 3,6 – 4,5 ммоль/дм³, а очищеної води – 1,3 – 1,9 ммоль/дм³. Протягом всього періоду випробувань питна вода відповідає вимогам за показником жорсткість.

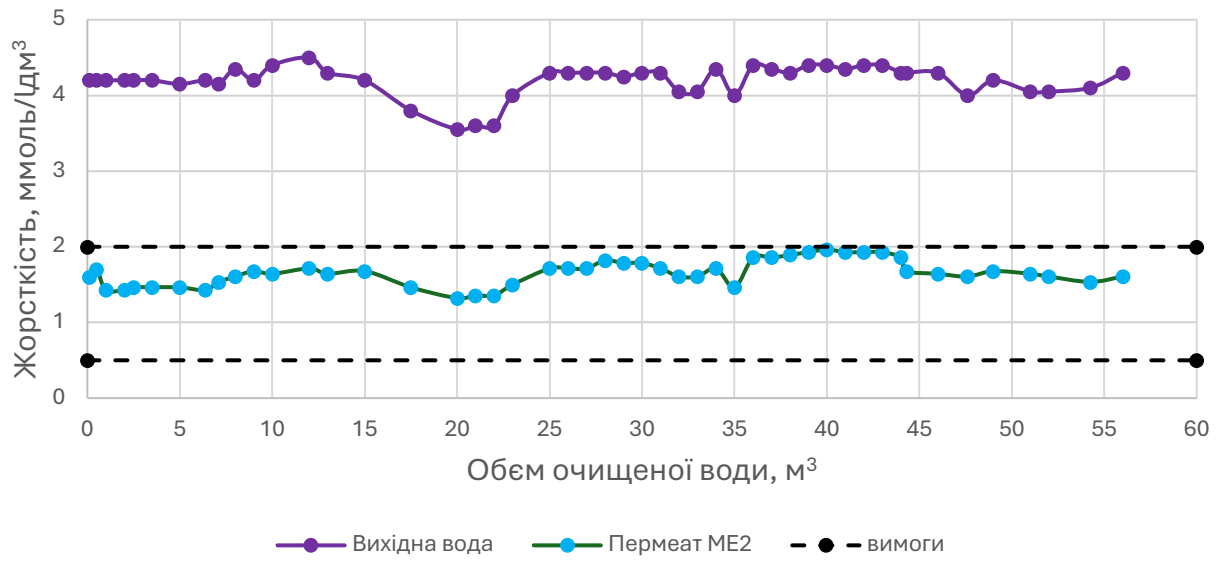


Рисунок 3.11 – Динаміка зміни жорсткості від об'єму одержаного пермеату

На рисунку 3.12 показана забарвленість вихідної та очищеної води.

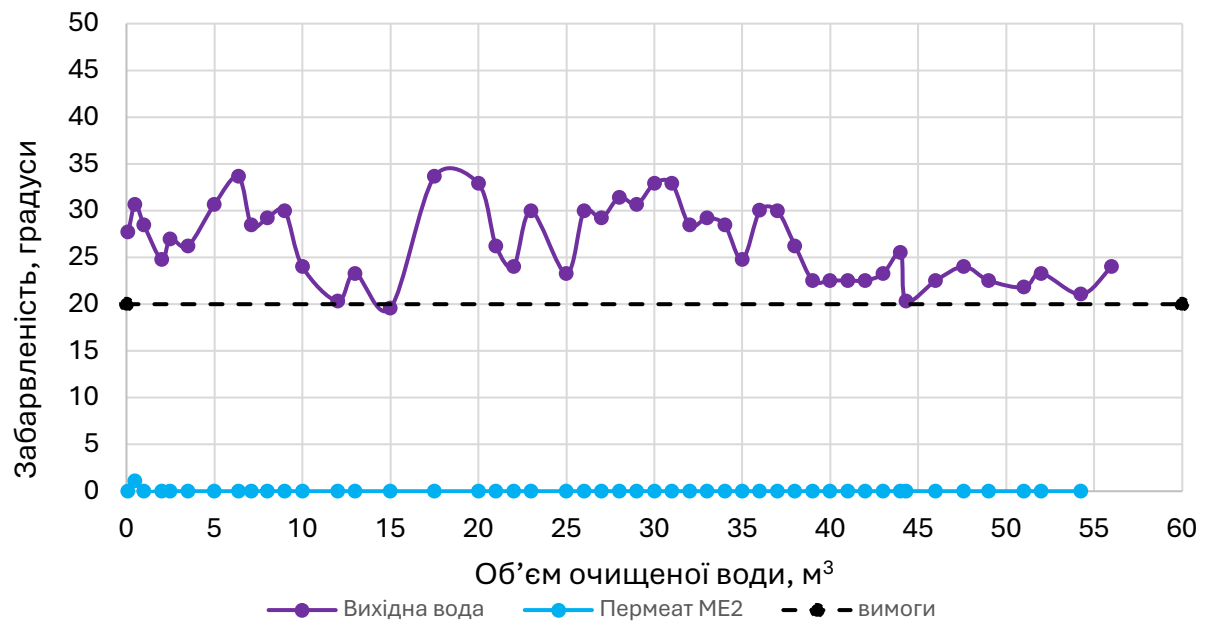


Рисунок 3.12 – Динаміка зміни забарвленості від об'єму одержаного пермеату

Як видно з рисунку 3.12 забарвленість вихідної води варіюється в широких межах від 20 до 35 градусів, при цьому забарвленість очищеної води менше 1 градуса протягом всього періоду випробувань і відповідає вимогам.

На рисунку 3.13 показана динаміка зміни водневого показника рН вихідної та очищеної води

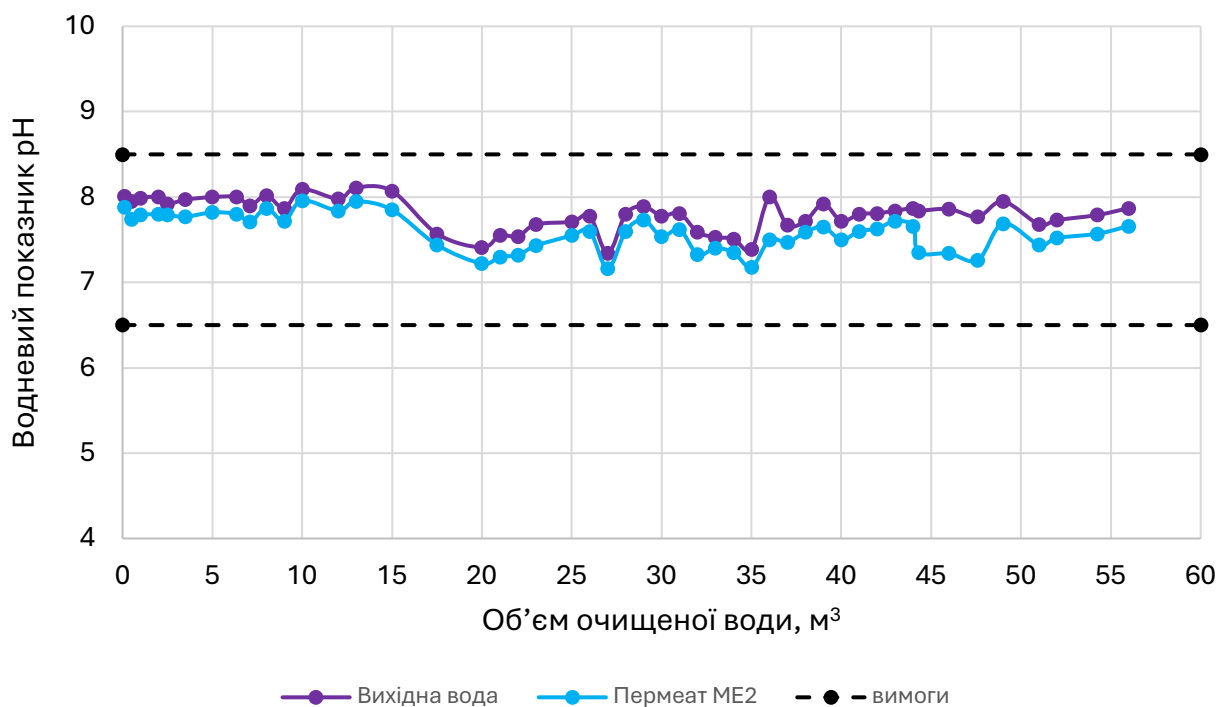


Рисунок 3.13 – Динаміка зміни рН від об'єму одержаного пермеату

З рисунку видно, водневий показник рН вихідної та очищеної води протягом випробувань варіюється в межах від 7,1 до 8,0 і відповідає вимогам. Очищення води з використанням мембранного елементу зі зниженою селективністю майже не змінює показник рН, на відміну від зворотноосмотичного елементу.

Як видно з рисунків 3.10 – 3.13 показники якості очищеної води зберігають стабільні значення протягом всього періоду експлуатації. Це свідчить про

стабільну селективність мембранних елементів ME2 в часі, що в свою чергу дає можливість розглядати їх використання в промислових масштабах.

В кінці дослідно-промислових випробувань якості води була проаналізована за розширеним переліком показників, наведеним в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Склад водопровідної та очищеної води під час дослідно-промислових випробувань

Показник	Водопровідна вода м. Київ	Очищена вода вдосконалим ВВА
Каламутність, НОК	1,5 – 2,6	< 0,5
Забарвленість, градуси	27 - 33	<1
Перманганатна окиснюваність, мг О ₂ /дм ³	5,0 – 6,0	< 2
Вміст тригалоген-метанів (ТГМ), мкг/дм ³	< 5	< 5
Жорсткість, ммоль/дм ³	3,5 – 3,8	1,6 - 1,8
Залізо, мг/дм ³	0,06 – 0,16	<0,01
Марганець, мг/дм ³	0,03 – 0,07	<0,01
Лужність, ммоль/дм ³	3,6 – 3,8	1,6 – 1,7
Сульфати, мг/дм ³	35 - 40	< 1,0
Нітрати, мг/дм ³	2 - 6	1 - 3
Сухий залишок, мг/дм ³	320 - 330	125 - 145
Водневий показник рН	7,9 – 8,1	7,5 – 7,7
Загальне мікробне число, КУО/см ³	3 - 5	1 - 2

Розширений аналіз показав, що запропонована для ВВА технологія підготовки питної води дозволяє одержати воду стабільно високої якості за показниками безпеки та фізіологічної повноцінності протягом тривалого часу.

Паралельно з якістю води аналізувалась і динаміка зміни продуктивності, яка наведена на рисунку 3.14.

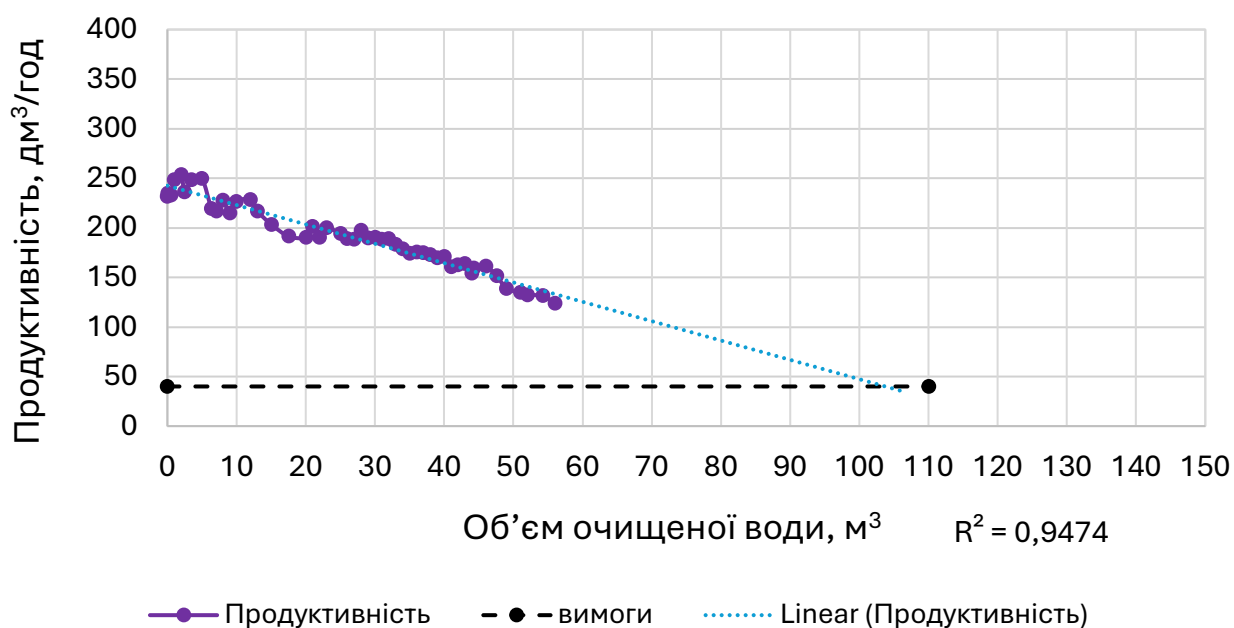


Рисунок 3.14 – Динаміка зміни продуктивності автомату в ході дослідно-промислових випробувань

Протягом випробувань спостерігається зниження продуктивності мембранних елементів, що є характерною особливістю для мембранних елементів. Початкова продуктивність двох елементів становила $250 \text{ дм}^3/\text{год}$, а після одержання 56 м^3 води – $124 \text{ дм}^3/\text{год}$, тобто зменшилась удвічі. Ресурс мембранних елементів визначався в точці зниження продуктивності до величини $40 \text{ дм}^3/\text{год}$, що є мінімально-допустимою продуктивністю, за якої ВВА все ще забезпечує користувачів достатньою кількістю води [59]. Екстраполяція кривої динаміки зміни

продуктивності показала, що прогнозований ресурс двох мембранних елементів складає 105 м³.

В результаті проведення дослідно-промислових випробувань вдалось встановити ресурси витратних елементів технологічної схеми (рис. 3.9). В таблиці 3.8 наведений перелік фільтрів вдосконаленої схеми ВВА та їх технічні характеристики.

Таблиця 3.8 – Перелік витратних елементів вдосконаленого водного вендингового автомату, їх характеристики, частота заміни та вартість на рік

Позиція на рис. 3.9	Змінні фільтри	К-сть, шт	Технічні характеристики	Частота заміни, разів на рік	Ціна*, грн	Сума, грн
1	2	3	4	5	6	7
1	Картридж градієнтний зі спіненого поліпропілену 25 - 5мкм, типорозмір 4.5"х 20"	1	Продуктивність: 900 дм ³ /год Тип матеріалу: 2-шарове поліпропіленове волокно Номінальний рейтинг фільтрації: 25- 5 мкм Ресурс: 85 000 дм ³	2	689	1 378
2	Картридж вугільний карбон блок, типорозмір 4.5"х20"	1	Продуктивність: 300 дм ³ /год Тип матеріалу: спресоване активоване вугілля із шкаралупи кокосового горіху Номінальний рейтинг фільтрації: 10 мкм Ресурс : 100 000 дм ³	2	3 500	7 000

1	2	3	4	5	6	7
3	Картридж антискалант, типорозмір 4.5"x20"	1	Продуктивність: 360 дм ³ /год Діюча речовина: поліфосфонати Ресурс: 85000 дм ³	2	4150	8 300
5.1, 5.2	Зворотноосмотичний мембранний елемент типорозмір 3"x12"	2	Продуктивність: 75 – 120 дм ³ /год Тип матеріалу: поліамідне мембранне полотно, модифіковане поліамідне мембранне полотно Селективність 50 - 99% ККД: 50 % Ресурс: 52500 дм ³	1	6 300	12 600
7	Картридж вугільний карбон блок, типорозмір 4.5"x20"	1	Продуктивність: 300 дм ³ /год Тип матеріалу: спресоване активоване вугілля із шкаралупи кокосового горіху Номінальний рейтинг фільтрації: 10 мкм Ресурс : 100 000 дм ³	1	3 500	3 500
8	Випромінювач до світлодіодної УФ- лампи	1	Продуктивність: 300 дм ³ /год Тип випромінювача: світлодіодна лампа Ефективність знезараження: 99,9999 % Ресурс: 7 років	0,14	16 400	2 296
	Загальна вартість витрат на рік					35 074

* - ціни на картриджі та витратні матеріали вказані згідно [29, 100].

Порівняльний аналіз таблиць 3.6 та 3.8 показує, що вдосконалена технологія підготовки води у ВВА та цифровізація останнього дозволяє зменшити витрати на змінні елементи та знизити частоту сервісного обслуговування з 4 до 2 разів на рік.

Висновки підрозділу 3.7

Проведені дослідно-промислові випробування на водопровідній воді міста Києва. Проілюстровано, що в процесі очищення протягом дослідно-промислової експлуатації індикаторні показники якості питної води, а саме сухий залишок, жорсткість, рН, забарвленість, відповідають вимогам до питної води стабільно високої якості. Визначено ресурс мембранних елементів із різною селективністю, який складає 105 м³. Продемонстровано, що поєднання вдосконаленої технологічної схеми та цифровізації дає можливість знизити частоту сервісного обслуговування автоматів з 4 до 2 разів на рік.

Висновки розділу 3

В розділі 3 була проаналізована база даних «Карта якості води», зроблена класифікація водопровідної води за рівнем та типом мінералізації. Для кожного типу розрахований ступінь зниження показників сухий залишок та жорсткість до рівня вимог питної води стабільно високої якості.

Визначені фізико-хімічні властивості мембранних полотен. Встановлена залежність між їх селективністю по відношенню до індикаторних і мінеральних показників якості води та кутом змочування, дзета-потенціалом і радіусом пор. Обрані ефективні полотна для одержання питної води заданої якості.

З обраних полотен різної селективності були виготовлені два мембранні елементи та визначені їх властивості: селективність по відношенню до сухого залишку і жорсткості, продуктивність.

Розроблений алгоритм вибору мембранних елементів або їх комбінації для кожного з трьох типів водопровідної води. Запропонована формула розрахунку співвідношення потоків пермеатів одержаних з мембранних елементів різної селективності.

Згідно розробленого алгоритму проведені пілотні випробування процесу одержання питної води стабільно високої якості з водопровідної різних типів. Показано, що випробування підтвердили правильність вибору мембранних полотен та адекватність запропонованого алгоритму.

На основі результатів пілотних випробувань, була запропонована вдосконалена технологічна схема підготовки питної води у водному вендинговому автоматі. Зокрема, стадії зворотний осмос та домінералізація замінені на одну стадію – зворотний осмос із використанням мембранних елементів із різною селективністю.

Також запропонована цифровізація вендингового автомату, що включає сенсори, датчики, контролер з мікропроцесором та програмне забезпечення, для віддаленого контролю якості та об'єму очищеної води.

Проведені дослідно-промислові випробування на водопровідній воді міста Києва. Показано, що в процесі очищення протягом дослідно-промислової експлуатації індикаторні показники якості питної води, а саме сухий залишок, жорсткість, рН, забарвленість, відповідають вимогам до питної води стабільно високої якості. Визначено ресурс мембранних елементів із різною селективністю, який складає 105 м³. Встановлено, що поєднання вдосконаленої технологічної схеми та цифровізації дає можливість знизити частоту сервісного обслуговування автоматів з 4 разів до 2 разів на рік.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ПІДГОТОВКИ ПИТНОЇ ВОДИ

4.1. Економічна доцільність впровадження сучасних підходів до підготовки питної води

Економічний ефект від впровадження результатів даної роботи оцінюється шляхом порівняння роботи двох мереж водних вендингових автоматів. Перша мережа складається з існуючих ВВА – Ecosoft. Друга – із запропонованих в даній роботі вдосконалених ВВА.

Мережі порівнюються за річними витратами на їх функціонування. Нижче наведені статті витрат, які були сформульовані в підрозділі 1.2 і за якими буде здійснюватися порівняння:

- витратні матеріали (змінні картриджі, тощо);
- амортизація ВВА;
- сервісне обслуговування;
- інкасація;
- витрати на водопровідну воду та електроенергію.

В таблиці 4.1 наведені параметри порівнюваних мереж. Для порівняння обрані мережі, що налічують 50 одиниць кожна. Такий розмір мережі обраний для порівняння роботи запропонованих ВВА з існуючими [65].

Принципові технологічні схеми ВВА Ecosoft та вдосконаленого наведені на рисунках 3.7 та 3.9 відповідно. В таблицях 3.5 та 3.7 наведений перелік, характеристики та ціни змінних елементів ВВА Ecosoft та вдосконаленого відповідно. На основі даних таблиць визначається стаття витрат «Витратні матеріали».

Таблиця 4.1 – Порівняльні характеристики водних вендингових автоматів Ecosoft та вдосконалених

Параметр	ВВА Ecosoft	Вдосконалений ВВА
Продуктивність, дм ³ /год	250	250
Добовий налив води, дм ³	300	300
Річне споживання води, м ³	146	183
Кількість ступенів очищення	7	6
Технологічна схема підготовки води	рис. 3.7	рис. 3.9
Споживання електроенергії, кВт	1,0	0,5
Спосіб заміни витратних елементів	за часом	за об'ємом
Частота заміни	4 рази на рік	2 рази на рік*
Платіжні засоби	монети, купюри	безготівковий

* - заміна витратних елементів здійснюється за об'ємом очищеної води у міру вичерпання ресурсу витратних елементів , при розливі 300 дм³ на добу частота заміни становить 2 рази на рік.

Стаття витрат «Амортизація» розраховується за формулою 4.1:

$$A = \frac{\text{Вартість ВВА}}{T_c}, \quad (4.1)$$

де А – амортизація, грн/рік,

Вартість ВВА – вартість ВВА, грн

T_c – термін служби ВВА, роки

Вартість ВВА Ecosoft та вдосконаленого становить 311 354 грн та 229 641 грн відповідно [29], а термін служби складає 7 років.

Вартість сервісного обслуговування становить 5 300 грн за 1 виїзд інженера [87]. Ця сума включає заробітну плату інженера, витрати на паливно-мастильні матеріали, амортизацію автомобіля та інструменти. Вказана вартість відноситься до мережі ВВА з 50 одиниць та більше. ВВА Ecosoft потребує 4-х сервісних обслуговувань на рік, що становить 200 операцій на мережу. У вдосконаленому автоматі заміна відбувається за об'ємом одержаної питної води. При об'ємі розливу 300 дм³ на день – обслуговування здійснюється 2 рази на рік, тобто 100 виїздів на мережу в рік.

Вартість інкасації становить 880 грн за 1 інкасацію [87]. Версія ВВА Ecosoft оснащена купюро- та монетоприймачем, інкасація здійснюється 1 раз на місяць, що становить 600 інкасацій на рік на мережу. Вдосконалена версія оснащена платіжною системою на основі застосунку. Готівкові способи оплати не використовуються, тому витрати на інкасацію відсутні [101,102].

Комунальні платежі включають платежі за водопровідну воду та водовідведення і спожиту електроенергію. Тариф для юридичних осіб за водопостачання та водовідведення становить – 49,98 грн/м³ [103], електропостачання 9,12 грн/кВт [104]. На основі споживання води та електроенергії і тарифів розраховані річні витрати за статтею «Витрати на електроенергію та воду».

На рисунку 4.1 наведене порівняння витрат за статтями.

Як видно з рисунку 4.1, завдяки зменшенню кількості ступенів очищення води та частоти заміни картриджів, затрати на витратні матеріали зменшились на 40 %. За рахунок зменшення кількості виїздів інженерів на обслуговування на 50 % зменшились затрати на сервісне обслуговування. Перехід на безготівковий спосіб розрахунків дозволяє уникнути витрат на інкасацію в мережі із оптимізованих ВВА. Амортизація та комунальні платежі зменшились на 26 % та 21 % відповідно.

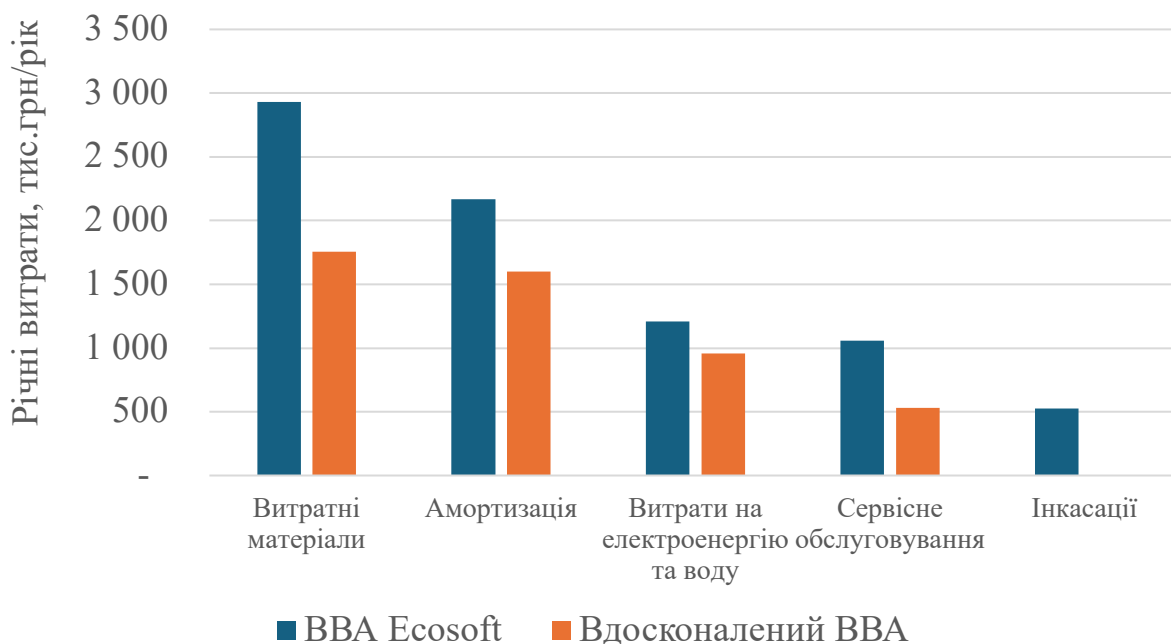


Рисунок 4.1 – Річні витрати на одержання 300 дм³ питної води на день у двох мережах з 50 водних вендингових автоматів Ecosoft та вдосконаленого

Отже, річні витрати на одержання 300 дм³ питної води на день в мережі з 50 ВВА Ecosoft становлять 7 900 тис. грн, а в мережі вдосконалених ВВА – 4 839 тис. грн. Зменшення собівартості становить 39 % або 3 061 тис. грн на рік.

4.2. Екологічна доцільність впровадження водних вендингових автоматів

Одним із ключових екологічних викликів сучасного водопостачання є високий рівень споживання бутильованої води, що супроводжується утворенням значних обсягів пластикових відходів. Навіть за умови організованого збору тари, фактичний рівень перероблення пластику залишається обмеженим, а частина упаковки потрапляє в довкілля у вигляді сміття, що спричиняє довготривале забруднення територій та водних об'єктів, а також створює ризики утворення мікропластику.

У цьому контексті ВВА, що забезпечують розлив підготовленої питної води споживачам у багаторазову тару, є екологічно обґрунтованою альтернативою бутильованій воді. Принципова перевага ВВА полягає у заміщенні одноразової упаковки багаторазовою: споживач використовує власну тару, а отже відсутня необхідність у виробництві, транспортуванні та подальшій утилізації значної кількості пластикових пляшок. Таким чином, користування ВВА безпосередньо запобігає потраплянню одноразових пластикових пляшок у навколишнє середовище та зменшує навантаження на систему поводження з відходами.

Екологічний ефект від впровадження ВВА можна кількісно оцінити через обсяг пластикової упаковки, що не утворюється за умови заміщення бутильованої води водою з ВВА. Для цього прийнято такі розрахункові передумови: середній об'єм розливу одним ВВА становить $300 \text{ дм}^3/\text{добу}$, що еквівалентно $109\,500 \text{ дм}^3/\text{рік}$. За умови, що відповідний обсяг води у разі відсутності ВВА був би забезпечений у споживчій тарі об'ємом 5 дм^3 , річна кількість таких пляшок становила б $21\,900 \text{ шт.}/(\text{рік} \cdot \text{ВВА})$. За маси однієї пластикової пляшки 5 дм^3 на рівні 90 г сумарна маса пластикових відходів, що потенційно утворюються, складає $1\,971 \text{ кг}/(\text{рік} \cdot \text{ВВА})$. Для мережі з 50 ВВА зазначений показник становить $98\,550 \text{ кг}/\text{рік}$, тобто майже $100\,000 \text{ кг}$ пластикових відходів на рік. Отримані значення демонструють суттєвий потенціал ВВА як інструменту скорочення утворення одноразової пластикової упаковки.

Водночас популяризація ВВА може розглядатися як інструмент реалізації Цілей сталого розвитку ООН, насамперед цілі №6 «Чиста вода та належні санітарні умови» (через забезпечення доступу до питної води стабільно високої якості) та цілі №12 «Відповідальне споживання» (через формування практик повторного використання тари та зменшення обсягів одноразового пакування)[105].

Крім того, поширення практик споживання води через ВВА сприяє виконанню вимог та загальної спрямованості Директиви ЄС 2019/904 щодо зменшення впливу

певних одноразових пластикових виробів на довкілля [106]. Хоча нормативні механізми Директиви включають різні інструменти (обмеження, маркування, розширену відповідальність виробника тощо), сама логіка документа підтримує перехід від одноразової упаковки до повторного використання та запобігання утворенню відходів. У цьому сенсі ВВА є прикладом практичного рішення, що зменшує потребу у споживанні одноразових пляшок і, відповідно, екологічні наслідки їх виробництва та неконтрольованого потрапляння у довкілля.

Висновки розділу 4

В четвертому розділі обґрунтована економічна доцільність впровадження сучасного підходу до підготовки питної води стабільно високої якості у мембранному водному вендинговому автоматі. Здійснено порівняння річних витрат на експлуатацію мереж існуючих автоматів та вдосконалених і продемонстрована економія в 39 %, що становить приблизно 3 мільйони гривень на рік в розрахунку на мережу із 50 ВВА. Такий економічний ефект є рушійною силою для промислового впровадження розроблених підходів до підготовки питної води.

Екологічна доцільність впровадження ВВА підтверджується як якісними аргументами (зниженням пакувального та логістичного навантаження, зменшенням ризиків засмічення територій пластиком), так і кількісною оцінкою, відповідно до якої мережа з 50 ВВА здатна зменшити утворення пластикових відходів майже на 100 000 кг на рік за прийнятих умов заміщення бутильованої води. Це дозволяє розглядати ВВА як ефективний екологічний компонент сучасних підходів до підготовки та розподілу питної води стабільно високої якості.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізована інформація щодо складу водопровідної води в Україні та запропонована класифікація за рівнем та типом мінералізації. Показано, що одержання питної води стабільно високої якості з водопровідної в 56 % регіонів потребує зниження сухого залишку та жорсткості на 55 ± 5 %, в 36 % регіонів – на 65 – 85 %, у 8 % регіонів - на 90 ± 5 %, а всіх інших компонентів - на 90-100%, що є можливим при застосуванні мембранних методів, заснованих на використанні поліамідних мембран.

2. Визначено фізико-хімічні характеристики широкого спектру поліамідних мембранних полотен та встановлено вплив їх властивостей на селективність за показниками гідрокарбонат та сульфат натрію, сухий залишок, жорсткість та забарвленість. Показано, що найбільш ефективними є поліамідні зворотноосмотичні мембрани з кутом змочування 55 ± 5 градусів, дзета потенціалом при рН 7 -22 ± 2 мВ, розміром пор $4,0 \pm 0,1$ Å та їх модифіковані версії з кутом змочування 45 ± 5 градусів, дзета потенціалом при рН 7 -25 ± 2 мВ, розміром пор $4,5 \pm 0,2$ Å. Селективність зворотноосмотичних полотен як за сухим залишком, так і за жорсткістю, складає 95 ± 3 %, а модифікованих - 56 ± 5 %, відповідно, а за органічними домішками та сульфатами - 96 ± 3 % для обох типів.

3. Показана можливість отримання питної води стабільно високої якості з водопровідної різного складу шляхом змішування пермеатів двох зворотноосмотичних елементів, виготовлених з обраних мембранних полотен. Запропоновано формулу розрахунку співвідношення потоків пермеату з різних мембранних елементів в залежності від складу вихідної води, а також створено програму автоматизованих розрахунків в MS Excel. Проведені пілотні випробування процесу на водопровідній воді різного складу, результати яких показали адекватність запропонованого підходу.

4. Розроблена технологічна схема процесу підготовки питної води стабільно високої якості з водопровідної води різного складу. Проведені дослідно-промислові випробування з використанням мембранного водного вендингового автомату показали високу ефективність та стабільність розробленої технології. Запропонована схема цифровізації водного вендингового автомату для управління мережею на основі актуальних даних. Показана можливість скорочення частоти обслуговування вдосконаленого автомату з 4 разів до 2 разів на рік.

5. Оцінена економічна доцільність сучасного підходу до підготовки питної води стабільно високої якості. Зменшення витрат на експлуатацію мережі із вдосконалених ВВА склало 39 % у порівнянні з експлуатацією існуючих ВВА. Оцінка екологічної доцільності впровадження ВВА показала можливість зменшення пластикових відходів на 100 000 кг на рік при роботі мережі із 50 ВВА.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міністерство охорони здоров'я України. (2010, 12 травня). Про затвердження Державних санітарних норм та правил "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10): Наказ МОЗ України від 12.05.2010 № 400 (станом на 22 берез. 2022 р.).
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення: 20.06.2025).
2. World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incorporating the 1st addendum). World Health Organization.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.
3. Mitchenko, T. Y. (2017). Evoliutsiia zvorotnoho osmosu. Water and Water Purification Technologies, 84, 4-12.
4. Mitchenko, T. Y., & Bolshak, A. (2020). Ekolohiia chystoi vody. Water and Water Purification Technologies, 95-96, 18-26.
5. Wellinger, M., Smrke, S., & Yeretizian, C. (2018). The SCA water quality handbook. Specialty Coffee Association (SCA). 82 p. ISBN 978-0-9995807-3-8.
<https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/12365>.
6. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2022 році. (n.d.).
https://mtu.gov.ua/files/%D0%9D%D0%B0%D1%86.%20%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D1%8C%20%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%20%D1%81%D1%82%D0%B0%20%D0%9F%D0%92%20_2022%20%D1%80.pdf.
7. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2023 році. (n.d.).
<https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/nacionalna-dopovid-pro-iakest-pitnoyi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostacannia-ta-vodovidvedennia-v-ukrayini-u-2023-r.pdf>.

8. Ecosoft. (n.d.). Якість води в Києві. <https://ecosoft.ua/ua/blog/water-quality-in-kyiv/>.
9. Мітченко, Т. Є., Косогіна, І. В. (2022). Сучасні методи кондиціювання та очищення води (навчальний посібник). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. С. 122. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/1d11732b-207f-4130-bd3a-3a7c7b353af0/content>.
10. Мітченко, Т. Є., Андрусишина, І. М., Василюк, С. Л., Малецький, З. В., Макарова, Н. В., Мудрик, Р. Я., Светлейша, О. М., Сусь, М. О. (2019). Серія видань "Світ сучасної водопідготовки": Актуальні проблеми води. К.: ВУВТ WaterNet. 82 с. ISBN 978-966-97940-1-7.
11. Дрікер, Ю. (2023). Карта якості води: зміни в умовах війни. Вода і водоочисні технології, 105-106(1-2), 48-57.
12. WaterNet. (n.d.). Карта якості води. <https://waternet.ua/water-map>.
13. Дрікер, Ю., Браславська, Є. (2021). Карта якості води: 10 років моніторингу. Вода і водоочисні технології: наук.-практ. журнал, (1-2), 64-67.
14. Аналіз води: Навіщо? Де? Коли? (2021). Вода і водоочисні технології: наук.-практ. журнал, (3-4), 62-64.
15. A million bottles a minute: world's plastic binge 'as dangerous as climate change'. (2017, June 28). The Guardian. <https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/28/a-million-a-minute-worlds-plastic-bottle-binge-as-dangerous-as-climate-change>.
16. Should we break our bottled water habit? (n.d.). Consumer Reports. <https://www.consumerreports.org/epa/should-we-break-our-bottled-water-habit-a5667672175/>
17. Yakist i tsina: yaku pytnu vodu my kupuiemo i chym vona vidrizniaietsia. Porivniannia. (2021, January 13). Ekonomichna Pravda. <https://www.epravda.com.ua/publications/2021/01/13/669917>.

18. Govarts, E., Gilles, L., Rodriguez Martin, L., Santonen, T., Apel, P., Alvito, P., Schoeters, G. (2023). Harmonized human biomonitoring in European children, teenagers and adults: EU-wide exposure data of 11 chemical substance groups from the HBM4EU aligned studies (2014-2021). *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 249, 114119. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2023.114119>.
19. Staples, C., van der Hoeven, N., Clark, K., Mihaich, E., Woelz, J., Hentges, S. (2018). Distributions of concentrations of bisphenol A in North American and European surface waters and sediments determined from 19 years of monitoring data. *Chemosphere*, 201, 448-458. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.175>.
20. Zare Jeddi, M., Rastkari, N., Ahmadvhaniha, R., Yunesian, M. (2015). Concentrations of phthalates in bottled water under common storage conditions: Do they pose a health risk to children? *Food Research International*, 69, 256-265. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.11.057>.
21. What's the problem with plastic bottles? (n.d.). One Green Planet. <https://www.onegreenplanet.org/animalsandnature/whats-the-problem-with-plastic-bottles>.
22. How the plastic bottle went from miracle container to hated garbage. (n.d.). National Geographic. <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/plastic-bottles>.
23. Reverse osmosis (RO) membrane market size global report, 2022-2030. (n.d.). Polaris Market Research. <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/reverse-osmosis-membrane-market>.
24. Filtry dla pitnoy vody. (n.d.). Ecosoft. <https://ecosoft.ua/ua/filtry-obratnogo-osmosa-prod>.
25. Vseredyni akvaboksu chystoi vody. (n.d.). BWT Aqua. <https://bwtaqua.com.ua/inside-bwt>.

26. Bring a bottle. Fill a bottle. (n.d.). Primo Water.
<https://www.water.com/services/primo-water-refill>.
27. Скільки українці платитимуть за воду. (n.d.).
<https://expert.in.ua/society/07032025-skilky-platytymemo-za-vodu-z-1-berezhnya-2025-roku-de-v-ukrayini-najvyshhi-taryfy>.
28. Ціна мінеральної води. (n.d.). Retrieved 22.07.2025 from:
<https://index.minfin.com.ua/ua/markets/wares/prods/drinks/water>.
29. Ціна фільтрів для води. (n.d.). Retrieved 22.07.2025 from: Ecosoft.
<https://ecosoft.ua/ua/filtry-obratnogo-osmosa-prod>.
30. Вартість води у аквабоксі BWTAQUA. (n.d.). BWT Aqua.
<https://bwtaqua.com.ua/card-topup>.
31. Voutchkov, N. (2017). Pretreatment for reverse osmosis. Elsevier. 308 p. ISBN 978-0-12-809953-7.
32. Мітченко, Т. Є. (Ред.). (2021). Серія видань "Світ сучасної водопідготовки": Технологічні рішення. К.: ВУБТ WATERNET. 80 с. ISBN 978-966-97940-3-1.
33. Braslavskaya, Y., Mitchenko, T., Ponomarev, V., Maletskyi, Z., Kosogina, I. (2022). Production technology and filtering properties of carbon block cartridges. Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News, 33(2), 32-42.
<https://doi.org/10.20535/2218-930022022255835>
34. Golovko, O., de Brito Anton, L., Cascone, C., Ahrens, L., Lavonen, E., & Kohler, S. J. (2020). Sorption characteristics and removal efficiency of organic micropollutants in drinking water using granular activated carbon (GAC) in pilot-scale and full-scale tests. Water, 12(7), 2053. <https://doi.org/10.3390/w12072053>
35. Hasan, N. I., Makki, H. F. (2021). Disinfection by-product removal by activated carbon-using batch mode. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 790(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/790/1/012035>

36. Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, 116420. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420>
37. Nazari, M. T., Schnorr, C., Riguetto, C. V. T., Alessandretti, I., Melara, F., da Silva, N. F., Crestani, L., Ferrari, V., Vieillard, J., Dotto, G. L., Silva, L. F. O., Piccin, J. S. (2022). A review of the main methods for composite adsorbents characterization. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23883-z>
38. Астрелін, І. М. (Ред.), Ратнавіра, Х. (Ред.). (2025). Фізико-хімічні методи очищення води. Управління водними ресурсами. К.: Проект «Водна гармонія». 637 с. ISBN 978-82-999978-0-5.
39. Bommi, G., Bommi, K. M. (2009, November 5). Method for manufacturing carbon blocks (U.S. Patent No. US20090274893A1).
40. KX Technologies LLC, USA. (2018). Matrikx-CTO data sheet (Issue 4). <https://filtrexttechnologies.com/wp-content/uploads/2018/08/Matrikx-CTO-Data-Sheet-Issue-4.pdf> (date of access: 30.07.2025).
41. Wu, C. C., Ghosh, S. (2017). The microbial colonization of activated carbon block point-of-use (PoU) filters with and without chlorinated phenol disinfection by-products. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3, 830-843. <https://doi.org/10.1039/C7EW00134G>
42. Lee, C.-S., Lee, H., Sinha, S., Farsad, A., Westerhoff, P., Rho, H. (2024). Mini-cores of activated carbon block simulate full-sized performance for removing organics and arsenate from drinking water. *Water Research*, 267, 122461. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122461>
43. Mulhern, R., Stallard, M., Zanib, H., Stewart, J., Sozzi, E., MacDonald Gibson, J. (2021). Are carbon water filters safe for private wells? Evaluating the occurrence of

- microbial indicator organisms in private well water treated by point-of-use activated carbon block filters. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 238, 113852. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113852>
44. Schoonenberg Kegel, F., Rietman, B., Verliefde, A. R. D. (2010). Reverse osmosis followed by activated carbon filtration for efficient removal of organic micropollutants from river bank filtrate. *Water Science & Technology*, 61(10), 2603-2610. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.166>
 45. Konradt, N., Kuhlen, J. G., Rohns, H. P., Schmitt, B., Fischer, U., Binder, T., et al. (2021). Removal of trace organic contaminants by parallel operation of reverse osmosis and granular activated carbon for drinking water treatment. *Membranes*, 11(1), 33. <https://doi.org/10.3390/membranes11010033>
 46. Orestov, Y. (2012). Reahenty dlia bezreahentnoi vodopidhotovky. *Water and Water Purification Technologies*, 63, 4-10.
 47. Мітченко, Т. Є. (Ред.). (2019). Серія видань "Світ сучасної водопідготовки": Словник термінів. К.: ВУБТ WATERNET. 68 с. ISBN 978-966-97940-0-0.
 48. Мітченко, Т. Є. (Ред.). (2019). Серія видань "Світ сучасної водопідготовки": Методи і матеріали. К.: ВУБТ WATERNET. 134 с. ISBN 978-966-97940-2-4.
 49. Avista membrane treatment solutions. (n.d.). Kurita America. <https://www.kuritaamerica.com/products/avista-membrane-technologies>.
 50. Nalco membrane chemistry. (n.d.). Ecolab. <https://www.ecolab.com/nalco-water/offerings/membrane-chemistry>.
 51. Ecosoft. (n.d.). Магістральні фільтри для захисту від накипу. <https://ecosoft.ua/ua/filtr-ot-nakipi-ecosoft-ecozon-dlya-boylerov-i-kotlov>.
 52. Tyvonenko, A. V. (2025). Ecologization of reverse osmosis processes [Doctoral dissertation, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»]. Здобуття ступеня доктора філософії, державна реєстрація № 0825U000645.

53. DuPont Water Solutions. (2024, October). FilmTec™ reverse osmosis membranes technical manual (Form No. 45 D01504 en, Rev. 17).
<https://www.dupont.com/content/dam/water/amer/us/en/water/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf>.
54. DuPont Water Solutions. (2024, October). FilmTec™ XLE PRO 4040 & XLE PRO 2540 element product data sheet (Form No. 45 D03972 en, Rev. 5).
<https://www.dupont.com/content/dam/water/amer/us/en/water/public/documents/en/RO-FilmTec-XLE-PRO-4040-and-XLE-PRO-2540-PDS-45-D03972-en.pdf>.
55. Toray Industries, Inc. (2024). TM700D series high-rejection brackish water reverse osmosis membrane: TM710D 4040 [Product data sheet].
https://www.water.toray/products/ro/pdf/TorayRO_TM700D.pdf.
56. Shabib, A., et al. (2025). Advancements in reverse osmosis desalination: Technology, environment, economy and bibliometric insights. *Desalination*, 598, 118413. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118413>.
57. Sutariya, B., Karan, S. (2022). A realistic approach for determining the pore size distribution of nanofiltration membranes. *Separation and Purification Technology*, 293, 121096. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121096>.
58. Wu, J., Cao, M., Tong, D., Finkelstein, Z., Hoek, E. M. V. (2021). A critical review of point of use drinking water treatment in the United States. *npj Clean Water*, 4(1), Article 28. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00128-z>.
59. Mudryk, R., Mitchenko, T. (2023). Shared automatic drinking water treatment and dispensing systems and methods of their optimization. *Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*, 35(1), 9-25.
<https://doi.org/10.20535/2218-930012023281111>.
60. Lamma, O. A., Outhman, A. (2015). Impact of reverse osmosis on purification of water. *Journal of Pharmaceutical Biology*. ISSN 2249-7579.

61. Tyvonenko, A., Mitchenko, T., Homaniuk, O., Vasilyuk, S., Kosogina, I., Mudryk, R. (2023). Production of physiologically complete drinking water using modified reverse osmosis membrane elements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/10(122), 6-13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277491>.
62. Mitchenko, T. Y., Orestov, Y., Vasilyuk, S. (2017). Ot demyneralyzatsyy k domyneralyzatsyy. *Water and Water Purification Technologies*, 83, 4-7.
63. Ratnasri, N., Sharmilan, T. (2021). Vending machine technologies: A review article. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 58, 160-166.
64. Nelson, N., De Luca, A. (2022). Remineralization and stabilization of desalinated water. In M. W. Shahzad, M. Dixon, & G. Barassi (Eds.), *Pathways and challenges for efficient desalination* (Chap. 5). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99458>.
65. Lesimple, A., Ahmed, F. E., Hilal, N. (2020). Remineralization of desalinated water: Methods and environmental impact. *Desalination*, 496, 114692. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114692>.
66. Al-Naama, A.-R. A., Simcock, A. (2016). Desalinization. In *United Nations report: Chapter 28*. United Nations. https://www.un.org/depts/los/global_reporting/WOA_RPROC/Chapter_28.pdf.
67. Сіль для ремінералізації. (n.d.). Ecosoft. <https://ecosoft.ua/ua/sol-dlya-rimeneralizatsii-1a>.
68. Sousi, A., Servais, P., LeChevallier, M. W. (2020). Measuring bacterial growth potential of ultra low nutrient drinking water produced by reverse osmosis filtration and remineralization. *Frontiers in Microbiology*, 11, 791. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00791> (date of access: 11.03.2025).

69. Philibert, M., Filingeri, A., Natalello, C., Moe, N., Filloux, E., Cipollina, A. (2022). Surface water RO permeate remineralization through minerals recovery from brines. *Desalination*, 531, 115725. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115725>.
70. Nativ, P., Leifman, O., Lahav, O., Epsztein, R. (2021). Desalinated brackish water with improved mineral composition using monovalent selective nanofiltration followed by reverse osmosis. *Desalination*, 520, 115364. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115364> (дата звернення: 20.05.2025).
71. Мітченко, Т. Є. (2017). Еволюція зворотного осмосу. Вода та водоочисні технології, № 2(84).
72. Atieh, M. A. (2022). Application of magnesium oxide media for remineralization and contaminant removal in drinking water treatment. *Water*, 14(4), 633. <https://doi.org/10.3390/w14040633>.
73. Lim, S., Kim, Y. C. (2023). Optimization of pilot scale remineralization by calcite dissolution using sulfuric acid for seawater desalination processes. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9(3), 620-629. <https://doi.org/10.1039/D2EW00768A>.
74. Фільтруючий матеріал Calcite. (n.d.). Ecosoft. <https://ecosoft.ua/ua/filtruyushchiy-material-calcite>.
75. Фільтруючий матеріал Corosex. (n.d.). Ecosoft. <https://ecosoft.ua/ua/filtruyushchiy-material-corosex>.
76. Hailemariam, R. H., et al. (2020). Reverse osmosis membrane fabrication and modification technologies and future trends: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 276, 102100. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102100>.
77. Haflich, H. M., Ramirez Membreno, M. A., Job, H., Huang, K., Toomey, M., Howarter, J. A., Shah, A. D. (2021). Effect of halides on polyamide-based membrane flux and monomer degradation during chloramination. *Journal of Membrane Science*, 639, 119717. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119717>.

78. Verbeke, R., et al. (2020). Controlled chlorination of polyamide reverse osmosis membranes at real scale for enhanced desalination performance. *Journal of Membrane Science*, 611, 118400. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118400>.
79. Ghernaout, D., El Wakil, A. (2017). Short communication: Requiring reverse osmosis membranes modifications - An overview. *American Journal of Chemical Engineering*, 5(4), 81-88. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20170504.15>.
80. Articles on the topic of modified reverse osmosis elements. (n.d.). ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/search?qs=reverse%20osmosis%20elements%3B%20modification%20membranes>.
81. Asadollahi, M., Bastani, D., & Musavi, S. A. (2017). Enhancement of surface properties and performance of reverse osmosis membranes after surface modification: A review. *Desalination*, 420, 330-383. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.05.027>.
82. Garcia-Pacheco, R., et al. (2017). End-of-life membranes: Challenges and opportunities. In *Comprehensive membrane science and engineering* (pp. 293-310). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.12254-1>.
83. Kim, H., et al. (2019). Nernst-Planck analysis of reverse-electrodialysis with the thin-composite pore-filling membranes and its upscaling potential. *Water Research*, 165, 114970. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114970>.
84. Yang, J.-Y., Li, Y.-S., Huang, B. (2013). Research on refurbishing of the used RO membrane through chemical cleaning and repairing with a new system. *Desalination*, 320, 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.04.008>.
85. Grievson, O., Holloway, T., Johnson, B. (2022). Strategic digital transformation for the water industry. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781789063400>
86. Porter, M. E., Heppelmann, J. E. (2014, November). How smart, connected products transforming competition. *Harvard Business Review*.

87. Mudryk, R., Orestov, Y. (2023). Digitalization of water vending machines. *Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*, 37(3), 28-39. <https://doi.org/10.20535/2218-930032023302842> (date of access: 08.05.2025).
88. Morley, M., Savic, D. (2020). Water resource systems analysis for water scarcity management: The Thames Water case study. *Water*, 12. <https://doi.org/10.3390/w12061761>.
89. Ohmura, K., Thurlimann, C. M., Kipf, M., Carbajal, J. P., Villez, K. (2019). Characterizing long-term wear and tear of ion-selective pH sensors. *Water Science & Technology*, 80, 541-550. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.301>.
90. Sarni, W., White, C., Webb, R., Cross, K., Glotzbach, R., et al. (2019). Digital water industry leaders chart the transformation journey (No. 1). London, UK.
91. Hryhorczuk, D., Levy, B. S., Prodanchuk, M., Kravchuk, O., Bubalo, N., Hryhorczuk, A., Erickson, T. B. (2024). The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>.
92. de Souza Groppo, G., Costa, M. A., Libanio, M. (2019). Predicting water demand: A review of the methods employed and future possibilities. *Water Supply*, 19, 2179-2198. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.122>.
93. Leigh, N. G., Lee, H. (2019). Sustainable and resilient urban water systems: The role of decentralization and planning. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su11030918>.
94. Li, Z., Wang, Y. (2018). Domain knowledge in predictive maintenance for water pipe failures. In J. Zhou & F. Chen (Eds.), *Human and machine learning: Visible, explainable, trustworthy and transparent* (pp. 437-457). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90403-0_21.
95. Demsar, J., Curk, T., Erjavec, A., Gorup, C., Hocevar, T., Milutinovic, M., Mozina, M., Polajnar, M., Toplak, M., Staric, A., Stajdohar, M., Umek, L., Zagar, L.,

- Zbontar, J., Zitnik, M., Zupan, B. (2013). Orange: Data mining toolbox in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 14(Aug), 2349-2353.
96. Sarbolouki, M. N. (1982). A general diagram for estimating pore size of ultrafiltration and reverse osmosis membranes. *Separation Science and Technology*, 17(2), 381-386. <https://doi.org/10.1080/01496398208068547>.
97. Аквабокс із виробництва води. (n.d.). Ecosoft. <https://ua.ecosoft.com/product-uk/ka250robcdm>.
98. UV lamps vs UVC LEDs: Which is best for your water disinfection needs? (n.d.). Klaran. <https://klaran.com/uv-lamps-vs-uvc-leds-which-is-best-for-your-water-disinfection-needs>.
99. State of the art LED ultra-violet disinfection systems. (n.d.). <https://www.leduv-c.co.uk>.
100. Змінні елементи для фільтрів. Retrieved 22.07.2025 from: <https://build.rozetka.com.ua/ua/230392363/p230392363>.
101. Payment options. (n.d.). <https://www.practicalbusinessskills.com/managing-a-business/financial-management/payment-options>.
102. Безготівкові розрахунки. (n.d.). Національний банк України. <https://bank.gov.ua/ua/payments/nocash>.
103. Тариф для юридичних осіб за водопостачання та водовідведення. Retrieved 22.07.2025 from: <https://www.vodokanal.kiev.ua/tarifi>.
104. Тариф для юридичних осіб за електропостачання. Retrieved 22.07.2025 from: <https://коес.com.ua/page?root=23>.
105. Як ООН підтримує цілі сталого розвитку в Україні. (n.d.). <https://ukraine.un.org/uk/sdgs>.
106. Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment. (2019, June 5). EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj/eng>.

Додаток 1

Акт впровадження у промислове використання

ecosoft THE WATER
PROFESSIONALSТОВ «НВО «ЕКОСОФТ»
вул. Покровська, 11, м. Ірпінь,
Київська обл., 08203, УкраїнаТелефон +38 044 490 34 54
E-mail company@ecosoft.com
Сайт ecosoft.com

Вих. № 1-12/125

від 15.12.2025

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт складений в тому, що одержані при виконанні дисертації здобувача вищої освіти рівня «PhD» Мудрика Ростислава Ярославовича на тему «Сучасні підходи до підготовки питної води стабільно високої якості» результати та розроблені в рамках робіт технологічні рішення були застосовані ТОВ «НВО «Екософт» для здійснення вхідного контролю якості мембранних полотен, що використовуються для виробництва зворотноосмотичних елементів з різною селективністю, та вдосконалення існуючих фільтрів та систем підготовки питної води.

Технічний директор

ТОВ «НВО «Екософт»



Додаток 2

Програма розрахунку співвідношення потоків пермеату з мембранних елементів різної селективності

Вхідні дані

Сухий залишок, мг/дм ³	330
Жорсткість, ммоль/дм ³	4,8
Частка сульфатів, %	15%

Результати

Мін. частка пермеату після ME2	71%
Макс. частка пермеату після ME2	100%

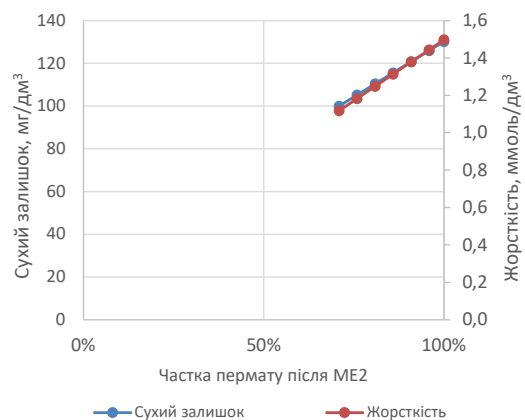
Якість очищеної води при різних частках пермеату ME2

Частка пермеату після ME2	Сухий залишок, мг/дм ³	Жорсткість, ммоль/дм ³
71%	100	1,1
76%	105	1,2
81%	110	1,2
86%	116	1,3
91%	121	1,4
96%	126	1,4
100%	130	1,5

Якість очищеної води при обраній частці пермеату ME2

Частка пермеату після ME2	Сухий залишок, мг/дм ³	Жорсткість, ммоль/дм ³
75%	104	1,2

Якість очищеної води при різних частках пермеату ME2



**Програма розрахунку співвідношення потоків пермеату
з мембранних елементів різної селективності
(формули розрахунків)**

Вхідні дані	
Сухий залишок, мг/дм ³	330
Жорсткість, ммоль/дм ³	4,8
Частка сульфатів, %	0,15
Результати	
$= (100 - E6 * (1 - 0,92)) / (E6 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55))$	$= (200 - E6 * (1 - 0,92)) / (E6 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55))$
$= (0,5 - E7 * (1 - 0,96)) / (E7 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64))$	$= (2 - E7 * (1 - 0,96)) / (E7 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64))$
$= IF(D12 < 0; 0; IF(D12 > 1; 1; D12))$	$= IF(D12 < 0; 0; IF(D12 > 1; 1; D12))$
$= IF(D13 < 0; 0; IF(D13 > 1; 1; D13))$	$= IF(D13 < 0; 0; IF(D13 > 1; 1; D13))$
Мін. частка пермеату після ME2	$= MAX(C14; C15)$
Макс. частка пермеату після ME2	$= MIN(D14; D15)$

Якість очищеної води при різних частках пермеату ME2

Частка пермеату після ME2	Сухий залишок, мг/дм ³	Жорсткість, ммоль/дм ³
$= VSTACK(SEQUENCE((MAX(E17; E18) - MIN(E17; E18)) / 5\% + 1; 1; MIN(E17; E18); E18))$	$= IF(C22 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C22 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C22 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C22 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C23 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C23 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C23 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C23 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C24 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C24 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C24 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C24 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C25 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C25 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C25 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C25 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C26 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C26 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C26 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C26 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C27 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C27 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C27 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C27 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C28 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C28 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C28 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C28 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C29 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C29 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C29 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C29 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C30 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C30 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C30 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C30 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C31 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C31 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C31 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C31 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C32 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C32 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C32 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C32 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C33 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C33 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C33 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C33 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C34 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C34 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C34 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C34 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C35 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C35 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C35 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C35 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C36 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C36 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C36 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C36 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C37 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C37 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C37 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C37 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C38 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C38 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C38 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C38 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C39 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C39 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C39 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C39 + SE57 * (1 - 0,96); "")$
	$= IF(C40 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C40 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C40 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C40 + SE57 * (1 - 0,96); "")$

Якість очищеної води при обаній частці перміату ME2

Частка пермеату після ME2	Сухий залишок, мг/дм ³	Жорсткість, ммоль/дм ³
0,75	$= IF(C44 > 0; SE56 * (1 - SE58) * (0,92 - 0,55) * C44 + SE56 * (1 - 0,92); "")$	$= IF(C44 > 0; SE57 * (1 - SE58) * (0,96 - 0,64) * C44 + SE57 * (1 - 0,96); "")$

**Якість очищеної води при різних
частках пермеату ME2**

