

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

РАДОВЕНЧИК ЯРОСЛАВ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

УДК 628.316.12

**НАУКОВІ ЗАСАДИ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ ВІДХОДАМИ
СИСТЕМ ВОДООБРОБКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИМИ РОЗЧИНАМИ**

Спеціальність 21.06.01 – Екологічна безпека

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі екології та технології рослинних полімерів.

Науковий

консультант:

доктор технічних наук, професор

Гомеля Микола Дмитрович

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри екології та технології рослинних полімерів

Опоненти:

доктор технічних наук, професор

Трохименко Ганна Григорівна

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій

доктор технічних наук, професор

Мартинов Сергій Юрійович

Національний університет водного господарства та природокористування, завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та бурової справи

доктор технічних наук, професор

Кочетов Геннадій Михайлович

Київський національний університет будівництва і архітектури, професор кафедри хімії

Захист відбудеться «23» вересня 2025 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Берестейський, 37, корп. 1, ауд. 05.

Захист транслюватиметься на YouTube-каналі Вченої ради КПІ ім. Ігоря Сікорського: <https://www.youtube.com/@vchenaradakpi/streams>

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Берестейський, 37, та на сайті Вченої ради Університету за адресою: <https://rada.kpi.ua>.

Про дату та місце захисту громадськість проінформовано

«29» липня 2025 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої
ради Д 26.002.05
доктор технічних наук, професор

Олена ІВАНЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан гідросфери викликає все більше занепокоєння людства. Масштабні зміни клімату, що супроводжуються катастрофічним перерозподілом атмосферних опадів, тривалі регіональні посухи, дефіцит доступних запасів води, катастрофічне зниження якості наявних природних вод – ось лише короткий перелік результатів негативних змін в довкіллі, спричинених антропогенною діяльністю людини. Хижацьке споживання природних ресурсів із супутнім забрудненням довкілля ставить перед людством нові масштабні завдання. Найбільш прийнятною стратегією боротьби з відходами в розвинутих країнах світу є попередження утворення цих відходів. В такому випадку проблем з їх утилізацією чи знешкодження взагалі не виникає.

Переважає більшість сучасних технологій обробки води супроводжується утворенням значної кількості твердих та рідких відходів. І якщо тверді відходи, незважаючи на їх шкідливість для довкілля та значні втрати природних ресурсів, поповнюють потік твердих побутових відходів, то рідкі скидаються в гідросферу, формуючи відповідні антропогенні кругообіги різних сполук. Так, при пом'якшенні води іонообмінним методом в поверхневій водоймі скидається значна кількість відпрацьованих регенераційних розчинів у вигляді 8-10 % концентратів хлориду натрію з домішками іонів жорсткості. На наступному етапі забору такої природної води для подачі споживачам вже необхідно передбачати не лише її пом'якшення, а й її демінералізацію. І якщо в промислових масштабах проблема вирішується за рахунок створення об'ємних шламосховищ, то системи пом'якшення малої та середньої продуктивності просто скидають відпрацьовані регенераційні розчини в каналізаційні мережі чи поверхневій водоймі безпосередньо. Шкоду для довкілля та майбутні затрати на підготовку такої води до споживання навіть важко уявити. Тому очевидно, що давно назріла необхідність заміни іонообмінної технології пом'якшення води більш дешевою та екологічно безпечною, або розроблення технології регенерації відпрацьованих регенераційних розчинів з можливістю багаторазового повторного використання концентрованого розчину хлориду натрію.

Не меншої шкоди довкіллю завдають і системи зворотного осмосу, котрі все частіше споживачі вимушені використовувати для отримання якісної питної води. Можна констатувати зародження нової екологічної проблеми – забруднення довкілля мікропластиком. В той же час зовсім не звертаємо увагу на величезні об'єми пластику, часто – мікропористого, котрий викидається в довкілля при вичерпанні ресурсу картриджів систем зворотного осмосу. На сьогодні ця проблема не отримала навіть належної оцінки, не кажучи вже хоча б про часткове її вирішення.

Технології обробки води та утилізації концентратів потребують значних затрат енергоресурсів. Відсутність джерел енергії не дозволяє вирішувати необхідний комплекс питань для створення автономних безпечних технологій. Розробка оригінальних випарювачів із незначними витратами енергії або взагалі без електроживлення дозволяє започаткувати цілий ряд апаратів для обробки

води, упарювання та кристалізації концентратів. Розробка наукових засад використання в таких апаратах матеріалів з капілярними властивостями сприятиме створенню подібного обладнання в інших галузях.

Важливим аспектом нових технологій є вимога щодо відсутності вторинного забруднення води, утворення та скиду нових відходів, які не піддаються повній переробці та знешкодженню.

Шахтні води виділяються із загального потоку промислових технологічних розчинів величезними об'ємами та широкою гамою різноманітних забруднень. Це перешкоджає їх ефективному очищенню, тому, в більшості випадків води з різних горизонтів змішуються між собою та піднімаються на поверхню. Оскільки добування корисних копалин сьогодні перемістилося на глибини біля 1 км, то підземні води на цих горизонтах відрізняються підвищеною мінералізацією. Їх скид в гідросферу призводить до підвищення мінералізації поверхневих вод та забруднення їх токсичними речовинами. Ефективне очищення сотень мільйонів метрів кубічних води щороку вимагає значних фінансових затрат, тому на більшості шахт обмежується коагуляцією, флокуляцією та відстоюванням. Інші домішки викидаються в гідросферу без будь-якого знешкодження. На території України проблема настільки загострилася, що в грудні 2021 р. Кабінетом Міністрів України було затверджено «План заходів з управління шахтними водами Кривбасу», реалізація котрих сьогодні практично зупинена. Тому нетрадиційні, ефективні та дешеві підходи щодо вирішення проблеми шахтних вод сьогодні особливо актуальні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до наступних напрямів: Загальнодержавна програма «Питна вода України на 2022–2026 роки», у рамках «Загальнодержавної цільової програми розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпра на період до 2021 року». Дослідження безпосередньо пов'язано з тематикою науково-дослідних робіт кафедри екології та технології рослинних полімерів КПІ ім. Ігоря Сікорського: держбюджетними темами «Захист поверхневих вод від забруднення біогенними елементами та іонами важких металів» (номер держреєстрації 0116U003766); «Застосування електролізу при створенні безвідходних процесів очищення води» (номер держреєстрації 0118U002086); «Наукові основи розширення фонду джерел водозабезпечення населення, усунення загроз національній безпеці України в екологічній сфері» (номер держреєстрації 0122U001686), де автор був виконавцем та відповідальним виконавцем.

Мета і завдання дослідження. *Метою дослідження* є розробка стратегії безпечного поводження із відходами процесів водообробки та технологічними розчинами для вирішення проблем захисту природних екосистем від забруднення шляхом створення маловідходних технологій водопідготовки та очищення води для забезпечення раціонального використання природних ресурсів.

Для досягнення поставленої мети та успішної розробки наукових засад захисту гідросфери від забруднення відходами систем водоочищення та технологічними розчинами були поставлені наступні завдання:

- дослідження ефективності використання матеріалів з капілярними властивостями в процесах упарювання води та кристалізації твердої фази з регенераційних розчинів і концентратів систем зворотного осмосу, розробка нових апаратів для ефективного відділення утвореної твердої фази;
- визначення особливостей кристалізації карбонату кальцію і гідроксиду магнію та встановлення можливості використання содово-натрієвої технології для пом'якшення води в системах малої та середньої продуктивності;
- підбір ефективних реагентів для процесів пом'якшення води в умовах систем малої та середньої продуктивності, дослідження їх ефективності та негативного впливу на довкілля, визначення основних умов використання в технологічному процесі;
- дослідження ефективності термічних методів знешкодження використаних регенераційних розчинів установок іонообмінного пом'якшення води, визначення можливості повторного використання утвореної твердої фази для приготування нових регенераційних розчинів;
- вивчення існуючих технологій відновлення регенераційних розчинів іонообмінного пом'якшення води, вибір найбільш прийнятних для систем малої та середньої продуктивності, розробка технологічної схеми обробки регенераційних розчинів;
- вивчення традиційних методів виявлення іонів жорсткості в природних водах, їх оцінка з точки зору використання в системах малої та середньої продуктивності, розробка методу оперативного управління процесами пом'якшення та регенерації іоніту;
- аналіз рідких та твердих відходів, що утворюються в процесах доочищення води зворотним осмосом, оцінка їх негативного впливу на довкілля та визначення можливості регенерації чи повторного використання різних елементів системи;
- розробка заходів щодо зниження негативного впливу на довкілля відходів систем зворотного осмосу малої та середньої продуктивності;
- аналіз стану поводження із шахтними водами на території України, будови підземних горизонтів в різних регіонах країни, особливостей хімічного складу підземних вод на різних горизонтах;
- обґрунтування нової концепції знешкодження шахтних вод з можливістю обробки та наступного використання маломінералізованих вод з неглибоких горизонтів, оцінка економічної ефективності нової концепції.

Об'єкт дослідження – процеси обробки природних і стічних вод для систем водоспоживання і водокористування та процеси утилізації і знешкодження відходів такої обробки.

Предмет дослідження – характеристики та технологічні параметри процесів обробки води та переробки відходів при організації екологічно безпечних та ресурсозбеґіючих систем водоспоживання.

Методи дослідження. При виконанні досліджень з вивчення процесів обробки води для контролю її характеристик використовували хроматографічний, спектрофотометричний, хімічний та фізико-хімічний методи аналізу. Були досліджені механічні, реагентні, баромембранні, іонообмінні та електрохімічні

методи очищення води та переробки відходів. Достовірність отриманих результатів оцінювалася методами математичної обробки.

Наукова новизна одержаних результатів. При проведенні комплексних досліджень з вирішення проблеми захисту гідросфери від забруднення відходами систем водоочищення та технологічними розчинами було:

- вперше розроблено наукові засади застосування матеріалів з капілярними властивостями в процесах упарювання забруднених вод та кристалізації компонентів регенераційних розчинів іонообмінного пом'якшення води і концентратів систем зворотного осмосу;
- вперше розроблено реагентну та електрохімічну технології відновлення поліпропіленових фільтрів механічного очищення води в системах зворотного осмосу, котрі забезпечують відновлення робочих характеристик фільтрів та можливість їх багаторазового повторного використання, підібрано оптимальні режими роботи електролізера; створені технології не передбачають скиду в гідросферу концентрованих розчинів, а дозволяють перетворювати розчинені забруднювачі в тверду фазу у вигляді суміші гіпсу та гідроксиду заліза (III) або лише гідроксиду заліза (III), котрі придатні для використання в промисловості будівельних матеріалів;
- вперше розроблено реагентну та електрохімічну методики оперативного виявлення проскоку іонів жорсткості при іонообмінному пом'якшенні води шляхом фіксації зміни електропровідності розчинів з можливістю автоматизації запуску процесу регенерації;
- вперше запропоновано та екологічно і економічно обґрунтовано концепцію знешкодження шахтних вод шляхом захоронення в глибших, ніж розроблені, горизонтах з можливістю очистки низькомінералізованих вод і підйомом їх на поверхню для задоволення потреб різних споживачів та суттєвого зменшення об'ємів шахтних вод; розроблена концепція передбачає можливість безпечної утилізації концентратів зворотньоосмотичного очищення води;
- отримали подальший розвиток методи реагентного пом'якшення води шляхом використання комплексного реагенту з можливістю ефективної реалізації в системах малої та середньої продуктивності без скиду в довкілля відпрацьованих регенераційних розчинів; відходи вдосконалених методів можуть бути використані в якості мінеральних добрив;
- отримали подальший розвиток методи відновлення та багаторазового повторного використанням регенераційних розчинів іонообмінного пом'якшення води з застосуванням матеріалів з капілярними властивостями; запропоновані рішення передбачають перетворення домішок у безпечну тверду фазу та відсутність скиду в довкілля шкідливих концентратів;
- розроблені системи дозування реагентів при домінералізації води після систем зворотного осмосу без використання малорозчинних сполук та з контролем електропровідності води, що дозволяє просто та оперативно змінювати склад реагентів, які дозуються, в залежності від вимог споживачів та чинних нормативних документів.

Практичне значення одержаних результатів. В результаті проведення комплексу досліджень створено наукові засади використання матеріалів з капілярними властивостями в процесах переробки відходів процесів водообробки, розроблено кілька конструкцій кристалізаторів та випарювачів. Розроблено нову концепцію знешкодження шахтних вод в підземних горизонтах без підйому на поверхню. На конструкції апаратів отримано патент України на винахід № 127579, патенти України на корисну модель № 128819, № 146650, № 147576, № 148202, № 148678, № 150381, № 150615, № 154419, № 154517, № 154768, № 154769, № 156441. Розроблено технологію реагентного пом'якшення води для промисловості та систем малої та середньої продуктивності (патент України на корисну модель № 154768, випробуваний в компанії ТОВ «ІВІК Формула води» та ПрАТ «Компанія Ензим»). Розроблено та запропоновано до впровадження технологію відновлення регенераційних розчинів з багаторазовим їх використанням і без скиду в доквілля концентратів хлоридів натрію (патент України на корисну модель № 154517, випробуваний в ТОВ «АКВА ФОРСАЙТ»). На свердловині питної води в м. Монастирище компанії ТОВ «Бізнес Сенат» впроваджено систему домінералізації води після зворотного осмосу.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота виконана на кафедрі екології та технології рослинних полімерів інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського і є результатом як самостійних досліджень, так і досліджень за участю наукового консультанта, магістрів та аспірантів, в яких здобувач був науковим керівником. Розділ 5 виконано спільно із аспіранткою Гордієнко К. Ю., керівником котрої являється автор, а розділ 6.1.1 – спільно з аспіранткою Карпенко М. В. з подальшим представленням результатів у спільних публікаціях. Автором дисертації визначено мету і задачі майбутніх досліджень, здійснено пошук та оцінку їх рішень, проведено теоретичне обґрунтування нових напрямків досліджень та виконано необхідні експерименти при розробці перспективних технологій обробки води та утилізації відходів. Основні результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень відображено у відповідних наукових працях, які опубліковано в журналах, що входять до переліку фахових видань України та до міжнародних наукометричних баз даних, захищено патентами України на корисні моделі та винахід.

Апробація результатів досліджень. Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень за напрямком дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наукових конференціях та семінарах різних рівнів, а саме: ХХ Міжнародна науково-практична конференція «Екологія. Людина. Суспільство» (23 травня 2019 р., м. Київ); Всеукраїнська наукова конференція «Євроінтеграція екологічної політики України» (29-31 травня 2019 р., м. Одеса); ХVІІІ Міжнародна науково-практична конференція «Літні наукові підсумки 2019 року» (5 червня 2019 р., м. Дніпро); ХІХ Міжнародна конференція «Експериментальні та теоретичні дослідження сучасної науки» (23 червня 2019 р., м. Дніпро); ХV Всеукраїнські наукові Таліївські читання (30 жовтня 2019 р., м. Харків); ІІІ Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи

майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки» (14 листопада 2019 р., м. Київ); The 5th International scientific and practical conference «Science, society, education: topical issues and development prospects» (12-14 квітня 2020 р., м. Харків); X Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (29-30 квітня 2020 р., м. Чернігів); XXI Міжнародна науково-практична конференція «Екологія. Людина. Суспільство» (21 травня 2020 р., м. Київ); The 2nd International Scientific and Practical Conference «Modern Scientific Trends and Standards» (February 16-18, 2022, Santa Rosa, Argentina); The 13th International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science” (August 17-19, 2022, Vancouver, Canada); The 12th International scientific and practical conference «Modern science: innovations and prospects» (October 12-13, 2022, Stockholm, Sweden); The 2nd International scientific and practical conference “Scientific research in the modern world” (December 7-9, 2022, Toronto, Canada); XXIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання” (5-7 грудня 2023 р., м. Київ); XXIV Міжнародна науково-практична конференція «Екологія. Людина. Суспільство» (5 червня 2024 р., м. Київ); XLI International scientific and practical conference «Progressive Opportunities and Solutions of Modern Scientific Potential» (October 2-4, 2024, Toronto, Canada); International scientific-practical conference “Science, education, technology and society: problems and prospects”: conference proceedings (October 4, 2024, Tampere, Finland).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано **72** наукові праці, у тому числі **3** монографії та **1** розділ монографії, **33** статі у наукових фахових виданнях, **14** з яких індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus, **1** патент України на винахід та **12** патентів України на корисну модель, **1** патент України на промисловий зразок, **18** тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, **3** підручника.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Матеріали дисертації викладено на 444 сторінках друкованого тексту, зокрема основний текст – на 372 сторінках, серед яких площа 7 сторінок повністю зайнята таблицями та рисунками. Фактичний матеріал систематизовано у 25 таблицях та ілюстровано 199 рисунками. Список використаних джерел містить 463 найменування. Дисертаційна робота включає 5 додатків, розміщених на 44 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі**, обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету, для досягнення якої було окреслено завдання дослідження, описано наукову новизну отриманих результатів та їхнє практичне значення. Представлено інформацію щодо зв'язку роботи з науковими темами та грантами, а також інформацію щодо апробації одержаних результатів. Описано особистий внесок здобувача на різних етапах виконання досліджень, процеси оброблення та оформлення одержаних результатів, відомості про їх апробацію.

У **першому розділі** розглянуто сучасний стан та перспективи розвитку вітчизняної галузі водозабезпечення промислових підприємств та населення. Показано, що великої шкоди поверхневим водоймам та підземним горизонтами завдають відходи технологій очищення та доочищення води. Підвищення мінералізації вод поверхневих водойм в результаті скиду в них концентрованих розчинів різноманітного складу та висока природна мінералізація підземних вод в окремих регіонах України вимагає проводити їх пом'якшення перед споживанням. Найбільшого поширення сьогодні в цій галузі набули іонообмінні методи, особливо для систем малої та середньої продуктивності – побутових та офісних. Експлуатація таких систем супроводжується скидом в гідросферу концентратів хлориду натрію з домішками іонів кальцію та магнію, що формує замкнуте коло обігу мінеральних речовин в гідросфері. Розроблена достатньо велика кількість технологічних процесів для використання в умовах промислового виробництва не дозволяє забезпечити необхідну ефективність процесів пом'якшення та низьку їх вартість. Тому розробка процесів утилізації традиційних регенераційних розчинів іонообмінних систем при пом'якшенні води складає сьогодні досить актуальну та вартісну проблему, особливо в умовах застосування термічних методів. Спорудження масштабних централізованих систем водопостачання та їх тривала експлуатація призводять до вторинного забруднення питних вод та вимагають їх доочищення в точках водовідбору. Найчастіше в системах доочищення застосовують іонний обмін, сорбцію, мембранні технології, котрі також продукують значну кількість відходів. До сьогодні експлуатація таких систем не супроводжується утилізацією чи знешкодженням твердих та рідких відходів, що утворюються в результаті доочищення води, що наносить довікільню непоправної шкоди та характеризується нераціональним використанням природних ресурсів. Зважаючи на швидкий ріст масштабів застосування систем очищення води малої та середньої продуктивності, актуальною є вирішення проблеми знешкодження та утилізації відходів таких технологій. Процес добування корисних копалин шахтним методом практично завжди супроводжується утворенням величезних об'ємів стічних вод із вмістом шкідливих речовин, вище допустимих концентрацій. І хоча на сьогодні розроблено достатньо технологій очищення шахтних вод, широкого впровадження їх не спостерігається із-за значних об'ємів та широкої гами забруднень з різноманітними фізико-хімічними властивостями. Тому скид таких вод в гідросферу супроводжується забрудненням природних водойм та підвищення їх

мінералізації. На основі проведеного аналізу літературних джерел розроблено програму наукових досліджень в об'ємі даної роботи (рис. 1).

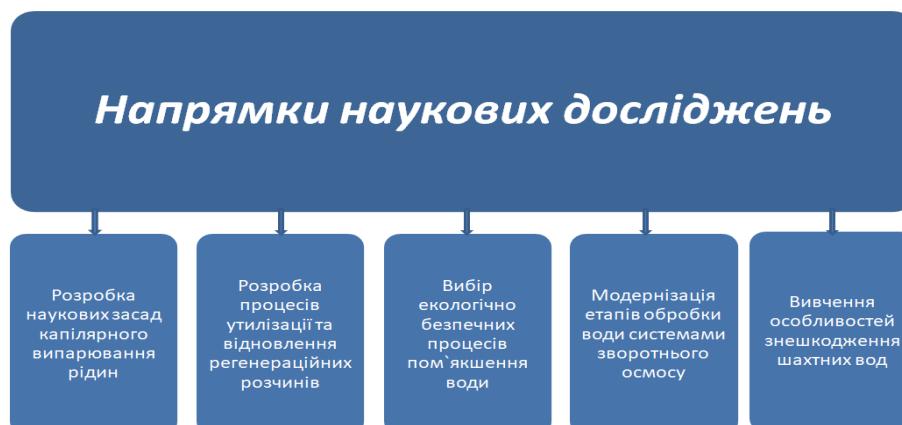


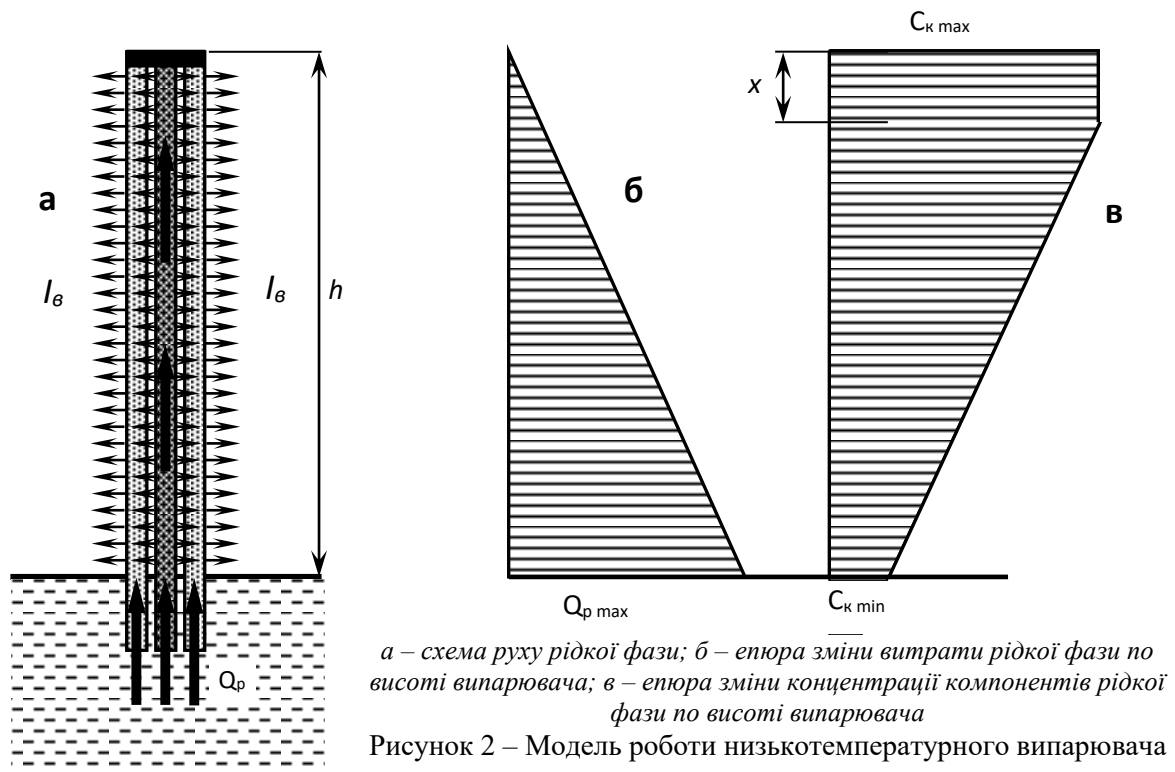
Рисунок 1 – Основні напрямки наукових досліджень

Другий розділ містить відомості про об'єкти дослідження, матеріали та реагенти, що використовувалися в процесі експериментів, методики проведення досліджень та методи математичної обробки експериментальних результатів. У розділі приведені посилання на відомі методи аналізу розчинів та твердих відходів, зазначені стандартні засоби вимірювання, які використовувалися в роботі та приведені схеми нового лабораторного обладнання, розробленого для серій експериментів в об'ємі даної роботи. Експериментальні дослідження основних закономірностей випарювання водних розчинів з використанням матеріалів з капілярними властивостями проводили на смужках тканин з бавовни та льону, змінюючи кількість шарів в смужках та умови їх застосування. В роботі використовували як природні води, так і модельні розчини, що імітували регенераційні розчини хлориду натрію концентрацією 10 % та 24 %. Аналогічні за складом розчини використовували і в експериментах по термічному та реагентному відновленню їх регенераційної здатності. В інших дослідженнях використовували модельні розчини, що імітували природні поверхневі та підземні води та води централізованих систем водопостачання. Методи статистичної та математичної обробки експериментальних даних застосовували для підтвердження достовірності отриманих результатів.

Третій розділ роботи присвячено використанню волокнистих матеріалів з капілярними властивостями в процесах випарювання рідин. Багато технологічних процесів в системах водоочищення та промисловості супроводжуються утворенням концентратів, котрі досить дорого зберігати через їх токсичність чи корозійну агресивність, але ще дорожче переводити в зручний для захоронення та зберігання твердий стан. Тому проблеми знешкодження таких розчинів є сьогодні досить гострими і потребують термінового вирішення. Одним з перспективних напрямків можна вважати використання в процесах випарювання матеріалів з капілярними властивостями. Наявність останніх дозволяє створювати на основі таких

матеріалів ефективні, автономні, дешеві та надзвичайно прості системи упарювання.

Сьогодні переміщення рідин в капілярних структурах вивчені досить детально, однак такі системи розглядаються, переважно, як ізольовані від навколишнього середовища. При використанні матеріалів з капілярними властивостями в системах упарювання одночасно проходить два процеси – переміщення рідкої фази по порах та випаровування якоїсь її частини в процесі руху. Особливості останнього процесу сьогодні практично не досліджені і потребують більш ґрунтовної оцінки. Якщо розглянути полотнище із кількох шарів тканини (рис. 2), занурене нижнім кінцем у відповідний розчин то очевидно, що по існуючих порах рідка фаза буде підніматися на певну висоту h . Оскільки ця висота є фіксованою для кожного типу капілярних матеріалів, концентрації розчинів, умов в навколишньому середовищі то можна вважати, що після досягнення цієї висоти витрата рідкої фази відповідає витраті на випаровування з поверхні полотнища. Очевидно, що на максимальній висоті h переміщення рідкої фази взагалі не відбувається, тому графік зміни витрати по висоті матиме вигляд трикутника з максимумом в основі. Відповідно, при випаровуванні рідкої фази при переміщенні вверх по капілярах концентрація домішок зростатиме і на максимальній висоті досягатиме концентрації насичення з наступною кристалізацією та переходом розчинених речовин в твердий стан.



Проведені дослідження показали, що при використанні в якості матеріалів з капілярними властивостями тканини із бавовни, встановлення таких випарювачів дозволяє підвищити інтенсивність випаровування в

1,5-100 разів (табл. 1). Особливо це ефективно для звичайних температур навколишнього середовища.

Таблиця 1 – Інтенсивність випаровування з поверхні тканини при різних температурах розчину

Інтенсивність випаровування при різних температурах розчину (°C), см ³ /м ² ·год				
	20	46	57	75
Полотнище із 15 смужок	192	545	690	1750
Контроль	2	91	250	1050

Важливим фактором виявилася товщина полотнища тканини. Як видно з рис. 3, із збільшенням кількості шарів тканини в полотнищі інтенсивність випаровування також зростає.

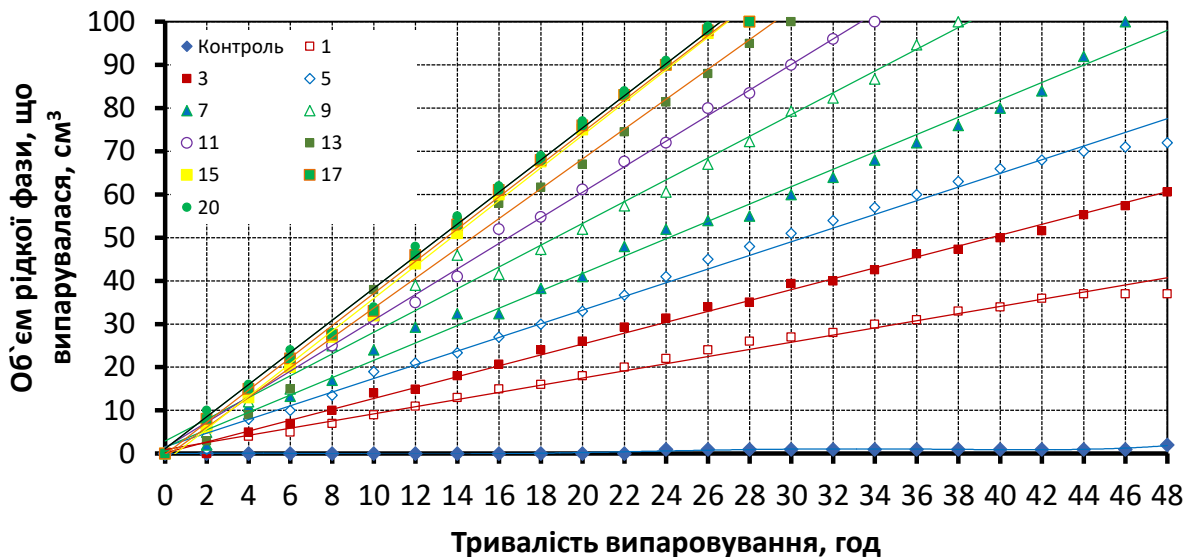


Рисунок 3 – Зміна об'єму випарованої рідини з поверхні смужки із бавовни при різних кількостях шарів тканини (T = 20 °C)

Відповідні результати можна пояснити тим, що при незначній товщині полотнища об'єм рідкої фази недостатній для підйому на максимальну висоту і випаровується вже при початкових значеннях h . А це призводить до зменшення площі випаровування і, відповідно, загальної інтенсивності. Так, якщо при одному шарі тканини з поверхні полотнища протягом доби випаровується 20 см³/дм² розчину, то при 20 шарах цей показник становить 90 см³/дм².

На висоту підняття розчину по порах тканини суттєво впливає і температура навколишнього середовища. Як видно з рис. 4, для бавовни при збільшенні температури з 16 до 30 °C висота підняття рідкої фази знижується майже в 2 рази, а для льону – в 1,5 рази. З метою підвищення продуктивності обладнання та більш економного використання поверхні дзеркала водойми чи робочої ємкості можливо встановлення одночасно кілька полотнищ. При цьому

важливим фактором є відстань між окремими полотнищами. Як показали проведені дослідження (рис. 5), збільшення відстані між смужками від 1 до 20 мм зумовлює зростання інтенсивності випарювання. Проте, ближче до межі 20 мм зростання інтенсивності випарювання помітно знижується, порівняно зі зростанням на початкових значеннях відстаней. Криві при відстанях від 10 мм до 25 мм накладаються одна на одну, тому на рисунку не відображені. Тобто, за відсутності вітру, між вертикально розташованими смужками оптимальними є відстані в межах 7-15 мм, які дозволяють забезпечити максимальну інтенсивність випарювання.

Важливо звернути увагу на динаміку самого процесу змочування. Чим більше шарів тканини нараховує полотнище, тим довше відбувається стабілізація процесу випарювання (рис. 6). На основі проведених досліджень було запропоновано схему каскадного інтенсифікатора випарювання токсичних розчинів із шламосховищ (рис. 7).

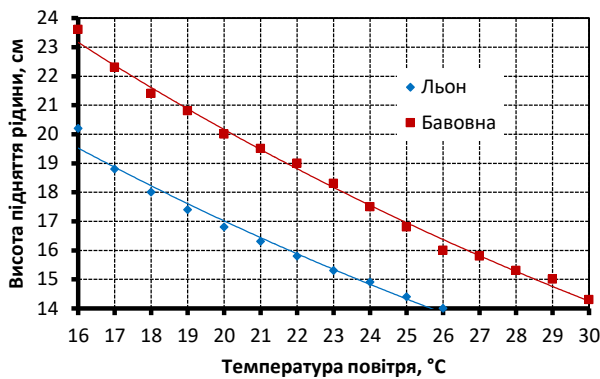


Рисунок 4 – Зміна висоти підняття рідини в порях різних тканин протягом 1 год. за різних температур повітря

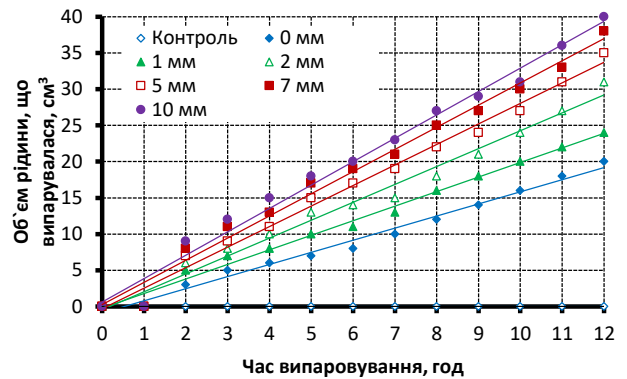


Рисунок 5 – Інтенсивність випарювання при температурі 20 °C з поверхні полотнищ із бавовни при різній відстані між ними

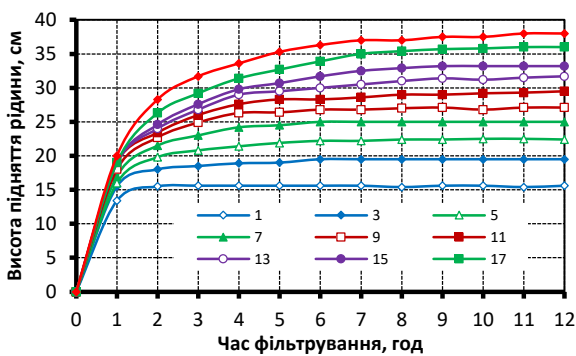
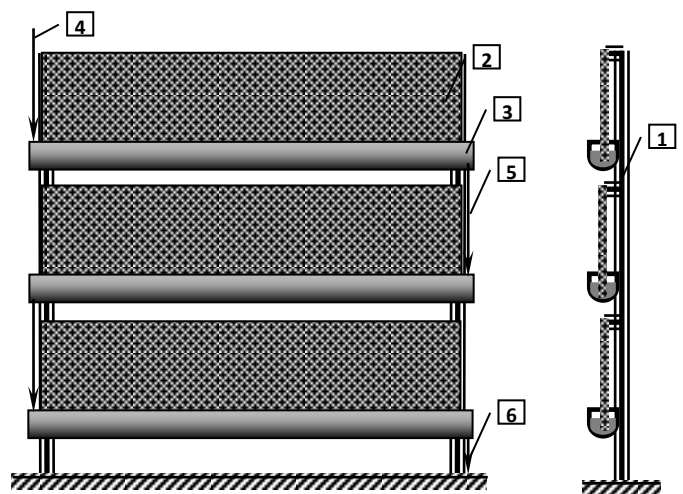


Рисунок 6 – Зміна висоти підняття рідини в порях смужки з бавовни при різній кількості шарів тканини

В процесі досліджень було встановлено ще кілька особливостей випарювання розчинів з використанням матеріалів



1 – металева стійка; 2 – полотнище тканини; 3 – жолоб для подачі розчинів; 4 – подача розчину на випарювач; 5 – перелив розчинів між каскадами; 6 – злив залишків після випарювання

Рисунок 7 – Схема каскадного інтенсифікатора випарювання токсичних розчинів із шламосховищ

з капілярними властивостями. При формуванні твердої фази відбувається заповнення пор сформованими кристалами та обмеження доступу до них для рідкої фази. В результаті цього знижується інтенсивність випаровування. З ростом концентрації розчинів, тим інтенсивніше цей процес спостерігається (рис. 8). Також необхідно враховувати той факт, що зі збільшенням концентрації розчинів зростає і їх в'язкість, що також негативно впливає на інтенсивність випаровування (рис. 9).

Так, якщо протягом доби із конкретного полотнища випаровується 160 см³ дистильованої води, то при концентрації хлориду натрію 20 % цей показник знижується майже в 3 рази. Зважаючи на вказані особливості, було розроблено кристалізатор із рухомим полотном (рис. 10) та, разом з колегами з КПШ ім. Ігоря Сікорського, кристалізатор із тканинним полотном у вигляді стрічки Мебіуса (рис. 11), які дозволяють враховувати вказані фактори.

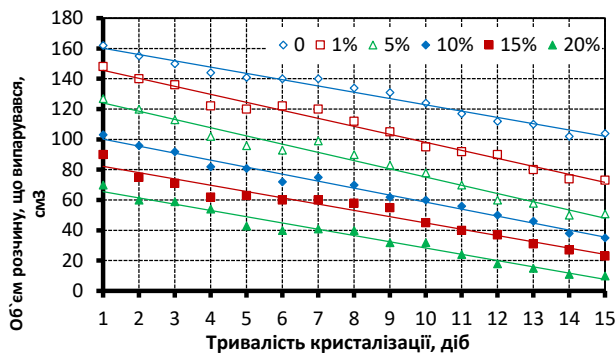


Рисунок 8 – Зниження інтенсивності кристалізації в часі при різних концентраціях хлориду натрію

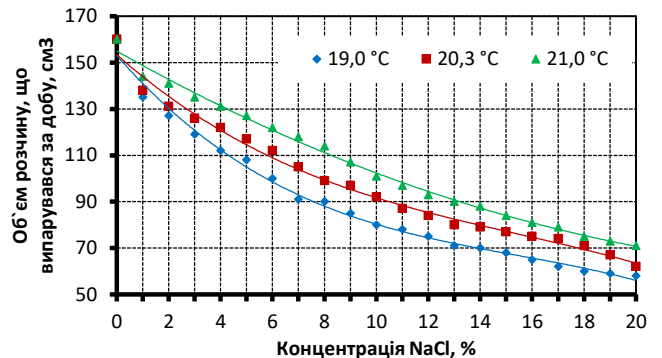
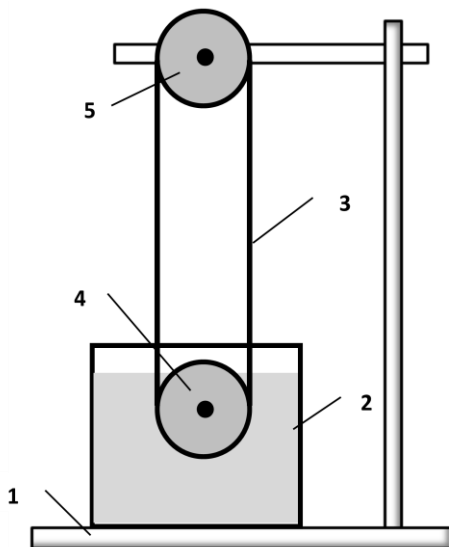
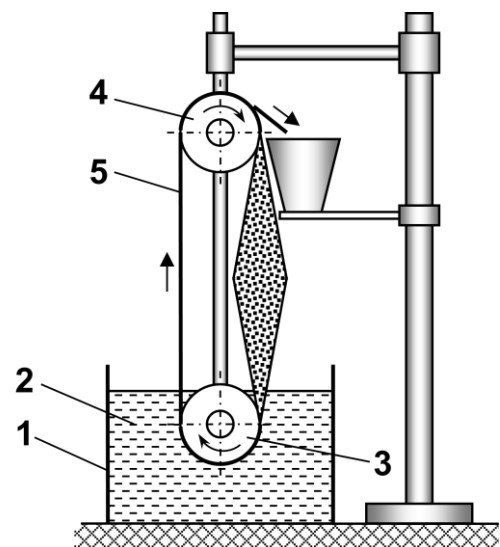


Рисунок 9 – Зміна інтенсивності випаровування в залежності від концентрації розчину хлориду натрію при різних температурах (°C)



1 – штатив; 2 – ємність з розчином; 3 – безкінечне тканинне полотно; 4 – нижній барабан; 5 – верхній барабан

Рисунок 10 – Кристалізатор із рухомим тканинним полотном

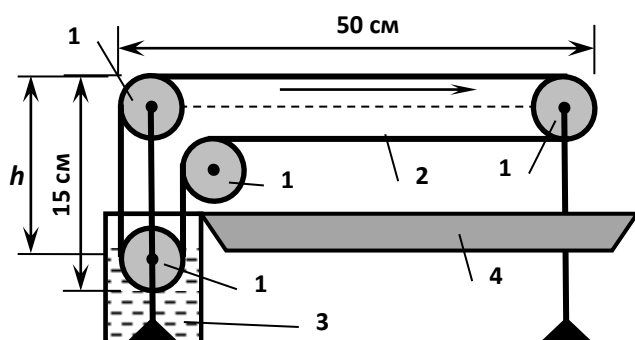


1 – ємність; 2 – розчин; 3 – нижній барабан; 4 – верхній барабан; 5 – безкінечне тканинне полотно у вигляді стрічки Мебіуса

Рисунок 11 – Кристалізатор із рухомим тканинним полотном у вигляді стрічки Мебіуса

Обмежуючим фактором в конструкціях більшості кристалізаторів є незначна висота підйому рідкої фази для типових тканин із бавовни та льону, яка не перевищує, зазвичай, 25-35 см. З іншого баку, згідно положень класичної фізики, висота підняття рідкої фази в порах капілярів не залежить від кута нахилу капіляра до горизонту. А це дозволяє за тих самих умов суттєво збільшувати площу випаровування і, відповідно, продуктивність випарювачів. На основі такого висновку було розроблено низькотемпературний кристалізатор з горизонтальним рухомих полотном (рис. 12). Такий підхід дозволяє створювати кристалізатори з довжиною горизонтальної частини 2-3 м.

Дещо підвищити продуктивність кристалізаторів вертикального типу дозволяє використання багатошарової структури. Суть такої конструкції



1 – барабани, здатні обертатися; 2 – тканинне полотно; 3 – ємність з розчином; 4 – лоток для кристалів;

Рисунок 12 – Низькотемпературний кристалізатор з рухомих тканинним полотном

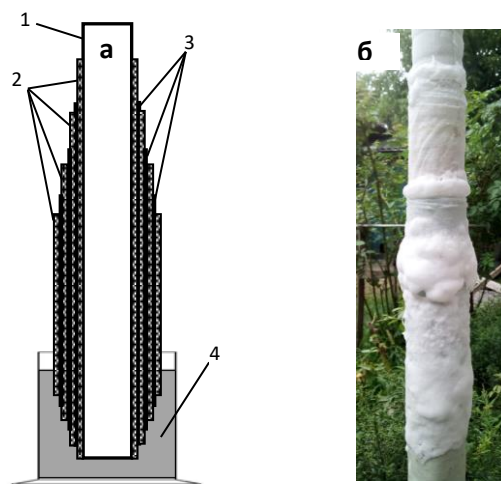


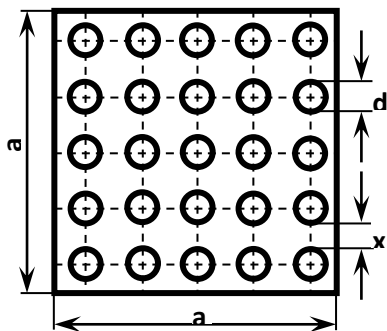
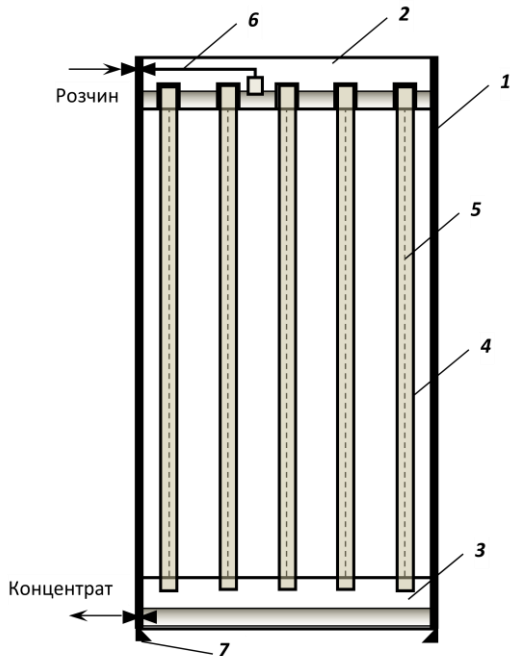
Рисунок 13 – Схема багатошарового кристалізатора (а) та приклад результату його роботи (б)

полягає в тому, що випаровування рідкої фази відбувається лише у верхній частині кожного шару, які розміщені каскадно (рис. 13). Кожен шар ізольований від інших непроникнутою перегородкою і умовно поділяється на дві частини – ізольовану частину, яка використовується лише для транспортування рідкої фази і відкриту частину випаровування з комплексною функцією.

На основі проведених досліджень розроблено простий модуль для випарювання рідин промислового використання, на який отримано патент України на винахід (рис. 14). Він складається із чотирьох стійок, які підтримують верхній та нижній піддони. На верхньому піддоні закріплені спеціальні збірні конструкції із пластикової сітки та тканинного рукава, котрі не доходять до дна нижнього піддону. Як показують проведені розрахунки, найбільш прийнятними є діаметри рукава в 100 мм при відстані між рукавами 100 мм. В такому випадку на 1 м² можливо влаштувати 25 рукавів. Модуль, в залежності від швидкості надходження рідкої фази, може працювати як в режимі повного випарювання з кристалізацією компонентів, так і в режимі часткового випарювання – концентрування.

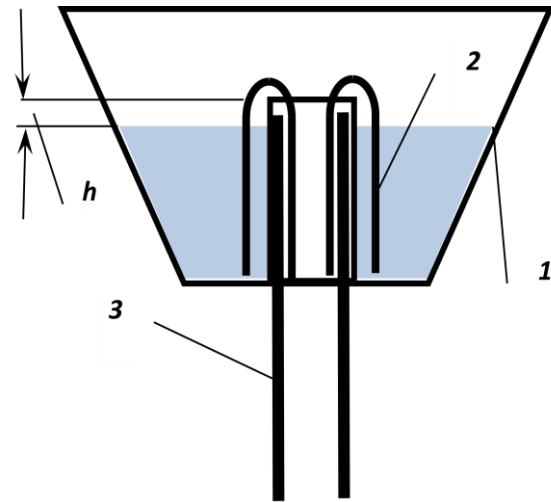
Для регулювання режиму роботи було розроблено спеціальний пристрій, котрий дозволяє точно встановлювати параметри процесу, регулюючи рівень рідкої фази у верхньому піддоні (рис. 15). Як показують проведені

експерименти, за приведених параметрів площа випаровування модуля висотою в 1 м складає $15,7 \text{ м}^2$ і при температурі навколишнього середовища $30 \text{ }^\circ\text{C}$ та швидкості вітру 8 м/с забезпечує випарювання протягом доби біля 60 дм^3 розчину. На основі повного факторного експерименту побудовано поверхню інтенсивності випаровування модуля в залежності від температури повітря та швидкості вітру (рис. 16).



1 – стійки; 2 – верхній піддон; 3 – нижній піддон; 4 – рукав із тканини; 5 – каркас із пластикової сітки; 6 – поплавковий кран; 7 – опори з можливістю регулювання

Рисунок 14 – Конструкція модуля випаровування



1 – ємність з рідиною; 2 – регулятор швидкості рідини; 3 – випарювач

Рисунок 15 – Принцип регулювання швидкості рідкої фази у випарювачі

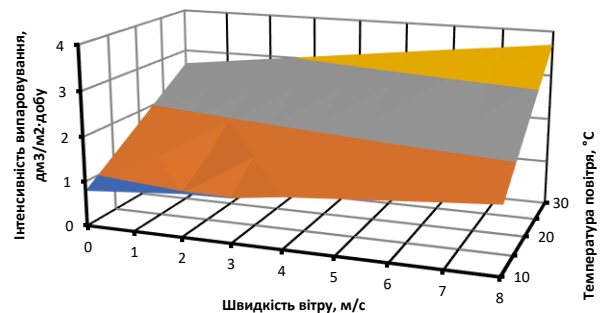


Рисунок 16 – Зв'язок основних параметрів модуля для випарювання концентратів та розчинів

Четвертий розділ роботи присвячено дослідженню процесів пом'якшення природних вод з підвищеним вмістом іонів кальцію та магнію. Найчастіше для цього використовують іонообмінний метод, котрий характеризується скидом в довкілля значних об'ємів концентратів хлориду натрію. В процесах регенерації використовують, переважно, 10 та 24-х відсоткові розчини, хімічний склад котрих приведено в табл. 2.

Якщо розглянути хімічні властивості компонентів регенераційних розчинів, то варто звернути увагу на той факт, що всі вони мають різну

розчинність (табл. 3). Найменша розчинність характерна саме для хлориду натрію, що дозволяє відділяти його від розчину шляхом фракційного випарювання.

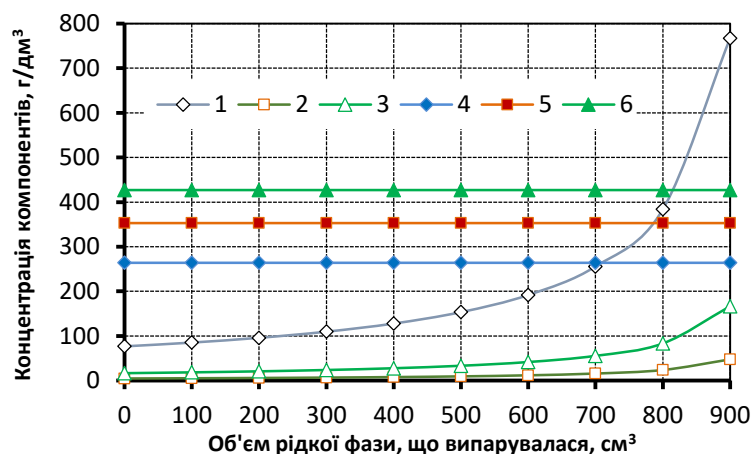
Таблиця 2 – Вміст основних компонентів регенераційних розчинів іонообмінних фільтрів

Реагент	Один. вим.	Концентрація розчину	
		10 %	24 %
NaCl	г/дм ³	76,72	184,13
CaCl ₂	г/дм ³	16,65	39,96
MgCl ₂ ·6H ₂ O	г/дм ³	10,57	25,37

Таблиця 3 – Розчинність компонентів відпрацьованих регенераційних розчинів

№	Сполука	Розчинність, г/дм ³ при температурі, °С	
		20	100
1	NaCl	264,0	281,0
2	MgCl ₂	353,0	423,0
3	CaCl ₂	427,0	614,0

Як видно з рис. 17, концентрація насичення хлориду натрію при використанні 10 %-х розчинів досягається при випарюванні 70 % рідкої фази. При цьому ні хлорид кальцію, ні хлорид магнію не досягають критичних концентрацій навіть при випарюванні 90 % рідкої фази. Така ситуація дозволяє відділити сформовані кристали хлориду натрію від маточного розчину для подальшої переробки.



- 1 – концентрація хлориду натрію;
- 2 – концентрація хлориду магнію;
- 3 – концентрація хлориду кальцію;
- 4 – розчинність хлориду натрію;
- 5 – розчинність хлориду магнію;
- 6 – розчинність хлориду кальцію

Рисунок 17 – Зміна концентрації компонентів відпрацьованих 10 %-х регенераційних розчинів при їх випарюванні

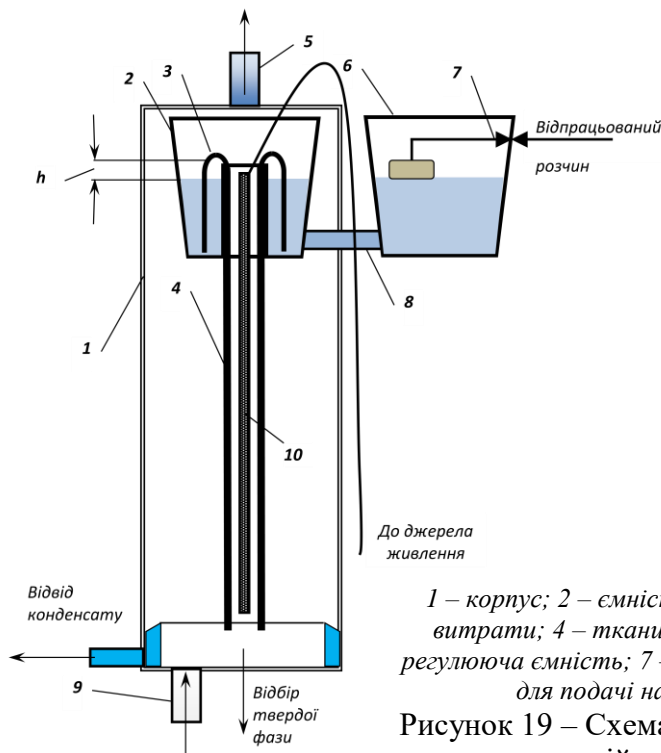
Залишок в 10 % маточного розчину може накопичуватися для подальшого випарювання та видалення спочатку хлориду кальцію, а потім і хлориду магнію. Ще кращі результати можна отримати при використанні в якості регенераційних 24 %-х розчинів хлориду натрію. Вже при випарюванні 30 % маточного розчину починають формуватися кристали хлориду натрію, котрі легко відділити від розчину. Залишок маточного розчину також можна

піддавати подальшому випарюванню для розділення сполук кальцію та магнію чи переведення їх у тверду фазу.

Очевидно, що найбільш важливим параметром кристалізованого хлориду натрію є вміст іонів жорсткості, що може суттєво впливати на можливість використання його для приготування нових регенераційних розчинів.

Як свідчать проведені дослідження (рис. 18), цей показник суттєво змінюється в процесі упарювання. Варто зауважити, що тверда плівка хлориду натрію починає формуватися на поверхні маточного розчину задовго до повного насичення. При цьому вміст солей жорсткості у відібраній твердій фазі мінімальний. Із збільшенням ступеню упарювання вміст домішок зростає, так як зростає їх концентрація в маточному розчині. Разом з тим, за свідченням окремих науковців, при повній обмінній ємкості катіоніту на рівні 1800-2000 мг-екв/дм³ вміст іонів жорсткості в регенераційних розчинах на рівні до 100 мг-екв/дм³ на якість регенерації практично не впливає. Тому можливо використання сформованого хлориду натрію для приготування нових регенераційних розчинів.

Зважаючи на значні затрати енергії на випарювання, було досліджено можливість використання матеріалів з капілярними властивостями для упарювання регенераційних розчинів. Результати виявилися кращими, ніж у випадку звичайного випарювання. На основі конструкції модуля для випарювання було розроблено установку для випарювання відпрацьованих регенераційних розчинів (рис. 19). До схеми модуля випарювання було додано нагрівальний елемент, розміщений в центральній частині тканинного рукава та для збереження енергії розмістили випарювач в спеціальному корпусі.



1 – корпус; 2 – ємність для регулювання витрати розчину; 3 – регулятор витрати; 4 – тканинний випарювач; 5 – патрубок для відводу пари; 6 – регулююча ємність; 7 – поплавок регулятор; 8 – перемичка; 9 – патрубок для подачі нагрітого повітря; 10 – нагрівальний елемент

Рисунок 19 – Схема установки для випарювання відпрацьованих регенераційних розчинів з використанням матеріалів з капілярними властивостями

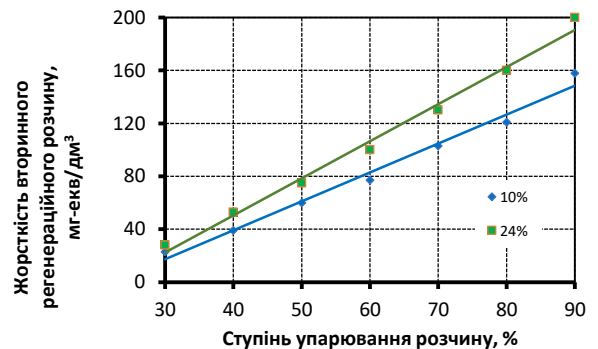


Рисунок 18 – Зміна жорсткості регенераційного розчину, приготованого із кристалізованої фази на різних ступенях упарювання

Використання випарювання може бути допустимим у випадку наявності джерел супутньої чи альтернативної енергії. В більшості ж випадків для систем малої та середньої продуктивності перевагу варто надавати іншим методам. Одним з таких досліджених методів був реагентний. При цьому значна увага приділялася не лише ефективності пом'якшення, а й ефективності відділення твердої фази від маточного розчину. При використанні класичної содово-натрієвої технології було встановлено, що в результаті вдається довести залишкову жорсткість регенераційного розчину до 1 мг-екв/дм^3 , але водневий показник при цьому повинен складати 10,5, що потребує подальшого його корегування розчином кислоти. Крім цього, отримані осадки важко відфільтровуються, що досить важливо для систем малої та середньої продуктивності (рис. 20). Покращити ситуацію можливо у випадку, коли проводити попереднє відстоювання обробленого розчину і лише потім піддавати його фільтруванню (рис. 21). Однак суттєвою проблемою виявилася низька розчинність карбонату натрію, в результаті чого об'єм регенераційного розчину з кожним циклом зростає на 5-13 % з необхідністю наступного упарювання. Тому було досліджено ефективність використання фосфатів в процесах відновлення регенераційних розчинів.

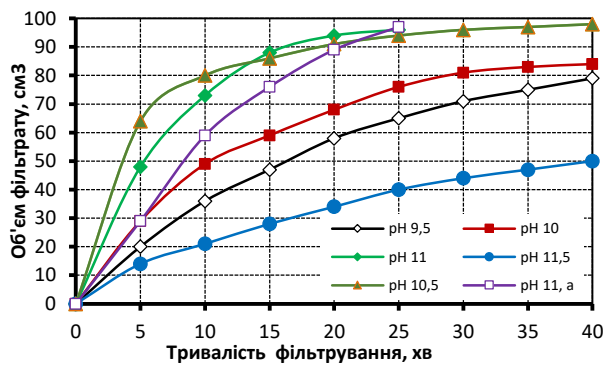
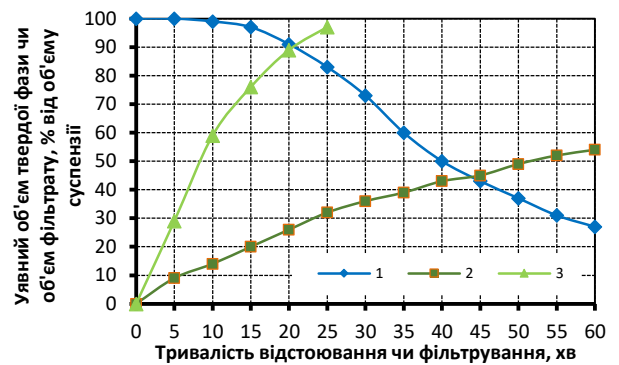


Рисунок 20 – Зміна ефективності фільтрування суспензії регенераційних розчинів в залежності від рН ($T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$)



1 – відстоювання; 2 – фільтрування; 3 – фільтрування з попереднім відстоюванням

Рисунок 21 – Криві ефективності відстоювання та фільтрування суспензії регенераційних розчинів ($T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$)

Проведені дослідження показали, що фосфати забезпечують достатню ефективність пом'якшення, але утворені осадки важко відділяються від рідкої фази фільтруванням (рис. 22). Використання додаткових реагентів дозволяє покращити параметри процесу. Використання неіоногенного флокулянту ПАА не супроводжувалося позитивними змінами навіть при дозах 70 мг/дм^3 (рис. 23).

Аналогічні результати зафіксовані і при використанні флокулянту аніонного типу Zetag-7692 (рис. 24). Суттєвий позитивний вплив на інтенсивність фільтрування забезпечує флокулянт катіонного типу Magnofloc-336. При дозах в 90 мг/дм^3 швидкість відділення твердої фази зростає в 2-2,5 рази (рис. 25). Тому саме такі співвідношення додаткових реагентів можуть бути рекомендовані для реальних технологічних процесів.

Фосфат натрію відноситься до лужних реагентів, тому після обробки ним регенераційних розчинів водневий показник може сягати 11-11,5, що потребує його корегування. Тому було запропоновано для осадження використовувати комплексний реагент із суміші фосфату та дигідроортофосфату натрію. Змінюючи співвідношення між компонентами можливо регулювати водневий показник регенераційного розчину після обробки (рис. 26).

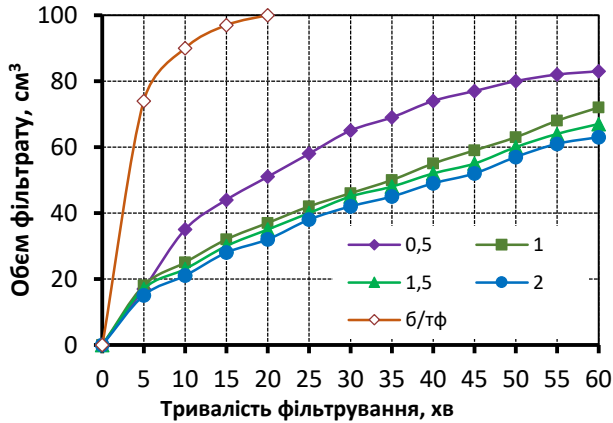


Рисунок 22 – Криві ефективності фільтрування суспензії регенераційних розчинів при різних співвідношеннях $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}]$ ($T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, б/тф – без твердої фази)

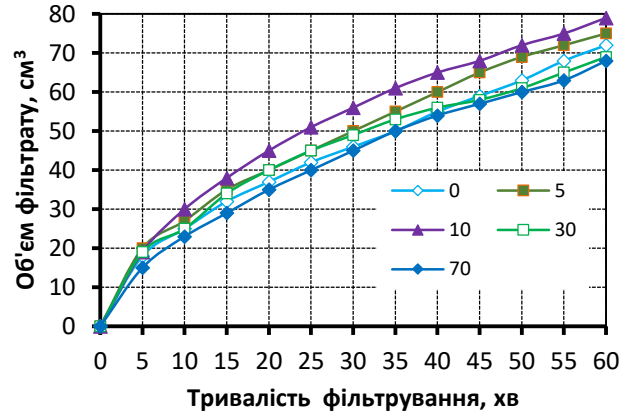


Рисунок 23 – Криві ефективності фільтрування суспензії регенераційних розчинів при співвідношенні $K = 1$ та різних дозах ПАА (мг/дм^3 ; $T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$)

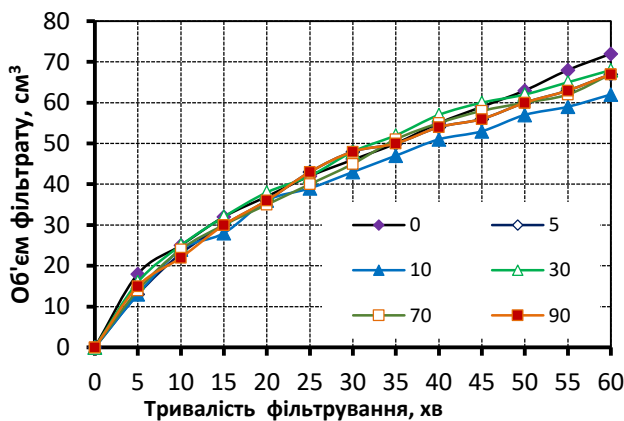


Рисунок 24 – Криві ефективності фільтрування суспензії регенераційних розчинів при співвідношенні $K = 1$ та різних дозах Zetag – 7692 (мг/дм^3 ; $T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$)

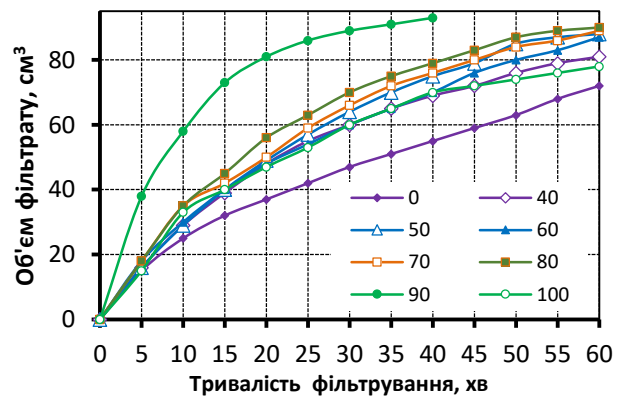
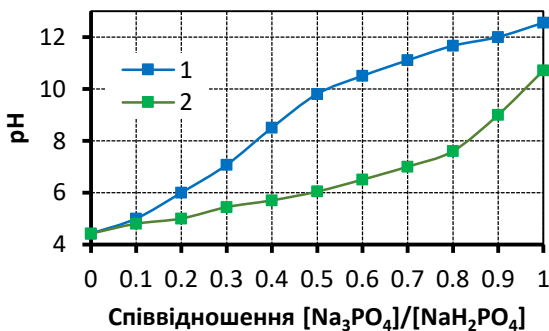


Рисунок 25 – Криві ефективності фільтрування суспензії регенераційних розчинів при співвідношенні $K = 1$ та різних дозах Magnofloc – 336 (мг/дм^3 ; $T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$)



1 – осаджуючий розчин із суміші фосфату та дигідроортофосфату натрію; 2 – водневий показник регенераційного розчину після обробки осаджуючим розчином

Рисунок 26 – Залежність водневого показника розчину від співвідношення його компонентів ($T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$)

Суттєво впливає на умови відновлення регенераційних розчинів і залишковий вміст фосфатів після відновлення. Як свідчать проведені дослідження, при регенерації насиченого іонами кальцію катіоніту розчином з вмістом фосфатів більше 50 мг/дм³ спостерігається кристалізація фосфату кальцію безпосередньо в порах іоніту та в проміжках між зернами (табл. 4). Тому дозу фосфатів варто вибирати дещо меншою від стехіометричної, щоб забезпечити ефективне видалення іонів жорсткості.

Таблиця 4 – Вплив фосфат-аніонів на ефективність регенерації катіоніту КУ – 2 – 8 від іонів жорсткості

№ п/п	Концентрація фосфат-аніонів, мг/дм ³	Початкова обмінна ємкість, мг-екв/дм ³	Обмінна ємкість після регенерації, мг-екв/дм ³	Примітка
1	-	1382	1382	-
2	12,6	1367	1355	-
3	28,3	1356	1335	-
4	49,3	1354	1314	-
5	80,8	1351	-	кристалізація фосфату кальцію
6	126	1349	-	кристалізація фосфату кальцію

На основі отриманих результатів була розроблена технологічна схема відновлення регенераційних розчинів з багаторазовим їх використанням (рис. 27). Вона передбачає обробку розчину осаджуючим реагентом із суміші фосфатів та флокулянту у відповідному співвідношенні, пропускання отриманої суспензії через рукавний фільтр для відділення твердої фази, доочищення рідкої фази на механічному фільтрі та прокачуванні її через вугільний фільтр для видалення залишків флокулянтів і повернення в бак регенераційного розчину. При необхідності об'єм регенераційного розчину поповнюється із спеціально влаштованого додаткового баку невеликого об'єму.

Для процесів відновлення регенераційних розчинів з використанням фосфатів та різних типів флокулянтів отримані математичні моделі, 3D-поверхня найбільш ефективного з них приведена на слайді (рис. 28) і котрі підтверджують доцільність використання в якості додаткового реагенту флокулянту катіонного типу Magnofloc-336:

$$y_1 = 59,0 + 5,55 \cdot x_1 + 20,2 \cdot x_2 + 0 \cdot x_1 \cdot x_2 - 5,45 \cdot x_1^2 - 5,3 \cdot x_2^2, \quad (1)$$

$$Y_1 = + 5,775 + 0,329 \cdot X_1 + 1,805 \cdot X_2 - 0,00218 \cdot X_1^2 - 0,01325 \cdot X_2^2, \quad (2)$$

$$y_2 = 5,7 - 2,45 \cdot x_1 - 4,75 \cdot x_2 + 0,65 \cdot x_1 \cdot x_2 + 3,95 \cdot x_1^2 + 0,15 \cdot x_2^2, \quad (3)$$

$$Y_2 = + 20,537 - 0,226 \cdot X_1 - 0,292 \cdot X_2 + 0,002 \cdot X_1^2 + 0,001 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0003 \cdot X_2^2. \quad (4)$$

В приведених рівняннях y_1 – об'єм фільтрату, см^3 ; y_2 – залишкова жорсткість регенераційного розчину, мг-екв/дм^3 ; x_1 – витрата флокулянта, мг/дм^3 ; x_2 – тривалість фільтрування, хв. ("y" – моделі у кодованій формі, "Y" – моделі у натуральній формі).

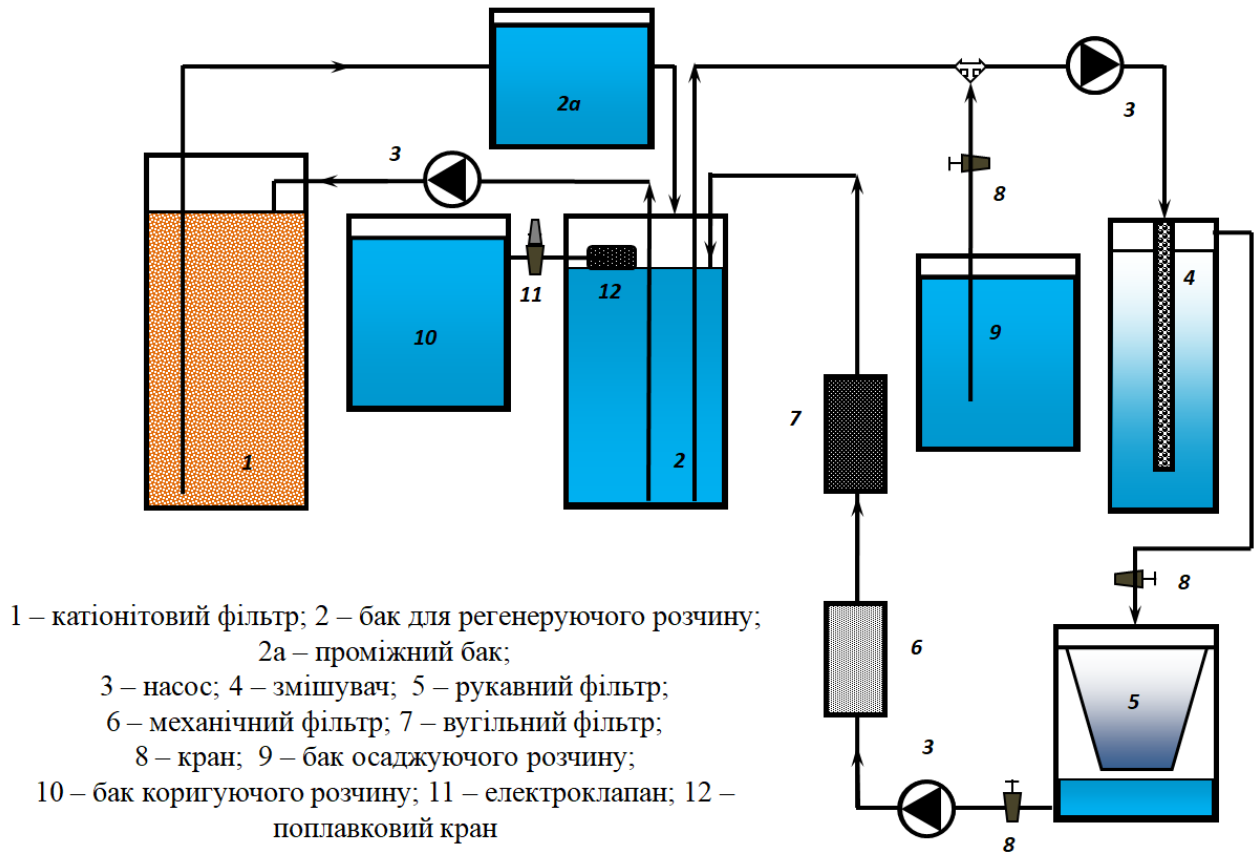


Рисунок 27 – Технологічна схема відновлення регенераційних розчинів

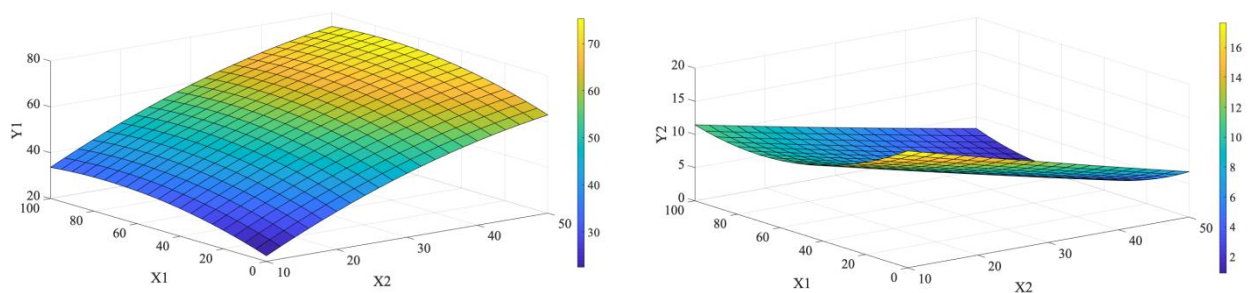
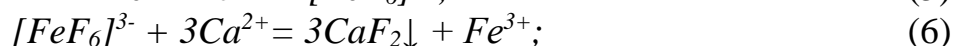


Рисунок 28 – 3D-поверхні прогнозування параметрів процесу пом'якшення води з використанням фосфатів та флокулянтів, побудовані на основі отриманих математичних моделей, при використанні флокулянту Magnofloc-336

Надзвичайно важливим є завдання визначення моменту насичення катіоніту іонами жорсткості для повного використання обмінної ємкості іоніту та своєчасного запуску процесу регенерації. Для цього було розроблено кілька реагентних методів, котрі дозволяють вчасно фіксувати наявність іонів кальцію в обробленій воді. В першому варіанті колонку розділяли на дві частини,

нижню частину котрої заповнювали аніонітом, насиченим роданід-іонами, а верхню – аніонітом, насиченим комплексним іоном фториду заліза. При відсутності у воді іонів кальцію аніоніт перебуває в первинному стані і не забарвлюється. При проскоку іонів кальцію вони реагують із фтором з утворенням нерозчинної сполуки, вивільняючи іони заліза (III). Останні взаємодіють з роданід-іонами із забарвленням аніоніту в нижній частині насиченим червоним кольором (рис 29). В спрощеній формі хімічні реакції можна записати як:



Аналогічний ефект можна отримати для іонів магнію з використанням барвника титанового жовтого (рис. 30). Суттєвим недоліком таких методик є їх одноразовість і необхідність перепакування після кожної регенерації.

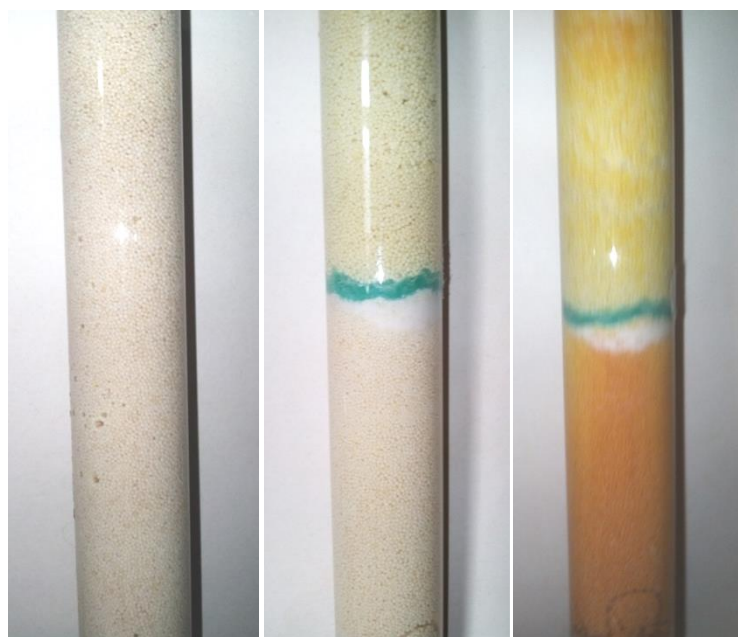


Рисунок 29 – Контроль наявності іонів кальцію опосередкованою реакцією

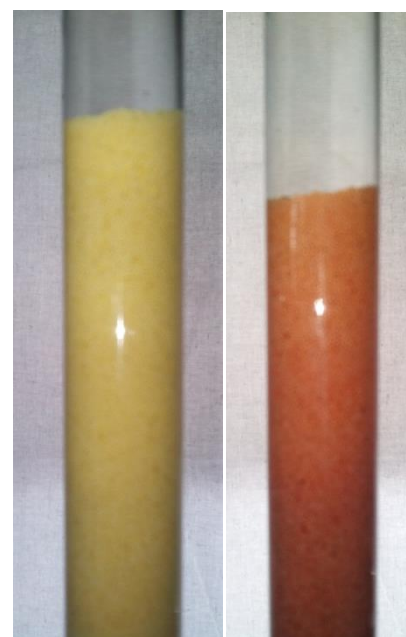


Рисунок 30 – Забарвлення іонами магнію аніоніту, обробленого титановим жовтим

Більш перспективним є електрохімічний метод, який не потребує реагентів, додаткового обслуговування та може працювати необмежений термін часу в автоматичному режимі. Суть методу полягає в наступному. Якщо розглянути роботу іонообмінного фільтру при пом'якшенні води, то можна виділити три основні етапи:

1 етап – катіоніт повністю перебуває в Na^+ -формі. Тому при надходженні жорсткої води іони кальцію та магнію обмінюються на іони натрію і на виході з фільтру фіксуються лише іони натрію в еквівалентних концентраціях.

2 етап – катіоніт перебуває в змішаній Ca^{2+} , Mg^{2+} -формі. Зважаючи на вищу селективність катіоніту до іонів кальцію, на виході фільтру будуть фіксуватися лише іони магнію, які будуть обмінюватися в фільтрі на іони кальцію. В залежності від вимог до води, фільтр може бути відключений на регенерацію.

3 етап – катіоніт повністю перебуває в Ca^{2+} -формі. На виході фільтру фіксується проскок іонів кальцію і магнію та необхідність відключення його на регенерацію.

Відомо, що електроліз водних розчинів в електролізері з діафрагмою чи мембраною супроводжується підвищенням кислотності в анодному просторі та підвищенням лужності в катодному просторі. Тому при заповненні електролізера розчинами сульфату чи хлориду натрію в процесі електролізу спостерігається ріст електропровідності розчинів в обох відділеннях за рахунок розкладання води (рис. 31). У випадку наявності у розчинах іонів магнію картина кардинально змінюється. В процесі електролізу електропровідність розчину в анодній камері зростає, а в катодній – знижується. Таке зниження відбувається за рахунок того, що в результаті росту рН іони магнію починають гідролізуватися, формуючи тверду фазу і зв'язуючи іони магнію та гідроксил-іони. Фіксуючи такі зміни, досить просто автоматично запускати процес регенерації іоніту (рис. 32).

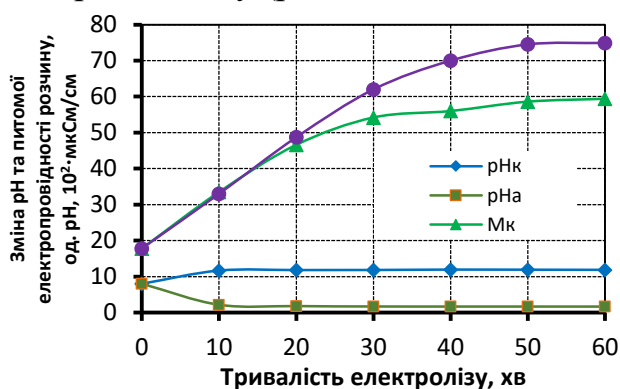


Рисунок 31 – Зміна рН та питомої електропровідності розчинів сульфатів натрію концентрації 15 мг-екв/дм³ в процесі електролізу ($U = 15 \text{ В}$, $I = 0,06\text{-}0,24 \text{ А}$, $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$)

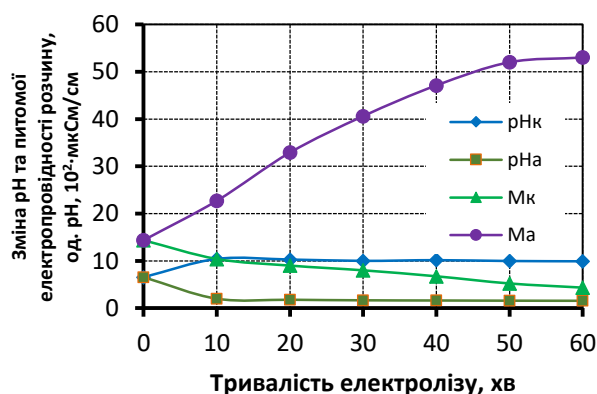
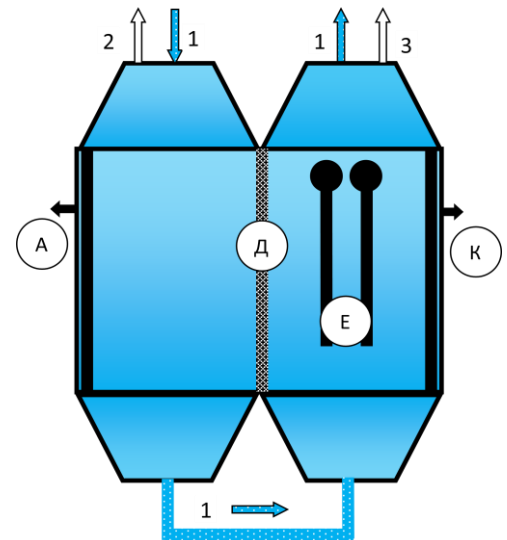


Рисунок 32 – Зміна рН та питомої електропровідності розчинів сульфатів магнію концентрації 15 мг-екв/дм³ в процесі електролізу ($U = 15 \text{ В}$, $I = 0,02\text{-}0,06 \text{ А}$, $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$)

Іони кальцію важче фіксувати даним методом, оскільки вони гідролізуються при $\text{pH} > 12,4$, яке можна досягнути в катодному просторі при тривалому електролізі або в електролізерах спеціальної конструкції. Але при наявності в розчині карбонат-іонів цей процес стає навіть простішим і коротшим, ніж у випадку з іонами магнію. Отримані результати реалізовані у вигляді електролізера з діафрагмою, суміщеного із вимірювачем електропровідності (рис. 33). Прокачування кислого розчину із анодного відділення дозволяє очищувати катодне відділення від осаду та забезпечувати тривалу безперебійну роботу.

П'ятий розділ присвячено дослідженню процесів пом'якшення вод, що містять надлишкову кількість іонів кальцію та магнію. На сьогодні вивчено та досліджено велика кількість технологій та реагентів для пом'якшення води, однак більшість з них орієнтована на використання в промислових масштабах. Менш потужні споживачі, як то приватні будинки, квартири та офіси обладнуються, переважно, іонообмінними установками, негативні наслідки експлуатації котрих було розглянуто раніше. Тому основною метою даного циклу досліджень був вибір технології та реагентів для ефективного та екологічно безпечного пом'якшення води для систем малої та середньої продуктивності. Вивчення класичної содово-натрієвої технології показало, що за низьких температур (а у водопровідній системі м. Києва середня температура води складає 13,5 °С при зниженні в зимовий період до 8,5 °С) ефективність її надзвичайно низька. При низькій початковій жорсткості навіть при температурі 70 °С і дозі карбонату натрію в 10 разів більшою в порівнянні із стехіометрією, залишкова жорсткість не падає менше 1 мг-екв/дм³ (рис. 34). А при температурах 10-20 °С ефективність пом'якшення за таких умов складає 20-25 %. Для ефективного видалення іонів кальцію дозу карбонату натрію необхідно збільшувати в 20-30 разів (рис. 35).



А – анод; К – катод; Д – діафрагма; Е – електроди для вимірювання електропровідності; 1 – шлях проби води; 2 – скид кисню; 3 – скид водню

Рисунок 33 – Блок запуску регенерації іонообмінного фільтру пом'якшення води

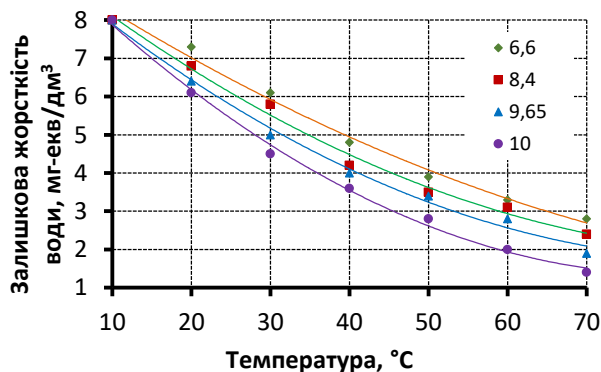


Рисунок 34 – Залежність залишкової жорсткості води від температури при різних значеннях водневого показника ($J_{\text{поч}} = 8 \text{ мг-екв/дм}^3$, коефіцієнт $K = [\text{CO}_3^{2-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}] = 10$)

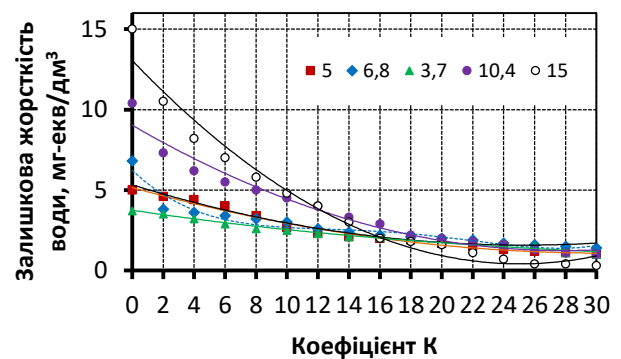


Рисунок 35 – Ефективність осадження іонів кальцію карбонатом натрію при різних значеннях початкової жорсткості та співвідношеннях компонентів: температура води = 13 °С, початкове рН = 6,64, коефіцієнт $K = [\text{CO}_3^{2-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}]$

Аналогічна ситуація і з іонами магнію, котрі видаляються у вигляді гідроксиду і починають гідролізуватися лише при рН > 10,5 (рис. 36). Тому

було проведено вибір більш ефективних реагентів для систем пом'якшення води малої та середньої продуктивності.

Серед всіх реагентів, що утворюють із іонами жорсткості нерозчинні сполуки, було обрано реагенти на основі фосфатів. Це пов'язано з тим, що фосфати ефективно зв'язують іони кальцію при стехіометричних співвідношеннях і забезпечують нормативні значення для питної води при значно нижчих співвідношеннях (рис. 37). Фосфати досить ефективно працюють в широкому діапазоні температур (рис. 38). Лише при температурі води 5 °С спостерігається деяке зниження ефективності. При інших температурах вона залишається стабільно високою. Крім цього, що є досить важливим, сформовані частки фосфату кальцію досить ефективно відділяються від води фільтруванням як при різних температурах, так і в широкому діапазоні рН (рис. 39).

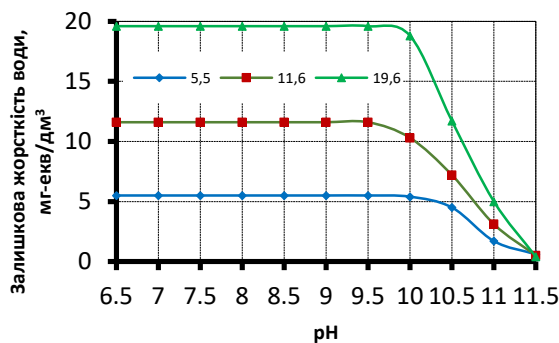


Рисунок 36 – Залежність залишкової жорсткості води (по Mg^{2+}) від рН при різних значеннях початкової жорсткості та температурі розчину 22 °С

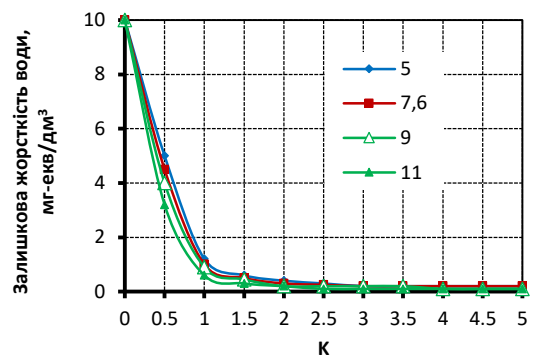


Рисунок 37 – Залежність залишкової жорсткості води від співвідношення компонентів $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [Ca^{2+}, \text{мг-екв}]$ при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $J_{\text{поч}} = 10 \text{ мг-екв/дм}^3$ та різних початкових значеннях рН

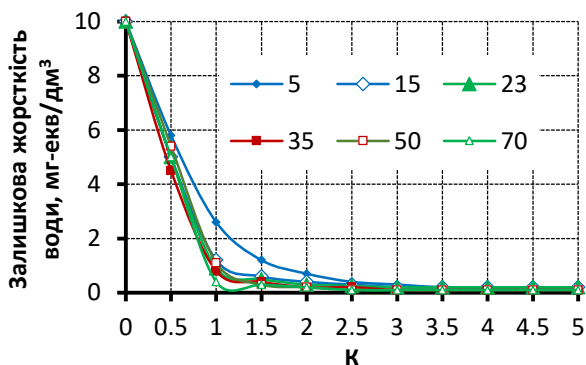


Рисунок 38 – Залежність залишкової жорсткості води від температури і співвідношення компонентів $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [Ca^{2+}, \text{мг-екв}]$ при $J_{\text{поч}} = 10 \text{ мг-екв/дм}^3$ та $\text{pH} = 7,45$

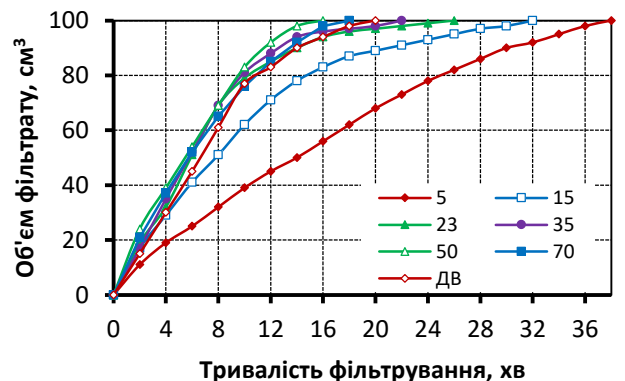


Рисунок 39 – Залежність об'єму фільтрату від часу фільтрування при $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [Ca^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$, $J_{\text{поч}} = 10,5 \text{ мг-екв/дм}^3$, $\text{pH} = 6,48$ та різних значеннях температури суспензії

Ефективність фосфатів відносно іонів магнію виявилася дещо нижчою. Якщо залишкові концентрації кальцієвої жорсткості легко забезпечувалися на рівні нижче 1 мг-екв/дм³, то для магнію ця границя піднімалася до 2-3 мг-екв/дм³ (рис. 40). Не суттєво знижується ефективність пом'якшення при

зміні температури та початкової жорсткості обробленого розчину (рис. 41). В той же час, в результаті пом'якшенні формуються осаді, що досить важко зневоднюються фільтруванням. В порівнянні із швидкістю фільтрування дистильованої води швидкість фільтрування отриманої суспензії в 2-5 разів нижча в залежності від умов осадження (рис. 42).

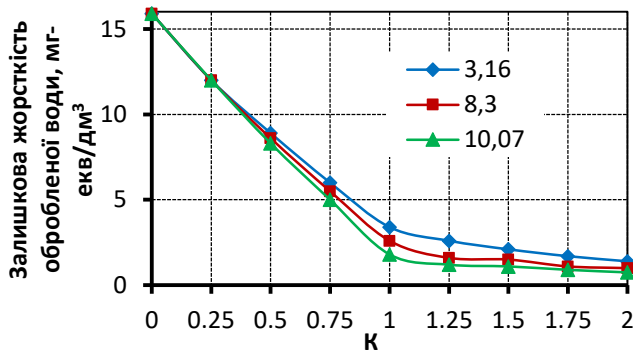


Рисунок 40 – Залежність залишкової жорсткості води від коефіцієнту $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}]$ при різних значеннях рН та $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$

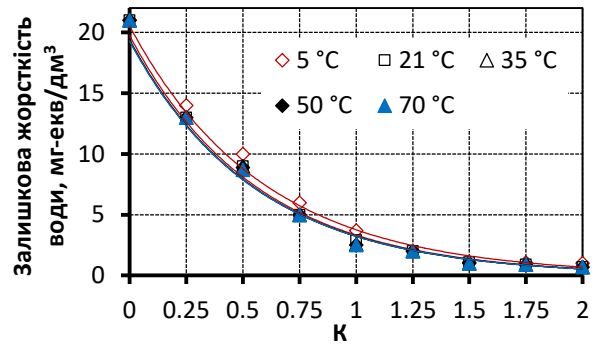


Рисунок 41 – Залежність залишкової жорсткості води від коефіцієнту $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}]$ при різних значеннях T розчину, $J_{\text{поч}} = 21 \text{ мг-екв/дм}^3$, рН = 6,58

Додавання флокулянту аніонного типу Magnofloc–336 суттєво впливає на процес фільтрування. Дози флокулянту в 30-80 мг/дм³ знижують швидкість фільтрування, але при зменшенні концентрацій реагенту ефективність підвищується. При використанні флокулянту в концентрації 1-10 мг/дм³ швидкість фільтрування зростає та стає наближеною до швидкості фільтрування дистильованої води (рис. 43).

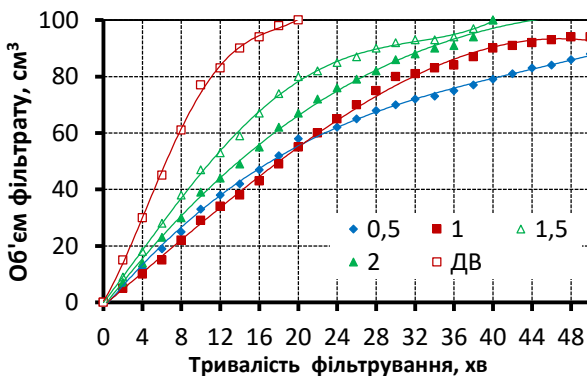


Рисунок 42 – Залежність швидкості фільтрування суспензії в часі при різних значеннях $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}]$ при $T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, $J_{\text{поч}} = 16,3 \text{ мг-екв/дм}^3$, рН = 6,58 (ДВ – дистильована вода)

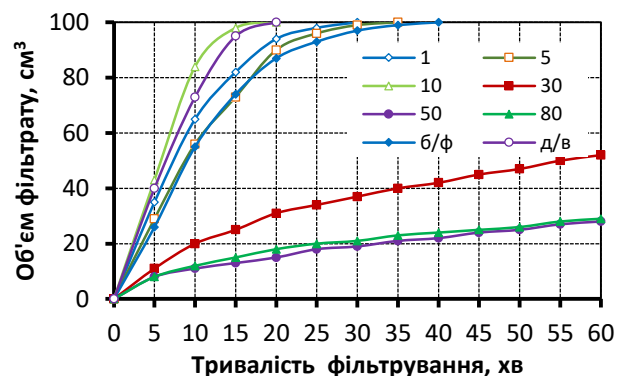
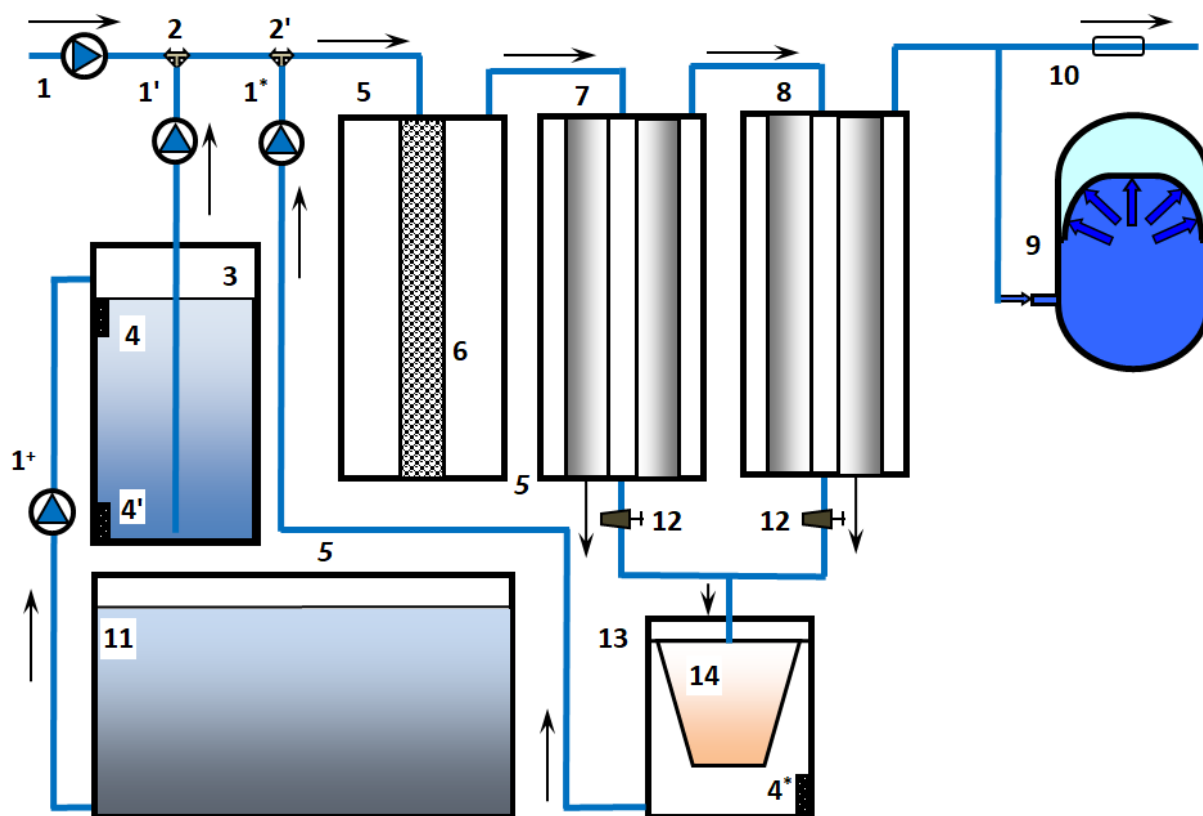


Рисунок 43 – Залежність швидкості фільтрування суспензії при різних концентраціях Magnofloc – 336 (мг/дм³) ($K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$, $T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, $J_{\text{поч}} = 27,0 \text{ мг-екв/дм}^3$, рН_п = 7,4) (б/ф – без флокулянта, д/в – дистильована вода)

Отримані результати свідчать про підвищення ефективності процесу та економності використання реагентів. Більш детальні дослідження на реальних водах відповідного хімічного складу та жорсткості дозволяють рекомендувати використання флокулянту аніонного типу Magnofloc–336 для систем

пом'якшення малої та середньої ефективності, в яких фільтрування є основним процесом відділення твердої фази.

На основі отриманих результатів була розроблена технологічна схема пом'якшення води для систем зворотнього осмосу малої та середньої продуктивності (рис. 44). Вона передбачає обробку жорсткої води комплексним реагентом із суміші фосфату та дигідроортофосфату натрію і флокулянту Magnofloc-336, відділення утвореного осаду на механічних фільтрах та подачу обробленої води на систему зворотнього осмосу. Після зневоднення твердої фази вона може бути використана в якості реагенту для обробки ґрунту, а рідка фаза від процесів зневоднення повертається в технологічний процес.



1 – насос; 2 – інжектор; 3 – мірний бак осаджуючого розчину; 4 – датчики рівня рідкої фази; 5 – блок перемішування реагентів; 6 – перфорована трубка; 7 – механічний фільтр 20 мкм; 8 – механічний фільтр 5 мкм; 9 – гідроаккумулятор; 10 – реле тиску; 11 – ємність з осаджуючим розчином; 12 – електроклапан; 13 – блок обробки твердої фази; 14 – рукавний фільтр

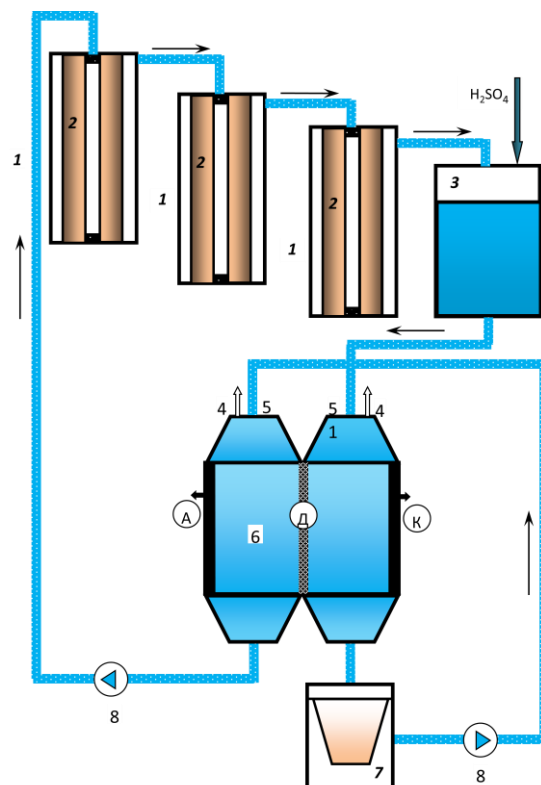
Рисунок 44 – Технологічна схема пом'якшення води з використанням фосфатів

Шостий розділ роботи присвячено зменшенню негативного впливу на довкілля відходів систем зворотнього осмосу. Найбільш перспективною сьогодні вважається обробка води в місцях водовідбору – квартирах, будинках, офісах. Найчастіше з цією метою застосовують системи зворотнього осмосу, здатні видалити з потоку води практично всі домішки. Типова система зворотнього осмосу нараховує, в середньому, сім ступенів обробки води і являє собою набір

корпусів, в які встановлюються картриджі відповідного складу та призначення. І якщо зворотноосмотична мембрана та ультрафіолетова лампа повинні замінюватися через рік експлуатації, то всі інші картриджі рекомендується замінювати кожні півроку, а то і три місяці. Таким чином, крім чистої води системи зворотнього осмосу продукують значну частину твердих відходів, які суттєво збільшують їх загальний об'єм. За нашими оцінками, лише в м. Києві в результаті експлуатації систем зворотнього осмосу утворюється більше 1 тис. м³ твердих відходів і втрачається значна кількість цінної вторинної сировини. Тому давно існує необхідність розробки методів регенерації чи утилізації картриджів систем зворотнього осмосу.

Розроблена реагентна технологія регенерації поліпропіленових картриджів етапу механічного очищення води потребувала постійного дозування сірчаної кислоти та вирізнялася утворенням значної кількості твердої фази у вигляді гіпсу та гідроксиду заліза (III). Тому було розроблено електрохімічну технологію утилізації таких картриджів. Нова технологія базується на використанні електролізера з діафрагмою, що дозволяє регулювати водневий показник в анодному та катодному відділеннях без додавання реагентів. Дослідженнями було встановлено, що в залежності від концентрації сульфату заліза (III), котрий є основним компонентом регенераційних розчинів, водневий показник в катодній камері може бути підвищений до рівня 4,5 протягом 15-45 хвилин електролізу. Таким чином, катодну камеру можна використати для осадження заліза у вигляді гідроксиду та видалення його за межі електролізера.

Технологічна схема (рис. 45) являє собою замкнуту систему, з якої виводиться лише гідроксид заліза (III) в твердій формі. Для підвищення ефективності роботи системи до її складу включено одночасно три картриджі для регенерації, через котрі регенераційний розчин проходить послідовно. Після закінчення процесу електролізу розчин з анодної камери електролізера прокачується через каскад картриджів в типових корпусах. Далі робочий розчин накопичується в буферній ємкості, доки катодне відділення електролізера не звільниться. Паралельно із процесом прокачування розчину через картриджі відбувається фільтрування розчину із катодної камери через рукавний фільтр та відділення твердої фази. Після розділення рідкої та твердої



*A – анод; К – катод; Д – діафрагма;
1 – корпус механічного фільтру;
2 – поліпропіленовий картридж; 3 – буферна
ємність; 4 – скид кисню та водню; 5 – подача
розчинів; 6 – електролізер; 7 – рукавний
фільтр; 8 – насос*

Рисунок 45 – Технологічна схема електрохімічної регенерації поліпропіленових картриджів

фаз в рукавному фільтрі рідка фаза насосом перекачується в анодне відділення електролізера. Паралельно із буферного баку розчин із підвищеним вмістом заліза (III) заповнює катодне відділення електролізера і процес його обробки починається. Після визначеного терміну обробки в електролізері розчин в анодній камері набуває сильно кислої реакції, в катодній – сильно лужної. Далі розчини використовуються по алгоритму, описаному вище. Оскільки з твердою фазою з процесу виводиться деяка кількість рідкої фази, періодично проводять її поповнення шляхом додавання в буферну ємність 0,5 %-го розчину сірчаної кислоти при використанні свинцевих анодів. В іншому випадку втрати компенсуються питною водою.

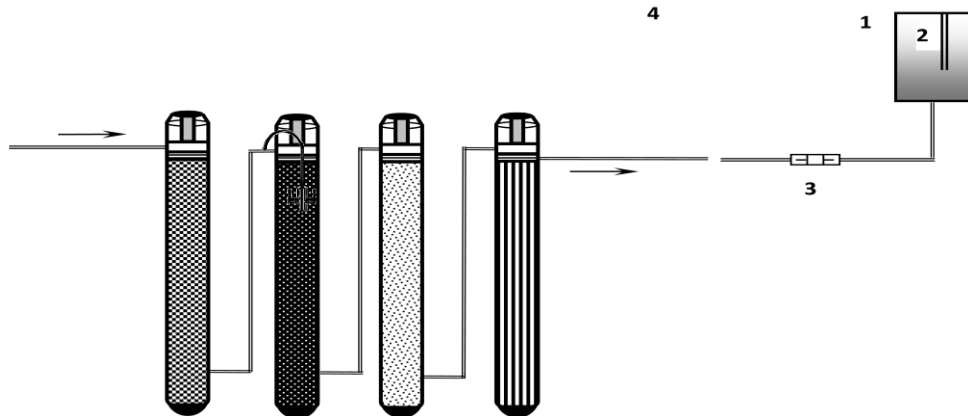
Картриджі другого, третього та п'ятого етапів представлені картриджами із брикетованого чи гранульованого вугілля. Оскільки навіть на сьогодні не розроблено простих та дешевих технологій регенерації активованого вугілля, то найбільш прийнятним є термічний метод їх знешкодження. Тим більше, що до складу картриджів входять лише горючі компоненти, що дозволяє використовувати картриджі в якості енергоносія. Теплотворна здатність такого енергоносія навіть більша, ніж кам'яного вугілля.

Більш ефективно використовувати картриджі із гранульованим вугіллям дозволяє застосування картриджів багаторазового використання, котрі сьогодні продукуються в достатній кількості багатьма компаніями. Проблема лише в організації збору використаних картриджів та перепакування їх свіжим активованим вугіллям.

Після зворотно осмотичної мембрани мінералізація води складає 10-20 мг/дм³, що вимагає її домінералізації до сухого залишку в 100 мг/дм³. Існуючі на сьогодні мінералізатори в системах зворотного осмосу являють собою корпуси із пластику, заповнені набором малорозчинних сполук. За задумом, при проходженні через таку суміш де мінералізована вода розчинятиме деяку кількість хімічних сполук і набуватиме нормативних вимог. Разом з тим, як показали проведені дослідження, робота мінералізатора нестабільна, не забезпечує необхідної якості домінералізації, практично не піддається контролю та справляє на довкілля негативний вплив шляхом накопичення значних об'ємів пластиків та неорганічних хімічних сполук.

Самим простим варіантом домінералізації зворотньоосмотичної води є використання природних мінеральних вод. В Україні існує цілий клас високо мінералізованих мінеральних вод – Поляна Квасова, Моршинська, Лужанська і т.п. Загальна мінералізація цих вод сягає 6-15 г/дм³. Якщо виходити із необхідної мінімальної мінералізації питної води на рівні 60 мг/дм³, то ресурс 1 дм³ такої мінералки складе від 100 до 250 дм³ питної води. Для реалізації способу запропоновано (рис. 46) мінералізатор замінити на ємність 1 із мінеральною водою, в якій передбачено спеціальний прозорий проміжок для контролю рівня рідини 2. До додаткових компонентів системи домінералізації входить також дросель 3 та спарений подвійний кран 4. Для автоматичного регулювання процесу домінералізації води мінералізатор замінюють на додаткову ємність із мінеральною водою та ємність, яка може бути як додатковою, так і використовувати її як наявний гідроаккумулятор системи

зворотнього осмосу. Ємність підключена до системи через електромагнітний клапан, котрий регулюється системою з відповідним електродним датчиком.



*1 – ємність із мінеральною водою; 2 – прозорий проміжок для контролю рівня рідини;
3 – дросель; 4 – спарений подвійний кран*

Рисунок 46 – Спрощена схема модернізації чотириступеневої системи

Крім цього, було підібрано реагенти для дозування в оброблену воду зворотноосмотичних систем для отримання фізіологічно повноцінної питної води згідно чинних нормативних документів. Дозування такої суміші в оброблену воду з технічної точки зору не викликає жодних труднощів, тому може бути реалізовано існуючим сьогодні обладнанням. Запропоновані заходи дозволять суттєво покращити якість обробки води системами зворотного осмосу малої та середньої продуктивності та знизити навантаження на довкілля за рахунок зменшення неконтрольованого скиду відходів експлуатації таких систем.

Сьомий розділ присвячено обґрунтуванню нової схеми знешкодження шахтних вод шляхом захоронення в підземних горизонтах. Традиційна технологія передбачає змішування шахтних вод із кількох горизонтів та транспортування отриманої суміші на поверхню для знешкодження чи скидання в поверхневі водойми (рис. 47).

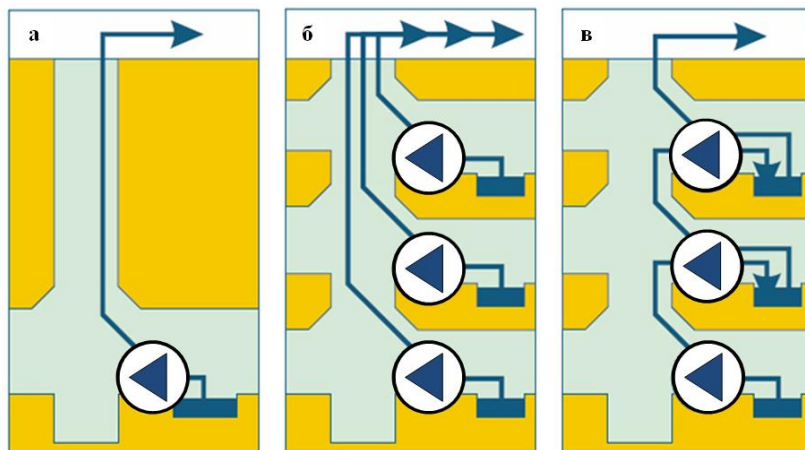
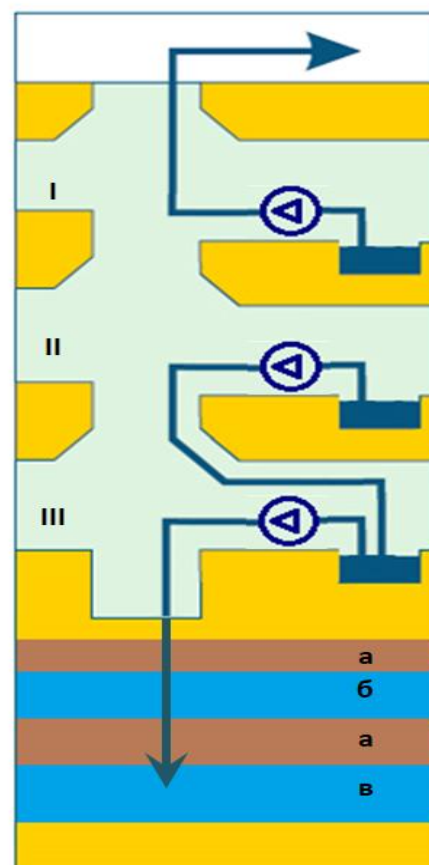


Рисунок 47 – Основні технологічні схеми водовідведення з шахт

Таким чином на виході із системи водовідливу формується суміш із вод з усіх підземних горизонтів. Найчастіше, зважаючи на залягання на глибинах більше 500-800 м мінералізованих вод, потік шахтних вод характеризується підвищеною мінералізацією, жорсткістю та наявністю широкого спектру інших забруднень. Зважаючи на величезні об'єми шахтних вод, в реальних умовах їх очищення чи знешкодження практично не проводиться, за виключенням коагуляції та відстоювання.

Тому було розроблено нетрадиційний підхід до вирішення проблеми шахтних вод. Ідея реалізується наступним чином. На першому етапі відбувається розділення потоків з різних горизонтів. Прісні шахтні води з незначним солевмістом (горизонт I), які формуються на невеликих глибинах, транспортуються на земну поверхню і скидаються в природні поверхневі водойми. За необхідності ці води можна додатково очищати з подальшим використанням у якості вод господарсько-питного призначення (рис. 48). Солонуваті води (горизонт II) направляються в спеціальні накопичувачі на глибших горизонтах з подальшим закачуванням в підземні горизонти. У випадку, коли надлишкова мінералізація води (в порівнянні із вимогами нормативних документів) відносно незначна, ефективним рішенням є облаштування систем зворотньоосмотичного очищення безпосередньо в шахті. Але для реалізації такого підходу потрібні сприятливі геологічні умови обраної ділянки. При такій схемі перміат транспортується до вищого горизонту і далі, разом з прісними водами, транспортується на поверхню. Концентрат транспортується на більші глибини. Загальна мінералізація концентрату в такому випадку не буде більша за мінералізацію міжпластових вод, що знаходяться на більш нижчому горизонті, оскільки при баромембранній очистці мінералізація може збільшитись в 2-3 рази в порівнянні із початковими значеннями.

Високомінералізовані води з нижнього горизонту та залишки вод з вищих горизонтів через спеціально влаштовану свердловину за допомогою насосів закачуються до глибшого водоносного горизонту. Такий процес не буде жодним чином змінювати характеристики вод у відповідному горизонті, оскільки хімічні властивості та загальна мінералізація в цьому горизонті значно перевищують відповідні показники у водах, що транспортуються з вищих горизонтів.



*а – водотриви; б – буферний горизонт;
в – поглинаючий горизонт*

Рисунок 48 – Нова схема водовідведення з шахт

При реалізації запропонованої технології знешкодження шахтних вод та концентратів, що утворюються в процесах баромембранного очищення води, можна отримати ряд екологічних та соціальних переваг:

- попередження процесів підвищення вмісту солей в різних поверхневих водоймах. За 5-10 років мінералізація повернеться до стійких традиційних значень в результаті проходження природних процесів;
- можливість забезпечити населення питною водою необхідної якості, особливо для промислових регіонів України, де відчувається дефіцит водних ресурсів і, разом з тим, знаходяться більша частина шахт;
- зменшення кількості і подальша ліквідація накопичувачів розсолів та сильно мінералізованих вод, зниження їх негативного впливу на довкілля;
- зниження витрат на процеси водовідведення із шахт за рахунок скорочення шляху транспортування води та за рахунок отримання додаткових прибутків від продажу якісної питної води місцевому населенню.

Для оцінки доцільності поховання шахтних вод в підземних горизонтах були використані дані реальної шахти на території України. Розробка вугілля ведеться на чотирьох горизонтах – 1023 м, 965 м, 741 м та 547 м. Система водовідливу побудована за ступінчатою схемою – з нижнього горизонту вода піднімається на попередній, змішується з існуючими там водами і піднімається на вищий горизонт. Загальна витрата шахтних вод в середньому складає 170 м³/год. Води всіх горизонтів піднімаються на поверхню в ставок-відстійник. Після відстоювання та відділення зважених речовин очищена таким чином вода через каскад додаткових ставків скидається в р. Західний Буг. Крім затрат на підйом води та прокачування через каскад очисних споруд, підприємство повинно сплачувати екологічний збір за скид в довкілля значної кількості додаткових речовин (табл. 5). Тоді загальні затрати на водовідведення протягом року для шахти складатимуть 169 799 668 грн.

Таблиця 5 – Витрати на знешкодження шахтних вод

Водоносний горизонт	Витрата води, м ³ /добу	Основні витрати, грн.						Підйом води, грн.	Загальні витрати, грн/доб
		За скид в довкілля							
		Змулених речовин		Хлоридів		Сульфатів			
		Маса, т	Плата, грн.	Маса, т	Плата, грн.	Маса, т	Плата, грн.		
Традиційна схема									
Суміш вод всіх горизонтів	4080	1,20	445	1,9	693	3,5	1 281	462 784	465 204
Нова схема									
547 м	1608	-	-	-	-	-	-	-	0
741 м	1128	-	-	-	-	-	-	-	0
965 м	960	-	-	-	-	-	-	30 744	30 744
1023 м	384	-	-	-	-	-	-		

Загальні витрати за рік: **традиційна схема** – 169 799 668 грн; **нова схема** – 11 221 560 грн. **Економічний ефект** – 158 578 108 грн.

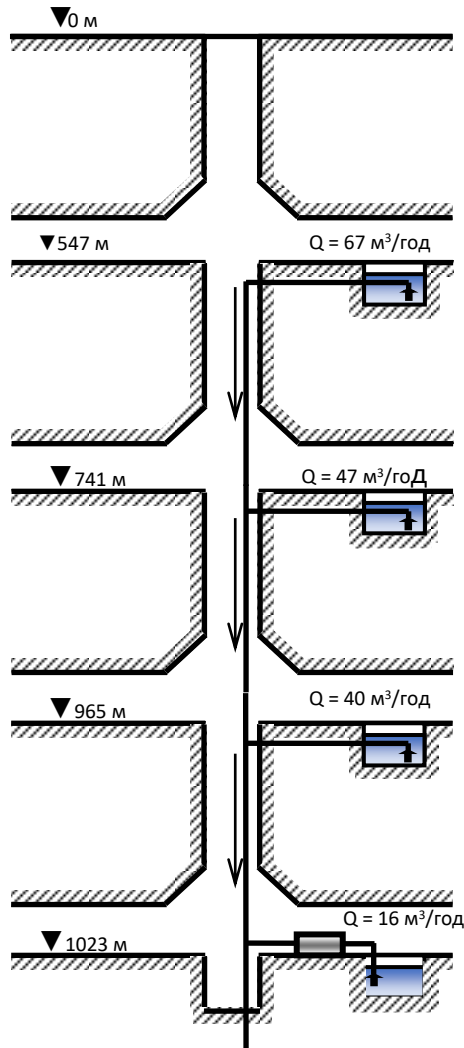


Рисунок 49 – Схема водовідливу згідно нової концепції

Згідно нової концепції напрям руху шахтних вод змінюється на протилежний (рис. 49). Найбільш простим варіантом є захоронення всіх шахтних вод шляхом закачування їх в поглинальний горизонт.

Оскільки мінералізація вод кожного наступного по глибині водоносного горизонту на 3-5 г/дм³ більша від попереднього, то закачування в поглинальний горизонт вод меншої мінералізації не справлятиме негативного впливу на загальний склад води в ньому. Оцінка економічної та екологічної ефективності нової концепції знешкодження шахтних вод показує, що впровадження нової концепції дозволяє знизити ці витрати більше ніж в 15 разів і щорічно отримувати економію в 158 млн. грн. Якщо зважити на незначні капітальні затрати, то впровадження такої концепції є цілком прийнятним з усіх точок зору.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаних теоретичних та експериментальних досліджень створено та поглиблено наукові основи ефективного захисту гідросфери від забруднення відходами систем водообробки та технологічними розчинами.

1. Вперше розроблено наукові засади використання матеріалів з капілярними властивостями в технологічних процесах знешкодження висококонцентрованих розчинів та випарювання мінералізованих та забруднених вод. Детально описано загальний механізм проходження процесу, розглянуто ключові властивості та вплив головних факторів. Виведено основні залежності між характеристиками процесу використання матеріалів з капілярними властивостями. Використання капілярного ефекту разом з процесами випаровування води при її капілярному підйомі в пористому матеріалі дає можливість створювати ефективні, дешеві та конструктивно досить прості системи для знешкодження різноманітних розчинів шляхом випаровування води та кристалізації розчинених сполук.

2. Доведено можливість застосування матеріалів з капілярними властивостями в ролі компоненту, що інтенсифікує процес випаровування води з поверхні рідини. Встановлено, що збільшення інтенсивності процесу випаровування відбувається за рахунок значно більшої площі випаровування, котра забезпечується капілярним матеріалом. Вагомою перевагою вказаного процесу є те, що він не вимагає жодних додаткових пристроїв, оскільки таке збільшення площі реалізується за рахунок сил капілярного підняття рідини. В окремих випадках збільшення інтенсивності випаровування може становити більше ніж 2-2,5 порядки. Цей факт є вказує на перспективність подальших досліджень в даному напрямку та можливість впровадження даного рішення на різних промислових об'єктах.

3. Обґрунтовано умови застосування систем із матеріалів з капілярними властивостями, основні фактори, що впливають на їх ефективність, описано їх переваги та недоліки. Теоретично обґрунтовано досягнення на визначеній висоті тканинного полотна умов кристалізації розчинених речовин та запропоновано залежності для розрахунку параметрів зони кристалізації. Запропоновано кілька варіантів обладнання для реалізації описаного ефекту. Проведено дослідження лабораторних зразків такого обладнання, зазначено основні переваги та недоліки кожної конструкції, проведено їх патентування. Розроблено конструкцію модуля для випарювання, готового до впровадження, котрий дозволяє формувати на його основі системи будь-якої продуктивності.

4. Вперше досліджено процеси термічного знешкодження регенераційних розчинів іонообмінного пом'якшення води. Встановлено умови їх випарювання при наявності надлишкової енергії та можливість повторного використання в технологічному процесі. Вивчено можливість відновлення регенераційних розчинів шляхом упарювання в установках з використанням матеріалів з капілярними властивостями.

5. Вдосконалено технологію реагентного відновлення регенераційних розчинів з можливістю використання їх в системах пом'якшення води малої та середньої продуктивності. Детально досліджено ефективність різних реагентів при пом'якшенні води вказаними системами, запропоновано найбільш прийнятні процеси розділення твердої та рідкої фаз. Вивчено вплив флокулянтів на ефективність відділення твердої фази фільтруванням, вибрано найбільш ефективні та підібрано їх концентрації. Розроблено технологічну

схему відновлення регенераційних розчинів іонообмінного пом'якшення води в установках малої та середньої продуктивності.

6. Удосконалено системи фіксації іонів жорсткості при пом'якшенні води з використанням іонного обміну, запропоновано прості та дешеві конструкції індикаторів, підібрано необхідні реагенти та їх концентрації. Вперше запропоновано використовувати електроліз в процесах контролю моменту насичення іонообмінного фільтру в системах пом'якшення води. Розроблено практичну конструкцію апарату для використання в автоматизованих системах.

7. Детально досліджено особливості класичної содова-натрієвої технології та процеси пом'якшення води з використанням фосфат-аніонів. Оцінено можливість використання їх в системах пом'якшення води малої та середньої продуктивності. Встановлено, що фосфати кальцію та магнію формуються в широкому діапазоні температур та значень водневого показника, забезпечують високу ефективність, однак відрізняються значною дисперсністю осаду. Серед запропонованих флокулянтів найбільш ефективним виявилися флокулянт аніонного типу Magnofloc-336 та флокулянт катіонного типу Zetag-7692.

8. Вивчено ефективність використання в якості осаджувача фосфату амонію, комплексного реагенту, в якому частина фосфатів замінена на карбонати, силікатів. Встановлено, що така заміна не сприяє покращенню параметрів твердої фази з точки зору її ефективного відділення від води. На основі різних хімічних сполук фосфатів розроблено реагент для пом'якшення води, котрий дозволяє ефективно видаляти іони кальцію та магнію, не підвищуючи водневий показник обробленої води. Запропоновано технологічну схему реагентного пом'якшення води в системах малої та середньої продуктивності. Зазначено особливості впровадження систем пом'якшення на промислових підприємствах.

9. Проведені необхідні дослідження та розроблено технологічні схеми реагентної та електрохімічної регенерації поліпропіленових фільтрів зворотньоосмотичних систем малої та середньої продуктивності з мінімальним утворенням відходів. Проведено аналіз можливості утилізації компонентів систем зворотнього осмосу, головними складовими яких є різні види активованого вугілля. Визначено можливі два напрямки такої утилізації – термічний метод та використання багаторазових картриджів. Пораховані ресурси енергії при спалюванні використаних фільтрів, наведені приклади корпусів багаторазових фільтрів. Розглянуто проблеми домінералізації води після зворотнього осмосу. Запропоновано кілька простих варіантів вирішення даної проблеми з доведенням загального вмісту солей до нормативних значень.

10. Вперше запропоновано нову концепцію знешкодження шахтних вод шляхом поховання їх в спеціальних накопичувальних горизонтах, що ізольовані від горизонтів з прісними чи слабомінералізованими водами. При цьому негативного впливу на підземні горизонти не спостерігається, оскільки мінералізація шахтних вод значно нижча мінералізації води в накопичувальному горизонті. Поховання шахтних вод в підземних горизонтах

дозволяє попередити засолення вод поверхневих водойм і протягом 5–10 років повернути їх води до природного рівня мінералізації.

11. Обґрунтовано доцільність розділення змішаного потоку шахтних вод на прісні та мінералізовані води, що дозволяє шляхом додаткової обробки прісного потоку отримувати якісні питні води для забезпечення потреб населення та промисловості. Використання баромембранних технологій забезпечує отримання якісної питної води також і з слабо солоних вод, захоронюючи концентрати в поглинальних горизонтах. При цьому, зважаючи на вирішення проблеми концентратів, обладнання для реалізації баромембранних технологій може бути розміщено безпосередньо в шахтних розробках.

12. Показано, що отриманий в результаті впровадження концепції ефект може сягати більше 100 млн грн на одній шахті.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії (розділи у колективних монографіях):

1. Трус І.М., Галиш В.В., Скиба М.І., **Радовенчик Я.В.**, Гомеля М.Д. Нові високоефективні методи очищення води від розчинних та нерозчинних поллютантів / Монографія. – К.: Кондор-Видавництво, 2020. – 272 с. *Особистий внесок здобувача полягає у підготовці 5 розділу монографії.*

2. Радовенчик В.М., Іваненко О.І., **Радовенчик Я.В.**, Крисенко Т.В. Застосування феритних матеріалів в процесах очищення води / Монографія. – Біла Церква: Видавництво О.В. Пшонківський, 2020. – 215 с. *Особистий внесок здобувача полягає у підготовці 2 розділу монографії.*

3. **Радовенчик Я.В.** Волокнисті матеріали в процесах захисту гідросфери від забруднення / Монографія. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 141 с.

4. **Radovenchyk I.V.**, Trus I.M., Radovenchyk V.M., Gomelya M.D., Hlushchuk V.R. A new method of disposal of concentrated solutions by crystallization of their components // Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: колективна монографія – Київ: Яроченко Я.В., 2022. – С. 424-451. <https://doi.org/10.51500/7826-23-0>. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментальної частини досліджень.*

Статті у наукових фахових виданнях України:

5. A. Petrychenko, I. Makarenko, **I. Radovenchyk**, T. Shabliy. Removal of ammonium ions from aqueous solutions using electrodialysis // Eastern-European journal of Enterprise Technologies. – 2018. – № 4/6 (94). – p. 26-34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140549>. (фахове видання, **Scopus Q3**). *Особистий внесок здобувача полягає у розробці конструкції та створенні двокамерних електролізерів для вивчення процесів електрохімічного окислення амонію у водних розчинах при різних значеннях щільності струму, часу електролізу та різних характеристиках вихідних розчинів.*

6. I. Trus, N. Gomelya, V. Halysh, **I. Radovenchyk**, O. Stepova, O. Levytska. Technology of the comprehensive desalination of wastewater from mines // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 3/6 (105). – p. 21-27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206443>. (фахове видання категорії «А», **Scopus Q3**). *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень*

зворотньоосмотичних та нанофільтраційних мембран щодо селективності по окремих компонентах мінералізованих вод.

7. **Radovenchyk I. V.**, Trus I. M., Halysh V. V., Radovenchyk V. M., Chuprinov Ye. V. A new method of disposal of concentrated solutions by crystallization of their components // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2022. – № 3. – р. 44-50. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-3/044>. (фахове видання категорії «А», **Scopus Q3**). *Особистий внесок здобувача полягає у розробці плану досліджень та технічній реалізації проведення експериментів по кристалізації компонентів високо мінералізованих розчинів.*

8. **Радовенчик Я.В.**, Радовенчик В.М. Особливості освітлення води матеріалами з капілярними властивостями // *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. – 2017. – № 1. – с. 78-83. <https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2017.119477>. (фахове видання). *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень продуктивності фільтру з капілярних матеріалів при різних умовах навколишнього середовища та різних характеристиках капілярних матеріалів.*

9. Гомеля М.Д., Грабітченко В.М., **Радовенчик Я.В.**, Макаренко І.М. Отримання активного хлору електролізом концентратів зворотньоосмотичного опріснення води // *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2017. – № 2. – с. 58-65. <https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2017.119474>. (фахове видання). *Особистий внесок здобувача полягає у розробці конструкцій електролізерів для процесів обробки концентратів, обробці отриманих результатів.*

10. Радовенчик В.М., Нецерет Т.С., **Радовенчик Я.В.**, Іванова В.В. Знезалізнення води фільтруванням через завантаження із карбонату кальцію // *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2018. – №1. – с. 85-89. (фахове видання). *Особистий внесок здобувача полягає у визначенні залежності ефективності видалення іонів Fe^{2+} завантаженням з карбонату кальцію при різних швидкостях фільтрування.*

11. Петриченко А.І., Гомеля М.Д., **Радовенчик Я.В.** Видалення фосфатів з води методом хімічного та електрохімічного осадження // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. – 2018. – Т. 29 (68). – № 4 (2). – с. 106-110. (фахове видання). *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень процесів видалення фосфатів з використанням методів електрокоагуляції.*

12. Гомеля М.Д., **Радовенчик Я.В.**, Побережний М.В. Інтенсифікація низькотемпературного випарювання рідин // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. – 2019. – №2. – с. 86-91. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у розробці та реалізації конструкцій випаровувачів, плануванні експериментів та узагальнені отриманих результатів.*

13. Крижановська Я.П., Гомеля М.Д., **Радовенчик Я.В.** Безвідходна технологія очистки високо мінералізованих вод з отриманням коагулянту // *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2019. – № 1. – с. 67-72. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171047>. (фахове видання). *Особистий внесок здобувача полягає у розробці трикамерного*

електролізу з аніонообмінною мембраною МА-41 та кат іонообмінною мембраною МК-40 та контролі проведення досліджень.

14. Крисенко Т.В., **Радовенчик Я.В.**, Глушко О.В., Сіренко Л.В. Якісні реакції для контролю насичення іонів під час іонообмінного пом'якшення води // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. – 2020. – Том 31 (70) . – № 1. – с. 71-77. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.1-2/13>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу існуючих методик аналізу наявності іонів Ca^{2+} та Mg^{2+} у розчинах, підготовці матеріалів статі до друку.*

15. **Радовенчик Я.В.**, Гомеля М.Д., Радовенчик В.М. Нова концепція знешкодження шахтних вод та концентратів процесів водоочищення // Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2020. – № 1. – с. 43-49. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2020.207811>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні існуючих технологій знешкодження та переробки шахтних вод та високо мінералізованих концентратів, дослідженні можливості знешкодження шахтних вод шляхом закачування їх в підземні горизонти.*

16. **Радовенчик Я.В.**, Крисенко Т.В., Побережний М.В. Випарювання рідин при низьких температурах // Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2021. – №4. – с. 74-81. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2021.248947>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень та підготовці статті до друку.*

17. **Радовенчик Я.В.**, Крисенко Т.В., Побережний М.В., Радовенчик В.М. Зниження кольоровості води матеріалами з капілярними властивостями // Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2021. – №2. – с. 65-71. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2021.235869>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у підготовці експериментальної установки для проведення досліджень ефективності капілярних матеріалів.*

18. **Радовенчик Я.В.**, Гордієнко К.Ю., Радовенчик В.М., Крисенко Т.В. Особливості хімічного висадження іонів кальцію з розведених водних розчинів // Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2022. – №2. – с. 72-78. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260353>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні літературного аналізу та постановці плану проведення дослідження.*

19. **Радовенчик Я.В.**, Гордієнко К.Ю., Крисенко Т.В., Радовенчик В.М. Ефективність видалення іонів магнію з води в процесах її пом'якшення // Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2022. – №4. – с. 88-94. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2022.269815>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментальних досліджень процесів видалення іонів магнію з водних розчинів.*

20. Гордієнко К., **Радовенчик Я.**, Крисенко Т., Радовенчик В. Ефективність висадження іонів кальцію з розведених водних розчинів у вигляді фосфатів // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – №5 (313). – с. 134-140. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-313-5-134-140>. (фахове видання категорії «Б»).

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні впливу різноманітних факторів на процес пом'якшення води.

21. Гордієнко К.Ю., **Радовенчик Я.В.**, Радовенчик В.М., Бакуновський О.О. Технології пом'якшення води для систем малої і середньої продуктивності // Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2024. – №4. – с. 51-61. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2024.319016>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у підборі реагентів для проведення досліджень та підготовці матеріалів статті для друку.*

22. Радовенчик В.М., Гордієнко К.С., **Радовенчик Я.В.**, Крисенко Т.В. Використання поверхнево-активних речовин для ефективного видалення часток фосфату кальцію із води // Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2022. – №3. – с. 94-102. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265365>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у підборі флокулянтів та контролі проведення досліджень.*

23. **Радовенчик Я.В.**, Гордієнко К.Ю., Крисенко Т.В., Іваненко О.І. Підвищення ефективності видалення сполук магнію з води в процесах її пом'якшення // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. – №1. – с. 225-230. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/34>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у підборі флокулянтів та розробці плану проведення експериментів.*

24. Гордієнко К.Ю., **Радовенчик Я.В.** Використання флокулянтів в процесах пом'якшення води // Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2023. – № 3. – с. 94-100. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2023.288254/>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у розробці плану проведення досліджень та контролі проведення експериментів по використанню флокулянтів.*

25. Карпенко М.В., **Радовенчик Я.В.**, Іваненко О.І. Видалення сполук заліза із механічних фільтрів побутових зворотноосмотичних систем очищення води // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2023. – № 2. – с. 127-132. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279720>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні існуючих технологій регенерації механічних картриджів та розробці схеми проведення досліджень.*

26. **Радовенчик Я.В.**, Гордієнко К.С., Бакуновський О.О., Іванова В.П. Дослідження ефективності процесів пом'якшення води силікатом натрію // Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2024. – №2. – с. 62-70. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2024.307362>. (фахове видання категорії «Б»). *Особистий внесок здобувача полягає у обробці експериментальних даних по дослідженню ефективності пом'якшення води силікатом натрію.*

Статті у періодичних наукових виданнях інших держав:

27. Gomelya M., Shabliy T., **Radovenchuk I.**, Overchenko T., Halysh V. Estimation of the efficiency of ammonia oxidation in anolyte of two-chamber electrolyzer // Journal of Ecological Engineering. – 2019. – V. 20, № 5. – p. 121-129. <https://doi.org/10.12911/22998993/105337>. (**Scopus Q2**). *Особистий внесок здобувача полягає у підготовці двокамерних електролізерів та підборі оптимальних умов*

проведення процесу електрохімічного окиснення розчину аміаку в електролізері з мембраною МА-41.

28. I. Trus, **I. Radovenchyk**, V. Halysh, M. Skiba, I. Vasylenko, V. Vorobyova, O. Hlushko, L. Sirenko. Innovative approach in creation of integrated technology of desalination of mineralized water // Journal of Ecological Engineering. – 2019. – № 20 (8). – p. 107-113. <https://doi.org/10.12911/22998993/110767>. (**Scopus Q2**). *Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні ефективності використання осадів, що утворюються в процесах баромембранного очищення води, в якості добавок в галузі виробництва будівельних матеріалів.*

29. Trus I., **Radovenchyk I.**, Halysh V., Chuprinov E., Benatov D., Hlushko O., Sirenko L. Innovative method for water deiron ions using capillary material // Journal of Ecological Engineering. – 2022. – 23(3). – p. 174-182. <https://doi.org/10.12911/22998993/145467>. (**Scopus Q2**). *Особистий внесок здобувача полягає у підготовці капілярних матеріалів та обробці результатів експериментів.*

30. Gomelya M., Shabliy T., **Radovenchyk I.**, Vakulenko A. Determining the efficiency of reverse osmosis in the purification of water from phosphates // Journal of Ecological Engineering. – 2023. – 24(2). – p. 238-246. <https://doi.org/10.12911/22998993/157023>. (**Scopus Q2**). *Особистий внесок здобувача полягає у підготовці зворотньоосмотичної установки та обробці результатів експериментів.*

31. Trus I., Halysh V., **Radovenchyk I.**, Fleisher H. Conditioning of iron-containing solutions // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2020. – №55. – p. 486-491. (**Scopus Q3**). *Особистий внесок здобувача полягає у підготовці однокамерних електролізерів та модельних розчинів двовалентного заліза з різними початковими концентраціями.*

32. **I. Radovenchyk**, I. Trus, V. Halysh, T. Krysenko, E. Chuprinov, A. Ivanchenko. Evaluation of optimal conditions for the application of capillary materials for the purpose of water deironing // Ecological Engineering and Environmental Technology. – 2021. – V. 22. No. 2. – p. 1-7. <https://doi.org/10.12912/27197050/133256>. (**Scopus Q3**). *Особистий внесок здобувача полягає у підборі капілярних матеріалів та проведенні експериментів щодо дослідження процесів видалення сполук заліза з водних розчинів.*

33. I. Trus, M. Gomelya, M. Tverdokhlib, V. Halysh, **I. Radovenchyk**, D. Benatov. Purification of mine waters using lime and aluminum hydroxochloride // Ecological Engineering and Environmental Technology. – 2022. – № 5. – p. 169–176. <https://doi.org/10.12912/27197050/152104>. (**Scopus Q3**). *Особистий внесок здобувача полягає у підготовці досліджуваних зразків шахтних вод та обробці результатів досліджень.*

34. **I. Radovenchyk**, I. Trus, V. Halysh, T. Krysenko. Methods of processing liquid waste concentrates using materials with capillary properties // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2022. – № 57 (5). – p. 946–952. (**Scopus Q3**). *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень по ефективності використання матеріалів з капілярними властивостями.*

35. **Radovenchyk I.**, Ivanenko O., Karpenko M., Radovenchyk V. Removal of iron compounds from mechanical filters of household reverse osmosis systems water purification // Ecological Engineering and Environmental Technology. – 2023. – 24 (6). – p. 163-172. <https://doi.org/10.12912/27197050/168097>. (**Scopus Q3**). *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень ринку побутових систем доочищення води та розробці методики проведення експериментів з регенерації механічних картриджів.*

36. M. Gomelya, T. Shabliy, **I. Radovenchyk**, A. Vakulenko. Application of low-pressure reverse osmosis membranes for drinking water softening // Ecological Engineering and Environmental Technology. – 2023. – № 5. – p. 154-162. <https://doi.org/10.12912/27197050/165897>. (**Scopus Q3**). *Особистий внесок здобувача полягає у обробці експериментальних даних та підготовці матеріалів до публікації.*

37. **Radovenchyk I.**, Hordiienko K., Radovenchyk V., Overchenko T., Ivanenko O., Krysenko T., Sirenko L. Water softening systems of low and medium capacity // Ecological Engineering and Environmental Technology. – 2024. – 12. – p. 194-202. <https://doi.org/10.12912/27197050/194157>. (**Scopus Q3**). *Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні та розробці систем малої та середньої продуктивності для пом'якшення води в побутових та офісних умовах.*

Патенти на винахід та патенти на корисну модель:

38. **Радовенчик Я.В.**, Гомеля М.Д., Радовенчик В.М. Модуль для концентрування розчинів та кристалізації наявних в них речовин. Патент на винахід № 127579. Україна: МПК В01D9/00, В01D9/02, В01D1/06; Заявл. 08.06.2021 р.; Опубл. 18.10.2023 р., Бюл. № 42. *Особистий внесок здобувача полягає у розробці технічної ідеї винаходу.*

39. Згуровський М.З., Гомеля М.Д., Дуда Б.І., Мовчанюк О.М., **Радовенчик Я.В.**, Вембер В.В. Фільтр для глибокого очищення води. Патент на корисну модель № 128819. Україна: МПК В01D29/56, В01D61/00, В01D33/04, В01D71/10, С02F9/00, С02F101/20, С02F103/06; Заявл. 04.04.2018 р.; Опубл. 10.10.2018 р., Бюл. №19. *Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні характеристик прототипу фільтру.*

40. **Радовенчик Я.В.** Спосіб управління процесом домінералізації води. Патент на корисну модель № 146650. Україна: МПК С02F1/44; Заявл. 04.04.2018 р.; Опубл. 10.03.2021 р., Бюл. №10.

41. **Радовенчик Я.В.**, Гомеля М.Д. Пристрій для концентрування розчинів та кристалізації речовин. Патент на корисну модель № 147576. Україна: МПК В01D9/00; Заявл. 04.04.2018 р.; Опубл. 19.05.2021 р., Бюл. № 20. *Особистий внесок здобувача полягає у технічній реалізації пропонуваного пристрою та дослідженні експериментального зразка.*

42. **Радовенчик Я.В.**, Трус І.М., Галиш В.В. Пристрій з рухомим тканинним полотном для концентрування розчинів та кристалізації наявних в них речовин. Патент на корисну модель №148202. Україна: МПК В01D9/00; Заявл. 04.04.2018 р.; Опубл. 14.07.2021 р., Бюл. №38. *Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні існуючих аналогів та прототипів заявленого пристрою.*

43. **Радовенчик Я.В.**, Бакуновський О.О., Іванова В.П., Радовенчик В.М. Спосіб домінералізації води після баромембранних установок. Патент на корисну модель № 150615. Україна: МПК С02F1/44, С02F1/68; Заявл. 10.08.2021 р.; Опубл. 09.03.2022 р., Бюл. №10. *Особистий внесок здобувача полягає у розробці технічного рішення пропонуваного способу домінералізації води.*

44. **Радовенчик Я.В.**, Гомеля М.Д., Крисенко Т.В. Пристрій з похилим тканинним полотном для концентрування розчинів та кристалізації наявних в них речовин. Патент на корисну модель № 148678. Україна: МПК В01D9/00; Заявл. 04.04.2018 р.; Опубл. 01.09.2021 р., Бюл. №35. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень ефективності роботи заявлено пристрою.*

45. **Радовенчик Я.В.**, Мікульонок І.О., Трус І.М., Галиш В.В. Кристалізатор. Патент на корисну модель № 150381. Україна: МПК В01D9/00; Заявл. 04.04.2018 р.;

Опубл. 09.02.2022 р., Бюл. №6. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень ефективності процесів кристалізації при використанні капілярних матеріалів.*

46. **Радовенчик Я.В.** Корпус для фільтрів очищення води систем малої та середньої продуктивності. Патент на корисну модель № 154419. Україна: МПК C02F1/18, B01D35/30; Заявл. 27.03.2023 р.; Опубл. 15.11.2023 р., Бюл. № 46.

47. **Радовенчик Я.В.** Спосіб відновлення регенераційних розчинів натрій-катіонного пом'якшення води. Патент на корисну модель № 154517. Україна: МПК B01D9/00; Заявл. 09.02.2023 р.; Опубл. 22.11.2023 р., Бюл. № 47.

48. **Радовенчик Я.В.,** Гордієнко К.Ю. Спосіб пом'якшення води. Патент на корисну модель № 154768. Україна: МПК C02F5/00, C02F5/04; Заявл. 06.06.2023 р.; Опубл. 13.12.2023 р., Бюл. № 50. *Особистий внесок здобувача полягає у розробці технічної ідеї пропонованого способу.*

49. Бакуновський О.О., **Радовенчик Я.В.,** Іванова В.П., Радовенчик В.М. Фільтр для очищення води в польових умовах. Патент на корисну модель № 154769. Україна: МПК C02F1/18; Заявл. 06.06.2023 р.; Опубл. 13.12.2023 р., Бюл. № 50. *Особистий внесок здобувача полягає у розробці конструктивних особливостей пропонованого фільтру.*

50. **Радовенчик Я.В.,** Гомеля М.Д. Спосіб фіксації іонів кальцію в процесах іонообмінного пом'якшення води. Патент на корисну модель № 156441. Україна: МПК C02F1/00; Заявл. 27.03.2023 р.; Опубл. 26.06.2024 р., Бюл. №26. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментальних досліджень пропонованого способу та обробці отриманих результатів.*

51. Гомеля М.Д., **Радовенчик Я.В.,** Трус І.М. Фільтр для очищення води шляхом розділення твердої та рідкої фаз. Свідоцтво на промисловий зразок №46650. Україна; Заявл. 04.10.2023 р.; Опубл. 24.07.2024 р., Бюл. № 30. *Особистий внесок здобувача полягає у розробці конструкції фільтру з капілярними елементами.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

52. Лясота В.О., **Радовенчик Я.В.** Очищення природних і стічних вод від натрію і кальцію шляхом нанофільтрації // Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (23 травня 2019 р.). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – С. 58-59.

53. **Radovenchik I.,** Trus I., Halysh V., Skiba M. New method for water purification from iron ions by materials with capillary action / Роботи всеукраїнської наукової конференції «Євроінтеграція екологічної політики України» (29-31 травня 2019 р.). – Одеса. – 2019. – С. 175.

54. **Радовенчик Я.В.,** Крисенко Т.В. Випаровування рідин при низьких температурах // Збірник XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Літні наукові підсумки 2019 року» (5 червня 2019 р.). – Дніпро. – 2019. – С. 19-25.

55. **Радовенчик Я.В.,** Крисенко Т.В. Випробування інтенсифікатора випарювання в природних умовах // Тези XIX Міжнародної конференції «Експериментальні та теоретичні дослідження сучасної науки» (23 червня 2019 р.). – Дніпро. – 2019. – С. 12-19.

56. **Радовенчик Я.В.,** Крисенко Т.В., Коломієць О.В. Вплив різноманітних факторів на властивості волокнистих матеріалів // Збірник робіт XV Всеукраїнських наукових Таліївських читань (30 жовтня 2019 р.). – Харків. – 2019. – С. 85-87.

57. Лясота В.О., **Радовенчик Я.В.** Видалення поверхнево-активних речовин, натрію та кальцію методом нанофільтрації // III Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки» (14 листопада 2019 р.). – Київ. – 2019. – С. 113-114.

58. Трус І.М., **Радовенчик Я.В.**, Галиш В.В., Гомеля М.Д., Мігранова В.О. Оцінка ефективності нанофільтраційного знесолення води // Матеріали Х Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (29 - 30 квітня 2020 р.). – Чернігів: ЧНТУ. – 2020. – Т. 2. – С. 120-123.

59. Trus I., **Radovenchyk I.**, Nosachova J., Hlushko O., Gomelya M., Vozna I. Development of a waste-free technology of mine water desulphatization involving the use of lime and aluminium coagulants // The 5th International scientific and practical conference «Science, society, education: topical issues and development prospects» (12-14 квітня 2020 р.). – м. Харків. – 2020. – С. 205-211.

60. Гомеля М.Д., **Радовенчик Я.В.** Знешкодження шахтних вод татехнологічних концентратів // XXI Міжнародна науково-практична конференція «Екологія. Людина. Суспільство» (21 травня 2020 р.). – Київ. – 2020. – С. 212-215.

61. Гордієнко К.Ю., Радовенчик В.М., **Радовенчик Я.В.** Особливості кристалізації карбонату кальцію з розведених розчинів / Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Modern Scientific Trends and Standards» (February 16-18, 2022). – Santa Rosa, Argentina. – 2022. – p. 381-385.

62. Гордієнко К.Ю., **Радовенчик Я.В.**, Крисенко Т.В., Радовенчик В.М. Ефективність видалення з водних розчинів іонів кальцію фосфатами // The 13th International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science” (August 17-19, 2022). – Vancouver, Canada. – 2022. – С. 75-81.

63. **Радовенчик Я.В.**, Гордієнко К.Ю., Крисенко Т.В., Радовенчик В. М. Відстоювання суспензії фосфату кальцію в процесах пом'якшення води // Proceedings of the 12th International scientific and practical conference «Modern science: innovations and prospects». – Stockholm, Sweden. – 2022. – p. 93-99.

64. Гордієнко К.Ю., **Радовенчик Я.В.**, Гожан Ю.М. Видалення іонів магнію з води фосфатами / Proceedings of II International Scientific and Practical Conference (7-9 December 2022). – Toronto, Canada. – 2022. – p. 206-211.

65. **Радовенчик Я.В.**, Гожан Ю.М. Фракційне випарювання відпрацьованих регенераційних розчинів / Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання” (5-7 грудня 2023 р.). – м. Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – 2023. – С.102 - 104.

66. Маслюк В., **Радовенчик Я.** Сучасні підходи до схем підготовки питної води для населення // Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (5 червня 2024 р.). – м. Київ. – 2024. – С. 164-167.

67. Гордієнко К., **Радовенчик Я.** Використання силікату натрію в технологіях пом'якшення води: оцінка ефективності // Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (5 червня 2024 р.). – м. Київ. – 2024. – С. 114-116.

68. **Радовенчик Я.В.**, Гордієнко К.Ю. Спосіб оперативного контролю виснаження іонообмінного фільтру в системах пом'якшення води / XLI International scientific and practical conference «Progressive Opportunities and Solutions of Modern Scientific Potential» (October 2-4, 2024). – Toronto, Canada. – 2024. – С. 102 - 104.

69. **Радовенчик Я.В.**, Карпенко М.В. Електрохімічна регенерація поліпропіленових картриджів систем зворотнього осмосу / International scientific-practical conference “Science, education, technology and society: problems and prospects”: conference proceedings (October 4, 2024). – Tampere, Finland: Scholarly Publisher ICSSH. – 2024. – р. 58-59.

70. **Радовенчик Я.В.**, Гомеля М.Д. Фізико-хімічні методи доочищення води / Підручник з грифом Вченої ради НТУУ «КПІ». – К.: «Кондор – Видавництво», 2016. – 264 с. *Особистий внесок здобувача полягає у підготовці 1, 2, 3, 6 розділів підручника.*

71. Гомеля М.Д., Шаблій Т.О., **Радовенчик Я.В.** Фізико-хімічні основи процесів очищення води / Підручник з грифом Вченої ради КПІ ім. Ігоря Сікорського. – К.: Кондор. – 2019. – 256 с. *Особистий внесок здобувача полягає у підготовці 1, 7 та 8 розділів підручника.*

72. Радовенчик В.М., Гомеля М.Д., **Радовенчик Я.В.** Утилізація та рекуперація відходів / Підручник з грифом Вченої ради КПІ ім. Ігоря Сікорського. – К.: Кондор. – 2020. – 246 с. *Особистий внесок здобувача полягає у підготовці 7 та 8 розділів підручника.*

АНОТАЦІЯ

Радовенчик Я.В. НАУКОВІ ЗАСАДИ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ ВІДХОДАМИ СИСТЕМ ВОДООБРОБКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИМИ РОЗЧИНАМИ. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – Екологічна безпека. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена зменшенню техногенного навантаження на гідросферу шляхом впровадження технологій утилізації та знешкодження відходів процесів очищення води та водопідготовки, а також шляхом нетрадиційного вирішення проблем скиду в довкілля значних об'ємів технологічних розчинів. Розроблено наукові засади використання матеріалів з капілярними властивостями в процесах випарювання рідин та знешкодження концентратів різноманітного хімічного складу. Запропоновано кілька конструкцій багат шарових кристалізаторів, розроблено модуль випарювання для промислового використання. Запропоновано технологію реагентної обробки розчинів хлориду натрію з багаторазовим використанням в технологічному процесі. Розроблено технологічну схему для реалізації процесів відновлення відпрацьованих регенераційних розчинів. Запропоновано прості та дешеві індикатори проскоку іонів кальцію та магнію реагентного та електрохімічного типу. Досліджено ефективність традиційних технологій пом'якшення води, визначено їх недоліки та запропоновано використовувати фосфати в якості осаджувачів іонів кальцію та магнію. Запропоновано реагентну та електрохімічну технології регенерації поліпропіленових картриджів етапу механічного очищення, заходи щодо знешкодження та утилізації картриджів комплексного очищення води, гранульованих та пресованих картриджів з активованим вугіллям. Запропоновано замінити мінералізатори в системах

доочищення води ефективною системою дозування розрахованої кількості відповідних реагентів. Обґрунтовано можливість та ефективність знешкодження шахтних вод шляхом захоронення їх в підземних горизонтах.

Ключові слова: очищення води, пом'якшення, утилізація, знешкодження відходів, електроліз, іонний обмін, флокулянти, залізо, регенераційні розчини, фільтрування, очищення стічних вод, водопідготовка, забруднення води.

SUMMARY

Radovenchyk I.V. Scientific principles of environmental protection from pollution by waste of water treatment systems and technological solutions. – Qualifying scientific work, manuscript. Dissertation for the Doctor of Technical Sciences degree (Doctor of Science) on the specialty 21.06.01 – Environmental safety. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to reducing the anthropogenic influence on the hydrosphere by implementing technologies for utilization and neutralization of waste from water purification and water treatment systems, as well as by non-traditional solutions of the problems of discharging significant volumes of technological solutions with various compositions to the environment. Scientific principles for use of materials with capillary properties in the processes of liquids evaporation and neutralization of concentrates with various chemical compositions have been developed. Several designs of multilayer crystallizers have been proposed, an evaporation module for industrial use has been developed. A technology for reagent treatment of sodium chloride solutions with repeated use in the technological process is proposed. A technological scheme for the implementation of processes for the recovery of spent regeneration solutions has been developed. Simple and cheap indicators of calcium and magnesium ion breakthrough of reagent and electrochemical type are proposed. The effectiveness of traditional water softening technologies was investigated, their shortcomings were identified, and it was proposed to use phosphates as precipitants of calcium and magnesium ions. Reagent and electrochemical technologies for the regeneration of polypropylene cartridges of mechanical purification stage, measures for the neutralization and disposal of complex water purification cartridges, granular and pressed cartridges with activated carbon are proposed. It is proposed to replace mineralizers in water treatment systems with an effective dosing system with the calculated amount of appropriate reagents. The possibility and effectiveness of mine water neutralization by burying it in underground horizons is substantiated.

Key words: Water treatment, Softening, Recycling, Waste disposal, Electrolysis, Ion exchange, Flocculants, Iron, Regeneration solutions, Filtration, Wastewater treatment, Purification, Water pollution.