

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Навчально-науковий інженерно-технічний інститут
імені акад. І.С. Гулого**

Кафедра машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

_____ Сергій БЛАЖЕНКО

(підпис)

(ім'я та прізвище)

« ___ » _____ 20__ р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Олександр ГАВВА

(підпис)

(ім'я та прізвище)

« ___ » _____ 20__ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності 133 – Галузеве машинобудування
освітньо-професійної програми «Інжиніринг фармацевтичних та
біотехнологічних виробництв»

на тему:

**Удосконалення процесу і конструкції апарату для пом'якшення води та
реконструкція дільниці підготовки води очищеної продуктивністю
15 м³/год**

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ЗОФ-2-3м

Пшонкін Максим Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

Керівник Губеня Олексій Олександрович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

Консультанти

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Рецензент

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій
розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я
не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час
підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач _____

(підпис)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут імені акад. І. С. Гулого
Кафедра машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв
Освітній ступінь «Магістр»
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
Освітньо-професійна програма: Інжиніринг фармацевтичних та біотехнологічних виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МАХФВ

_____ **Олександр ГАВВА**
“ ____ ” _____ грудня 2025 ____ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Пшонкін Максим Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **Удосконалення процесу і конструкції апарату для пом'якшення води та реконструкція дільниці підготовки води очищеної продуктивністю 15 м³/год**

Керівник роботи

Губеня Олексій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 15.10.2025 р. № 845-КС

2. Строк подання здобувачем роботи 15.12.2025

3. Вихідні дані до роботи. Предмети досліджень – обладнання для підготовки води. Апарат для пом'якшення води. Іонообмінні смоли.

4. Зміст пояснювальної записки

Анотація (українською та англійською мовами); Вступ; Матеріали і методи досліджень; Результати досліджень, їх математично-статистичне оброблення, пояснення та обговорення; Маркетингове (техніко-економічне), соціальне обґрунтування проекту; Застосування результатів (модернізація обладнання, реконструкція лінії); Безпека життєдіяльності; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу:

Слайди презентації: Актуальність теми; Сучасний стан наукової та практичної проблеми; Мета, завдання, об'єкт і предмети досліджень; Матеріали і методи досліджень; Результати досліджень та їх математично-статистичне оброблення, Висновки.

Креслення: Модернізація обладнання, реконструкція лінії (6 листів).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01.10.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Розділи пояснювальної записки:	01.11.2025	
	Вступ	10.11.2025	
	Матеріали і методи досліджень	15.11.2025	
	Результати досліджень, їх математично-статистичне оброблення, пояснення та обговорення	20.11.2025	
	Маркетингове (техніко-економічне), соціальне обґрунтування проекту	25.11.2025	
	Застосування результатів (модернізація обладнання, реконструкція лінії)	25.11.2025	
	Модернізація обладнання, реконструкція лінії	5.01.2025	
	Розрахункова частина	10.01.2025	
	Безпека життєдіяльності	12.01.2025	
	Висновки	14.01.2025	
	Презентація та креслення	15.12.2025	

Здобувач

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Максим ПШОНКІН

(прізвище та ініціали)

Олексій ГУБЕНЯ

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У магістерському проєкті розглянуто питання підвищення ефективності іонообмінного пом'якшення води в системі водопідготовки фармацевтичного виробництва, де очищена вода використовується для виготовлення рідких лікарських форм, екстрактів, а також як живлення для ультрафільтрації, зворотного осмосу, тепломереж і холодильних установок. Метою роботи було як експериментально дослідити роботу іонообмінних смол при пом'якшенні артезіанської води, так і модернізувати Na-катіонітний фільтр продуктивністю 20 т/год у складі лінії водопідготовки. Експериментальну частину виконано на тестовій іонообмінній колонці з використанням смол ECOSOFT ECOLITE CK та DOWEX HCR-S/S FF. Жорсткість вихідної та пом'якшеної води визначали у виробничій лабораторії. Показано, що один об'єм іонообмінної смоли забезпечує пом'якшення приблизно 40–60 об'ємів артезіанської води з початковою жорсткістю 5–6 мг-екв/дм³ до рівня 0,5–1,0 мг-екв/дм³. Після подальшого збільшення об'єму пропущеної води якість пом'якшення погіршується, що вимагає своєчасної регенерації завантаження. Встановлено, що смола ECOSOFT ECOLITE CK має вищу робочу обмінну ємність та довший міжрегенераційний цикл, ніж DOWEX HCR-S/S FF. Після близько 1800 циклів регенерації тривалість ефективної роботи смоли скорочується у 2–2,5 рази, що обґрунтовує необхідність її планової заміни. На основі аналізу фактичної роботи іонообмінного обладнання виявлено наявність застійних зон у колоні, де смола використовується неповністю. Запропоновано модернізацію апарата шляхом зміни схеми розподілу потоків і встановлення колекторної системи для рівномірного промивання всього об'єму завантаження. Розраховано основні параметри модернізованого Na-катіонітного фільтра (об'єм смоли 600 дм³, площа фільтрації 1,56 м², швидкість фільтрації 45 м/год, витрата солі на одну регенерацію 117 кг) та обґрунтовано їх відповідність технологічним вимогам фармацевтичного виробництва.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні залежностей між жорсткістю води, ресурсом іонообмінних смол, кількістю регенерацій і гідродинамікою потоку в колоні. Практичне значення полягає в можливості підвищення надійності та економічності роботи систем водопідготовки, зменшенні витрат солі й енергії, усуненні застійних зон та продовженні ресурсу мембранних ступенів очищення.

Ключові слова: водопідготовка, іонообмінна смола, Na-катіонування, пом'якшення води, ультрафільтрація, зворотний осмос, натрій-катіонітний фільтр.

ABSTRACT

In this Master's project, the problem of improving the efficiency of ion-exchange water softening in the water treatment system of a pharmaceutical plant is addressed. In this system, purified water is used for the production of liquid dosage forms and extracts, as well as for feeding ultrafiltration, reverse osmosis units, heating networks and refrigeration systems. The aim of the work was both to experimentally study the performance of ion-exchange resins in softening artesian water and to modernize a Na-cation exchange filter with a capacity of 20 t/h as part of the water treatment line.

The experimental part was carried out on a test ion-exchange column using ECOSOFT ECOLITE CK and DOWEX HCR-S/S FF resins. The hardness of the feed and softened water was determined in a production laboratory. It was shown that one bed volume of ion-exchange resin can effectively soften approximately 40–60 bed volumes of artesian water with an initial hardness of 5–6 meq/dm³ down to 0.5–1.0 meq/dm³. With further increase in the volume of treated water, the softening efficiency declines, which requires timely regeneration of the resin bed. It was found that ECOSOFT ECOLITE CK resin has a higher operating exchange capacity and a longer run between regenerations than DOWEX HCR-S/S FF. After about 1800 regeneration cycles (under industrial conditions – roughly 3–5 years of operation), the effective service time per cycle is reduced by a factor of 2–2.5, which justifies scheduled replacement of the resin.

Based on the analysis of the actual operation of the ion-exchange equipment, stagnant zones were identified inside the column, where the resin is not fully utilized. A modernization of the apparatus is proposed, involving modification of the flow distribution scheme and installation of a collector system to ensure uniform flushing of the entire resin bed. The key parameters of the upgraded Na-cation exchange filter were calculated (resin volume 600 dm³, filtration area 1.56 m², filtration rate 45 m/h, salt consumption per regeneration 117 kg), and their

compliance with the technological requirements of pharmaceutical production was justified.

The scientific novelty of the work lies in establishing relationships between water hardness, ion-exchange resin life, number of regenerations and flow hydrodynamics in the column. The practical significance consists in improving the reliability and cost-effectiveness of water treatment systems, reducing salt and energy consumption, eliminating stagnant zones, and extending the service life of membrane purification stages.

Keywords: water treatment, ion-exchange resin, Na-cation exchange, water softening, ultrafiltration, reverse osmosis, sodium cation exchange filter.

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Аналітичний огляд стану питання	6
1.1. Процес і обладнання для очищення води	8
1.2. Вимоги до очищеної води	8
1.3. Опис технологічного процесу всього циклу очищення води	9
1.4. Особливості процесу помякшення води у загальному циклі водопідготування	16
1.5. Огляд обладнання для проведення процесу іонного обміну, зокрема, помякшення води	18
1.6. Висновки і задачі досліджень	22
2. Методика проведення досліджень	25
2.1. Об'єкт і предмет досліджень	25
2.2. Матеріали, що досліджуються	25
2.3. Характеристика досліджуваних іонітів	26
2.4. Принципова схема Na-катіонітового пом'якшення води	27
2.5. Схема експериментального стенду	28
2.6. Порядок проведення досліджень	29
2.6.1. Пом'якшення води	29
2.6.2. Розпушування катіоніту	30
2.6.3. Регенерація катіоніту	30
2.6.4. Відмивка катіоніту	31
2.6.5. Контроль пом'якшення води	32
3. Результати досліджень	34
3.1. Визначення впливу кількості пропущеної води на концентрацію іонів кальцію	35
3.2. Визначення впливу кількості пропущеної води на концентрацію іонів магнію	36
3.3. Визначення впливу кількості пропущеної води на концентрацію іонів магнію та кальцію	37
3.4. Зміна загальної жорсткості води після 1800 регенерацій	38
3.5. Порівняння результатів досліджень	40
3.6. Висновки	40

<i>Відповідальна організація</i>	<i>Технічне узгодження Губеня</i>	<i>Пояснювальна записка</i>	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i>	<i>Розробник документа Пшонкін</i>	<i>Назва, додаткова назва</i>	000000.М.Р.08.000.ПЗ			
.....	<i>Затверджено Гавва</i>		<i>Інд. змін</i>	<i>Дата видачі</i>	<i>Мова ПЛ</i>	<i>Арку "</i>

4. Реконструкція дільниці відопідготовки	42
4.1. Опис роботи дільниці водопідготовки ТОВ "Фармацевтична компанія «Здоров'я»	42
4.2. Технологічний розрахунок	54
5. Модернізація іонообмінного апарату	56
5.1. Опис запропонованого технічного рішення	56
5.2. Будова та принцип роботи обладнання	56
5.3. Розрахунки	60
5.3.1. Вибір конструкційних матеріалів	62
5.3.2. Показники якості води після окремих стадій її обробки	64
5.3.3. Розрахунок Na-катионового фільтру	64
5.3.4. Розрахунок механічного фільтру	72
6. Вимоги до монтажу, експлуатації та ремонту обладнання	74
7. Система управління	80
8. Безпека життєдіяльності	83
Висновок	90
Література	93

ВСТУП

Фармацевтична промисловість належить до найбільш вимогливих галузей, де кожен допоміжний компонент технології впливає на якість і безпечність готових лікарських засобів. Вода у цьому контексті є стратегічною сировиною: вона використовується як розчинник для рідких лікарських форм та екстрактів, як середовище для миття, стерилізації, отримання води очищеної, води для ін'єкцій і чистої пари, а також як тепло- та холодоносії у технологічних системах. Тому до систем водопідготовки фармацевтичних підприємств висуваються підвищені вимоги щодо надійності, стабільності параметрів та відповідності води вимогам ДФУ та міжнародних фармакопей.

Однією з ключових проблем є підвищена жорсткість природної, особливо артезіанської, води. Іони кальцію та магнію спричиняють утворення накипу, прискорюють корозію, погіршують роботу теплообмінників, мембран та арматури. Для фармацевтичного виробництва це означає не лише додаткові витрати на ремонт, а й ризики відхилення якості води від нормативної. Тому стадія пом'якшення, зокрема методом Na-катионування, є критичним елементом багатоступеневої схеми водопідготовки, що передує ультрафільтрації та зворотному осмосу.

Іонообмінні процеси чутливі до режимів роботи, властивостей вихідної води, якості смол та конструкції апаратів. Нерівномірний розподіл потоку, застійні зони в колоні, невдало обрана швидкість фільтрації або недосконала регенерація призводять до передчасного виснаження смоли, зростання витрат солі та зниження економічної ефективності. В умовах застосування артезіанської води це особливо відчутно, оскільки навантаження солями жорсткості є стабільно високим.

У межах магістерського проекту розглядається комплексний підхід до вдосконалення Na-катионного пом'якшення води для фармацевтичних цілей. Поєднано:

експериментальне дослідження роботи іонообмінних смол ECOSOFT ECOLITE CK та DOWEX HCR-S/S FF при пом'якшенні артезіанської води; оцінку їхнього ресурсу в циклах «фільтрація – регенерація»; аналіз гідродинаміки потоку в колоні та виявлення застійних зон; модернізацію конструкції Na-катионітного фільтра продуктивністю 20 т/год у складі реальної схеми водопідготовки.

Особлива увага приділяється взаємозв'язку між жорсткістю фільтрату, кількістю пропущеної води, числом регенерацій та повнотою використання об'єму смоли. Встановлення цих залежностей дозволяє обґрунтувати критерії планової заміни смол, оптимізувати витрати солі та води на регенерацію.

Важливим аспектом є інтеграція модернізованого Na-катионітного фільтра в автоматизовану систему керування водопідготовкою із застосуванням аналізаторів жорсткості, кондуктометрів, датчиків ТОС і рН. Це дає змогу забезпечити контроль якості в режимі реального часу, своєчасно фіксувати вичерпання ресурсу смоли та запобігати подачі води неналежної якості на критичні ділянки фармацевтичного процесу.

Метою магістерського проєкту є підвищення ефективності процесу пом'якшення артезіанської води методом Na-катионування для фармацевтичного виробництва шляхом дослідження роботи іонообмінних смол, аналізу їхнього ресурсу та модернізації конструкції іонообмінного апарата у складі комплексної лінії водопідготовки.

Для досягнення мети вирішуються задачі:

аналіз сучасних вимог до якості води та схем водопідготовки;

експериментальне дослідження пом'якшення води на різних смолах і оцінка їхнього ресурсу;

виявлення конструктивних недоліків існуючих фільтрів і розробка варіантів модернізації;

розрахунок параметрів модернізованого Na-катионітного фільтра з
урахуванням фармацевтичних вимог;

врахування аспектів безпечної експлуатації обладнання та охорони праці
на ділянці водопідготовки.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ

1.1. Процес і обладнання для очищення води

Для більшості фармацевтичних виробництв вода є не просто сировиною, а окремим видом допоміжного матеріалу, від якого залежить якість готової продукції. У рецептурах лікарських форм вода використовується як розчинник, компонент допоміжних сумішей, засіб для миття обладнання й тари. Тому до її хімічного складу, мікробіологічної чистоти та стабільності висувають значно жорсткіші вимоги, ніж до звичайної питної води.

Вихідна водопровідна вода містить широкий спектр домішок: солі кальцію і магнію, гідрокарбонати, залізо, механічні частинки, органічні сполуки, розчинені гази та мікроорганізми. У виробничих умовах ці домішки призводять до утворення накипу на нагрівальних поверхнях, корозії трубопроводів і апаратів, засмічення форсунок, нестабільності рН та появи сторонніх включень у готовому продукті. Окремо виділяють іонний склад жорстких лужноземельних металів, який безпосередньо впливає на якість очищеної води для ін'єкцій і розчинів.

Типова схема підготовки води для фармацевтичних підприємств включає кілька послідовних стадій. На початку застосовують механічне очищення – сітчасті або картриджні фільтри, які утримують пісок, іржу та інші грубі включення. Далі воду часто піддають обробці на вугільних фільтрах для зниження вмісту органічних речовин, хлору та покращення запаху й смаку. Наступні ступені вже спрямовані на глибоку зміну солевого складу: пом'якшення, знесолення, демінералізація.

Одним з найпоширеніших методів зниження жорсткості є іонний обмін на Na-катіонітових фільтрах. У зернистому завантаженні фільтра міститься катіонітова смола, на поверхні якої закріплені натрієві йони. При проходженні води іони кальцію та магнію обмінюються на іони натрію, а солі жорсткості зв'язуються у структурі смоли. Таке пом'якшення дає змогу суттєво зменшити тенденцію до утворення накипу у теплообмінниках,

бойлерах та апаратах для приготування очищеної води. Після вичерпання обмінної ємності завантаження регенерують розчином кухонної солі, відновлюючи його робочу здатність.

Паралельно з іонним обміном у фармацевтичній галузі широко застосовують мембранні методи – зворотний осмос, нанофільтрацію, ультрафільтрацію. Мембранні установки дозволяють затримувати розчинені солі, органічні сполуки та мікроорганізми, отримуючи воду з дуже низькою мінералізацією. Часто їх поєднують з Na-катіонітовими фільтрами: спочатку проводять пом'якшення, а потім знесолення на мембранах або в змішаношарових іонітових фільтрах для досягнення необхідної електропровідності й загального вмісту солей.

Обладнання для очищення води будується у вигляді окремих блоків, об'єднаних в єдину лінію. До основних апаратів належать напірні фільтри з зернистим завантаженням, Na-катіонітові колони, вугільні фільтри, мембранні модулі, ємності для зберігання та циркуляції очищеної води, а також насосне й дозувальне обладнання. Система автоматизації контролює витрати, тиск, електропровідність, жорсткість, температуру, веде облік об'єму води, що пройшла через кожен ступінь, та керує регенерацією іонітів.

Особливістю фармацевтичних систем є обов'язкове дотримання вимог належної виробничої практики: використання корозійностійких матеріалів (переважно нержавіюча сталь і спеціальні полімери), санітарна обробка СІР-циклами, унеможливлення застійних зон у трубопроводах. Це стосується і апаратів для пом'якшення води – конструкція фільтрів має забезпечувати рівномірний розподіл потоку через шар іоніту, надійний відвід розчинів регенерації та зручність обслуговування.

Таким чином, сучасні системи очищення води для фармацевтичних виробництв поєднують кілька фізико-хімічних методів, серед яких пом'якшення на Na-катіонітових фільтрах займає важливе місце. Від правильного вибору та удосконалення конструкції цих апаратів, а також від

раціональної організації всієї ділянки підготовки води залежить стабільність роботи технологічної лінії та відповідність готової продукції нормативним вимогам.

1.2. Вимоги до очищеної води

У фармацевтичній технології очищена вода розглядається як критичний допоміжний матеріал, фізико-хімічні та мікробіологічні характеристики якого безпосередньо впливають на безпечність, терапевтичну ефективність і стабільність лікарських засобів. Нормативні показники регламентуються відповідними вимогами Державної та Європейської фармакопей і, як правило, є жорсткішими, ніж для води питної якості.

До основних органолептичних параметрів належать відсутність стороннього запаху й присмаку, прозорість, безбарвність та відсутність видимих механічних включень. Хімічні вимоги охоплюють обмеження за сумарним вмістом розчинених речовин (сухий залишок), електропровідністю, рН, концентрацією окремих неорганічних іонів (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NH_4^+), а також домішок важких металів, кремнію та заліза. Особливо значущим показником є залишкова жорсткість: концентрація іонів кальцію і магнію повинна бути знижена до рівня, що унеможливує утворення накипу, осадів солей у технологічному обладнанні та зміну рН розчинів.

Мікробіологічні критерії включають нормування загальної кількості аеробних мезофільних мікроорганізмів, відсутність специфічних патогенних видів та обмеження вмісту ендотоксинів (для очищеної води, яка використовується у парентеральному виробництві). Для збереження мікробіологічної стабільності необхідні безперервна циркуляція води у кільцевих контурах, підтримання регламентованого температурного режиму, а також можливість регулярної термічної або хімічної санітарної обробки системи.

Отже, очищена вода для фармацевтичних виробництв повинна одночасно відповідати комплексу показників органолептичної, хімічної та мікробіологічної якості. Виконання цих вимог забезпечується правильно спроектованою схемою підготовки води, до складу якої входять високоефективні ступені пом'якшення на Na-катіонітових фільтрах, мембранні процеси та система постійного контролю критичних параметрів.

1.3. Опис технологічного процесу всього циклу очищення води

Технологічний цикл підготовки очищеної води на фармацевтичному підприємстві охоплює послідовні стадії від забору міської води до її подачі в точки споживання, а також систему постійного контролю та обслуговування обладнання. Роботою установок керує підготовлений персонал, але основні вузли працюють в автоматичному режимі за заданими програмами та внутрішніми інструкціями з експлуатації.

На першому етапі здійснюється забір вихідної (міської) води і її попередня оцінка. Жорсткість та інші базові показники контролюють у визначених контрольних точках відповідно до затвердженого порядку відбору та аналізу проб. За потреби використовують як лабораторні методики, так і експрес-тести, щоб оперативно оцінити якість води, що надходить на ділянку водопідготовки. Результати аналізів фіксують у встановлених формах протоколів та передають відповідальному інженеру чи начальнику станції, який приймає рішення щодо подальшого режиму роботи системи.

Далі вода проходить через апарати механічного очищення та фільтри попереднього очищення (картриджні, піщані, вугільні тощо). На цій стадії видаляються механічні домішки, пісок, оксиди заліза, частина органічних речовин. Картриджні елементи з різною тонкістю фільтрації (наприклад, 50, 5 або 1 мкм) замінюють за затвердженим графіком, а всі операції з обслуговування реєструють у журналі експлуатації, очищення та ремонту обладнання.

Ключовою ланкою схеми є пом'якшення води на іонообмінних апаратах. Вода проходить крізь Na-катіонітові фільтри, де іони кальцію та магнію заміщуються на йони натрію. Жорсткість пом'якшеної води контролюють щоденно (а при нестабільній роботі – частіше) з використанням внутрішніх методик контролю якості чистих середовищ. Результати вимірювань заносять у окремий протокол аналізу пом'якшеної води. Якщо показник жорсткості перевищує граничне значення, відповідальний фахівець призначає позапланову регенерацію фільтра та/або залучає сервісну службу для діагностики та ремонту. Експлуатаційний стан іонообмінної смоли контролюють за тривалістю фільтраційних циклів і умовами експлуатації; у разі деградації властивостей завантаження його замінюють.

Після пом'якшення вода надходить на мембранні ступені – ультрафільтрацію та/або зворотний осмос. Для оцінки ступеня забруднення ультрафільтраційних модулів періодично визначають індекс забруднюваності SDI. Перевищення встановленого порогового значення є підставою для проведення СІР-очищення (clean-in-place) мембран згідно з інструкціями виробника та стандартними процедурами підприємства. Аналогічно для модулів зворотного осмосу контролюють продуктивність та селективність; помітне падіння продуктивності або погіршення якості пермеату слугує сигналом до проведення хімічної мийки або інших регламентних робіт.

Отримана очищена вода (ВО) надходить до ємностей зберігання та в розподільчі контури. У резервуарах і трубопроводах підтримують умови, що перешкоджають вторинному забрудненню: постійну циркуляцію, задану температуру, відсутність застійних зон. На ділянках розподілу встановлено ультрафіолетові випромінювачі з довжиною хвилі, придатною для знезараження води. Стан УФ-ламп періодично перевіряють, лампи та кварцові кожухи замінюють з регламентованою періодичністю або за показаннями, а всі заміни реєструють у відповідних журналах. Повітряні

фільтри, що захищають дихальні патрубки ємностей, також змінюють за графіком із фіксацією в документації.

Робочі параметри системи – електропровідність, температура, витрата, іноді вміст органічного вуглецю (ТОС) – регулярно заносять до журналів оперативного контролю для кожного корпусу або цеху. Записи виконують з певною періодичністю (наприклад, кожні 30–60 хвилин) протягом зміни; у випадку відхилень оператор вказує причину, а наприкінці зміни завіряє запис своїм підписом. Інженер чи начальник ділянки проводить періодичну (зазвичай щотижневу) перевірку повноти та правильності ведення журналів.

Мікробіологічний контроль якості очищеної води здійснює лабораторія контролю якості за затвердженими процедурами відбору та аналізу проб. Визначають загальне мікробне число, за потреби – ендотоксини та інші показники. Якщо отримані значення досягають попереджувальних меж, ініціюють розслідування і коригувальні дії відповідно до процедур управління відхиленнями; при досягненні граничних значень (рівень дії) можуть бути зупинені окремі ділянки або проведена позапланова санітарна обробка системи. Після хімічної санації додатково контролюють промивні води на відсутність залишків дезінфектантів.

Санація та (або) стерилізація системи отримання, зберігання та розподілу води виконується згідно з окремими інструкціями, із складанням протоколів та заповненням ідентифікаційних карт статусу систем. Періодичність таких робіт встановлюють на основі даних моніторингу якості, а для нових або модернізованих систем – після завершення кваліфікаційних випробувань. Введення системи в експлуатацію дозволяється лише за умови успішного проходження всіх тестів без критичних зауважень.

Точки відбору проб для планового хімічного та мікробіологічного контролю обирають так, щоб охопити критичні ділянки циклу: вихід очищеної води з установки, ділянки до і після УФ-обробки, кінець розподільчого кільця та найбільш «проблемні» ділянки, виявлені під час

кваліфікації. Для кожної обраної точки встановлюють періодичність контролю та перелік показників.

Узагальнена схема підготовки води (рис. 1.5) відображає послідовність основних стадій процесу – від забору міської води, її механічного очищення й пом'якшення до мембранної обробки, зберігання, розподілу та системи моніторингу. Сукупність технічних заходів і регламентів обслуговування забезпечує стабільне отримання очищеної води із заданими параметрами якості протягом усього терміну експлуатації системи.

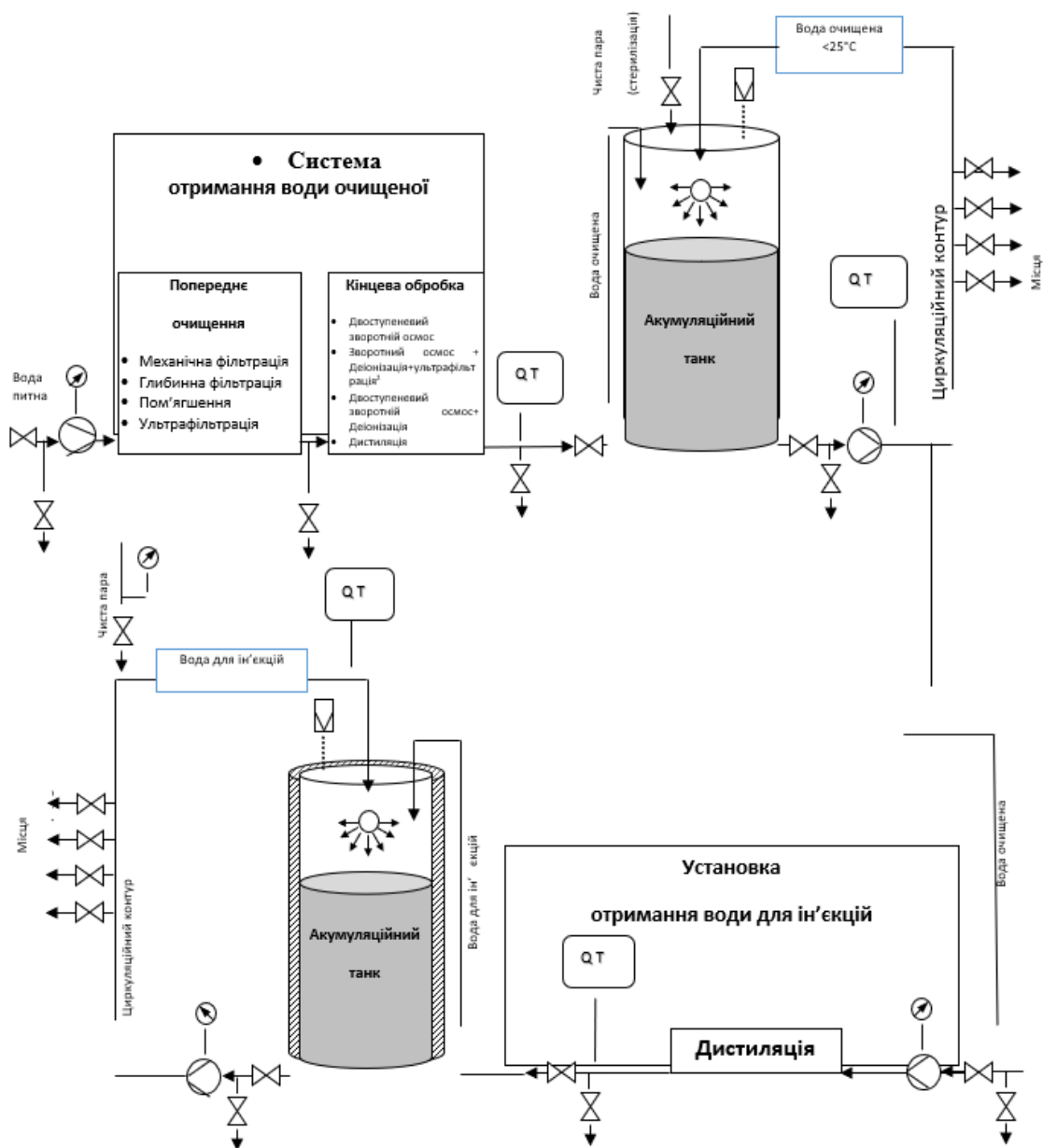


Рис. 1.1. Узагальнена схема підготовки води

1.5. Огляд обладнання для проведення процесу іонного обміну, зокрема пом'якшення води

Іонний обмін у промислових умовах реалізується в спеціальних апаратах – іонообмінних фільтрах та колонних установках, де шар іоніту контактує з водою, що очищається. Конструкція такого обладнання визначає ефективність пом'якшення, знесолення та знезалізнення води, а також витрату реагентів, води на регенерацію та кількість стічних вод.

У харчовій, енергетичній, хімічній та інших галузях найбільше поширення отримали установки з гранульованими іонообмінними смолами – катіонітами та аніонітами, що працюють у колонних апаратах періодичної або безперервної дії, з нерухливим, слаборухомих чи псевдозрідженим шаром завантаження.

Іонообмінні фільтри періодичної дії з нерухливим шаром

Базовим елементом більшості схем пом'якшення є колонний іонообмінний фільтр з нерухливим шаром смоли. Це вертикальний циліндричний апарат, всередині якого на опорних ґратах розташований шар гранульованого іоніту. У нижній частині передбачена дренажно-розподільна система, яка забезпечує рівномірне підведення води або розчинів регенерації та збір фільтрату. Зверху шар смоли зазвичай прикривають сіткою з нержавіючої сталі чи полімерних матеріалів, щоб запобігти виносу іоніту потоком.

Робота такого фільтра здійснюється циклічно й включає кілька послідовних стадій:

робочий цикл (фільтрація) – через шар смоли пропускають вихідну воду, де відбувається обмін іонів жорсткості на іони натрію чи водню;

зворотне промивання – у фільтр подають воду знизу догори, шар смоли розпушується, вимиваються механічні домішки та злежані частинки;

регенерація – через шар іоніту пропускають розчин кислоти, лугу або солі натрію, відновлюючи робочу форму смоли;

пряме промивання – видалення з колони залишків розчину регенерації до досягнення нормативного рН та мінералізації.

Такі апарати прості в конструкції, добре відпрацьовані в експлуатації, але працюють періодично: на період регенерації фільтр виводять із роботи, що вимагає встановлення кількох апаратів у паралель чи каскад для забезпечення безперервної подачі пом'якшеної води.

Обладнання для пом'якшення води методом натрій-катіонування

Для технологічного пом'якшення води в харчовій промисловості (живлення котлів, мийні операції, підготовка води до варіння, приготування розчинів тощо) найбільше застосовують натрій-катіонітові фільтри. Вони завантажуються катіонітом у Na-формі, який обмінює іони Ca^{2+} і Mg^{2+} , що зумовлюють жорсткість, на іони натрію.

Типова установка натрій-катіонування включає:

тискостійкий колонний фільтр з шаром Na-катіоніту;

бак приготування та зберігання розчину кухонної солі (NaCl), що використовується при регенерації;

мірний бак або солерозчинник;

ежектор чи насос-дозатор для подачі розчину солі в регенераційний режим;

запірну та регулюючу арматуру, витратоміри, манометри, прилади контролю якості води на виході.

У ході робочого циклу вода подається у верхню частину фільтра, проходить униз крізь нерухливий шар Na-катіоніту, де солі кальцію та магнію переходять у натрієву форму. Для регенерації фільтр переводять у режим пропускання концентрованого розчину NaCl зверху вниз з подальшим промиванням до повного видалення хлоридів і солей жорсткості з дренажних вод.

Для води з підвищеною твердістю або при великих витратах використовують двоступеневі схеми натрій-катіонування з двома послідовно встановленими фільтрами (перший – попереднє пом'якшення, другий – доведення якості до норм). Це потребує більшої кількості обладнання, але дає змогу раціональніше використати обмінну ємність смоли та стабілізувати якість води.

Водень-катіонітові фільтри та комбіновані схеми H–Na-катіонування

Коли необхідно не тільки зменшити жорсткість, а й суттєво знизити загальну мінералізацію води, застосовують водень-катіонування та комбіновані схеми H–Na-обробки.

Установка H-катіонування зазвичай містить:

водень-катіонітовий фільтр, виконаний із корозійностійких матеріалів (сталей, футерованих полімером), стійких до дії кислот;

кислотне господарство – бак зберігання кислоти (HCl або H₂SO₄), мірник кислоти, пристрій для підсмоктування кислоти (ежектор) та дозуючі лінії;

дегазатор для видалення вуглекислого газу, що утворюється після проходження води через H-катіоніт;

вентилятор для відведення газу з дегазатора;

насос перекачування очищеної води, промивні баки та трубопроводи.

Після H-катіонування у фільтраті присутні вільні кислоти та підвищена концентрація CO₂, тому дегазаційна колона (з насадкою чи тарілками) є обов'язковим елементом такої схеми. У подальшому вода може подаватися на Na-катіонітові фільтри для коригування складу, усунення надлишкової кислотності та доведення солевмісту до вимог споживача.

Комбіновані схеми послідовного або паралельного H–Na-катіонування передбачають використання щонайменше одного водень-катіонітового фільтра і двох Na-катіонітових, а також дегазатора, проміжного бака і насосного обладнання. Такі системи дозволяють глибоко знижувати

твердість і лужність, що особливо важливо при підготовці живильної води для котлів високого тиску.

Іонообмінні апарати безперервної та напівбезперервної дії

Класичні фільтри з нерухливим шаром, попри простоту, мають конструктивний недолік – періодичність роботи: на час регенерації фільтр не видає пом'якшену воду, через що виникають простоя або необхідність надлишкового резервування потужностей. Для подолання цих обмежень розроблені апарати безперервної та напівбезперервної дії, у яких іоніт під час роботи переміщується між зоною сорбції та зоною регенерації.

Типова установка безперервного іонного обміну містить:

вертикальний апарат-колону, розділену на зони сорбції, регенерації та промивання;

систему подачі та відведення іоніту (ерліфт, насос для іоніту, гідротаран, гвинтові або спіральні транспортери);

дренажні системи для кожної зони;

пристрої подачі регенераційних розчинів та промивної води;

обладнання контролю витрат, концентрацій і тиску.

У таких апаратах смола повільно пересувається назустріч потоку води, що очищується, а регенераційні розчини подаються в окрему зону. Протитечійний рух фаз дає змогу краще використовувати обмінну ємність, істотно зменшувати витрату реагентів і обсяг стічних вод, одночасно підвищуючи стабільність якості пом'якшеної або демінералізованої води.

Колони з псевдозрідженим (киплячим) шаром іоніту

Окремий клас обладнання для іонного обміну – колони з псевдозрідженим шаром смоли, у яких гранули іоніту знаходяться в підвішеному, «киплячому» стані під дією висхідного потоку рідини. Вони виконуються у вигляді вертикальних колон із системою сітчастих тарілок і переливних пристроїв.

У типових конструкціях:

розчин (вода, що очищається) подається знизу;

швидкість потоку підбирається так, щоб забезпечити стійке псевдозрідження шару на кожній тарілці;

регенерований іоніт безперервно надходить на верхню тарілку та самопливно переміщується до нижньої, звідки відпрацьована смола виводиться на регенерацію в окремий апарат;

промивання та регенерація смоли здійснюються поза основною колоною, що дає змогу підтримувати безперервну подачу пом'якшеної або знесоленої води.

Перевагою такого обладнання є висока інтенсивність масообміну завдяки хорошому перемішуванню фази та ліквідації застійних зон у шарі іоніту, а також більш повне використання обмінної ємності смоли. Недоліком є складніша апаратурна реалізація і підвищені вимоги до стабільності гідравлічного режиму.

Класифікація обладнання за режимом роботи та гідродинамікою

Якщо узагальнити наведені конструкції, іонообмінне обладнання для пом'якшення та знесення води можна поділити за двома ключовими ознаками:

режим роботи – апарати періодичної дії (класичні фільтри з нерухливим шаром) та апарати безперервної / напівбезперервної дії (колони з рухомим або киплячим шаром іоніту);

гідродинамічний режим у шарі – щільний нерухливий шар, слабо розширений шар і псевдозріджений (завислий) шар смоли.

У технологічних схемах підготовки води для харчових підприємств найчастіше застосовують фільтри періодичної дії з нерухливим шаром На-катионіту, іноді в комбінації з Н-катионітовими фільтрами й дегазаторами. Для великих потужностей, особливо коли потрібне глибоке знесення, все ширше впроваджуються установки безперервної дії та протитечійні схеми

регенерації, що дозволяють суттєво скоротити витрату реагентів і зменшити утворення стічних вод при збереженні або підвищенні якості пом'якшеної води.

1.5. Огляд обладнання для проведення процесу іонного обміну, зокрема пом'якшення води

Комерційний пом'якшувач Ecosoft BasicSoft 2000

Виробник: Ecosoft (Україна/ЄС) – спеціалізація на іонному обміні та мембранних технологіях для побутових і промислових систем водопідготовки.

BasicSoft 2000 – це натрій-катіонітовий пом'якшувач для невеликих промислових і комерційних споживачів (пекарні, ресторани, мийні машини, парогенератори). Установка працює за класичною схемою: вода проходить крізь шар сильно-кислотного катіоніту у Na-формі (наприклад, ECOLITE СК), де іони Ca^{2+} і Mg^{2+} заміщуються на Na^{+} , що забезпечує зниження жорсткості та запобігає утворенню накипу.

Роботою керує автоматичний клапан: він відстежує об'єм очищеної води й запускає регенерацію при досягненні заданої ємності. Регенерація здійснюється розчином NaCl з окремого солевого бака; цикл включає зворотне промивання, подачу сольового розчину, повільне витіснення й кінцеве промивання до нормативної електропровідності. Такий режим зменшує людський фактор і дозволяє інтегрувати пом'якшувач у загальну систему автоматизації підприємства.

BasicSoft 2000 забезпечує помірно високі витрати при компактних габаритах, підходить для роботи з міською водою середньої та підвищеної жорсткості. Важливо, що використовується спеціалізована смола ECOLITE СК з високою повною обмінною ємністю (~1,8 г-екв/л), стабільною гранулометриєю та широким діапазоном допустимих швидкостей фільтрації, що забезпечує надійну роботу при змінних навантаженнях.

Таблиця 1.1. – Основні характеристики Ecosoft BasicSoft 2000

Показник	Значення (типово для BasicSoft 2000)
Максимальна робоча витрата, м ³ /год	≈ 7,7
Об'єм катіоніту, л	≈ 200
Об'ємна ємність (при базовій жорсткості), м ³ пом'якшеної води	≈ 40
Споживання солі на 1 регенерацію, кг	≈ 20–32
Тип іоніту	Сильно-кислотний катіоніт у Na-формі (ECOLITE SK)
Режим регенерації	Автоматична, за об'ємом води
Застосування	Комерційні споживачі, технологічні та мийні потреби

Дуплексна установка BWT Rondomat Duo / HVD

Виробник: BWT (Best Water Technology, Австрія) – один із найбільших європейських виробників систем водопідготовки. Серія Rondomat HVD/Duo розроблена для багатоквартирних будинків, готелів, лікарень і промислових об'єктів із безперервною потребою в пом'якшеній воді.

Схема – дуплексна: два однакові балони з іонообмінною смолою працюють поперемінно. Поки перший балон знаходиться в робочому режимі, другий може бути в резерві або проходити регенерацію. Перемикання здійснюється об'ємно-керованою автоматикою: система реєструє реальний об'єм пом'якшеної води й запускає регенерацію тільки при повному використанні обмінної ємності, що мінімізує витрати солі й води. Регулювання виконується за принципом протиточної регенерації (counter-current), коли регенераційний розчин рухається назустріч потоку експлуатації – це підвищує якість пом'якшення і зменшує солевитрати.

Rondomat Duo/HVD має розвинену систему контролю: датчики витрати, можливість підключення до BMS (системи диспетчеризації), сигналізацію несправностей. Конструкція передбачає використання харчових матеріалів, солерозчинники великого об'єму, захист від “залипання” клапанів, режими резервної регенерації для запобігання застою смоли. У результаті установка забезпечує стабільну жорсткість на виході при дуже високій надійності, що

важливо для фармацевтичних або харчових виробництв, де зупинка води критична.

Таблиця 1.2. – Приклад характеристик лінійки BWT Rndomat Duo II

Показник	Типовий діапазон для різних моделей
Об'єм іонообмінної смоли, л	2 × 18 ... 2 × 150
Об'єм солі в баку-регенераторі, кг	100 ... 375
Витрата промивної води на 100% регенерацію, л	≈ 90 ... 450
Максимальна витрата промивної води, л/год	≈ 350 ... 1100
Час регенерації (повна), хв	≈ 32 ... 58
Тип регенерації	Об'ємно-керована, протиточна
Тип застосування	Готелі, великі будинки, промислові споживачі

Промисловий пом'якшувач Envirogen EcoSoft (EcoRange)

Виробник: Envirogen Group (Велика Британія/ЄС). Лінійка EcoSoft входить до платформи EcoRange – стандартні промислові установки пом'якшення з продуктивністю від 0,4 до 20 м³/год (≈2–100 gpm).

EcoSoft – це класичні натрій-катіонітові системи промислового типу з високоефективною смолою та склопластиковими або сталевими балонами. Вони призначені для зниження загальної жорсткості до рівня <4 ppm за CaCO₃, що відповідає дуже м'якій воді і дозволяє захистити теплообмінники, парові котли, СІР-системи, фармацевтичне обладнання. Установки можуть працювати цілодобово, а схема компоновки (одиначні, дуплексні, мультиплексні) підбирається під вимоги замовника.

Керування відбувається через мультипортовий клапан: регенерація може задаватися за часом, за об'ємом або комбіновано. Це дає можливість оптимізувати витрати солі й води, особливо при нерівномірному графіку споживання. У стандартній версії EcoSoft використовує високоякісні смоли з великою обмінною ємністю, що знижує частоту регенерацій. Типові застосування: часткове пом'якшення питної води, захист парових котлів,

підготовка води для технологічних ліній у харчовій і фармацевтичній промисловості, пральні, охолоджувальні системи.

Установка може виконуватись у вигляді окремо розташованих апаратів або як контейнеризоване рішення з інтегрованими насосами, баками та системою управління. Це спрощує монтаж і дає можливість масштабувати продуктивність при розширенні підприємства.

Таблиця 1.3. – Основні характеристики лінійки Envirogen EcoSoft

Показник	Значення (типовий діапазон)
Діапазон витрат, м ³ /год	≈ 0,4 ... 20
Тип процесу	Натрій-катионне пом'якшення
Залишкова жорсткість, ppm (CaCO ₃)	< 4
Режим роботи	24/7, можливі дуплекс/мультиплекс
Керування регенерацією	За часом / за об'ємом / комбіновано
Типи корпусів	Склопластик чи сталь з покриттям
Типові галузі	Харчова, фармацевтична, енергетика, пральні

Пом'якшувач на базі клапана Pentair Autotrol 255/760 Logix

Виробник: Pentair (США/ЄС). Серія Autotrol 255/Logix 740–760 – широко поширені керуючі клапани для побутових і малих промислових пом'якшувачів. На їх основі збираються готові системи (наприклад, 40 000 grain water softener), що застосовуються у котельнях, міні-цехах, лабораторіях.

Клапан Logix 760 забезпечує п'ятициклову роботу: сервіс (фільтрація), зворотне промивання, повільне сольове насичення, повільне витіснення, швидке промивання. Регенерація ініціюється за показами вбудованого лічильника витрати (meter initiated), що дозволяє точніше використовувати обмінну ємність смоли. Контролер електронний, з можливістю програмування часу, солевитрат, інтервалів, веде “історію” споживання. Подача живлення – 12 В АС від комплектного трансформатора.

Типові пом'якшувачі з Autotrol 255/760 мають продуктивність близько 10–15 gpm ($\approx 2,3\text{--}3,5$ м³/год) у сервісному режимі при невеликих втратах тиску й можуть працювати з балонами діаметром до 12–14". Для моделі на 40 000 grain ($\approx 2,6$ кг-екв) сервісна витрата становить $\approx 10,4$ gpm, швидкість зворотного промивання – $\approx 2,7$ gpm; габарити установки – орієнтовно 25 × 15 × 53" (Ш×Г×В).

Перевага такої системи – модульність: один і той самий клапан ставиться на різні балони та солерозчинники, дозволяє будувати як прості, так і більш складні схеми (twin, multi-tank). Матеріал корпусу клапана – армований термопласт, сертифікований для питної води, що робить його придатним як для технологічних, так і для господарсько-питних застосувань.

Таблиця 1.4. – Типові характеристики пом'якшувача з Autotrol 255/760

Показник	Орієнтовне значення
Тип керування	Електронний контролер Logix 760
Тип ініціювання регенерації	За об'ємом (meter initiated)
Кількість циклів	5 (фільтрація + промивки + регенерація)
Сервісна витрата, gpm (м ³ /год)	$\approx 10,4$ ($\approx 2,3$)
Макс. безперервна витрата клапана, gpm	до $\approx 15,5$
Витрата зворотного промивання, gpm	$\approx 2,7$
Живлення	12 В АС
Типові застосування	Невеликі котельні, цехи, лабораторії, комерційні об'єкти

1.6. Висновки та задачі досліджень

За результатами аналітичного огляду встановлено, що ділянки підготовки води для виготовлення рідких лікарських форм (екстракційні препарати, розчини, пасти, мазі тощо) потребують подальшого опрацювання з точки зору роботи іонообмінних апаратів. Недостатньо вивченими залишаються питання стабільності параметрів пом'якшення, оптимальної тривалості циклів фільтрації та регенерації, а також впливу характеристик смоли на якість води та економічні показники процесу.

Під час вибору іонообмінної смоли важливо не лише орієнтуватися на паспортні дані, а й експериментально оцінити її реальну ефективність у конкретних умовах виробництва: тривалість міжрегенерацийних інтервалів, стійкість до багаторазових циклів відновлення, збереження обмінної ємності протягом всього строку служби. Правильно підібрані режими роботи (швидкість фільтрації, глибина шару, концентрація та витрата розчину регенеранту) дають змогу збільшити продуктивність установки, зменшити витрату солі на регенерацію та скоротити час простою обладнання.

Артезіанська вода, яка часто використовується як вихідна для фармацевтичних потреб, зазвичай характеризується підвищеною жорсткістю порівняно з міською водопровідною. Тому доцільно застосовувати двоступеневу (двоколонну) схему натрій-катіонування, включену в загальну лінію підготовки води. Це дозволить забезпечити стабільно низький вміст іонів кальцію та магнію, створити оптимальні умови роботи для мембранних ступенів (ультрафільтрації, зворотного осмосу), зменшити ризики утворення накипу та знизити навантаження на обладнання.

Окремо слід відзначити, що конструктивне удосконалення наявних іонообмінних фільтрів (усунення застійних зон, покращення розподілу потоку, оптимізація дренажно-розподільної системи) здатне суттєво підвищити ступінь використання обмінної ємності смоли й забезпечити більш рівномірну якість пом'якшеної води протягом усього циклу роботи.

Відповідно до цього, метою роботи є підвищення ефективності процесу пом'якшення води іонообмінним методом для виробництва рідких лікарських форм та мазей шляхом раціонального вибору іонообмінних матеріалів, режимів експлуатації та модернізації обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі дослідження:

Розробити та змонтувати науково-випробувальний стенд для дослідження процесу пом'якшення води на іонообмінних фільтрах.

Налагодити систему аналітичного контролю якості води, отриманої в лабораторних умовах (визначення жорсткості, електропровідності та супутніх показників).

Дослідити вплив тривалості обробки води на зміну жорсткості для різних марок іонообмінних смол.

Встановити раціональну тривалість міжрегенераційного циклу та оцінити допустимий загальний час експлуатації смоли до її заміни.

Запропонувати варіант реконструкції існуючої установки водопідготовки для виробництва рідких лікарських засобів з урахуванням отриманих результатів.

Розробити заходи з модернізації наявного іонообмінного апарата для підвищення ефективності пом'якшення води та зменшення експлуатаційних витрат.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Об'єкт і предмет досліджень

Об'єкт дослідження – робота Na-катіонітового фільтра та практична реалізація процесу іонного обміну під час пом'якшення води.

Предмет дослідження – зміна концентрації іонів кальцію та магнію в очищеній воді залежно від об'єму пропущеної води через шар іоніту для смол марок ECOSOFT ECOLITE СК та HCR-S/S FF, а також їх придатність до використання у фармацевтичному виробництві на ділянках підготовки води.

2.2. Матеріали, що досліджуються

Як вихідну сировину використовують воду з артезіанської свердловини. Така вода містить підвищену кількість розчинених мінеральних солей (зокрема, солей жорсткості), що потребує її попереднього аналізу та коригування іонного складу перед використанням у фармацевтичних технологіях. Склад і основні показники якості вихідної води наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. – Показники якості вхідної води

Показник	Позначення	Кількість, мг/дм ³	Кількість, мг-екв/дм ³
Сухий залишок	So	398	–
Окислюваність, мго ₂ /дм ³	Ok	2	–
Загальна жорсткість	Жо	–	6,0
Карбонатна твердість (вона ж лужність)	Жк	–	5,5
Некарбонатна твердість	Жнк	–	0,5
Бікарбонат-іони	HCO ₃ ⁻	335	5,5
Сульфат-іони	SO ₄ ²⁻	48	1,0
Хлорид-іони	Cl ⁻	18	0,5
Бісилікат-іони	HSiO ₃ ⁻	38,5	0,5
Натрій-іони	Na ⁺	23	1,0
Вільна кислота* (у перерахунку на бікарбонат-іони)	CO ₂	22	0,5*

2.3. Характеристика досліджуваних іонітів

Dowex HCR S/S – сильнокислотна катіонітна смола, створена компанією Dow Chemical Company (США) для застосування у системах пом'якшення води побутового, комерційного й промислового призначення. Смола виготовлена на стирол-дивінілбензолній гелевій матриці з сульфогрупами як функціональними групами. Така структура забезпечує значну обмінну ємність, стійкість до механічних навантажень та стабільність характеристик у широкому діапазоні температур і рН.

Dowex HCR S/S ефективно вилучає з води солі жорсткості, завдяки чому досягається високий ступінь пом'якшення. Висока швидкість обміну дозволяє експлуатувати фільтри при підвищених швидкостях фільтрації без помітного погіршення якості очищення. Смола добре переносить повторювані цикли регенерації розчинами хлориду натрію і за умови правильно підбраного режиму роботи зберігає працездатність до п'яти років.

До основних експлуатаційних переваг Dowex HCR S/S належать: висока ефективність видалення солей жорсткості; можливість роботи при значних швидкостях потоку; зниження витрат води та солі на регенерацію; тривалий ресурс служби при збереженні обмінної здатності.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики матеріалу Dowex™ HCR-S/S

Продукт	Тип	Матриця	Функціональна група
Dowex™ HCR-S/S	Сильнокислотний катіоніт	Стирол-ДВБ, гелева	Сульфонова кислота

Параметр	Значення
Іонна форма при поставці	Na ⁺
Повна обмінна ємність, г-екв/л (мін.)	1,9
Вміст вологи, %	48–52
Кількість цілих гранул, % (мін.)	90
Щільність гранул, г/мл	1,3
Насипна вага, г/л	800

Ecolite СК – сильнокислотна катіонообмінна смола виробництва Ecosoft, призначена для використання в установках пом'якшення води для житлово-комунальних об'єктів, промислових підприємств та систем підготовки живильної води котлів. Матриця смоли – стирол-ДВБ, гелева структура з сульфогрупами, що забезпечує високу обмінну ємність і стабільність властивостей при зміні умов експлуатації.

Смола демонструє добрі характеристики при роботі з водою підвищеної жорсткості, дозволяє отримати стабільний результат очищення і витримує багатократні цикли «робота – регенерація». За належного режиму експлуатації орієнтовний строк служби Ecolite СК сягає трьох років.

Її ключові переваги: висока обмінна ємність, що забезпечує значний ресурс між регенераціями; можливість роботи при підвищених швидкостях фільтрації; помірні витрати солі та води на регенерацію; достатня механічна та хімічна стійкість.

У процесі фільтрації води через шар Ecolite СК іони жорсткості Ca^{2+} та Mg^{2+} обмінюються на іони Na^{+} , закріплені в смолі. Таким чином зменшується схильність води до утворення накипу, а нагрівальні поверхні та теплообмінники захищаються від відкладень. Коли запас іонів натрію у смолі вичерпується, шар регенерують розчином хлориду натрію; під час регенерації кальцій і магній вимиваються у стоки, а катіоніт знову переходить у натрієву форму.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики матеріалу Ecolite СК

Продукт	Тип	Матриця	Функціональна група
Ecolite СК	Сильнокислотний катіоніт	Стирол-ДВБ, гелева	Сульфенова кислота

Параметр	Значення
Іонна форма при поставці	Na^{+}
Повна обмінна ємність, г-екв/л (мін.)	1,8
Вміст вологи, %	50–55
Ефективний розмір зерен, мм	0,52
Насипна вага, г/л	800

Рекомендовані умови експлуатації смол:

- максимальна температура експлуатації – 120 °С;
- робочий діапазон рН – 0–14;
- мінімальна висота шару смоли – 600 мм;
- швидкості потоків: робочий цикл / швидка промивка – 25–40 м/год;
зворотна промивка – 10–15 м/год; регенерація / витіснення – 1–10 м/год;
- загальна витрата води на промивання – 3–6 об/об шару;
- регенераційний розчин – 8–10 % NaCl.

Назва товару	Ціна товару
Іонообмінна смола Ecosoft Ecolite СК 25 л	3056 грн
Іонообмінна смола Dowex HCR-S/S 25 л	2025 грн

2.4. Принципова схема Na-катіонітового пом'якшення води

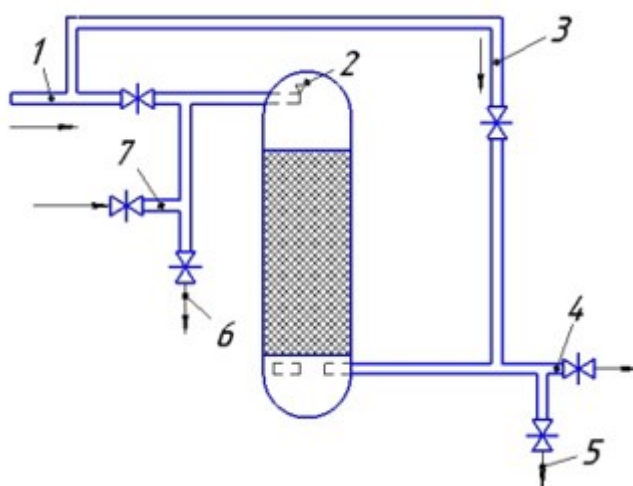


Рис. 2.1. Принципова схема Na-катіонітового пом'якшення води:

- 1 – подача вихідної води;
- 2 – катіонітовий фільтр;
- 3 – підведення води для розпушування шару іоніту;
- 4 – відведення пом'якшеної води;
- 5 – відвід регенераційного розчину;

6 – скидання стічної води в каналізацію;

7 – підведення розчину для регенерації.

Технологічна схема Na-катіонування з напірними фільтрами (рис. 2.1) передбачає подачу сирі води по трубопроводу 1 у верхню частину корпусу фільтра. Далі потік проходить крізь шар катіоніту зверху вниз, після чого зібрана дренажною системою пом'якшена вода відводиться трубопроводом 4. Дренаж виконують у вигляді трубчастої системи з корозійностійких матеріалів. Орієнтовна робоча швидкість фільтрування становить близько 10 м/год для води із загальною жорсткістю 10...15 ммоль/м³ та може бути підвищена до 25 м/год, якщо загальна жорсткість не перевищує 5 ммоль/м³.

2.5. Схема експериментального стенду

Експериментальний стенд являє собою невеликий Na-катіонітовий фільтр колонного типу. Корпус фільтра виконаний у вигляді вертикальної труби з нержавіючої сталі висотою 74 мм та внутрішнім діаметром 23 мм. У нижній частині колони встановлено щілинний ковпачок, який забезпечує рівномірний розподіл потоку води по перерізу та запобігає виносу гранул катіоніту з апарата.

Усередині корпусу формується робочий шар смоли висотою 55–74 мм. До фільтра під'єднана система трубопроводів із запірною арматурою; шляхом перемикання вентилів задають необхідний напрямок руху води та розчину регенеранту залежно від поточної операції – робочої фільтрації, зворотної промивки, регенерації або відмивки.

Розчин хлориду натрію для регенерації готують у солерозчиннику – прозорій ємності з оргскла розміром у плані 150×150 мм та висотою 500 мм. Отриманий розчин для освітлення додатково пропускають через шар піску. Для стабілізації тиску живильна водопровідна вода подається на установку не безпосередньо, а через зрівнювальний бачок 14, що гарантує постійний напір на вході у фільтр.

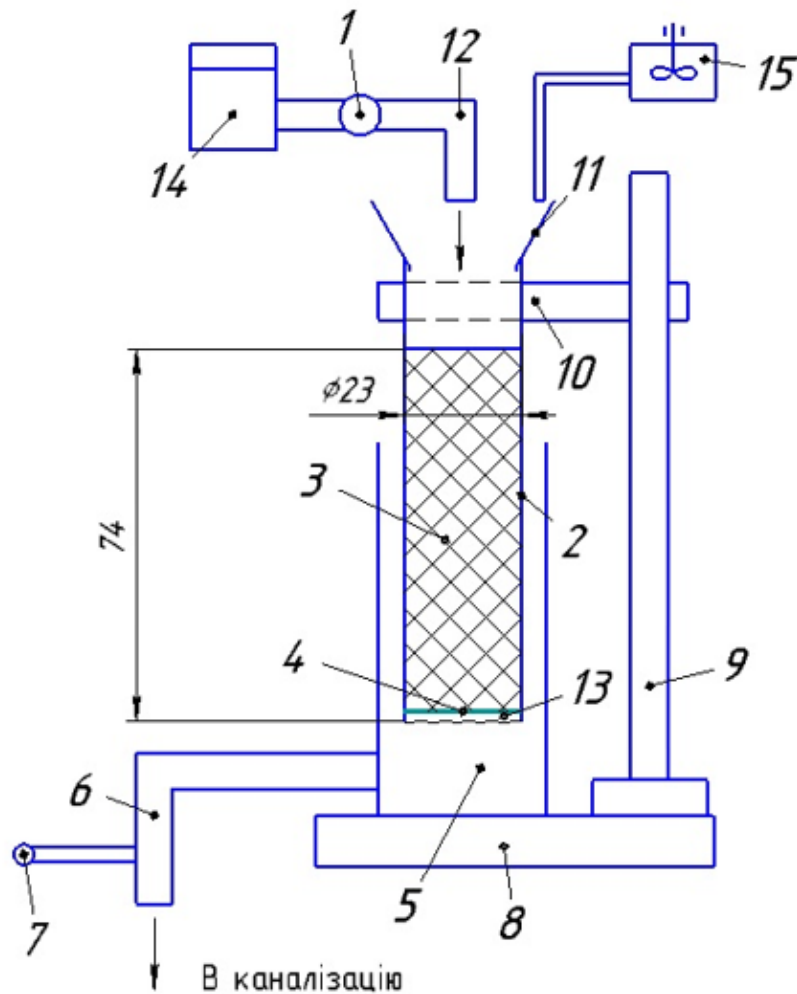


Рис. 2.2. Схема експериментального стану:

1 – витратомір; 2 – колонка; 3 – іоніт; 4 – фільтрувальна решітка; 5 – ємкість для очищеної води; 6 – вихідна труба; 7 – патрубок для відбирання проб; 8 – станина; 9 – стійка; 10 – тримач; 11 – лійка; 12 – труба для подачі води; 13 – фільтрувальний матеріал; 14 – зрівнювальний бак; 15 – бак з насиченим розчином солі.

2.6. Порядок проведення досліджень

2.6.1. Пом'якшення води

Під час робочого циклу вихідна вода подається у верхню частину колони і рухається крізь шар катіоніту зверху вниз. Швидкість фільтрування залежить від початкової жорсткості води та задається в межах $V_a = 10\text{--}25$ м/год. Вода надходить через підвідну трубу 12, проходить через завантаження і відводиться через вихідний патрубок 6.

Швидкість фільтрації визначають за формулою:

$$V_a = Q / F, \text{ м/год} \quad (2.5)$$

де:

V_a – швидкість фільтрування;

Q – витрата води, м³/год;

F – площа поперечного перерізу фільтра, м².

Витрату води Q знаходять об'ємним методом:

$$Q = W / t, \text{ м}^3/\text{год} \quad (2.6)$$

де:

W – об'єм мірної колби, м³;

t – час заповнення цієї колби, год.

2.6.2. Розпушування катіоніту

Метою операції розпушувальної промивки є усунення ущільнення шару катіоніту, що утворюється під час тривалої роботи, та видалення механічних домішок. Розпушування здійснюють подачею води знизу вгору з інтенсивністю $q = 3\text{--}4 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$; при цьому вода проходить через шар смоли й відводиться в дренаж.

Інтенсивність промивки розраховують за виразом:

$$i = Q / F, \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{м}^2) \quad (2.7)$$

де:

i – інтенсивність промивки;

Q – витрата води, л/с;

F – площа поперечного перерізу фільтра, м².

2.6.3. Регенерація катіоніту

Після вичерпання пом'якшувальної здатності катіоніт переводять у вихідну натрієву форму за допомогою регенерації. Через Na-катіонітовий фільтр пропускають розчин вивареної солі, який подають зверху вниз протягом 15–30 хв. Для цього у солерозчинник завантажують необхідну

кількість солі, заповнюють його водою, після повного розчинення отриманий розчин направляють на фільтр. Стоки регенерації відводяться у каналізацію. Швидкість руху регенераційного розчину становить $V_{рег} = 3-5$ м/год; витрата 2-5-% розчину NaCl – приблизно $1,2$ м³ на 1 м³ катіоніту.

Витрату солі на одну регенерацію катіонітового фільтра визначають за формулою (2.4), де приймають:

$bс = 98-99$ % – масова частка NaCl у технічній солі;

a – витрата солі на 1 г-екв затриманих катіонів Ca^{2+} та Mg^{2+} , г (орієнтовно $a = 200$ г/(г-екв));

$Eроб$ – обмінна ємність 1 м³ сульфовугілля, г-екв/м³;

$f \times H$ – об'єм сульфовугілля, завантажений в один фільтр, м³.

2.6.4. Відмивка катіоніту

Після завершення регенерації шар катіоніту необхідно ретельно відмити від залишків регенераційного розчину та продуктів обміну. Відмивку здійснюють подачею води зверху вниз зі швидкістю $V_{відм} = 6-10$ м/год упродовж 30-60 хв. Як промивну використовують водопровідну воду. На 1 м³ смоли витрачається в середньому $4-5$ м³ промивної води.

2.6.5. Контроль пом'якшення води

Контроль якості пом'якшеної води проводять періодично протягом роботи фільтра, щоб вчасно визначити момент переходу до наступних операцій (регенерація, промивка тощо). Для цього визначають жорсткість води комплексонометричним методом із застосуванням трилону Б.

Порядок виконання аналізу:

Піпеткою відмірюють 25 мл досліджуваної води у конічну колбу.

Дистильованою водою доводять об'єм до 50 мл.

Додають 1 мл буферного розчину.

Вносять $100-150$ мг індикатора ET-90 з NaCl.

Суміш ретельно перемішують і повільно титрують 0,05 Н розчином трилону Б до переходу забарвлення від винно-червоного через фіолетово-синій до яскраво-блакитного. Для точнішого фіксування кінцевої точки поруч тримають перетитровану пробу-еталон; при подальшому додаванні трилону Б колір розчину вже не змінюється.

Жорсткість Жз обчислюють за формулою:

$$\text{Жз} = (V1 - V2) \times N \times 1000 / a, \text{ ммоль/дм}^3 \quad (2.8)$$

де:

V1 – об'єм 0,05 Н розчину трилону Б, дм³, налитий у бюретку;

V2 – об'єм 0,05 Н розчину трилону Б, дм³, що залишився в бюретці після титрування;

N – нормальність розчину трилону Б;

a – об'єм досліджуваної води, дм³.

Отримані значення дають змогу оцінити ступінь виснаження катіоніту і визначити момент, коли необхідно перевести фільтр у режим регенерації.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Визначення впливу кількості пропущеної води на концентрацію іонів кальцію

Таблиця 3.1. – Вплив кількості пропущеної води на концентрацію іонів кальцію

№	V	ECOSOFT ECOLITE СК	HCR-S/S FF	k = $V_{\text{води}}/V_{\text{катионіту}}$
1	200	0	0	1000
2	400	0	0	2000
3	600	0	0	3000
4	800	0,2	0	400
5	1000	0,4	0,2	50
6	1200	2,2	1,1	60

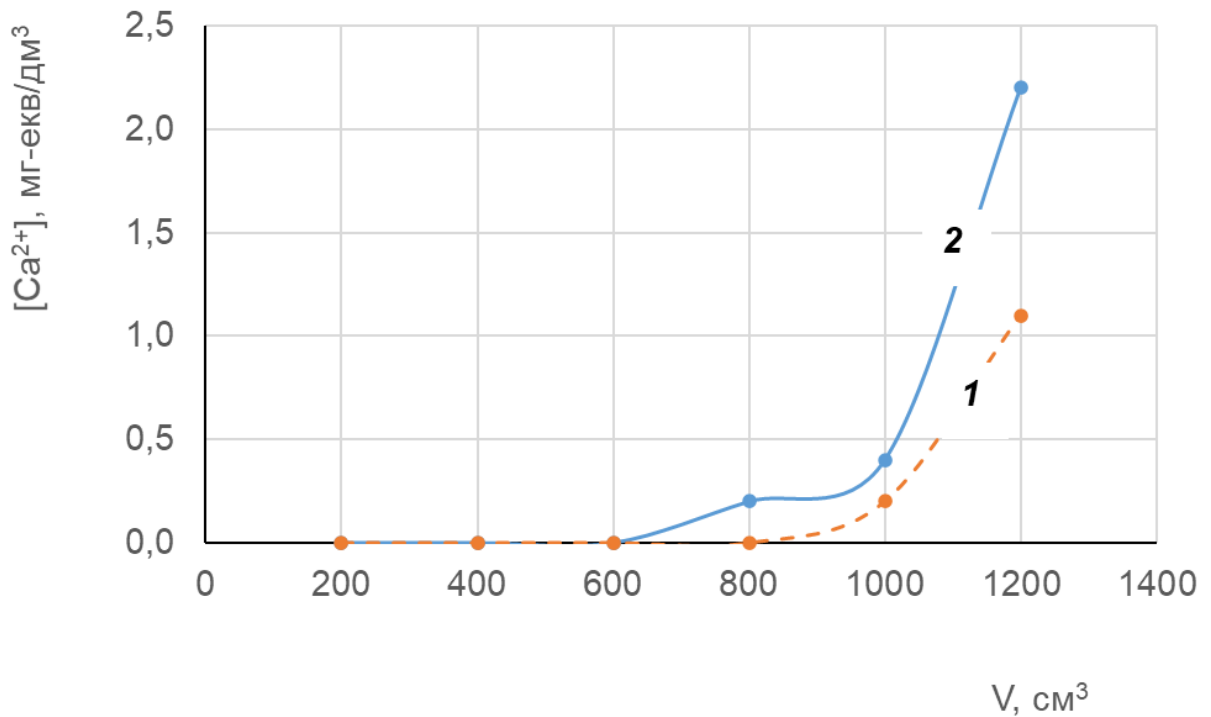


Рис. 3.1. Вплив кількості пропущеної води на концентрацію іонів кальцію:
1 - HCR-S/S FF
2 - ECOSOFT ECOLITE СК

3.2. Визначення впливу кількості пропущеної води на концентрацію іонів магнію

Таблиця 3.2. – Залежність кількості пропущеної води на концентрацію іонів магнію

№	V	ECOSOFT ECOLITE CK	HCR-S/S FF	$k = \frac{V_{\text{води}}}{V_{\text{катионіту}}}$
1	200	0	0	1000
2	400	0,1	0	200
3	600	0,6	0,3	30
4	800	0,9	0,4	40
5	1000	3,2	0,8	50
6	1200	4,1	4,1	60

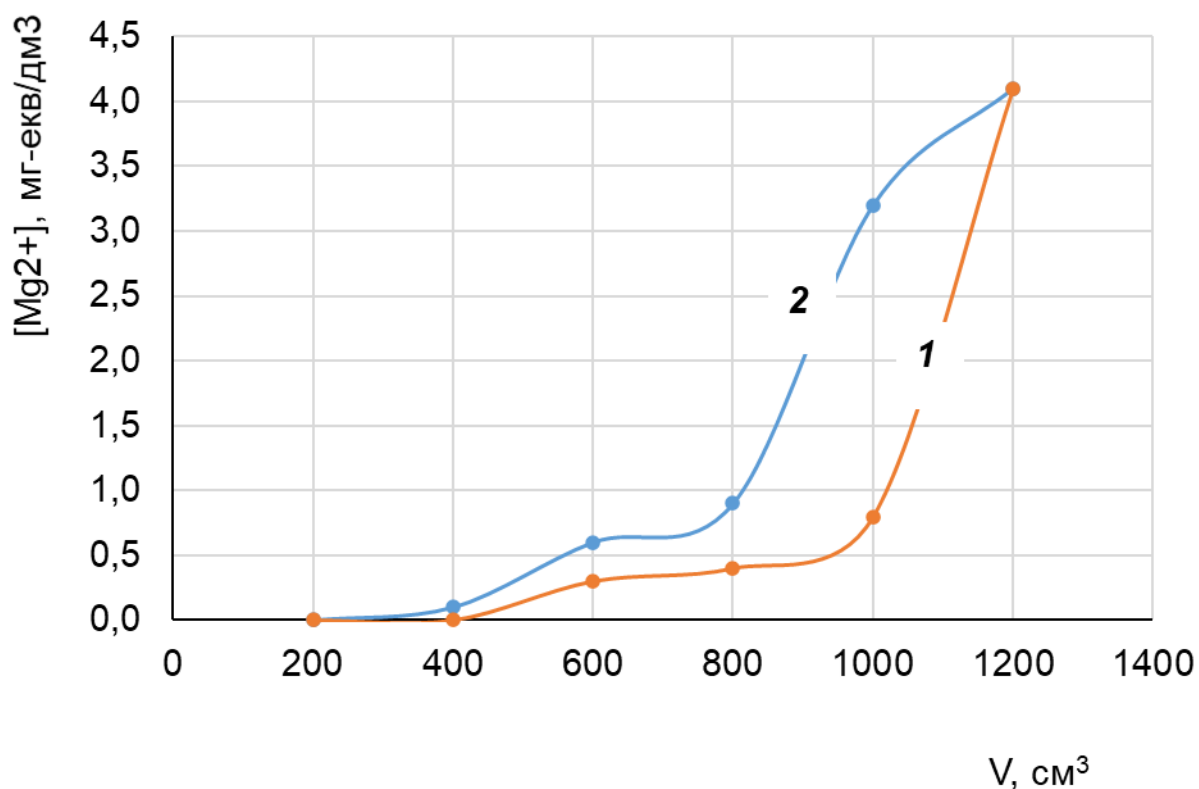


Рис. 3.2. Залежність кількості пропущеної води на концентрацію іонів магнію:
 1 - HCR-S/S FF
 2 - ECOSOFT ECOLITE CK

3.3. Визначення впливу кількості пропущеної води на концентрацію іонів магнію та кальцію

Таблиця 3.3. – Залежність кількості пропущеної води від концентрації іонів магнію та кальцію

№	V	ECOSOFT ECOLITE CK	DOWEX HCR-S/S FF	k = $V_{\text{води}}/V_{\text{катионів}}$
1	200	0	0	1000
2	400	0,2	0	200
3	600	0,7	0,4	30
4	800	1,1	0,6	40
5	1000	4	1,7	50
6	1200	5,1	5,1	60

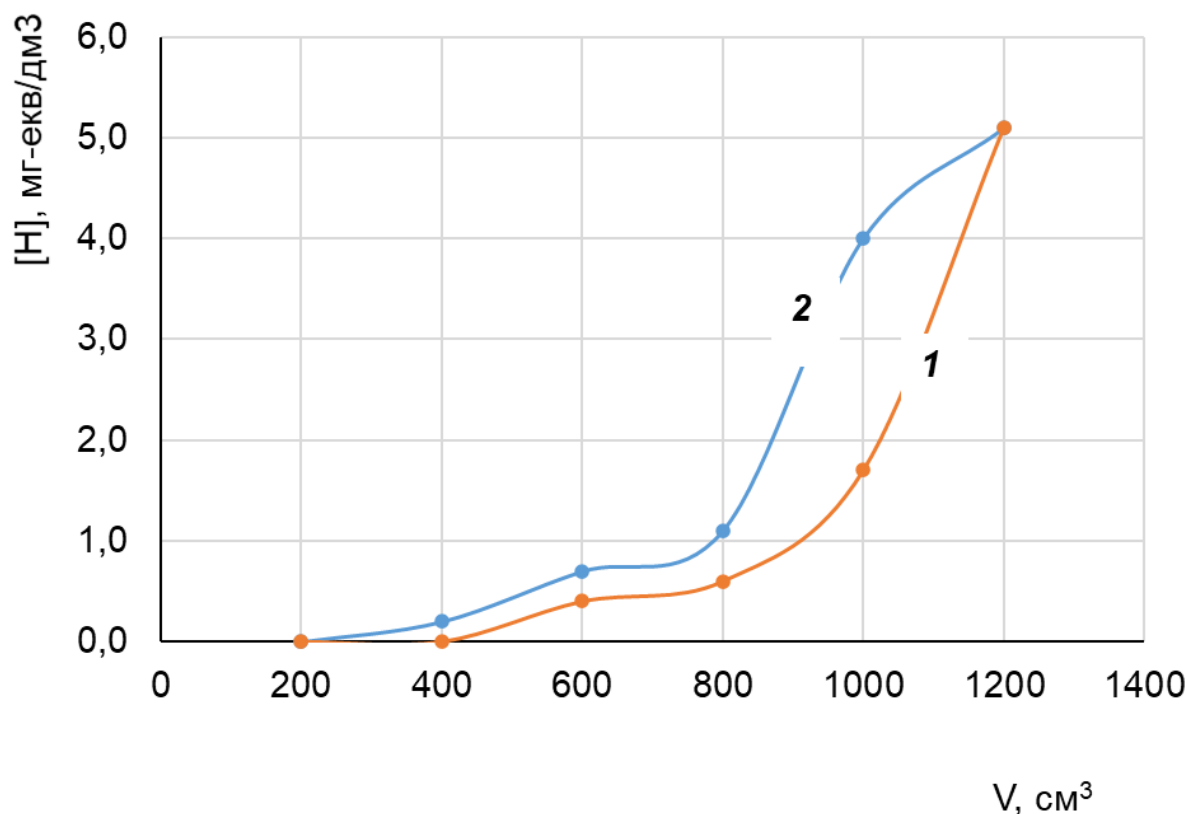


Рис. 3.3. Залежність кількості пропущеної води від концентрації іонів магнію та кальцію:
1 - HCR-S/S FF
2 - ECOSOFT ECOLITE CK

3.4. Зміна загальної жорсткості води після 1800 регенерацій

Таблиця 3.4. – Залежність кількості пропущеної води від концентрацію іонів магнію та кальцію (після 1800 регенерацій)

№	V	ECOSOFT ECOLITE CK	DOWEX HCR-S/S FF	k = $V_{\text{води}}/V_{\text{катионіту}}$
1	200	0	0	1000
2	400	0,3	0,2	20
3	600	1,7	1,2	30
4	800	5,1	5,1	40
5	1000	5,1	5,1	50
6	1200	5,1	5,1	60

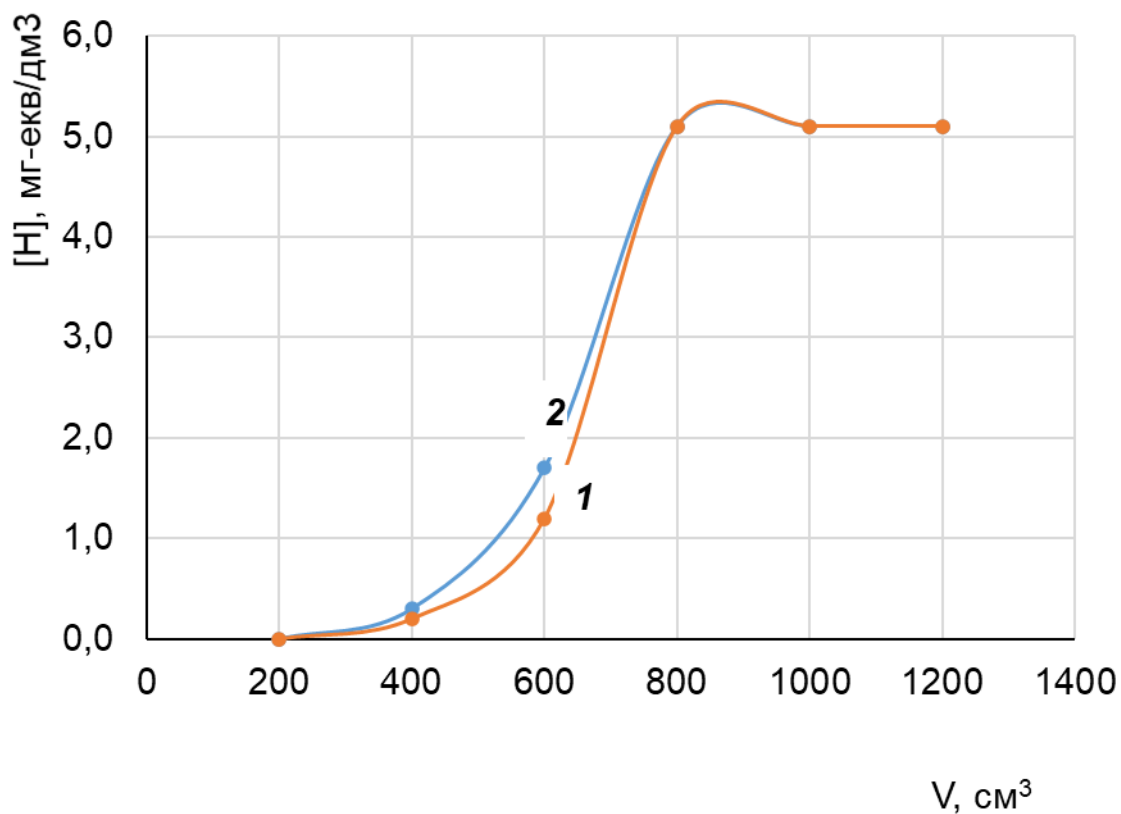


Рис. 3.4. Залежність кількості пропущеної води від концентрацію іонів магнію та кальцію (після 1800 регенерацій):
1 - HCR-S/S FF
2 - ECOSOFT ECOLITE CK

3.5. Порівняння результатів досліджень

Отримані в роботі залежності частково узгоджуються з даними, наведеними в працях інших дослідників. Зокрема, при безперервному пом'якшенні води на іонообмінних смолах більшість авторів виокремлюють кілька характерних зон перебігу процесу (рис. 3.5).

Зона адсорбції солей жорсткості. У цьому інтервалі висоти шару смоли вода практично повністю звільняється від іонів кальцію та магнію, тобто спостерігається максимальний знесолювальний ефект. Для різних типів іонообмінних матеріалів об'єм води, що може бути пропущений через шар за умови майже повного видалення солей жорсткості, зазвичай становить орієнтовно від 30 до 100 об'ємів смоли.

Провідні фахівці у галузі водопідготовки з НТУ «КП» у своїх дослідженнях отримали аналогічну картину зміни концентрації іонів жорсткості вздовж шару іоніту, доповнивши її детальним аналізом перебігу процесу пом'якшення та характеристиками окремих зон масообміну.

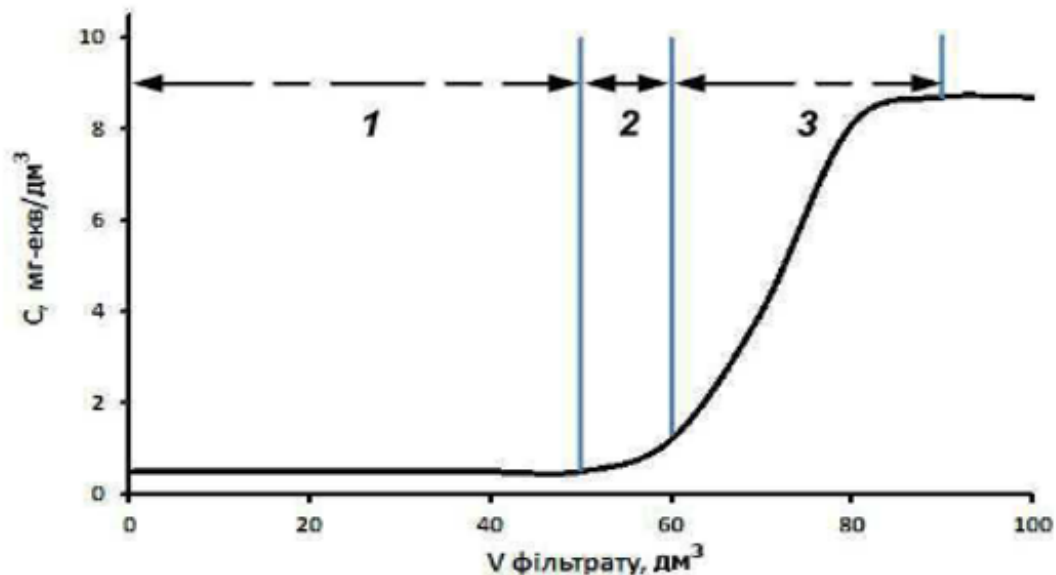


Рис. 3.5. Криві фільтрування води: 1 – зона адсорбції; 2, 3 – зони насичення.

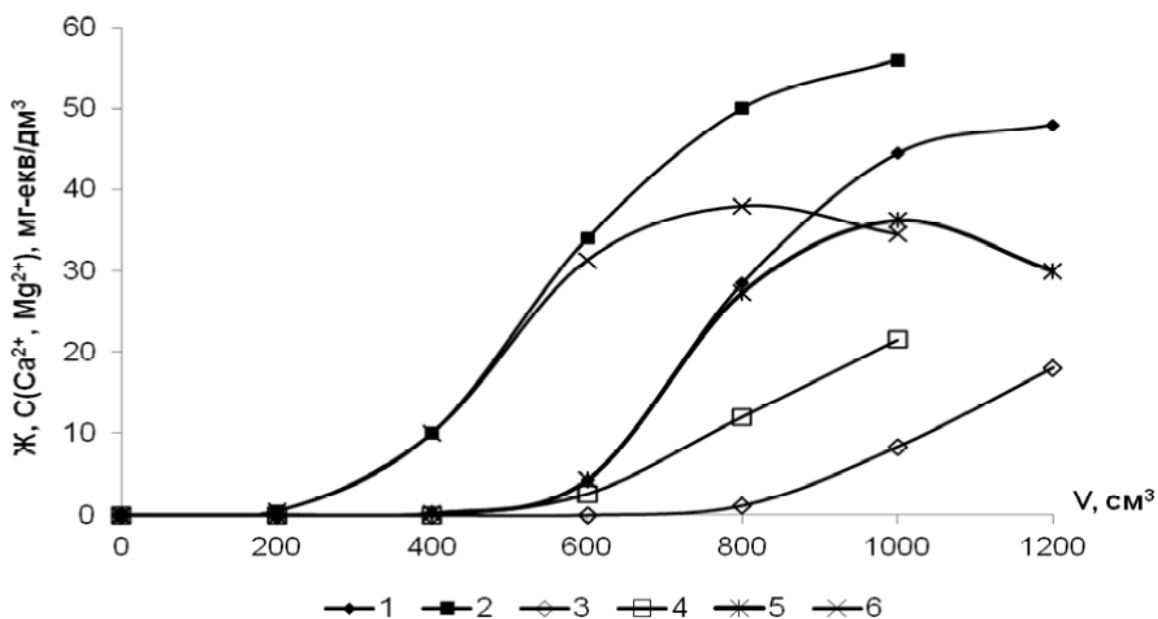


Рис. 1. Залежність жорсткості (1; 2), концентрації іонів кальцію (3; 4) та магнію (5; 6) від пропущеного об'єму модельного розчину М1 (1; 3; 5) та М2 (2; 4; 6) через катіоніт КУ-2-8 в Na^+ формі ($V_i = 20 \text{ cm}^3$) (ПОДС₁ = 1744 мг-екв/дм³, ПОДС₂ = 1295 мг-екв/дм³, ПОДС₃ = 1045 мг-екв/дм³, ПОДС₄ = 838 мг-екв/дм³, ПОДС₅ = 699 мг-екв/дм³, ПОДС₆ = 457 мг-екв/дм³)

Схожі результати для інших іонів описані в статті:

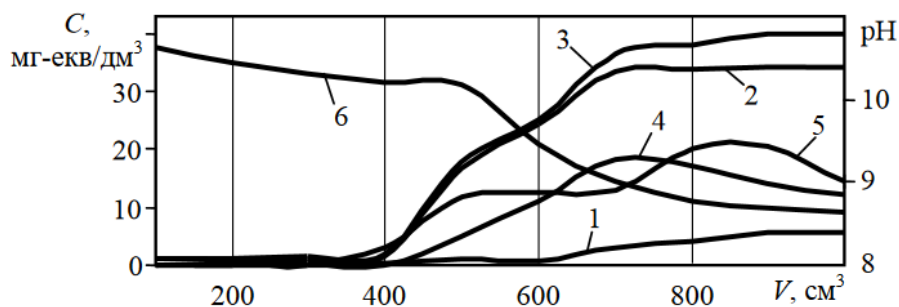


Рис. 1. Залежність концентрації іонів кальцію, магнію, жорсткості, хлоридів, сульфатів та pH від пропущеного розчину через аніоніт АВ-17-8 в ОН формі ($V=20 \text{ см}^3$): $[\text{Ca}^{2+}]$ (1); $[\text{Mg}^{2+}]$ (2); Ж (3); $[\text{Cl}^-]$ (4); $[\text{SO}_4^{2-}]$ (5); pH (6)

Усі отримані результати свідчать, що на початку циклу спостерігається стабільне знесолення води в зоні адсорбції, однак після певного об'єму пропускання відбувається швидке виснаження іонообмінної смоли, втрата нею знесолювальної здатності й виникає потреба у проведенні регенерації.

3.6. Висновки

Досліджено залежність концентрації іонів кальцію від об'єму води, що проходить через шар катіоніту. Встановлено, що зі збільшенням кількості пропущеної води через іоніти ECOSOFT ECOLITE СК та DOWEX HCR-S/S FF вміст кальцію у фільтраті поступово зростає. Це пов'язано з поступним виснаженням обмінної ємності смоли. За підсумками експериментів зроблено висновок, що катіоніт ECOSOFT ECOLITE СК характеризується вищою обмінною здатністю порівняно з DOWEX HCR-S/S FF.

Вивчено вплив об'єму пропущеної води на концентрацію іонів магнію. Показано, що зі збільшенням кількості води, яка проходить через катіоніти ECOSOFT ECOLITE СК та DOWEX HCR-S/S FF, концентрація магнію у пом'якшеній воді також зростає. Така тенденція обумовлена поступовим вичерпанням обмінної ємності смоли та зниженням її здатності до зв'язування іонів жорсткості. Аналіз результатів підтверджує, що катіоніт ECOSOFT ECOLITE СК забезпечує більш ефективне вилучення магнію, ніж DOWEX HCR-S/S FF.

Узагальнено вплив об'єму пропущеної води на сумарну концентрацію іонів кальцію та магнію. Показано, що зі зростанням об'єму води, що

проходить через шар катіоніту ECOSOFT ECOLITE СК або DOWEX HCR-S/S FF, загальний вміст солей жорсткості у фільтраті збільшується. Причиною є виснаження активних центрів смоли і, як наслідок, зниження її обмінної здатності. Отримані дані дозволяють стверджувати, що катіоніт ECOSOFT ECOLITE СК демонструє кращі показники роботи порівняно з DOWEX HCR-S/S FF.

Показано, що при експлуатації іонообмінних смол після приблизно 1800 циклів регенерації граничний корисний об'єм пом'якшеної води істотно зменшується: уже після пропускання близько 800 см³ вихідної води її жорсткість практично не знижується. Отже, після досягнення орієнтовно 1800 регенерацій для обох досліджуваних смол доцільно здійснювати їх заміну. Використання «старої» смоли економічно необґрунтоване, оскільки для її регенерації потрібні значні кількості солі, а отже, загальна економічна ефективність процесу пом'якшення істотно знижується.

4. РЕКОНСТРУКЦІЯ ДІЛЬНИЦІ ВІДОПІДГОТОВКИ

4.1. Опис роботи дільниці водопідготовки

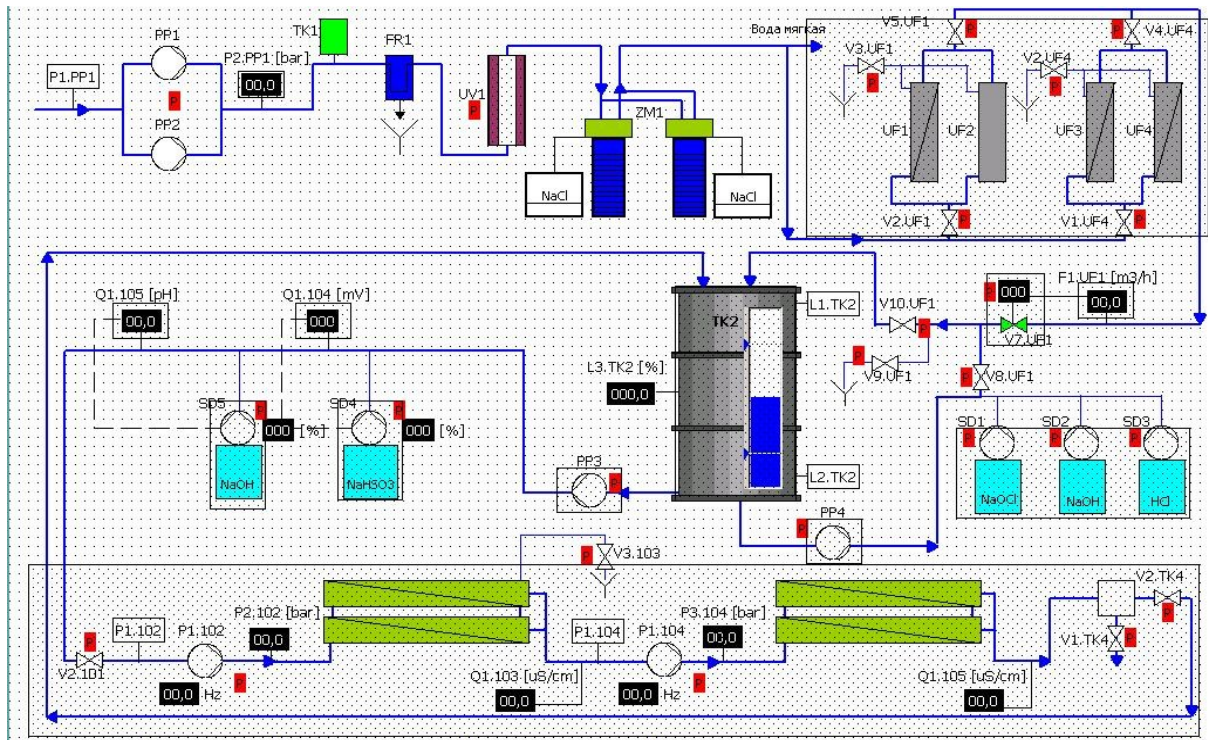


Рис. 4.1. Дільниці водопідготовки

Система збору, зберігання та подачі очищеної води (рисунок 4.1) спроектована для безперервної, цілодобової роботи з підготовки водопровідної води. Її призначення – одержання очищеної води, що відповідає вимогам ДФУ, з подальшим використанням для приготування води для ін'єкцій, генерації чистої пари, а також у процесах виробництва твердих лікарських форм, сиропів та настоянок.

Питна вода з міської мережі надходить на насосну групу PP1 і PP2. Насоси працюють у автоматичному режимі, підтримуючи стабільний тиск у магістралі на рівні 4,8–5,0 бар. Після цього потік спрямовується на самопромивний фільтр грубого очищення FR1 BWT MULTIPUR з класом фільтрації 100 мкм; цикл промивки фільтра задається один раз на годину.

Далі вода проходить через ультрафіолетовий модуль UV1 з автоматичним контролем інтенсивності випромінювання, призначений для зниження мікробіологічного навантаження. УФ-установка працює в

автоматичному режимі та вмикається одночасно із запуском станції ультрафільтрації UV1,2,3,4. Після ультрафіолетового знезараження вода подається на теплообмінник, де здійснюється підігрів міської води, і вже з теплообмінника надходить на пом'якшувач ZM1 Rondomat 31 DWZ 2400 NT (рис. 4.2). У цьому вузлі вода пом'якшується до залишкової жорсткості не більше ніж 0,5 мг-екв/л.



Рис. 4.2. Пом'якшувач води ZM1

Пропонується встановити модернізовану систему пом'якшення води, що включає дві іонообмінні колони із загальним об'ємом завантаження 2000 л. Колони виконуються зі знизу-вгору подачею води та оснащуються спеціальними розподільчими пристроями, які забезпечують рівномірний розподіл потоку по перерізу шару смоли. Для відновлення обмінної здатності іоніту передбачається один регенераційний бак, за потреби схема може бути доповнена другим резервуаром.

Запропоноване технічне рішення підвищує ступінь очищення води та істотно зменшує навантаження на дорогі мембранні стадії – ультрафільтрацію та зворотний осмос. Виходячи з рекомендацій спеціальної літератури та практики експлуатації подібних установок, доцільно також

передбачити теплообмінник для підігріву міської води, якщо її температура опускається нижче 15 °С.

Очікуваний технічний ефект полягає в оптимізації роботи всієї системи водопідготовки в умовах, коли взимку температура вхідної води може знижуватися до 2 °С, що практично вдвічі зменшує продуктивність апаратів. Як теплоносієм використовується гаряча вода з внутрішньозаводської тепломережі, завдяки чому:

зростає продуктивність апаратів пом'якшення води;

підвищується ефективність системи ультрафільтрації;

покращуються умови роботи установок зворотного осмосу;

усувається проблема утворення конденсату на поверхні трубопроводів.

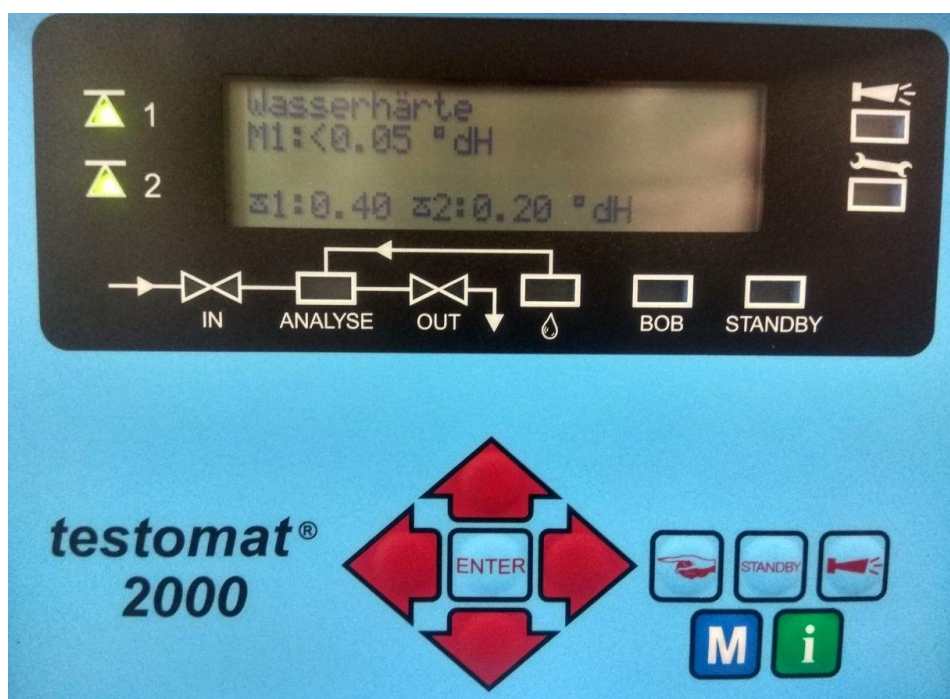


Рис. 4.3. BWT TESTOMAT 2000

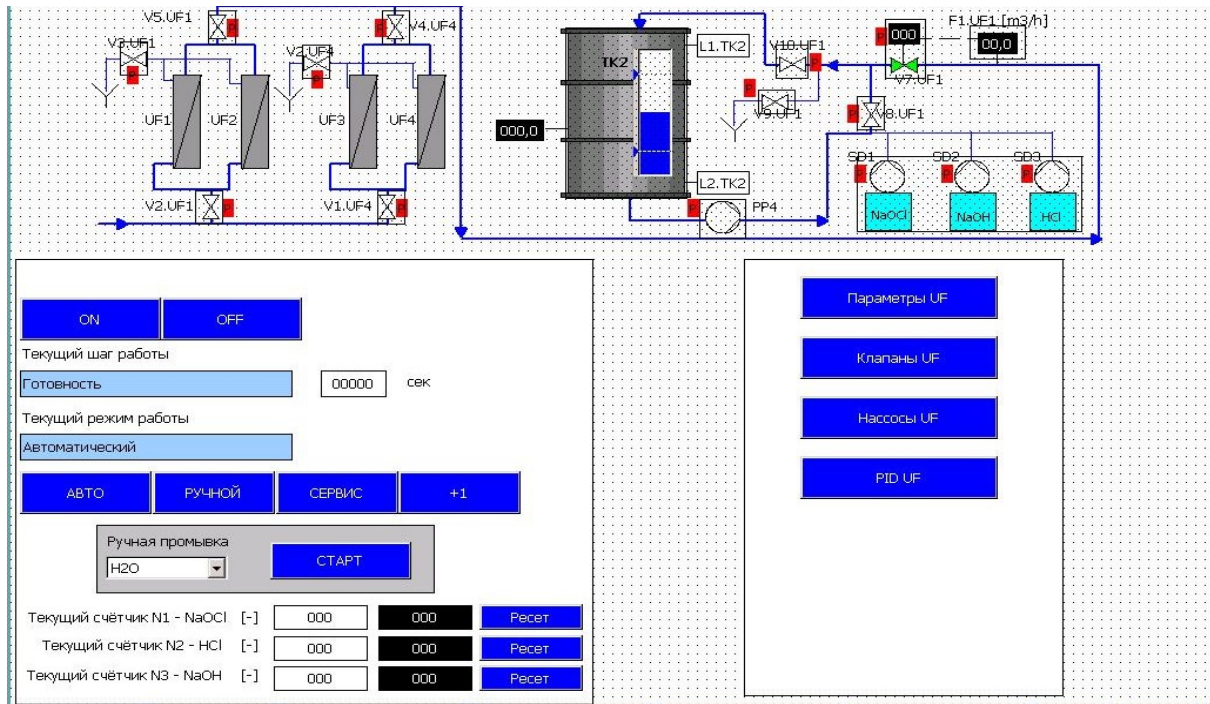


Рис. 4.4. Станція ультрафільтрації UV

Після блоку пом'якшення в лінію підготовки води вмикають аналізатор жорсткості BWT TESTOMAT 2000 (рис. 4.3), який забезпечує безперервний автоматичний контроль залишкової твердості. Прилад працює в онлайн-режимі: перший попереджувальний сигнал подається тоді, коли жорсткість пом'якшеної води досягає 0,2 мг-екв/л, а другий – при перевищенні рівня 0,4 мг-екв/л. Таким чином оператор своєчасно отримує інформацію про виснаження іонообмінної смоли та може ініціювати регенерацію або перевірку пом'якшувача, не допускаючи подачі води з надмірною жорсткістю на наступні високотехнологічні ступені очищення.

Далі потік пом'якшеної води спрямовується на проміжний механічний фільтр FR2 зі ступенем фільтрації 50 мкм. Він затримує залишкові механічні домішки, продукти корозії, можливі частинки смоли чи накипу, захищаючи мембранні елементи. Після фільтра FR2 підготовлена вода надходить на повністю автоматизовані ультрафільтраційні станції UV1, UV2, UV3 та UV4 (рис. 4.4), які працюють паралельно або за схемою поетапного підключення, залежно від витрати та режиму підприємства.

Щоб забезпечити стабільні гідравлічні умови роботи ультрафільтраційних модулів, на вході до кожної станції встановлюють редуційний клапан V5.FR2, відрегульований на тиск 2,0 бар. Це дозволяє підтримувати робочий діапазон тиску в межах 1,8–2,0 бар, що є оптимальним для мембран і суттєво зменшує ризик їхнього пошкодження або передчасного забруднення.

Станції ультрафільтрації працюють у повністю автоматичному режимі, виконуючи цикли зворотного промивання з використанням послідовності реагентів: H_2O , $NaOH$, $NaOH$ та HCl . Для подачі промивної води з бака пом'якшеної води у модулі ультрафільтрації використовується насос PP4. Під час хімічної промивки в систему дозується відповідний реагент – одним із насосів-дозаторів SD1, SD2 або SD3 вводиться розрахована кількість лугу чи кислоти, необхідна для відновлення пропускну здатності мембрани. За потреби передбачена можливість ручного запуску циклу очищення, що зручно при позапланових сервісних роботах.

Запуск станції ультрафільтрації жорстко пов'язаний з рівнем води у баку пом'якшеної води ТК2: при зниженні заповнення бака нижче 70 % система автоматично вмикає ультрафільтрацію до відновлення необхідного рівня. Сам бак об'ємом $V = 9000$ л оснащений датчиком рівня, повітряним фільтром тонкого очищення (0,2 мкм) для захисту від мікробіологічної контамінації з повітря, а також запірною арматурою для можливості відключення ємності на обслуговування.

З бака ТК2 пом'якшена та ультрафільтрована вода подається насосом PP3 на мембрану зворотного осмосу. На цій ділянці трубопроводу встановлено сенсор REDOX-потенціалу та рН-метр, сигнал з яких використовується для автоматичного дозування реагентів $NaHSO_3$ та $NaOH$. Система підтримує REDOX нижче 250 мВ (для запобігання окисному руйнуванню мембран та контролю вмісту вільного хлору) та рН у межах 7,8–

8,4, що є оптимальним діапазоном для стабільної роботи елементів зворотного осмосу.

Безпосередньо перед входом на модулі зворотного осмосу додатково встановлено проміжний фільтр FR101 зі ступенем фільтрації 5 мкм, який виконує роль фінішного бар'єру для твердих частинок. Така каскадна побудова – пом'якшення, механічне очищення, ультрафільтрація, тонка фільтрація та коригування хімічних параметрів – забезпечує стабільні умови для роботи установки зворотного осмосу та гарантує високу якість отриманої очищеної води.

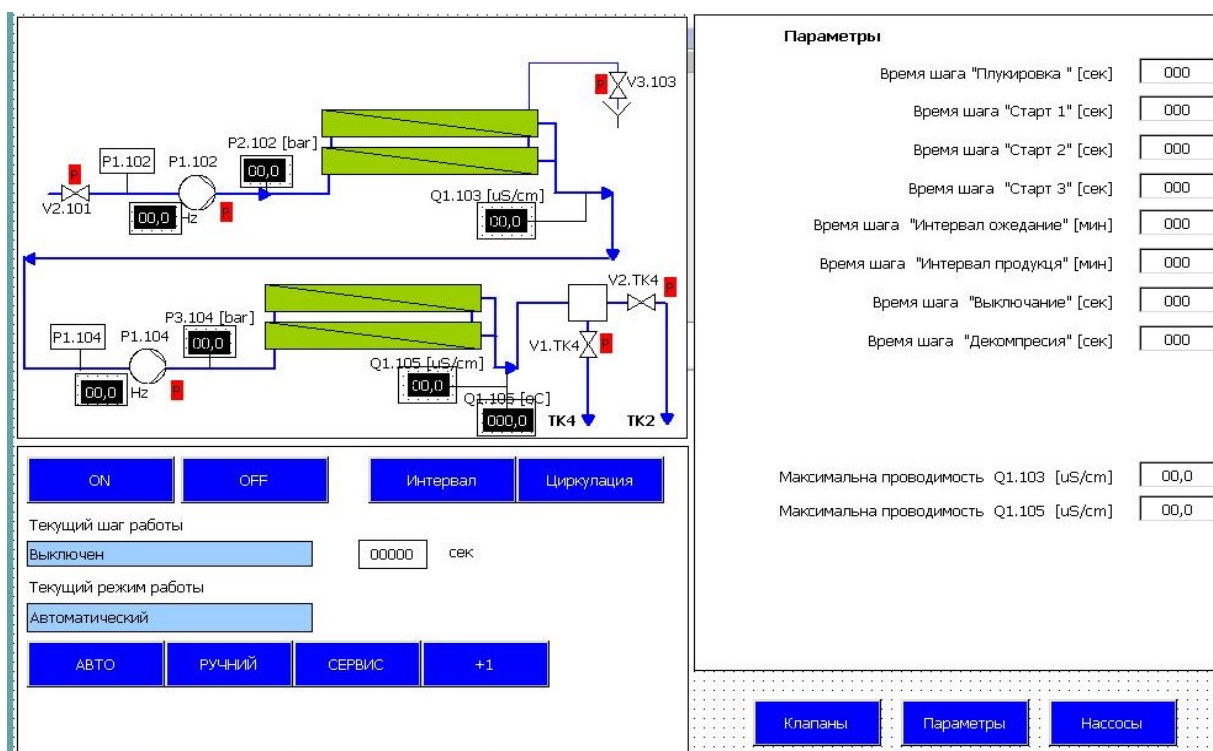


Рис. 4.5. Схема дільниці зворотнього осмосу.

Установка зворотного осмосу (рис. 4.5) працює переважно в повністю автоматичному режимі протягом року і вимикається лише під час ремонту чи усунення несправностей. Після насоса PP102 тиск контролюється датчиком і задається в параметрах насоса на панелі керування в межах 13–22 бар. Аналогічно, після насоса PP104 тиск відстежується окремим датчиком і встановлюється в діапазоні 7,5–10 бар. Продуктивність блоку зворотного

осмосу контролюється витратоміром F3.105 і має бути не меншою ніж 8,0 м³/год.

Установка зворотного осмосу забезпечує отримання очищеної води з електропровідністю менше 4,0 μS/см. Цей показник відслідковується за допомогою датчика провідності (кондуктометра) Q1.105. Одержана таким чином чиста вода надходить у накопичувальний бак ТК4.

Реалізовано кілька режимів роботи:

Ручний режим. Установка зворотного осмосу працює без автоматичних циклів промивки, просто виробляючи воду та подаючи її в накопичувальний бак.

Автоматичний режим – переривчастий. Коли бак ТК4 заповнений на 100 %, кожні 90 хв блок зворотного осмосу автоматично вмикається в режим промивки: протягом 4 хв здійснюється скид води через повітряний клапан V2.ТК4 у бак ТК2.

Автоматичний режим – циркуляція. Якщо накопичувальний бак ТК4 заповнений на 100 %, установка зворотного осмосу може працювати безперервно, без обмеження часу, зі скиданням потоку в бак ТК2 в режимі циркуляції.

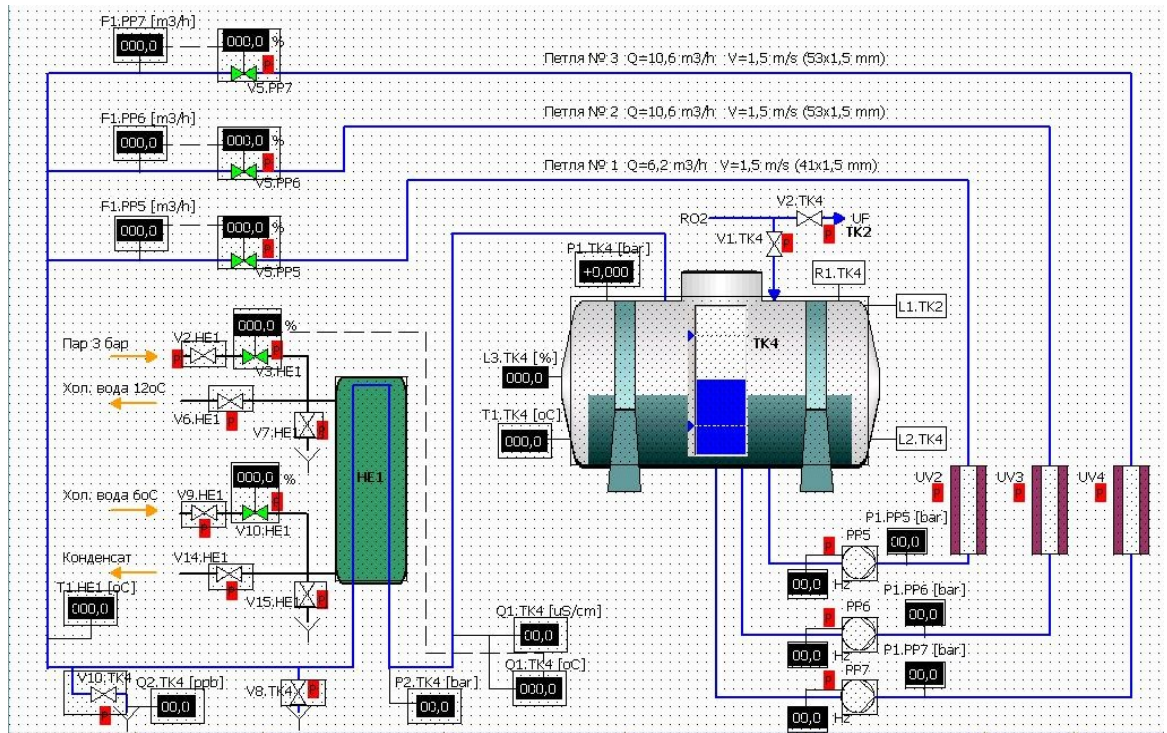


Рис. 4.6 Система зберігання води очищеної

Очищена вода накопичується в резервуарі ТК4 (рис. 4.6) об'ємом 14 000 л і звідти подається в три окремі контури за допомогою трьох циркуляційних насосів PP5, PP6 та PP7. Бак деіонізованої води оснащений стерильним повітряним фільтром, запірною арматурою, датчиком тиску, датчиком рівня, датчиком температури, а також запобіжною (розривною) мембраною для захисту від надмірного тиску.

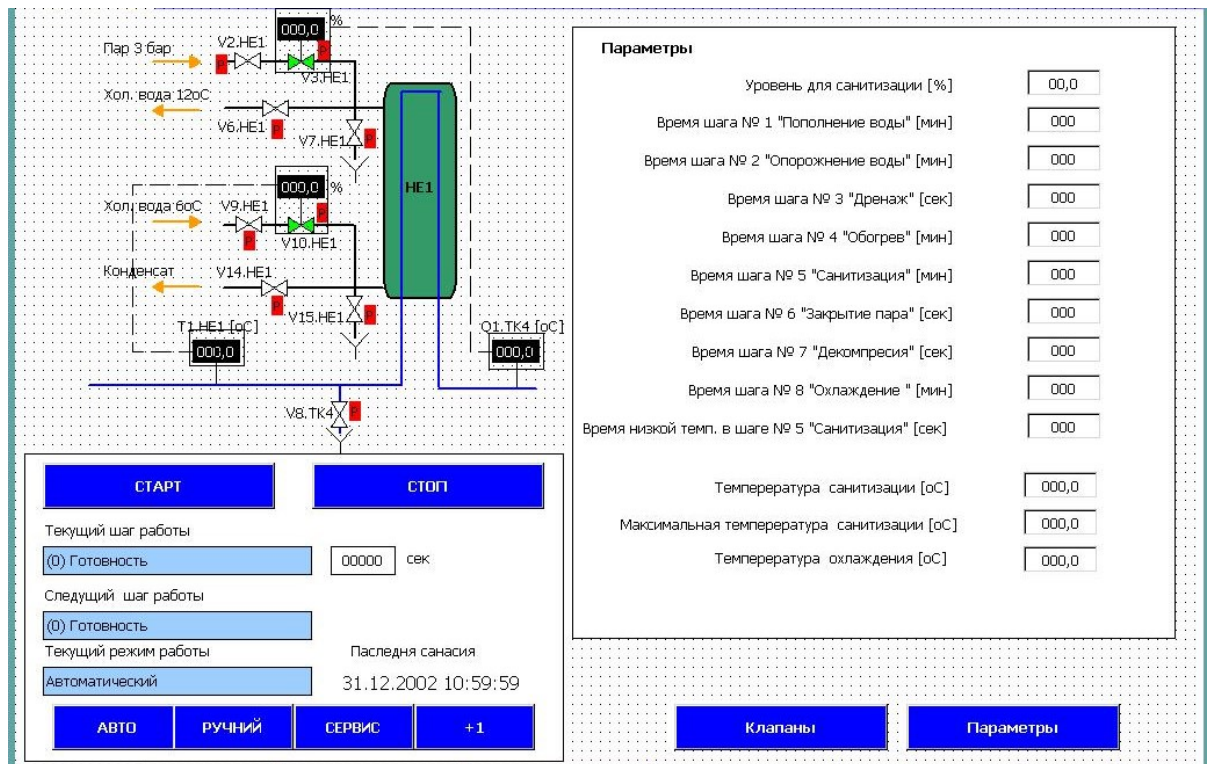


Рис. 4.7. Теплообмінник система зберігання води очищеної

Температуру зберігання очищеної води на рівні 18–22 °С підтримують за допомогою теплообмінника NE1 (рис. 4.7). Цей вузол також використовується для термічної дезінфекції системи: вода нагрівається до 90 °С і циркулює протягом 30 хв, для чого в теплообмінник подають технічну пару та охолоджувальну воду.

Для забезпечення стабільної мікробіологічної чистоти в контурі встановлено три ультрафіолетові модулі UV2, UV3 та UV4, а інтенсивність УФ-випромінювання контролюється в автоматичному режимі. Витрату очищеної води в трьох гілках розподілу відстежують витратоміри F1.PP5, F1.PP6 і F1.PP7; регулювання здійснюється електричними мембранними клапанами V5.PP5, V5.PP6 і V5.PP7.

Контур подачі очищеної води додатково обладнаний датчиком температури, датчиком провідності (кондуктометр Q1.ТК4), датчиком тиску та аналізатором ЗОВП Q2.ТК4 (у ppb), що дозволяє безперервно контролювати якість води.

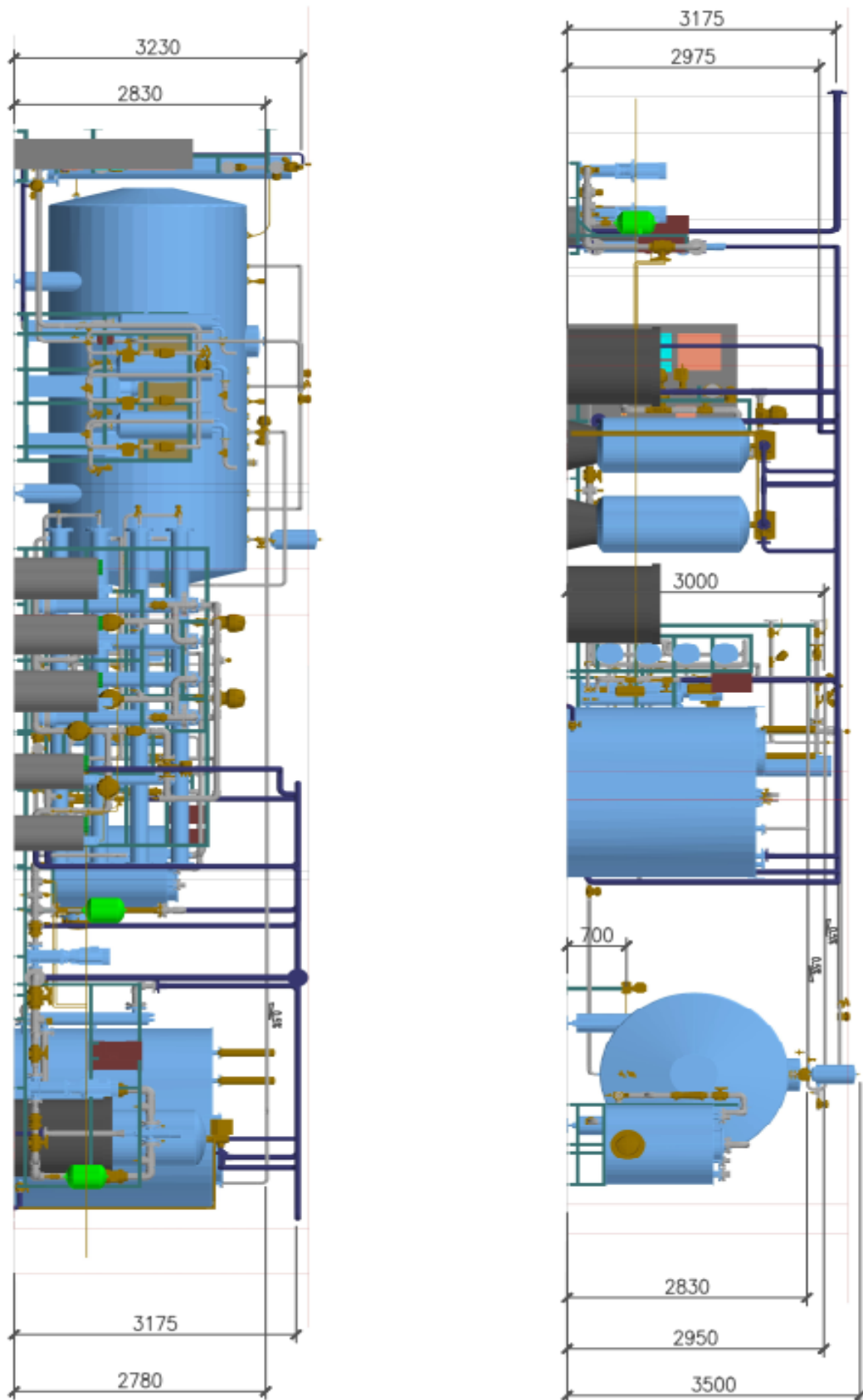


Рис. 4.9. Розріз цеху (тьохвимірний) ділянки очищення води

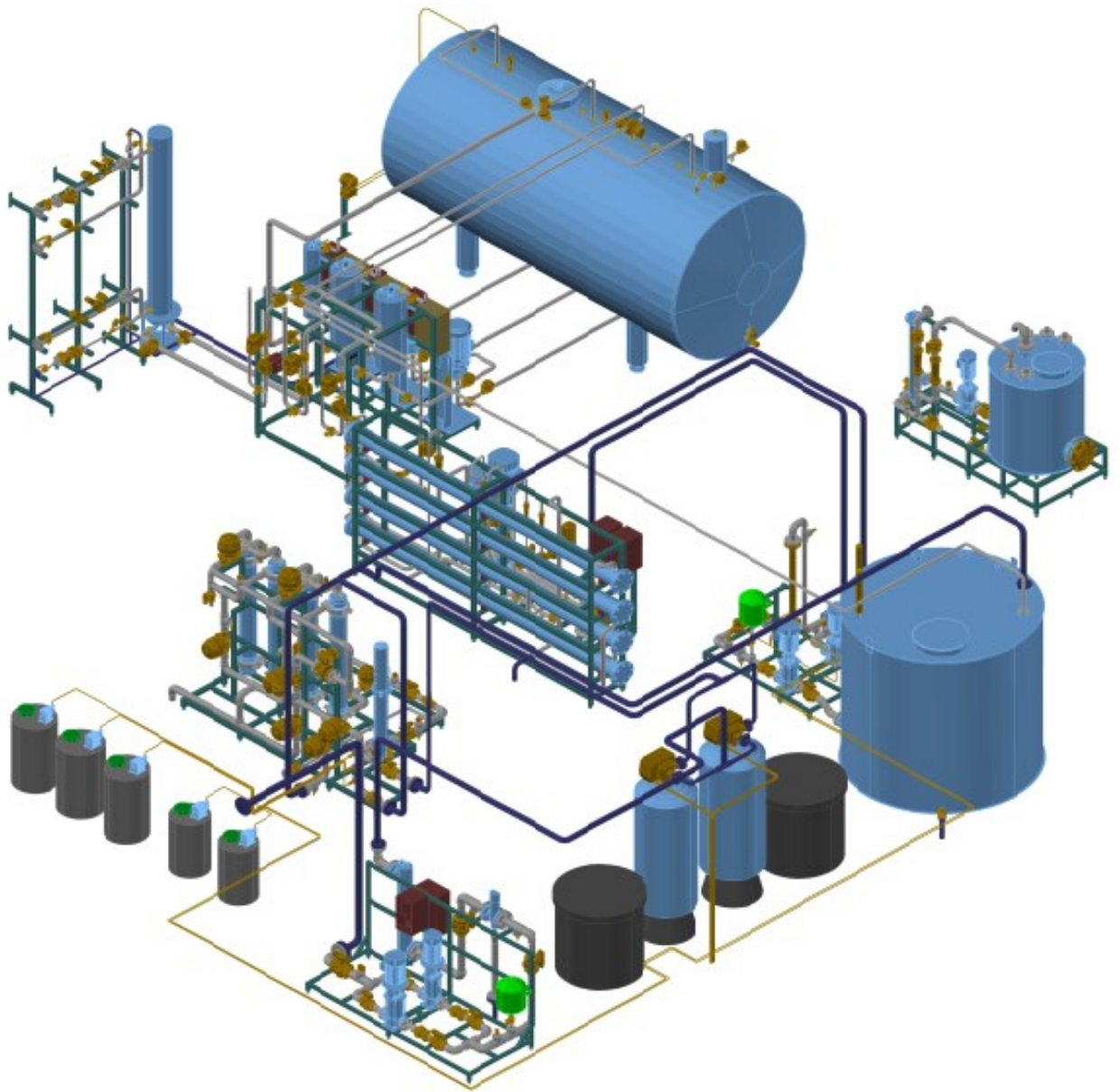


Рис. 4.10. Трьохвимірна схема ділянки очищення води

4.2. Технологічний прорахунок дільниці водопідготовки

Подача міської води на дільницю здійснюється двома живильними насосами PP1, PP2 продуктивністю по 17 м³/год, модель Grundfos CRNE15-06 A-FGJ-G-E-HQQE. Для вирівнювання гідравлічних коливань у лінії встановлено мембранний бак ТК1 тиском 10 бар та об'ємом 35 л (Grundfos Tank GT-H-35 V).

Сира вода спочатку проходить через попередній фільтр грубого очищення FR1 Multipur 80 AP зі ступенем фільтрації 100 мкм та максимальною продуктивністю 35 м³/год. Далі потік спрямовується на ультрафіолетову лампу UV1 Bewades 400W200/17Hi (потужність 2×200 Вт, продуктивність 35 м³/год), де відбувається первинне знезараження. Після цього вода надходить у пластинчастий теплообмінник HE2 Funke FP-10 DN80 PN16 площею теплообміну 100 м², де коригується температура перед подальшими стадіями.

На ступені пом'якшення працюють дві станції ZM1 Rondomat 31W2400, сумарною продуктивністю 2×20 м³/год. Вони видаляють солі жорсткості й формують потік пом'якшеної води, який проходить через проміжний фільтр FR2 OF-1МСНТ/60 (фільтрація 50 мкм, 35 м³/год). Якість пом'якшення контролюється приладом загальної та карбонатної жорсткості TEST BWT TESTOMAT 2000, який автоматично вимірює жорсткість у °d, °f, ppm CaCO₃, ммоль/л.

Далі вода подається на блок ультрафільтрації, що складається з чотирьох модулів UF1–UF4 Pentair X-Flow UF 4 X-line з індивідуальною продуктивністю 12–16 м³/год. Перед ними за схемою розташовані станції дозування реагентів: SD1 (NaOCl), SD2 (HCl), SD3 (NaOH) і SD4 (NaHSO₃) – усі з продуктивністю 18,5 л/год при тиску 6,2 бар (для SD4 – 7 бар), а також додаткова станція SD5 для NaOH із подачею 4 л/год при 7 бар; усі дозатори виконані на базі насосів Grundfos DME19-6.

Для захисту ємності пом'якшеної води ZB2 (бак V = 9000 л, виробник KTS) від мікробіологічного забруднення по повітрю встановлено два стерильні повітряні фільтри FR3, FR4 High Flow Tetpor 0,20 μm 20" ZCHT-2-C з класом фільтрації 0,2 мкм. Перекачування пом'якшеної води з цієї ємності забезпечують насоси PP3 та PP4 продуктивністю по 17 м³/год (моделі Grundfos CRNE15-05 AN-FGJ-G-E-HQQE та CRNE15-03 AN-FGJ-G-E-HQQE відповідно).

Для стабілізації тиску на цьому етапі додатково використовується мембранний бак ТК2 тиском 10 бар і об'ємом 35 л (Grundfos GT-H-35 V). Стан дозування та кондиціонування води контролюють дві вимірювальні комірки: Q1.SD4 REDOX Orbisint CPS12D з діапазоном від -1500 мВ до +1500 мВ та Q1.SD5 Orbisint CPS11D для вимірювання рН 0–14.

Перед зворотним осмосом передбачений проміжний фільтр тонкого очищення FR101 1MCHT40EC зі ступенем фільтрації 5 мкм і продуктивністю 20 м³/год. Високий тиск на мембранні модулі створюють насоси PP102 і PP104 продуктивністю по 17 м³/год, обидва моделі Grundfos CRNIS-17 E-CX-GI-E-HQQE.

Серце установки зворотного осмосу – мембранні модулі ТК1.103, ТК2.103, ТК1.105, ТК2.105 типу TORAY TM720-430. Кожен модуль має продуктивність 41,6 м³/добу, селективність 99,8 % та розрахований на тиск 15–25 бар. Якість пермеату контролюється датчиком електропровідності Q1.103 Condumax CLS16 з коефіцієнтом комірки k = 0,1 і діапазоном вимірювання 0,04 мкСм/см – 500 мкСм/см.

У комплексі описане обладнання формує послідовну лінію підготовки води: від забору з міської мережі, через ступені грубого й тонкого очищення, знезараження, пом'якшення, ультрафільтрації та зворотного осмосу – до отримання стабільного потоку очищеної води необхідної якості.

5. МОДЕРНІЗАЦІЯ ІОНООБМІННОГО АПАРАТУ

5.1. Опис запропонованого технічного рішення

У частини напірних (закритих) фільтрів подача води здійснюється зверху вниз. Така схема має суттєвий недолік: потік притискає шар іонообмінної смоли, він надмірно ущільнюється, і робоча ефективність фільтра зменшується.

За умови майже нерухомого, спресованого шару гранули смоли частково злипаються, з'являються «мертві» ділянки, куди промивний чи регенераційний розчин потрапляє погано, а паралельно утворюються канали, через які розчин проходить практично без контакту з іонітом. У таких зонах застою підвищується ризик розвитку мікрофлори, що призводить до мікробіологічного забруднення як смоли, так і елююючих розчинів.

Відкриті фільтри зі знизу-вгору подачею позбавлені цих недоліків. Вода надходить знизу з такою швидкістю, що частинки іоніту перебувають у псевдозрідженому стані: гранули «підвішені» в потоці й інтенсивно перемиваються з усіх боків. За таких умов робочий об'єм смоли використовується значно повніше. Попри більший гідравлічний опір і потребу в додаткових насосах, фільтри з нижньою подачею води нині застосовують дедалі частіше саме через їхню вищу ефективність і гігієнічність.

5.2. Будова та принцип роботи обладнання

У фільтрі-пом'якшувачі вихідна жорстка вода подається в корпус (1), заповнений шаром іонообмінної смоли, і, проходячи крізь завантаження, звільняється від солей жорсткості. У зоні фільтрації відбувається реакція іонного обміну: іони кальцію та магнію, що формують жорсткість, заміщуються іонами натрію, попередньо закріпленими в смолі.

Коли запас натрію у завантаженні вичерпується, автоматичний керуючий клапан (2) переводить установку в режим регенерації. У цей час до фільтра з сольового бака (3) подається розчин високочистого NaCl, рух якого

організують у зворотному щодо робочого циклу напрямку. Розчин вимиває з зерен смоли накопичені іони Ca^{2+} та Mg^{2+} і знову насичує їх іонами Na^+ , відновлюючи обмінну здатність завантаження.

Іонообмінний вузол складається з двох фільтрувальних колон і сольорозчинника. Конструкція дає змогу вмикати колони як паралельно (для збільшення продуктивності), так і послідовно (для підвищення ступеня пом'якшення) залежно від складу вихідної води й вимог до якості очищеної.

У застосованому варіанті колони (рис. 5.4) заповнені смолою Dowex HCR-S/S із середнім розміром зерен 0,52 мм та робочою обмінною ємністю близько 200 г-екв/м³, що забезпечує високий ресурс між регенераціями.

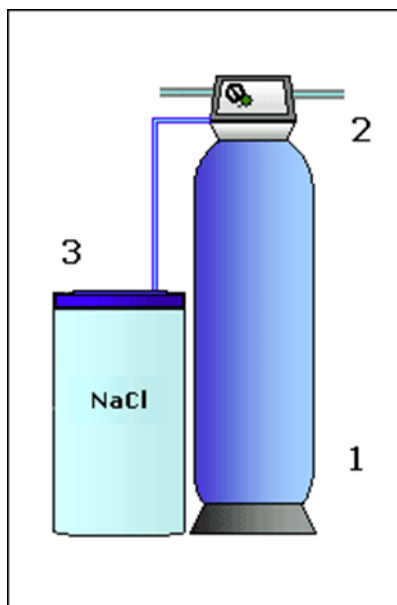


Рис. 5.1. Іонообмінний фільтр

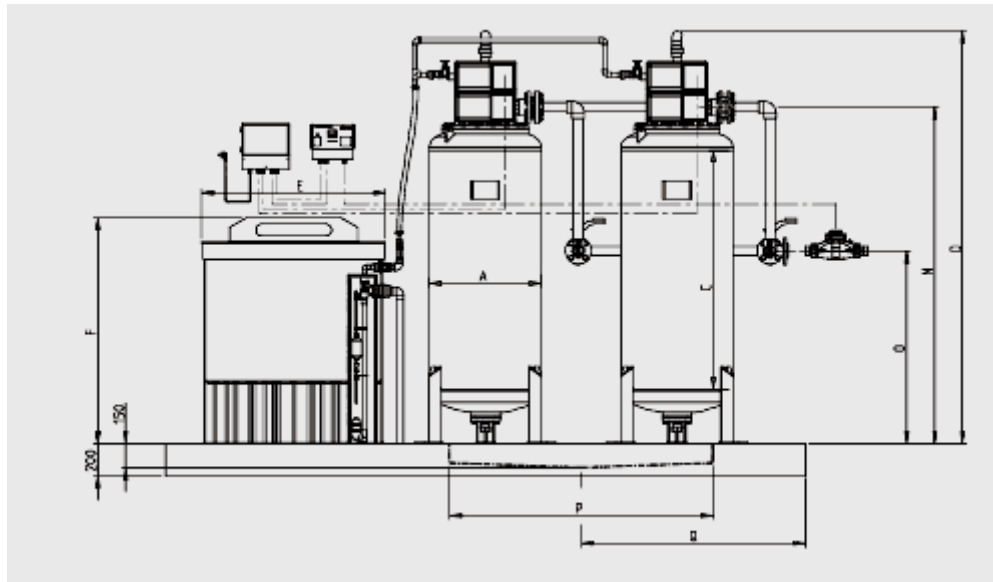


Рис. 5.2. Іонообмінний апарат

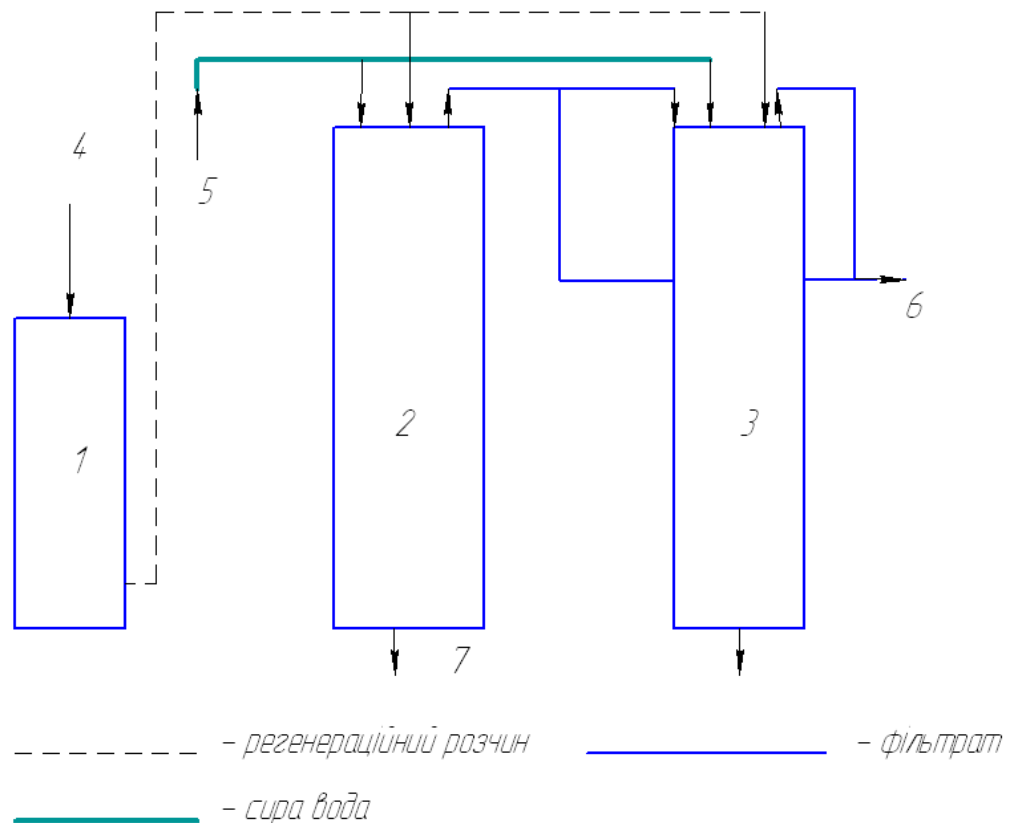


Рис. 5.3. Схема пом'якшення води:
 1- соляний бак; 2, 3 - натрій-катіонітовий фільтр; 4 - вода для регенераційного розчину; 5 - вхідна вода; 6 - вода на ультрафільтрацію; 7 - відпрацьована вода після регенерації.

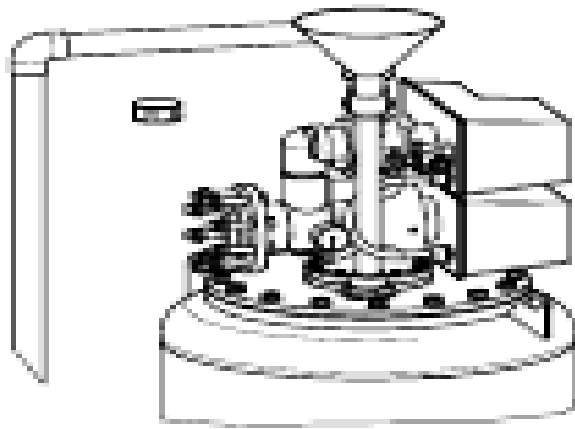


Рис. 5.4. Заповнення фільтру іонообмінною смолою

5.3. Розрахункова частина

Дані для розрахунку

Показник	Позначення	Кількість, мг/дм ³	Кількість, мг- екв/дм ³
Сухий залишок	So	398	—
Окислюваність, мго ₂ /дм ³	Ok	2	—
Загальна жорсткість	Жо	—	6,0
Карбонатна твердість (вона ж лужність)	Жк	—	5,5
Некарбонатна твердість	Жнк	—	0,5
Бікарбонат-іони	HCO ₃ ⁻	335	5,5
Сульфат-іони	SO ₄ ²⁻	48	1,0
Хлорид-іони	Cl ⁻	18	0,5
Бісилікат-іони	HSiO ₃ ⁻	38,5	0,5
Натрій-іони	Na ⁺	23	1,0
Вільна кислота* (у перерахунку на бікарбонат-іони)	CO ₂	22	0,5*

Продуктивність подачі на ультрафільтраційну систему становить 20 т/год.

Як вихідну використовують міську водопровідну воду з характеристиками, наведеними в таблиці 5.1.

Оскільки така вода вже відповідає санітарним вимогам і проходить базову міську очистку, її можна направляти на хімічне знезасолювання за технологією іонного обміну без додаткових стадій попередньої обробки.

Для систем, призначених для отримання чистої води, а також для холодильних контурів, натрій-катіонування (Na-катіонування) повністю задовольняє вимоги до якості підготовленої води та здатне забезпечити стабільні показники очищення (рис. 5.1).

Метод Na-катіонування ефективно видаляє катіони жорсткості та створює оптимальні умови для подальших технологічних процесів, зокрема роботи ультрафільтрації та зворотного осмосу, запобігаючи утворенню відкладень і збільшуючи ресурс обладнання.

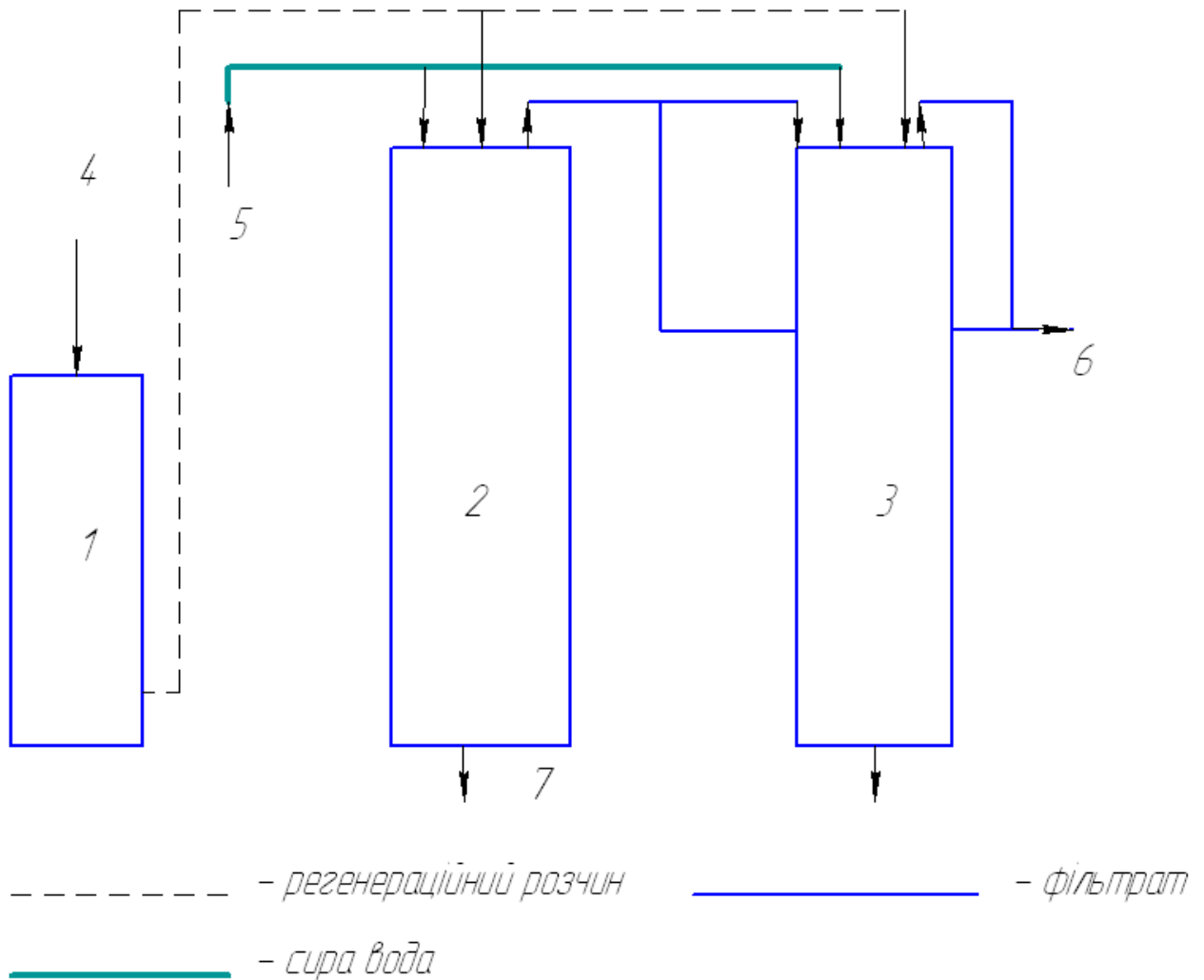


Рис. 5.5. Схема пом'якшення води:

1- соляний бак; 2, 3 - натрій-катионітовий фільтр; 4 - вода для регенераційного розчину; 5 - вхідна вода; 6 - вода на ультрафільтрацію; 7 - відпрацьована вода після регенерації.

Необхідні показники якості обробленої води повинні відповідати даним таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Якість обробленої води

Назва	Для ультрафільтрації	Для тепломережі
Жорсткість, мг-екв/дм ³	0,05	1,2
Лужність абсолютна, мг-екв/дм ³	0,02	0,7
Концентрація кремнієвої кислоти мг/дм ³ ; SiO ₃ ^I	0,4	38
Загальна кількість, мг/дм ³	2,5...3	165

5.3.1. Вибір конструкційних матеріалів

Добір матеріалів для вузлів і агрегатів у харчовому виробництві здійснюють з урахуванням кількох ключових вимог. Передусім, усі елементи, що мають прямий контакт із продуктом чи водою, повинні бути дозволені до використання в харчовій галузі й не виділяти шкідливих домішок у середовище. Другою важливою умовою є економічна доцільність: обрані матеріали мають забезпечувати потрібні властивості без зайвого подорожчання обладнання. Третій фактор – висока надійність і достатній ресурс роботи, щоб машина могла працювати тривалий час без аварій і позапланових зупинок.

Під час проєктування машин та апаратів для водопідготовки та інших харчових процесів ці вимоги реалізують через застосування конструкційних матеріалів, офіційно дозволених для контакту з харчовими продуктами (перелік матеріалів, які використовуються в машинах для очищення води, наведено в таблиці 6.2), через вибір максимально недорогих, але придатних за міцністю й технологічними параметрами матеріалів, а також через правильне поєднання пар тертьових елементів, щоб мінімізувати інтенсивність зношування.

Знос деталей небезпечний тим, що в процесі роботи переріз елементів зменшується, локальні напруження зростають і в певний момент можуть перевищити межу втоми, що призводить до тріщиноутворення та руйнування. Аварійний вихід з ладу важливих вузлів означає простої, порушення технологічного ритму й, відповідно, неприйнятні втрати для виробництва.

Щоб одночасно виконати санітарні вимоги й запобігти корозійному руйнуванню, у вузлах, що контактують з очищеною водою або продуктом, застосовують спеціальні високолеговані корозійностійкі та нержавіючі сталі, а також харчові гумові матеріали (стрічки, ущільнення тощо), сертифіковані для харчової промисловості.

Корпуси фільтрів іонообмінних апаратів виконують із вуглецевої сталі з подальшим нанесенням антикорозійного захисного покриття зсередини. Зовнішні ковпаки Na-катіонітних фільтрів виготовляють із вуглецевої сталі, тоді як для фільтрів Н–ОН-типу використовують нержавіючу сталь через більш агресивні умови експлуатації.

Верхні й нижні збірно-розподільчі пристрої, а також щілинні ковпачки типу ФЕЛ виготовляють із нержавіючої сталі. Такий підхід до вибору конструкційних матеріалів для іонообмінних установок дозволяє досягти оптимального поєднання довговічності, стійкості до робочого середовища та економічної ефективності експлуатації обладнання.

Корпус іонообмінного апарата виконаний зі сталі марки 12Х21Н5Т, що регламентується стандартом ГОСТ 5632-72. Застосування цього матеріалу для обладнання, що контактує з водою, дозволено органами МОЗ України – дозвіл № 123-14/297-7 від 29.01.76.

Стійки апарата виготовляються зі сталі 40Х. Для них також діє ГОСТ 5632-72 і той самий дозвіл МОЗ України № 123-14/297-7 від 29.01.76, що підтверджує можливість використання матеріалу у складі харчового та фармацевтичного обладнання.

Трубопроводи до іонообмінного апарата виконуються з матеріалу ІРП-1368 відповідно до вимог ГОСТ 9030-74. Їх застосування в устаткуванні санітарного призначення узгоджене тим самим дозволом МОЗ – № 123-14/297-7 від 29.01.76.

Перехідники, які з'єднують окремі елементи трубопроводу та апарата, виготовляють зі сталі 12Х18Н10Т за стандартом ГОСТ 5632-72. Для цього матеріалу діє окремий дозвіл МОЗ України № 126-14/1461-3 від 16.09.67.

Гайки та болти, що використовуються для кріплення вузлів іонообмінного апарата, також виконані зі сталі 12Х18Н10Т за ГОСТ 5632-72 і мають дозвіл МОЗ України № 123-14/297-7 від 29.01.76. Такий добір

матеріалів гарантує як корозійну стійкість і міцність, так і відповідність санітарно-гігієнічним вимогам.

5.3.2. Показники якості води після окремих стадій обробки

Вода перед Na-катионітними фільтрами:

загальна жорсткість:

$$Ж_0 = 6 \text{ мг-екв/дм}^3$$

концентрація натрію:

$$Na^+ = 7,5 \text{ мг-екв/дм}^3$$

сумарний вміст катіонів:

$$\Sigma_{\text{Кат}} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ = 6 + 7,5 = 13,5 \text{ мг-екв/дм}^3$$

Вода після Na-катионітних фільтрів:

залишкова жорсткість:

$$Ж_0 = 0,5 \text{ мг-екв/дм}^3$$

концентрація натрію:

$$Na^+ = 0,25 \text{ мг-екв/дм}^3$$

сумарний вміст катіонів:

$$\Sigma_{\text{Кат}} = Ж_0 + Na^+ = 0,5 + 0,25 = 0,75 \text{ мг-екв/дм}^3$$

5.3.3. Розрахунок Na-катионітного фільтра

Допустима швидкість фільтрації натрій-катионітного фільтра:

$$w_{\text{доп}} = 30 \dots 60 \text{ м/год.}$$

Необхідна розрахункова площа фільтра:

$$F = Q_H / w = 2 / 45 = 0,04 \text{ м}^2,$$

де $Q_H = 2 \text{ м}^3/\text{год}$ – подача через фільтр,

$w = 45 \text{ м/год}$ – прийнята швидкість фільтрації.

Швидкість фільтрації приймаємо:

$$w = 45 \text{ м/год.}$$

Із ряду стандартних апаратів обрано фільтр з площею:

$$f = 0,78 \text{ м}^2.$$

Кількість необхідних фільтрів:

$$a = F / f = 0,04 / 0,78 \approx 1.$$

Отже, достатньо встановити один Na-катіонітний фільтр з параметрами:

$D = 800$ мм (діаметр),

$F = 0,78$ м² (площа фільтрації),

$H_{сл} = 2$ м (висота шару завантаження).

Кількість солей жорсткості, що підлягають видаленню:

$$A = 24 - Ж_0 - Q_{Na} = 24 - 0,6 - 2 = 28,8 \text{ г-екв/добу},$$

де $Ж_0$ – загальна жорсткість води, що надходить на фільтр, г-екв/м³;

Q_{Na} – витрата натрію (за вихідними даними).

Таблиця 5.4. Значення обмінної здатності катіонітів

Катіоніт	Розмір зерен, мм	Повна обінна ємність, г-екв/м ³
Сульфовугіль	0,3...0,8	550
Сульфовугіль	0,5...1,5	500
Dowex HCR-S/S	0,8...1,2	1700

Як фільтрувальне завантаження приймаємо сульфовугілля, для якого задані такі технологічні характеристики:

повна обмінна ємність у Н-формі:

$$E_{п} = 550 \text{ г-екв/м}^3;$$

гранулометричний склад:

розмір зерен 0,3...0,8 мм.

Робочу обмінну здатність катіоніту при натрій-катіонуванні визначають за залежністю

$$E_{р} = \alpha \cdot \beta \cdot E_{п} - 0,5 \cdot q_c \cdot Ж_0$$

з підстановкою числових значень:

$$E_{р} = 0,94 \cdot 0,62 \cdot E_{п} - 0,5 \cdot 350 \cdot 6 = 250 \text{ г-екв/м}^3,$$

де

α – коефіцієнт ефективності регенерації Na-катіоніту;

β – коефіцієнт використання повної обмінної ємності;

Еп – повна обмінна ємність сульфовугілля, г-екв/м³;

qс – питомі витрати солі NaCl на регенерацію, г/г-екв;

Ж₀ – загальна жорсткість вихідної води, мг-екв/дм³.

Питомі витрати кухонної солі NaCl на регенерацію qс приймають за довідковими даними (табл. 5.5) і для розрахункового варіанта вони становлять

$$qс = 350 \text{ г/г-екв.}$$

Таблиця 5.5. – Технічні дані для розрахунку натрій-катионових фільтрів

Показник	Фільтр I ступеню	Фільтр II ступеню
1	2	3
Висота слою катіоніту, м	2...2,5	1,5
Розмір зерен катіоніту, мм	0,5... 1,1	0,5... 1,1
Швидкість фільтрування		
до 5	25 (35)	40 (50)
до 10	15 (25)	–
до 15	10 (20)	–
Розпушування катіоніту:		
інтенсивність, л/(м ² -с)	4 (3)	4 (3)
тривалість, хв	30 (15)	30 (15)
Витрати кухонної солі на регенерацію одного фільтру:		
до 5	100... 120	300... 400
до 10	120... 200	
до 15	170... 250	
до 20	200... 300	
Концентрація регенераційного розчину, %	5... 8	8... 12
Швидкість пропуску регенераційного розчину, м/год	3... 4	3... 5
Робоча обмінна здатність сульфовугля, г-екв/м ³	По формулі (2,9)	250... 300
Відмивання катіоніту від продуктів регенерації		
– швидкість пропуску, відмив очної води через катіоніт, м/год	6... 8	6... 8
– витрата відмивочної води, м ³ /м ³ , при завантаженні фільтра:		
– сульфовуглем	4	6
– катіонітом КУ-2	6	8
Загальна регенерація фільтрів, год, при завантаженні фільтра:		
– сульфовуглем	2	2,5... 3,5
– катіонітом КУ-2	3... 4,5	3,5... 5,0

Питома витрата солі q_s безпосередньо задає значення коефіцієнта ефективності регенерації α , який використовується у формулі для розрахунку робочої обмінної ємності катіоніту.

Для прийнятої питомої витрати кухонної солі

$$q_s = 350 \text{ г/г-екв}$$

за даними таблиці 5.6 обираємо:

$$\alpha = 0,94.$$

У розрахункове рівняння також вводять коефіцієнт β . Він враховує те, що частина обмінних центрів катіоніту зайнята іонами натрію, через що ефективна ємність щодо іонів кальцію та магнію (Ca^{2+} і Mg^{2+}) зменшується. Числові значення β приймають за табличними даними (табл. 5.7), де наведено коригувальні коефіцієнти для різних режимів роботи фільтра.

Таблиця 5.6. – Визначення коефіцієнту ефективності регенерації

Витрата солі	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
q_c , г/г-екв											
α	0,62	0,64	0,67	0,69	0,72	0,74	0,75	0,77	0,78	0,80	0,81
Витрата солі	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
q_c , г/г-екв											
α	0,82	0,83	0,84	0,85	0,87	0,87	0,88	0,88	0,89	0,90	0,91
Витрата солі	320	330	340	350	—	—	—	—	—	—	—
q_c , г/г-екв											
α	0,92	0,92	0,93	0,94	—	—	—	—	—	—	—

Таблиця 5.7. – Коефіцієнт зниження обмінної ємності катіоніту

$C^2_{Na}/Ж_0$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
β	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83
$C^2_{Na}/Ж_0$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	2
β	0,8	0,77	0,73	0,70	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,62
$C^2_{Na}/Ж_0$	3	4	5	6	7	8	9	10	–	–
β	0,60	0,57	0,54	0,53	0,52	0,52	0,51	0,50	–	–

Частота регенерацій Na-катіонітного фільтра.

Кількість циклів регенерації за добу визначають за співвідношенням:

$$n = A / (f \cdot H_{сл} \cdot E_{нр}) = 28,8 / (0,78 \cdot 2 \cdot 250) \approx 1 \text{ раз на добу,}$$

де

A – кількість солей жорсткості, що підлягають видаленню, г-екв/добу;

f – площа перерізу фільтра, м²;

$H_{сл}$ – висота шару завантаження, м;

$E_{нр}$ – робоча обмінна ємність натрій-катіоніту, г-екв/м³.

Отже, приймаємо, що фільтр потребує регенерації орієнтовно один раз на добу.

Витрата 100%-ї кухонної солі на одну регенерацію.

Маса чистого NaCl, необхідна для регенерації всіх фільтрів за один цикл, обчислюється так:

$$Q_k = (q_k \cdot f \cdot H_{сл} \cdot E_{нр} \cdot a) / 1000 = (150 \cdot 0,78 \cdot 2 \cdot 250 \cdot 2) / 1000 = 117 \text{ кг,}$$

де

q_k – питома витрата кухонної солі, $q_k = 150$ г/г-екв;

a – кількість фільтрів.

Таким чином, на одну регенерацію потрібно 117 кг 100%-го NaCl.

Витрата технічної 93%-ї кухонної солі на одну регенерацію.

З урахуванням того, що використовують технічну сіль із вмістом NaCl:

$Q_{к.т} = (Q_k \cdot n \cdot 100) / (c \cdot 1000) = (117 \cdot 1 \cdot 100) / (93 \cdot 1000) = 0,12$
т/добу,

де

c – масова частка NaCl у технічній солі, $c = 93 \%$.

Отже, добова витрата технічної кухонної солі становить приблизно 0,12 т.

Місячна витрата технічної солі.

За місяць (30 діб) витрати складуть:

$Q_{к.т} = 0,12 \cdot 30 = 2,8$ т/місяць.

Витрата води на одну регенерацію фільтра.

Витрата води включає дві складові.

а) Вода на розпушування та промивання завантаження:

$Q_{роз} = (i \cdot f \cdot 60 \cdot t_{роз}) / 1000 = (4 \cdot 0,78 \cdot 60 \cdot 30) / 1000 = 5,5$ м³,

де

i – інтенсивність розпушування-промивки, $i = 4$ л/(с·м²) (за рис. 4.2.2 при $t = 20$ °С і $d = 1$ мм);

$t_{роз}$ – тривалість розпушування-промивки, $t_{роз} = 30$ хв (за табл. 4.2.4).

б) Вода на приготування регенераційних розчинів (для сульфовугілля):

$Q_{р.р} = (Q_k \cdot 100) / (1000 \cdot b \cdot \rho_{р.р}) = 12,3 \cdot 100 / (1000 \cdot 1,5 \cdot 1) = 0,82$ м³,

де

b – концентрація регенераційного розчину, %, при сульфовугіллі $b = 1,5 \dots 2 \%$ (за табл. 5.7);

$\rho_{р.р}$ – густина розчину відповідної концентрації (приймається за довідковими даними).

Таким чином, на одну регенерацію витрачається 5,5 м³ води на розпушування і промивку шару та 0,82 м³ води на приготування регенераційного розчину.

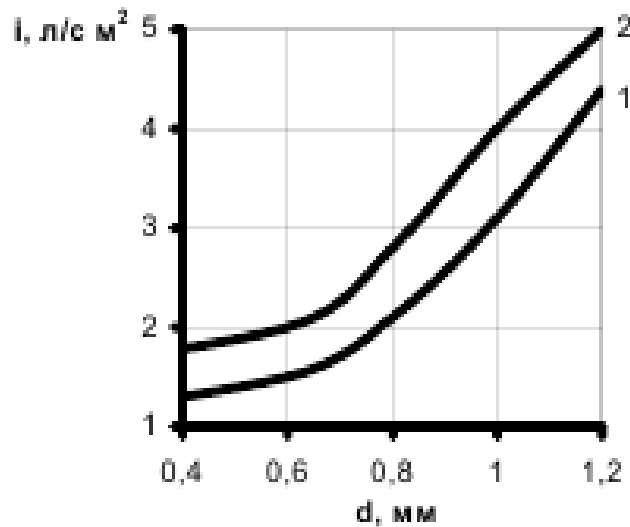


Рис. 5.6. До таблиці 5.7. графік для визначення необхідної інтенсивності розпушування катіоніту в залежності від діаметру зерен катіоніту:

1 - при температурі 5 °С; 2 - при температурі 20 °С.

в) Витрата води на відмивання катіоніту від продуктів регенерації визначається за формулою:

$$Q_{\text{від}} = q_{\text{від}} \cdot f \cdot H_{\text{слою}}$$

де

$q_{\text{від}}$ – питомі витрати води на відмивання,

f – площа перерізу фільтра,

$H_{\text{слою}}$ – висота шару завантаження.

Підставляємо числові значення:

$$Q_{\text{від}} = 10 \cdot 0,76 \cdot 1,5 = 11,4 \text{ м}^3.$$

Отже, на операцію відмивання витрачається 11,4 м³ води.

Загальна витрата води на одну регенерацію фільтра складається з трьох частин – на розпушування ($Q_{\text{роз}}$), приготування розчину ($Q_{\text{р.р.}}$) та відмивання ($Q_{\text{від}}$). Сумарно:

$$Q_{\text{н}} = (Q_{\text{роз}} + Q_{\text{р.р.}} + Q_{\text{від}}) \cdot a$$

При $a = 1$ та підстановці отриманих значень:

$$Q_{\text{н}} = (5,5 + 0,82 + 11,4) = 17,72 \text{ м}^3$$

(у розрахунку вказано 35,4 м³ – це для двох фільтрів; якщо вважаємо а = 2, то:

$$Q_H = 17,72 \cdot 2 \approx 35,4 \text{ м}^3 \text{ на регенерацію обох фільтрів).}$$

Середньогодинна витрата води на власні потреби Na-катіонітних фільтрів визначається як:

$$Q_{с.н(год)} = Q_H / 24$$

$$\text{Для } Q_H = 35,4 \text{ м}^3:$$

$$Q_{с.н(год)} = 35,4 / 24 \approx 1,5 \text{ м}^3/\text{год.}$$

5.3.4. Розрахунок механічного фільтру

Середньогодинне навантаження на механічний фільтр.

До механічного фільтра надходить як основний потік, так і вода на власні потреби Na-катіонітних фільтрів, тому сумарна витрата становить:

$$Q_{\text{мех}} = 24 + 1,5 = 25,5 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Прийнята швидкість фільтрування.

Для механічних фільтрів із завантаженням із піску (розмір зерен 0,5–1,2 мм) приймають швидкість фільтрації в межах:

$$w = 10 \dots 12 \text{ м/год.}$$

Розрахункова площа фільтрації.

Необхідну площу фільтрувальної поверхні визначають діленням витрати на швидкість фільтрації:

$$F = 25,5 / 10 \dots 25,5 / 12 = 2,55 \dots 2,125 \text{ м}^2.$$

Вибір стандартного апарата.

Із типового ряду (таблиця 4.3.7) обираємо механічний фільтр з такими параметрами:

$$\text{діаметр } D = 2000 \text{ мм;}$$

$$\text{площа фільтрації } f = 3,1 \text{ м}^2.$$

Кількість фільтрів.

Для забезпечення заданого режиму роботи достатньо одного механічного фільтра:

a = 1.

Фактична робоча швидкість фільтрації.

Перевіряємо швидкість фільтрування для обраного фільтра:

$$v_n = Q_{\text{мех}} / f = 25,5 / 3,1 = 8,2 \text{ м/год.}$$

Отже, реальна швидкість фільтрації 8,2 м/год не перевищує рекомендовані 10...12 м/год і є допустимою для нормальної роботи механічного фільтра.

Таблиця 5.8. – Площа фільтрування стандартних фільтрів

Діаметр фільтра D_f , мм	700	1000	1500	2000	2600	3000	3400
Площа фільтрування f_f , м ²	0,39	0,76	1,72	3,1	5,2	6,95	9,1

6. ВИМОГИ ДО МОНТАЖУ, ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ ОБЛАДНАННЯ

Технічний огляд

Технічний огляд є основним інструментом контролю справного та безпечного стану обладнання, що працює під тиском. Порядок його проведення встановлюється в інструкціях заводу-виробника з монтажу й експлуатації. Для пароперегрівачів та економайзерів, які конструктивно об'єднані з котлом, огляд виконується одночасно з котлом.

Огляд планують таким чином, щоб обладнання було вчасно зупинене – не пізніше строків, зазначених у технічній документації. Повний технічний огляд включає:

- зовнішній огляд;
- внутрішній огляд;
- гідростатичне випробування.

За необхідності можуть додатково застосовуватися методи неруйнівного контролю (у т.ч. акустична емісія).

Завдання зовнішнього та внутрішнього оглядів:

при первинному огляді – переконатися, що обладнання встановлене й оснащене згідно з нормативами, а його елементи не мають видимих пошкоджень;

при періодичних та позачергових – підтвердити придатність до подальшої експлуатації.

Під час огляду особливу увагу приділяють:

наявності тріщин, щілин, вм'ятин, слідів корозії на зовнішніх і внутрішніх поверхнях;

стану зварних, клепаних, вальцьованих і прокатних з'єднань (підтікання, запотівання, соляні нарости, пустоти в швах);

цілісності футеровки та захисних покриттів.

Гідростатичне випробування проводять для перевірки міцності елементів і герметичності з'єднань. Випробувальний тиск приймають не менше значення, яке відповідає:

максимальному можливому навантаженню в реальних умовах роботи з урахуванням максимально допустимого тиску й температури, помножених на коефіцієнт безпеки 1,25;

або максимально допустимому робочому тиску, помноженому на 1,43 (береться більше з двох значень);

для посудин, що заповнюються повітрям або азотом і не піддаються вогневому нагріву, – не менше 1,5 розрахункового тиску.

Вертикальні посудини дозволено випробовувати в горизонтальному положенні, якщо міцність корпусу при цьому підтверджена розрахунком виробника з урахуванням способу опирання. Пробний тиск при цьому приймають з урахуванням гідростатичного стовпа, який діє на посудину в реальній експлуатації. Час витримки під пробним тиском задається у проєктній документації; за її відсутності – не менший за мінімальні значення, наведені в нормативних таблицях.

У комбінованих посудинах із кількома робочими порожнинами, розрахованими на різні тиски, кожен порожнину випробовують окремо своїм пробним тиском.

Посудини з небезпечними середовищами (токсичні, вибухо- та пожежонебезпечні рідини або гази) додатково перевіряють на герметичність при робочому тиску, використовуючи повітря або інертний газ. Такі випробування проводять за затвердженою на підприємстві інструкцією.

Якщо заповнення посудини водою неможливе (велика маса води, складність зливу, наявність внутрішніх вкладишів тощо), гідравлічне випробування допускається замінити пневматичним – повітрям або інертним газом при тому самому пробному тиску. Це допускається лише за умови позитивних результатів внутрішнього огляду й перевірки міцності.

Пневматичні випробування виконують за окремою інструкцією з чітко прописаними заходами безпеки.

Якщо під час роботи можливий вплив агресивного середовища, високих температур (понад 450 °С) чи інших факторів, що погіршують властивості металу, такі посудини проходять додаткові огляди згідно з внутрішніми процедурами підприємства. Результати заносять до журналу (паспорта) огляду.

Обсяг, методи та періодичність технічних оглядів (крім балонів) мають бути визначені виробником обладнання й відображені в паспорті та інструкції з експлуатації. За відсутності таких даних застосовують загальні вимоги чинних правил (відповідні таблиці додатків). Якщо в зазначений термін обладнання надати до огляду неможливо, власник зобов'язаний зробити це раніше встановленої дати.

Трубопроводи пари та гарячої води гідравлічно випробовують:

перед введенням у роботу новозмонтованих ділянок;

після відпрацювання нормативного ресурсу;

після аварії або значного ремонту;

після зварювального ремонту;

після консервації тривалістю понад два роки.

Пробний тиск для таких трубопроводів приймають на рівні 1,25 робочого, але не менше 2 бар; посудини, що конструктивно входять до складу трубопроводу, випробовують тим самим тиском. Зовнішній огляд паро- й водогрійних трубопроводів проводиться щонайменше раз на три роки.

Під час гідравлічного випробування:

обладнання повністю звільняють від повітря;

використовують воду температурою від 5 до 40 °С, яка не викликає інтенсивної корозії;

не допускається конденсація вологи на стінках через надто низьку температуру металу.

Виробник у своїх інструкціях обов'язково вказує мінімально допустиму температуру стінки під час випробувань, щоб запобігти крихкому руйнуванню. Загальний час підйому тиску задається в експлуатаційних документах; якщо дані відсутні – він має бути не менше 10 хвилин, так само як і час витримки під пробним тиском. Після витримки тиск знижують до робочого і при цьому ретельно оглядають усі з'єднання (зварні, клепані, вальцьовані, рознімні).

Тиск контролюють щонайменше двома манометрами, один із яких повинен мати клас точності не нижче 1,5. Для підняття тиску при гідравлічних випробуваннях забороняється використовувати стиснене повітря чи газ.

Перед технічним оглядом внутрішні поверхні очищують від накипу, продуктів корозії, сажі, золи та інших відкладень, а внутрішні пристрої, що заважають огляду, демонтують. За вимогою фахівця, який проводить огляд, допускається часткове розкриття обмурівки, зняття теплоізоляції або навіть видалення частини труб для візуального доступу.

Якщо під час огляду виявлено дефекти (стоншення стінок, знос в'язей тощо), що знижують міцність, можливе тимчасове продовження експлуатації при знижених параметрах тиску й температури – за умови підтвердження розрахунком на міцність і перерахунком пропускної здатності запобіжних клапанів. Якщо ж дефекти викликають сумнів у надійності або їх природу важко встановити, подальша експлуатація обладнання забороняється.

При наявності поверхневих тріщин, підтікання або відкладень у місцях клепаних і вальцьованих швів перед ремонтом (підварюванням, підвальцьовуванням тощо) обов'язково проводять дослідження щодо міжкристалітної корозії. Уражені ділянки підлягають вирізанню.

Періодичні огляди обладнання під тиском (крім парових та водогрійних трубопроводів) проводять не рідше:

одного разу на 4 роки – зовнішній та внутрішній огляди;

одного разу на 8 років – гідростатичні випробування.

Роботодавець, який експлуатує котли та посудини, зобов'язаний також самостійно організувати огляди після кожного внутрішнього очищення або ремонту, але не рідше одного разу на 12 місяців.

Позачергові огляди виконують у разі:

простою обладнання понад 12 місяців;

перенесення на нове місце;

значного зварювального ремонту;

масової заміни елементів (анкерних в'язей, барабана, колекторів, великої частини труб тощо);

досягнення граничного строку служби;

аварій.

У деяких із цих випадків до огляду обов'язково проводиться експертне обстеження (технічна діагностика).

Пуск у роботу обладнання під тиском

Введення новоустановленого обладнання під тиском здійснюється відповідно до чинних нормативних документів і супровідної технічної документації.

Пуск у роботу дозволяється наказом роботодавця на підставі результатів:

пусконаладжувальних робіт;

первинного технічного огляду, який підтверджує готовність обладнання до безпечної експлуатації.

На кожній посудині чи котлі, що введені в роботу, на видному місці закріплюють табличку розміром не менше 300×200 мм із зазначенням:

дозволеного робочого тиску (та/або максимальної температури води або середовища);

дати (число, місяць, рік) наступного внутрішнього/зовнішнього огляду;

дати наступного гідростатичного випробування.

Така система дозволяє організувати регламентний нагляд, своєчасно планувати зупинки на огляди й ремонти та підтримувати обладнання під тиском у безпечному технічному стані протягом усього строку експлуатації.

7. Система управління

Для моніторингу параметрів якості води в системі водопідготовки використовується автоматичний аналізатор жорсткості BWT TESTOMAT 2000, який входить до складу загальної системи керування.

Призначення та функції приладу BWT TESTOMAT 2000

BWT TESTOMAT 2000 – це автоматичний прилад безперервної дії, призначений для контролю:

загальної жорсткості;

карбонатної жорсткості;

показників кислотності/лужності (так зване «m-значення»);

вимірювання виконуються колориметричним методом із застосуванням індикаторних розчинів. Результати можуть відображатися в одиницях: градуси жорсткості °d, °f, у ppm CaCO₃ або в ммоль/л.

Мова інтерфейсу меню обирається при замовленні: доступні польська, англійська, німецька та французька. Це полегшує інтеграцію приладу в міжнародне виробниче середовище.

Режими керування вимірюваннями

Прилад підтримує кілька режимів запуску аналізу, що дозволяє гнучко налаштовувати алгоритм контролю:

Часовий режим – тест запускається через задані інтервали часу. Період аналізу може встановлюватися в межах від 0 до 99 хвилин (при значенні «0» запуск узгоджується з іншими командами системи).

Кількісний режим – вимірювання виконуються після проходження заданого об'єму води. Для цього BWT TESTOMAT 2000 отримує імпульси від водоміра й запускає аналіз при досягненні встановленої кількості.

Динамічний режим – частота аналізів змінюється залежно від ступеня виснаження іонообмінної смоли: на початку циклу регенерації вимірювання проводяться рідше, а з наближенням до кінця ресурсу шару – частіше. Для цього прилад працює разом із контактними сигналами від лічильника води.

Зовнішнє керування – запуск аналізу ініціюється сигналом від зовнішнього контролера або системи автоматизації (PLC/SCADA).

Параметри програми, у т.ч. тестова програма та час відгуку, можуть бути налаштовані таким чином, щоб забезпечити підвищений рівень безпеки й уникнути «пропуску» критичних значень жорсткості.

Прилад оснащений чотирирядковим дисплеєм, на якому можна переглядати:

результати останнього аналізу;

поточні параметри налаштувань;

інформацію з пам'яті помилок (журнал відмов і збоїв).

Додаткова функція BOB (режим роботи без нагляду) дозволяє забезпечити автономний контроль упродовж 24–120 годин, що важливо для безперервних технологічних процесів.

Умови експлуатації та обмеження

Прилад розрахований на роботу в стандартних умовах водопідготовки:

робочий тиск у лінії: від 0,1 до 8 бар;

температура води: від 10 до 40 °С;

температура навколишнього повітря: від 10 до 40 °С;

Максимальні допустимі концентрації домішок у досліджуваній воді:

вільний CO₂ – до 80 мг/л;

залізо – до 0,5 мг/л;

мідь – до 0,1 мг/л;

алюміній – до 0,1 мг/л.

Електроживлення може бути виконане на рівні 230 В, 115 В або 24 В (залежно від виконання). Ступінь захисту корпусу – IP65, що забезпечує захист від пилу та бризок води і дозволяє монтувати прилад безпосередньо в зоні виробництва.

Витрата індикаторного розчину становить орієнтовно 500 мл на близько 7500 вимірювань (для деяких типів, наприклад TN2005, – приблизно на 500 вимірювань), що слід враховувати при плануванні обслуговування.

Роль автоматизації в системі водопідготовки

Сучасні хімічні та фармацевтичні виробництва працюють у режимі високих швидкостей і значних навантажень, а будь-які відхилення якості води можуть призвести до браку продукції або зупинки технологічних ліній. Тому автоматизований контроль якості води з використанням таких приладів, як BWT TESTOMAT 2000, є критично важливим елементом системи керування.

Автоматизація контролю жорсткості та інших параметрів води забезпечує:

- стабільну якість підготовленої води для технологічних потреб;
- оптимальну витрату реагентів (солі для регенерації, лугів, кислот);
- зменшення кількості ручних операцій та ризику помилок персоналу;
- своєчасне виявлення вичерпання ресурсу іонообмінних фільтрів;
- зниження навантаження на мембранні стадії (ультрафільтрація, зворотний осмос) і подовження їхнього ресурсу;

покращення умов праці за рахунок мінімізації контактів з хімічними реагентами.

При інтеграції BWT TESTOMAT 2000 у загальну систему керування (SCADA) значення жорсткості можуть використовуватися як вхідні сигнали для автоматичного запуску регенерації фільтрів, формування тривоги, блокування подачі води неналежної якості на критично важливі ділянки та для побудови статистики роботи ділянки водопідготовки.

Таким чином, система управління на базі BWT TESTOMAT 2000 є невід'ємною частиною комплексної автоматизації процесу підготовки води і забезпечує не лише контроль параметрів, а й загальну надійність та безпечність експлуатації обладнання.

8. Безпека життєдіяльності та охорона праці на дільниці водопідготовки

Загальні положення

Організація безпечної праці на дільниці водопідготовки фармацевтичного виробництва здійснюється відповідно до Закону України «Про охорону праці» та чинних державних, міжгалузевих і галузевих нормативних актів.

На підприємстві розробляються та впроваджуються інструкції з охорони праці для всіх професій та видів робіт (оператор дільниці водопідготовки, слюсар-ремонтник, електрик, лаборант контролю якості тощо). Ці інструкції є обов'язковими до виконання, мають статус внутрішнього нормативного документа та доводяться до працівників під підпис.

До самостійної роботи на дільниці водопідготовки допускаються особи:
віком не менше 18 років;

з освітою не нижче середньої (переважно – технічної або спеціальної професійної);

які пройшли попередній (періодичний) медогляд і не мають протипоказань;

пройшли ввідний інструктаж з охорони праці, пожежної безпеки, електробезпеки;

отримали первинний інструктаж на робочому місці, пройшли стажування й перевірку знань;

склали іспит (кваліфікаційну співбесіду) комісії підприємства та допущені наказом/розпорядженням.

Оператор дільниці водопідготовки повинен знати:

властивості вихідної води, реагентів (NaCl, NaOH, HCl, NaHSO₃ та ін.), проміжних і кінцевих продуктів;

технологічну схему системи очищення води, етапи Na-катіонування, ультрафільтрації, зворотного осмосу;

конструкцію, принцип дії та особливості обслуговування насосів, фільтрів, мембранних апаратів, ємностей під тиском;

порядок дій у разі аварійних ситуацій (витік реагентів, розрив трубопроводу, відключення електроенергії).

Під час роботи оператор підтримує постійний зв'язок із черговим слюсарем, електриком, диспетчером, лабораторією контролю якості – особисто, по телефону або через систему оперативного зв'язку.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори на дільниці водопідготовки

Робота з системами водопідготовки фармацевтичного призначення пов'язана з дією низки фізичних, хімічних, біологічних та психофізіологічних факторів. Основні з них:

Фізичні фактори:

підвищена температура поверхонь теплообмінників, трубопроводів гарячої води та пари (ризик термічних опіків);

підвищений рівень шуму від насосів, компресорів, вентиляторів;

підвищений тиск у посудинах і трубопроводах (ризик гідравлічних ударів, розгерметизації);

підвищена вологість повітря, конденсат на трубах (ризик ковзання, корозії металевих поверхонь);

ультрафіолетове випромінювання від УФ-ламп при неправильній експлуатації або пошкодженні корпусу.

Хімічні фактори:

луги (NaOH), кислоти (HCl), розчини NaHSO₃, реагенти для СІР-очищення – небезпека хімічних опіків шкіри та слизових, подразнення дихальних шляхів;

аерозолі, бризки розчинів під час промивки, регенерації та дозування;

можливе утворення корозійних продуктів, що забруднюють робочу зону.

Пилові та газові фактори:

пил від регенераційної солі (NaCl) під час розвантаження й розчинення; підвищений вміст CO₂ у деяких зонах (наприклад, у приміщеннях із недостатньою вентиляцією).

Біологічні фактори:

ризик мікробіологічного забруднення у місцях застою води, у фільтрах, ємностях та трубопроводах при порушенні режимів дезінфекції;

при роботі у фармацевтичному виробництві – потенційний контакт з біологічними агентами (культури мікроорганізмів, біотехнологічні середовища).

Електричні фактори:

наявність великої кількості електроприводів, шаф керування, насосів, вимірювальних приладів;

підвищений ризик ураження електричним струмом в умовах вологості та наявності металевих конструкцій.

Для зниження впливу цих факторів передбачаються:

ефективна припливно-витяжна вентиляція;

герметизація трубопроводів, обладнання, вузлів дозування;

екранування й блокування УФ-випромінювачів;

системи контролю тиску, температури, витрат, концентрації реагентів;

використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

Основні ЗІЗ для оператора водопідготовки:

спецодяг із довгими рукавами, кислотолюбистійкий фартух;

захисні окуляри або щиток;

хімічностійкі рукавиці (для лугів і кислот);

гумові чоботи або взуття з неслизькою підошвою;

респіратор при роботі з пилоподібною сіллю або аерозолями;

протишумові навушники (у зонах зі значним шумом).

Оператор зобов'язаний дотримуватися правил особистої гігієни: не вживати їжу на робочому місці, мити руки перед прийомом їжі, пити воду

лише з обладнаних питних пунктів, після зміни – приймати душ (за наявності виробничого душу), підтримувати чистоту спецодягу.

Інструкції з охорони праці та система контролю

Інструкція з охорони праці – це локальний нормативний документ підприємства, в якому у простій та зрозумілій формі викладені вимоги безпеки під час виконання певної роботи або за конкретною професією. Її зміст формується на основі:

- чинних законів і підзаконних актів України з охорони праці;
- галузевих норм і стандартів;
- технологічних регламентів;
- експлуатаційної документації виробників обладнання;
- конкретних умов даного виробництва.

Інструкція для оператора дільниці водопідготовки зазвичай містить розділи:

- загальні положення;
- вимоги безпеки перед початком роботи (огляд обладнання, ЗІЗ, порядок запуску);
- вимоги безпеки під час роботи (заборони, алгоритм дій, робота з реагентами, СІР тощо);
- вимоги безпеки після закінчення роботи (відключення, промивка, прибирання, здача зміни);
- дії в аварійних та нештатних ситуаціях (розлив реагентів, витік води, відсутність тиску, аварійне відключення електроенергії, пожежа).

Служба охорони праці підприємства:

- спільно з керівниками підрозділів визначає перелік професій і робіт, для яких необхідні інструкції;
- надає методичну допомогу при їх розробленні;
- бере участь у погодженні та ревізії інструкцій;

контролює наявність актуальних екземплярів інструкцій безпосередньо на робочих місцях;

ініціює перегляд інструкцій у разі змін технології, обладнання або нормативної бази.

Обов'язок щоденного контролю за дотриманням вимог інструкцій покладається на роботодавця та безпосередніх керівників робіт (начальник дільниці, майстер). Громадський контроль здійснюють уповноважені трудового колективу та профспілкові органи.

Електробезпека

У фармацевтичному виробництві та на дільниці водопідготовки діють загальні вимоги електробезпеки:

класифікація приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом (вологі, особливо небезпечні тощо);

застосування електрообладнання у відповідному виконанні (ступінь захисту, клас ізоляції);

наявність захисного заземлення та занулення;

використання пристроїв захисного вимкнення (ПЗВ);

організація блискавкозахисту будівель і зовнішніх установок.

Працівники, що обслуговують електрообладнання або мають до нього доступ, повинні мати відповідну групу з електробезпеки, проходити періодичні навчання, перевірки знань та інструктажі. Особлива увага приділяється:

забороні робіт під напругою без спеціального допуску;

використанню діелектричних засобів захисту;

безпечній експлуатації переносних електроприладів в умовах підвищеної вологості.

Безпека при роботі з обладнанням під тиском та криогенними/газовими системами

Системи водопідготовки включають:

посудини під тиском (ємності, бак-фільтри, ресивери);

трубопроводи води, пари, стисненого повітря;

запобіжні клапани, редуктори, манометри.

Їхня експлуатація регламентується вимогами до:

монтажу, кріплення, гідравлічних випробувань;

проведення періодичних технічних оглядів, гідровипробувань, діагностики;

ведення технічної документації (паспорти, журнали обліку, акти оглядів);

наявності справних запобіжних і запірних пристроїв.

У випадку використання криогенних, інертних або стиснених газів (наприклад, при азотуванні систем) передбачаються додаткові заходи:

вентиляція та контроль концентрації газів;

попередження вибухонебезпечних і задушливих середовищ;

навчання персоналу правилам роботи з балонами й газовими комунікаціями.

Безпека вантажних операцій та біологічна безпека

На дільниці водопідготовки проводяться навантажувально-розвантажувальні роботи: постачання мішків із сіллю, хімреагентами, фільтрувальними матеріалами. Важливо дотримуватися:

правил безпечного підйому та переміщення вантажів вручну (обмеження за масою, правильні прийоми підйому);

вимог до використання візків, рокл, автонавантажувачів;

чіткого маркування зон руху техніки та пішоходів.

У фармацевтичній та біотехнологічній галузі додатково діють вимоги біобезпеки:

класифікація біологічних факторів за ступенем небезпеки;
спеціальні інструкції при роботі з мікроорганізмами, культурами клітин,
біологічними середовищами;
контроль мікробіологічного забруднення повітря, поверхонь, води;
застосування ЗІЗ (халати, маски, рукавиці, біобокси) та спеціальних
режимів дезінфекції.

Нормативно-правова база України встановлює окремі вимоги для роботи
з біологічними агентами, які інтегруються у загальну систему охорони праці
підприємства.

Комплексне виконання перелічених заходів – від правильно
розроблених інструкцій і навчання персоналу до технічного контролю
обладнання й систем автоматизації – забезпечує безпечну експлуатацію
дільниці водопідготовки, знижує ризик аварій, травматизму та виробничих
захворювань, а також гарантує стабільну якість очищеної води для
фармацевтичного виробництва.

Висновок

У магістерському проєкті виконано комплексне дослідження та інженерне опрацювання процесу пом'якшення води методом Na-катионування для фармацевтичного виробництва, а також модернізовано іонообмінний апарат дільниці водопідготовки продуктивністю 20 т/год. Поставлена мета – підвищити ефективність роботи Na-катионітного фільтра в складі системи одержання очищеної води та зменшити навантаження на подальші стадії ультрафільтрації та зворотного осмосу – досягнута в повному обсязі.

На основі аналітичного огляду сучасних методів підготовки води для фармацевтичних цілей обґрунтовано вибір іонообмінного пом'якшення як обов'язкової стадії перед мембранними процесами. Проаналізовано вимоги ДФУ до очищеної води, розглянуто будову та принцип роботи Na-катионітних фільтрів, автоматизованих систем контролю жорсткості (BWT TESTOMAT 2000), а також багатоступеневої схеми водопідготовки, що включає механічну фільтрацію, Na-катионування, ультрафільтрацію, зворотний осмос, резервуар деіонізованої води та контури її розподілу.

Експериментальна частина роботи була присвячена дослідженню впливу об'єму пропущеної води на концентрацію іонів кальцію та магнію для двох марок катіонітів – ECOSOFT ECOLITE СК та DOWEX HCR-S/S FF. Встановлено, що зі збільшенням кількості профільтрованої води концентрація іонів Ca^{2+} і Mg^{2+} у фільтраті закономірно зростає через виснаження обмінної здатності смол. Порівняльний аналіз показав перевагу катіоніту ECOSOFT ECOLITE СК за робочою обмінною ємністю та стабільністю роботи в циклі до регенерації. Окремо з'ясовано, що після приблизно 1800 регенерацій граничний об'єм пом'якшеної води суттєво зменшується, що обґрунтовує доцільність планової заміни іоніту, оскільки подальша експлуатація призводить до зростання витрат солі та зниження економічної ефективності.

У частині інженерних розрахунків визначено основні параметри модернізованого Na-катионітного фільтра для продуктивності 20 т/год. Встановлено, що для забезпечення заданого ступеня пом'якшення необхідний об'єм завантаження катионітом становить 600 дм³, розрахункова площа фільтрування – 1,56 м², а робоча швидкість фільтрації – 45 м/год. Підібрано режим регенерації та доведено, що на один цикл регенерації потрібно близько 117 кг кухонної солі (100 % NaCl), що дозволяє оцінити експлуатаційні витрати й навантаження на солерозчинник та дренажно-каналізаційну систему. Проведено розрахунок кількості регенерацій, витрати води на розпушування, промивання та приготування регенераційних розчинів, а також підібрано механічний фільтр попереднього очищення з площею фільтрації 3,1 м², що забезпечує допустиму швидкість фільтрування та захист іонітного шару від механічних домішок.

Запропоновані конструктивні рішення щодо іонообмінного апарата – використання двох колон з нижньою подачею води, удосконаленого збірно-розподільчого пристрою, правильно підібраної висоти шару смоли та режимів регенерації – дають змогу уникнути утворення застійних зон, підвищити рівномірність омивання зерен іоніту та повніше використовувати обмінну ємність завантаження. Додаткове включення теплообмінника для підігріву холодної міської води в зимовий період дозволяє стабілізувати роботу Na-катионітних фільтрів, ультрафільтрації й зворотного осмосу, зменшивши сезонне падіння продуктивності.

Важливим результатом роботи є розробка та опис інтегрованої автоматизованої системи контролю якості води, в якій BWT TESTOMAT 2000 використовується для безперервного моніторингу жорсткості, формування сигналів тривоги та автоматичного запуску регенерації фільтрів. Це підвищує надійність технологічного процесу, знижує ризик подачі води неналежної якості на критичні ділянки фармацевтичного виробництва та мінімізує вплив людського фактора.

У розділі з охорони праці та безпеки життєдіяльності проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі фактори дільниці водопідготовки (хімічні реагенти, робота під тиском, гарячі поверхні, електрообладнання, підвищена вологість, можливе мікробіологічне забруднення), обґрунтовано вибір засобів індивідуального захисту, організаційних і технічних заходів, а також вимоги до інструкцій з охорони праці, кваліфікації персоналу та системи періодичних оглядів обладнання під тиском. Це забезпечує відповідність проєктних рішень сучасним вимогам промислової, електричної та біологічної безпеки.

Отримані результати мають як науково-практичне, так і прикладне значення. Запропонована модернізація Na-катионітного апарата та вдосконалена схема водопідготовки можуть бути впроваджені на реальних фармацевтичних підприємствах для підвищення надійності систем очищення води, продовження ресурсу мембранних елементів, оптимізації витрат солі та енергії. У подальших дослідженнях доцільно поглибити вивчення впливу тривалої експлуатації й кратних регенерацій на структуру та кінетику роботи іонообмінних смол, а також оцінити економічний ефект від впровадження запропонованих технічних рішень у діючих виробничих умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Shukshith K. S., Gupta N. V. Water for pharmaceutical use // International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research. – 2016. – Vol. 36, No. 1. – P. 199–204.
2. World Health Organization. Guidelines on water for pharmaceutical use // WHO Technical Report Series. – 2012. – No. 970, Annex 2. – Geneva: WHO.
3. European Pharmacopoeia Commission. European Pharmacopoeia. – 11th ed. – Strasbourg: EDQM, Council of Europe, 2023. – Vol. 1. – Monographs: Purified water (0008), Water for injections (0169).
4. United States Pharmacopoeial Convention. United States Pharmacopoeia 46 – National Formulary 41. – Rockville, MD: USP, 2023. – General chapter <1231> Water for pharmaceutical purposes.
5. European Medicines Agency. Guideline on quality of water for pharmaceutical use (EMA/CHMP/CVMP/QWP/496873/2018). – Amsterdam: EMA, 2020.
6. Rögener F. Increasing the sustainability of pharmaceutical grade water production // Chemie Ingenieur Technik. – 2024. – Vol. 96, No. 4. – P. 522–531.
7. Campanile A., Liguori B., Ferone C., Caputo D., Aprea P. Zeolite-based monoliths for water softening by ion exchange/precipitation process // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12, Article 3686.
8. Deakin J. Water softening by ion exchange // Chemistry Review. – 2024. – Vol. 34, No. 2. – P. 54–61.
9. Eissa M. E. Determination of the microbiological quality of feed city water for pharmaceutical industry in Egypt // Athens Journal of Sciences. – 2017. – Vol. 4, No. 2. – P. 123–134.
10. Rao P. K., Kumari P., Reddy K. Review – water for pharmaceutical use // World Journal of Pharmaceutical and Pharmaceutical Sciences. – 2024. – Vol. 13, No. 9. – P. 1605–1621.
11. Гомеля М. Д., Шаблій Т. О., Радовенчик Я. В. Фізико-хімічні основи процесів очищення води: підручник. – Київ: Кондор, 2019. – 256 с.

12. Чуешов В. І., Гладух Є. В., Сайко І. В. та ін. Технологія ліків промислового виробництва: підручник: у 2 ч. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Харків: НФаУ, 2012. – Ч. 1. – 694 с.
13. Макаренко І. М., Гоц В. М., Макаренко Ю. І. та ін. Іонообмінне знесолення та пом'якшення мінералізованих вод // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2014. – Вип. 23. – С. 17–22.
14. Ткач А. А. Дослідження меж застосування іонообмінного методу при очищенні природних вод: тези доповідей наук.-практ. конф. – Київ: КНУБА, 2011. – 4 с.
15. Zupančič B. Water for pharmaceutical use: lecture notes. – Ljubljana: University of Ljubljana, Faculty of Pharmacy, 2023. – 32 p.
16. Ion exchange in water treatment // Water 151: Water Treatment Plant Design and Operation II. – LibreTexts, 2022.
17. Ecosoft. Іонний обмін в технологіях водопідготовки. – Київ: Ecosoft, 2023. – 18 с.
18. Chemosnova. Іонообмінні технології ум'якшення та знесолення води. – Київ: Основа, 2022. – 20 с.
19. ActivCarbon. Іонообмінні смоли: нове слово в технологіях очищення води. – Київ: ActivCarbon, 2024. – 16 с.
20. DuPont Water Solutions. AmberLite™ Ion Exchange Resins. Water Conditioning Manual. – Wilmington, DE: DuPont, 2020. – 120 p.