

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського  
Навчально-науковий інститут муніципального управління  
та міського господарства  
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

## ТЕМА РОБОТИ

### «УДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗНЕСОЛЕННЯ ВОДИ ДЛЯ ПАРОВИХ КОТЛІВ»

Здобувача вищої освіти  
Сіренка Максима Ігоровича  
Освітня програма  
«Автоматизоване управління  
технологічними процесами»  
(Спеціальність 174 «Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології  
та робототехніка»)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник:  
к.т.н., доцент, Дроменко В.Б.

\_\_\_\_\_ (підпис)

Національна шкала \_\_\_\_\_  
Кількість балів \_\_\_\_\_  
Оцінка: ECTS \_\_\_\_\_

Київ – 2025

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського  
Навчально-науковий інститут муніципального управління  
та міського господарства  
Кафедра інженерних систем та технологій  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані  
технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Завідувач кафедри  
Наталія ОМЕЦІНСЬКА  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Сіренку Максиму Ігоровичу

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Удосконалення автоматизованої системи знесолення води для парових котлів.  
керівник роботи: к.т.н., доцент, Дроменко В.Б.  
затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:  
від « 2 » жовтня 2025 р. № 116
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи: 5 грудня 2025р
3. Вихідні дані до роботи: Живильна вода для парових котлів ТЕЦ з підвищеною мінералізацією та змінним сольовим складом, необхідність отримання демінералізованої води з електропровідністю не більше 0,1 мкСм/см та стабільною якістю пари відповідно до вимог котельного обладнання високого тиску. Впровадження комбінованої технології RO+EDI
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Вступ. Технологічний розділ. Дослідницько-аналітичний розділ. Проектно-рекомендаційний розділ. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки по роботі. Список використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу: графічний матеріал виконаний у вигляді мультимедійної презентації.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	к.т.н., доцент, <u>Дроменко В.Б.</u>		
Розділ 2	к.т.н., доцент, <u>Дроменко В.Б.</u>		
Розділ 3	к.т.н., доцент, <u>Дроменко В.Б.</u>		
Розділ 4	к.т.н., доцент, <u>Дроменко В.Б.</u>		

7. Дата видачі завдання 3 жовтня 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Заключний документ етапу	
1	Вибір теми магістерської роботи, призначення керівника	до 08.09.2025	Затвердження переліку тем магістерських робіт та наукових керівників	
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану магістерської роботи	до 15.09.2025	Список літературних (інформаційних) джерел, план роботи	
3	Визначення об'єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми магістерського дослідження	до 22.09.2025	Текст вступу	
4	Написання тексту магістерської роботи відповідно до її структури:		Текст розділів	
	4.1	I розділ		23.09.2025 – 10.11.2024
	4.2	II розділ		23.09.2025 – 05.10.2025
	4.3	III розділ		06.10.2025 – 20.10.2025
	4.4	IV розділ		21.10.2025 – 03.11.2025
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.11.2025 – 14.11.2025	Роздатковий матеріал, презентація	
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	15.11.2025 – 21.11.2025	Список літературних джерел	
7	Оформлення та попередній захист магістерської роботи	24.11.2025 – 28.11.2025	Магістерська робота, рішення кафедри про допуск до захисту	
8	Внесення коректив та кінцеве редагування магістерської роботи	01.12.2025 – 05.12.2025	Магістерська робота	
9	Реєстрація магістерських робіт на кафедрі	до 05.12.2025	Магістерська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт	
10	Захист магістерської роботи	15.12.2025 – 26.12.2025	Рішення Екзаменаційної комісії про захист	

## АНОТАЦІЯ

**Сіренко М. І. Удосконалення автоматизованої системи знесолення води для парових котлів – Рукопис.**

Кваліфікаційна магістерська робота за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2025 рік.

Ця робота присвячена реконструкції системи знесолення живильної води для парових котлів із впровадженням сучасної комбінованої технології зворотного осмосу та електродеіонізації (RO+EDI), орієнтованої на забезпечення високої якості пари та стабільної роботи котельного обладнання. У роботі розглянуто фізико-хімічні основи процесів демінералізації, проаналізовано недоліки застарілих іонообмінних систем, що використовувалися раніше, та обґрунтовано необхідність їх заміни енергоефективними мембранними технологіями.

У роботі детально висвітлено технологічну схему установки, принципи роботи насосного та мембранного обладнання, а також наведено гідравлічні розрахунки, необхідні для забезпечення розрахункової продуктивності та стабільного тиску на мембранах. Значна увага приділена питанням експлуатації, технічного обслуговування та умовам надійної роботи установок високого тиску, що є критично важливими для безпеки котельного господарства.

Наукова новизна роботи полягає у створенні адаптивної системи керування знесоленням води, що застосовує зворотний зв'язок за показниками хімічного складу пари — рішення, яке підвищує ефективність роботи RO+EDI, продовжує ресурс мембран та оптимізує витрати реагентів і електроенергії.

**Ключові слова:** зворотний осмос, електродеіонізація, знесолення води, парові котли, автоматизація, мембранні технології, датчики, насоси високого тиску, аналіз пари, коригування якості води.

## ABSTRACT

### **Sirenko M. I. Improvement of the automated water desalination system for steam boilers – Manuscript.**

Qualifying master's thesis on specialty 174 " Automation, computer-integrated technologies and robotics". – V.I. Vernadskyi Taurida National University, Kyiv, 2025.

This work is dedicated to the reconstruction of the feedwater demineralization system for steam boilers through the implementation of a modern combined reverse osmosis and electrodeionization technology (RO+EDI), aimed at ensuring high steam quality and stable operation of boiler equipment. The study examines the physicochemical foundations of water demineralization processes, analyzes the shortcomings of outdated ion-exchange systems previously used, and substantiates the need to replace them with energy-efficient membrane technologies.

The work provides a detailed description of the technological scheme of the unit, explains the operating principles of pumping and membrane equipment, and presents the hydraulic calculations required to ensure the design capacity and stable pressure across the membranes. Considerable attention is given to operational aspects, maintenance procedures, and the conditions necessary for reliable operation of high-pressure systems, which are critically important for the safety of boiler facilities.

The scientific novelty of this project lies in the development of an adaptive water-demineralization control system that applies feedback based on the chemical composition of steam—an approach that enhances the performance of the RO+EDI system, extends membrane lifetime, and optimizes reagent and energy consumption.

**Keywords:** reverse osmosis, electrodeionization, water desalination, steam boilers, automation, membrane technologies, sensors, high-pressure pumps, steam analysis, water quality adjustment.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....	9
1.1 Фізико-хімічні основи несолення, та вплив якості води на роботу парових котлів.....	9
1.2 Існуюча система підготовки води для парових котлів.....	17
1.3 Обґрунтування вибору схеми зворотного осмосу + EDI. ....	23
1.4 Висновки до розділу 1.....	33
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....	35
2.1 Опис автоматики системи знесолення. ....	35
2.2 Гідравлічні характеристики системи.....	43
2.3 Датчики системи знесолення.....	52
2.4 Висновки до розділу 2.....	71
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ .....	74
3.1 Необхідність аналізу пари для пере регулювання системи знесолення..	74
3.2 Конструкція вузла відбору пари.....	76
3.3 Вибір давачів складу конденсату. ....	78
3.4 Алгоритми автоматичного корегування системи знесолення. ....	81
3.5 Висновки до розділу 3.....	90
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	93
4.1 Техніка безпеки та охорона праці при роботі з установкою для знесолення. ....	93
4.2 Техніка безпеки при роботі з насосами системи знесолення.....	95
4.3 Техніка безпеки при монтажних роботах у знесолюючій установці. ....	98
4.4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	101
4.5 Висновки до розділу 4.....	103
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ .....	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	108

## ВСТУП

У сучасних енергогенеруючих комплексах якість живильної води є одним із ключових факторів надійності, довговічності та економічності роботи парових котлів. Зростаюча потужність теплотехнічного обладнання, підвищення тисків і температур у парових контурах, а також вимога до мінімізації експлуатаційних витрат формують потребу в удосконаленні систем хімоводоочищення, які забезпечують стабільні параметри знесоленої води. В умовах посилення екологічних норм та необхідності оптимізації споживання реагентів, електроенергії й водних ресурсів особливої актуальності набувають сучасні мембранні технології, що дають змогу отримувати високу якість пермеату без значних експлуатаційних витрат і без утворення великих обсягів хімічних відходів.

Типові установки знесолення, що тривалий час експлуатуються на теплових електростанціях і промислових об'єктах, базуються на традиційних іонообмінних фільтрах з періодичною регенерацією кислотою та лугом. Попри високу ефективність, такі технології характеризуються значним ресурсним навантаженням, високим рівнем споживання реагентів, утворенням значних об'ємів стоків і підвищеною експлуатаційною складністю. Зношене обладнання, корозія, нестабільна якість вихідної води й недостатній рівень автоматизації призводять до коливань у показниках електропровідності пермеату, що, у свою чергу, негативно впливає на роботу котлів і прискорює знос трубних поверхонь нагрівання.

Реконструкція системи знесолення на основі зворотного осмосу та електродіалізу з іонною демінералізацією (RO + EDI) є сучасним інженерним рішенням, яке дозволяє повністю відмовитися від регенераційних реагентів, забезпечити стабільно низьку мінералізацію води та досягти високої чистоти, необхідної для парових котлів високого тиску. Мембранні технології відзначаються високою енергоефективністю, компактністю, тривалим ресурсом роботи елементів і гнучкістю налаштування. Інтеграція RO та EDI в єдиний технологічний комплекс відкриває можливість отримувати воду з

електропровідністю менше 0,1–0,2 мкСм/см без необхідності циклічних регенерацій, що кардинально знижує експлуатаційні витрати та екологічний вплив системи.

Особливо вагомим аспектом роботи є впровадження сучасної автоматизованої системи керування, яка охоплює моніторинг тиску, витрати, електропровідності, рН, температури, ступеня засолення концентрату та низки інших параметрів, що визначають стабільність роботи мембранних елементів. Застосування датчиків високої точності та інтегрованих алгоритмів регулювання забезпечує динамічну адаптацію системи до змін якості вихідної води, що дозволяє підтримувати оптимальні технологічні режими без участі оператора. Автоматизація також сприяє підвищенню рівня безпеки, оскільки мінімізує людський фактор, забезпечує аварійний захист і дозволяє своєчасно виявляти аномалії.

Сучасні системи знесолення розглядаються не лише як окремий технологічний блок, а як невід'ємна частина загальної енергетичної інфраструктури. Їх робота тісно пов'язана зі стабільністю живлення котлів, мінімізацією накипу, зменшенням витрат на продувку, підвищенням коефіцієнта корисної дії котла та продовженням ресурсу турбінного обладнання. Якість демінералізованої води прямо впливає на паровий баланс, енергоефективність та ремонтні інтервали тепломеханічного обладнання, що робить модернізацію системи хімводоочищення стратегічно важливою частиною загального технічного переоснащення.

У цій роботі розглядається комплексна реконструкція системи знесолення з переходом від морально й технічно застарілих іонообмінних технологій до сучасної мембранної схеми RO + EDI, яка забезпечує високу якість пермеату, низькі експлуатаційні витрати та екологічну безпечність. Особливу увагу приділено гідравлічним характеристикам, вибору насосного обладнання, конструктивній компоновці ліній, інтеграції засобів автоматизації, реалізації алгоритмів контролю та захисту, а також впровадженню додаткової системи

контролю якості пари для корегування режимів роботи установки в реальному часі.

Реалізація такої реконструкції вимагає високого технічного рівня проєктування, точного підбору мембранних елементів, глибокого розуміння фізико-хімічних процесів та всебічної інтеграції обладнання в інфраструктуру котельні. Запропоноване рішення дозволяє створити технологічно досконалу, економічно обґрунтовану й екологічно безпечну систему знесолення, що відповідає сучасним вимогам до роботи енергетичного обладнання.

**Об'єкт дослідження:** процеси глибокого знесолення води для живлення парових котлів високого тиску.

**Предмет дослідження:** реконструкція системи хімоводоочищення на основі технологій зворотного осмосу та електродіалізу з іонною демінералізацією, включаючи гідравлічні, технологічні та автоматизаційні аспекти.

**Методи дослідження:** аналіз літератури та технічної документації, гідравлічні та хіміко-технологічні розрахунки, моделювання роботи мембранних елементів, розробка алгоритмів автоматизації, оцінка експлуатаційних характеристик.

**Практична цінність:** впровадження мембранної системи RO + EDI дозволяє суттєво підвищити якість живильної води, зменшити експлуатаційні витрати, знизити екологічне навантаження, підвищити ефективність роботи котлів і продовжити строк служби обладнання.

**Елемент наукової новизни:** запропоновано комплексний мембранний підхід до глибокого знесолення води з інтеграцією автоматизованого контролю якості пари та динамічним корегуванням режимів роботи системи RO + EDI.

## РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Фізико-хімічні основи несолення, та вплив якості води на роботу парових котлів.

Парові котли високого тиску належать до найвідповідальніших енергетичних установок промисловості, оскільки саме вони забезпечують генерацію теплової та механічної енергії у технологічних циклах, критичних для роботи підприємства. Робота котла високого тиску супроводжується екстремальними фізичними навантаженнями на метал конструкцій, трубні системи, колектори, екранні панелі, економайзери та пароперегрівачі. У таких умовах навіть незначні відхилення у складі живильної води здатні призвести до різкого зниження ресурсу обладнання, появи депасиваційних зон, прискореної корозії, локальних перегрівів та потенційно аварійних ситуацій. У сучасній енергетиці давно встановлено, що якість живильної води є одним із ключових параметрів, який визначає безпеку роботи парового котла, стабільність виробництва та тривалість безаварійного ресурсу.

Проблема накипоутворення у високотискових котлах завжди була і залишається однією з найгостріших. Розчинені солі кальцію, магнію, кремнію, натрію, заліза й залишкові органічні компоненти при високій температурі та тиску переходять у тверду фазу, утворюючи відкладення на внутрішній поверхні труб. Зростання шару накипу на десять долі міліметра вже суттєво знижує теплопровідність, збільшуючи температуру стінки металу та створюючи передумови для міжкристалітної корозії. У високотискових системах це може призвести до локальних вибухових руйнувань труб, гідравлічних пошкоджень та виведення з ладу цілого котлоагрегату. Саме тому сучасні норми передбачають практично нульовий вміст солей жорсткості та наднизьку провідність живильної води, що вимагає використання високотехнологічних методів глибокого знесолення [11].

Існуючі на багатьох підприємствах системи підготовки води розроблялися в період, коли не існувало таких технологій, як мембранний зворотний осмос, установка якого показана на Рисунку 1.1 чи електродіаліз деіонізації (EDI), установка якого показана на Рисунку 1.2.



Рис 1.1 Установка зворотнього осмосу



Рис 1.2 Установка електродіалізу деіонізації (EDI)

Традиційні іонітні схеми, що включають натрій-катіонітні фільтри, двоступеневе аніонітне очищення та змішані фільтри, мають низку принципових недоліків, пов'язаних із високою вартістю реагентів, небезпекою поводження з кислотами та лугами, коливанням якості води через прорив іонітів, складністю обслуговування та залежністю від людського фактору. Пропускна здатність таких систем також часто обмежена, а продуктивність та якість очищення падають у міру старіння сорбенту. Сучасні вимоги до котлів високого тиску висувають стандарти, які старі схеми фізично не здатні забезпечити, особливо при високій продуктивності та нестабільному хімічному складі вихідної води.

Крім технологічної частини, важливою є економічна складова. Зниження ефективності теплообміну через накип приводить до збільшення витрат палива, підвищення навантаження на пальникові пристрої, прискореного старіння топкових елементів та зростання кількості аварійних зупинок. Кожна позапланова зупинка котла високого тиску призводить до серйозних фінансових втрат, зупинки технологічних ліній, деградації продукції та непрямого збільшення витрат підприємства. У багатьох випадках саме нестабільна робота системи водопідготовки стає тим “вузьким місцем”, яке визначає ефективність усієї котельні. Реконструкція системи знесолення з переходом на мембранні технології дозволяє усунути цей фактор і створити прогнозовану, контрольовану та стабільну роботу котельного обладнання [25].

В умовах сучасних екологічних стандартів значно підвищуються вимоги до використання хімічних реагентів. Традиційні іонітні фільтри потребують регулярної регенерації великими обсягами соляної кислоти та каустичної соди, що несе ризики техногенного навантаження, утворення токсичних стоків, необхідність спеціальних ємностей, вентиляції та компенсаційних заходів. Мембранні методи, і насамперед зворотний осмос, практично повністю усувають необхідність використання кислот для знесолення, а електродіонізація (EDI) дозволяє виробляти надчисту воду без

реагентів взагалі. Це суттєво спрощує експлуатацію, зменшує вплив людського фактору та підвищує екологічну безпеку підприємства.

Зворотний осмос у поєднанні з EDI-модулем забезпечує провідність готової води на рівні 0,06–0,2 мкСм/см, що значно перевищує можливості класичних систем. Така вода забезпечує стабільну роботу котла високого тиску, знижує ризики утворення солей кремнію, що особливо небезпечно для пароперегрівачів, та мінімізує перенесення солей у пар (солеперенос), яке може призвести до пошкодження турбін або високотемпературних теплообмінників. Вода після EDI характеризується стабільністю складу, відсутністю коливань якості після регенерацій та рівномірністю параметрів, що є критично важливим для сталого режиму котлоагрегату.

Питання модернізації системи знесолення стає ще актуальнішим у зв'язку з природним зносом обладнання. В багатьох котельнях України використовуються установки, що працюють понад 20–30 років, мають фізично та морально застарілі вузли, неконтрольовані фільтрувальні середовища, втрати продуктивності насосів, високий гідравлічний опір та часті витіки. Спроба підтримувати старі системи у робочому стані призводить до непропорційно великих витрат, тоді як впровадження нової схеми “зворотний осмос + EDI” часто окупується лише за рахунок економії палива та скорочення аварійних зупинок.

Слід також враховувати, що робота котельні — це складний комплекс технологічних процесів, де кожна підсистема має бути узгоджена з іншими. Відсутність якісного знесолення впливає не тільки на сам котел, а й на роботу деаератора, насосних магістралей, теплообмінників живильної води, арматури, датчиків рівня, регуляторів та всієї автоматики. Модернізація системи водопідготовки з впровадженням зворотного осмосу та електродіонізації дозволяє сформувати єдину інтегровану, автоматизовану, контрольовану систему, яка працюватиме у сталих параметрах, не залежатиме від людського фактору та забезпечуватиме безпечний режим генерації пари.

Сучасні енергетичні підприємства рухаються у напрямку цифровізації та автоматизації. Нові системи водопідготовки не лише виробляють якісну воду, а й дозволяють інтегрувати контроль параметрів у SCADA, вести історію провідності, тисків, витрат та інших параметрів, що унеможлиблює приховані відхилення. Використання EDI-модуля дає змогу працювати безперервно, без циклів регенерації, без зупинок, без використання кислот, що відповідає сучасним міжнародним практикам водопідготовки для високотискових парових котлів [37].

Таким чином, реконструкція системи знесолення живильної води є не лише технічним вдосконаленням обладнання, а й необхідною умовою підвищення надійності, безпеки та економічної ефективності роботи котельні. У реаліях сучасного виробництва, коли кожна година простою призводить до значних економічних втрат, а вимоги до екологічної безпеки постійно зростають, перехід до схеми «зворотний осмос + електродіонізація» вже не є варіантом, а стає стратегічною необхідністю. Саме тому питання реконструкції системи знесолення є актуальним, своєчасним та критично важливим для сучасної промислової енергетики.

Живильна вода парових котлів високого тиску є технічно складним об'єктом, який вимагає глибокого аналізу з точки зору хімічного складу, фізичних характеристик та потенційної поведінки при переході у стан насиченої та перегрітої пари. Вода, що надходить до котла, несе в собі розчинені іони, мінерали, гази, часточки мікродисперсних домішок та органічні залишки, кожен із яких здатен у високотемпературних умовах трансформуватися у тверду фазу, каталізувати корозію, прискорювати руйнування металу або створювати небезпечні умови для роботи котельного агрегату. У котлах із робочим тиском понад 4 МПа ці процеси відбуваються зі значно більшою інтенсивністю, ніж у низько- і середньотискових системах, що зумовлює підвищені вимоги до рівня очищення та стабільності хімічного складу живильної води.

В основі більшості проблем, пов'язаних зі зниженням ресурсу котельного обладнання, лежить процес відкладення солей жорсткості, силікатів, карбонатів та інших речовин на поверхні нагріву. Під час нагріву вода втрачає здатність утримувати деякі солі в розчиненому стані, що приводить до їхнього випадіння в осад. Молекулярні механізми накипоутворення надзвичайно чутливі до концентрації кальцію, магнію, кремнію, алюмосилікатів та натрію, а також до рН, температури та структури води. При переході у стан насиченої пари та подальшому підвищенні температури у пароперегрівачах відбувається зміна рівноваги між розчиною та твердою фазою солей, що прискорює утворення накипу. Особливо небезпечним є утворення сольових плівок на внутрішній поверхні труб, що значно знижує теплопередачу та призводить до нерівномірного розподілу температурних напруг у металі [42].

Присутність кремнію у воді є однією з найкритичніших проблем для котлів високого тиску. Силікати здатні переноситися разом із паром у вигляді летких або механічно затягваних частинок, що викликає відкладення у пароперегрівачах, ступенях турбін, теплообмінниках та на поверхнях арматури. Солеперенос кремнію навіть на рівні кількох десятків мкг/кг може мати руйнівні наслідки для високотемпературних вузлів. Зниження концентрації кремнію у воді до рівнів менше 20 мкг/кг у більшості випадків неможливе без мембранних технологій, таких як зворотний осмос, у поєднанні з EDI, оскільки традиційні іонітні фільтри втрачають ефективність при низьких концентраціях розчинених речовин та під час коливань мінералізації. Тільки мембранні методи забезпечують стабільність вилучення навіть слідових компонентів, що й робить їх критично необхідними для сучасних високотискових котлів.

Важливою проблемою у водопідготовці є також розчинений кисень. Навіть при незначних концентраціях кисень здатен спричинити питтингову корозію, утворюючи локальні ямки на внутрішній поверхні труб, які надалі розвиваються у наскрізні отвори. У системах високого тиску цей процес

відбувається швидше через підвищені температури та прискорену дифузію. Абсолютно безпечний рівень кисню для таких котлів становить менше 20–30 мкг/кг, а в ідеалі — всього кілька мікрограмів. Досягнення такого рівня можливе лише при комплексному підході, що включає хімічну деаерацію, використання високотемпературного деаератора та застосування води з мінімальним вмістом органіки, яку може забезпечити лише глибоке знесолення зворотним осмосом у поєднанні з EDI [49].

Часто недооцінюється роль органічних речовин та мікробіологічних домішок. У вихідній воді може бути присутня гумінова органіка, залишки промислових забруднень, природні полімерні комплекси та різні леткі органічні компоненти. Високотискові котли реагують на них утворенням азотноорганічних відкладень, полімерних шарів, які змінюють структуру накипу, ускладнюють його видалення та створюють ізоляційний бар'єр на внутрішніх поверхнях труб. Мембранні технології системи попереднього знесолення ефективно вилучають органічні домішки, а електродіонізація забезпечує додаткове видалення низькомолекулярних органічних залишків, які традиційні іоніти пропускають або затримують нестабільно.

При високих тисках особливо гостро постає проблема внутрішньої корозії парових магістралей та котлового обладнання, пов'язаної з концентрацією іонів натрію та хлоридів. Натрій має здатність залишатися у парі та переноситись до турбін, створюючи солеві відкладення на лопатках та каналах. Хлориди ж викликають стрес-корозійні тріщини, особливо в зонах високої температури та у присутності циклічних навантажень. Зменшення вмісту цих іонів до рівнів менше 5 мкг/кг можливе лише при застосуванні мембранних технологій, що характеризуються стабільним вилученням навіть найменших залишкових концентрацій.

У технічній літературі наголошується, що будь-які системи, які мають фази регенерації, очищення, промивання та відновлення фільтрувальних властивостей, завжди потенційно нестабільні. Навіть у найкращих умовах іонітні фільтри працюють циклічно, що неминуче призводить до

періодичного погіршення якості води. У випадку високотискових котлів це неприпустимо. Тому світові стандарти давно перейшли до концепції безперервного знесолення, яке забезпечує електродіонізація — процес, що поєднує принцип електродіалізу та іонного обміну, але не потребує регенерації кислотами чи лугами, не має циклічності та працює стабільно у всьому діапазоні навантажень. Саме поєднання зворотного осмосу та EDI-модуля дозволяє досягти того рівня чистоти, що є обов'язковим для стабільної та безпечної роботи високотискових котельних агрегатів.

Особливо критичним є питання контролю провідності води. У високотискових котлах провідність живильної води повинна бути нижчою за 0,2 мкСм/см, що практично недосяжно при використанні класичних систем. Висока чутливість котлів до солемісту зумовлена тим, що в умовах високих температур відбувається зміна стану води та парорідинної суміші, що створює умови для зміни сольового балансу всередині котла. Неправильний розподіл солей та накопичення солей у зоні пароутворення може викликати коливання рівня, піноутворення та механічне затягування солей у магістралі пари. Зворотний осмос у поєднанні з EDI забезпечує стабільність показників, які не залежать від якості вихідної води, коливань температури чи часу роботи обладнання, що робить таку систему найнадійнішою для складних енергетичних об'єктів.

Таким чином, фізико-хімічні основи процесів у високотискових котлах обумовлюють жорсткі вимоги до якості води, що може бути досягнуто тільки комплексною системою мембранного знесолення. Поглиблене розуміння цих процесів дозволяє обґрунтувати необхідність реконструкції застарілої системи водопідготовки та впровадження сучасної схеми «зворотний осмос + EDI», яка здатна забезпечити стабільність, надійність та безпеку роботи парового котла високого тиску.

## 1.2 Існуюча система підготовки води для парових котлів.

Система водопідготовки, що наразі експлуатується на котельні, була розроблена та встановлена у період, коли домінуючими технологіями очищення води для живлення парових котлів залишалися традиційні іонітні методи з застосуванням катіонітних, аніонітних та змішаношарових фільтрів. Концепція цієї системи ґрунтувалася на хімічному обміні іонів у фільтрувальному середовищі, яке потребує періодичної регенерації кислотами та лугами. На момент проєктування та монтажу така схема відповідала технічним вимогам і забезпечувала прийнятні показники води для котлів середнього тиску. Однак сучасні вимоги до котлів високого тиску, а також зміна складу вихідної води, технологічні навантаження та природна деградація іонітів призвели до того, що система перестала відповідати потребам виробництва [34].

Основною частиною існуючої системи є лінія механічної підготовки, представлена сітчастими фільтрами грубої очистки та піщаними фільтрами, які повинні затримувати механічні домішки, оксиди заліза, мулові включення та пісок. Проте ефективність цих фільтрів суттєво зменшилася внаслідок тривалої експлуатації без заміни фільтрувального шару. Піщані завантаження втратили гранулометричну структуру, частково спресувалися, а у нижніх шарах утворився ущільнений муловий шар, що підвищив гідравлічний опір і знизив продуктивність. Нерівномірність промивання призвела до того, що частина фільтрів працює не в номінальному режимі, а у режимі часткової фільтрації, що створює ризик прориву механічних домішок у наступні етапи очищення.

Після механічної підготовки вода подається на натрій-катіонітні фільтри, призначені для видалення іонів кальцію та магнію. Ці фільтри традиційно працюють у режимі періодичної регенерації розчином кухонної солі. Однак із часом катіоніт втратив обмінну здатність, частково деградував через температурні коливання та циклічні механічні навантаження. Це призводить до нестабільності процесу пом'якшення: у моменти пікового

водоспоживання можливий прорив солей жорсткості. Накопичення кальцію та магнію в живильній воді є неприйнятним для котлів високого тиску, оскільки висока температура спричиняє утворення карбонатних та сульфатних накипів на поверхнях нагріву, що може призвести до локального перегріву та руйнування труб.

Після блоку пом'якшення вода надходить на двоступеневу іонітну схему глибокого знесолення, що включає сильнокислотні катіонітні фільтри, сильнолужні аніонітні фільтри та змішаношарові демінералізатори. У сильнокислотних катіонітних фільтрах відбувається заміщення катіонів кальцію, магнію, заліза та інших металів на іони водню, а в сильнолужних аніонітах — заміщення сульфатів, хлоридів, нітратів та кремнієвої кислоти на гідроксид-іони. Ці процеси ґрунтуються на строгому дотриманні циклів регенерації, що включають промивання, відмивання, подачу кислоти й лугу, контроль рН та концентрацій реагентів. Однак реальна картина показує, що ефективність цієї системи значно знизилася. Іоніти відпрацювали ресурс, частина гранул зруйнувалася, що призвело до утворення суспензії смоли у фільтрах, нерівномірного розподілу потоків та утворення каналів обтікання. Через це вода не контактує повністю з фільтрувальним середовищем, а проходить через найменший опір, що спричиняє прорив солей і збільшення провідності.

Змішаношарові фільтри, які за своєю конструкцією повинні забезпечувати найвищий рівень очищення, також втратили ефективність. Змішування шарів аніоніту та катіоніту відбувається нерівномірно, частина зерен злиплася, а частина має різну щільність і фізичну структуру, що порушує стратифікацію під час промивання. Це призводить до того, що ефективність фільтру у деякі моменти циклу падає в рази. Підвищення провідності та наявність кремнію у пермеаті на виході зі змішаного шару є критичними показниками деградації системи та об'єктивним сигналом про вичерпання ресурсу іонітів.

Окрему проблему становлять ємності для реагентів та вузол їх подачі. Через природну корозію та старіння трубопроводів з'явилися мікропротікання, які створюють додаткову небезпеку під час роботи з кислотами та лугами. Деякі модулі зливу та відмивання вже працюють нестабільно, оскільки засувки й клапани мають зношені ущільнення, а частина арматури морально застаріла. Крім того, сама процедура регенерації є небезпечною для персоналу, оскільки потребує ручного втручання, транспортування хімічних реагентів, вимірювання концентрацій та контролю дозування.

Гідравлічна частина системи також втратила свої номінальні характеристики. Насоси перекачування та промивання втратили продуктивність через знос робочих коліс, а частина трубопроводів має корозійні ушкодження. Це спричиняє нерівномірність розподілу потоків, зниження швидкостей промивки та обтікання фільтрувального середовища, що безпосередньо впливає на якість очищення. У деяких ділянках трубопроводів утворилися гідравлічні тіні, що порушують роботу фільтрів, а на зварних швах виявлені сліди точкової корозії, які у майбутньому можуть перерости у аварійні витоки.

Система автоматизації на існуючій водопідготовці практично відсутня як сучасний інструмент контролю. Частина вимірювачів провідності та рН давно не працює або видає нестабільні дані, що змушує персонал покладатися на лабораторний аналіз, який не дає можливості оперативного реагування. Відсутність онлайн-контролю провідності після кожного фільтру призводить до того, що прориви солей виявляються із затримкою, інколи вже на виході всієї системи. Це створює додаткові ризики для роботи котельні та може спричинити непередбачувані відхилення у якості живильної води.

У підсумку існуюча система знесолення представляє собою комплекс фізично та морально застарілих вузлів, які не здатні забезпечити стабільну якість води для котлів високого тиску. Вона працює на межі можливостей, постійно вимагає ремонту, має високу залежність від людського фактору і не

відповідає сучасним вимогам енергоефективності, екологічної безпеки та технологічної стабільності [27].

Необхідність реконструкції системи знесолення води для живлення парових котлів високого тиску обумовлена поєднанням технічних, хімічних, економічних та експлуатаційних факторів, які в сучасних умовах створили критичну невідповідність між можливостями існуючої іонітної схеми та реальними потребами технологічного процесу. Високий тиск, підвищені температури, висока теплонапруженість поверхонь нагріву та адаптація котельні до сучасних вимог енергоефективності потребують максимально стабільної, передбачуваної та високоякісної живильної води, чого існуюча структура водопідготовки забезпечити вже не може.

Першою і найочевиднішою причиною є те, що іонітні фільтри втратили свою обмінну ємність через тривалу експлуатацію. Іоніти мають обмежений життєвий цикл, протягом якого їхня структура зазнає деградації: гранули злипаються, розтріскуються, частково руйнуються під дією кислотно-лужних регенерацій, механічного стирання та термонавантаження. У результаті значна частина фільтрувального середовища не бере участі в іонному обміні, створюючи канали обтікання, крізь які вода проходить без очищення. Цей процес стає непомітним у короткостроковій перспективі, але з роками він прогресує, доки фільтр повністю не втрачає здатність забезпечувати стабільну якість води. У системах для котлів низького тиску це можна компенсувати підвищенням частоти регенерацій, однак у випадку котлів високого тиску це не усуває ризиків і є технологічно неприйнятним.

Другою критичною причиною є те, що тенденції у складі вихідної води значно змінилися порівняно з періодом проектування системи. Зросли концентрації органічних домішок, збільшилась кількість заліза та міді у трубопроводах через їхній природний знос, у деяких випадках змінився хімічний склад підземних або річкових вод через антропогенне навантаження. Традиційні іонітні фільтри не здатні стабільно працювати із водою змінного складу. Вони потребують точного балансу іонів та

передбачуваної мінералізації, яких у реальних умовах більше немає. Мембранні технології зворотного осмосу, навпаки, працюють однаково ефективно незалежно від коливань якості сировинної води, що робить їх значно більш універсальними в сучасних умовах.

Третьою причиною є висока залежність існуючої системи від людського фактору. Процес регенерації іонітів передбачає ручну подачу хімічних реагентів, контроль концентрацій, вимірювання рН, перемикання клапанів і ручне керування промивними циклами. Усі ці дії потребують високого рівня дисципліни, точності та професійності персоналу. Проте людський фактор неминуче приводить до помилок: неправильне дозування реагентів, несвоєчасна регенерація, недостатнє промивання або перегрів фільтрувального середовища. Ці помилки безпосередньо впливають на якість води, а у випадку котлів високого тиску можуть перерости у серйозні аварійні події.

Четвертим важливим фактором є економічна недоцільність подальшої експлуатації застарілої системи. Для підтримання роботи іонітних фільтрів необхідні значні обсяги реагентів, зокрема соляної кислоти та каустичної соди. Це не тільки створює значні експлуатаційні витрати, але й призводить до утворення великих обсягів агресивних стічних вод, які потребують нейтралізації, утилізації та екологічного контролю. У сучасних умовах, коли екологічні стандарти та нормативи посилюються, зберігати таку технологію стає дедалі менш доцільно. Мембранні технології, особливо у поєднанні з EDI, практично не використовують реагентів, працюють у безперервному режимі й генерують мінімум стічних вод, що суттєво знижує експлуатаційні витрати [19].

П'ятою визначальною причиною є критична нестабільність якості води, що надходить у котел. Провідність води на виході зі змішаношарових фільтрів значно коливається залежно від того, на якому етапі регенераційного циклу вони знаходяться. Така циклічність є нормою для іонітних технологій, але абсолютно неприпустима для котлів високого тиску,

де навіть короткочасне збільшення солевмісту може призвести до інтенсивного утворення накипу, піноутворення, нестабільності рівня та солепереносу в паропроводи. Саме тому у світовій практиці циклічні системи майже повністю витіснені безперервними мембранними лініями.

Шостою ключовою причиною, що прискорила необхідність реконструкції, є фізичне старіння трубопроводів, арматури та технологічного обладнання водопідготовки. Корозія металу, розгерметизація зварних швів, знос насосів, протікання засувок та клапанів створюють не тільки експлуатаційні складнощі, але й потенційні аварійні ризики. У ряді вузлів є реальні ознаки порушення гідравлічного режиму, що знижує швидкість промивання фільтрів і сприяє утворенню застійних зон. Це особливо небезпечно у системах з реагентами, де витік кислоти або лугу може створити локальні хімічні ураження.

Подальшим вагомим фактором є відсутність сучасної автоматизації та можливості онлайн-контролю. Стара система не передбачає безперервного моніторингу провідності на кожному етапі, а існуючі датчики або не працюють, або не мають точності, необхідної для котлів високого тиску. Це призводить до того, що персонал змушений проводити лабораторні аналізи постфактум, коли відхилення якості води вже могли вплинути на режим котла. Для високотискових систем така затримка між появою відхилення та реакцією на нього є неприпустимою.

Вирішальним аргументом для реконструкції є також те, що міжнародні стандарти експлуатації високотискових котлів вже давно передбачають застосування мембранних технологій, зокрема зворотного осмосу та електродіонізації, як базових методів підготовки води. Це пов'язано з тим, що саме такі технології забезпечують стабільну, безперервну та незалежну від циклів регенерації якість води. Зворотний осмос забезпечує глибоке видалення мінералізованих домішок, органіки та колоїдів, а EDI доводить воду до рівня провідності, що вимірюється у десятках наносіменсів на

сантиметр. Традиційна іонітна схема фізично не здатна забезпечити стабільно низьку провідність, яка необхідна для котлів високого тиску.

У підсумку реконструкція не є просто модернізацією або заміною обладнання, а є необхідним стратегічним кроком, що забезпечує надійну, стабільну й безпечну роботу всієї котельної установки. Вона дозволяє усунути ризики аварій, підвищити енергоефективність, зменшити експлуатаційні витрати, підвищити технологічну дисципліну та відповідність сучасним стандартам. У сучасних умовах збереження застарілої системи не тільки неефективне, але й небезпечне як для обладнання, так і для персоналу, тому впровадження схеми «зворотний осмос + EDI» є технічно обґрунтованою та економічно доцільною необхідністю.

### **1.3 Обґрунтування вибору схеми зворотного осмосу + EDI.**

Сучасна промисловість використовує широкий спектр технологій очищення та знесолення води для котельних агрегатів. Кожна з них має власні фізико-хімічні особливості, робочі обмеження, ступінь автоматизації та рівень стабільності. Однак при живленні парових котлів високого тиску вимоги до якості води значно жорсткіші, ніж у будь-яких інших галузях водопідготовки. У цих умовах найбільшого значення набувають такі параметри як стабільність провідності, відсутність циклічності роботи, здатність видаляти кремній, мікродомішки та органіку, мінімальна залежність від людського фактора, а також можливість інтеграції у сучасні автоматизовані системи керування [7].

Історично першими технологіями, що застосовувалися для знесолення води, були термічні методи — випарювання, ректифікація та конденсація. Ці технології забезпечували практично повне видалення мінеральних солей, але відзначались величезною енергоємністю, складністю експлуатації, необхідністю масштабних теплообмінників та значним зношенням обладнання через постійний контакт з агресивними середовищами. У сучасних умовах вони застосовуються виключно у спеціалізованих

установках, де доступна дешева теплова енергія або де є технічна необхідність отримувати ультрачисту воду без використання хімічних реагентів. Для котельних установок такі методи є малоприматними через високу собівартість, складність обслуговування та відсутність гнучкості.

Другим важливим напрямом є використання класичних іонітних технологій, що включають катіонітні фільтри, аніонітні фільтри, змішаношарові демінералізатори та різні їхні комбінації. Ці системи багато десятиліть були основою водопідготовки на промислових об'єктах, оскільки забезпечували високий ступінь очищення, порівняно невисоку капітальну вартість та передбачувану роботу за умови правильно організованої регенерації. Проте вони мають низку фундаментальних недоліків, пов'язаних із циклічністю роботи, залежністю від якості реагентів, небезпекою помилок персоналу та обмеженою ефективністю при видаленні кремнію, органіки та слідових іонів. Для котлів низького та середнього тиску іонітні фільтри залишаються економічно доцільними, однак у системах високого тиску вони давно поступилися місцем мембранним технологіям.

Наступним етапом розвитку технологій очищення води став зворотний осмос (Reverse Osmosis — RO), Рисунок 1.3, який базується на застосуванні напівпроникних мембран, здатних пропускати молекули води та повністю затримувати розчинені іони, органіку, бактерії, віруси та колоїди.

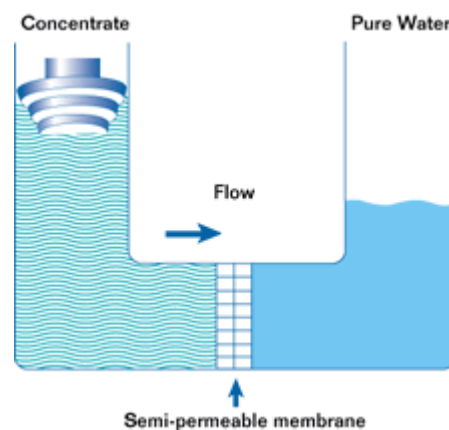


Рис 1.3 Технологія RO

Зворотний осмос став справжнім проривом у водопідготовці, оскільки дозволяє забезпечувати високе вилучення солей без використання хімічних реагентів, забезпечує безперервний процес і не потребує регенерацій. Однак сам по собі зворотний осмос не дає води, достатньо чистої для котлів високого тиску. Провідність пермеату RO зазвичай становить 5–20 мкСм/см залежно від якості вихідної води та ступеня мембранної очистки. Цього недостатньо для надвисоких температур, оскільки навіть мінімальні концентрації кремнію та натрію призводять до солепереносу та утворення відкладень у пароперегрівачах [13].

Для доведення води до рівня, необхідного для котлів високого тиску, у світовій практиці застосовуються методи, здатні видаляти іони до рівня одиниць або десятків мікрограмів на літр. Однією з таких технологій є електродіаліз. Проте класичний електродіаліз працює ефективно лише при певній концентрації солей та має обмеження щодо низькомінералізованої води. Тому він зазвичай застосовується як попередній етап перед осмосом, а не після нього.

Справжню революцію у виробництві високочистої води здійснила електродіонізація (EDI), зображена на Рисунку 1.4. Це процес, що поєднує мембранну технологію та іонний обмін, але без циклів регенерації. У модулі EDI використовуються іонообмінні смоли у поєднанні зі спеціальними мембранами, а рух іонів забезпечується електричним полем. За рахунок цього система працює у повністю безперервному режимі, постійно відводячи мінеральні компоненти у концентрат, не використовуючи кислот чи лугів. Головною перевагою EDI є здатність забезпечувати провідність пермеату на рівні 0,06–0,2 мкСм/см, що абсолютно недосяжно для традиційних іонітних фільтрів у циклічному режимі та неможливо для зворотного осмосу без доочищення.

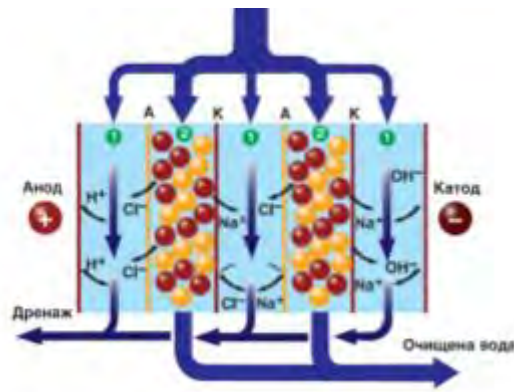


Рис 1.4 Принцип EDI

Важливим є той факт, що електродіонізація досягає максимальної ефективності саме у поєднанні зі зворотним осмосом. Осмос забезпечує зниження мінералізації до того рівня, який є оптимальним для EDI-модуля. Надто висока концентрація солей зменшує ефективність електродіонізації, оскільки зростає навантаження на іонообмінні смоли та мембрани. Надто низька мінералізація (характерна для повторного пропускання через RO або для деяких демінералізованих вод) також створює умови, коли EDI не може працювати на номінальному струмі. Таким чином, саме комбінація «осмос + EDI» є ідеальною з точки зору фізики процесу.

Окремо слід розглянути технології ультрафільтрації, нанофільтрації та мембранної дегазації. Ультрафільтрація ефективно видаляє колоїди, високомолекулярні органічні речовини та мікробіологічні домішки, проте практично не впливає на концентрацію солей. Нанофільтрація здатна частково знесолювати воду, але її ефективність значно нижча за зворотний осмос і вона не видаляє кремній до рівнів, необхідних для котлів високого тиску. Мембранна дегазація може частково видаляти кисень та вуглекислий газ, але сама по собі не забезпечує знесолення. Такі технології ефективно інтегруються у комбіновані схеми водопідготовки, але жодна з них не може замінити RO+EDI. Структурна і функціональна схема RO+EDI показана на Рисунку 1.5.

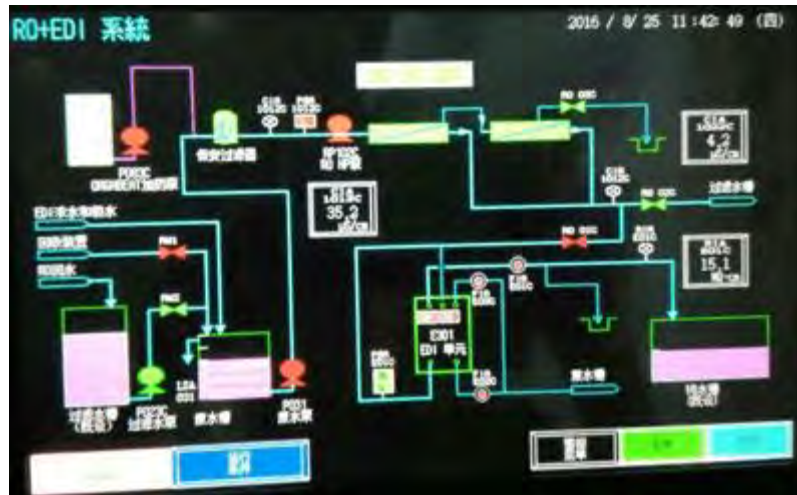
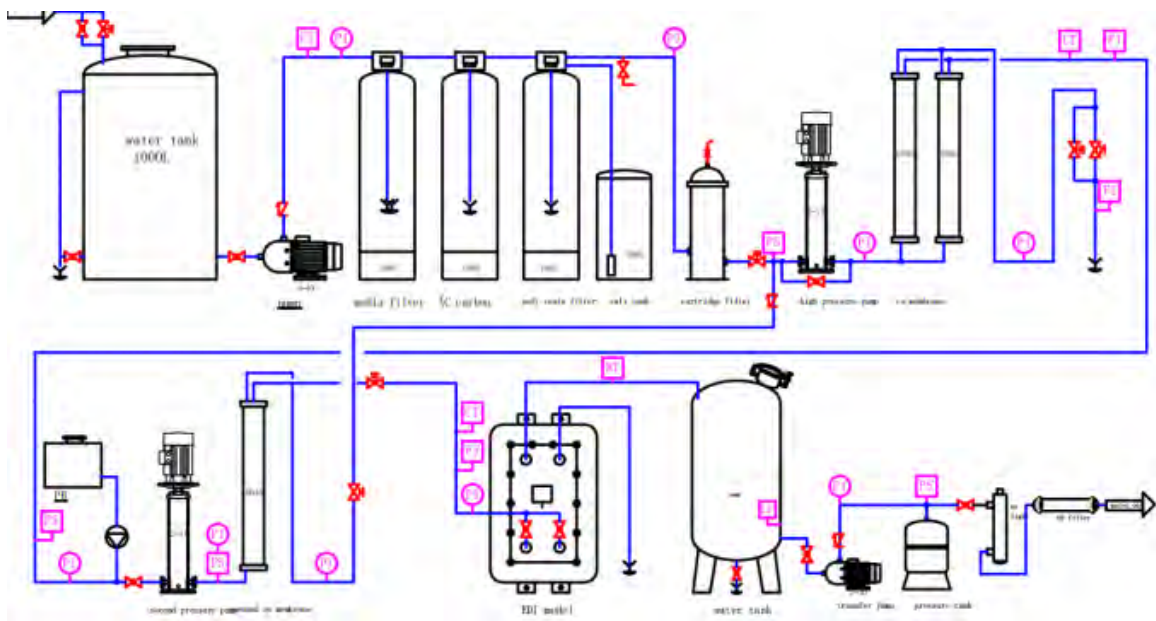
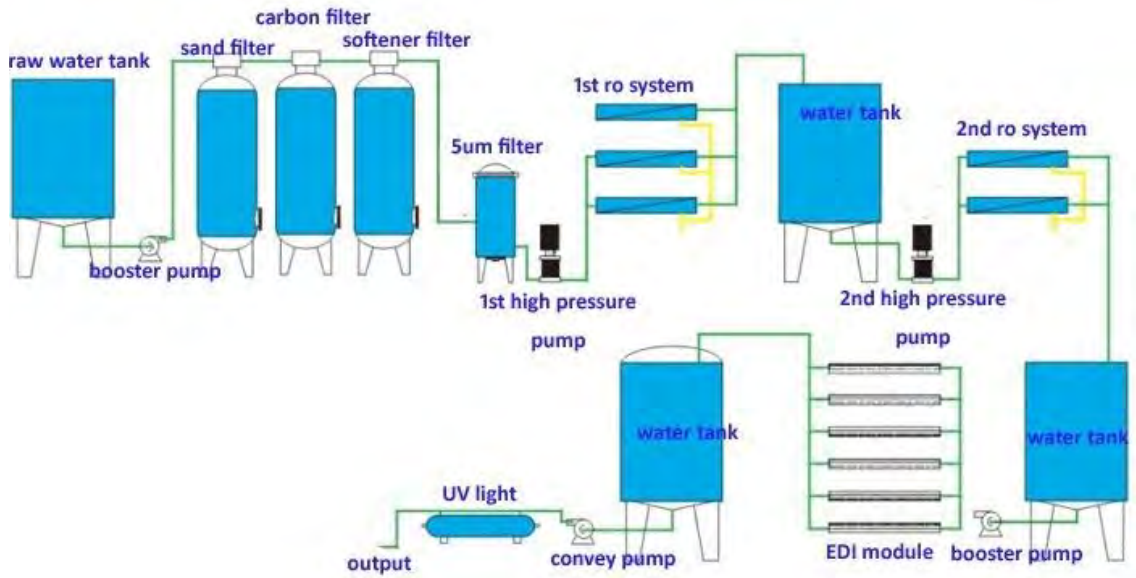


Рис 1.5 Структурна і функціональна схема RO+EDI

Порівнюючи різні технології між собою, можна виділити ключові критерії, важливі для котлів високого тиску: стабільність провідності, здатність видаляти кремній та натрій до ультранизьких рівнів, відсутність циклічності роботи, мінімальні експлуатаційні витрати, можливість роботи у безперервному режимі, відсутність реагентів, висока автоматизація, можливість інтеграції у SCADA та прогнозованість роботи у широкому діапазоні навантажень. За сукупністю цих факторів лише комбінація зворотного осмосу та електродіонізації повністю відповідає сучасним міжнародним стандартам для котлів високого тиску [2].

Традиційні іонітні системи мають об'єктивні технологічні межі. Вони здатні забезпечувати провідність у діапазоні 0,2–1 мкСм/см, але тільки короткий час після регенерації. Далі провідність поступово підвищується, а ефективність знижується. У випадку котлів високого тиску ця циклічність є неприпустимою. Система RO+EDI, навпаки, забезпечує стабільну провідність протягом усього періоду експлуатації, а коливання параметрів мають величину десяті або соті частки мікросіменса, що абсолютно несуттєво для роботи котла.

Ще одним фактором, який визначає вибір на користь RO+EDI, є здатність цієї схеми видаляти органічні домішки. Мембранні технології, зокрема осмос, ефективно видаляють органіку з молекулярною масою понад 100 моль, включно з гуміновими кислотами, поверхнево-активними речовинами, фенольними домішками та природними полімерними структурами. У той час як іонітні фільтри значну частину органічних речовин пропускають, і вони надалі сприяють утворенню органо-мінеральних відкладень, які значно складніше усунути, ніж класичний сольовий накіп.

Важливим аспектом є також стійкість до змін навантаження. Система RO+EDI може працювати як у режимі максимальної продуктивності, так і у режимі мінімальних потоків, зберігаючи при цьому якість води. Іонітні

фільтри, навпаки, значно погіршують якість при відхиленні від номінальних витрат.

У глобальному масштабі схема зворотного осмосу з електродіонізацією стала домінуючим рішенням для енергетики, фармацевтики, електронної промисловості та підприємств, які потребують надчистої води. Це не просто сучасна технологія — це галузевий стандарт.

Таким чином, вибір системи RO+EDI є технічно обґрунтованим, науково підтвердженим і відповідає найжорсткішим вимогам для котлів високого тиску. Вона забезпечує найвищу стабільність показників, мінімальні експлуатаційні витрати, відсутність реагентів, екологічну безпеку та максимальну автоматизацію, що робить цю технологію єдиною правильною для реконструкції застарілої системи підготовки води.

Реконструйована система водопідготовки для котлів високого тиску базується на повністю мембранному принципі очищення, який забезпечує найвищий можливий ступінь знесолення, стабільність параметрів та повну відсутність циклічності, характерної для традиційних іонітних систем. Нова технологічна схема є поєднанням кількох послідовних фізико-хімічних процесів, кожен із яких виконує строго визначену функцію: попереднє механічне очищення, видалення заліза, зниження каламутності, зменшення окиснюваності, стабілізація рН, вилучення органіки, глибоке знесолення зворотним осмосом та доведення провідності до ультрачистих значень у модулі електрод іонізації [17].

Основою технологічної лінії є двоступенева схема зворотного осмосу. Перша ступінь RO виконує найбільш енергоємну частину роботи — вилучає до 97–99 % розчинених солей, органічних речовин, колоїдів і кремнію. Вода після першої ступені має провідність на рівні 10–20 мкСм/см і підходить для подавання або на другу ступінь осмосу, або безпосередньо на EDI, залежно від складу вихідної води. На котельнях високого тиску доцільно застосовувати двоступеневий RO, оскільки він забезпечує стабільно низьке навантаження на EDI-модулі, продовжує їхній ресурс і гарантує, що

концентрація кремнію перед EDI не перевищуватиме 100–200 мкг/кг, що є оптимальним параметром для стабільної роботи електродіонізації.

Перша ступінь зворотного осмосу починається з попереднього механічного очищення, яке виконується за допомогою картриджних фільтрів номінальною пористістю 5 мкм. Цей елемент є критично важливим, оскільки мембрани надзвичайно чутливі до механічних домішок, піску, іржі та флоків, які можуть пошкодити структуру поліамідної мембрани. Картриджні фільтри розміщуються у герметизованих корпусах, здатних витримувати високий тиск, а їхній ресурс контролюється за різницею тисків до і після фільтра. Заміна фільтрів проводиться автоматично або за командою оператора залежно від конструкції системи.

Після картриджних фільтрів вода направляється у високонапірний насос першої ступені, який створює необхідний тиск для проходження води через мембрани. Робочий тиск у системі RO може становити 10–16 бар залежно від солемісту вихідної води. Насос виконує одну з ключових ролей у системі, тому для нього необхідно забезпечити плавний пуск, захист від сухого ходу, контроль вібрацій та температури підшипників. Конструктивно насос зазвичай є багатоступеневим, виготовленим із корозійностійкої сталі.

Мембранні модулі першої ступені зворотного осмосу являють собою поліамідні спіральозвиті елементи, розміщені в корпусах із нержавіючої сталі або високотискового склопластику. Усередині кожного модуля розташована мембрана, яка пропускає молекули води та затримує розчинені речовини. Концентрат (вода з підвищеною концентрацією солей) скидається у дренаж або повертається у систему повторного використання залежно від технологічної схеми, тоді як пермеат спрямовується або у буферну ємність другої ступені, або безпосередньо у лінію EDI.

Друга ступінь зворотного осмосу повторює принцип роботи першої, але працює з пермеатом, який уже має низьку мінералізацію. Тиск на цій стадії нижчий — приблизно 8–12 бар. Головною функцією другої ступені є зниження мінералізації до рівня 2–6 мкСм/см, що створює оптимальні умови

для роботи електродіонізаційного модуля. Двоступенева схема також дозволяє суттєво зменшити вміст кремнію, який є найбільш небезпечним компонентом при високих температурах.

Після двох ступенів зворотного осмосу вода накопичується у буферній ємності, яка служить гідравлічним демпфером між RO та EDI. У цій ємності підтримується постійний рівень, контролюється провідність та рН, а також здійснюється захист EDI-модуля від різких коливань витрати або від перебоїв подачі пермеату. Ємність виготовлюється із нержавіючої сталі або інертного полімеру, що не взаємодіє з ультрачистою водою [22].

Електродіонізаційний модуль є ключовим елементом для отримання води з провідністю 0,06–0,2 мкСм/см. У середині EDI-модуля розташовані комірки, поділені мембранами на канали концентрату та пермеату. Поле постійного струму, яке прикладається між електродами, спричиняє рух іонів крізь мембрани. Іони, що залишилися після двоступеневого осмосу, переходять у концентрат, тоді як очищена вода проходить через модуль і надходить на вихід системи. Іонообмінні смоли, розміщені всередині EDI, виконують функцію мікрокаталізаторів процесу іонного транспорту. Завдяки постійному електричному полю смола регенерується сама, без використання хімічних реагентів. Це забезпечує повністю безперервний цикл роботи та виключає будь-яку циклічність очищення.

Для коректної роботи електродіонізації необхідно забезпечити точний контроль усіх параметрів: температури, витрати, рН та провідності. Температура пермеату, що надходить у EDI, повинна бути в межах 10–35 °С, оскільки при низьких температурах знижується провідність води, а при надмірно високих можуть деградувати мембрани та смоли. Витрата також є критичним параметром: надто низький потік сприяє локальній концентрації солей, а надто високий — викликає гідравлічні перевантаження.

Вода після EDI направляється у ємність ультрачистої води, з якої живильні насоси подають її у деаератор котельні. У цій ємності здійснюється постійний контроль мікропровідності, температури та рівня. Ємність

зазвичай розміщується у технологічному приміщенні з підтриманням чистоти та мінімального впливу зовнішнього середовища, оскільки ультрачиста вода є хімічно агресивною і здатна вилугувати іони з металів. Тому всі трубопроводи після EDI виконуються з нержавіючої сталі AISI 316L або високоякісних полімерів.

До складу лінії також входить система хімічної корекції: дозування антискаланта перед RO, дозування NaOH або HCl для корекції pH, дозування метабісульфіту для видалення залишкового хлору, якщо у вихідній воді застосовується хлорування. Антискаланта захищає мембрани зворотного осмосу від карбонатного, сульфатного та кремнієвого накипу, подовжуючи їхній ресурс. Дозувальні насоси обладнані імпульсними контролерами, що забезпечують точну, стабільну та адаптивну подачу реагентів.

Система також включає блок промивки мембран: періодичну хімічну очистку RO-модулів (CIP), промивання EDI, дренажні лінії, баки реагентів, лінії скидання концентрату. Усі ці елементи формують єдиний гідравлічно та електронно керований комплекс, який працює без втручання оператора, окрім періодичних планових робіт.

Автоматизація є обов'язковим компонентом реконструйованої системи. Усі ключові параметри — тиск, витрата, температура, провідність, рівні, стан насосів, робочі точки мембран та EDI — інтегруються у ПЛК середнього класу (Siemens, Schneider, Omron), який здійснює логіку керування, аварійні відключення, плавний запуск насосів, ведення архіву та взаємодію з SCADA. Система автоматизації забезпечує повний захист мембранних елементів від перепадів тиску, нестачі води, сухого ходу насосів, критичного зростання провідності або температури.

Таким чином, реконструйована система водопідготовки являє собою високотехнологічний комплекс, що працює у повністю безперервному режимі, не використовує кислот чи лугів для регенерації, забезпечує стабільно низьку провідність, високу якість води та відповідає найжорсткішим вимогам котлів високого тиску.

## 1.4 Висновки до розділу 1

Фізико-хімічні процеси, що лежать в основі знесолення води для живлення парових котлів, визначають надійність, довговічність і економічність роботи всієї теплотехнічної системи. Аналіз вихідної якості води, складу домішок, ступеня мінералізації, наявності жорсткості, кремнієвої кислоти та колоїдних частинок показує, що традиційні схеми хімоводоочищення, побудовані на іонітообміні та періодичній регенерації кислотами й лугами, вичерпали свій технічний ресурс. Старі установки не забезпечують стабільної якості демінералізованої води на рівні вимог сучасних парових котлів, особливо при підвищених тисках, де будь-яке відхилення у вмісті солей безпосередньо призводить до утворення накипу, локального перегріву металу, зниження теплопередачі та прискореної корозії поверхонь нагріву.

Фактичний технічний стан багатьох працюючих іонітних блоків, зношування фільтруючих завантажень, деградація смол, нестабільність регенераційних циклограм, а також висока залежність якості води від людського фактору створюють додаткові ризики для роботи котлоагрегатів. За багаторічний експлуатаційний період старі системи втратили передбачуваність, демонструють підвищену витрату реагентів, а отримана вода часто вимагає коригування, що підвищує собівартість кожної тонни виробленої пари. Умови сучасної енергетики вимагають стабільності, автоматизованого контролю та значного зниження експлуатаційних витрат, чого неможливо досягти при використанні застарілого обладнання.

На противагу цьому, комбінація зворотного осмосу та електродіалізу з іонною дифузією (RO+EDI) є технологічно обґрунтованим і природним етапом розвитку систем знесолення. Мембранні процеси відрізняються високою селективністю, низькою чутливістю до коливань якості вихідної води та повною відмовою від хімічних реагентів для регенерації. Робота під високим тиском, на якій базується зворотний осмос, дозволяє видаляти до 98–99,5 % розчинених солей, колоїдів, бактерій і органічних домішок,

забезпечуючи стабільність і повторюваність параметрів. Наступна стадія EDI дає можливість остаточного доведення води до параметрів, необхідних для уточненої живильної води котлів високого тиску — з питомою електропровідністю на рівні 0,06–0,2 мкСм/см і мінімальним вмістом кремнієвої кислоти.

Важливою перевагою RO+EDI є майже повна автоматизація процесів, можливість постійного моніторингу параметрів, інтеграція з системами технологічного захисту та відсутність регенераційних розчинів, що знижує ризик хімічних аварій та витрат на утилізацію відходів. Мінімізуються людські помилки, підвищується надійність водопідготовки, зменшується споживання електроенергії та води, а експлуатаційні витрати у довгостроковій перспективі істотно знижуються.

Порівняльний аналіз показує, що стара іонітна схема не відповідає сучасним вимогам до котлів високого тиску, тоді як RO+EDI забезпечує якість, стабільність і безпечність, недосяжні для традиційних методів. Перехід до мембранної технології є не лише технічним рішенням, а й стратегічною необхідністю для підвищення ефективності енергетичного обладнання, продовження ресурсу котлів та мінімізації експлуатаційних ризиків. Реконструкція системи знесолення є обґрунтованим кроком модернізації, що забезпечить стабільні параметри пари, підвищить енергоефективність та відповідатиме сучасним нормам промислової безпеки.

## РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Опис автоматики системи знесолення.

Автоматизація реконструйованої системи знесолення води для котлів високого тиску є ключовим елементом її функціонування, оскільки саме система керування визначає стабільність параметрів, безпеку роботи, захист мембранного обладнання та узгодження роботи всіх технологічних вузлів із режимами котельні. Мембранні технології, на відміну від іонітних фільтрів, вимагають суворого, постійного та високоточного контролю тиску, витрати, температури, провідності, рівнів, а також безперервного моніторингу стану насосів, клапанів і модулів електродіонізації. Втрата хоча б одного критичного параметра може призвести до швидкої деградації мембран, порушення потоку, термічних перевантажень або необоротного пошкодження мембранних елементів. Саме тому система керування у новій установці є не допоміжним, а центральним елементом усієї структури [29].

Оснoву автоматизації становить програмований логічний контролер (ПЛК) середнього або високого класу, що має достатню кількість входів, виходів та обчислювальних ресурсів для реалізації складної логіки керування багатоступеневими насосами, електромагнітними клапанами, регулюючими заслінками та численними датчиками. Контролер повинен підтримувати можливість роботи у реальному часі, без затримок, із циклом опитування не більше декількох мілісекунд, оскільки швидкі зміни тиску чи витрати у мембранній системі можуть призвести до аварійних перенавантажень. Традиційно для таких систем використовують контролери Siemens серії S7-1200, показаний на Рисунку 2.1, або S7-1500, які забезпечують резервування, гнучку логіку, високу стійкість до перешкод та можливість підключення SCADA.



Рис2.1 Контролер Siemens серії S7-1200

Система автоматизації починається з контролю роботи насосів першої та другої ступеней зворотного осмосу. Насоси оснащуються датчиками тиску на вході та виході, датчиками вібрації, термодатчиками корпусу та датчиками сухого ходу. ПЛК постійно контролює всі ці параметри й автоматично блокує запуск РО-модуля у разі відсутності води перед насосом, критично низького рівня у входній ємності або небезпечної температури підшипників. Для регулювання швидкості та запобігання гідравлічним ударам використовуються частотні перетворювачі, які дозволяють виконувати плавний старт і плавну зупинку насосів.

На кожному етапі технологічного процесу встановлено датчики тиску, що дають можливість контролювати робочу точку мембран, а також датчики перепаду тиску на картриджних фільтрах, що дозволяє автоматично визначати момент необхідності їхньої заміни. Система в режимі реального часу відстежує зростання перепаду тиску, порівнює його з номінальними значеннями та видає попередження або аварію при перевищенні порогових

значень. Це дозволяє уникнути ситуацій, коли забитий картриджний фільтр спричиняє перевантаження насосів і руйнування мембран.

Критично важливим елементом автоматизації є контроль провідності пермеату після кожного ступеня зворотного осмосу. На виході першої ступені встановлено датчик мікропровідності, що фіксує якість пермеату та дозволяє контролювати ступінь очищення. Якщо провідність пермеату виходить за допустимі межі, система не допускає подавання цієї води на EDI або другу ступінь. Це дозволяє запобігти перенавантаженню EDI-модуля солями, які він не здатен утилізувати в реальному часі. Аналогічний датчик розміщується після другої ступені RO, де провідність є основним параметром, що визначає навантаження на електродіонізаційний модуль. Особливе місце займають датчики провідності на вході та виході EDI. Провідність на вході визначає стан пермеату та здатність блоку EDI працювати у номінальних умовах. Провідність на виході є головним критерієм якості ультрачистої води для котла, і будь-яке відхилення вище 0,2 мкСм/см призводить до негайного блокування подавання води у живильну лінію котельні. У таких випадках вода автоматично скидається у дренаж, а система переходить у режим промивки. Таким чином виключається навіть мінімальна можливість подавання нестабільної або недостатньо очищеної води у високотисковий теплогенератор [35].

Для стабілізації роботи EDI-модуля використовується система контролю струму і напруги на електродах. ПЛК здійснює постійний моніторинг електричних параметрів і визначає моменти, коли змінюється іонний баланс або зростає концентрація солей у воді. Якщо струм виходить за межі номінального діапазону, система автоматично знижує навантаження, відкриваючи обвідний клапан або зменшуючи витрату води через EDI. Таким чином забезпечується захист мембранних каналів від перенавантаження.

Температурні датчики встановлюються у декількох критичних точках — перед модулем RO, після модулів RO та на вході в EDI. Температура пермеату впливає на ефективність мембран і визначає допустиму робочу

точку. У випадку критичного підвищення температури система блокує роботу, оскільки перегрів може призвести до деградації поліамідної мембрани або руйнування смол у модулі електродіонізації.

Важливою частиною автоматизації є система контролю рівнів у буферних і технологічних ємностях. Ємність пермеату після RO обладнана мінімальним та максимальним рівнем. Досягнення максимального рівня призводить до автоматичного вимкнення насосів RO, а зниження рівня нижче мінімального — блокує запуск системи EDI. Це запобігає роботі модулів «на суху» та зберігає цілісність мембран.

У складі системи передбачені електромагнітні клапани на основних лініях подачі пермеату, концентрату, дренажу, а також байпасні лінії, які застосовуються для аварійного обводу або промивання. Логіка керування клапанами жорстко прив'язана до показників датчиків. Будь-яке відхилення провідності, тиску або температури призводить до автоматичного перемикання контурів без участі оператора.

Алгоритми роботи системи забезпечують максимально плавний та передбачуваний запуск установки. Спочатку здійснюється промивання мембран чистою водою без тиску, потім підключається перший ступінь RO з повільним нарощуванням тиску. Після стабілізації параметрів запускається друга ступінь. EDI запускається лише після того, як провідність пермеату досягла номінальних значень і протягом певного часу залишається стабільною. Це виключає навіть короткочасне перенавантаження іонообмінних каналів.

Усі дані з датчиків архівуються і відображаються у SCADA. Історичні графіки провідності, тисків, струмів та температур дозволяють аналізувати поведінку системи, прогнозувати знос мембран і своєчасно планувати технічне обслуговування. Основний інтерфейс SCADA показує стан кожного елемента: насоси, клапани, датчики, аварійні сигнали, подачу живлення, стан частотних перетворювачів та режим роботи EDI.

Таким чином, автоматизація реконструйованої системи RO+EDI забезпечує повну технологічну незалежність від людського фактору, високу точність керування, адаптацію до змін навантаження, абсолютний захист мембран, прогнозованість якості води та інтеграцію у загальну систему безпеки котельні. Це перетворює установку на стійкий, самодіагностичний комплекс, здатний працювати у найскладніших умовах і забезпечувати котел високого тиску водою бездоганної якості.

Експлуатація реконструйованої мембранної системи знесолення, розробленої на базі двоступеневого зворотного осмосу та електродіонізації, має власну специфіку, яка суттєво відрізняється від традиційних іонітних схем. Вона не передбачає регенерацій, перерв у роботі на хімічні цикли, промивань кислотами або лугами, а отже є значно більш стабільною і прогнозованою у часі. Водночас така система потребує високої дисципліни щодо контролю параметрів, стану мембран, справності датчиків, чистоти хімічних ліній і дотримання встановлених режимів запуску, зупинки, промивання та стоянки. Усі ці фактори безпосередньо визначають ресурс мембран, стабільність EDI-модуля та якість живильної води, що подається у котел високого тиску.

Експлуатація системи починається з контрольованого запуску, при якому повинні бути створені умови для мінімального механічного та термічного навантаження на мембрани. Перед запуском оператор перевіряє рівні у всіх технологічних ємностях, відсутність повітря у лініях, чистоту картриджних фільтрів та наявність стабільного тиску на вході. Далі система автоматично запускає циркуляцію води через мембрани без тиску, що дозволяє видалити повітря та забезпечити рівномірне зволоження мембранних поверхонь. Лише після цього частотний перетворювач починає плавно піднімати тиск на першій ступені RO, що дозволяє уникнути різких перепадів, які можуть розірвати або деформувати поліамідні шари.

Під час роботи система зворотного осмосу повинна забезпечувати стабільний тиск, який відповідає технологічній точці. Надто низький тиск

знижує вилучення солей, що підвищує навантаження на EDI і може викликати зростання провідності. Надто високий тиск призводить до механічного навантаження на мембрани і прискорює їхню деградацію. Тому ПЛК постійно регулює робочу точку, коригуючи частоту обертання насоса, щоб підтримувати оптимальний баланс між витратою і відсотком відбору пермеату. Відсоток відбору, або recovery, є одним із найважливіших параметрів експлуатації. Якщо він надто високий, концентрація солей у концентраті зростає, що викликає ризик утворення накипу на мембрані. Якщо занадто низький — збільшується кількість відходів і зростають енерговитрати. Зазвичай оптимальний recovery для першої ступені становить 60–75%, а для другої — 70–85%, залежно від складу вихідної води [40].

У процесі експлуатації важливим параметром є перепад тиску на мембранних модулях. Зростання перепаду тиску свідчить про забруднення мембрани колоїдами, залізом, органікою або біологічними відкладеннями. Хоча перед RO встановлені фільтри тонкої очистки, вони не здатні на 100% усунути дрібнодисперсні частинки або бактерії, які можуть осідати на мембрані. Система контролю фіксує перепад тиску, а SCADA попереджає оператора про необхідність виконання хімічної очистки мембран (CIP). Хоча мембрани RO не потребують частих промивань, у реальних умовах CIP проводиться кожні 6–12 місяців або частіше, якщо вихідна вода має високі концентрації заліза чи органіки.

Хімічна очистка мембран здійснюється у спеціальному режимі, коли RO-модулі переключаються у контур циркуляції з використанням розчину кислот, лугів або м'яких детергентів. Очистку проводять при низькому тиску, щоб уникнути пошкоджень мембранного шару. Основним завданням CIP є видалення неорганічних відкладень, біоплівки та органіки, які знижують продуктивність і збільшують перепад тиску.

Особливі вимоги висуваються до експлуатації EDI-модулів. Електродіонізація є найбільш чутливою частиною системи, оскільки її стабільність значною мірою залежить від якості пермеату, струмових

характеристик та температури. Модуль EDI працює у повністю безперервному режимі і не допускає жодних коливань у подачі води. Поява повітря у каналах EDI може призвести до локальних зон сухого ходу, що сприятиме перегріву мембран і термічному руйнуванню полімерів. Тому система автоматично контролює всі рівні перед EDI і блокує подачу води, якщо рівень у буферній ємності надто низький.

Під час експлуатації важливо підтримувати оптимальну температуру пермеату, що надходить у EDI. Температура нижче 10 °C знижує провідність і погіршує електролітичні властивості, а температура вище 35 °C може прискорити деградацію іонообмінних шарів. ПЛК контролює температуру за допомогою датчиків і за необхідності переводить систему у режим часткового обводу, якщо температура виходить за межі допустимого діапазону.

Струмове навантаження на EDI-модуль також є критичним параметром. Підвищення струму вище номінального значення свідчить про збільшення концентрації солей у пермеаті, накопичення іонів у каналах або зниження ефективності іонообмінної смоли. У таких ситуаціях система або знижує продуктивність, або переводить установку у режим промивки. Знижений струм, навпаки, може означати надто низьку провідність вхідної води або недостатній потік через модуль. Усі ці відхилення контролюються автоматично і архівуються у SCADA [46].

Одним із ключових елементів експлуатації є контроль якості пермеату. Провідність на виході EDI є індикатором стану всієї системи та визначає придатність води для живлення котла. Підвищення провідності навіть на десяти долі мікросіменса може свідчити про накип, забруднення мембран, деградацію смоли або гідравлічні порушення. У таких випадках вода автоматично переключасться у дренаж, а система переходить у режим діагностики.

Буферні ємності та трубопроводи, що контактують із ультрачистою водою, вимагають особливої уваги, оскільки ультрачиста вода є агресивним

розчинником і здатна розчиняти метали та іони з поверхонь. Тому експлуатація передбачає регулярну перевірку стану трубопроводів з нержавіючої сталі AISI 316L, контроль відсутності корозійних явищ, стерильність ліній та герметичність усіх з'єднань.

Режим зупинки системи RO+EDI також має чітко регламентований алгоритм. У разі планової зупинки установка переходить у режим промивки мембран пермеатом для видалення концентрату та солей. Мембрани не можуть залишатися із солоним розчином у стані спокою, оскільки це викликає їхню деградацію, осадження солей та розвиток біоплівки. Для тривалих простоїв мембрани консервуються спеціальним розчином (консервантом), який подається у модулі та підтримує їхній стан протягом декількох тижнів.

Експлуатація EDI під час зупинки потребує відключення напруги на електродах та промивки модулів пермеатом. Залишення струму на електродах без подачі води призведе до перегріву і руйнування мембран. Технічне обслуговування системи включає періодичну перевірку всіх датчиків тиску, потоку та провідності, очищення фільтрів, контроль насосів, перевірку кабельних з'єднань, калібрування аналізаторів та огляд стану модулів RO і EDI. Більшість сучасних систем підтримують функцію самодіагностики, яка допомагає оператору визначати деградацію мембран, наближення кінця ресурсу або необхідність хімічної очистки.

Таким чином, експлуатація мембранної системи RO+EDI є високотехнологічним процесом, що потребує ретельного контролю параметрів, чітких режимів роботи та своєчасного технічного обслуговування. За правильної експлуатації така система забезпечує десятки тисяч годин стабільної роботи, високу якість води та мінімальні експлуатаційні витрати.

## 2.2 Гідравлічні характеристики системи.

Сучасні парогосподарства переходять на більш високі параметри тиску та температури пари, а це автоматично піднімає вимоги до якості живильної води на порядок суворіше, ніж це було для котлів середнього тиску. В умовах підвищених теплових навантажень, збільшеної щільності теплового потоку та мінімізованих резервів по водно-хімічному режиму навіть невеликі концентрації кремнієвої кислоти, натрію або загальної мінералізації призводять до прискореного накипоутворення на поверхнях нагріву, локальної перегрівності металу, деградації жароміцних сталей і прискореного ресурсного виснаження трубних систем.

Реконструкція знесолення стає не опцією, а необхідністю з огляду на економіку палива, надійність та відповідність екологічним нормам, оскільки підвищення ККД котлоагрегата на частки відсотка при мільйонних річних витратах палива дає вимірюваний фінансовий ефект, а стабільна робота турбомашин без відкладень захищає найдорожчі вузли енергетичної установки. Перехід від іонообміну на Na-катіоніті до мембранних технологій зі стадією зворотного осмосу та електродіонізації дозволяє вивести солевміст у пермеаті до меж одиниць–десятків мкСм/см до EDI і до 0,055–0,2 мкСм/см після EDI, що відповідає найжорсткішим нормам до живильної води високого тиску і мінімізує хімічні підживки, спрощує режим продувок і знижує солове навантаження на контур. На фоні подорожчання реагентів і складнощів з логістикою регенерацій, мембранно-електрохімічна схема усуває потребу у значних запасах кислот і лугів, скорочує обсяг стоків регенерації і робить цикл більш “зеленою” технологією [50].

Додатковим чинником актуальності є мінливість якості вихідної води в міських і поверхневих джерелах, сезонні коливання мутності, органіки та кремнію. Традиційні фільтри з малорухливими шарами недостатньо стабілізують SDI та органіку на вході в мембрани, що веде до прискореного фолінгу та падіння продуктивності. Інтеграція сучасного попереднього очищення, коректно розрахованих гідравлічних режимів і замкнених

алгоритмів автоматики дозволяє підтримувати SDI менше 3–4 одиниць, стабілізувати рН і вуглекислотну рівновагу, утримувати індекс накипоутворення в зоні керованої антискалантної дози. Паралельно зростають вимоги безпеки: високі тиски живильних насосів і RO-помп, хімічні реагенти, електроліти EDI та електропостачання великої потужності диктують впровадження міжблокувань, функціональної безпеки, подвійного контролю провідності і кремнію, а також детальної діагностики мембранних полів. З урахуванням життєвого циклу установки тотальні витрати на 1 м<sup>3</sup> демінералізованої води за RO+EDI, як правило, стають нижчими за класичні змішано-іонообмінні схеми, оскільки відпадають трудомісткі регенерації, збільшується міжремонтний інтервал і різко знижується навантаження на каналізацію реагентних стоків. Саме ці фактори формують актуальність реконструкції: підвищена надійність паропостачання, прогнозованість водно-хімічного режиму, скорочення OPEX і декарбонізаційний ефект через зменшення витрат палива при чистих поверхнях теплообміну.

Технологічний опис та склад ліній зворотного осмосу і EDI. Проектована схема будується як безреагентна по основному тракту з контрольованим мінімумом реагентів на стадії попереднього кондиціювання. Сировинна вода після водопровідного вводу або власного водозабору спрямовується у блок вирівнювання якості та попереднього видалення механічних домішок.

Перший рубіж становлять напірні мультимедійні фільтри для грубого видалення зважених речовин і зниження SDI; при нестабільній вихідній воді і вимозі підвищеної надійності доцільно встановлювати вугільний фільтр для зниження вмісту органіки та вільного хлору з метою захисту поліамідних мембран. На виході з блоку фільтрації здійснюється безперервне дозування антискаланту відповідно до іонного складу та розрахункової ступені вилучення солей у мембранному модулі. Для остаточного бар'єру перед мембранами встановлюються картриджні фільтри тонкого очищення з номінальною пористістю 5–1 мкм, якими формується гідравлічно спокійний

та стабільний потік на вході у високонапірну групу. Високонапірний насос зі змінною швидкістю обертань створює тиск на мембранному полі в діапазоні, необхідному для подолання осмотичного тиску вихідної води та отримання заданого відсотка пермеату; за потреби передбачено байпас для плавного виходу на режим і скидання надлишкового тиску при аварійному закритті регулюючої арматури. Мембранне поле зворотного осмосу приймається із стандартних спірально-згорнутих елементів 8×40 дюймів у тискових кожухах з компоновкою 2:1 або 3:1 по кожному потоку залежно від необхідної продуктивності, якості пермеату і допустимих втрат напору.

Концентрат перекачується на дросель з підтриманням зворотного тиску для формування відбору пермеату і забезпечення турбулентної обтікання поверхні мембран з метою мінімізації поляризації концентрації. Частина концентрату може бути рециркульована на вхід мембранного поля для оптимізації гідравліки і зменшення габаритів насоса, але при цьому суворо контролюється граничний осмотичний тиск та індекс накипоутворення в хвостовій частині кожуха. Пермеат RO спрямовується у проміжну ємність-баланс з інертним покриттям, з якої подається низьконапірним живильним насосом на блок електродіонізації. У EDI-модулі застосовуються чергування концентруючих і розділювальних камер з іонообмінними мембранами та заповненням іонообмінним матеріалом для підтримки безперервного вилучення залишкових іонів під дією електричного поля без циклів регенерації кислотами та лугами. Концентрат EDI як правило зводиться в дренаж з мінімальною витратою або повертається в “сифоновий” контур підмішування до концентрату RO для зменшення свіжого водозабору. На виході з EDI встановлюється датчик питомої електропровідності або питомого опору, додатково може стояти аналізатор кремнію і, за вимогами турбін, натрію; вихід EDI відводиться у бак чистої води, з якого живильні насоси котла забирають воду через дегазаційний блок або термічний деаератор для доведення розчинених газів до нормованих величин [43].

Усі напірні лінії високого тиску виконуються з нержавіючої сталі з контролем шорсткості та коректним вибором арматури під робочі тиски, а допоміжні низьконапірні тракти пермеату і EDI — з електрополірованої нержавіючої сталі або PVDF/PP-RCT для мінімізації вторинного засолювання. Опис системи автоматики, вимірювання і між блокувань.

Система керування будується на ПЛК з модульним введенням–виведенням і резервованим живленням від ДБЖ, оскільки відмова під час високонапірної фази може призвести до гідравлічного удару. Керування високонапірним насосом здійснюється перетворювачем частоти за сигналом регулятора тиску, що порівнює вимірний тиск на колекторі мембран з уставкою, синхронізованою з поточним осмотичним тиском та запитаною продуктивністю. Передбачено каскадні PID-конттури: перший забезпечує стабілізацію тиску, другий — підтримання витрати пермеату, третій — контроль відсічного тиску на дроселі концентрату для заданого добутку відбору і турбулентності у кожухах.

На вході RO та EDI встановлюються витратоміри, манометри і диференціальні перетворювачі тиску для оцінки втрат напору на картриджах і мембранах, що дозволяє онлайн обчислювати ступінь фолінгу і запускати процедуру промивки чи SIP при досягненні граничних величин. Проводиться безперервний контроль провідності пермеату та опору на виході EDI з автоматичним відводом некондиційної води у скид або на рецикл до досягнення параметрів. Впроваджуються хімічні аналізатори для силікатів на виході RO і на виході EDI, а також натрію на лінії живлення котла, щоб чутливо виявляти пробої мембран чи паразитні витоки іонів.

Алгоритми безпеки включають заборону пуску високонапірного насоса при незаповнених фільтрах і відсутності підтвердження мінімальної витрати через кожухи, миттєве розвантаження по аварії перевищення тиску, заклинювання регулюючого клапана або відмові живлення приводу, контроль порожнього ходу та кавітації за пульсаціями тиску і спектральними ознаками на датчику вібрації. Антискалант дозується пропорційно сумарній

подачі на RO з корекцією по прогнозованому LSI та pH; у рецепті передбачено автоматичний перехід на запасний хімдозатор із збереженням сумарної подачі під час обслуговування основного. Для EDI реалізовано плавний пуск напруги з наростанням струму за вимірною провідністю подачі, що зводить до мінімуму нагрів і деградацію іонообмінного наповнювача. Усі аварійні сигнали дублюються світлозвуковою індикацією та протоколюються з часовими мітками, а система SCADA відображає тренди провідності, тисків, витрат, температури та розрахованих показників фолінгу для рішення про CIP.

Експлуатація, пуски, промивки, CIP і режим деградації Експлуатаційна стратегія спрямована на стабільність параметрів і тривалий термін служби мембран. Перед пуском перевіряється готовність низьконапірного контуру, заповнення фільтрів і картриджів, наявність антискалantu в баку і готовність відбору пермеату у промивний дренаж.

Вихід на робочий тиск здійснюється плавно, зі зниженим відсічним тиском на концентраті, поки пермеат не стане прозорим по провідності; перші хвилини пермеату відводяться у скид. У штатному режимі підтримується постійний відсоток відбору, але у разі зростання SDI сирієї води система автоматично зменшує ступінь вилучення та підвищує промивну швидкість концентрату, аби знизити поляризацію. Картриджі замінюються за диференціальним тиском або наростанням SDI після них. CIP запускається при перевищенні контролюваного падіння продуктивності або зростанні перепаду тиску на певний відсоток від номіналу, а також при зміщенні нормалізованого солевідкидання.

Програма CIP передбачає мийку лужним і кислотним розчинами з проміжними ополіскуваннями та контролем температури, щоб уникнути термодеструкції поліаміду; у протоколі фіксується повернення показників до довідкових значень. Для EDI передбачене періодичне гідравлічне промивання та контрольні цикли зниження струму для релаксації іонообмінної матриці, а також автоматичний обхід EDI у разі невиконання по

провідності з переходом системи у режим деградації, коли котел живиться тільки пермеатом RO з тимчасовим зниженням тиску пару або підвищенням продувки, поки не буде відновлено працездатність EDI. Консервація мембран при зупинках понад 48 годин виконується з використанням біоцидних консервантів, а трубопроводи пермеату і EDI промиваються демінералізованою водою для недопущення вторинної контамінації [32].

Проектний гідравлічний розрахунок виконується з метою забезпечення заданої продуктивності, обмеження швидкостей у трубопроводах, нормування втрат напору і підбору насоса з необхідним напором з урахуванням осмотичного тиску. Базовою формулою для розрахунку втрат напору в прямих ділянках приймаємо рівняння Дарсі–Вейсбаха, де лінійні втрати напору

$$h_1 = \lambda \cdot (L/D) \cdot (v^2/(2g)), \quad (2.1)$$

де  $\lambda$  — коефіцієнт тертя за Муді,

$L$  — довжина ділянки,

$D$  — внутрішній діаметр,

$v$  — середня швидкість потоку,

$g$  — прискорення вільного падіння.

Місцеві втрати сумуються за формулою

$$h_\zeta = \sum \zeta_i \cdot (v^2/(2g)), \quad (2.2)$$

де  $\zeta_i$  — коефіцієнти місцевих опорів для відводів, трійників, засувок, фільтрів і мембранних корпусів.

Осмотичний тиск  $\pi$  оцінюється за Вант-Гоффом як  $\pi \approx i \cdot C \cdot R \cdot T$  для розбавлених розчинів, але для інженерної точності на практиці береться табличне чи програмне значення за сумарним еквівалентним солевмістом і температурою. Робочий напір насоса визначається як

$$H_{\text{нас}} = (p_{\text{RO}}/\rho g) + h_1 + h_\zeta + \Delta p_{\text{карт}} + \Delta p_{\text{кожух}} + \Delta p_{\text{безпека}}, \quad (2.3)$$

де  $p_{\text{RO}}$  — необхідний тиск на вході у мембрани,

$\rho$  — густина,

$\Delta p_{\text{карт}}$  — втрати на картриджних фільтрах,

$\Delta p_{\text{кожух}}$  — внутрішні втрати у мембранних кожухах,

$\Delta p_{\text{безпека}}$  — запас на старіння та забруднення.

Вибір діаметрів виконується з умов допустимих швидкостей: для високого тиску на подачі до РО зазвичай ціль 1,5–2,0 м/с для сталі, щоб обмежити втрати і шум; для концентрату допускається 2–3 м/с для підтримання турбулентності; для пермеату і EDI — 0,8–1,2 м/с, щоб зменшити ризик дегазування і вторинного засолювання. Перевіряється режим течії за числом Рейнольдса

$$Re = vD/\nu \quad (2.4)$$

із вибором  $\lambda$  по діаграмі Муді або формулі Колбрука–Вайта для турбулентної зони

$$1/\sqrt{\lambda} = -2\log_{10}(\epsilon/3,7D + 2,51/(Re\sqrt{\lambda})), \quad (2.5)$$

де  $\epsilon$  — абсолютна шорсткість матеріалу.

Прийmemo вихідні дані продуктивності пермеату 7,5 м<sup>3</sup>/год при загальному відборі 75 %, отже витрата на вході в РО близько 10 м<sup>3</sup>/год, витрата концентрату 2,5 м<sup>3</sup>/год. Осмотичний тиск для вихідної води умовно 6 бар при температурі 20 °С; необхідний робочий тиск на мембранах для досягнення 75 % відбору беремо 15 бар. Вибираємо напірний трубопровід з нержавіючої сталі внутрішнім діаметром 65 мм для подачі 10 м<sup>3</sup>/год. Розраховуємо швидкість, де  $v = Q/(\pi D^2/4)$ .

Об'ємна витрата  $Q$  дорівнює 10/3600 м<sup>3</sup>/с, тобто 0,00278 м<sup>3</sup>/с. Площа перерізу при  $D = 0,065$  м становить  $\pi \cdot 0,065^2/4 \approx 0,003318$  м<sup>2</sup>. Швидкість відповідно  $v \approx 0,00278/0,003318 \approx 0,84$  м/с, що укладається у цільовий діапазон для високонапірної сталі.

Прийmemo сумарну довжину напірної ділянки до мембран  $L = 25$  м з урахуванням еквівалентів місцевих опорів, шорсткість електрополірованої сталі  $\epsilon = 0,015$  мм, кінематична в'язкість води  $\nu \approx 1,0 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Число Рейнольдса  $Re = vD/\nu \approx 0,84 \cdot 0,065/1e-6 \approx 54\,600$ , турбулентний режим гарантований. Оцінимо коефіцієнт тертя  $\lambda$  за Колбруком; для такої комбінації

$Re$  і  $\varepsilon/D \approx 0,000015/0,065 \approx 2,3 \cdot 10^{-4}$   $\lambda$  буде близько 0,020–0,022; візьмемо  $\lambda = 0,021$ .

Лінійні втрати на цій ділянці становлять  $h_1 = 0,021 \cdot (25/0,065) \cdot (0,84^2/(2 \cdot 9,81)) \approx 0,021 \cdot 384,6 \cdot (0,7056/19,62) \approx 0,021 \cdot 384,6 \cdot 0,036 \approx 0,29$  м вод. ст. або близько 0,029 бар. Додамо місцеві втрати: два відводи, трійник, зворотний клапан і запірна арматура дають умовно  $\Sigma \zeta \approx 5-7$ ; з урахуванням  $v^2/(2g) \approx 0,7056/19,62 \approx 0,036$  отримаємо  $h_\zeta \approx 7 \cdot 0,036 \approx 0,25$  м або 0,025 бар.

Втрати на картриджних фільтрах беремо 0,2 бар чисті та до 0,5 бар забруднені; на мембранних кожухах внутрішні втрати 0,5–1,0 бар залежно від компоновки; для розрахунку приймемо  $\Delta p_{\text{карт}} = 0,3$  бар,  $\Delta p_{\text{кожух}} = 0,8$  бар. Тоді розрахунковий напір насоса при чистій системі становить  $H_{\text{нас}} \approx 15$  бар + 0,029 + 0,025 + 0,3 + 0,8  $\approx 16,15$  бар.

Додаємо запас на старіння та фолінг 10–15 % і отримуємо близько 17,8–18,6 бар. Під це підбирається насос із номінальним напором 18–19 бар на подачі 10 м<sup>3</sup>/год із можливістю регулювання частотою.

Для лінії концентрату при 2,5 м<sup>3</sup>/год беремо діаметр 40–50 мм, щоб забезпечити швидкість 1,5–2,5 м/с для інтенсивного зсуву біля мембрани.

Приміром,  $D = 40$  мм дає площу 0,001257 м<sup>2</sup> і швидкість  $v \approx (2,5/3600)/0,001257 \approx 0,000694/0,001257 \approx 0,55$  м/с, що замало;  $D = 32$  мм дає 0,000804 м<sup>2</sup> і швидкість  $\approx 0,86$  м/с; оптимальні значення отримуємо при 25–32 мм залежно від конкретної геометрії кожухів і допустимих втрат.

Вибір остаточно фіксується після перевірки втрат на дросельному клапані, адже він має працювати в середній зоні ходу, а не “на шпильці”. Для пермеату 7,5 м<sup>3</sup>/год доцільно взяти діаметр 50 мм, що дає швидкість близько 1,06 м/с при мінімальних втратах і достатній гігієні потоку [21].

На ділянці EDI падіння тиску зазвичай невелике, порядок 0,3–0,5 бар на модуль при номінальній подачі; лінії виконуються з матеріалів із низькою екстракцією іонів і з мінімумом “мертвих зон”, форсовані швидкості тут не потрібні, важливіше уникати повітряних пасток і забезпечити стік

конденсатів. Для підбору частотного приводу слід перевірити  $NPSH_{\text{вим}}$  і порівняти із  $NPSH_{\text{доступ}}$  на всмоктуванні, враховуючи температуру, геометрію і втрати на сітках і клапанах; кавітаційний запас приймають не менше 1–2 м додатково до  $NPSH_{\text{вим}}$  виробника. Доводка водно-хімічних параметрів і баланс потоків.

Проектні уставки передбачають SDI вихідної води після попереднього фільтрування нижче 3 одиниць, рН у вході в RO у нейтральній зоні 6,8–7,5 при контрольованому вмісті вільного хлору нижче межі чутливості, що гарантує збереження поліаміду. Відбір 75 % забезпечує компроміс між економікою скиду і ризиком накипоутворення в хвості кожуха; при сезонному зростанні кремнію або жорсткості алгоритм зменшує відбір до 65–70 %, тримаючи індекси у безпечній зоні антискалантної карти.

Провідність пермеату RO очікується в межах 5–20 мкСм/см залежно від солевмісту сировини, після EDI — нижче 0,2 мкСм/см, кремній — нижче 20 мкг/л, натрій — одиниці мкг/л для живильних вимог високого тиску. Внутрішній баланс включає рециркуляцію частини концентрату для підтримання швидкостей і варіант часткового повернення промивних вод після фільтрів у сирий бак.

Для енергетики важливо також врахувати тепловий баланс деаератора; чиста вода з EDI може мати нижчу температуру, і це впливає на сумарну теплову економіку при пікових навантаженнях. Підсумкові інженерні зауваги. Реконструкція на RO+EDI забезпечує якісний прорив у стабільності хімічного режиму котельної установки, але вимагає дисципліни у гідравлічному проектуванні, належній автоматизації і регламентній експлуатації. Ключовими факторами довговічності стають SDI-контроль, грамотний вибір швидкостей і діаметрів, надійні міжблокування високого тиску та вчасні CIP. Детально проведений гідравлічний розрахунок, як у наведеному прикладі, дозволяє правильно задати робочу точку насоса і закласти реалістичні втрати напору, а отже уникнути і хронічних “недодавлень”, і руйнівних запасів.

На виході отримуємо демінералізовану воду, яка відповідає вимогам парових котлів високого тиску без реагентних регенерацій, з нижчими експлуатаційними витратами і прогнозованим ресурсом мембранного парку.

### **2.3 Датчики системи знесолення.**

Електропровідність є основним інтегральним показником якості води на кожній стадії зворотного осмосу та електродіонізації. Вона визначає ступінь вилучення солей, ефективність транспорту іонів у межах мембранного поля, стабільність EDI-модуля та придатність води для подачі у паровий котел високого тиску. Будь-яке відхилення провідності вгору або вниз від номінальних значень сигналізує про наявні технологічні проблеми. Зростання провідності після RO говорить про зниження солевідкидання мембран, появу мікродфектів, початок фолінгу або поляризації концентрації. Підвищення провідності після EDI є критичною небезпекою, адже вказує на перевантаження іонообмінного середовища, деградацію мембран електродіонізації, недостатню температуру або зміну гідравлічного профілю потоку. Саме тому система реконструкції вимагає встановлення декількох високоточних датчиків електропровідності, придатних до роботи у діапазоні від десятків мікросіменсів у пермеаті RO до сотих часток мікросіменса у воді після EDI.

Одним із найбільш сучасних та інтелектуальних сенсорів провідності для мембранних систем є Endress+Hauser Memosens CLS82D, зображений на Рисунку 2.2. Цей датчик розроблений для ультрачистих середовищ, де провідність наближається до фізичної межі чистоти води. Сенсор працює стабільно у діапазоні 0,055–2000 мкСм/см і має здатність точно фіксувати найменші зміни у нижній частині шкали — саме там, де працює EDI. Його конструкція виконана з полімерів високої чистоти та нержавіючої сталі, що повністю сумісна з демінералізованою водою, яка активно вилуговує іони з металевих поверхонь. Унікальною характеристикою CLS82D є використання інтелектуальної цифрової технології Memosens, при якій калібрувальні дані

зберігаються в головці сенсора, а сам датчик передає сигнал у цифровій формі, незалежно від стану кабелю. Цей підхід гарантує абсолютну стійкість до вологи, конденсату, електромагнітних завад і значно спрощує експлуатацію, адже калібровка може виконуватися у лабораторії, а заміна сенсора в полі займає лічені секунди. Саме Endress+Hauser CLS82D найчастіше встановлюється у точках, де якість води повинна бути під контролем постійно: на вході EDI, на виході EDI та в баку ультрачистої води. Його точність і стабільність роблять його одним із найкращих сенсорів для котелень високого тиску.



Рис 2.2 Сенсор провідності для мембранних систем є Endress+Hauser Memosens CLS82D

Іншим високоточним та еталонним приладом є Mettler Toledo Thornton 770MAX. Який показаний на Рисунку 2.3. Це не просто промисловий сенсор, а лабораторного класу аналізатор, який застосовується на виробництвах електроніки, у фармацевтичних установках, на атомних електростанціях і скрізь, де потрібна найчистіша вода. Thornton 770MAX здатний вимірювати провідність з абсолютною точністю у верхній та нижній частинах діапазону, але його головна перевага полягає в бездоганній роботі в області надчистої води — на рівні 0,055 мкСм/см, що відповідає теоретичній провідності води, очищеної до меж хімічної чистоти. Установка такого датчика на виході EDI дозволяє контролювати не просто якість, а саме хімічну поведінку системи у реальному часі. Усі відхилення провідності, навіть мінімальні, миттєво фіксуються аналізатором і передаються у SCADA. Завдяки цьому система

може негайно відключити подачу нестандартної води, переорієнтувати її у дренаж або включити режим стабілізації струму EDI. Thornton 770MAX має корпус, який повністю інертний до ультрачистої води, та сенсорні елементи з кварцовим покриттям, що гарантує відсутність паразитних домішок.



Рис 2.3 Аналізатор Thornton 770MAX

Третім важливим типом датчиків провідності є японська система Yokogawa SC450 разом із сенсором SC42-SP34. Він зображений на Рисунку 2.4. Це надзвичайно надійне рішення, яке особливо добре зарекомендувало себе в умовах високої вологості, механічної вібрації та перепадів температур. Yokogawa традиційно створює сенсори, які працюють десятиліттями без зміни точності, і саме тому їхні прилади часто встановлюють на виходах RO та у лініях концентрату. Сенсор SC42-SP34 має електроди зі стійких матеріалів, які не деградують навіть під впливом слабкомінералізованої води. Його конструкція дозволяє працювати у широкому діапазоні температур, а аналізатор SC450 забезпечує апаратну фільтрацію шумів, точну компенсацію температури та підтримку цифрових протоколів зв'язку [15]. На відміну від Thornton, який найкраще працює у надчистій воді, SC42-SP34 оптимізований для роботи у зонах підвищеної провідності — наприклад, після першої ступені RO або в лінії концентрату, де важливо фіксувати зміни солевідкидання мембран та оцінювати динаміку процесу фолінгу.



Рис2.4 Система Yokogawa SC450

Усі ці датчики разом формують інтегральну систему контролю провідності, яка дозволяє не лише стежити за показниками води, а й будувати аналітичну модель роботи всього комплексу. За зміною провідності оператор та автоматика можуть визначити початок деградації мембран, зменшення їх водопроникності, зміни у транспорті іонів, появу мікродфектів, початок біоплівкоутворення або зростання поляризації концентрації. Для EDI ця інформація є ще більш важливою, оскільки різка зміна провідності вказує на електронні перенавантаження, перегрів комірок, зміну якості пермеату, зниження металізації іонообмінного наповнювача або проблеми з гідравлікою.

Встановлені датчики провідності працюють у режимі безперервної реєстрації та передачі даних. SCADA формує довгострокові тренди, порівняння за сезонністю, автоматичні протоколи відхилень, логіку блокувань та діагностичні повідомлення. Уся система провідності стає основою для захисту котла високого тиску, адже саме по електропровідності визначається, чи може вода надходити у живильну лінію.

Кремній у вигляді розчиненої кремнекислоти є одним з найбільш небезпечних домішкових компонентів у живильній воді для котлів високого тиску. На відміну від більшості іонів, кремній має здатність переходити у легкі сполуки і переноситися у пар, після чого він осідає на лопатках турбіни,

утворює тверді силікатні нашарування і викликає деградацію лопаточного апарату. Навіть незначне підвищення його концентрації у живильній воді призводить до порушення роботи парогенератора, підвищення температури металу, зміни теплопередачі і незворотних механічних пошкоджень турбіни. Тому контроль кремнію є однією з найважливіших функцій у системах підготовки води для котлів середнього та високого тиску, а датчики кремнію входять у обов'язковий комплект контролю разом з датчиками електропровідності та натрію.

Одним із найкращих і найпоширеніших аналізаторів кремнію для сучасних котельних установок є Nach 5500sc, зображений на Рисунку 2.5. Це реальний промисловий прилад, який широко застосовується на теплових та атомних електростанціях, у фармацевтичній промисловості та у системах демінералізації води високої чистоти. Його основною перевагою є абсолютна стабільність вимірювання, довготривала автономна робота та здатність працювати у наднизьких діапазонах концентрації, характерних для води після EDI. Nach 5500sc здатний вимірювати кремній на рівні від десятих частин мкг/л, що відповідає вимогам для котлів високого тиску, де допустимий вміст кремнію зазвичай не перевищує 20 мкг/л, а в багатьох випадках — навіть менше.



Рис 2.5 Аналізатор кремнію Nach 5500sc

Принцип роботи аналізатора базується на фотометричному методі з реактивами, які реагують з кремнекислотою, утворюючи кольорову сполуку, інтенсивність якої пропорційна концентрації кремнію. Прилад самостійно дозує реагенти, проводить змішування, витримку та подальше фотометричне вимірювання. Усі ці процеси відбуваються автоматично, а оператору необхідно лише періодично поповнювати реагенти згідно з інтервалом обслуговування, який може становити від одного до трьох місяців залежно від інтенсивності роботи. Такий автономний характер роботи робить аналізатор надзвичайно зручним для великих систем, де необхідний постійний контроль і де оператор не має змоги проводити ручні вимірювання [9].

У реконструйованій системі RO + EDI датчик кремнію встановлюється в найвідповідальніших точках. Найважливішою є лінія після EDI, де кремній повинен мати найнижчу концентрацію. Саме цей показник визначає, чи може вода бути подана у живильний тракт котла. Якщо вміст кремнію зростає навіть на незначну величину, SCADA автоматично переводить воду у дренаж, зупиняє подачу у бак чистої води або знижує продуктивність EDI з метою зменшення навантаження на мембрану. Другий важливий пункт контролю — це вода після другої ступені RO. Якщо кремній на цьому етапі зростає, це майже завжди сигналізує про деградацію мембрани або її забруднення, адже RO є основним етапом, який має видаляти кремній до рівня, прийняттого для подальшого вилучення у EDI. У деяких проектах аналізатор встановлюють також у лінії концентрату RO для оцінки селективності мембран та розуміння реального рівня забруднення.

Nach 5500sc має унікальну властивість — стабільність калібрування, яка зберігається протягом тривалого часу. Його оптична система побудована так, що вплив зовнішніх факторів зведений до нуля, а автоматична компенсація дозволяє працювати у широкому діапазоні температур. Для демінералізованої води це критично важливо, адже зміни температури навіть на кілька градусів здатні змінити хімічну активність води, швидкість реакції

та інтенсивність спектру. Аналізатор самостійно визначає наявність бульбашок, помутніння або попадання забруднень у вимірювальну кювету і сигналізує про необхідність промивки або обслуговування.

Контроль кремнію дозволяє швидко діагностувати проблеми в системі знесолення. Якщо концентрація кремнію зростає на вході EDI, це говорить про появу колоїдів або дисоційованих форм кремнекислоти, погано вилучених мембранами RO. Якщо ж зростання відбувається на виході EDI, це вказує на втому іонообмінного середовища, втрату електролітичної селективності або гідравлічні порушення у структурі каналів. Різка підвищення кремнію після баку чистої води є ознакою повторного забруднення, контакту з металами, виходу з ладу ультрачистих трубопроводів або проникнення повітря, яке містить леткі кремнійорганічні компоненти.

Датчик кремнію є одним з найважливіших інструментів захисту парового котла. Усі сучасні котельні високого тиску, включно з енергоблоками електростанцій, мають кілька незалежних каналів контролю кремнію, і реконструйована система RO + EDI повністю відповідає цим вимогам. Від правильності контролю кремнію залежить не лише якість пари, а й довговічність турбіни та безпека всієї енергетичної установки.

Вміст натрію у демінералізованій воді є одним з найчутливіших показників, що дозволяє оцінити ефективність роботи іонообмінної та мембранної системи. На відміну від кремнію, який визначає здебільшого чистоту перегрітої пари та поведінку турбіни, натрій є прямим індикатором працездатності мембран RO та EDI. Найменше підвищення концентрації натрію у пермеаті свідчить про початок деградації мембранного полотна, появу мікропошкоджень або зростання мікрodefektів структури поліаміду, через які одновалентні іони, такі як  $\text{Na}^+$ , проходять першими. Натрій є «першим дзвінком», який сигналізує про порушення селективності, і саме тому системи високого ступеня очищення завжди мають окремий канал контролю натрію, незалежний від контролю електропровідності.

Найточнішим і найпоширенішим датчиком для вимірювання натрію у надчистій воді є Thermo Scientific Orion 2117XP Sodium Analyzer, показаний на Рисунку 2.6. Це високоточний промисловий аналізатор, який застосовується на атомних електростанціях, у хімічних виробництвах, у фармацевтичній та електронній промисловості, а також у всіх сучасних котельнях високого тиску. Orion 2117XP здатний вимірювати натрій у діапазоні від кількох ppb (частин на мільярд), що відповідає мікрограмам на літр, і саме в такому діапазоні працюють EDI-модулі, призначені для живлення котлів високого тиску.



Рис 2.6 Датчик для вимірювання натрію Thermo Scientific Orion 2117XP  
Sodium Analyzer

Принцип роботи аналізатора базується на використанні іоноселективного електрода, чутливого саме до  $\text{Na}^+$ . Така технологія дозволяє виявляти найменші зміни концентрації натрію навіть тоді, коли електропровідність води залишається стабільною. Це особливо важливо у випадках, коли мембрани RO мають початкові мікрodefekти: загальна мінералізація ще не зросла, але вибіркоче проходження натрію вже почалося. Електропровідність у такому разі не є достатньо чутливою, тому аналізатор натрію стає єдиним реальним інструментом ранньої діагностики проблем.

Thermo Orion 2117XP працює автоматично, постійно відбираючи воду з потоку та здійснюючи вимір. Його іоноселективний електрод має спеціальну мембрану, яка сприймає лише натрій і майже не реагує на одновалентні катіони типу калію. Перед електродом розташований клапан температурної стабілізації, який забезпечує сталість хімічних умов. Уся вимірювальна система побудована так, щоб виключити вплив дрейфу температури, тиску та зміни рН. Для надчистої води це критично, адже навіть невелика зміна рН здатна перерозподілити рівновагу між  $H^+$ ,  $OH^-$  і  $Na^+$ , що призводить до хибних результатів [4].

У реконструйованій системі RO + EDI датчик натрію встановлюється у найвідповідальнішому місці — після EDI, перед входом у бак чистої води. Саме тут концентрація натрію повинна бути мінімальною. Зростання цього показника є прямою вказівкою на те, що EDI перевантажений або втратив здатність повністю вилучати одновалентні іони. У разі відхилення SCADA переводить воду у дренаж і видає сигнал про необхідність діагностики. Оператор може швидко оцінити, чи проблема полягає у RO (що дає занадто високу провідність на вході EDI), чи у самому EDI, який втрачає селективність через деградацію шарів, перегрів або забруднення.

Датчик натрію встановлюють також у контурі циркуляції води у баку чистої води. Це дозволяє визначити, чи система трубопроводів не забруднює воду повторно. Ультрарізна вода є агресивною і вилуговує іони з металів, тому будь-яке неправильне ущільнення, поганий шов або неякісний сегмент трубопроводу здатний викликати постійне збільшення концентрації натрію. Такі явища характерні для старих котелень, де після реконструкції лише частина трубопроводу замінена на AISI 316L або полімерні лінії, а інші частини збереглися з попередніх років.

Orion 2117XP має тривалу стабільність калібрування, що дозволяє проводити калібровку у великих інтервалах, часто раз на кілька місяців. Усі електроди мають довгий ресурс і змінюються без зупинки потоку. Прилад забезпечує повну діагностику стану електрода, визначає залишковий ресурс

мембрани, сигналізує про проблеми з реагентами або забруднення вимірювального каналу. В умовах котельні це є однією з головних переваг, оскільки оператору не потрібно постійно слідкувати за приладом.

Контроль натрію дозволяє точно оцінити можливість подачі води у живильну лінію котла. Якщо датчик показує зростання концентрації до кількох десятків мкг/л, система автоматично вмикає блокування. Причина проста: натрій здатний утворювати дуже стійкі солі, які відкладаються в першій черзі на випарних поверхнях, викликаючи локальне перегрівання та збільшення ризику пошкодження труб. У поєднанні з кремнієм натрій сприяє утворенню силікатів, які є надзвичайно твердими і майже не піддаються хімічному розчиненню. Тому датчик натрію є не просто контролем якості, а важливим елементом системи безпеки всієї котельної установки.

Таким чином, встановлення Thermo Orion 2117XP у реконструйованій системі RO + EDI забезпечує найвищий рівень контролю якості води. Цей прилад дозволяє своєчасно виявляти початкові стадії деградації мембран, запобігати повторному забрудненню ультрачистої води в трубопроводах, захищати котел від подачі неякісної води та підтримувати довготривалу стабільність роботи EDI. Контроль натрію разом із кремнієм і провідністю формує трикутник абсолютної надійності, який і визначає якість води на рівні, необхідному для живлення котлів високого тиску.

Контроль рівня у технологічних ємностях системи зворотного осмосу та електродіонізації є критично важливим чинником, що визначає безперервність, безпеку та стабільність роботи всієї установки. Мембранні системи не допускають роботи «всуху», не допускають нестабільного притоку води, не допускають пульсацій у лінії пермеату та не допускають гідравлічного недовантаження на вході EDI. Саме тому точний, надійний та стійкий до хімічно агресивних середовищ контроль рівня у буферних ємностях є обов'язковим елементом реконструйованої системи.

У типовій установці RO + EDI є кілька ключових ємностей, у яких постійно вимірюється рівень: бак сирієї води або технічної підпитки,

буферний бак перед високонапірним насосом, проміжний бак між ступенями RO, ємність перед EDI і, звичайно, бак ультрачистої води після EDI. Кожен з цих баків має власні особливості, різні вимоги до точності та різну поведінку рідини. Наприклад, ємність перед EDI заповнена водою з дуже низькою провідністю, яка є агресивною і може вилугувувати метали; тому матеріал датчика повинен бути стійким до демінералізованої води. Ємність сирієї води може містити домішки, завислі речовини та повітряні пробки, що вимагає використання датчиків, нечутливих до піни та турбулентності. Ємність після EDI повинна мати максимально плавний контроль рівня, оскільки від цього залежить робота всієї котельної установки.

Одним із найкращих та найбільш універсальних інструментів для контролю рівня у мембранних системах є VEGA VEGAPULS C21, Показаний на Рисунку 2.7 — сучасний, надточний радарний рівнемір на основі технології FMCW на частоті 80 ГГц. Це компактний, безконтактний сенсор, який має високу чутливість і абсолютно не залежить від провідності, прозорості, кольору чи чистоти води. На відміну від ультразвукових датчиків, VEGAPULS C21 не реагує на конденсат, не боїться пари, не потребує відбиваючих поверхонь і не дає похибки через температуру або тиск. Такий датчик підходить ідеально для баків перед RO, де можливе випаровування, турбулентність або зміна температури води. Радарний датчик працює через полімерний герметичний фронтальний вузол, що робить його повністю інертним відносно демінералізованої води і забезпечує довгострокову стабільність вимірювання.



Рис 2.7 Датчик рівня у мембранних системах VEGA VEGAPULS C21

Іншим промисловим рівнеміром, який широко застосовується у котельних та системах очищення води, є Endress+Hauser Levelflex FMP54, зображений на Рисунку 2.8. Це датчик рівня на основі технології «guided wave radar» — направленої хвилі, яка поширюється по зондовому стрижню або тросу. На відміну від класичного радару, який працює через повітря, цей датчик проводить хвилю безпосередньо у рідинний об'єм, що дає абсолютну точність у вузьких, високих або складних за формою ємностях. FMP54 особливо добре працює в середовищах, де є турбулентність, піна, зміна діелектричної проникності або відкладення на стінках [23]. Саме тому його часто використовують у буферній ємності перед високонапірним насосом RO, де змішуються декілька потоків, де присутній рециркуляційний потік концентрату і де рівень може змінюватися швидко. Завдяки технології направленої хвилі Levelflex FMP54 ігнорує турбулентні коливання поверхні і дає чіткий сигнал рівня, який передається в систему керування у вигляді аналогового сигналу 4–20 мА або цифрового протоколу HART.



Рис 2.8 Датчик рівня Endress+Hauser Levelflex FMP54

Сучасні реконструйовані системи часто використовують також Siemens Sitrans LR100, зображений на Рисунку 2.9, це компактний радарний датчик, оптимізований під невеликі ємності, такі як проміжні баки RO або баки пермеату. Siemens успішно застосовується там, де є обмеження по висоті, вузькі люки або невеликі внутрішні діаметри. LR100 має надзвичайно мале енергоспоживання і дуже чистий радарний сигнал, завдяки якому він ефективно працює навіть у ємностях малого діаметра, де відбитий імпульс є дуже слабким. Для демінералізованої води та пермеату така характеристика є дуже цінною, оскільки ультрачиста вода має низьку діелектричну проникність і багато дешевих датчиків просто не бачать її поверхню.



Рис 2.9 Датчик рівня Siemens Sitrans LR100

Контроль рівня виконує декілька стратегічних функцій у системі RO + EDI. По-перше, він формує міжблокування запуску високонапірного насоса, щоб виключити роботу «всуху». Мембранні насоси не допускають навіть секундного зниження притоку, оскільки це призводить до кавітації й миттєвого руйнування робочих коліс. По-друге, контроль рівня визначає гідравлічний запас перед RO, від якого залежить стабільність тиску і рівномірність подачі на мембранні модулі. По-третє, рівень у ємності перед EDI визначає безпеку роботи електродіонізаційного модуля. Якщо рівень падає, система негайно зупиняється, оскільки сухий хід EDI призводить до перегріву і руйнування мембранних шарів через локальне зростання температури. Четвертою важливою функцією є контроль рівня у баці ультрачистої води [31]. Саме цей бак є буфером між системою знесолення та живильним трактом котла. Занадто низький рівень може викликати повітряні

викиди у живильну лінію, що є неприпустимим для котла високого тиску. Надмірно високий рівень створює ризик переливу та втрати води, що може викликати корозію обладнання або затоплення.

Датчики рівня інтегруються у SCADA та працюють у режимі безперервного контролю. Система будує графіки зміни рівня, аналізує динаміку циклів, стежить за тим, чи рівень поводить ся відповідно до очікуваної витрати і притоку. Відхилення у поведінці рівня, такі як надто швидке падіння або незвичайні коливання, сигналізують про гідравлічні несправності, засмічення трубопроводу, повітряні пробки або вихід з ладу клапанів. Таким чином, датчики рівня є одночасно елементами контролю, діагностики та технологічного захисту.

Контроль рН у системах зворотного осмосу та електродіонізації є критично важливим, оскільки навіть невеликі відхилення цього параметра призводять до низки фізико-хімічних наслідків, які безпосередньо впливають на довговічність мембран, ефективність вилучення солей, стабільність роботи EDI-модулів та якість ультрачистої води. Поліамідні мембрани у модулі RO є надзвичайно чутливими до підвищення рН, і навіть короткочасне потрапляння лужного середовища може руйнувати тонку активну поліамідну плівку. Надмірно кисле середовище також є небезпечним, оскільки викликає гідролітичний розпад і прискорює деградацію мембрани. Мембранні системи EDI мають власні оптимальні діапазони рН, при виході за межі яких відбувається зміна структури іонообмінних смол, що знижує їх електролітичну селективність. Тому контроль рН на всіх критичних стадіях — обов'язковий.

Одним із найкращих і найнадійніших промислових датчиків рН є Endress+Hauser Orbisint CPS11D, зображений на Рисунку 2.10, який представляє собою високоточний сенсор із цифровим протоколом Memosens. CPS11D — це універсальний електрод, який працює у широкому діапазоні рН, не боїться забруднень, має стабільний потенціал і може довго працювати без перезавантаження або частих калібровок. Його особливість полягає у

тому, що вимірювальний елемент виконано зі скла підвищеної хімічної стійкості, а довготривалість стабільності забезпечується спеціальною полімерною діафрагмою. Міжвузловий перехід захищений від ефектів натрієвої інтерференції, що дозволяє датчику працювати навіть у воді з низькою буферністю, такої як демінералізована вода.



Рис 2.10 Промисловий датчик рН Endress+Hauser Orbisint CPS11D

Датчик CPS11D чудово працює в області перед RO, де рН може коригуватися для запобігання утворенню карбонатних відкладень. Мембранний RO-модуль зазвичай працює у нейтральному або слабнокислому діапазоні, а тому датчик рН повинен бути стійким до змін температури, тиску та можливих домішок. Його цифрова технологія Memosens виключає вплив вологи та конденсату: електрод може працювати навіть при повному заливанні кабельного з'єднання, і це ніяк не позначиться на точності передачі сигналу. З міркувань безпеки CPS11D встановлюється в ISO-фланцевих тримачах, а сигнал передається у контролер у цифровому вигляді для подальшої обробки у SCADA.

Для ділянок, де потрібна ще вища стійкість і можливість роботи з дуже чистою водою, часто застосовують японські сенсори Yokogawa FU24-F, зображений на Рисунку 2.11, які спеціально розроблені для роботи у середовищі з малою буферною ємністю та низькою провідністю. FU24-F

використовує подвійний рідкий електроліт і має унікальну конструкцію подвійної діафрагми, що захищає від впливу домішок і забезпечує стабільність потенціалу при різких змінах температури [44]. Такі датчики ставлять перед EDI або після нього, коли потрібно стежити за тим, чи не відбувається зміщення рН у надчистій воді. Хоча провідність після EDI є надзвичайно низькою, навіть невелике зміщення рН може бути ознакою потрапляння CO<sub>2</sub>, мікродфектів у мембранах або повторного змішування з водою іншої якості.



Рис 2.11 Датчик рН Yokogawa FU24-F

Системи СІР (хімічної промивки RO) потребують окремих датчиків рН, здатних витримувати високі концентрації лугу або кислоти. У таких випадках застосовують більш стійкі сенсори на основі полімерних корпусів, наприклад ті ж Е+Н, але у модифікації CPS41, які здатні працювати при рН до 14 та при високих температурах. Ці датчики забезпечують контроль правильності складу миючих розчинів, допомагаючи уникнути ситуації, коли через помилку персоналу надто концентрований луг або кислота потрапляє у мембранний контур. Поліамідні мембрани гинуть за хвилини при рН > 11, тому датчик рН є надійним і обов'язковим бар'єром.

Контроль рН допомагає діагностувати нестандартні ситуації у роботі установки. Якщо рН після RO починає зростати, це може сигналізувати про деградацію мембрани, яка починає пропускати більше іонів натрію та менше — гідрокарбонатів. Це відразу відображається у поведінці рН, навіть якщо електропровідність ще не змінилась. Якщо рН падає на вході в EDI, це часто

говорить про проникнення  $\text{CO}_2$  або про зміну балансу у системі дегазації. Зміна рН після EDI є дуже рідкісною ситуацією, але якщо вона виникає, то майже завжди пов'язана з деградацією мембран EDI, перегрівом каналів або нерівномірним розподілом потоку.

Датчик рН інтегрується у SCADA і працює в режимі безперервного моніторингу. Алгоритм керування враховує його показники для автоматичного регулювання подачі антискаланта, коригування дозування кислот або лугу у системах попередньої підготовки, а також для міжблокувань, які зупиняють установку при виході рН за межі допустимого діапазону. Для мембрани RO ці межі зазвичай становлять 2–11 у робочому режимі та 1–12 у короткочасних режимах SIP. Для EDI — ще вужчі, оскільки надмірно кисле або лужне середовище руйнує структуру іонообмінних каналів.

Таким чином, датчики рН є невід'ємною частиною системи контролю і захисту процесу знесолення. Вони забезпечують стабільність хімічного середовища, не допускають появи небезпечних режимів, діагностують початок деградації мембран та допомагають підтримувати якість води на рівні, необхідному для живлення котлів високого тиску. Разом із датчиками провідності, натрію та кремнію вони утворюють комплексну систему багаторівневого контролю, яка дозволяє вчасно виявляти аномалії, оптимізувати роботу і забезпечувати безперебійну та безпечну експлуатацію. У системах підготовки води для котлів високого тиску контроль окисно-відновного потенціалу, або ORP, є одним із фундаментальних і недооцінених параметрів, який визначає загальну хімічну реактивність середовища, його схильність до корозії, біологічної активності, а також присутність потенційно небезпечних окисників, таких як вільний хлор. Мембранні модулі зворотного осмосу є надзвичайно чутливими до окисників, особливо до гіпохлориту та вільного хлору: навіть частки міліграма на літр можуть викликати глибоке окисне руйнування поліамідного шару мембрани. Тому ORP у системі RO

має пряме значення для безпеки і довговічності мембран і є одним з перших параметрів, які контролюють перед подачею води у першу ступінь RO.

Датчики ORP вимірюють потенціал редокс-рівноваги між окисними та відновними чинниками у воді. У системі підготовки води це дозволяє визначити наявність залишкового хлору після дозування антискаланта, оцінити ефективність системи видалення хлору (зазвичай це активованій вуглець або дозування натрію метабісульфіту), виявити появу біологічної активності та спрогнозувати умови для мікробного фолінгу мембран. ORP також допомагає виявити присутність пероксидних залишків після озонування або хімічної промивки [30].

Одним із найбільш надійних та широко застосовуваних сенсорів ORP є Endress+Hauser Memosens CPS12D, зображений на Рисунку 2.12, який представляє собою промисловий електрод платиногового типу, спеціально створений для систем водопідготовки. Цей датчик має цифрову технологію Memosens, яка повністю захищає його від впливу конденсату, вологості та корозії кабельних з'єднань. Memosens дозволяє переносити калібрувальні дані всередині головки датчика, що робить технічне обслуговування значно простішим: датчик може бути відкалібрований у лабораторії, після чого його просто підключають до процесу, і він миттєво працює з точними параметрами.



Рис 2.12 Датчик ORP

CPS12D здатен працювати у дуже широкому діапазоні ORP, реагуючи на зміни окисної активності навіть у демінералізованій воді, яка має низьку

концентрацію іонів і слабку буферність. Його конструкція базується на скляному корпусі високої чистоти та платиновому електроді, який забезпечує швидку реакцію на зміни хімічного потенціалу. У реконструйованій системі RO + EDI CPS12D встановлюється на декількох ключових ділянках. Найважливішою точкою контролю є лінія перед мембранами RO, де ORP повинен бути стабільним і низьким, щоб гарантувати відсутність окисників, зокрема залишкового хлору. Зміна ORP у бік позитивних значень є прямою ознакою появи хлору, і в такому разі система негайно блокує подачу, активує аварійний обвід або дозує відновник — зазвичай це розчин метабісульфіту натрію.

Другим важливим місцем встановлення ORP-датчика є лінія після блоку активованого вугілля або після хімічної фази нейтралізації хлору. Тут електрод працює як індикатор ефективності затримання окисників та як елемент діагностики стану фільтра завантаження. Якщо ORP починає зростати після кількох місяців стабільної роботи, це вказує на насичення активованого вугілля, на деградацію адсорбційної здатності або на пропуск нових домішок у сирій воді.

У багатьох системах ORP контролюють також у поверненні концентрату, де підвищений окисний потенціал може провокувати біологічну активність. Мембрани RO дуже чутливі до біологічного фолінгу, а ORP є непрямим, але чутливим індикатором кисневого та органічного метаболізму в системі. Якщо ORP падає до великих негативних значень, це означає наявність редуруючих середовищ, що часто виникає при мікробному рості.

Контроль ORP дозволяє системі автоматизації здійснювати критично важливі операції. Першою є міжблокування від хлору: якщо ORP піднімається вище розрахункових значень, SCADA негайно зупиняє високонапірний насос, відключає подачу води на RO і запускає аварійну схему. Другою функцією є оптимізація дозування відновників. Занадто велика доза метабісульфіту може перевести систему у глибоко негативний ORP, що теж є небажаним, бо викликає хімічну нестабільність води. Третьою

функцією є визначення ефективності промивки та СІР. Під час очищення мембран ОРР різко змінюється, і його поведінка дозволяє оцінити, чи повністю видалені залишки окисних або відновних компонентів.

Таким чином, датчики ОРР є не лише елементами контролю, а й важливими діагностичними інструментами, які забезпечують захист мембран, стабільність хімічного середовища, попередження небезпечних ситуацій і підтримку оптимального режиму роботи зворотного осмосу та електродіонізації. Вони дозволяють оцінювати хімічну природу процесів у системі, не допускають окисних пошкоджень, попереджають біофолінг і допомагають утримувати роботу установки у критично важливих межах хімічної безпеки.

#### **2.4 Висновки до розділу 2.**

У другій частині було розглянуто комплекс технічних рішень, що формують основу надійного управління сучасною знесолюючою установкою типу «зворотний осмос + електродіонізація». Автоматика виступає не просто допоміжною підсистемою, а ключовим елементом, який визначає стабільність усього процесу підготовки води для парових котлів. У високонавантажених теплотехнічних циклах, де якість живильної води напряму впливає на ресурс котла, турбіни та всієї енергетичної установки, будь-яке коливання параметрів потребує негайної реакції. Сучасні засоби автоматизації дозволяють працювати у режимі постійного контролю, корекції та самодіагностики, що неможливо забезпечити у класичних схемах зі старими знесолюючими станціями.

Правильний вибір гідравлічних параметрів у системах RO та EDI є ключовим аспектом забезпечення їхнього ефективного функціонування. Тиск, витрата, стабільність потоку, підтримання лінійного режиму руху води, запобігання гідроімпульсам, а також точне дозування реагентів утворюють взаємопов'язану структуру, у якій збалансованість відіграє вирішальну роль. Будь-яке відхилення тиску на мембранах зворотного осмосу, нестабільність

витратного режиму чи некоректне співвідношення пермеату та концентрату можуть не тільки знизити продуктивність установки, але й призвести до передчасного виходу з ладу дорогих мембранних елементів. У модулі EDI гідравлічні параметри критично визначають якість остаточного знесолення, а зміни електропровідності та температури води безпосередньо залежать від того, наскільки точно утримуються задані параметри подачі.

Саме тому у другій частині особливу увагу приділено питанням добору датчиків та вимірювальних приладів. В умовах постійних коливань хімічного складу вихідної води, зміни тисків у мережі та динамічних навантажень на насосне обладнання саме датчики визначають, чи отримає система достовірні вихідні дані. Від якості цих даних залежить робота контролерів, частотних перетворювачів, виконавчих механізмів та алгоритмів корекції, а отже — і якість кінцевої води. Неправильно підібрані давачі, їх невірний діапазон вимірювання, повільний відгук або низька стабільність можуть спричинити неправильні рішення автоматики, що у складних процесах знесолення фактично дорівнює системній помилці.

Було показано, що сучасні датчики електропровідності, рН, редокс-потенціалу, та солевмісту повинні відбиратися з урахуванням як хімічної агресивності середовища, так і вимог до точності вимірювань. Установки RO+EDI працюють на межі технологічних можливостей: мембрани потребують стабільного тиску, модулі EDI — стабільної електропровідності та температури, а насосне обладнання — чітко витриманих гідравлічних режимів. У цих умовах датчик стає не допоміжним пристроєм, а критичним елементом системи керування. Помилка у вимірюванні у межах навіть кількох відсотків може призвести до некоректної роботи цілої лінії знесолення.

Підсумовуючи, можна сказати, що сучасна система автоматизації разом з правильно підбраною гідравлікою та високоточними давачами формує основу надійної високотехнологічної схеми знесолення. Установки типу RO+EDI не працюють «вслупу», вони функціонують як єдина інтегрована

система, де якість кожного параметра визначає результат. Стабільність, прогнозованість та висока якість води є прямим наслідком того, наскільки грамотно побудовано комплекс автоматики та наскільки професійно підбрано датчики, що забезпечують безперервний контроль усіх ключових процесів. Правильний інженерний підхід у цьому питанні є гарантією довговічності обладнання, економічності процесу та стабільної роботи парових котлів у всіх режимах.

## РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Необхідність аналізу пари для пере регулювання системи знесолення.

У сучасних енергетичних комплексах, хімічних підприємствах, теплоелектроцентралях і котельнях високого тиску традиційно застосовується перевірена, але морально застаріла процедура контролю якості пари та живильної води. Вона базується на періодичних лабораторних аналізах, при яких проби пари або конденсату відбираються вручну, відстоюються, транспортуються до лабораторії, проходять температурну стабілізацію і вже потім піддаються аналізу. Уся процедура займає від кількох десятків хвилин до кількох годин, що в умовах сучасних високонавантажених котлів високого тиску є неприйнятним. Пара, яка за цей час вже пройшла через пароперегрівачі, турбінні лопатки або технологічне обладнання, могла містити небажані домішки, здатні викликати деградацію металів, утворення твердих нашарувань, зміну теплопередачі та передчасні зношування обладнання.

Проблема полягає в тому, що реальний якісний стан пари і живильної води може змінитися раніше, ніж системи водопідготовки відреагують на ці зміни. Установка RO + EDI виробляє воду з ультранизьким солевмістом, однак якість цієї води не завжди напряму визначає якість пари. Причини можуть бути різними: локальні корозійні процеси в трубопроводах, вторинне забруднення конденсату, витіки у конденсатопроводах, несправності у деаераторах, зворотна домішка з теплообмінників, неправильна робота системи електропідігріву, перехідні процеси у котлі, наявність силікатів чи катіонної «облітності». Будь-яка з цих причин призводить до того, що навіть при ідеальній роботі RO + EDI у парі можуть з'являтися домішки натрію, кремнію, заліза, хлоридів або інших солей. Людина не може вчасно відреагувати на такі зміни, оскільки ручне тестування фізично не здатне забезпечити необхідної частоти.

Сучасні котельні високого тиску працюють у режимах, де будь-яка затримка з контролем складу пари призводить до лавинного розвитку пошкоджень. Силікатні відкладення в турбіні, які формуються при концентраціях кремнію на рівні кількох мікрограмів на літр, здатні за кілька годин порушити динамічний баланс ротора. Накопичення натрію в перших рядах труб пароперегрівача змінює профіль теплопередачі, створюючи локальні перегріву понад 600 °С. За таких умов оператор, який реагує на зміни за показами лабораторних аналізів, завжди буде запізнюватися, оскільки фактична ситуація в системі змінюється швидше, ніж проходить цикл аналітики [39].

Саме тому виникає необхідність побудови абсолютно нової системи, яка працює у принципово іншій логіці — не від котла до лабораторії, а від котла до системи водопідготовки у режимі реального часу. Розробляється автоматизований комплекс, який має здатність безперервно відбирати пробу пари, приводити її до стабільних фізико-хімічних умов, виконувати точний онлайн-аналіз хімічного складу, а потім через SCADA впливати на параметри роботи RO і EDI. Тобто система перетворюється на замкнену петлю керування з повною інтеграцією у PLC Siemens. Це означає, що котел стає активним учасником регулювання якості власної живильної води: він «повідомляє» систему, яка саме вода потрібна йому в реальному часі.

Це нововведення не є просто покращенням існуючих процедур, воно змінює саму філософію керування водно-хімічним режимом котла. Вперше система знесолення отримує зворотний зв'язок від продукту, який вона забезпечує, а не лише від пермеату, що виходить з RO + EDI. Це дозволяє враховувати ті фактори, що раніше перебували поза контролем водопідготовки: стан конденсатної системи, проміжну корозію, появу транзитних домішок, нерівномірність парогенерації, дегазаційні аномалії та багато інших.

У результаті формується абсолютно новий клас систем — інтелектуальні системи керування знесоленням, у яких якість пари впливає

на режими роботи RO + EDI так само, як вхідна вода. Саме цей принцип і лежить в основі розроблюваного нововведення.

### **3.2 Конструкція вузла відбору пари.**

У системах котлів високого тиску відбір проби пари є складною процедурою, яка вимагає суворого дотримання міжнародних стандартів, щоб забезпечити повну відповідність між реальною якістю пари в паровому просторі та тією пробєю, яку отримує аналітична система. Будь-яке неправильне охолодження, неконтрольоване зниження тиску або передчасна конденсація призводять до спотворення хімічного складу проби, оскільки частина солей може залишитися у рідкій фазі у зонах зворотної конденсації, а частина — втратитися разом із фрагментами сухої пари. Тому ключовим завданням є створення вузла, який забезпечить не просто охолодження пари, а стандартизовану пробу, що точно відповідає реальному солевмісту пари всередині котла.

Конструкція вузла відбору базується на принципі ізокінетичного забору, що означає відбір проби зі швидкістю, максимально наближеною до швидкості руху пари у трубопроводі. Для цього у стінку паропроводу монтується спеціальний занурювальний зонд із нержавіючої сталі AISI 316L, який має внутрішній гладкий канал і конічну торцеву частину, що захищає пробу від турбулентних вихорів і мікроводоворотів біля стінки. Такий зонд має довжину 150–300 мм залежно від діаметра трубопроводу, щоб забір здійснювався з центральної частини потоку, де структура пари є найбільш рівномірною.

Зонд приєднується до високотемпературного відбірного капіляра, виконаного зі сталі 316L або з інконелю, який здатен витримувати температуру понад 500 °C та тиск понад 10–15 МПа, характерний для котлів високого тиску. Капіляр має мінімальний внутрішній діаметр, щоб уникнути теплообміну з навколишнім середовищем та передчасної конденсації. Його

поверхня може бути полірувана до номеру  $Ra \leq 0,8$  мікрон, щоб усунути ризик адгезії крапель та солей [24].

Перший етап регулювання параметрів проби — дроселювання тиску. Для цього у вузлі встановлюється спеціальне сопло з каліброваним отвором, виготовлене з карбїду вольфраму або нержавіючої сталі з високою твердістю. Сопло забезпечує зниження тиску пари з робочого (8–14 МПа) до безпечного тиску 0,2–0,4 МПа. Важливо те, що дроселювання відбувається без утворення локальних зон перегріву, які могли б змінити рівноважні характеристики домішок. Зниження тиску відбувається плавно і практично ізоентальпійно, так що проба зберігає вихідну концентрацію розчинених солей.

Після дроселювання пара подається у спеціальний мультиканальний конденсатор, виконаний із полірованої нержавіючої сталі або з кварцового скла, зображений на Рисунку 3.1. Конденсатор являє собою блок з декількох тонкостінних трубок малого діаметра, які проходять через сорочку з проточною охолоджувальною водою. Така конструкція забезпечує рівномірний тепловідвід і знижує температуру проби до 25–35 °С, що є оптимальним для точності аналізаторів. Багатоканальна конфігурація дозволяє уникнути ламінарної конденсації, яка може призводити до втрат частини домішок на стінках. Турбулентність у трубках сприяє швидкому переходу пари у рідину, не залишаючи нерівномірних зон конденсату.



Рис 3.1 Відбор і конденсація пари

Для більш високої точності застосовується попередній теплообмінник, який забезпечує стабілізацію температури проби ще до входу в конденсатор. Він зменшує нагрівання охолоджувальної води в конденсаторі та забезпечує

постійний температурний профіль. Усі елементи теплообмінника виготовлені з інертних матеріалів, які не взаємодіють з ультрачистою водою і не вносять сторонніх іонів у пробу.

Після конденсації проба подається у термостатичну камеру, яка зрівнює температуру до стабільної величини, необхідної для роботи датчиків провідності, кремнію та натрію. Термостатична камера усуває температурні пульсації, що виникають при зміні навантаження котла, та гарантує відсутність похибок.

У конструкції вузла передбачені елементи захисту від помилок у роботі: спеціальний дренажний контур відводить пробу, яка ще не досягла стабільних параметрів, щоб на аналітичний модуль надходила лише кондиційована рідина. У разі підвищення температури або тиску у пробі автоматично спрацьовують запірні клапани, щоб уникнути подачі некоректних даних у SCADA.

Таким чином, вузол відбору та охолодження проби є високотехнологічною частиною системи контролю пари. Він забезпечує точність, відповідність стандартам і, найголовніше, — дозволяє побудувати реальний зворотний зв'язок між котлом та системою знесолення, який раніше був неможливим [10].

### **3.3 Вибір давачів складу конденсату.**

Система автоматизованого аналізу проби пари може існувати лише за умови використання спеціалізованих аналітичних датчиків, здатних працювати в екстремальному середовищі — ультрачистому конденсаті з наднизькою провідністю, де концентрація домішок вимірюється у діапазоні мікрограмів на літр, а інколи навіть нанограмів. Звичайні прилади, які застосовуються у загальнопромисловій хімії води, абсолютно не придатні для таких задач, оскільки вони не забезпечують потрібної точності, стабільності потенціалу, нечутливості до температурних коливань та відсутності ефекту дрейфу. Для контролю якості пари котлів високого тиску потрібні

вузькоспеціалізовані аналітичні комплекси, створені саме для ультрачистої води, і вибір таких приладів є критично важливим етапом у розробці нової системи [6].

Головною вимогою до аналітичних датчиків є їх здатність працювати у середовищі, яке практично не має електролітної сили. У такій воді іони рухаються повільно, а провідність наближається до теоретичного мінімуму, визначеного лише автодисоціацією води. Більшість промислових датчиків просто не здатні стабільно працювати у таких умовах, оскільки їх робочі мембрани або діафрагми вимагають певної іонної сили для підтримання рівноваги. Тому у складі нової системи застосовуються лише ті аналізатори, які пройшли міжнародні стандарти IAPWS та ASTM для роботи з конденсатом та живильною водою котлів високого тиску.

Першим і найбільш важливим датчиком є аналізатор натрію Thermo Scientific Orion 2117XP. Натрій є ключовим показником у парі, оскільки він визначає ранні ознаки проникнення солей через мембрани, а також є прямим індикатором вторинного забруднення конденсату. Принцип роботи Orion 2117XP базується на високочутливому іоноселективному електроді, здатному фіксувати присутність натрію на рівні кількох ppb. Унікальність цього приладу полягає у його здатності працювати без істотного дрейфу, не залежати від низької провідності середовища та відстежувати навіть коливання натрію, спричинені короткочасними процесами у котлі або в конденсатній системі. Це дозволяє використовувати його не лише як контрольний інструмент, а як частину системи предиктивної аналітики: кожне коливання натрію фіксується у SCADA, формуючи електронний підпис поведінки котла. Саме тому Orion 2117XP входить до складу багатьох міжнародних систем хімічного режиму на ТЕЦ та АЕС [1].

Другим ключовим компонентом є аналізатор кремнію Swan AMI Silica або Nash 5500sc. Кремній у парі є однією з найнебезпечніших домішок, оскільки він здатен переходити у легкі форми та потрапляти на лопатки турбіни, що призводить до утворення надзвичайно твердих силікатних

відкладень. Ці відкладення майже неможливо видалити без механічного втручання, і навіть тонкий шар здатен порушити аеродинамічний профіль лопаток. Тому аналізатор кремнію має бути надзвичайно точним та стабільним. Системи Swan та Nash використовують фотометричний метод з реагентами, який забезпечує точність до десятих частин мікрограма на літр. Важливою особливістю цих аналізаторів є їх здатність працювати з конденсатом  $\text{pH} \approx 6$ , де кремнієва кислота має максимально стабільну форму. Автоматичне дозування реагентів, оптична компенсація та контроль фону дозволяють отримувати стабільні результати навіть при значних коливаннях температури або тиску.

Ще один ключовий інструмент — низькопровідний аналізатор Endress+Hauser ceramic conductivity sensor Condtrace. На відміну від класичних електродів, які працюють у воді з провідністю 5–1000 мкСм/см, Condtrace здатний вимірювати провідність у діапазоні до одиниць нСм/см. Це дозволяє оцінити наявність залишкових іонів у парі, навіть якщо їх концентрація не визначається окремими аналізаторами. Провідність є інтегральним параметром, який відображає сумарний іонний склад, і зміна цього параметра часто є першою ознакою деградації мембран або змішування чистого конденсату із технологічною водою. Конструкція Condtrace базується на високочастотній електроніці, яка забезпечує стабільність сигналу навіть у воді, що практично не містить солей. Сенсор виготовлений із високочистої кераміки, яка не взаємодіє з водою та не виділяє іонів, тому його застосування гарантує відсутність внесених домішок [14].

Важливим доповненням до цих аналізаторів є система вимірювання  $\text{pH}$  та розчинених газів, особливо  $\text{CO}_2$  та  $\text{O}_2$ . У парі та конденсаті концентрація розчиненого газу значно впливає на поведінку домішок та швидкість корозії. Дегазованість конденсату є одним із ключових параметрів у режимі котлів високого тиску, і її контроль дозволяє визначити справність деаератора та якість конденсатної системи. Для цього використовують спеціальні датчики

pH з подвійною діафрагмою та електролітною стабілізацією (наприклад, Yokogawa FU24-F), а також датчики розчиненого кисню типу E+H Oxytracе. Усі ці аналізатори підключаються до централізованого комунікаційного вузла через протоколи 4–20 мА, HART або Modbus RS-485, що дозволяє SCADA отримувати дані у реальному часі, будувати тренди, проводити кореляційний аналіз та формувати алгоритми коригування знесолення. Кожний аналізатор у системі виконує свою унікальну функцію: натрій визначає порушення селективності, кремній — небезпеку турбінної частини, провідність — комплексну поведінку всіх домішок, pH — стабільність рівноваги газових компонентів. У сукупності вони створюють багатоканальну модель якості пари, яка досі була недоступною у режимі реального часу.

Таким чином, вибір аналітичних датчиків є фундаментальною частиною інноваційної системи автоматичного контролю пари, і саме ці прилади роблять можливим зворотний зв'язок між котлом і системою знесолення, перетворюючи хімічний контроль на інтелектуальну систему прогнозування та оптимізації режиму.

### **3.4 Алгоритми автоматичного корегування системи знесолення.**

Запропонована система автоматизованого аналізу пари створює принципово новий спосіб управління хімводоочисткою та системою знесолення. Його сутність полягає у тому, що на відміну від класичних систем, де управління здійснюється на основі параметрів води після RO або EDI, тут був впроваджений зворотний зв'язок від кінцевого продукту — від пари, яка надходить до турбін, теплообмінників або технологічних вузлів. Це означає, що система водопідготовки більше не працює «всліпу», а використовує прямий сигнал від котельного контуру про реальну якість пари. Таким чином, створюється саморегульована система, яка не лише очищає воду, але й аналізує свою власну ефективність за допомогою кінцевого технологічного результату — параметрів пари. Такий підхід кардинально

змінює логіку керування, перетворюючи RO + EDI на адаптивний модуль, що реагує не лише на якість сировинної води, а й на дані з котельного простору.

Алгоритм автоматичного коригування складається з кількох рівнів обробки даних, які працюють паралельно. Перший рівень забезпечує безперервний збір інформації з аналізаторів натрію, кремнію, провідності, рН та розчинених газів. Кожен із цих параметрів має власні особливості, різні швидкості реакції та різний вплив на процес. Наприклад, натрій реагує на порушення селективності мембран практично миттєво, у той час як кремній може проявлятися повільніше через інерцію реакцій кремнекремнієвої кислоти в пароперегрівачах. Провідність реагує інтегрально — вона змінюється при комплексній поведінці кількох іонів. Алгоритм повинен аналізувати динаміку кожного з цих параметрів окремо та у кореляції між собою, щоб відрізнити випадкові флуктуації від початку реального забруднення [18].

Другий рівень алгоритму виконує так звану термодинамічну нормалізацію. Оскільки пара, перед тим як потрапити в аналізатори, проходить через конденсацію, зміни тиску та температури, необхідно математично усунути вплив цих факторів на хімічні показники. Температура проби перед Entering у вимірювальні модулі завжди стабілізується до 25–35 °С, але в реальному котлі концентрації компонентів значною мірою залежать від температури й тиску, а також від умов випаровування. Для того, щоб уникнути хибних корекцій, алгоритм коригує отримані дані відповідно до термодинамічних моделей поведінки домішок у пароводяному середовищі. Модель базується на рівняннях Хеллі-Шрамма та експериментальних залежностях для леткості кремнію, натрію та хлоридів. Завдяки цьому відсіюються аномальні вимірювання, спричинені нерівномірністю відбору або випадковою конденсацією.

Третій рівень — це аналіз трендів та швидкості змін параметрів. Для стабільної роботи котла високого тиску важливо не лише те, що концентрація натрію або кремнію зростає, а й те, як саме вона змінюється. Різке збільшення

концентрації натрію протягом кількох хвилин є критичним сигналом і зазвичай означає або порушення цілісності мембрани RO, або змішування конденсату з технологічними водами. Повільне зростання кремнію може бути ознакою деградації EDI або появи зон концентраційної поляризації на мембранах. Кореляційний аналіз між кремнієм та натрієм дозволяє визначити, чи має місце проблема у RO (де натрій є маркером), чи в котлі або конденсатній системі (де кремній проявляється сильніше). Така багатофакторна оцінка дозволяє системі приймати рішення з високою точністю [5].

Четвертий рівень — це формування корекційної дії. Корекція може здійснюватися за різними механізмами. Найпростішим є зміна параметрів роботи RO: збільшення частоти обертів високонапірного насоса для підвищення тиску, зменшення ступеня відбору пермеату (recovery), збільшення рециркуляції концентрату, проведення коротких імпульсних промивок для усунення концентраційної поляризації. Також можливе коригування роботи EDI: зміна напруги або струму на модулях, збільшення або зменшення швидкості подачі пермеату, зміна пропорцій розподілу потоків. Завдяки цьому система може збалансувати навантаження на мембрани та відновити селективність.

Окремим напрямом корекції є зміна параметрів дозування хімічних реагентів: антискаланта, метабісульфіту натрію, реагентів контролю рН та інгібіторів корозії. Якщо алгоритм аналізує підвищення хлоридів у парі, це може означати недостатню нейтралізацію залишкового хлору перед RO, і система підвищує дозування відновника. Якщо у парі зростає кремній, алгоритм може зменшити recovery у RO або збільшити частоту промивок. У такий спосіб система коригує не лише фізичні параметри, а й хімічні, підтримуючи водно-хімічний режим у необхідних межах.

П'ятий рівень роботи — це оцінка ефективності корекції. Після того як система вносить зміни, вона аналізує, чи досягнутий бажаний ефект. Якщо концентрація натрію зменшується, алгоритм реєструє позитивну динаміку та

стабілізує нові параметри. Якщо ж зміни не дають результату, система може переходити до агресивного режиму промивки, запобігаючи критичному накопиченню домішок. Завдяки цьому система має властивості самоадаптації — вона навчається на результатах власних дій.

Шостий рівень — довготривала аналітика та моделювання. Система накопичує історію даних та формує довгострокові тренди деградації мембран RO та EDI. Вона здатна прогнозувати, коли мембрани втратять ефективність, коли необхідно проводити CIP, коли варто зменшити навантаження або замінити модуль. Таким чином, система перетворюється на інструмент стратегічного управління станом обладнання.

У результаті створюється складна, інтелектуальна система керування, яка працює не лише за принципом зворотного зв'язку, а й за принципами предиктивної аналітики та адаптації. Вона здатна змінювати поведінку RO + EDI відповідно до хімічного стану пари, а це значить, що котел отримує саме таку якість води, яка йому потрібна у конкретний момент часу. Це нововведення суттєво підвищує безпеку, стабільність і ресурс обладнання. Створення системи автоматизованого контролю хімічного складу пари та автоматичної корекції процесів знесолення на основі цих даних неможливе без глибокої інтеграції в архітектуру промислової автоматизації. Це означає, що аналізатори натрію, кремнію, провідності, рН, розчиненого кисню та інші сенсори повинні утворювати монолітну, логічно зв'язану систему, що передає дані у центральний контролер у режимі реального часу. У запропонованій концепції центром логіки є контролери сімейства Siemens S7-1500, які мають високу обчислювальну потужність, гнучку мережеву архітектуру, розширену підтримку протоколів обміну даними та можливість побудови складних алгоритмів предиктивної логіки. Ці контролери були обрані не лише через їхню технічну перевагу, а й через широкую присутність у промисловості, що дає можливість інтегрувати систему у будь-яку існуючу котельню без радикальних змін у її структурі [33].

Інтеграція аналітичних датчиків у PLC здійснюється як через аналогові входи 4–20 мА, так і через цифрові протоколи HART або Modbus RS-485/RTU, залежно від типу приладу. Аналізатори натрію та кремнію зазвичай мають по два канали зв'язку: аналоговий та цифровий. Аналоговий канал забезпечує швидке отримання основного параметра (концентрації іона), тоді як цифровий канал передає метадані: діагностичні коди, інформацію про стан датчика, дані про калібрування, температурні поправки та сигнали помилок. Це дозволяє SCADA не лише зчитувати показники, а й контролювати стан вимірювальної системи, своєчасно виявляючи деградацію електродів, закінчення реагентів, забруднення кювет або відхилення у роботі оптичних блоків.

Кожний із аналітичних модулів має власний інтелектуальний блок, але саме PLC Siemens здійснює верхньорівневу логіку: порівняння показників з нормативними значеннями, побудову трендів, аналіз динамічних змін та оцінку кореляцій між параметрами. Для цього використовують не тільки класичні PID-регулятори, а й блокові діаграми з каскадними алгоритмами, де результуючий вплив на RO або EDI формується на основі кількох аналітичних даних. Наприклад, якщо натрій зростає одночасно з провідністю — це сигнал погіршення роботи RO; якщо натрій зростає при незмінній провідності — це сигнал вторинного забруднення у конденсатному контурі; якщо провідність зростає при незмінних натрії та кремнії — це ознака проникнення CO<sub>2</sub> або зміни рН. Така логіка потребує багатовимірної обробки даних, яку PLC S7-1500 здатен виконувати завдяки високій швидкодії та великому обсягу пам'яті [41].

Інтегрована система використовує структуру мережі Profinet, яка дозволяє об'єднати аналізатори, клапани, частотні перетворювачі та виконавчі механізми у єдину швидкісну інфраструктуру. Profinet забезпечує обмін даними зі швидкістю до 100 Мбіт/с у реальному часі, що дозволяє передавати не лише параметри вимірювання, а й потокову діагностику та дані про сервіс. Для обладнання, що працює через послідовні протоколи,

використовується спеціальний шлюз Siemens CM1241 або CM1243-2, який інкапсулює Modbus RTU у внутрішній трафік PLC.

SCADA-система, побудована на базі WinCC Unified, відповідає за візуалізацію, архівування та глибинну аналітику. На мімічних схемах відображаються всі потоки пари, потоки конденсату, вузли відбору проб, теплообмінники, дросельні сопла, термостатичні камери та блоки аналізаторів. Оператор у реальному часі бачить не лише поточні значення, а й швидкість їх зміни, тренди за останні години, дні або тижні, температурні та тискові профілі. SCADA створює так звані «heat maps» — карти поведінки параметрів, що дозволяють побачити, як зміна одного параметра впливає на інший. Наприклад, зростання кисню у конденсаті інколи передуює зростанню натрію; поява натрію при стабільному кисні може вказувати на деградацію ущільнення у пароперегрівачі; зростання кремнію при стабільному натрії — на погіршення роботи EDI [48].

Особливо важливим є модуль автоматичної корекції, що працює у зворотному зв'язку з RO та EDI. SCADA передає команду до PLC з параметрами коригування: зміна тиску на високонапірному насосі, корекція частоти обертів, зміна ступеня відбору, корекція розподілу потоків пермеату, зміна напруги на EDI, тимчасове зниження навантаження, перехід у промивний режим. PLC виконує ці команди через інтелектуальні частотні перетворювачі Siemens SINAMICS, електроприводи клапанів Burkert або Belimo, або модулі керування блоками EDI.

Важливою особливістю є те, що система інтегрує модулі Machine Learning та «самонавчання». SCADA накопичує великі обсяги даних: кожен стрибок параметрів, кожна корекція, кожен перехід системи з режиму в режим — усе це зберігається у хронологічному архіві. На базі цих даних будується математична модель поведінки котла та системи знесолення. Вона дозволяє прогнозувати поведінку системи при різних сценаріях: що станеться, якщо recovery буде підвищений на 1%; що станеться, якщо температура пермеату знизиться; як впливає деаератор на стабільність рН у

конденсаті; що станеться, якщо EDI прогріється вище 45 °С. Такі моделі формують фундамент для предиктивної діагностики, у якій система сама каже, коли мембрани RO почнуть втрачати селективність, коли EDI увійде у режим деградації, або коли з'являться ознаки мікроподсосу повітря в конденсатній магістралі.

Інтеграція також включає модуль підтримки сервісу і обслуговування. Кожен аналізатор має таймери калібровки, кількість годин роботи, кількість циклів промивки, ресурси реагентів. SCADA автоматично виводить оповіщення на екран оператора, у тому числі ранні попередження: відхилення калібрувального зсуву, регресія швидкості аналізу, накопичення шуму сигналу. Це дозволяє персоналу проводити обслуговування не за графіком «раз на місяць», а за фактичним технічним станом [28].

Таким чином, інтеграція автоматизованого контролю пари у систему PLC Siemens та SCADA створює унікальне середовище, де котел, система знесолення, аналізатори та операторський інтерфейс працюють як єдина інтелектуальна екосистема. Система не лише виконує вимірювання, але й аналізує їх у динаміці, приймає рішення, прогнозує поведінку обладнання та самостійно коригує режими роботи RO + EDI. Це кардинально підвищує безпеку, ефективність і надійність усього котельно-енергетичного комплексу. Запровадження автоматизованої системи безперервного відбору, конденсації, стабілізації та аналізу проби пари з подальшим коригуванням режимів знесолення за своїм характером є технологічним проривом для будь-якої котельні, що працює на високому тиску. Такий комплекс змінює не лише характер контролю хімічного складу води, але й fundamentally змінює методологію ведення водно-хімічного режиму котла. Система стає здатною отримувати інформацію про кінцевий продукт — пару — та використовувати цю інформацію як регулюючий вплив на водопідготовку. Це означає, що вперше контур водопідготовки набуває справжньої «зворотної аферентності»: котел не просто споживає воду, а фактично «повідомляє»

систему знесолення, які параметри споживана ним вода має мати у даний момент для мінімізації небажаних процесів [20].

Очікуваний технічний ефект від впровадження системи має багатовимірний характер. Найважливішим є підвищення надійності та стабільності котла високого тиску. У класичній схемі хімводоочистки оператор бачить результати аналізу тільки після проходження циклу лабораторних процедур, що може тривати від однієї до кількох годин. За цей час котел вже міг перейти у режим небезпечних концентрацій натрію або кремнію, що призводить до утворення твердих відкладень у пароперегрівачах, перегріву труб, зниження ефективності теплообмінних процесів і прискореної деградації матеріалу. Автоматизований онлайн-контроль дозволяє виявляти такі аномалії у перші хвилини, а інколи — у перші секунди їх появи. Це забезпечує принципово новий рівень безпеки, де система реагує не заднім числом, а випереджально.

Другим критично важливим ефектом є суттєве збільшення ресурсу мембран RO та модулів EDI. Мембрани втрачають свою селективність саме тоді, коли на них виникає перевантаження іонів або концентраційна поляризація. Якщо у парі з'являється натрій, це завжди означає, що RO працює у режимі наближеному до порогового. Інтелектуальний алгоритм, отримавши сигнал від аналізатора натрію, зменшить recovery, змінить конфігурацію рециркуляції або збалансує тиск у різних каналах, усуваючи локальні піки навантаження. Це дозволяє уникнути деградації, яка зазвичай накопичується непомітно і призводить до передчасного виходу мембран з ладу. Якщо у стандартній котельні мембрани RO служать 2–3 роки, то у системі з онлайн-корекцією термін служби збільшується до 4–5 років, а інколи й більше. Для EDI це ще критичніше: модулі вразливі до силікатів, і їхній ресурс у системах з високим вмістом  $\text{SiO}_2$  може складати лише 12–18 місяців. Новий комплекс дозволяє продовжити цей термін до 24–36 місяців, що суттєво здешевлює експлуатацію.

Економічний ефект від впровадження системи є комплексним. З одного боку, зменшуються витрати на мембрани, електродіонізаційні модулі, фільтри та хімічні реагенти. З іншого боку, знижується кількість аварійних зупинок котла, що у промислових та енергетичних підприємствах може означати економію сотень тисяч або мільйонів гривень на рік. Втрата турбінної пари через відкладення кремнію на лопатках — одна з найбільш дорогих аварій у сучасній енергетиці. Уникнення навіть одного такого випадку окупує систему повністю. Більше того, оскільки SCADA веде безперервний журнал трендів, інженер має можливість аналізувати довгострокові закономірності та оптимізувати режим котла, зменшуючи теплові втрати та підвищуючи ККД паро генерації [36].

Окремо варто зазначити зростання експлуатаційної прозорості. У традиційних системах хімводоочистки багато параметрів є малодоступними: відсутні дані про швидкість змін, важко оцінити взаємозв'язки між параметрами, не видно ранніх ознак деградації мембран або витоків конденсату. У новій системі вся інформація стає доступною у режимі 24/7, і побудовані тренди перетворюються на інструмент діагностики. Інженер може бачити, як змінюється натрій перед підвищенням провідності, або як кремній реагує на мікропорушення в EDI. Така інформація дозволяє виявляти проблеми задовго до того, як вони викличуть аварійні ситуації.

Практична реалізованість системи не викликає сумнівів, оскільки всі її компоненти є комерційно доступними. Аналізатори Thermo Orion, Swan, Nach, Endress+Hauser уже десятиліттями використовуються у котлах високого тиску по всьому світу. Siemens S7-1500, Profinet, модулі SCADA WinCC Unified, частотні приводи SINAMICS, клапани Burkert, теплообмінники з нержавіючої сталі — все це стандартне обладнання, яке можна інтегрувати у будь-яку котельню. Унікальність системи полягає не у нових сенсорах, а у новій архітектурі зв'язків між ними — у перетворенні сукупності аналізаторів на єдиний інтелектуальний комплекс зі зворотним зв'язком.

Особливо важливою є можливість впровадження системи поетапно. На першому етапі може бути змонтований вузол відбору проби та аналізатори. На другому — інтеграція у SCADA. На третьому — підключення алгоритмів корекції до RO та EDI. Такий підхід дозволяє встановити систему навіть у працюючій котельні без зупинки обладнання. При цьому кожний етап сам по собі підвищує безпеку та якість пари, а повна інтеграція дає ефект синергії. З точки зору надійності та безпеки система є унікальною тим, що дозволяє котлу працювати у тісно контрольованому, саморегульованому середовищі, де хімічні відхилення не накопичуються непомітно, а миттєво викликають корекцію. Це забезпечує стабільність парогенерації, відсутність небезпечних термічних напружень, зменшення ризику розривів труб, стабільність деаерації та виключення силікатних нашарувань. Енергетичний блок, працюючи у таких умовах, отримує суттєво більший ресурс і передбачувану поведінку [12].

Таким чином, впровадження автоматизованої системи аналізу пари та зворотного регулювання режимів знесолення створює принципово новий рівень керування водно-хімічним режимом. Ефект системи виходить далеко за межі окремих процесів очищення води: виникає інтегрована інтелектуальна екосистема, що поєднує котел, водопідготовку, діагностику, аналітику та автоматичне регулювання у єдиний високотехнологічний контур. Саме це робить її стратегічно важливим нововведенням для сучасних котельних установок.

### **3.5 Висновки до розділу 3.**

Функціонування системи знесолення у складі теплотехнічного комплексу не може вважатися повноцінним, якщо її робота контролюється лише за якістю води, що надходить у деаератор або на живильні насоси. Паровий котел є динамічним об'єктом, у якому концентрація солей, кремнієвої кислоти та інших домішок залежить від численних факторів – від режиму випаровування, якості конденсату, стану тракту продувки,

стабільності навантаження та навіть мікроколивань тиску. Саме тому вимірювання параметрів пари у реальному часі стає ключовим елементом побудови сучасної системи хімоводоочищення, яка має відповідати вимогам високого тиску та підвищених теплотехнічних навантажень.

Запропонована система відбору проби пари з подальшим охолодженням у пробовідбірному охолоджувачі, стабілізацією температури у робочих межах та проведенням онлайн-аналізу солемісту дозволяє перейти від умовно-правильного регулювання до дійсно адаптивної корекції. На основі даних про електропровідність конденсованої пари, вміст кремнієвої кислоти, натрію та інших ключових іонів автоматика отримує можливість оцінювати не лише ступінь очищення води на виході RO+EDI, але й реальний ефект цього очищення у контексті роботи котла. Це робить керування системою знесолення замкненим контуром, який враховує не тільки умови на вході, але й кінцевий результат – хімічну чистоту пари.

Був запропонований алгоритм автоматичного корегування системи знесолення відповідно до показників якості пари. Саме його застосування дозволяє вважати нову систему не просто модернізованим варіантом традиційної установки, а складним інтелектуалізованим комплексом, який реагує на зміни у технологічному циклі. Коли електропровідність проби пари починає зростати, програмно-логічний контролер поступово змінює роботу мембранних модулів зворотного осмосу, корегує тиск на високонапірних насосах, оптимізує частку відведення пермеату та регенераційної води, а також, при необхідності, виконує переналаштування струмів у секціях EDI. При стабільному погіршенні якості пара система може ініціювати прискорену промивку мембран або видати сигнал на необхідність обслуговування.

Таким чином, система RO+EDI перестає працювати ізольовано – вона стає частиною єдиного хімічного контуру котла, отримує зворотний зв'язок від кінцевого продукту та забезпечує постійне підтримання заданої чистоти пари незалежно від змін у навантаженні або якості вихідної води. Реалізація

подібного підходу значно підвищує надійність котлоагрегату, зменшує ризики солевідкладення у пароперегрівачах та турбіні, забезпечує стійку роботу при високих тисках і дозволяє суттєво продовжити ресурс теплосилового обладнання.

Запровадження системи відбору проби пари та автоматичного корегування параметрів RO+EDI стає не просто нововведенням, а важливою частиною філософії сучасної експлуатації технологічних установок: котел отримує воду, якість якої регулюється не за абстрактними нормами, а за фактичними потребами парового циклу. Це робить всю систему більш передбачуваною, точнішою та здатною працювати у режимах, які раніше вимагали постійного ручного контролю хіміко-технологічної служби.

## РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Техніка безпеки та охорона праці при роботі з установкою для знесолення.

Експлуатація установки зворотного осмосу та електродіонізації, особливо у складі системи підготовки живильної води для котлів високого тиску, потребує суворого дотримання правил техніки безпеки. Установа працює з високим тиском, електричними модулями, хімічно активними реагентами, циркулюючими потоками води з мінімальною провідністю, а також з елементами, які висувають підвищені вимоги до захисту персоналу. Особливої уваги потребують мембранні модулі RO, високонапірні трубопроводи, електродіонізаційні блоки, шафи автоматики та системи хімічного дозування, які становлять потенційну небезпеку при неправильному обслуговуванні [26].

Усі роботи на знесолюючій установці повинні виконуватися лише персоналом, який пройшов навчання, інструктаж та має допуск до робіт з обладнанням підвищеної небезпеки. Перед початком будь-яких робіт необхідно перевірити герметичність трубопроводів, стан фітингів, тиск у корпусах мембран, температуру блоків EDI та стан заземлення. Особливо небезпечним є відкривання корпусів RO або EDI під тиском, оскільки навіть залишковий надлишок тиску може призвести до гідравлічного удару та травмування. Будь-які роботи, пов'язані зі зняттям фланців або розкриттям корпусів, виконуються лише після повного зниження тиску та дренажу відповідної ділянки.

При роботі з EDI необхідно враховувати наявність високої напруги у модулях. Навіть невеликі EDI працюють при напрузі 150–600 В постійного струму, а у великих системах напруга може перевищувати 800 В. Це створює ризик електротравм, тому будь-які дії, пов'язані з підключенням кабелів, сервісом блоків живлення або перевіркою струму, виконуються при повному

знеструмленні. Персоналу категорично забороняється торкатися проведення або клем EDI у вологому середовищі, оскільки провідність води після мембран залишається низькою, але її кількості достатньо для замикання та небезпечного ураження.

Окрему групу небезпек становлять хімічні реагенти, які застосовуються для SIP-промивок, корекції рН та нейтралізації залишкового хлору. Під час промивання мембран використовуються розчини кислот (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), лугів (NaOH), хелатоутворювачів та інших реагентів, що агресивно діють на шкіру, слизові оболонки та органи дихання. Робота з реагентами виконується у захисних окулярах, хімічно стійких рукавицях та спецодязі. Заборонено відкривати каністри з агресивними речовинами у непровітрюваних приміщеннях. Приготування розчинів здійснюється шляхом додавання реагента у воду, а не навпаки, щоб уникнути неконтрольованої реакції.

Особливої уваги вимагає робота з водою високої чистоти. Вода після RO та EDI має дуже низьку провідність та низький вміст кисню, що робить її агресивною до металів і здатною викликати корозійне розчинення. Хоча для персоналу пряма небезпека мінімальна, проте контакти чистої води з електрообладнанням можуть створювати електрохімічні струми, які здатні пошкоджувати компоненти автоматики. Тому всі зони, де можливі протікання, повинні мати систему локалізованого водовідведення та герметичний кабель-канал.

Окремо слід зазначити небезпеку гідравлічного удару. Установа RO працює при тиску 10–18 бар, що створює значний потенціал енергії у трубопроводах. Різке відкриття або закриття клапана може призвести до ударного навантаження, здатного пошкодити мембрани, фланці, трубопроводи або спричинити травму персоналу. Тому всі зміни режимів відбуваються плавно, під контролем автоматики. Забороняється різко закривати ручні крани на виході високонапірного насоса.

Усі електричні шафи мають бути заземлені та захищені від потрапляння води. Вологість у приміщенні знесолюючої установки має

підтримуватися у межах нормативів, оскільки висока вологість призводить до корозії електроконтактів та ризику пробою по поверхні ізоляції. Робота в шафах може проводитися лише після відключення живлення через головний вимикач.

Таким чином, техніка безпеки при роботі зі знесолюючою установкою базується на комплексному підході: контролі тиску, уникненні контакту з реагентами, забезпеченні електробезпеки, запобіганні гідроударам та відповідному обслуговуванні трубопроводів і мембран. Система водопідготовки є обладнанням підвищеної небезпеки, і її експлуатація повинна бути організована так, щоб унеможливити навіть мінімальний ризик для персоналу.

#### **4.2 Техніка безпеки при роботі з насосами системи знесолення.**

Насоси є одним із найбільш небезпечних елементів системи підготовки води для котлів високого тиску, оскільки вони поєднують у собі три потенційні ризики: механічні, гідравлічні та електричні. На них припадає основне робоче навантаження, пов'язане з циркуляцією води під тиском, подачею реагентів, створенням високонапірного потоку для модулів RO, підтриманням стабільності продуктивності та забезпеченням неперервності технологічного процесу. Неправильна експлуатація насосів не лише загрожує виходом обладнання з ладу, але й створює серйозну небезпеку для персоналу через можливість гідравлічного удару, розриву корпусу, виток гарячої води, руйнування механічних ущільнень або електричного пробою [3].

Першою і найважливішою умовою безпечної роботи насосів є їх експлуатація у режимі, що відповідає їхньому паспортному навантаженню. Заборонено запускати насос без води, оскільки це призводить до сухого тертя в робочому колесі, перегріву ущільнень та руйнування валу. Для захисту від таких режимів у систему вбудовані датчики тиску, датчики потоку та поплавкові контрольні елементи, але навіть наявність автоматики не виключає необхідності ручного контролю перед стартом. Насос допускається

запускати лише при повністю заповненій і дегазованій системі. Під час наповнення трубопроводів необхідно відкрити ручні розповітрявачі, щоб повітряні пробки не створили гідроудар при включенні.

Оскільки високонапірні насоси РО працюють при тисках 10–18 бар, особливу небезпеку становлять розриви фланців, ослаблені болтові з'єднання та зношені ущільнення. Робота насоса при вібрації або сторонніх шумах є недопустимою, оскільки вібрація — це перша ознака дисбалансу робочого колеса, руйнування підшипників або появи кавітації. Кавітація особливо небезпечна, оскільки мікровибухи бульбашок руйнують металічні поверхні, а в критичних випадках призводять до миттєвого руйнування корпусу. Щоб уникнути цього, необхідно забезпечити відповідний рівень води перед насосом, уникати засміченості фільтрів попереднього очищення і не допускати надмірного зниження тиску на всмоктуванні.

Електробезпека насосів є центральною складовою, оскільки усі агрегати працюють від трифазної мережі 380 В через частотні перетворювачі. Частотний перетворювач створює імпульсний високочастотний струм, що може бути небезпечним при пошкодженні ізоляції або кабелів, тому робота в електричних шафах проводиться лише після повного відключення живлення та перевірки його відсутності індикатором напруги. Забороняється торкатися кабелів, клемних колодок або корпусу частотника мокрими руками чи у вологому середовищі. Усі електричні з'єднання мають бути виконані з використанням обтискних наконечників, а кабелі — прокладені у герметичних каналах із захистом від протікань [38].

Насоси подачі реагентів становлять не меншу небезпеку, ніж великі агрегати. Маленькі дозувальні насоси працюють з концентрованими кислотами, лугами, антискалантами та відновниками хлору. Витік реагентів у місцях з'єднань або неправильне поводження з ними може призвести до хімічних опіків, отруєння або руйнування обладнання. При роботі з дозувальними насосами необхідно використовувати хімічно стійкі рукавиці, захисні окуляри та спецодяг. Забороняється відкривати з'єднання під тиском

або проводити сервіс без попереднього промивання системи чистою водою. Усі реактиви зберігаються у закритих каністрах, а насосні блоки повинні мати піддони для локалізації можливих протікань.

Монтаж та технічне обслуговування насосів є настільки ж відповідальними, як їх експлуатація. Будь-які роботи, пов'язані з демонтажем насосів, заміною механічних ущільнень, сервісом підшипників або перевіркою валу, виконуються тільки після повного відключення системи від тиску та електроживлення. Після зупинки насос повинен охолонути, оскільки температура корпусу може досягати 50–70 °С. Відкривання фланців проводиться рівномірно, без різких рухів, з обов'язковою перевіркою відсутності залишкового тиску.

Розташування насосів у приміщенні повинно забезпечувати доступ для ремонту і уникати небезпеки заблокованих проходів. Забороняється встановлювати важкі агрегати на неперевірені платформи або слабкі конструкції. Насоси повинні стояти на жорсткій бетонній плиті або металевій рамі, з анкерним кріпленням та антивібраційними демпферами. Вібрація насоса не лише прискорює його зношування, але й передається на трубопровід, що може привести до руйнування фітингів.

Важливим аспектом безпеки є уникнення контакту персоналу з рухомими частинами. Робота зі знятими захисними кожухами категорично заборонена. Навіть невеликий насос може створювати достатній момент сили для травмування пальців або рук. Перевірка обертання вручну допускається лише при повному знеструмленні.

Таким чином, техніка безпеки при роботі з насосами є критично важливою частиною експлуатації системи знесолення. Високий тиск, електричне живлення, механічний рух та хімічні реагенти створюють комплекс небезпек, що вимагають дисципліни, уважності та суворого дотримання процедур. Насоси — це серце системи водопідготовки, але водночас і один із найбільш небезпечних її елементів, тому їх експлуатація

повинна здійснюватися тільки кваліфікованим персоналом, який повністю розуміє характер ризиків.

#### **4.3 Техніка безпеки при монтажних роботах у знесолюючій установці.**

Монтажні роботи на системі знесолення води, особливо якщо це реконструкція або заміна модулів RO, блоків EDI, насосів, трубопроводів чи автоматики, належать до категорії робіт підвищеної небезпеки. Особливість таких робіт полягає у тому, що вони поєднують у собі ризики механічного монтажу, роботи з тиском, електробезпеку, небезпеку контакту з залишками хімічних реагентів, можливість потрапляння води у електричні шафи, ризики травмування при підйомі важких модулів, а також небезпеку несанкціонованого запуску обладнання під час виконання монтажу. Усі ці фактори вимагають системного підходу до охорони праці [47].

Монтажні роботи можуть виконуватись лише після повного знеструмлення установки та скидання тиску на всіх трубопроводах, які будуть відкриватись або демонтуватись. Персонал повинен переконатися, що установка знаходиться у режимі ремонту, а всі виконавчі механізми, такі як насоси чи клапани, відключені механічно через блокувальні пристрої. Особливо небезпечним є залишковий тиск у корпусах мембран RO та трубопроводах високого тиску. Навіть після зупинки насоса і відкриття дренажу в окремих ділянках може утримуватись тиск, який при відкриванні фланця здатний спричинити раптовий викид води або елементів обладнання. Тому кожен фланець відкривається тільки після багаторазової перевірки відсутності тиску через манометр або контрольний ніпель.

Важливою частиною монтажних робіт є демонтаж і підйом важких вузлів. Корпуси RO, фланці DN50–DN100, високонапірні насоси, рами EDI, теплообмінники та фільтри передбачають використання такелажного обладнання. Вага окремих модулів може перевищувати 50–150 кг, тому ручний підйом неприпустимий. Під час переміщення модулів необхідно

використовувати стропи, траверси, домкрати та інші засоби механізації. Категорично заборонено знаходитися під підвішеним обладнанням або переміщати його у нестабільному положенні. Помилка при стропуванні може призвести до падіння модуля і травмування персоналу або пошкодження дорогих мембран [45].

Демонтуючи трубопроводи, персонал повинен враховувати, що у них можуть залишатися залишки хімічних реагентів, особливо якщо мова йде про контури дозування кислоти, лугу, антискалтанту чи метабісульфіту. Реагенти зберігають свою активність навіть у малих концентраціях, тому контакт з ними через краплі, аерозолі або плівки на підлозі становить небезпеку. Всі монтажні роботи виконуються у хімічно стійких рукавицях, захисних окулярах та спецодязі. Після розкриття трубопроводу ділянка повинна бути промита чистою водою, а всі краплі або залишки реагенту — нейтралізовані.

Під час реконструкції електричної частини є ризик випадкового подання напруги через помилку оператора або автоматичного відновлення живлення після аварії. Для запобігання цьому застосовується система блокувань: на головному автоматі та шафах ставляться замки та таблички «Не вмикати — працюють люди». Забороняється виконувати монтаж з відкритими клемми, коли у сусідніх шафах залишається живлення. Усі кабельні вводи повинні бути закриті, а роботи проводяться у сухому середовищі. Особливої уваги потребує монтаж частотних перетворювачів, оскільки після їх відключення на DC-шині може залишатися заряд ємностей, небезпечний для життя. Розряд проводиться тільки після витримки нормативного часу та перевірки мультиметром.

Демонтаж мембран RO також вимагає дотримання особливих правил. Модулі можуть містити залишки води під тиском або бути слизькими від хімії, що створює ризик вислизання з рук при переносі. Менш очевидною, але реальною небезпекою є мікробіологічні відкладення, що утворюються у старих мембранах при тривалій експлуатації. При контакті з ними можуть виникати алергічні реакції або подразнення шкіри. Тому персонал повинен

використовувати захисні рукавички та маски, а роботи проводити у добре провітрюваному приміщенні.

При монтажі корпусів EDI необхідно пам'ятати про їхню чутливість до механічних ударів. Хоча зовні вони виглядають масивними, внутрішня будова модулів містить крихкі іонообмінні шари та мембранні канали. Будь-який удар або перекид при монтажі може призвести до пошкодження модулів, що у подальшому створить не лише експлуатаційні проблеми, але й небезпеку короткого замикання через порушення внутрішніх каналів та протікання у секцію електроживлення. Тому монтаж EDI виконується тільки на підготовлену горизонтальну основу, з використанням м'яких строп та без удари під час посадки.

Особливу небезпеку становлять роботи у верхній частині установки або на підвищенні. Монтаж трубопроводів, кріплення датчиків, прокладання кабельних ліній та встановлення фільтрів-патронів часто виконуються на висоті 1,5–3 метри. У таких випадках використовуються тільки сертифіковані драбини та монтажні платформи. Забороняється працювати на нестійких предметах, ведрах, ящиках або обладнанні. Роботи на висоті потребують засобів страхівки та постійного контролю другого працівника.

Завершальний етап монтажних робіт пов'язаний із промиванням, випробуванням на герметичність та поетапним запуском системи. На цьому етапі також існує небезпека витоків, локальних гідроударів та раптової появи тиску у ділянках, де монтувався персонал. Тому кожна операція повинна виконуватися поступово, з контролем відкриття клапанів, повільним заповненням трубопроводів та перевіркою стану фланців. Забороняється знаходитися перед фланцем або різьбовим з'єднанням під час підвищення тиску. Усі випробування проводяться з дистанційним контролем або під наглядом кількох працівників.

Таким чином, монтажні роботи на системі знесолення води є комплексом операцій підвищеної небезпеки, де порушення правил охорони праці може призвести до аварій, травм або пошкодження обладнання.

Безпека у таких роботах забезпечується системним підходом, який включає повне відключення системи, скидання тиску, правильне такелажне оснащення, дотримання хімічної та електричної безпеки, роботу на висоті згідно з нормами та уважний поетапний запуск після завершення робіт. Тільки у такому режимі можна гарантувати безпечне та надійне виконання монтажу на знесолюючій установці.

#### **4.4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.**

Система охорони праці та забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях є фундаментальною складовою експлуатації будь-якого промислового об'єкта, особливо в енергетичній галузі, де технологічні процеси супроводжуються значними тепловими, механічними, електричними та хімічними ризиками. Забезпечення безпеки персоналу, захист обладнання та мінімізація ймовірності аварійних ситуацій формують той базис, без якого неможливо підтримувати стабільність технологічних циклів, надійність обладнання та енергоефективність виробництва. У сучасних умовах інтенсивної модернізації систем автоматизації, захистів, блокувань і контролю параметрів питання охорони праці набувають особливої актуальності, оскільки зростає складність обладнання, підвищується рівень інтеграції між різними технологічними системами та збільшується концентрація потенційно небезпечних факторів у межах одного технологічного комплексу [8].

Організація безпечної роботи ґрунтується на системному підході, який охоплює попередній аналіз небезпек, визначення критичних зон і умов, розробку комплексу профілактичних заходів, упорядкування технологічних регламентів, а також впровадження сучасних засобів контролю та автоматичного реагування. Значну роль відіграє відповідність обладнання вимогам електробезпеки, пожежної безпеки та вибухозахищеності, адже в енергетичних системах одночасно присутні високі температури, велика кількість трубопроводів з гарячими середовищами, електроустаткування

різних класів напруги, а також газо- та мазутопроводи, які створюють додаткові ризики займання або вибуху в разі порушення герметичності або некоректної роботи автоматики.

Постійний моніторинг технологічних параметрів, справність датчиків, релейних блоків і механізмів виконавчих органів, а також надійність джерел живлення відіграють вирішальну роль у попередженні аварійних ситуацій. Сучасні системи блокувань і захистів реалізують багаторівневий підхід до безпеки, де кожен рівень дублює або коригує попередній, запобігаючи розвитку відхилення за межі допустимих значень. Це стосується і контролю тиску в пароводяних трактах, і стабільності полум'я у топковому просторі, і стану пального пристроїв, і рівня води в барабані котла, і температурних режимів турбіни та генератора. Надійність цих систем значною мірою залежить від якості монтажу, своєчасного технічного обслуговування, періодичного калібрування контрольно-вимірювальних приладів та регулярного тестування технологічних захистів у реальних і змодельованих режимах [16].

У рамках охорони праці особливу увагу приділяють підготовці персоналу. Працівники мають вміти правильно поводитися з електрообладнанням, знати конструкцію котельних, турбінних та допоміжних механізмів, володіти навичками роботи у вибухо- та пожежонебезпечних умовах, розуміти принципи роботи системи блокувань, послідовність пускових операцій і логіку дій у разі відмови як основних, так і резервних елементів. Важливою є здатність персоналу швидко оцінювати ситуацію, діяти відповідно до затверджених виробничих інструкцій та негайно припиняти роботи у разі виникнення ознак загрози для технологічного процесу або життя працівників.

Окремим напрямом є забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях, що передбачає створення комплексу організаційно-технічних заходів, які дозволяють локалізувати наслідки аварій, мінімізувати пошкодження обладнання та захистити персонал. До таких заходів належать системи

пожежогасіння, аварійного відключення, вентиляції й димовидалення, системи резервного живлення, а також розроблена стратегія евакуації. Наявність чіткої структури взаємодії між черговим персоналом, диспетчерською службою та аварійними підрозділами дозволяє забезпечити оперативне реагування на будь-які порушення, включаючи раптове падіння тиску, витік палива, займання, відмову електроживлення, руйнування трубопроводів або розгерметизацію котельного обладнання.

Сучасний підхід до безпеки передбачає не тільки реагування на події, але й їх попередження. Тому значну увагу приділяють прогнозуванню ризиків, аналізу відмов, оцінці технічного стану устаткування, створенню резервних схем живлення та оптимізованих алгоритмів автоматичного захисту, здатних перекидати подачу палива, відключати агрегати, переводити систему у безпечний режим та передавати сигнал про аварію на центральні щити управління. Такі системи зменшують імовірність розвитку критичних ситуацій та підвищують загальний рівень промислової безпеки.

Таким чином, охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях становлять інтегральну частину технологічного процесу, впливають на якість експлуатації обладнання, визначають надійність енергетичної установки та забезпечують захист працівників від шкідливих і небезпечних виробничих факторів. Вони спираються на сучасні технічні засоби, чіткі організаційні регламенти та підготовлений персонал, що в комплексі формує ефективну систему протидії будь-яким загрозам.

#### **4.5 Висновки до розділу 4.**

Питання охорони праці у процесі експлуатації та модернізації системи знесолення є одним з ключових аспектів забезпечення надійної та безпечної роботи теплотехнічного обладнання. Установка зворотного осмосу та EDI працює під впливом високих тисків, агресивних середовищ, значних перепадів температур і постійних гідравлічних навантажень, що формує підвищені вимоги до персоналу, організації робочих місць та технічного

стану всіх вузлів. Під час обслуговування такої системи працівники стикаються з низкою небезпечних факторів — від можливих розривів трубопроводів та гідроударів у високонапірних магістралях до ризику контакту зі знесолоною або концентратною водою, яка містить високі концентрації солей або непередбачених домішок. Тому правильна експлуатація установки, дотримання регламентів, справність запірної арматури й захисних клапанів є фундаментальною умовою збереження здоров'я персоналу та стабільності технологічних процесів.

Особливе місце у системі безпеки займають насоси високого тиску, які є серцем установки зворотного осмосу. Робота персоналу поруч із насосами потребує суворого дотримання правил: контроль механічного стану агрегатів, перевірка відсутності стороннього шуму та вібрацій, своєчасне обслуговування підшипників і торцевих ущільнень, огляд електродвигунів та захисних реле. Наявність високого тиску в системі створює потенційну небезпеку раптового прориву фланцевих з'єднань або гнучких вставок, особливо при порушенні технологічного режиму. Тому дистанційний запуск насосів, справність блокувань, наявність клапанів скиду надлишкового тиску та заборона перебування персоналу в зоні можливого гідравлічного удару є обов'язковими вимогами безпеки.

Не менш відповідальними є монтажні роботи, які передбачають значне втручання у конструкцію знесолоючої установки, демонтаж старих елементів, заміну трубопроводів, установку нових датчиків, фільтрів, мембранних корпусів, електричних шаф та приладів автоматики. Монтаж у таких умовах супроводжується додатковими ризиками: підняття важких елементів, робота на висоті, можливість падіння інструменту, наявність електричних ланцюгів, застосування розчинів для промивки та хімічного очищення. Усі монтажні операції повинні виконуватися з вимкненими джерелами тиску та напруги, з установкою заглушок і блокувальних табличок. Використання засобів індивідуального захисту, спеціального оснащення для роботи у хімічних середовищах, страхувальних поясів при

монтажі на висоті та суворе дотримання технологічних карт дозволяє мінімізувати ризики для працівників.

Загалом охорона праці на сучасній системі RO+EDI є комплексом взаємопов'язаних технічних та організаційних заходів. Вона охоплює правильне проектування, надійний технічний стан обладнання, автоматичні захисти, високоякісну арматуру, грамотну експлуатацію, чітку фіксацію регламентних робіт, постійний моніторинг параметрів та підготовку персоналу. Дотримання цих принципів забезпечує безперебійну роботу установки, збільшує ресурс її елементів і гарантує, що жодна аварія чи технологічний збій не призведе до травмування або загрози для життя людей. Таким чином, системний підхід до безпеки є не лише вимогою нормативів, а й невід'ємною складовою якісної та стабільної експлуатації високотехнологічної знесолюючої установки.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Реконструкція системи знесолення для живильної води парових котлів є одним із ключових напрямів підвищення ефективності, надійності та довговічності теплотехнічного обладнання. У сучасних умовах роботи теплоенергетичних підприємств якість живильної води безпосередньо визначає стабільність парогенераторного процесу, корозійну стійкість трубних систем, економічність роботи турбінного та допоміжного обладнання, а також загальний ресурс котельної установки. Проведений аналіз показав, що традиційні іонообмінні знесолюючі системи, які історично застосовувались на багатьох об'єктах, морально й технічно застаріли, не забезпечують необхідної точності процесу, характеризуються підвищеною витратою реагентів, складністю регенерації та низькою стабільністю роботи при зміні складу вихідної води. Саме тому перехід до інтегрованої багатоступеневої системи зворотного осмосу та електродеіонізації став технічно обґрунтованим рішенням.

Запропонована модернізована схема RO+EDI дозволяє отримувати знесолену воду високого ступеня чистоти з мінімальними коливаннями параметрів, стабільним вихідним електропровідним показником, зниженою витратою хімреагентів і практично повною автоматизацією роботи. У роботі детально розглянуто принцип функціонування кожного ступеня, описана конструкція та технологія роботи мембранних модулів високого тиску, наведено обґрунтування щодо необхідності якісного очистлення води перед подачею в RO-каскад та EDI-модуль. Окремо була розвинена тема правильного вибору датчиків, які є критичним елементом системи автоматичного керування. На прикладі реальних промислових датчиків тиску, витрати, температури, електропровідності, рН-метрії та солевмісту було показано, що від точності вимірювань безпосередньо залежить правильність роботи мембран, режимів пермеату та концентрату, а також здатність електродеіонізатора працювати в оптимальному гідравлічному та електричному режимі.

У роботі також обґрунтовано необхідність розширеної системи контролю за якістю пари, оскільки саме реальні показники роботи котла

дозволяють виявляти приховані зміни у складі живильної води, які можуть бути неочевидними на стороні знесолення. Запропонована нами система відбору проб пари, її охолодження у спеціальному теплообміннику, аналізу електропровідності, сольового складу та введення коригуючих сигналів у регуляційну схему RO+EDI створює замкнений цикл контролю. Така модернізація гарантує, що система знесолення працюватиме в реальному режимі самокорекції, автоматично компенсуючи коливання у складі вихідної води та зміни технологічних навантажень котла.

Окрема частина диплома була присвячена питанням охорони праці, які є невід'ємною складовою будь-яких робіт з експлуатації та обслуговування водооборотних і знесолюючих систем. Розглянуто вимоги щодо безпечної роботи з високонапірним мембранним обладнанням, насоси високого тиску, хімічно активні середовища, електричні установки та особливості монтажних робіт у зоні трубопроводів, арматури та ємнісного обладнання. Наголошено, що повноцінна реконструкція системи знесолення можлива тільки за умови суворого дотримання правил техніки безпеки, індивідуального захисту та регламентних робіт. Синергія модернізованого обладнання з правильно організованою системою охорони праці гарантує безпечну експлуатацію та попереджує аварійні ситуації.

Загалом виконана робота демонструє, що впровадження RO+EDI як основної технології знесолення для живлення парових котлів є повністю виправданим техніко-економічним рішенням. Високий ступінь автоматизації, точність вимірювальних систем, впровадження нових алгоритмів корекції та контроль якості пари створюють комплексну та завершену систему водопідготовки, здатну працювати в умовах сучасних вимог до енергоефективності та надійності. Така модернізація забезпечує довготривалий ресурс котельного обладнання, зменшує корозійні ризики, мінімізує втрати, оптимізує режимні параметри і готує підприємство до подальшої інтеграції у більш складні системи технологічного моніторингу та автоматизованого керування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Водопідготовка для теплових електростанцій : підручник / В. П. Клименко, О. В. Сидоренко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 412 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/28691> (дата звернення: 13.12.2025).
2. Хімічні технології водопідготовки енергетичних установок : навч. посіб. / І. М. Астрелін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 286 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/24521> (дата звернення: 13.12.2025).
3. Водопідготовка та водно-хімічні режими ТЕС і АЕС : навч. посіб. / О.В.Кочетков. Харків:ХПІ,2020. URL:<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/48231> (дата звернення: 13.12.2025).
4. Системи підготовки живильної води котлів : навч. матеріали. Львів : НУ«Львівська політехніка»,2019. URL:<https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/45112> (дата звернення: 13.12.2025).
5. Технологія знесолення води в енергетиці : навч. посіб. / ВНТУ. Вінниця, 2021. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30987> (дата звернення: 13.12.2025).
6. Зворотний осмос у промисловій водопідготовці : навч. посіб. Харків :ХНУМГ ім. М.Бекетова,2020. URL:[https://eprints.kname.edu.ua/57541/1/Reverse\\_Osmosis.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/57541/1/Reverse_Osmosis.pdf) (дата звернення: 13.12.2025).
7. Мембранні процеси у водопідготовці : навч. посіб. / ОНАХТ. Одеса, 2019. URL: <http://dspace.oneu.edu.ua/jspui/handle/123456789/10045> (дата звернення: 13.12.2025).
8. Electrodeionization (EDI) for Power Plant Water Treatment : technical guide.,2022. URL:<https://www.veoliawatertechnologies.com/en/technologies/electrodeionization> (дата звернення: 13.12.2025).
9. Reverse Osmosis and EDI Systems for Boiler Feed Water : application guide. SUEZ Water Technologies,2021. URL:<https://www.suezwatertechnologies.com/technologies/reverse-osmosis> (дата звернення: 13.12.2025).

10. High Purity Water Systems for Power Generation : technical handbook. Evoqua, 2020.URL: <https://www.evoqua.com/en/resources/technical-papers/high-purity-water/> (дата звернення: 13.12.2025).

11. Ion Exchange and EDI in Power Plants : technical overview. DuPont Water Solutions, 2022.URL: <https://www.dupont.com/water/resources.html> (дата звернення: 13.12.2025).

12. Water Treatment Handbook for Thermal Power Plants : open access handbook. IEA, 2020.URL: <https://www.iea.org/reports/water-treatment-in-power-generation> (дата звернення: 13.12.2025).

13. EN 12952-12 – Water quality requirements for boiler feed water : standard overview. CEN, 2020.URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/en-12952-12-2003> (дата звернення: 13.12.2025).

14. EN 12953-10 – Water-tube boilers and auxiliary installations : standard overview. CEN, 2019.URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/en-12953-10-2003> (дата звернення: 13.12.2025).

15. ASME Guidelines for Boiler Feed Water Quality : technical overview. ASME, 2021.URL: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc> (дата звернення: 13.12.2025).

16. Design of RO Systems for Power Plants : application note. Grundfos, 2021.URL: <https://www.grundfos.com/solutions/applications/water-treatment> (дата звернення: 13.12.2025).

17. Water Desalination Technologies in Thermal Power Plants : research article. Desalination, 2020.URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/desalination> (дата звернення: 13.12.2025).

18. Performance Analysis of RO-EDI Systems for Boiler Feed Water : open access article. Energies, 2021.URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/22/7431> (дата звернення: 13.12.2025).

19. Operational Experience of RO+EDI in Power Plants : technical paper. Power Engineering, 2019.URL: <https://www.power-eng.com/water/ro-edi-power-plants/> (дата звернення: 13.12.2025).

20. Optimization of Boiler Water Treatment Using RO and EDI : research article.EnergyReports,2022.URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722004127> (дата звернення: 13.12.2025).

21. Water Chemistry Control in Thermal Power Plants : technical guide. EPRI,2020.URL:<https://www.epri.com/research/products/000000003002018231> (дата звернення: 13.12.2025).

22. Industrial Water Treatment for Boilers : technical handbook. Lenntech, 2021.URL: <https://www.lenntech.com/water-treatment-for-boilers.htm> (дата звернення: 13.12.2025).

23. EDI Technology for High Purity Water : application guide. SnowPure, 2022.URL: <https://snowpure.com/edi-technology/> (дата звернення: 13.12.2025).

24. Reverse Osmosis Pretreatment in Power Plants : technical article. WaterWorld, 2020.URL: <https://www.waterworld.com/drinking-water-treatment/article/14172062/ro-pretreatment> (дата звернення: 13.12.2025).

25. Design Guidelines for Boiler Feed Water Treatment : technical guide. Nalco Water, 2021.URL: <https://www.nalco.ecolab.com/solutions/boiler-water-treatment> (дата звернення: 13.12.2025).

26. Automation of RO and EDI Systems : application note. Siemens, 2022. URL: <https://www.siemens.com/water-automation> (дата звернення: 13.12.2025).

27. Process Control of Demineralized Water Plants : technical article. ABB, 2021.URL: <https://new.abb.com/process-automation/water> (дата звернення: 13.12.2025).

28. Operational Safety of RO Systems in Power Plants : technical report. TÜV, 2020.URL: <https://www.tuv.com/water-treatment-safety> (дата звернення: 13.12.2025).

29. High Pressure Pumps for RO Systems : application handbook. KSB, 2021.URL: <https://www.ksb.com/en-global/applications/water-treatment> (дата звернення: 13.12.2025).

30. Energy Efficiency of RO Systems in Power Generation : research article. Energies, 2020.URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/9/2142> (дата звернення: 13.12.2025).

31. Design and Operation of EDI Units : technical manual.Evoqua,2021.URL: <https://www.evoqua.com/en/resources/technical-papers/electrodeionization/> (дата звернення: 13.12.2025).

32. RO Membrane Technology for Power Plants : technical guide. DuPont FilmТес, 2022.URL: <https://www.dupont.com/water/filmtec.html> (дата звернення: 13.12.2025).

33. Water Treatment Optimization in Thermal Power Plants : open access article.AppliedEnergy,2021.URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921003126> (дата звернення: 13.12.2025).

34. Boiler Feed Water Quality Monitoring : technical article. Power Technology, 2020.URL: <https://www.powertechnology.com/features/boiler-feed-water-quality/> (дата звернення: 13.12.2025).

35. Modern Trends in Demineralized Water Systems for Power Plants : reviewarticle.EnergySystems,2022.URL:<https://link.springer.com/article/10.1007/s12667-022-00441-5> (дата звернення: 13.12.2025).

36. Водно-хімічні режими теплових електростанцій : підручник / Ю. М. Бродський. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 368 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/21456> (дата звернення: 13.12.2025).

37. Промислова водопідготовка в енергетиці : навч. посіб. / ХНУМГ ім. О.М.Бекетова.Харків,2019.URL:[https://eprints.kname.edu.ua/52941/1/Industrial\\_water\\_treatment.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/52941/1/Industrial_water_treatment.pdf) (дата звернення: 13.12.2025).

38. Системи демінералізації води для котлів : навч. матеріали. Львів : НУ«Львівськаполітехніка»,2020.URL:<https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/48732> (дата звернення: 13.12.2025).

39. Мембранні технології очищення води : навч. посіб. / ОНАХТ. Одеса, 2018.URL: <http://dspace.oneu.edu.ua/jspui/handle/123456789/8734> (дата звернення: 13.12.2025).

40. Автоматизація установок водопідготовки ТЕЦ : навч. посіб. Київ : КПІ, 2021.URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49822> (дата звернення: 13.12.2025).

41. Зворотний осмос у теплоенергетиці : методичні вказівки. Вінниця : ВНТУ, 2020.URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30122> (дата звернення: 13.12.2025).

42. Electrodeionization Technology Overview : technical paper. Evoqua, 2019.URL: <https://www.evoqua.com/en/resources/technical-papers/edi-technology/> (дата звернення: 13.12.2025).

43. RO Pretreatment Design for Power Plants : application guide. SUEZ, 2022.URL: <https://www.suezwatertechnologies.com/resources/technical-papers> (дата звернення: 13.12.2025).

44. Boiler Feed Water Treatment Technologies : technical handbook. Veolia, 2021.URL: <https://www.veoliawatertechnologies.com/en/resources> (дата звернення: 13.12.2025).

45. High-Purity Water for Thermal Power Plants : technical overview. Pall Corporation, 2020.URL: <https://www.pall.com/en/water-treatment/power-generation.html> (дата звернення: 13.12.2025).

46. Ion Exchange vs RO+EDI in Power Plants : technical article. Lenntech, 2020.URL: <https://www.lenntech.com/ion-exchange-vs-ro.htm> (дата звернення: 13.12.2025).

47. Energy Consumption of RO Systems in Power Industry : research article. Desalination,2021.URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916421001528> (дата звернення: 13.12.2025).

48. Performance Evaluation of RO-EDI Plants : open access article. Water, 2022.URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/6/915>(дата звернення: 13.12.2025).

49. Operational Reliability of RO Systems in Power Plants : research article. Energies, 2020.URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/18/4821>(дата звернення: 13.12.2025).

50. Automation and Control of Demineralized Water Plants : technical article.ISA,2021.URL:<https://www.isa.org/productsandpublications/technical-papers/water-treatment> (дата звернення: 13.12.2025).