

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет технологій і дизайну
Кафедра хімії та хімічної інженерії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Удосконалення технології водопідготовки на атомних електростанціях на

прикладі ХАЕС

Назва теми

Рівень вищої освіти другий магістерський

Галузь знань 16 – «Хімічна інженерія та біоінженерія»

Спеціальність 161 – «Хімічні технології та інженерія»

Освітня програма «Хімічні технології та інженерія»

Шифр КРМХТІ. 2023166.23.14.00

Виконав студент 2 курсу група ХТІмз-23-1


Підпис

Марина МІХАЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: канд. техн. наук, доцент
Науковий ступінь, звання


Підпис

Тетяна ІВАНШЕНА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер


Підпис

Олександр СТРЕМЕЦЬКИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри хімії та хімічної інженерії


Підпис

Ольга ПАРАСКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Хмельницький 2024

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет технологій і дизайну

Кафедра хімії та хімічної інженерії

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 16 Хімічна інженерія та біоінженерія

Шифр і назва

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

Шифр і назва

Освітня програма Хімічні технології та інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

Ольга ПАРАСКА

«26» серпня 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

МІХАЙ Марина

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Поліпшення якості водо підготовки на атомних електростанціях на прикладі ХАЕС

Керівник проєкту (роботи) ІВАНІШЕНА Тетяна Володимирівна
канд.техн.наук, доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26.08.2024 р. № 60

2. Строк подання здобувачем роботи на кафедру 10.12.2024р.

3. Вихідні дані до роботи аміачно-калієвий водно-хімічний режим першого контуру, процес утворення радіоактивних відходів, система водо очистки, характеристика системи водо очистки на ХАЕС.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд джерел науково технічної інформації (аналіз існуючого рівня технологій, техніки теорії виявлення не вирішених питань), характеристика цеху з водо підготовки атомних електростанцій, аналіз технології водо підготовки, технологічна частина.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Функціональна схема СВО 1 – СВО 7, графік зміни концентрації аміаку і водню в теплоносії протягом однієї паливної компанії, графік залежності концентрації аміаку і водню від рівня потужності реактора в режимі маневрування, графік залежності сумарної молярної концентрації іонів лужних металів (K, Li, Na) в теплоносії першого контуру від поточної концентрації

борної кислоти, схема утворення рідких радіоактивних відходів, графік підтримки водно хімічного режиму при роботі в базовому режимі та режимі маневрування, порівняльний аналіз міжнародних та вітчизняних систем водоочистки на атомних електростанціях, порівняльний аналіз міжнародних та вітчизняних систем водоочистки на атомних електростанціях, запропонована схема поліпшення якості систем водоочищення.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Огляд джерел науково-технічної інформації	ІВАНШЕНА Тетяна, декан ФТіД, доцент		
Технологічна частина	ІВАНШЕНА Тетяна, декан ФТіД, доцент		

7. Дата видачі завдання 22 серпня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділу) етапу кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапу кваліфікаційної роботи	Примітка
Вступ	до 16.09.2024	Виконано
1 Огляд джерел науково-технічної інформації(аналіз існуючого рівня технологій, техніки теорії, виявлення невирішених питань).	до 16.09.2024	Виконано
1.1 Характеристика цеху з водопідготовки атомних електростанцій	до 16.09.2024	Виконано
1.2 Аналіз технологій водопідготовки	до 01.10.2024	Виконано
2 Технологічна частина	до 01.10.2024	Виконано
2.1 Використання іонообмінних смол та накопичення рідких радіоактивних відходів (РРВ)	до 01.11.2024	Виконано
2.2 Корозія обладнання та активність першого контуру реакторної установки	до 01.12.2024	Виконано
2.3 Радіоактивні викиди: тритій та вуглець	до 01.12.2024	Виконано
Висновки	до 10.12.2024	Виконано

Здобувач

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис

Підпис

Марина МІХАЙ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Тетяна ІВАНШЕНА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Анотація

Кваліфікаційна робота на тему: Поліпшення якості водо підготовки на атомних електростанціях на прикладі ХАЕС.

Автор роботи – здобувач гр. ХТІмз-23-1

Марина МІХАЙ

Керівник роботи – кандидат тех.наук, доцент

Тетяна ІВАНІШЕНА

Обсяг кваліфікаційної роботи 75 сторінки, 13 таблиць, 18 рисунків, 21 джерела посилання, графічної частини 12 слайдів виконаних у програмі презентації.

Ключові слова: ВОДНО-ХІМІЧНИЙ РЕЖИМ, СПЕЦВОДООЧИЩЕННЯ, РІДКІ РАДІОАКТИВНІ ВІДХОДИ, ЛІТІЙ-ВОДНЕВИЙ РЕЖИМ.

Мета роботи: поліпшення якості водо підготовки на вітчизняних АЕС шляхом заміни водно хімічного режиму для зниження корозійного впливу на обладнання першого контуру, зменшення утворення рідких радіоактивних відходів та викидів в навколишнє середовище.

Розглянуто особливості ведення водно-хімічного режиму на вітчизняних АЕС та на АЕС Емсланд. Проведено аналіз переваг переходу з аміачно-калієвого водно-хімічного режиму на літій-водневий. Запропоновано перехід на літій водневий водно-хімічний режим.

Здобувачка вищої освіти групи ХТІмз-23-1

Марина МІХАЙ

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Огляд джерел науково-технічної інформації.....	9
1.1 Характеристика цеху з водопідготовки атомних електростанцій.....	9
1.2 Аналіз технологій водопідготовки.....	25
2 Технологічна частина.....	47
2.1 Використання іонообмінних смол та накопичення рідких радіоактивних відходів.....	47
2.2 Корозія обладнання та активність першого контуру реакторної установки.....	59
2.3 Радіоактивні викиди: тритій та вуглець	64
Висновки.....	72
Перелік джерел посилання.....	74

Вступ

Покращення водно-хімічного режиму на атомних електростанціях є дуже важливою темою, оскільки це впливає на безпеку та ефективність їхньої роботи. Вода у системах атомної електростанції (АЕС) виконує роль охолоджувача і її якість має безпосередній вплив на збереження обладнання в належному стані. Якщо не контролювати хімічний склад води, можуть виникнути корозія, утворення накипу та інші проблеми, які можуть призвести до зупинки роботи станції або навіть аварії. Крім того, від правильного водно-хімічного режиму залежить екологічна безпека, оскільки знижуються ризики забруднення навколишнього середовища. Це також дозволяє зменшити витрати на ремонт і технічне обслуговування, що підвищує економічну ефективність роботи АЕС. Тема є актуальною, тому що сучасні атомні станції повинні працювати з урахуванням високих стандартів безпеки та екологічних вимог, які постійно вдосконалюються [1].

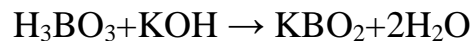
На АЕС з водо-водяними реакторами (ВВЕР-1000) застосовується слаболужний відновлювальний водно-хімічний режим (ВХР) з борним регулюванням в якому застосовується аміак і калій.

На українських АЕС спостерігається стабільне ведення ВХР, яке забезпечує:

- зниження утворення окисних продуктів радіолізу теплоносія під час роботи енергоблоку на потужності;
- корозійну стійкість конструкційних матеріалів тепловиділяючих збірок (ТВЗ);
- збереження проектної корозійної стійкості матеріалів обладнання та трубопроводів першого контуру в рамках всього терміну експлуатації енергоблоку;
- мінімізація відкладень на поверхнях тепловиділяючих збірок і теплообмінних поверхнях парогенератора;
- мінімізація відкладень активних продуктів корозії на поверхнях обладнання першого контуру.

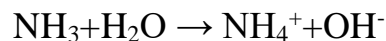
У реакторах типу ВВЕР-1000 застосовується аміачно-калієвий ВХР з додаванням борної кислоти H_3BO_3 для регулювання реактивності реактора. Перевагою борної кислоти є те, що вона стійка в радіаційних полях, не розкладається при високих температурах, добре розчинна у воді, не утворює накипу, в присутності лугів є інгібітором корозії. Разом з тим, борна кислота знижує рН води першого контуру. Для нейтралізації борної кислоти до теплоносія вводять гідроксид калію КОН.

Реакція нейтралізації борної кислоти гідроксидом калію:

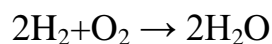


Додавання аміаку до першого контуру реакторної установки (РУ) з ВВЕР-1000 здійснюється для того щоб зменшити утворення радіолізного кисню в теплоносії. Це допомагає підтримувати необхідну концентрацію розчиненого водню [1].

При дозуванні аміаку в перший контур, для утворення розчиненого водню в теплоносії, аміак у водному розчині взаємодіє з водою, утворюючи іони амонію і гідроксид-іони:



Реакція взаємодії водню з киснем, що відбувається для придушення радіолізного кисню в теплоносії:



Попри надійність та багаторічний досвід використання аміачно-калієвого ВХР насичення теплоносія аміаком має свої недоліки:

- суттєво погіршує роботу іонообмінних фільтрів;
- для відновлення іонообмінної здатності фільтрів необхідно їх часто регенерувати;
- Кількість розчинів для регенерації зростає (згодом утворюються рідкі радіоактивні відходи).

При цьому виникають наступні експлуатаційні проблеми:

- регулювання концентрації водню в період змінних режимів, таких як пуски та зупини, ускладнюється через змінну швидкість радіолізу води;

- виникають різкі підвищення активності теплоносія через витіснення лужних металів з іонообмінних фільтрів;

- перед розущільненням першого контуру (підняттям кришки верхнього блоку) під час планово-попереджувального ремонту необхідно довго провітрювати обладнання, щоб видалити водень, який утворюється через залишковий нейтронний потік;

- разом з теплоносієм та водними реагентами в обладнання можуть потрапляти домішки, що викликають корозію, а також ізотопи які активуються в активній зоні реактора. Це призводить до підвищення радіоактивності теплоносія через утворення ізотопів ^{24}Na , ^{42}K та інших;

- в результаті протікання ядерної реакції в активній зоні реактора зростає утворення вуглецю з атомів азоту та аміаку.

Основною метою роботи «Поліпшення якості водопідготовки на атомних електростанціях на прикладі ХАЕС» є заміна існуючого калій-аміачного ВХР, для цього необхідно провести порівняльний аналіз міжнародного досвіду щодо дотримання параметрів водно-хімічного режиму (ВХР) на західних АЕС та оцінки стану наявних та сучасних технологій ВХР. При цьому на АЕС передбачається зниження виробництва радіоактивних відходів та витратами на переробку, зменшення радіаційних викидів у навколишнє середовище і зниження радіаційного навантаження на персонал при виконанні робіт з радіоактивними відходами [1]. Запропоновано перехід від аміачно-калієвого водно-хімічного режиму для зменшення корозії, активності теплоносія та обсягів рідких радіоактивних відходів. Дослідження базуються на аналізі хімічних процесів у першому контурі реакторів типу ВВЕР-1000 та їх екологічного впливу.

Предметом дослідження обрано Хмельницьку атомну електростанцію, а об'єктом - систему водопідготовки на ній.

Застосування результатів роботи можливі в атомній енергетиці, так як літій-водневий водно-хімічний режим можливо буде застосувати при проєктуванні нових енергоблоків для підвищення безпеки та економічності

ефективності. Результати роботи також можна застосувати в галузі екології, через суттєве зменшення радіоактивного впливу на навколишнє середовище через скорочення обсягів рідких радіоактивних відходів.

1. Огляд джерел науково-технічної інформації

1.1 Характеристика цеху з водопідготовки атомних електростанцій

Призначенням хімічного цеху на атомній електростанції є організація процесів водопідготовки і контролю за водно-хімічним режимом роботи обладнання електростанції.

Основні напрями водопідготовки на атомних електростанціях спрямовані на забезпечення високоякісної води, яка необхідна для роботи реакторів, парогенераторів і систем охолодження. Оскільки вода в цих системах грає ключову роль, її підготовка має відповідати найвищим стандартам для забезпечення надійності й безпеки. Основні напрями водопідготовки на АЕС включають [1]:

1) Механічне очищення: перший етап очищення, спрямований на видалення з води великих механічних часток і суспензій. Це допомагає захистити обладнання від зношування і забруднення. Застосовуються фільтри грубого очищення, які видаляють пісок, іржу та інші великі домішки.

2) Демінералізація: видалення з води всіх розчинених солей і мінералів для отримання надчистої води, що використовується в парогенераторах і реакторах. Навіть незначна кількість солей може спричинити корозію та відкладення накипу. Використовуються методи іонного обміну або зворотного осмосу для забезпечення води високої чистоти.

3) Деаерація: видалення розчинених газів (переважно кисню і вуглекислого газу) з води. Кисень є причиною корозії металевих елементів обладнання, тому його концентрація повинна бути мінімальною. Використовуються термічні або вакуумні деаератори.

4) Контроль жорсткості води (пом'якшення): видалення іонів кальцію і магнію, які можуть утворювати накип у системах охолодження та парогенераторах. Це допомагає запобігти пошкодженню обладнання та

підвищує ефективність теплопередачі. Для цього застосовуються катіонітові фільтри або інші методи пом'якшення води.

5) Дезінфекція та знезараження: забезпечення біологічної безпеки води шляхом видалення патогенних мікроорганізмів. На АЕС важливо запобігати розвитку біоплівки та іншої органічної активності в системах водообігу. Використовуються методи обробки хлором, ультрафіолетом або озоном.

6) Коригування рН: регулювання кислотно-лужного балансу води для запобігання корозії та забезпечення стабільної роботи обладнання. Нейтральний або слабкокислий рН є оптимальним для багатьох технологічних процесів на АЕС. Застосовуються лужні або кислотні добавки для коригування рН.

7) Очищення конденсату: у системах пароконденсатного циклу вода проходить додаткове очищення від солей і продуктів корозії, щоб уникнути забруднення пари і підвищити ефективність процесів теплопередачі.

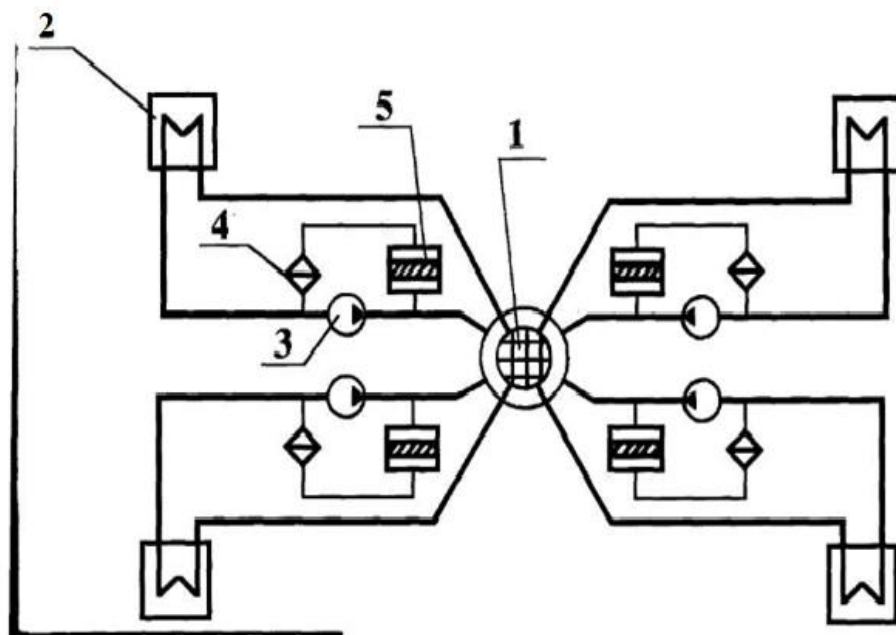
Водопідготовка на АЕС є критично важливим етапом для забезпечення безперервної і безпечної експлуатації станції, адже навіть незначні домішки у воді можуть спричинити серйозні пошкодження обладнання та знизити його ефективність.

Встановлено особливості технологій, які використовуються для водопідготовки на Хмельницькій атомній електростанції. На АЕС з водояним енергетичним реактором потужністю 1000 МВт присутні основні та допоміжна системи водопідготовки.

У енергоблоків з ВВЕР-1000 є сім систем спеціального водоочищення (СВО), дві з яких належать до реакторного відділення (СВО-1 і СВО-2), решта до спец корпусу (СК).

Під час роботи установки в першому контурі погіршуються нерозчинні, зважені активовані дрібнодисперсні продукти корозії конструкційних матеріалів. Для зменшення їх накопичення на поверхнях трубопроводів та обладнання використовують систему високотемпературного байпасного очищення теплоносія першого контуру (СВО-1). Вона розташована в

герметичній оболонці і складається з чотирьох петель, кожна з яких останнім об'єднана з петлею головного циркуляційного контуру. У шкірній петлі знаходиться фільтр, заповнений високотемпературним сорбентом — гранулами з губчастого титану, а також фільтри-пастки для захисту від руйнування сорбенту. Система функціонує безперервно під час експлуатації всіх установок, кожен ланцюг пропускає через себе 60-100 м³/Год, що становить близько 0,5% від загального потоку теплоносія, що циркулює в петлях. Ефективність очищення складає 50—95 %. Функціональна схема СВО-1 зображена на рис.1[2].

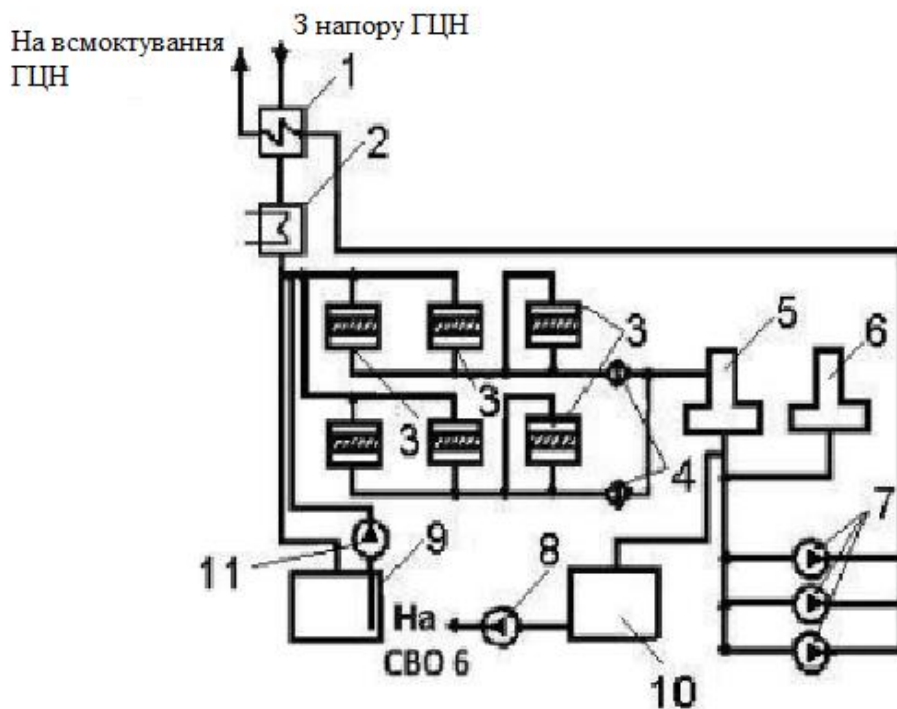


1- реактор; 2- парогенератор; 3- головний циркуляційний насос;
4- пастка сорбентів; 5 – високотемпературні фільтри.

Рисунок 1 – Функціональна схема СВО-1

Для очищення продувної води, яка виводиться з першого контуру системою продувки-підживлення, а також для видалення організованих протікань, використовується система низькотемпературного очищення продувної води першого контуру (СВО-2). У цій системі вода очищається від

продуктів корозії, радіоактивних елементів і хімічних забруднень за допомогою фільтрації та іонного обміну. Система складається з двох однакових ліній, кожна з яких включає два паралельно з'єднаних катіонних фільтра, разом з поєднаним з ними аніонний фільтр та пасти для іонів на випадок їх руйнування. Як фільтруючий матеріал використовуються різні типи іонообмінних смол. Функціональна схема СВО-2 зображена на рис.2 [2].

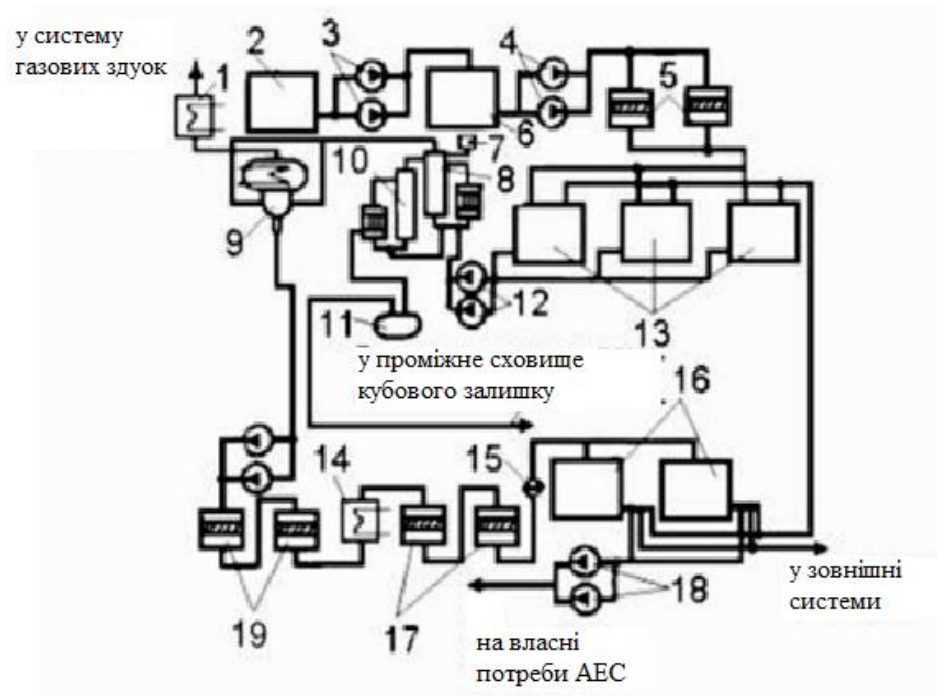


1-регенеративний теплообмінник; 2 – доохолоджувач; 3- іонообмінні фільтри; 4 – фільтри-пастки зернистих матеріалів; 5 – деаератор підживлення; 6 - деаератор борного регулювання; 7 - підживлювальні насоси; 8 – насос подачі розчину на очищення; 9 – бак організованих протікань; 10 – бак боровмісної води; 11 – насос бака оргпротікань.

Рисунок 2 – Функціональна схема СВО-2

СВО-3 призначений для очищення трапних вод, що надаються із систем спецканалізації реакторного відділення, а також для інших цілей. У цій системі використовують методи упарювання, дегазації, механічної

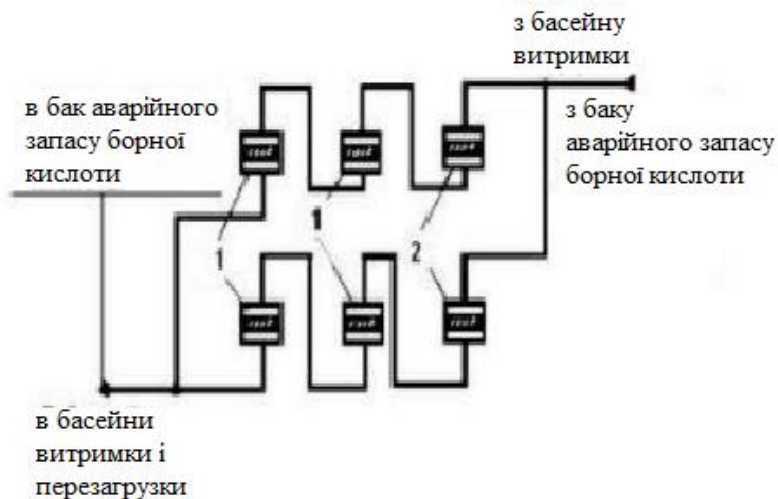
фільтрації та іонного обміну. Зазвичай для двох блоків є одна випарна установка. В середньому з одного блоку на очищення надходить 18000 тонн трапних вод на рік. На рис.3 зображена функціональна схема СВО-3 [3].



1 – охолоджувач газових здуок; 2 – бак спецканалізації; 3 – насоси спецканалізації; 4 – насоси бака-відстійника; 5 – механічні фільтри трапних вод; 6 – бак-відстійник трапних вод; 7 – пристрій для завантаження кілець Рашига; 8 – випарний апарат; 9 – конденсатор-дегазатор; 10 – доупарювач; 11 – монжюс; 12 – насоси трапних вод; 13 – баки трапних вод; 14 – охолоджувач дистилляту; 15 – фільтр пастка зернистих матеріалів; 16 – контрольний бак; 17 – фільтр іонітний та активованого вугілля; 18 – насоси контрольних баків; 19 – механічні фільтри.

Рисунок 3 – Функціональна схема СВО-3

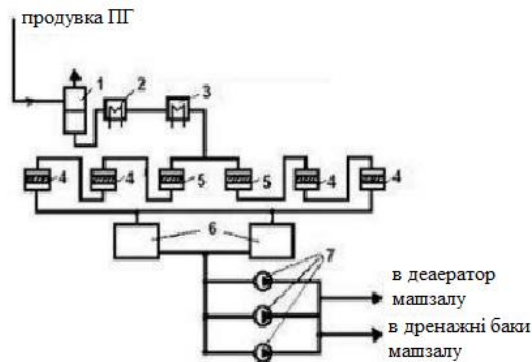
СВО-4 використовується для очищення води з басейну для зберігання відпрацьованого палива, а також з резервуарів аварійного запасу розчину борної кислоти. Очищення проводиться механічними, H^+ -катіонітовими та аніонітовими фільтрами. Функціональна схема СВО-4 зображена на рис.4 [4].



1 – Іонітовий фільтр; 2 – фільтр механічний

Рисунок 4 – Функціональна схема системи СВО-4

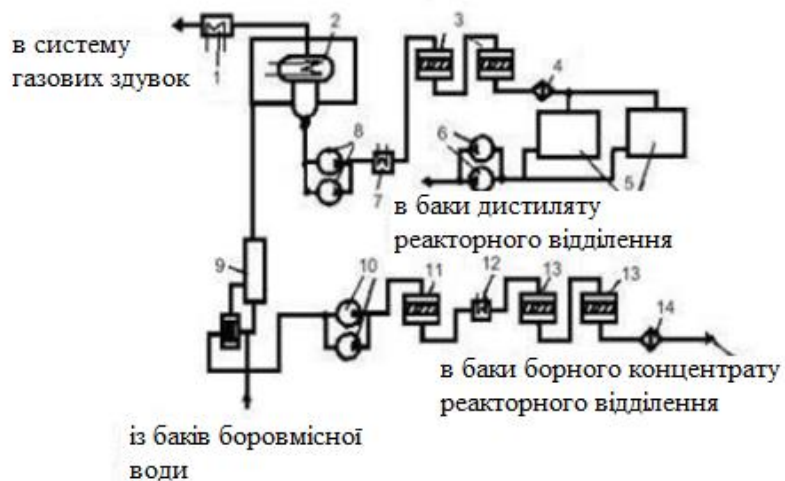
СВО-5 призначений для очищення продувних та дренажних вод парогенераторів з метою підтримки водно-хімічного режиму другого контуру шляхом видалення продуктів корозії та розчинених домішок. Система оснащена фільтрами, які очищають воду від корозійних продуктів і домішок в іонній формі, а також включають її демінералізацію. Очищення здійснюється безперервно з продуктивністю близько 60 м³/год. Це дозволяє підтримувати належний рівень якості води в другому контурі, запобігаючи утворенню відкладень та корозії, що може вплинути на ефективність роботи парогенераторів. Функціональна схема СВО-5 зображена на рис.5 [5].



1 – розширювач продукції; 2 – регенеративний теплообмінник продукції; 3 – доохолоджувач; 4 – фільтр іонітний; 5 – фільтр механічний; 6 – баки очищеної води; 7 - насоси бака очищеної води.

Рисунок 5 – Функціональна схема СВО-5

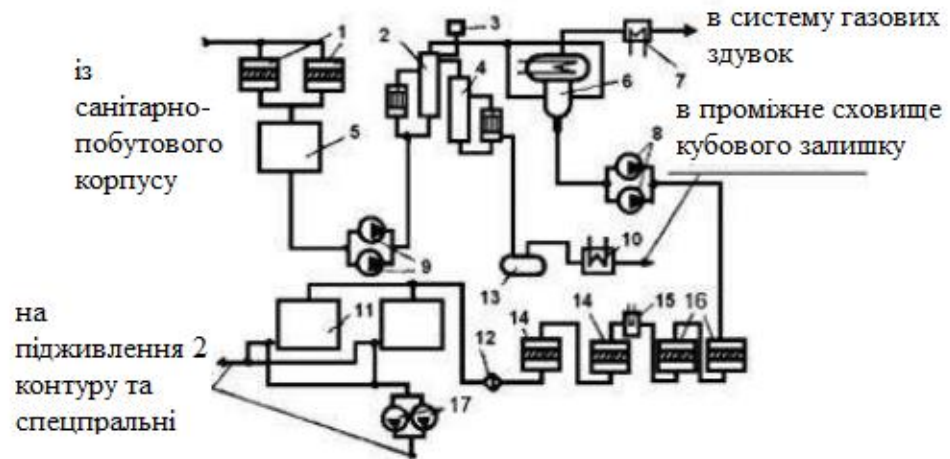
Установка СВО-6 призначена для відновлення та очищення борвмісних вод і розділення дистильованої води та борного концентрату. Для цього використовуються випарювання, дегазація, механічна фільтрація та іонний обмін. Функціональна схема СВО-6 зображена на рис.6 [6].



1 – охолоджувач газових здувок; 2 – конденсатор-дегазатор; 3 – фільтр іонітний та активованого вугілля; 4 – пастка зернистих матеріалів; 5 – баки очищеної води; 6 – насоси очищеної води; 7 – охолоджувач дегазованої води; 8 – насоси дегазованої води; 9 – випарна установка; 10 - насоси брудного борного концентрату; 11 – механічний фільтр; 12 – охолоджувач борного концентрату; 13 – іонітні фільтри; 14 - фільтр-пастка.

Рисунок 6 – Функціональна схема СВО-6

СВО-7 використовується для очищення вод спецпральні та душових. У системі використовують системи упарювання, конденсації, дегазації, механічної фільтрації та іонний обмін. Функціональна схема СВО-7 зображена на рис.7.



1-Фільтр механічний; 2 – випарний апарат; 3 – пристрій для завантаження кілець Рашига; 4 – доупарювач; 5 – бак-накопичувач; 6 – конденсатор-дегазатор; 7 – охолоджувач газових здувок конденсатора-дегазатора; 8 – насоси дегазованої води; 9 – насоси бака-накопичувача; 10 – охолоджувач кубового залишку; 11 – баки очищеної води; 12 – фільтр зернистих матеріалів; 13 – монжюс; 14 – іонітні фільтри; 15 – охолоджувач конденсату; 16 – механічні фільтри; 17 – насоси чистого конденсату.

Рисунок 7 – Функціональна схема СВО-7

Однією з основних технологій є система підживлення-продувки першого контуру. З її допомогою забезпечується борне регулювання, підтримка складного водно-хімічного режиму, повернення організованих і заповнення неорганізованих протікань першого контуру, а також ряд інших функцій. Основні завдання системи виконуються, постійно виводячи частину теплоносія з першого контуру — 10-60 м³/год, що називається продувкою. Повернення цієї води назад, очищеної і з необхідною концентрацією борної кислоти та певних реагентів, які називаються підживленням. Система є

критично важливою для безпеки та функціонує у всіх режимах роботи установок.

У деаераторі води для підживлення постійно виділяється вода, яку потрібно видаляти, щоб уникнути накопичення небезпечних концентрацій. Для цієї системи допалювання води, в якій цей газ окислюється (спалюється) на платиновому каталізаторі. Система включає охолоджувачі, газодувки та електронагрівачі.

Для зберігання та подачі додаткової дистильованої води в різні технологічні системи, зокрема через систему продувки-підживлення в перший контур для зниження концентрації борної кислоти, використовує систему дистиляції, яка складається з кількох резервуарів і насосів.

Через радіоліз води в першому контурі постійно залишається вода та кисень, які необхідно усувати, щоб запобігти їх накопиченню та зниженню корозійної стійкості теплоносія. Для цього вузол реагентного відділення в перший раз додають контур спеціалізованих реагентів у заданих дозах через систему продувки-підживлення.

Серед таких реагентів вибір NH_3 — аміак (для підтримки нормованої концентрації води), N_2H_4 — гідразин-гідрат (для тих же цілей, але при низькій температурі в контурі), а також KOH — гідроксид калію (для підтримки необхідного рівня рН теплоносія).

В першому контурі реакторів ВВЕР-1000 застосовується аміачно-калієвий водно-хімічний режим з додаванням борної кислоти H_3BO_3 для плавного регулювання реактивності реактора. Перевагою борної кислоти є те, що вона стійка в радіаційних полях, не розкладається при високих температурах, добре розчинна у воді, не утворює шлаку та накипу, в присутності лугів є інгібітором корозії. Разом з тим, борна кислота знижує рН води першого контуру. Для нейтралізації борної кислоти до теплоносія вводять гідроксид калію KOH [1].

На вітчизняних АЕС спостерігається стабільне ведення водно-хімічного режиму першого контуру, яке забезпечує:

- розрахункову корозійну стійкість конструкційних матеріалів тепловиділяючих збірок;
- розрахункову корозійну стійкість конструкційних матеріалів обладнання першого контуру і трубопроводів;
- проектну корозійну стійкість конструкційних матеріалів обладнання та трубопроводів першого контуру протягом всього терміну експлуатації енергоблоку;
- мінімізація відкладень на поверхнях тепловиділяючих збірок і теплообмінних поверхнях парогенератора;
- мінімізація відкладень активних продуктів корозії на поверхнях обладнання першого контуру;

З наявним досвідом експлуатації ВХР на АЕС з ВВЕР-1000, можна сказати, що система працює надійно та безвідмовно, проте має свої проблеми та недоліки, а саме:

- зменшує ефективність іонообмінних фільтрів, що застосовуються для очищення теплоносія першого контуру, обмежуючи їх здатність видаляти корозійно-небезпечні іони (СВО-2);
- фільтри потрібно часто регенерувати, щоб відновити їхню здатність до іонообміну;
- зростає кількість регенераційних розчинів, що призводить до утворення рідких радіоактивних відходів (РРВ).

У процесі утворюються такі експлуатаційні проблеми:

- регулювання концентрації водню у перехідних режимах, зокрема під час запусків і зупинок, стає складним через залежність швидкості радіолізу води від інтенсивності нейтронного потоку;
- спостерігаються сплески активності теплоносія через часткове вимивання лужних металів з іонообмінних фільтрів;
- до теплоносія разом з водними реагентами (NH_3 , KOH) потрапляють домішки які викликають корозію і радіоактивні ізотопи, які активуються в

активній зоні реактора, що призводить до зростання радіоактивності теплоносія через утворення ізотопів ^{24}Na , ^{42}K та інших;

– внаслідок ядерних реакцій в активній зоні реактора зростає утворення вуглецю ^{14}C з атомів ^{2}N - азоту та NH_3 ;

– процеси хімічної відновлювальної обробки смол призводять до осмотичного шоку іонітів, скорочують їх ресурс і, як наслідок, збільшують обсяг твердих радіоактивних відходів;

– у випарних установках СВО аміак усувається за допомогою газових потоків повністю і циркулює через весь технологічний процес переробки рідких радіоактивних відходів.

На АЕС за всі вище описанні функціональні системи та процеси відповідальний хімічний цех, який виконує важливі завдання та функції для забезпечення надійної та безпечної роботи основного і допоміжного устаткування шляхом підтримки у встановлених параметрах оптимальних водно-хімічних режимів першого і другого контурів та допоміжних систем, виконання хімічного контролю якості теплоносія, води, масел, газів та хімічних реагентів, корозійних відкладень на обладнанні, та поводження з рідкими радіоактивними відходами.

Завдання та функції, які виконує хімічний цех (ХЦ) на АЕС.

Для здійснення свого призначення та досягнення встановленої мети ХЦ вирішує наступні завдання та вимоги [7]:

1) забезпечення експлуатаційного обслуговування технологічних систем та обладнання, закріпленого за ХЦ, попередження аварій та відмов в роботі обладнання цеху та ліквідації їх наслідків. Забезпечення підтримки в справному стані, надійну, безпечну та економічну експлуатацію тепломеханічного та електротехнічного устаткування;

2) забезпечення хімічного контролю з метою своєчасного виявлення відхилень у режимах роботи обладнання АЕС від встановлених меж та умов експлуатації, виконує хімічні аналізи за заявками технологічних;

- 3) забезпечення приймання, переробки та зберігання рідких радіоактивних відходів;
- 4) організація раціонального скидання і нейтралізації скидних вод хімічної водоочистки, спец водо очистки, блочної знесолюючої установки, запобігання забрудненню навколишнього середовища;
- 5) вивчення досвіду експлуатації обладнання з метою покращення його роботи, удосконалення технологічних схем, впровадження та освоєння нової техніки, прогресивних методів хімічного контролю;
- 6) забезпечення вимог охорони праці і промислової санітарії на робочих місцях, у приміщеннях і на устаткуванні ХЦ;
- 7) забезпечення вимог радіаційної безпеки на робочих місцях, у приміщеннях і на устаткуванні ХЦ;
- 8) забезпечення пожежної безпеки;
- 9) дотримання вимог пропускнуго і внутрішньо-об'єктового режиму.

Хімічний цех здійснює забезпечення хімічного контролю з метою своєчасного виявлення відхилень у режимах роботи обладнання АЕС від встановлених меж та умов експлуатації, виконує хімічні аналізи за заявками технологічних цехів, виконує такі функції як виконання в установленому обсязі хімічного контролю теплоносія першого контуру, живильної та продувної води першого контуру, продувної води парогенератора (ПГ), систем спец водоочищення (СВО), допоміжних систем реакторного відділення, виконання в установленому обсязі хімічного контролю робочого середовища другого контуру (живильної води ПГ, пари ПГ, конденсату турбіни), допоміжних систем турбінного відділення, реєстрація показів приладів автоматизованого хімічного контролю (АХК) технологічних середовищ першого та другого контурів, допоміжних систем реакторного та турбінного відділень згідно з встановленими регламентами. Виконання в установленому обсязі хімічного контролю технологічних вод установок СВО спец корпусу, виконання в установленому обсязі хімічного контролю очисних споруд «брудної» зони, виконання в установленому обсязі хімічного контролю

мережної води, виконання в установленому обсязі хімічного контролю вод, які надходять на електролізну установку, виконання фізико-хімічного аналізу при вхідному контролі енергетичних масел, виконання фізико-хімічного аналізу при вхідному і експлуатаційному контролі іонообмінних смол і хімічних реагентів, які використовуються для підтримки водно-хімічного режиму основних технологічних контурів АЕС [7].

Обстеження корозійного стану технологічного устаткування АЕС в контексті ведення ВХР в установленому обсязі та за заявками цехів-власників устаткування і ремонтних підрозділів, виконання хімічного аналізу відкладень.

Виконання хімічного аналізу на вміст горючих вибухонебезпечних газів і кисню при допусках за нарядами, проведення планової атестації на право виконання вимірювань.

Хімічний цех забезпечує приймання, переробку та зберігання рідких радіоактивних відходів. Виконує розробку технічної документації для безпечної і ефективної експлуатації устаткування при всіх режимах роботи. Розробляє графіки технічного обслуговування і виведення в ремонт устаткування закріпленого за ХЦ. Виконує вхідний експлуатаційний контроль іонообмінних смол і хімічних реагентів [7].

Забезпечує подачу пари, хімічно знесолоної води, дезактивуючих розчинів для дезактивації приміщень, устаткування, спецодягу і засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) та виконує організаційно-технічні заходи щодо запобігання необґрунтованого забруднення приміщень і устаткування.

Організація раціонального скидання і нейтралізації скидних вод ХВО, СВО, запобігання забрудненню навколишнього середовища та виконання і дотримання вимог нормативно-правових актів з охорони навколишнього середовища є однією з важливих завдань цеху.

ХЦ надає проби води у відділ охорони навколишнього середовища (ВОНС) з вузла нейтралізації перед скиданням у навколишнє середовище та надає у ВОНС графіки планового ліміту на утворення і розміщення відходів

на наступний рік. Повідомляє в цех радіаційної безпеки (ЦРБ) про усі випадки порушення технологічного режиму, які сприяли виходу радіоактивних середовищ за встановлені проектом межі. Також ХЦ уживає заходи щодо локалізації і дезактивації об'єктів зовнішнього середовища у випадку їхнього забруднення. І одним з основних завдань є спрямування діяльності на недопущення забруднення території станції нафтопродуктами, маслами, та їх надходження у відкриті водойми [7].

Для вирішення завдання «Забезпечення вимог радіаційної безпеки на робочих місцях, у приміщеннях і на устаткуванні ХЦ» персонал ХЦ повинен перебувати у контрольованій зоні відповідно до діючих правил, норм та інструкцій по РБ. Утримувати приміщення ХЦ в контрольованій зоні відповідно до діючих інструкцій по РБ, планує і виконує заходів щодо поліпшення радіаційної обстановки в закріплених за ХЦ виробничих і робочих приміщеннях, зниження доз внутрішнього і зовнішнього опромінення персоналу.

ХЦ відповідає за подання заявок про постановку персоналу на дозиметричний облік та зняття з нього. У визначені терміни подаються списки персоналу, який має право видачі дозиметричних нарядів та розпоряджень. Працівників забезпечують засобами індивідуального дозиметричного контролю [7].

З джерелами іонізуючого випромінювання мають право працювати особи які не мають медичних протипоказань, пройшли навчання і перевірку знань з правил радіаційної безпеки.

Персонал ХЦ має повідомляти цех радіаційної безпеки (ЦРБ) про усі випадки порушення технологічного режиму, які спонукали вихід радіоактивних середовищ за встановлені проектом межі та виконувати розпоряджень ЦРБ з питань забезпечення радіаційної безпеки.

Вимоги до водопідготовки на АЕС

Вимоги до робіт по водопідготовці на атомних електростанціях (АЕС) є досить суворими, оскільки якість води відіграє критичну роль у забезпеченні

безпеки та ефективності роботи систем охолодження та інших технологічних процесів на станції. Основні вимоги до водопідготовки на АЕС визначаються технологічним регламентом безпечної експлуатації та інструкціями з ведення водо-хімічного режиму першого та другого контуру. Ось основні аспекти таких вимог [1] :

1) Якість води:

- Хімічна чистота: вода, що використовується в системах охолодження та технологічних циклах АЕС, має бути очищена від домішок, таких як солі, кислоти, луги, та органічні сполуки. Вимоги до якості води можуть включати жорсткий контроль концентрації іонів, зокрема хлоридів, сульфатів, заліза та інших металів, щоб уникнути корозії та забруднення.

- Радіаційна чистота: вода не повинна містити радіоактивних речовин або повинна мати їх концентрацію нижче встановлених норм, щоб запобігти вторинній радіоактивності в системах.

2) Процеси водопідготовки:

- Механічна фільтрація - забезпечує видалення твердих часток та механічних домішок.

- Деіонізація - використання іонообмінних смол для видалення іонів, що можуть спричинити корозію або формування накипу.

- Опріснення та демінералізація: використання спеціальних технологій (зворотний осмос, випаровування) для видалення солей та інших мінералів.

- Обеззаражування: обов'язкове знезараження води для зниження ризику бактеріологічного забруднення.

3) Контроль та моніторинг:

- Безперервний контроль параметрів води: включає контроль рівнів рН, провідності, вмісту розчинених газів (кисень, водень), температури та радіоактивності. Моніторинг здійснюється автоматизованими системами, що дозволяє оперативно виявляти відхилення та реагувати на них.

- Періодичний лабораторний аналіз: вода проходить регулярне тестування в лабораторіях для підтвердження її відповідності стандартам.

4) Системи регенерації та обробки відходів:

- системи водопідготовки на АЕС повинні мати засоби для регенерації використовуваних іонообмінних матеріалів, а також для обробки та утилізації відпрацьованих хімікатів та відходів. Особливо важливою є система обробки радіоактивних відходів, що може утворюватися під час водопідготовки.

5) Норми та стандарти:

- водопідготовка на АЕС регулюється міжнародними стандартами, такими як IAEA Safety Standards (Міжнародне агентство з атомної енергії) та національними нормативними документами, наприклад, НП 306.2.245-2024 в Україні або аналогічними нормами інших країн. Дотримання цих вимог гарантує безпечну та надійну експлуатацію атомних електростанцій, а також знижує ризик аварій та негативного впливу на навколишнє середовище.

Технологічні проблеми водо підготовки на АЕС

Технологічні проблеми які виникають при водо підготовці на АЕС можуть призводити до зниження ефективності роботи станції, збільшення експлуатаційних витрат та до ризиків безпеки. Вирішення цих проблем є ключовим аспектом для підвищення надійності систем водо підготовки.

Однією з таких проблем є корозія обладнання, яка виникає через наявність у воді агресивних іонів, таких як хлориди, сульфати, а також кисень, що розчиняється у воді. Це несе особливу небезпеку для теплообмінних поверхонь трубопроводів та реактора [8].

Для видалення іонів з води використовують іонообмінні смоли, які з часом втрачають свої властивості через виснаження активних центрів або механічне руйнування [9].

Утворення великої кількості рідких радіоактивних відходів в процесі частоті регенерації фільтрів пов'язані з веденням ВХР першого контуру.

Використання коригувальних добавок для ведення ВХР, а саме натрію та калію створюють від 80% до 90% питомої активності радіоактивних ізотопів.

Для підвищення ефективності систем водо підготовки розглянемо існуючі світові технології введення ВХР першого контуру на АЕС.

1.2 Аналіз технологій водо підготовки

На світових атомних електростанціях в залежності від типу реактора та конкретних експлуатаційних умов, використовують різні типи ведення водно-хімічного режиму першого контуру.

Основні види водно-хімічних режимів на АЕС:

1) Лужний водно-хімічний режим (Бельгія – Doel Nuclear Power Plant, Швеція -Ringhals Nuclear Power Plant).

Лужний водно-хімічний режим застосовується на атомних електростанціях для підтримки оптимальних умов у теплоносії. Цей режим передбачає введення хімічних добавок для підтримки певного рівня рН, що сприяє зниженню корозії металів та підвищенню надійності обладнання. Перевагами лужного водно-хімічного режиму є захист від корозії, стабільність роботи шляхом підтримки оптимального рН, яке сприяє зменшенню утворення корозійних продуктів та відкладень на поверхнях теплообмінного обладнання, мінімізація корозійних процесів та тріщин під впливом корозії підвищує надійність експлуатації реактора і продовжує термін служби обладнання. До недоліків лужного водно-хімічного режиму відноситься складність контролю та регулярного аналізу хімічного складу теплоносія, необхідність додавання додаткових реагентів для очистки потребує складної системи дозування, дорого вартісні реагенти та висока чутливість до порушень ВХР.

2) Кисневий водно-хімічний режим (США –James A. FitzPatrick Nuclear Power Plant, Японія – Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant).

Кисневий водно-хімічний режим (КВР) використовується на атомних електростанціях для підтримки води у вторинному контурі реакторів. Цей режим передбачає додавання невеликої кількості розчиненого кисню у воду,

щоб сформувати захисний шар оксиду заліза на внутрішніх поверхнях обладнання. Це зменшує швидкість корозії та запобігає утворенню відкладень на трубопроводах. Кисень додається в конденсат вторинного контуру, що забезпечує формування стійкого захисного шару гематиту (Fe_2O_3) на вуглецевій сталі. Це особливо ефективно у запобіганні корозії в зонах, схильних до високошвидкісного потоку води. До переваг можна віднести зменшення утворення відкладень і корозії, підвищення надійності обладнання. Недоліками є складність контролю оскільки надлишок кисню може призвести до прискорення корозії, а також обмежене застосування так як найчастіше використовується лише у вторинних контурах через потенційну шкоду для первинного контуру реакторів.

3) Водно-хімічний режим з гідрaziном (США – Three Mile Island Nuclear Generating Station, Болгарія – Kozloduy Nuclear Power Plant).

Водно-хімічний режим з гідрaziном використовується для контролю рівня кисню в охолоджуючій воді ядерних реакторів. Гідразин (N_2H_4) є хімічною речовиною, що ефективно знижує рівень кисню в воді, що важливо для зниження корозії металів у реакторних системах. Його додають для попередження окислення та корозії сталевих поверхонь, особливо в умовах високих температур і радіаційного навантаження. Перевагою являється ефективний контроль рівню кисню, який знижує ризик корозії, деградації та підвищення безпеки і надійності роботи ядерних установок. Слабкою стороною є те, що гідразин є токсичним, це вимагає суворого контролю за його використанням, при неправильному дозуванні або технічних збоях може призвести до накопичення шкідливих продуктів, таких як аміак[10].

4) Кислотний водно-хімічний режим (Японія – Hamaoka Nuclear Power Plant, США – Dresden Generating Station).

Кислотний водно-хімічний режим є специфічним для управління хімічними властивостями води в ядерних реакторах, що використовують принципи контролю кислотності для запобігання корозії та інших матеріальних пошкоджень. Це може бути досягнуто шляхом управління

рівнем рН в системах, що охолоджують реактори, щоб підтримувати оптимальні умови для збереження матеріалів і зменшення впливу агресивних кислотних сполук. Кислотний режим зазвичай включає використання кислотних речовин для зниження рН рівня води в реакторних системах. Зокрема, в системах з кислотним водно-хімічним режимом використовуються речовини, такі як амоніак або літій, для стабільного контролю рН. Зниження рівня рН допомагає запобігти корозії матеріалів, що контактують із водою, та зменшує вплив нітратів на металеві елементи.

Слабкими сторонами є потенційна агресивність – застосування кислих хімікатів може бути агресивним до інших систем і матеріалів, що знаходяться в контакті з водою. Зниження ефективності теплообміну – при недостатньому контролі можуть виникати проблеми з теплообмінними властивостями води. Корозія елементів не завжди знижена – у разі недотримання режимів або зниження рН понад норму можливе порушення роботи деяких матеріалів[10].

5) Киснево-дегазаційний (США – Seabrook Station Nuclear Power Plant, Чехія – Temelín Nuclear Power Plant).

Киснево-дегазаційний водно-хімічний режим в атомних електростанціях передбачає зменшення рівня розчиненого кисню в охолоджуючій воді. Це досягається за допомогою спеціальних систем дегазації, що дозволяють значно знизити концентрацію кисню до менше 1 частини на мільярд. Такий режим важливий для запобігання корозії трубопроводів і металевих конструкцій, оскільки кисень є одним з основних чинників, що сприяють корозії. Переваги: зниження корозії, зменшення утворення радіоактивних продуктів, покращення ефективності водоочищення. Зменшення кисню також дозволяє покращити ефективність інших процесів, таких як іонний обмін і очищення води, що може знизити витрати на хімічне очищення.

Недоліками являється необхідність високих технологій: вартість обладнання для дегазації і його обслуговування може бути високою.

Потрібен постійний моніторинг: для ефективної роботи необхідно постійно контролювати рівень кисню в системі.

б) Водно-хімічний режим зі зниженням концентрації бору (Велика Британія – Sizewell Nuclear Power Station, Бельгія – Tihange Nuclear Power Plant).

Водно-хімічний режим зі зниженням концентрації бору на ядерних станціях включає стратегії, спрямовані на оптимізацію ядерних реакцій та покращення ефективності реакторів, особливо в умовах зниження рівня борної кислоти. Бор є важливим нейтронним поглиначем у системах ядерних реакторів, але зменшення його концентрації може запобігти певним видам корозії та покращити стабільність системи.

Сильні сторони такого режиму включають можливість зменшення борної корозії і поліпшення експлуатаційних характеристик реактора. Однак, це також може спричинити потребу у більш точному контролі за реактивністю та вимагати додаткових заходів для збереження стабільного процесу ядерного поділу[11].

7) Режим з додаванням цинку (США – Diablo Canyon Power Plant, Фінляндія – Olkiluoto Nuclear Power Plant).

Водно-хімічний режим з додаванням цинку в ядерних енергетичних установках застосовується для зменшення рівня радіаційного опромінення, особливо в реакторах типу PWR (Pressurized Water Reactor). Цинк інжектуються в первинне охолодження, де він допомагає знизити утворення радіоактивних ізотопів, таких як Co^{60} . Основний механізм цього процесу полягає в тому, що цинк заміщає частину атомів кобальту в системах охолодження, зменшуючи таким чином джерела випромінювання. Це дозволяє знижувати рівень радіаційного опромінення на обладнанні та трубопроводах. Сильними сторонами є зниження радіаційного навантаження на персонал та підвищення безпеки, зменшення рівня радіоактивних забруднень на об'єктах, що покращує умови експлуатації, поліпшення довговічності обладнання завдяки зменшенню впливу радіації.

Слабкими сторонами є необхідність суворого контролю за рівнем цинку в охолоджуючій воді, щоб уникнути негативних впливів на водно-хімічний баланс, та можливі технічні проблеми через високі концентрації металів у системах охолодження[12].

8) Водно-хімічний аміачно-калієвий режим (США – Oconee Nuclear Station, Словенія – Krško Nuclear Power Plant, Україна – Хмельницька АЕС, Південноукраїнська АЕС, Рівненська АЕС, Запорізька АЕС).

Водно-хімічний режим з аміаком використовується для контролю рН і кисневого режиму в ядерних реакторах, особливо в реакторах типу ВВЕР. Основною перевагою цього режиму є можливість підтримання лужного середовища, яке допомагає запобігати корозії та стресовому корозійному розтріскуванню матеріалів. Аміак діє як основний компонент, який забезпечує необхідний рН, а також допомагає знижувати рівень розчиненого кисню в охолоджуючій воді.

9) Літій-водневий водно-хімічний режим (Німеччина – Emsland Nuclear Power Plant, США – Palo Verde Nuclear Generating Station, Японія – Mihama Nuclear Power Plant) [13], [14], [15].

Літій-водневий водно-хімічний режим застосовується для забезпечення стабільної та корозійно-стійкої роботи обладнання. Основна мета цього режиму — підтримка оптимальної рН та мінімізація корозійних процесів у теплоносії за рахунок введення літію та водню у вигляді гідроксиду літію (LiOH) та водню (H₂). Літій-водневий водно-хімічний режим використовується у контурі теплоносія для запобігання корозії металів і відкладення солей. Завдяки введенню LiOH підтримується слабколужне середовище (рН 6,8–7,4). Для видалення кисню, який є основним корозійним агентом вводиться водень.

Характеристики та особливості режимів ведення воднохімічного режиму енергетичних установок наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики та особливості режимів ведення воднохімічного режиму енергетичних установок.

Водно-хімічний режим	АЕС країна	Особливості ведення ВХР	Недоліки	Переваги
1	2	3	4	5
Лужний	Бельгія – Doel Nuclear Power Plant; Швеція- Ringhals Nuclear Power Plant	-регулярний контроль рН та концентрації лугів; -використання інгібіторів корозії; - своєчасне видалення відкладень на обладнанні.	-складність контролю хімічного складу; -дорогі реагенти; - висока чутливість до порушень режиму.	-захист від корозії; - стабільність роботи завдяки підтримці рН; -зменшення відкладень на теплообмінному обладнанні.
Кисневий	США – James A. FitzPatrick Nuclear Power Plant; Японія – Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant	- постійний моніторинг концентрації кисню; - контроль за утворенням оксидного шару; - використання спеціальних дегазаційних систем.	- складність контролю кисню; - обмежене застосування через потенційну шкоду для первинного контуру.	- формування захисного шару оксиду заліза; - зменшення корозії і відкладень; - підвищення надійності обладнання.
З гідрaziном	США – Three Mile Island Nuclear Generating Station; Болгарія – Kozloduy Nuclear Power Plant	-регулювання дозування гідразину; -систематичний аналіз води на токсичні продукти; - підтримання температури для оптимальної реакції гідразину з киснем.	- токсичність гідразину; - можливість накопичення шкідливих продуктів.	- ефективний контроль кисню; - зниження ризику корозії; - підвищення безпеки роботи реактора.
Кислотний	Японія – Намаока Nuclear Power Plant; США – Dresden Generating Station	-точний контроль концентрації кислоти; - використання матеріалів, стійких до корозії; - впровадження автоматизованих систем моніторингу параметрів.	- агресивність кислотних хімікатів; - можливі проблеми з теплообміном; - ризик корозії при неправильному контролі.	- зменшення корозії при правильному контролі; - оптимізація хімічних властивостей води.

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
Киснево-дегазаційний	США – Seabrook Station Nuclear Power Plant; Чехія – Temelín Nuclear Power Plant	- встановлення ефективних дегазаційних установок; - застосування індикаторів для визначення рівня кисню; - постійний контроль залишкової концентрації газів.	- висока вартість обладнання; - потреба в постійному моніторингу рівня кисню.	-зниження корозії; - покращення очищення води; - підвищення ефективності водопідготовки.
Зі зниженням концентрації бору	Велика Британія – Sizewell Nuclear Power Station; Бельгія – Tihange Nuclear Power Plant	- поступове зменшення бору в теплоносії; - контроль хімічного складу для уникнення втрати стабільності; - використання компенсуючих регуляторів реактивності.	- необхідність точного контролю за реактивністю; - потреба у додаткових заходах для стабільності ядерного поділу.	- зменшення корозії, спричиненої борною кислотою; - покращення характеристик реактора.
З додаванням цинку	США – Diablo Canyon Power Plant; Фінляндія – Olkiluoto Nuclear Power Plant	- оптимізація концентрації цинку для мінімізації корозії; - регулярний аналіз хімічного складу; - використання дозувального обладнання для введення цинку.	- потреба в суворому контролі рівня цинку; - можливі проблеми при високих концентраціях металів у системах охолодження.	-зниження радіаційного опромінення. - підвищення безпеки; - зменшення забруднення обладнання; - поліпшення довговічності обладнання.

Кінець таблиці 1

1	2	3	4	5
Аміачно-калієвий	США – Oconee Nuclear Station, Словенія – Krško Nuclear Power Plant; Україна – Хмельницька АЕС, Південноукраїнська АЕС, Рівненська АЕС, Запорізька АЕС	- постійний контроль рівня аміаку та калію; - уникнення перевищення допустимих концентрацій; - регулярна дегазація та контроль утворення побічних продуктів.	- нестабільність аміаку у процесі радіолізу; - утворення нітритів, які можуть погіршувати корозію; - утворення азоту та водню, що впливають на хімію води.	- підтримання лужного середовища; - зниження кисню у теплоносії; - регулювання реактивності за допомогою бору.
Літій-водневий	Германія – Emsland Nuclear Power Plant, США – Palo Verde Nuclear Generating Station;	- контроль співвідношення літію та водню у теплоносії; - регулярний моніторинг концентрації літію; - своєчасне коригування хімічного складу теплоносія.	- потреба у точному дозуванні літію; - можливість утворення відкладень при неправильному режимі; - ризик впливу на радіохімічну стабільність.	-забезпечення стабільності рН у теплоносії; -зниження корозії металевих поверхонь; - зменшення концентрації домішок.

На вітчизняних АЕС України з реактором ВВЕР-1000 використовується слаболужний аміачно-калієвий водно-хімічний режим з регулюванням реактивності реактора за допомогою бору. М'яке регулювання реактивності реактора досягається підтриманням змінної концентрації борної кислоти в теплоносії. Під час паливних кампаній контроль концентрації борної кислоти в теплоносії визначається інструкцією з експлуатації для енергетичного режиму реакторної установки та режиму роботи в перехідних режимах (зупинка, пуск) [16], [17].

Серед переваг аміачного водно-хімічного режиму можна відзначити, підтримку стабільного лужного рН, що зменшує корозійні процеси. Зниження рівня розчиненого кисню, що важливо для уникнення корозії та окиснення металів. Застосування аміаку у реакторах ВВЕР дозволяє зменшити вплив борної кислоти на системи.

Однак є і недоліки. Аміак може бути нестабільним у умовах радіолізу, що може призвести до утворення інших хімічних сполук, таких як нітрити, що можуть мати небажаний ефект на корозію і продуктивність системи. Можливе утворення азоту та водню, що може впливати на характеристики хімії води.

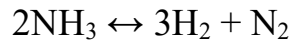
У першому контурі енергоблоків ВП ХАЕС застосовується слаболужний відновний аміачно-калієвий водно-хімічний режим із борним регулюванням реактивності реакторної установки. Основним матеріалом обладнання та трубопроводів першого контуру, що контактують із теплоносієм, є аустенітна хромонікелева сталь [16].

Сумарна активність теплоносія залежить від його хімічного складу та герметичності тепловиділяючих елементів активної зони реактора. Під час роботи на потужність значну частину активності забезпечують розчинені в теплоносії натрій і калій, які окремі радіоактивні ізотопи: ^{24}Na та ^{42}K , на які припадає 80–90% активності (без урахування інертних).

У першому контурі водопідготовки контролюються параметри, що визначаються взаємодією наступних процесів.:

- борне регулювання, яке приводить до зміни концентрації KOH ;
- радіоліз теплоносія: спричиняє зміну концентрації O_2 , NH_3 , N_2H_4 ;
- забруднення теплоносія;
- надходження з живильною водою і внесені хімічними реагентами: Cl^- , F^- , Na^+ , NO_3^- , SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^- , органічні речовини;
- Fe , Cr , Ni , Li^+ , утворюється в першому контурі під час роботи реакторної установки на потужності.

Регулювання кількості аміаку в першому контурі реакторної установки з ВВЕР-1000 здійснюється для придушення процесу формування в теплоносії радіолізного кисню. Це забезпечує потрібну кількість розчиненого водню в теплоносії. Схема розкладання аміаку під впливом нейтронного потоку температури має вигляд:



Водночас швидкість формування водню з дозуванням в теплоносії аміаку визначається в залежності від рівня нейтронного потоку в активній зоні.

Оптимальна концентрація аміаку в першому контурі має підтримуватись на рівні, що гарантує рівень водню в межах від 2,2 до 4,5 мг/дм³ [18].

Середній рівень концентрації аміаку в теплоносії під час кампанії знаходиться на рівні 10 мг/дм³. Максимальна концентрація аміаку спостерігається під час пуску блоку більше 100 мг/дм³.

Живильна вода в першому контурі не піддається термічній деаерації, а це означає, що кисень може потрапляти в охолоджувальну воду під час водообміну.

Розчини гідрозину та аміаку безперервно подаються в теплоносії протягом всієї паливної кампанії для підтримання заданих хімічних параметрів [18].

На рис.8 наведено зміну концентрації аміаку та водню в теплоносії одного з енергоблоків ВП ХАЕС під час паливної кампанії, також на рис.9 показано залежність концентрації аміаку і водню від рівня потужності реактора в режимі маневрування.

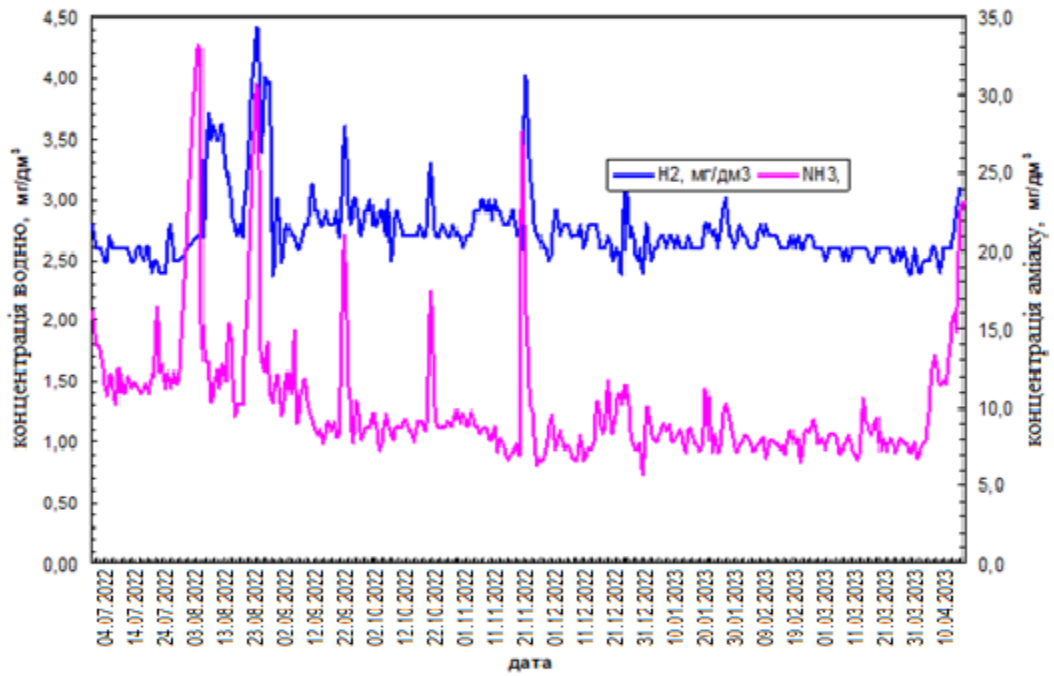


Рисунок 8 - Зміна концентрації аміаку і водню в першому контурі протягом одного паливного циклу

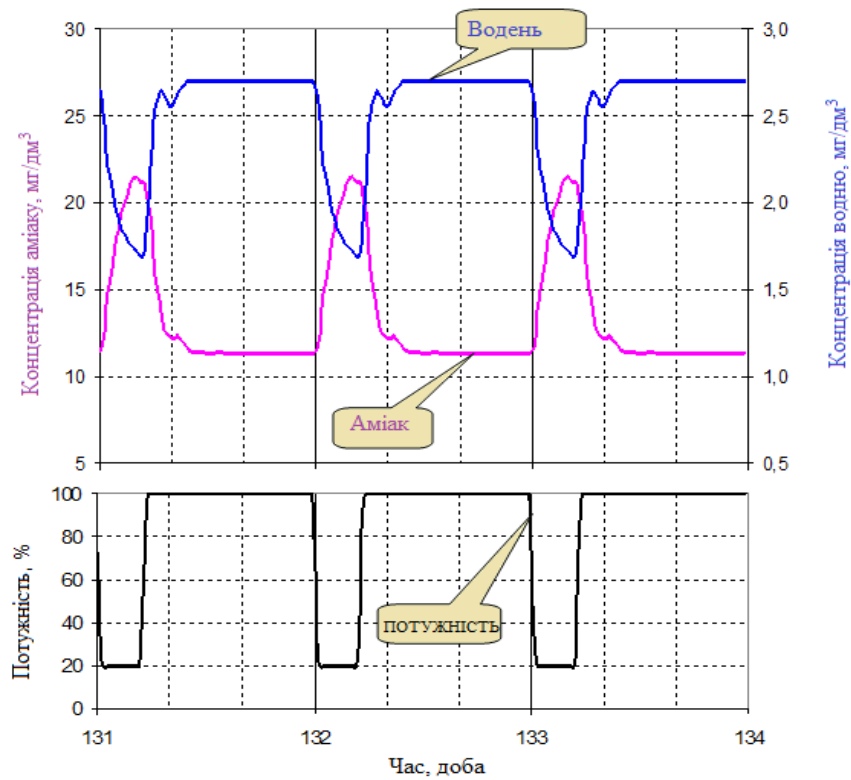


Рисунок 9 – Вплив рівня потужності реактора в режимі змінного навантаження на концентрію аміаку і водню

Критерії якості теплоносія першого контуру, включаючи діапазони граничних значень і рівні відхилень при роботі енергоблоку на різних рівнях потужності викладені в СОУ НАЕК 191:2020 «Інженерна, наукова та технічна підтримка. Водно-хімічний режим першого контуру ядерних енергетичних реакторів типу ВВЕР-1000. Технічні вимоги. Способи забезпечення якості», представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 - Якість теплоносія першого контуру при роботі РУ з ВВЕР-1000 на енергетичних рівнях потужності [18]

Найменування показників	Нормовані показники			
	Діапазон допустимих значень	Відхилення від допустимих значень		
		перший рівень	другий рівень	третій рівень
масова концентрація хлорид - іона, мг/дм ³	не більше 0,1	-	більше 0,1 - 0,2	більше 0,2
масова концентрація фторид - іона, мг/дм ³	не більше 0,1	-	більше 0,1 - 0,2	більше 0,2
масова концентрація розчиненого кисню, мг/дм ³	не більше 0,005	Більше 0,005-0,02	більше 0,02 - 0,1	більше 0,1
масова концентрація розчиненого водню, мг/дм ³	від 2,2 до 4,5	більше 4,5 - 7,2 або менше 2,2 - 1,3	більше 7,2 - 9,0 або менше 1,3 - 0,5	більше 9,0 або менше 0,5
сумарна молярна концентрація іонів лужних металів (К, Лі, Na) в залежності від поточної концентрації борної кислоти, ммоль/дм ³	зона А	зона Б і В	зона Г і Д	зона Е
Діагностичні показники				
Найменування показників			контрольні рівні	
Водневий показник рН, одиниць			від 5,8 - 10,3	
Масова концентрація аміаку, мг/дм ³			не менше 5,0	

Примітка. Перший рівень – незначні відхилення; другий рівень – середні відхилення; третій рівень – критичні відхилення.

Зона А – область, де співвідношення концентрацій відповідає оптимальному або допустимому режиму.

Зона Б – показує межі концентрацій, які відносяться до умов, ближчих до нижньої межі оптимального режиму. У межах зони Б концентрація є допустима, але ближчим до граничних значень.

Зона В – зона стосується меж концентрацій, які вже відносяться до нижніх допустимих значень, але ще не виходять за рамки безпечних параметрів.

Зона Г – область яка відповідає концентраціям де система переходить до верхніх граничних режимів. Це вказує на можливий ризик відхилення від оптимального стану.

Зона Д – відображає перевищення концентрацій борної кислоти або іонів металів, що може вказувати на режим, який наближається до аварійного.

Зона Е – це найвищий рівень концентрації, який, ймовірно, сигналізує про небезпечний або аварійний стан.

Концентрація борної кислоти в теплоносії протягом паливного циклу підтримується і поступово знижується шляхом водообміну в залежності від запасу реактивності активної зони.

Протягом роботи реакторної установки необхідно забезпечувати рівноважну масову концентрацію аміаку в теплоносії першого контуру на рівні, який підтримує масову концентрацію водню в діапазоні 2,2-4,5 мг/дм³. Мінімальне значення концентрації аміаку становить 5 мг/дм³, тоді як максимальна рівноважна концентрація аміаку визначається граничним значенням концентрації водню в теплоносії [18].

Коли реакторна установка (РУ) працює на потужності від 10% до 50% від номінального значення то дозволяється зменшити концентрацію водню в теплоносії в межах границі першого рівня відхилень (табл. 1). У цьому випадку концентрація розчиненого кисню в теплоносії має залишатись в межах допустимого діапазону таблиці 1.

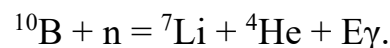
Якщо потужність РУ становить менше 10% від номінального рівня концентрація водню в теплоносії не регулюється. Для підтримки заданої концентрації кисню в теплоносії додається гідрозин гідрату.

У випадках, коли масова концентрація заліза в теплоносії перевищує 0,05 мг/дм³, визначається вміст хрому та нікелю з метою встановлення причин підвищення концентрації продуктів корозії та їх усунення.

Рівень сумарної молярної концентрації іонів калію, літію і натрію повинен відповідати допустимим значенням, які залежать від концентрації борної кислоти в теплоносії і досягатися не пізніше, ніж через сім діб після виходу роботи реактора на номінальну потужність після перевантаження палива.

Щоб збільшити сумарну молярну концентрацію іонів лужних металів (K, Li, Na) у теплоносії та компенсувати кислотність борної кислоти, у підживлювальну воду періодично вводять калій гідроксид (KOH) у кількості, яка забезпечує досягнення оптимального рівня концентрації іонів для поточної кількості борної кислоти. [19].

Процес нейтралізації також включає літій, що утворюється в результаті реакції і осідає в теплоносії.



Сполуки натрію (супутні забруднення), в основному аміак і гідроксид калію, потрапляють в теплоносії разом з коригуючим реагентом, що вводиться в перший контур.

З огляду на вищесказане, загальна концентрація іонів лужних металів калію, натрію і літію в залежності від концентрації борної кислоти в теплоносії 1 контуру представлена залежністю, наведеною на рис. 10.

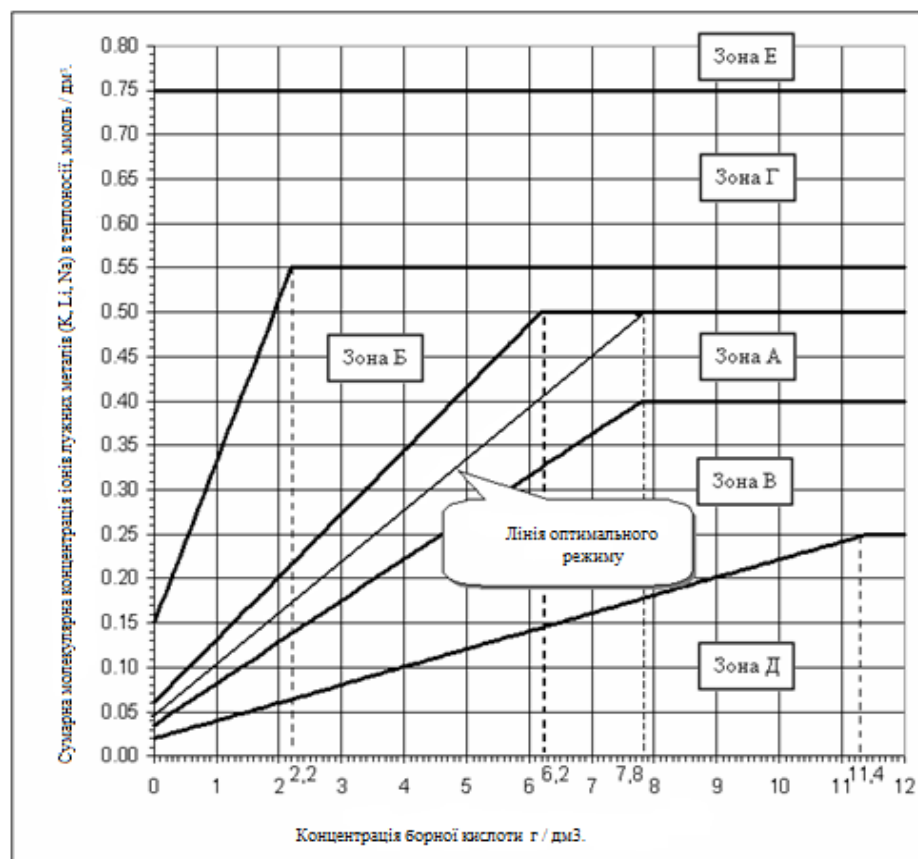


Рисунок 10 - Взаємозв'язок загальної молярної концентрації іонів лужних металів (K, Li, Na) у теплоносії першого контуру з актуальним рівнем концентрації борної кислоти [18]

Примітка: Границі зон А та Б, А та В відносяться до зони А.

Границі зон В та Д відносяться до зони В.

Границі зон Б та Г відносяться до зони Б.

Границі зон Г та Е відносяться до зони Г.

Реагенти та їх застосування, які додаються в теплоносії 1-го контуру, показані в таблиці 3.

Таблиця 3 - Хімічні речовини, що вводяться до теплоносія першого контуру [20]

Найменування реагенту, концентрація	Застосування реагенту
розчин гідроксид калію, 3%	вводиться в теплоносій для компенсування кислотних характеристик борної кислоти
розчин аміаку, 3%	вводиться в теплоносій для забезпечення потрібного рівня концентрації розчиненого водню
розчин гідразин гідрату, 2%	вводиться в теплоносій для хімічного видалення кисню з теплоносія та підживлювальної води першого контуру
розчини борної кислоти (концентрація залежить від поточного режиму роботи реактора)	вводяться в теплоносій для контролю реактивності активної зони реактора

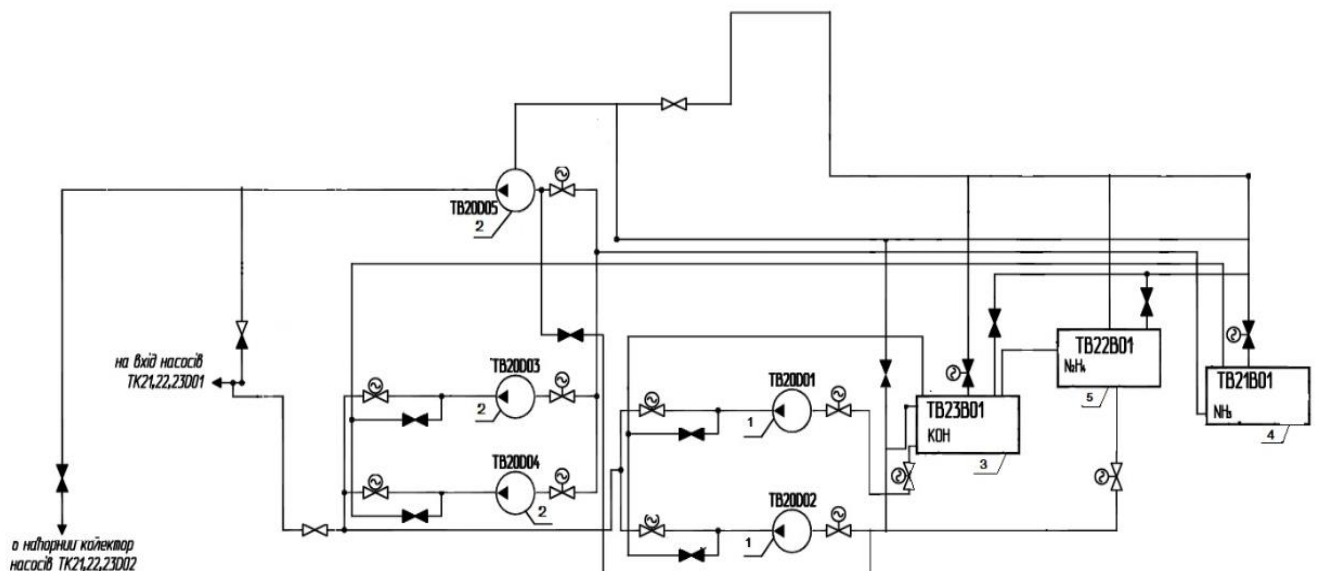
Система управління реагентами в реакторному відділенні реакторної установки ВВЕР-1000 показана на рисунку 11, призначена для приймання зі спецкорпусу, зберігання та введення реагентів у перший контур:

- 3% розчин калій гідроксиду, що знаходиться в баку ТВ23В01, подається до першого контуру за допомогою насосів ТВ20D01 (D02) у спільний всмоктувальний колектор підживлювальних насосів ТК21, ТК22, ТК23D02;

- 3% розчин аміаку, що знаходиться в баку ТВ21В01, подається за допомогою насосів ТВ20D03 (D04) у загальний всмоктувальний колектор підживлювальних насосів ТК21, ТК22, ТК23D02, а також насосом ТВ20D05 у напірний колектор підживлювальних насосів;

- 2% розчин гідразин гідрату, що міститься в баку ТВ22В01, подається насосами ТВ20D01 (D02) у загальний всмоктувальний колектор підживлювальних насосів. [18];

- розчини борної кислоти з масовою концентрацією від 16 до 20 г/дм³ на старті паливного циклу, а також до поточної концентрації в першому контурі, де масова концентрація коливається від 39,5 до 44,5 г/дм³, зберігаються в баках очищеного борного концентрату ТВ10В01 (В02) та в баках ТВ30В01 (В02).



1 – насос подачі КОН; 2 – насос подачі NH₃; 3 – бак з розчином КОН;
4 – бак з розчином NH₃; 5 – бак з розчином N₂H₄.

Рисунок 11 - Система управління реагентами реакторного відділення
РУ з ВВЕР-1000

Оскільки технічно та технологічно на українських атомних електростанціях, можлива заміна водно-хімічного режиму з слабо лужного, аміачно – калієвого ВХР, на літій-водневий для дослідження було обрано АЕС Емсланд, на якій використовувався цей ВХР. Це дозволить нам суттєво удосконалити ведення водно-хімічного режиму, шляхом зменшення впливу аміаку на ефективність СВО, перейти на нерегенеруючі смоли СВО. Дозволить зменшити сплески активності і значні коливання концентрації

лужних металів, при дозуванні аміаку в наслідок порушення поточної рівноваги фільтрів СВО-2, також знизити надходження корозійно-небезпечних активуючих домішок в перший контур. Зменшиться кількість рідких радіоактивних відходів та окислювальних продуктів радіолізу.

На АЕС Емсланд впроваджений оптимізований відновний водно-літійовий ВХР, у якому реактивність реактора контролюється за допомогою борної кислоти, а рівень рН у контурі підтримується за рахунок утворення ${}^7\text{Li}$ з ізотопом ${}^{10}\text{B}$, що міститься в борній кислоті. Цей режим є саморегульованим і не потребує додаткового введення хімічних елементів в теплоносій, окрім внесення 1 кг літію на початку паливного циклу.

Сильною стороною введення літій-водневого водно-хімічного режиму є уникнення кисневої та кислотної корозії металів, зменшення швидкості утворення тріщин, викликаних корозією, підвищення ресурсу обладнання, економічність та екологічність. З недоліків можна виділити необхідність високої чистоти води, тому що присутність сторонніх домішок значно знижує ефективність режиму, складність контролю через високі вимоги до системи моніторингу якості води та ризик передозування літію, що може спричинити утворення вторинних продуктів які шкодять обладнанню. Вимоги до ВХР теплоносія першого контуру наведені в табл. 3

Регулювання вмісту літію в граничних значеннях (рисунок 12) здійснюється за потреби шляхом періодичного підключення фільтру змішаної дії системи очищення теплоносія з катіонітом у водній формі, що дозволяє видаляти літій з теплоносія.

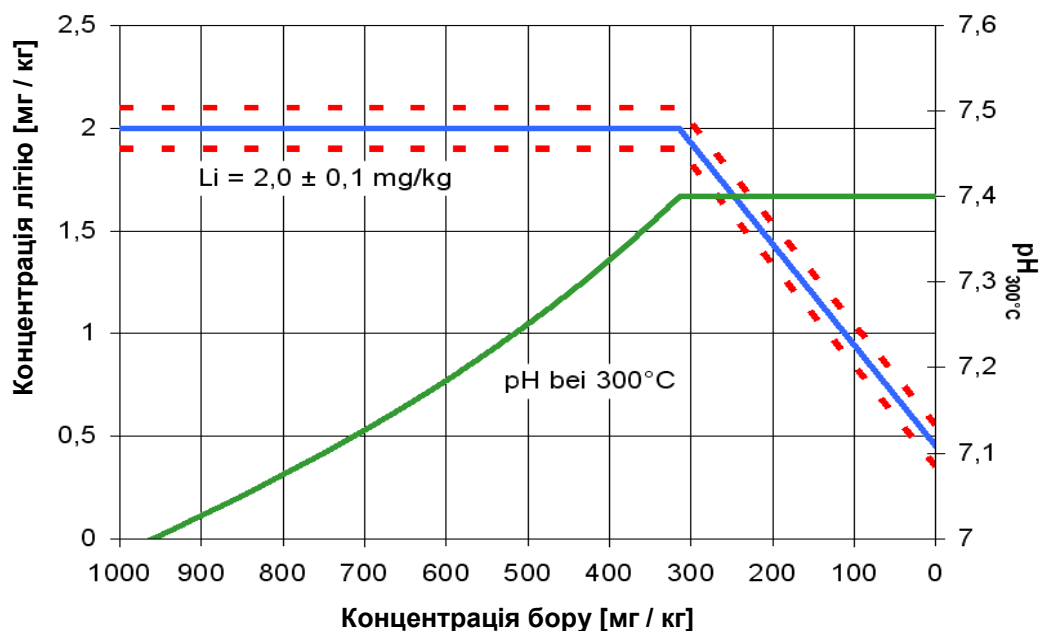


Рисунок 12 - Залежність концентрації літію (Li) від концентрації бору (B) при 300 °C

Вимоги до теплоносія 1 контуру РУ Емсланд

Таблиця 4 - Якість теплоносія 1 контуру РУ Емсланд при роботі на потужності

Контрольований параметр	Значення нормальної експлуатації	Відхилення рівень 1	Відхилення рівень 2	Відхилення рівень 3
Гідроксид літію, мг/кг	> 0,22	—	—	—
	<2,2	—	—	—
Водень, мг/кг	> 1,5	<1,5	<1	<0,5
	<4	—	> 4	> 5
Кисень в теплоносії, мг / кг	<0,005	—	—	—
Хлорид-іони, мг/ кг	<0,01	> 0,1	> 0,2	> 1,0
Сульфат, мг/кг	<0,01	> 0,1	> 0,2	> 1,0

Кисень, хлорид-іони та сульфати мають бути мінімізовані через їхній вплив на корозійні процеси в металічних компонентах системи.

Значення рН першого контуру і пов'язана з ним концентрація продуктів корозії знаходяться на найнижчому можливому рівні. Як наслідок, немає необхідності додатково впорскувати гідроксид літію (LiOH) по всій установці, а просто видаляти надлишок через фільтр змішаної дії (ФЗД), який можна підключати за потреби. Концентрації активності корозійних продуктів контролюються замість вимірювання макромолекулярних концентрацій.

Для регулювання подачі хімічних реагентів в перший контур розрахована система реагентного господарства. Розчин гідразину (15% -ий розчин гідразин гідрату N_2H_4) або розчин оксиду літію (LiOH) можна приготувати до необхідної концентрації в ємності для приготування розчину. Резервуар підключений до системи хімічного безсольового водопостачання. Насос для дозування реагентів - мембранний. Гідравлічні удари від подачі реагенту гасяться гасителями коливань (демпферами). Система дозування реагентів підключена до першого контуру перед живильним насосом [9].

Аналогічно, за необхідності, в це ж місце може подаватися борна кислота з системи зберігання запасів розчинів борної кислоти. Борна кислота є єдиним реагентом, який можна дозувати без затримок. Вона зберігається в двох баках по 106 м³, загальний обсяг яких становить 212 м³, з концентрацією бору 7100 мг/кг (4% борна кислота). Система розроблена таким чином, щоб покривати всі експлуатаційні режими, пов'язані з регулюванням реактивності (зменшення надлишкової реактивності, отруєння ксеноном), а також забезпечувати підвищення концентрації бору в першому контурі до 2200 мг/кг (1,25% борної кислоти) і подавати борну кислоту для перевантаження палива.

Також є бак об'ємом 10 м³ для приготування розчину борної кислоти і подачі його в перший контур для компенсації вигорання палива. Коли установка працює на повну потужність, нова борна кислота потрібна тільки для компенсації неминучих втрат, заповнення резервуарів для зберігання

борної кислоти, що використовуються в експлуатаційних цілях і для подачі в систему, що містить борну кислоту, після ремонту, коли потрібен дренаж. Виходячи з досвіду експлуатації установки, достатньо резервуара об'ємом 10 м³. Резервуар не знаходиться під тиском і переповнення стікає в дренажну систему будівлі. Оскільки борна кислота готується з використанням хімічно очищеної води з системи первинної обробки охолоджувальної води, цей бак розрахований на температуру 100°C. [21].

У вузлі дозування потік продувної води насичується воднем наступним чином. Газоподібний водень подається в сепаратор, де він засмоктується водоповітряним ежектором, який працює на воді, що надходить під тиском від підживлювальних насосів. Концентрація водню у воді залежить від тиску водню в газовій фазі сепаратора. На виході з ежектора утворюється суміш газу і рідини, яка направляється до змішувача, де вона з'єднується з основним потоком продувної води. Це дозволяє ефективно наситити воду воднем. Потім потік потрапляє в сепаратор, де невикористаний водень переходить в газову фазу, знову засмоктується ежектором, диспергується у воді і повертається до змішувача. Так досягається оптимальний рівень насичення води воднем, а також ефективно видаляються бульбашки водню, які не розчиняються у воді. Після цього потік подається до підживлювальних насосів.

На всмоктуванні підживлювальних насосів змішуються потоки з деаератора і вузла дозування водню. Для того щоб уникнути утворення великих газових бульбашок, перед кожним високонапірним насосом в патрубку встановлюється змішувальний елемент. Це дозволяє в насос потрапляти тільки дрібним і добре розподіленим бульбашкам газу, що захищає насоси від кавітації. Після насосів потік повертається в контур.

Ежекторна схема дозування водню зображена на рисунку 13.

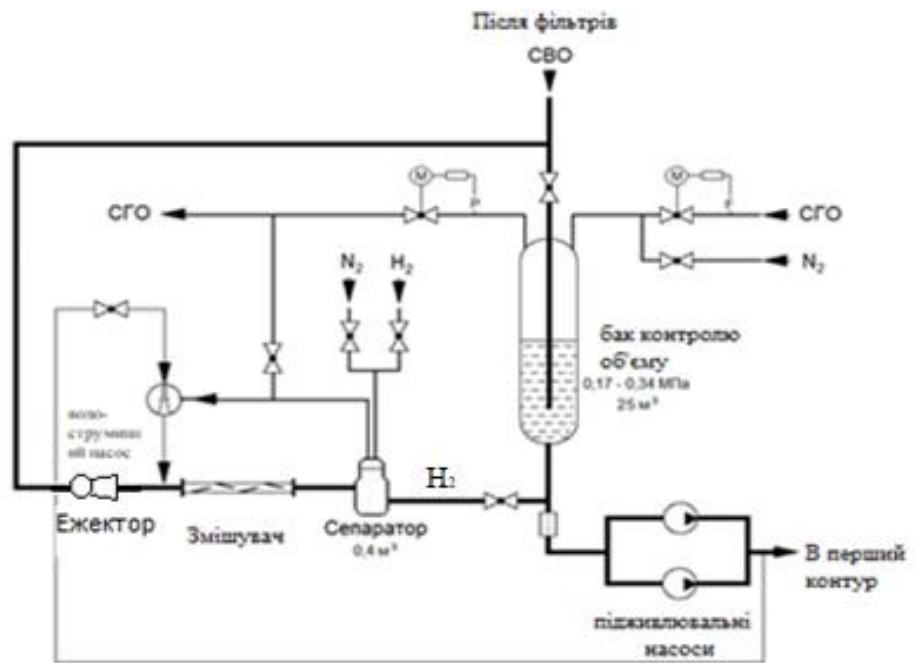


Рисунок 13 – Ежекторна схема дозування водню.

2 Технологічна частина

З огляду на численні негативні фактори, що супроводжують використання аміачно-калієвого ВХР, пропонується замінити дозування розчину аміаку на введення літію та газоподібного водню в теплоносій першого контуру. Це дозволить вирішити проблему корозії обладнання, що знизить небезпеку для теплообмінних поверхонь трубопроводів та реактора, знизити активність першого контуру, зменшити використання іонообмінних смол, знизити утворення великої кількості рідких радіоактивних відходів, зменшити утворення радіоактивних викидів, а саме тритію та вуглецю. Підвищення стабільності ведення ВХР матиме позитивний вплив на роботу реакторної установки в цілому та на навколишнє середовище шляхом зменшення утворення рідких радіоактивних технологічних відходів.

2.1 Використання іонообмінних смол та накопичення рідких радіоактивних відходів

В розділі 1.2 було описано вимоги до ведення ВХР 1 контуру РУ на ВП ХАЕС і на АЕС Емсланд.

Різниця в організації ВХР першого контуру для розглянутих РУ представлено у таблиці 5.

У таблиці 6 порівнюється кількість борної кислоти, яку споживають енергоблоки ВП ХАЕС і АЕС Емсланд за рік. На АЕС Емсланд не проводиться регенерація іонітів, а обсяг завантаження іонітних фільтрів у системі водопідготовки в п'ять разів менший, ніж на енергоблоці ВВЕР-1000.

Таблиця 5 - Основні відмінності в організації водно-хімічного режиму (ВХР) першого контуру між АЕС Емсланд та ВП ХАЕС

Параметр	АЕС Емсланд	ВП ХАЕС
Борна кислота	збагачена ізотопом ^{10}B .	природне співвідношення ізотопів бору.
Лужна добавка	LiOH , утворений із ^{10}B у нейтронному полі реактора. Дозується лише на початку кампанії для встановлення рН.	Дозується KOH протягом усієї паливної кампанії. Утворюється додатково ^7Li через ядерну реакцію з ^{10}B .
Придушення радіолізу	Газоподібний водень дозується в 1 контур.	Дозується розчин аміаку, розкладається на водень і азот під дією радіоактивного випромінювання.
Системи очищення теплоносія	Фільтри змішаної дії, не регенеруються.	Іонообмінні смоли, регенеруються, призводить до утворення значної кількості РРВ.
Рідкі радіоактивні відходи (РРВ)	Не утворюються через відсутність регенерації фільтрів.	Більша частина РРВ утворюється через регенерацію фільтрів.
Радіоактивні продукти активації	Відсутні продукти активації ^{42}K та ^{24}Na .	радіоактивні ізотопи ^{42}K та ^{24}Na , створюють 80-90% питомої активності ізотопів (без інертних газів).
Використання реагентів	Кількість дозованих реагентів менша.	Кількість дозованих реагентів більша, що сприяє утворенню більшої кількості РРВ.

Таблиця 6 - Річна витрата борної кислоти для енергоблоків ВП ХАЕС та АЕС Емсланд.

Реагенти	Кількість дозованої кислоти, кг			
	ХАЕС		АЕС Емсланд	
	Всього	на 1000 кВт потужності	всього	на 1000 кВт потужності
Природне співвідношення ізотопів борної кислоти	15000	15	120	0,086
Борна кислота, збагачена ізотопом ^{10}B	-	-	6	0,0043

У Таблиці 7 показано споживання хімічних речовин на один енергоблок на рік.

Таблиця 7 - Споживання хімічних реагентів на один енергоблок протягом року

Реагенти	Кількість хімічних реагентів, кг	
	ВП ХАЕС	АЕС Емсланд
Для підтримки водохімічного режиму 1-го контуру		
КОН	78	–
NH_3	1750	–
N_2H_4	581	4
LiOH	–	2
H_2	–	1163 (6600 л при $P = 20 \text{ МПа}$)
Для забезпечення роботи спецводоочистки		
HNO_3	4560	–
NaOH	5010	–
КОН	940	–

З огляду на дані вказані в таблиці 5, можна зробити висновок, що при додаванні аміаку в теплоносії 1-го контуру ХАЕС попадає найбільша частка шкідливих речовин, оскільки для підтримки ВХР 1-го контуру та забезпечення роботи СВО, дозується набагато більше реагентів ніж на АЕС Емсланд.

Для вирішення проблеми утворення рідких радіоактивних відходів необхідно:

- 1) перейти на літій-водневий водно-хімічний режим;
- 2) для регулювання рН середовища в теплоносії замінити аміак та калій на літій-гідроксид;
- 3) контролювати концентрацію літію щоб уникнути надлишкової корозії, або негативного впливу на обладнання;
- 4) оптимізувати системи очищення та впровадити більш ефективні методи обробки води, щоб мінімізувати обсяг кінцевих відходів.

Розробка та впровадження методів глибокої переробки, зберігання рідких радіоактивних відходів та забезпечення дотримання екологічних норм для мінімізації впливу на довкілля, допоможе екологічно та безпечно утилізувати відходи. На атомних електростанціях з реакторами типу ВВЕР-1000 теплоносії першого контуру очищується за допомогою фільтра СВО-2, який потребує відновлення через виснаження.

Для очистки теплоносія 1-го контуру на АЕС Емсланд використовують два паралельно працюючих фільтра змішаної дії. Вони направлені на очищення теплоносія від продуктів активації (Co, Cr, Fe), іонних домішок (Cl, SO₄) і продуктів розпаду (I, Mo, Cs, Sr). Продуктивність цих фільтрів становить близько 8 кг/с при роботі блоку на максимальній потужності..

Схему фільтра змішаної дії зображено на рисунку 14.



Рисунок 14 – Схематичне зображення складу фільтра змішаної дії

Основний фільтр - це фільтр змішаної дії, наполовину заповнений аніонними (насиченими борною кислотою) і наполовину заповнений катіонами (насиченими літієм)

Фільтр для видалення Li/Cs: той самий склад смоли, що і в основному фільтрі, насичений тільки борною кислотою і періодично вмикається для підтримки рекомендованої концентрації літію.

Коли фільтр для видалення Li/Cs насичується літієм, він використовується як основний фільтр, а основний фільтр вивантажується. Фільтри зазвичай працюють протягом 4-5 років і мають ємність 1300 літрів.

Вся охолоджуюча вода, що обмінюється в першому контурі, розділяється у випарнику на борну кислоту з концентрацією бору 7000 мг/кг і хімічно демінералізовану воду. Перед подачею на випарник охолоджуюча вода проходить через 600-літровий фільтр змішаної дії для видалення продуктів розпаду та активації. Термін служби фільтрів становить приблизно 1-1,5 роки. Іонообмінні смоли вивантажуються, коли закінчується термін їхньої експлуатації і накопичується певна кількість радіоактивних матеріалів.

Вода з басейну витримки відпрацьованого ядерного палива очищується в системі очищення зі швидкістю потоку ~ 5 кг/сек в 600-літровому фільтрі змішаної дії і насичується борною кислотою. Фільтр працює 1-2 роки, після чого іонообмінна смола вивантажується. Знову ж таки, основне завдання фільтра - відфільтрувати продукти розпаду та активації з води у басейні-накопичувачі. Одночасно фільтр змішаної дії відфільтровує колоїдні частинки, що потрапляють в басейн витримки з повітря. Іонообмінні смоли такі ж, як і ті, що використовуються в системах первинної обробки охолоджувальної води. [9].

Порівнюючи системи очищення ВП ХАЕС і АЕС Емсланд можна підвести висновок, що кількість використаних іонітів в установках очищення радіоактивних середовищ ВП ХАЕС більші, ніж на АЕС Емсланд (при розрахунку на один блок), оскільки на ХАЕС системи очищення охоплюють широкий спектр середовищ: теплоносій 1 контуру, боровмісні розчини, трапні води, конденсати, продувочні води, які вимагають більшої кількості фільтрів. Кожна система має кілька паралельних ниток з іонообмінними фільтрами, які часто піддаються регенерації для відновлення їхньої роботи. Це потребує значно більших обсягів іонітів, ніж на АЕС Емсланд, де використовуються фільтри, які працюють довше без регенерації.

Використання аміаку в якості коригуючої добавки в першому контурі на ХАЕС збільшує іонне навантаження катіонітового фільтра і скорочує цикл фільтрації, що дозволяє відмовитися від використання нерегенованої іонообмінної смоли. У випарнику аміак має високу летючість і тому змішується з конденсатом очисного середовища. Під час очищення конденсат на іонообмінній смолі переноситься в регеновану рідину і подається у випарник. на АЕС з ВВЕР-1000 спостерігаються значні витоки теплоносія першого контуру та інших боровмісних розчинів, що призводить до втрат борної кислоти і збільшення обсягів РРВ.

У проєкті В-320 (технічний проєкт ВВЕР-1000 для серійних енергоблоків), експлуатаційна швидкість витоку ВВЕР-1000 встановлена на рівні 0,2 т/год. Річний нормований обсяг витоків становить 1747 тонн. Неорганізовані витоки з реакторного відділення енергоблоку наведені в таблиці 6.

Протягом року через систему спецканалізації одного енергоблоку ВП ХАЕС на установку очищення СВО-3 спецкорпусу надходить сумарно 1500 м³ трапних вод для переробки, що відповідає проєктним значенням.

Таблиця 8 - Неорганізовані протікання енергоблоків ВП ХАЕС і АЕС Емсланд

Найменування	Нормоване протікання, т	Фактичне протікання, т
ВП ХАЕС	1747	1442
АЕС Емсланд	за проєктом – відсутня	0,006

Більшість РРВ утворюється в результаті втрати борної кислоти через витоки теплоносія першого контуру і розчинів систем безпеки та подальшого регулювання рН за допомогою гідроксиду натрію . Джерело надходження РРВ, що утворюється на АЕС становить 54%.

Схема утворення РРВ приведена на рисунку 15.

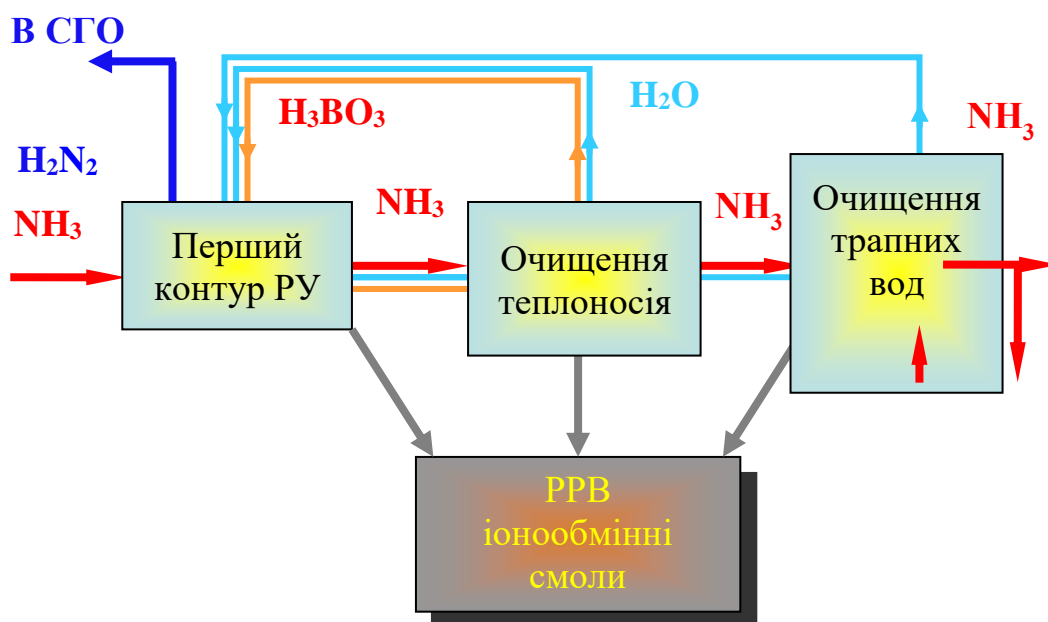


Рисунок 15 - Схема утворення рідких радіоактивних відходів

Значного скорочення радіоактивних відходів можна досягти шляхом усунення витоків і перевантаження палива в басейнах витримки відпрацьованого ядерного палива. Після усунення цього джерела, основними аспектами утворення РРВ на ХАЕС стануть технологія водопідготовки в першому контурі та робота спеціальних мийних машин.

Якщо не враховувати регенерацію СВО-3 і СВО-6 шляхом насичення аміаком, кількість рідких радіоактивних відходів, що утворюються в корпусі ВХР-1 виробничої установки, становить від 14 до 50 відсотків, в середньому близько 32 відсотків.

Враховуючи регенерацію іонообмінних смол установок СВО шляхом насичення аміаком, кількість рідких радіоактивних відходів, пов'язаних з технологією підтримки параметрів ВХР-1, збільшується до ~ 50%.

В табл. 9 наведено реагенти, які формують РРВ при веденні ВХР першого контуру реакторної установки на енергоблоках ВП ХАЕС.

Таблиця 9 - Кількість реагентів, що утворюють РРВ при веденні ВХР першого контуру РУ на енергоблоках ВП ХАЕС

Номер блоку	Загальний обсяг реагентів, які надійшли в трапні баки, т	Кількість реагентів для корекційної обробки теплоносія, т	Кількість реагентів для регенерації установки СВО-2, т	Кількість реагентів для корекційної обробки теплоносія і регенерації СВО-2, %
1	16,61	3,60	0,72	26,0
2	8,51	2,99	0,9	45,0

Хімічний склад радіоактивних стічних вод, що утворюються на ХАЕС, є наступним (рисунок 16):

- Борна кислота \approx 49%.
- Натрій \approx 29%.
- Калій \approx 3%.
- Нітрати \approx 18%.

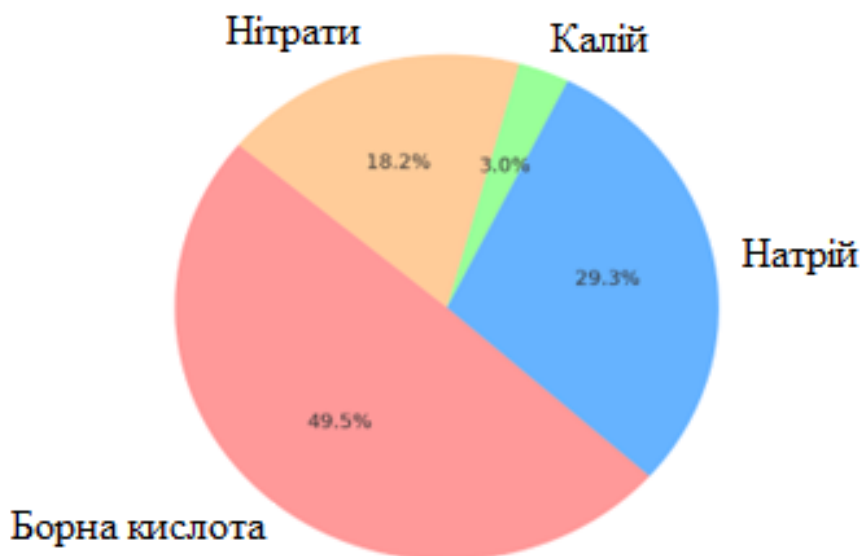


Рисунок 16 – Хімічний склад рідких радіоактивних відходів на ВП ХАЕС

Таким чином ~ 99% РРВ, що утворюються на ВП ХАЕС становлять:

- борна кислота ;
- реагенти для підтримки ВХР-1 у визначених межах;
- регенераційні розчини для регенерації працездатності іонітів систем очищення.

На АЕС Емсланд баланс витрати хімічних реагентів на один енергоблок за рік представлений в таблиці 10.

Таблиця 10 - Річний баланс споживання реагентів на АЕС Емсланд

Реагенти	Кількість витрачених хімічних реагентів, т	Кількість реагентів в РРВ (кубовому залишку)	
		т	%
N ₂ H ₄	0,004	відсутні	відсутні
LiOH	0,002	відсутні	відсутні
H ₂	6600 л (20 МПа) - 0,1163 т	відсутні	відсутні

На відмінну від енергоблоків ВВЕР, на АЕС Емсланд під час роботи блоку на потужності хімічні реагенти в теплоносій 1 контуру практично не дозуються і відповідно, їх немає в РРВ і кубовому залишку. У табл. 11 представлено склад кубового залишку.

Таблиця 11 - Склад кубічного залишку, в одному з резервуарів на АЕС Емсланд.

Хімічні реагенти	Концентрація хімічних речовин в кубовому залишку г/кг	Баланс за якістю	
		хімічний склад кубового залишку, %	хімічний склад РРВ, %
1	2	3	4
Гідроксид Натрію	47	20,7	-
Гідроксид Калію	3,8	1,7	-
Сульфати	64	28,2	-

Кінець таблиці 11

1	2	3	4
Борна кислота	83	36,6	-
Хлориди	2,5	1,1	-
Ca, Mg, Fe	0,6	0,3	-
Нерозчинні речовини	8,7	3,8	-
Всього	209,6	92,4	-

Хімічний склад кубових залишків на АЕС Емсланд регулярно не вимірюється. Для захоронення кубічних залишків достатньо лише радіохімічного аналізу. Наведені вище дані (табл. 11) були отримані з аналізу одного боксу після пошарового вакуумного випаровування. Рідкі радіоактивні відходи з АЕС Емсланд не використовувалися. Всі рідкі відходи в контрольованій зоні були випарені, а всі нелеткі матеріали були вилучені у вигляді кубічних залишків.

Хімічний склад кубових залишків на АЕС Емсланд можна порівняти з хімічним складом Хмельницької АЕС. Проте, джерела та кількість кубових залишків суттєво відрізняються.

В середньому на АЕС Емсланд утворюється близько 10 м³ кубічного залишку з густиною близько 1,2 г/см³, що відповідає приблизно 12 тоннам кубічного залишку на рік. Це відбувається, головним чином, при регулюванні рН води в резервуарі для трапних вод за допомогою розчинів NaOH і H₂SO₄. Ці речовини не використовуються для регенерації фільтра першого контуру або для дезактивації обладнання. Більшість твердих речовин у кубічному залишку - це органічні речовини, отримані з води для прання (миючі засоби та шматки одягу, що відірвалися під час прання) та реагенти для дезінфекції (розбавлений мильний розчин), що використовуються.

Використання нерегенерації іонообмінної смоли в головному фільтрі очищення теплоносія значно зменшує кількість кубічного залишку. Проте кожні 3-6 років утворюється приблизно 1500 літрів відходів у вигляді

іонообмінних смол. Ці смоли спочатку збираються в резервуар для збору і зберігаються близько п'яти років.

РРВ у ВП ХАЕС виникають внаслідок переробки радіоактивних вод першого контуру на СВО (теплоносій, вода з борною кислотою, регенераційні розчини, дезактивуючі розчини, спеціальна промивна вода).

Кількість РРВ, що утворюються, залежить головним чином від кількості та вмісту солей у цій воді.

Оскільки кількість води першого контуру і вміст борної кислоти приблизно однакові, кількість радіоактивних відходів від АЕС з реакторами типу PWR значно менша, ніж від АЕС з реакторами типу ВВЕР.

На ХАЕС утворюється в середньому 200 м³ радіоактивних відходів на енергоблок на рік. Це 0,2 м³ на мегават встановленої потужності.

Хімічний склад РРВ на ХАЕС вказує на те, що основним джерелом рідких радіоактивних відходів є борна кислота, що витікає з оболонок витримки ядерного палива, і гідроксид натрію, який використовується для нейтралізації цих витоків. Втрати борної кислоти на станції через витоки становлять близько 100 тонн на рік.

Технологічний цикл на АЕС Емсланд не виробляє більше 10 м³ кубічних залишкових РРВ з 25% мінералізацією на рік. Це становить 0,007 м³ на МВт встановленої потужності. У табл. 12 показано аналіз утворення трапних вод і кубового залишку.

Таблиця 12 - Утворення трапних вод і кубового залишку

Один енерг облок	Електрична потужність енерго блоку, мВт	Річне утворення трапних вод, м ³	Річне утворення кубового залишку РРВ, м ³	Концент рація солей в кубовом у залишку, %	Утворення кубового залишку РРВ на мегават установленої потужності, м ³
АЕС Емсланд	1400	5500	10	25	0,007
ХАЕС	1000	12100	160	25	0,2

Попередній аналіз показує, що такі відмінності в кількості утворення рідких радіоактивних відходів пов'язані в першу чергу з двома факторами:

- відмінністю в організації ВХР теплоносія першого контуру;
- значною кількістю борвмістних вод на АЕС з ВВЕР, що потрапляють в трап з неорганізованими протіканнями.

2.2 Корозія обладнання та активність першого контуру реакторної установки

Для вирішення проблем корозії обладнання атомної електростанції заміна ВХР є вірним рішенням. Заміна аміачно-калієвого ВХР на літій-водневий є сучасним підходом до підвищення надійності систем АЕС.

Корозія обладнання є однією з найважливіших проблем, що виникають під час експлуатації енергетичних систем атомних електростанцій (АЕС). Її наслідки включають зниження ефективності роботи обладнання, зростання ризику аварій та підвищення витрат на ремонт і технічне обслуговування. Одним із способів боротьби з корозією є оптимізація водно-хімічного режиму.

Аміачно-калієвий ВХР вважається найпоширенішим. Його використовують для регулювання рН у конденсатно-живильному контурі

вторинного контуру АЕС. У ньому застосовуються аміак (NH_3) і гідроксид калію (KOH). Незважаючи на поширеність, цей режим має значні недоліки.

При високих температурах аміак розкладається. Це призводить до змін хімічного складу теплоносія та утворення водню, який може пронизувати сталеві конструкції, викликаючи водневу крихкість та знижувати стійкість захисного оксидного шару на поверхні металу.

Щоб запобігти утворенню в теплоносії радіолізного кисню, який роз'їдає перший контур і конструкційні матеріали в активній зоні (АЗ) на енергоблоках з ВВЕР-1000 в теплоносії додається розчин аміаку, який розпадається під впливом нейтронного потоку і температури до газоподібного водню і азоту та має сольові домішки такі як натрій і хлор – іони і тд, в той час як на АЕС Емсланд використовується подача в теплоносії газоподібного водню з чистотою 99,9% який не містить сольових домішок. Газоподібний водень має значно кращу теплопровідність, ніж аміак, що підвищує ефективність теплопередачі в системах охолодження реактора. Це сприяє підтриманню стабільного температурного режиму в активній зоні

Аміак є токсичною речовиною, яка в разі витоку становить серйозну загрозу для здоров'я персоналу. Газоподібний водень, хоч і є вибухонебезпечним, не має токсичних властивостей і при розсіюванні у відкритому просторі не утворює шкідливих концентрацій.

Аміак здатний спричинити корозійне пошкодження трубопроводів і теплообмінного обладнання, особливо при взаємодії з мідними або сталевими сплавами. Газоподібний водень не має таких властивостей, що зменшує експлуатаційне навантаження на обладнання та подовжує його термін служби.

У разі витоку газоподібний водень не залишає токсичних слідів у навколишньому середовищі та не потребує складних процедур утилізації. Аміак, натомість, у разі розливу може спричинити серйозні екологічні наслідки через його хімічну активність.

При розгерметизації систем аміак утворює небезпечні токсичні концентрації. Газоподібний водень, маючи високу дифузійну здатність, швидко розсіюється в атмосфері, зменшуючи ризик небезпечного накопичення.

Гідроксид калію (KOH), що використовується в аміачно-калієвому ВХР, утворює іони калію (K^+). Вони можуть взаємодіяти з оксидами заліза, які формують захисний шар на поверхні обладнання. Це призводить до руйнування оксидного шару та збільшення швидкості корозії.

Аміак має високу леткість, особливо в умовах високих температур. Це ускладнює підтримання стабільного рН у теплоносії. Низький рН сприяє розвитку кислотної корозії, особливо в холодних зонах системи.

Літій-водневий режим передбачає використання гідроксиду літію (LiOH) для контролю рН. Цей підхід має низку переваг у порівнянні з аміачно-калієвим ВХР.

На сам перед гідроксид літію забезпечує стабільно високий рівень рН у діапазоні 9.2–9.4, що оптимально для мінімізації корозії сталей. На відміну від аміаку, літій не випаровується, тому рівень рН легко підтримувати навіть у високотемпературних умовах.

Літій не утворює корозійно-активних сполук при контакті з оксидами заліза. Це сприяє збереженню цілісності захисного шару на металевих поверхнях [9].

Відсутність розкладання літію в умовах високих температур запобігає появі продуктів, які можуть активізувати корозію.

Гідроксид літію сприяє підтримці чистоти теплоносія, оскільки літій утворює розчинні сполуки, які не осідають на поверхнях та теплоносії залишається більш стабільним і менш схильним до забруднення.

Покращення корозійної стійкості дозволяє знизити швидкість деградації матеріалів, подовжуючи термін експлуатації парогенераторів, конденсаторів та трубопроводів, що збільшить термін служби обладнання. Менший рівень корозії зменшує частоту ремонтів та заміни обладнання, що

скорочує експлуатаційні витрати також менший рівень корозії та водневої крихкості знижує ризик аварій, спричинених пошкодженням елементів системи.

Зважаючи на численні негативні аспекти, пов'язані з використанням аміаку, пропонується замінити дозування аміачного розчину на введення газоподібної води в теплоносій першого контуру з наданням швидкого досягнення і стабільного утримання необхідної концентрації води в періоди випуску, роботи на номінальній потужності та в перехідних режимах. Це дозволить стабілізувати контроль ВХР, мінімізувати утворення окисних продуктів радіолізу теплоносія в «гарячих» умовах РУ, під час роботи на мінімально контрольованій потужності реактора (МКР), а також при маневруванні течії отримання. Підвищення стабільності ведення ВХР позитивно позначиться на зменшення корозійних процесів, а також процеси масопереносу стабільних і активних продуктів корозії

Заміна аміачно-калієвого ВХР на літій-водневий є ефективним рішенням для мінімізації корозійних процесів у системах АЕС. Використання гідроксиду літію дозволяє стабілізувати рН, покращити захист металевих поверхонь від корозії, знизити радіоактивне забруднення та підвищити загальну надійність системи. Цей підхід сприяє як економічній ефективності експлуатації АЕС, так і підвищенню їх безпеки.

Висока активність першого контуру зумовлена накопиченням радіоактивних ізотопів калію та натрію, а також утворенням азоту в результаті радіолізу аміаку. Проблема сплесків активності теплоносія на АЕС виникає через те, що під час роботи іонообмінних фільтрів лужні метали, закріплені на смолі, можуть частково витіснятися внаслідок зміни умов теплоносія. У випадку використання аміачно-калієвого водохімічного режиму калій, витісняючись із іонообмінної смоли, потрапляє в теплоносій, де під впливом опромінення в активній зоні реактора стає джерелом радіоактивності. Для вирішення цієї проблеми доцільно перейти на літій-водневий режим, який мінімізує такі небажані ефекти.

У літію є кілька суттєвих переваг. По-перше, він утворює набагато менше радіоактивних ізотопів порівняно з калієм, тому навіть якщо якась незначна його частина потрапить у теплоносій, це не буде серйозною проблемою. Також, літій є більш стабільним у хімічному плані і не створює додаткових продуктів, які могли б сприяти активізації корозії чи забруднення теплоносія.

Внаслідок заміни аміачно-калієвого режиму на літій-водневий, суттєво змінюється хімічний режим теплоносія. У попередньому режимі для регулювання рН використовувався аміак. Аміак розпадається і утворює амонійні іони, які мають свої недоліки, включаючи здатність реагувати з іншими речовинами, що може створювати небажані продукти. У літій-водневому режимі замість аміаку використовується гідроксид літію (LiOH). Він забезпечує стабільний рівень рН, не утворює амонійних іонів, а значить, теплоносій стає більш «чистим» і передбачуваним у хімічному плані.

Ще одна важлива річ: літій має сильну спорідненість до іонообмінних смол. Це означає, що смоли краще утримують літій і не дозволяють йому витіснятися так легко, як це відбувалося з калієм. Тому навіть при зміні умов роботи ймовірність потрапляння літію в теплоносій дуже низька.

Крім того, літій-водневий режим дозволяє зменшити кількість продуктів корозії. Як відомо, у теплоносії є різні метали, які можуть кородувати через контакт із водою та іншими хімічними сполуками. Продукти цієї корозії потім активуються в реакторі, що теж підвищує радіоактивність теплоносія. У літій-водневому режимі корозія мінімізується завдяки стабільності рН, а також через те, що літій не створює умов для активного руйнування металевих поверхонь.

Щоб усе це працювало, потрібен чіткий контроль за параметрами теплоносія. Наприклад, постійно моніториться концентрація літію, рівень рН та хімічний склад продуктів корозії. Автоматизація цього процесу допомагає вчасно реагувати, якщо раптом якісь показники почнуть змінюватися.

У результаті перехід на літій-водневий режим приносить багато переваг. Це не лише знижує активність теплоносія, але й робить його хімічний склад більш стабільним, зменшує витрати на утилізацію радіоактивних відходів і підвищує довговічність обладнання.

2.3 Радіоактивні викиди: тритій та вуглець

Заміна ВХР також вирішує екологічну і радіаційну проблему, оскільки основний внесок радіоактивних забруднень АЕС в атмосферу зумовлюють інертні радіоактивні гази - тритій і генетично значимий ізотоп вуглецю ^{14}C .

В атмосферу ^{14}C надходить у формі різних сполук, основним чином у вигляді CO_2 , зокрема у вигляді CO і CH_4 . Період напіврозпаду ^{14}C становить 5730 років, найбільший пробіг електронів в повітрі 23 мм, а живої тканини 0,38 мм. Шкідливий вплив ^{14}C пов'язаний з його входженням до структури молекул білків і, зокрема, молекул ДНК і РНК. Істотне значення мають і наслідки зміни хімічної структури молекул при розпаді ^{14}C - умовна трансмутація (перетворення) атомів вуглецю в атоми азоту. При перетворенні вуглецю в молекулі ДНК здійснюється генна мутація, яка реверсивна насилу або зовсім реверсивна.

Також, у викидах АЕС наявні так само ізотопи тритію - надважкого водню. Ключова частина тритію викидається разом з рідкими відходами. Оскільки період напіврозпаду тритію сягає близько 12 років, через 40 років розпадається близько 90% вихідного тритію. Тритій, який міститься в повітряних забрудненнях і водяних скидах АЕС, входить до структури парів води і майже безперешкодно проходить системи очищення. Радіобіологічна функція тритію визначається його хімічними особливостями, які повністю відповідають простому водню, в наслідок чого тритій може бути частиною складу будь-яких органічних і неорганічних сполук.

Ключовим фактором формування ізотопу тритію в теплоносії 1 контуру є ізотоп ^{10}B , який наявний в борній кислоті АЕС з ВВЕР і АЕС з РWR.

Концентрація борної кислоти в теплоносії пов'язана з потужністю реактора і обумовлюється фізикою реактора. При однакових умовах потужності і концентрації борної кислоти на АЕС з ВВЕР і водно-водяний ядерний реактор (PWR) з'явиться однакова кількість тритію.

Спочатку паливного циклу обсяг формування тритію в теплоносії максимальний через високу концентрацію борної кислоти. В період паливної кампанії концентрація бору, а саме джерела тритію, поступово знижується, обсяг утворення тритію зменшується відповідно, також, за рахунок розведення підживлювальною водою, ступінь концентрації тритію в теплоносії 1 контуру знижується.

Процес схожі в першому контурі АЕС з водою під тиском, отже результати для АЕС з ВВЕР будуть такими ж, які для АЕС з PWR. Інакше кажучи, ВХР першого контуру не має впливу на формування тритію на АЕС з ВВЕР і PWR, отже, ВХР-1 не впливає на обсяг викидів тритію.

На атомних електростанціях з реакторами типу PWR і ВВЕР генетично важливий ізопоп вуглецю ^{14}C утворюється в основному в ході двох реакцій активації азоту аміаку і кисню нейтронами, а саме:

$^{-14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$ з великим перерізом захоплення нейтронів (σ : 1.82 барн);
 $^{-17}\text{O} (n, \alpha) ^{14}\text{C}$ з відносно великим перерізом захоплення нейтронів (σ : 0.24 барн).

Кількість ^{14}C , що утворюється при нейтронній активації ^{17}O , не залежить від використовуваного ВХР і однаковий на АЕС з ВВЕР і PWR.

Проте, у порівнянні з АЕС PWR (АЕС Емсланд) у ВП ХАЕС з ВВЕР-1000 є ще одне головне джерело утворення ізопопу ^{14}C , спричинений з технологією ведення водно - хімічного режиму теплоносія першого контуру.

Для підтримки нормального рівня водню і кисню в воді першого контуру ВП ХАЕС постійно вводить в воду першого контуру розчини аміаку і гідразину відповідно до вимог, викладених в нормативних документах. Азот аміаку і гідразину, який містить $\sim 99.6\%$ ізопопу ^{14}N , є основним джерелом

^{14}C в теплоносії ВВЕР бо мають великий переріз захоплення нейтронів (σ : 1.82 барн) реакції $^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$.

Концентрація аміаку в теплоносії ХАЕС в 10-20 разів вища, ніж в теплоносії АЕС Емсланд. Крім того, для видалення кисню часто додають гідразин, що збільшує вміст ^{14}N в теплоносії. Тому очікується, що ХАЕС вироблятиме більше ізотопів ^{14}C порівняно з АЕС Емсланд.

Хімічна форма здебільшого ^{14}C , що утворюється в ядерних реакторах типу ВВЕР, є органічним вуглеводнем в основному у вигляді метану (CH_4) внаслідок застосовуваного на ХАЕС відновного режиму ВХР першого контуру, невелика частина ^{14}C буде викидатися в неорганічній формі у вигляді CO_2 .

Порівняльний аналіз рівня утворення радіонуклідів представлено на таблиці 13.

Таблиця 13 - Порівняльний аналіз рівня утворення радіонуклідів у теплоносії першого контуру РУ енергоблоків ВП ХАЕС та АЕС Емсланд

Радіонуклід	ВП ХАЕС	АЕС Емсланд	Примітки
Тритій (^3H)	Рівень утворення не залежить від ВХР, визначається фізикою реактора і змістом бору (^{10}B) в борній кислоті	Рівень утворення не залежить від ВХР, визначається фізикою реактора і змістом бору (^{10}B) в борній кислоті	Тритій утворюється за однаковими умовами на обох АЕС
Вуглець (^{14}C)	Вищий рівень утворення через використання аміаку та гідразину, що є джерелом ізотопу азоту (^{14}N)	Нижчий рівень утворення через відсутність постійного дозування аміаку і гідразину	Вищий рівень викидів ^{14}C на ХАЕС, вимірювання не проводяться, планується впровадження вимірів

Аналіз відмінностей технології підтримки водно-хімічного режиму і процесів утворення РРВ на аналізованих енергоблоках показує:

1. Обидві станції використовують борний контроль, але на відміну від ХАЕС, АЕС Емсланд використовує борну кислоту, збагачену на 28% ізотопом бору ^{10}B [21].

2. Для зменшення корозійної активності борної кислоти на конструкційних матеріалах, що працюють в умовах першого контуру, в теплоносії додають регульовану кількість лужного металу як нейтралізатора кислотності для регулювання значення рН:

- на АЕС Емсланд використовується гідроксид літію, для запобігання утворення в технологічних середовищах ізотопів тритію використовується ізотопно-чистий гідроксид ^7Li . Враховуючи те, що штучний стабільний ізотоп ^7Li утворюється в теплоносії в результаті поглинання надлишкових нейтронів ізотопом бору ^{10}B , кількість розчину гідроксиду ^7Li , що додається в якості реагенту, є невеликою. Це означає, що кількість борної кислоти, збагаченої ізотопом бору ^{10}B , на одну паливну кампанію становить 1,2 кг, коли використовується борна кислота, збагачена ізотопом бору ^{10}B , і 1,9 кг, коли використовується борна кислота з природним співвідношенням ізотопів бору;

- на ВП ХАЕС дозується розчин гідроксид калію. З огляду на те, що в цьому реагенті в якості домішок міститься натрій і в теплоносії за рахунок реакції поглинання нейтронів ^{10}B генерується ^7Li , то при коригуванні рН враховується підсумковий вплив калію, натрію і літію на лужність теплоносія. Кількість вводиться в перший контур гідроксиду калію знаходиться на рівні 70 кг за паливну кампанію, тобто в ~ 45 разів більше ніж на АЕС Емсланд.

3. Щоб запобігти утворенню в теплоносії радіолізного кисню, який є корозійно-активною речовиною пов'язаною з конструкційними матеріалами першого контуру і активної зони (АЗ):

- на АЕС Емсланд застосовується дозування в теплоносії газоподібного водню з чистотою 99,9% що не містить сольових домішок;

- на енергоблоках ВП ХАЕС в теплоносії вводиться розчин аміаку, що розкладається під впливом нейтронного потоку і температури до газоподібного водню і азоту і містить сольові домішки у вигляді натрію і хлор – іонів і тд.

4. Системи водоочищення на обох станціях аналогічні. При цьому в системах очищення теплоносія і радіоактивних середовищ першого контуру:

- на АЕС Емсланд використовуються не регенеровані іоніти, обсяг іонітових завантажень фільтрів систем очищення ~ 5 разів менше, так як рівень надходження домішок в теплоносії низький зважаючи на обмеження дозування реагентів в теплоносії (тільки гідроксид літію на початку кампанії);

- для енергоблоків ВП ХАЕС застосовуються регенеровані іоніти, що створює додаткові джерела утворення рідких радіоактивних .

5. Використання водних розчинів аміаку і гідроксиду калію в першому контурі призводить до утворення довгоживучих ^{40}K ($T_{1/2} = 1,42 \times 10^9$ років), ^{14}C ($T_{1/2} = 5568$ років) які штучно утворюються в теплоносії і радіоактивних відходах. Ці елементи входять до групи біологічно активних хімічних елементів, які є потенційно більш шкідливими для навколишнього середовища в порівнянні з воднево-літійовим ВХР.

6. Додавання в теплоносії енергоблоків ХАЕС домішок з дозованим реагентами призводить до накопичення, корозійних речовин таких як, хлорид-іони, сульфат - іони, іони натрію, збільшуючи потенційний ризик корозії аустенітної нержавіючої сталі і власну радіоактивність теплоносія. ВХР першого контуру РУ АЕС з РWR у значній степені позбавлений цього недоліку, так як газоподібний водень майже не містить домішок.

7. Однією з основних причин збільшення об'ємів РРВ на АЕС з реакторами типу ВВЕР є висока концентрація аміаку в теплоносії першого контуру:

- використання аміаку спричиняє зниження обмінної ємності іонітних фільтрів, постійної регенерації, утворення великих обсягів регенераційних розчинів і, з рештою, до утворення РРВ;

- аміак у випарних апаратах поступає в конденсат, осідає на іонообмінних фільтрах і з регенераційними розчинами знову поступає у випарні апарати. Виходить особливий кругообіг аміаку, який призводить до збільшення регенераційних рідин і РРВ.

Таким чином, використана на ХАЕС технологія підтримки хімічних критерій теплоносія і роботи систем очищення попередньо створює передумови для вищого ступеня утворення рідких радіоактивних відходів, в порівнянні з технологією, яка використовується на АЕС Емсланд.

8. Застосування аміаку призводить до збільшення продуктів окислювального радіолізу під час зниження потужності енергоблока, при виході РУ в «гаряче зупинення» і на МКР.

9. Аміачний режим призводить до нерівномірного регулювання води в перехідному режимі системи управління, включаючи добові перебори.

На рисунках 17 та 18 зображено підтримку ВХР в базовому режимі, та в режимі маневрування.

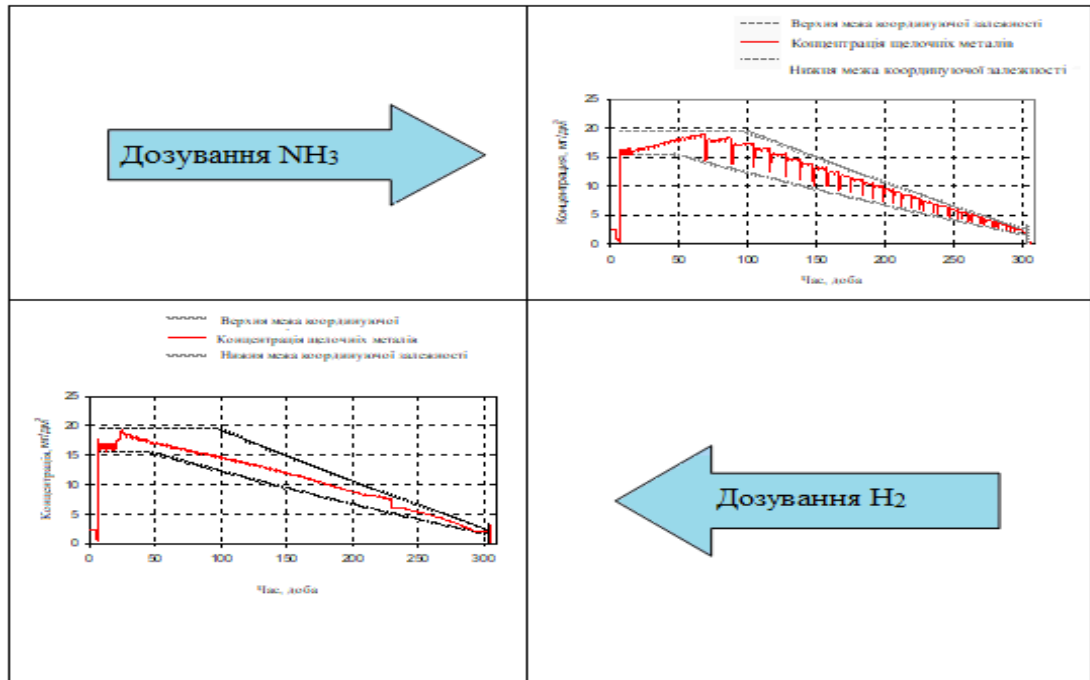


Рисунок 17 – Підтримка ВХР у стандартному режимі роботи

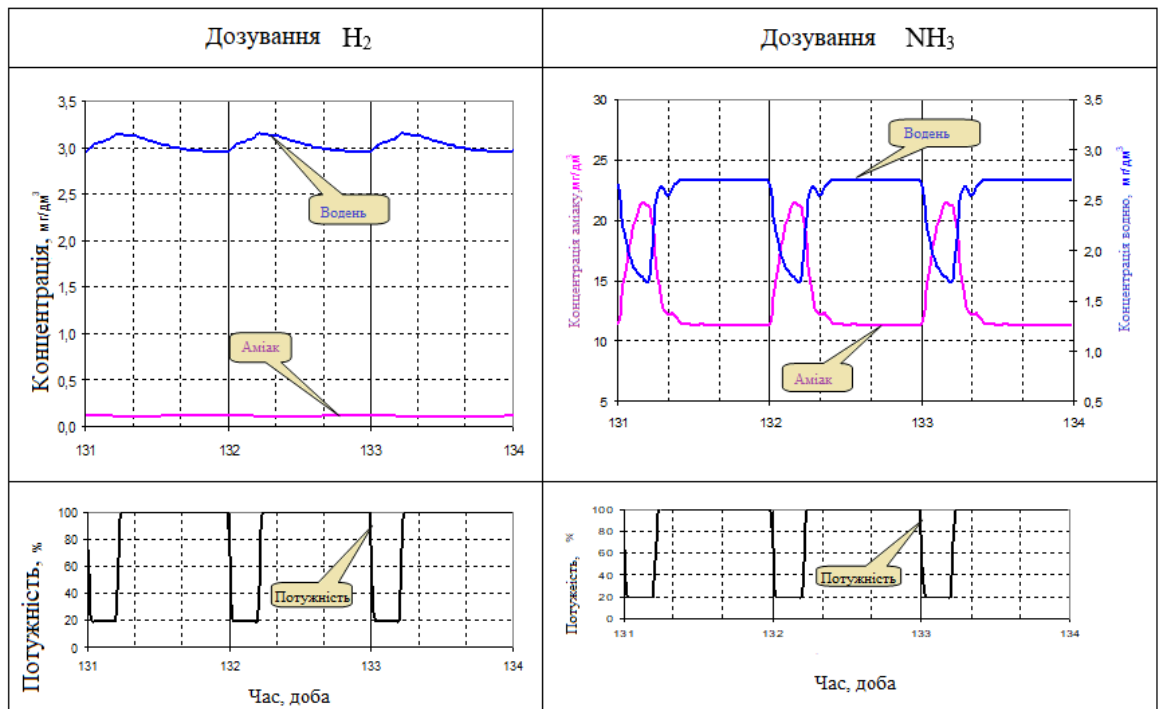


Рисунок 18 – Підтримка ВХР у режимі маневрування

Було розглянуто один із методів поліпшення якості водопідготовки на атомних електростанціях, а саме заміна водно-хімічного режиму для вирішення проблем які виникають при експлуатації реакторної установки.

Оскільки в наш час, атомна енергетика являється пріоритетним джерелом живлення країни, поліпшення якості водо підготовки на атомних електростанціях, є як ніколи актуальним, адже це вирішує проблеми та недосконалості які виникають в результаті роботи АЕС, та сприяє підвищенню ефективності, надійності, та екологічної безпеки енергоблоків. Вдосконалення процесів водо підготовки дозволяє зменшити корозійний вплив на обладнання, підвищити тривалість його експлуатації та мінімізувати ризики, пов'язані з викидами забруднюючих речовин у навколишнє середовище.

Висновки

У процесі проведення дослідження було виконано аналіз існуючих водно-хімічних режимів на атомних електростанціях України, зокрема на Хмельницькій АЕС і розглянуто перспективні підходи до їх оптимізації. Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

Забезпечення високої якості водопідготовки на атомних електростанціях є критично важливим для безпечної та ефективної експлуатації енергоблоків. Вода, як основний теплоносій, значно впливає на корозійну стійкість обладнання, утворення відкладень на теплообмінних поверхнях, а також на зменшення обсягів радіоактивних відходів.

На АЕС України з реакторами типу ВВЕР-1000 використовується аміачно-калієвий ВХР з борним регулюванням. Такий режим дозволяє підтримувати необхідні параметри теплоносія для зниження корозії та підтримки реактивності активної зони реактора. Разом з тим, аміачно-калієвий ВХР має низку недоліків, зокрема зниження ефективності іонообмінних фільтрів, часті регенерації фільтрів та утворення великої кількості рідких радіоактивних відходів.

Аналіз міжнародного досвіду показав, що на АЕС із різними типами реакторів застосовуються різноманітні ВХР: лужний, кисневий, киснево-дегазаційний, гідразинний, літій-водневий, водно-хімічний режим зі зниженим рівнем бору, режим з додаванням цинку тощо. Особливо перспективним та вдалим для заміни на українських АЕС є літій-водневий ВХР, який забезпечує стабільний хімічний склад теплоносія, мінімізує корозійні процеси та сприяє зниженню обсягів утворення радіоактивних відходів.

Аміачно-калієвий ВХР добре відпрацьований, але його недоліки, такі як високий рівень радіоактивних ізотопів ^{24}Na і ^{42}K у теплоносії, необхідність частого дозування реагентів та висока активність радіоактивних відходів, вказують на потребу вдосконалення.

Літій-водневий ВХР, реалізований на АЕС Емсланд (Німеччина), має переваги, включаючи стабільність параметрів теплоносія, зниження залежності від дозування реагентів та значне скорочення утворення радіоактивних відходів. Цей режим є саморегульованим, оскільки підтримує потрібний рівень рН за рахунок утворення літію під час розпаду ізотопу ^{10}B .

Рекомендується поступовий перехід на літій-водневий ВХР як більш екологічний та економічно вигідний режим. Це дозволить:

1. Знизити обсяги рідких радіоактивних відходів, що утворюються під час регенерації іонообмінних фільтрів.
2. Зменшити кількість радіоактивних ізотопів у теплоносії.
3. Уникнути корозійно-небезпечних сплесків активності в теплоносії.
4. Оптимізувати роботу систем водоочищення за рахунок використання нерегенеруючих іонообмінних смол.

Впровадження запропонованих заходів дозволить зменшити екологічний вплив роботи АЕС за рахунок зниження обсягів радіоактивних викидів у навколишнє середовище. Економічний ефект полягає у зменшенні витрат на обслуговування систем очищення, переробку радіоактивних відходів, а також підвищенні ресурсу експлуатації обладнання.

Таким чином, дослідження підтвердило, що вдосконалення водопідготовки на основі впровадження літій-водневого ВХР на українських АЕС сприятиме підвищенню їхньої безпеки, ефективності та відповідності сучасним міжнародним стандартам. Реалізація цих рекомендацій стане важливим кроком у підвищенні конкурентоспроможності атомної енергетики України та забезпеченні екологічної безпеки регіонів, де розташовані АЕС.

Перелік джерел посилань

1. СОУ НАЕК 191:2020. Інженерна, наукова та технічна підтримка. Водно-хімічний режим першого контуру ядерних енергетичних реакторів типу ВВЕР-1000. Технічні вимоги. Способи забезпечення якості. – На заміну СОУ-Н ЯЕК 1.013:2014; чинний від 01.01.2020. - Київ: НАЕК «Енергоатом», 2020. - 35 с.
2. Інструкція з ведення водно-хімічного режиму першого контуру та установок СВО-1, 2: 0.ХЦ.0697.ІН-24, ВП ХАЕС. – 2024. – 82 с.
3. Інструкція з експлуатації системи очищення трапних вод СВО-3: 0.ХЦ.0679.ІЕ-21, ВП ХАЕС. – 2021. – 167 с.
4. Інструкція з експлуатації системи очищення вод басейну витримки і баків аварійного запасу борної кислоти СВО-4: 0.ХЦ.0677.ІЕ-21, ВП ХАЕС. – 2021. – 81 с.
5. Інструкція з експлуатації системи очистки продувної води парогенераторів СВО-5: 0.ХЦ.0674.ІЕ-22, ВП ХАЕС. – 2022. – 79 с.
6. Інструкція з експлуатації системи регенерації борної кислоти СВО-6: 0.ХЦ.0676.ІЕ-22, ВП ХАЕС. – 2022. – 114 с.
7. Положення про хімічний цех: 0.ХЦ.0009.ПЛ-17, ВП ХАЕС. – 2017. – 76 с.
8. Дані Хмельницької АЕС. Технологічні схеми та інструкції з ведення водно-хімічного режиму. – Нетішин: ВП ХАЕС.
9. Kim H., Park J., Lee S. Development and Verification of Advanced Filtration Systems for Nuclear Applications // KoreaScience. – 2018. –Т. 50, №4. – 82 с.
10. IAEA Safety Standards No. SSG-13. Chemistry Programme for Water Cooled Nuclear Power Plants. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.iaea.org/sites/default/files/23/02/draft_ds525.pdf (дата звернення: 07.11.2024.)
11. Monterrosa A., Iyengar A., Huynh A., Madaan C. Boron Use and Control in PWRs and FHRs / Department of Nuclear Engineering, University of California, Berkeley. – 2012. – UCБТН-12-007 – 35 с. – Режим доступу:

- https://fhr.nuc.berkeley.edu/wp-content/uploads/2014/10/12-007_Boron_Use_in_PWRs_and_FHRs.pdf (дата звернення: 07.11.2024.)
12. ZINC: Zinc Injection in Nuclear Power Plants to Mitigate Environmentally-Assisted Cracking of Structural Materials. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.psi.ch/en/lnm/zinc-zinc-injection-in-nuclear-power-plants-to-mitigate-environmentally-assisted-cracking-of> (дата звернення: 07.11.2024.)
 13. Іванов В.С., Сидоренко А.Г. Переваги літій-водневого водно-хімічного режиму в реакторах ВВЕР // Збірник наукових праць Інституту проблем машинобудування. – 2019. – № 5. – С. 45-50.
 14. Zhang X., & Li Q. Lithium Hydroxide Chemistry in PWR Coolants // Nuclear Engineering International Journal. – 2020. – 24-29 с.
 15. Семенов О.П., Котов В.І. Аналіз ефективності літій-водневого ВХР для зниження корозії обладнання першого контуру АЕС // Вісник НТУУ «КПІ». Енергетика. – 2020. – № 3. – С. 15-20.
 16. Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ). IAEA Safety Standards. Норми безпеки для атомних електростанцій. – Відень: МАГАТЕ, 2024. – 116 с.
 17. Мальцева Т.В., Лукашин С.О., Шишута А.М., Баканов В.В. Водно-хімічний режим енергоблоків АЕС України: національні та міжнародні вимоги, технічні особливості та вдосконалення // Наука і радіаційна безпека. – 2024. – №1(101). – 68 с. – Режим доступу: [https://doi.org/10.32918/nrs.2024.1\(101\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2024.1(101).06) (дата звернення: 10.11.2024.)
 18. Технологічний регламент безпечної експлуатації АЕС / АТ «НАЕК Енергоатом». ВП ХАЕС. – Нетішин, 2023р. – 285 с.
 19. НП 306.2.245-2024. Норми та правила з водопідготовки в ядерній енергетиці України. – Київ: НАЕК «Енергоатом», 2024. – 61 с.
 20. Semerak, M. M., Lys, S. S., & Yurasova, O. H. Аналіз основних засобів забезпечення водно-хімічного режиму АЕС // Scientific Bulletin of UNFU. –

2018. – Т. 28, №6. – С.81-83. Режим доступа:
<https://doi.org/10.15421/40280615> (дата звернення: 10.11.2024.)

21. Electric Power Research Institute (EPRI). Advances in Water Chemistry for Nuclear Power Plants. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <https://restservice.epri.com/publicdownload/000000000001003124/0/Product> (дата звернення: 11.11.2024.)