

Барбашев С. В., д-р техн.наук

Андрєєв Е. В., магістрант

Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна

БЕЗПЕРЕРВНИЙ МОНІТОРИНГ ТРИТІУ У ЗОВНІШНІХ СКИДНИХ КОМУНІКАЦІЯХ АЕС, ЯК ГАРАНТІЯ СТАБІЛЬНОЇ І БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ СТАНЦІЇ

Сучасна атомна енергетика потребує підвищених вимог до безпеки експлуатації атомних електростанцій. Зовнішні системи скидних комунікацій енергоблоків, що відводять технологічну воду, є потенційними джерелами витоків радіоактивних речовин, зокрема тритію – радіоактивного ізотопу водню, який утворюється в процесі ядерних реакцій. Наприклад, на енергоблоці з ВВЕР-1000 напрацювання тритію за рік становить близько 700 ТБк [1]. На даний час очисних систем на АЕС, які можуть ефективно виділяти тритій з води, у світі не існує.

Тритій завдяки своїй високій рухливості та здатності входити до складу молекул води є ідеальним індикатором для виявлення навіть незначних порушень герметичності технологічних систем АЕС, що робить його моніторинг (контроль) критично важливим для своєчасного реагування на аварійні ситуації. Хоча β -випромінювання тритію слабке, його накопичення у ґрунтових водах чи водоймах поблизу АЕС може призвести до довгострокових екологічних наслідків. Водночас, існуючі станом на тепер на АЕС України методи моніторингу тритію не дозволяють експресно (скорочуючи час між взяттям проби та отримання відповіді) одержувати кількісну інформацію про зміст тритію у воді зовнішніх систем скидних комунікацій АЕС і, крім того, обмежуються складністю одержання та інтерпретації даних. Сказане вище підкреслює актуальність та необхідність проведення робіт щодо удосконалення методів моніторингу тритію з метою раннього виявлення малих витоків у зовнішні скидні системи АЕС, що дозволить підвищити радіаційну безпеку та знизити ризики для довкілля, населення та персоналу.

Метою даної статті є описання запропонованого авторами методу щодо експресного та безперервного визначення вмісту тритію у воді зовнішніх скидних комунікацій АЕС. Такий метод може підвищити ефективність моніторингу та мінімізувати екологічні ризики.

Об'єкт дослідження – скидні канали АЕС, в які спочатку потрапляють рідкі скиди з АЕС, що містять тритій, після чого він потрапляє до інших зовнішніх скидних комунікацій (водоймище-охолоджувач, водосховище, річка чи інші водні об'єкти), гідравлічно з'єднаних із скидними каналами. Для прикладу, у роботі розглянута система скидних комунікацій Запорізької АЕС (рис.1).

Поточний стан контролю тритію на АЕС України. Тритій (період напіврозпаду ~12 років) на АЕС утворюється під час роботи реактора за рахунок перебігу побічних реакцій поділу ядер ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , а також унаслідок взаємодії нейтронів з Li , B , D . Його поява у воді другого контуру чи скидних систем є ознакою порушення цілісності контурів реакторної установки. Тому тритій може бути індикатором не тільки витоків з трубопроводів та обладнання першого та другого контурів АЕС, але й витоків у зовнішні системи скидних комунікацій, що важливо з точки зору його впливу на формування радіоекологічного стану навколо АЕС.

Контроль тритію на АЕС здійснюється сьогодні відповідно до чинного нормативного документу СОУ-Н ЯЕК 1.008:2008 [2]. Цим документом пропонується виконувати контроль тритію у двох режимах: поточного або розгорнутого моніторингу.

В першому випадку пропонується виконувати вимірювання вмісту тритію не менше 3 разів на рік у пробах води, відібраних у рекомендованих документом [2] створах водних об'єктів. Розгорнутий моніторинг проводиться при виявленні перевищення вмісту тритію у воді порівняно з адміністративно-технологічним рівнем (А-ТР) його скиду.

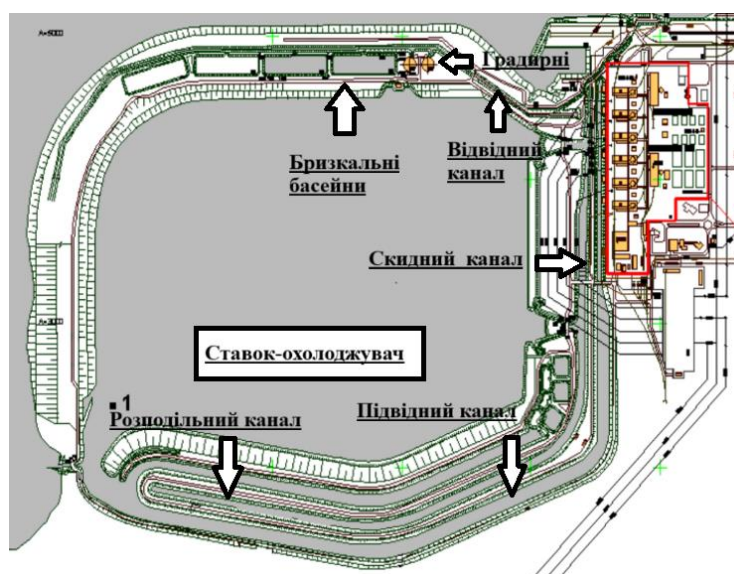


Рисунок 1 - Система зовнішніх скидних комунікацій на Запорізькій АЕС

Наприклад, на ЗАЕС він встановлений на рівні 12 ТБк/квартал. А-ТР не перевищує контрольного рівня (КР) для скиду тритію, який для ЗАЕС дорівнює 18 ТБк/квартал. Допустимий рівень скиду тритію на ЗАЕС дорівнює 1900 ТБк/рік [3]. Частоту відбору проб та вимірювання вмісту тритію встановлюють з урахуванням гідрологічного режиму, сезону року, динаміки водних мас у водних об'єктах та інших характеристик, які важливі для визначення причин і динаміки зміни активності тритію.

Вимірювання вмісту тритію в пробах води на АЕС України здійснюється шляхом регулярного відбору проб води зі скидних каналів та прилеглих водойм (як правило, щоквартально) з подальшим лабораторним аналізом цих проб методом рідинної сцинтиляції на рідинно-сцинтиляційному спектрометрі-радіометрі Quantulus 1220 чи Tri-Carb. Прилади дозволяють вимірювати вміст тритію без пробопідготовки на рівні від 1 Бк/л.

Такий підхід забезпечує високу чутливість вимірювань, проте має істотні обмеження: він не дає безперервної картини щодо динаміки вмісту тритію між відборами проб води. В інтервалах між ними невеликі витoki можуть залишитися непоміченими, а час лабораторного аналізу, який триває не менше 500 хвилин, не дозволяє оперативно реагувати на позаштатні протікання. Таким чином, наявний епізодичний контроль тритію, хоча і виконує вимоги нормативного документу [2], але не гарантує виявлення раптових або короточасних витоків у режимі реального часу.

Стан та потенційні проблеми існуючих скидних комунікацій. Скидний внутрішній трубопровід енергоблоку АЕС з ВВЕР призначений для відведення технологічної води з турбінного відділення до скидного каналу, а потім до водойми-охолоджувача. Хоча при проєктуванні ці комунікації розраховуються як герметичні, з часом можливе зношення ущільнень, корозія металу або утворення мікротріщин, що призводить до витоків. Навіть незначний витік води першого контуру (насиченої тритієм) у систему скиду спричиняє появу тритію у дренажній воді. Якщо такий витік не виявити вчасно, радіоактивна вода може потрапити у ґрунтові води або поверхневі водойми.

Основний внесок тритію, який потрапляє у зовнішній скидний канал формується переважно за рахунок дебалансних вод з контрольних баків СВО, продувних вод систем технічного водопостачання відповідальних споживачів та дебалансних вод бака радіаційного контролю хімоводоочищення.

Системи контролю тритію, що застосовуються на українських АЕС, за період експлуатації станцій не зафіксували наднормативних перевищень тритію у воді

зовнішніх скидних комунікацій. Наприклад, на ЗАЕС середня об'ємна активність тритію за період 2011-2020 років знаходилася на рівні $\sim 1,5 - 2,0 \text{ Бк/м}^3$, що відповідає скиду на рівні 30 - 50 ТБк/рік, тобто значно нижче ДС та КР. Однак, існуючі методи контролю, які застосовують періодичний відбір проб води, не гарантують своєчасного виявлення повільних або періодичних витоків, що можуть статися між плановими перевірками. Отже, існує потреба у створенні такої системи контролю, яка постійно моніторить тритій у скидній воді та негайно сповіщає про будь-які відхилення від норми. Саме цей висновок став відправною точкою для розробки яка представлена у даній статті.

Суть запропонованого рішення щодо безперервного вимірювання тритію у воді зовнішніх скидних комунікаціях. Прилади для безперервного визначення вмісту тритію у проточних водах на АЕС в даний час не застосовуються. Це пов'язано з тим, що тритій є чистим бета-випромінювачем з низькою енергією (максимальна енергія 18 кеВ), що робить пряме безперервне автоматизоване вимірювання його вмісту в проточній воді досить складним технічним завданням. Тому виміри активності тритію проводяться за допомогою низькофонових рідинно-сцинтиляційних спектрометрів, таких, як QUANTULUS 1220 чи TRI-CARB. Для таких приладів час на підготовку проби і вимірювання становить біля 500 хвилин. Як було сказано вище, такий метод контролю не гарантує виявлення раптових або короточасних витоків, а також не дозволяє спостерігати динаміку розповсюдження тритію у поверхневих водних об'єктах у режимі реального часу.

Для експресного та безперервного визначення вмісту тритію у воді зовнішніх скидних комунікацій ми пропонуємо використовувати вимірювальні прилади із проточними детекторами. В таких приладах вода безперервно подається на детектор, який може бути пропорційним лічильником або сцинтиляційним детектором. Це дозволяє проводити безперервний моніторинг вмісту тритію. Вибір детектора залежить від необхідної точності, швидкості вимірювання, концентрації тритію у воді та інших факторів. Наприклад, прилади на основі пропорційних лічильників використовуються для вимірювання рівня тритію у воді в режимі реального часу в системах охолодження ядерних реакторів. Прилади на базі сцинтиляційних детекторів можна використовувати в різних сферах, включаючи моніторинг навколишнього середовища та контроль технологічних процесів.

До приладів для безперервного визначення вмісту тритію та інших радіонуклідів у стічних і підземних водах, а також у технологічних трубопроводах об'єктів атомної

енергетики, відносяться радіометри проточні рідинні Wilma (далі - радіометр Wilma), які виробляються фірмою «LabLogic Systems Limited» у Великобританії [4].

Принцип роботи радіометра Wilma полягає в безперервному або дискретному відборі рідини в проточний канал радіометра і реєстрації іонізуючих частинок, системою детектування.

Система детектування радіометра являє собою проточну сцинтиляційну комірку, встановлену між фотокатодами двох ФЕП, розташованих під кутом 180° один до одного. Можуть використовуватися два типи проточних комірок: проточні комірки, заповнені твердими частинками сцинтилятора, і комірки, в які подається коктейль вимірюваної рідини та рідкого сцинтилятора (РС). Комірки є змінними.

Для подачі досліджуваної рідини і РС-коктейлю радіометр оснащений внутрішніми насосами. Після того, як вимірювана рідина надходить в комірку з твердим сцинтилятором або після автоматичного змішування вимірюваної рідини і коктейлю РС в заданій пропорції, вимірюється активність отриманої лічильної проби. Після закінчення вимірювань зразок автоматично подається в бак або лінію для відходів, вимірювальна система промивається спеціальним розчином миючого засобу і прилад готовий до наступного циклу вимірювання.

При відповідному налаштуванні радіометр може працювати в автоматичному режимі протягом декількох тижнів, що особливо важливо при установці приладу у важкодоступних місцях.

Для візуального огляду радіонуклідів, що вимірюються, у радіометрі може бути встановлений спектрометричний режим роботи.

Результати вимірювань, стан та інформація про параметри системи виводяться на дисплей, розташований на передній панелі радіометра. Радіометр має вбудований планшетний комп'ютер. Інтерфейс користувача дозволяє працювати локально за допомогою сенсорного екрану монітора або віддалено. On-line режим роботи приладу дає можливість вихідний сигнал від нього передавати на щит радіаційного контролю енергоблоку для обробки результатів та сповіщення персоналу у разі перевищення контрольних чи допустимих рівнів.

У технічній документації до радіометра Wilma наводиться діапазон вимірювання питомої активності тритію у воді, який дорівнює $10^4 - 10^{11}$ Бк/л. Але вказується, що сертифікаційні випробування із встановлення основних метрологічних характеристик приладу були проведені з пробами тритієвої води з об'ємною активністю понад 10^2

Бк/л. Інформації про те, які найнижчі значення питомої активності тритію у воді може вимірювати радіометр Wilma, автори статті не знайшли.

Для того, щоб переконатися в тому, що радіометр Wilma може підійти для безперервного моніторингу тритію у воді зовнішніх скидних комунікацій, в яких питома активність тритію знаходиться на рівні менш за 10^2 Бк/л, треба провести відповідні випробування з метою встановлення основних метрологічних характеристик приладу в реальних умовах безперервної роботи в зовнішніх скидних комунікаціях.

Таким чином, при реалізації запропонованого технічного рішення із застосуванням радіометра Wilma стає можливим проводити безперервний моніторинг активності тритію в скидних комунікаціях в режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на появу навіть незначних витоків та забезпечувати безпечну роботи блоку. Але придатність радіометра Wilma для моніторингу тритію у скидних комунікаціях АЕС потребує додаткових досліджень.

Вибір ділянки контролю. Для впровадження запропонованого методу безперервного вимірювання вмісту тритію у воді скидних комунікаціях АЕС пропонується обрати коротку ділянку скидного трубопроводу довжиною приблизно 200 м від АЕС до випускного каналу (Рис.2).

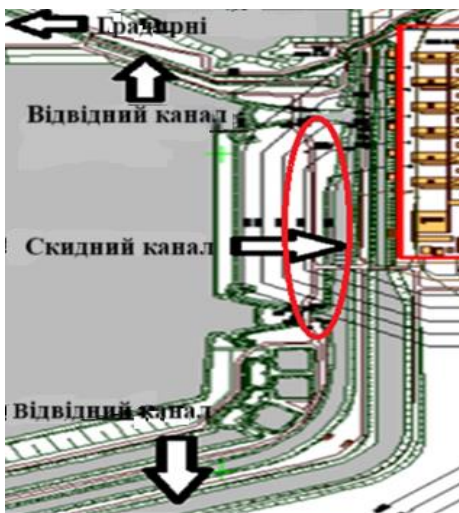


Рисунок 2 – Ділянка скидного каналу Запорізької АЕС для безперервного вимірювання вмісту тритію

Ця ділянка повинна містити оглядовий колодязь (інспекційну шахту), що забезпечує зручний доступ до внутрішньої порожнини трубопроводу для монтажу обладнання. Окрім того, місце її розташування треба вибрати неподалік від контрольного створу на виході води до водойми-охолоджувача, яка за нормативами знаходиться в межах

500 м від місця скиду. Установка датчиків саме на цій ділянці дає змогу виявляти аномальні викиди ще до потрапляння води до водойми-охолоджувача. Вибір 200-метрового сегменту зумовлений також тим, що він охоплює найбільш критичні вузли трубопроводу – стики, повороти, оглядовий колодязь – де ризик порушення герметичності підвищений. При цьому довжина сегменту достатньо мала, щоб локалізувати можливий витік у межах контрольованої зони. Відзначимо, що світовий досвід свідчить про доцільність розміщення датчиків саме поблизу вихідних шахт або перед впуском у відкритий скидний канал. Запропонований підхід повністю відповідає цим рекомендаціям, оскільки вибрана ділянка є критичною з точки зору контролю і водночас зручною для монтажу обладнання.

Організаційно-технічна схема впровадження. Впровадження системи безперервного контролю тритію на вибраній ділянці здійснюється у кілька послідовних етапів. Першим кроком є підготовка байпас-лінії: в зоні оглядового колодязя до основного трубопроводу під'єднується обвідний контур малого діаметра, що відбирає частину потоку води, пропускає її через вимірювальну камеру з детекторами і повертає назад у магістраль. Така байпас-лінія дозволяє виконувати вимірювання без перерви основного потоку і підтримувати стабільну малу витрату води через детектори (близько 5–10 л/хв) для забезпечення високої чутливості контролю.

На другому етапі у вимірювальному блоці байпас-лінії встановлюються три незалежні детектори для контролю концентрації тритію. Обрана триплексна конфігурація має кілька переваг: по-перше, підвищується надійність системи (у разі відмови одного датчика контроль все одно здійснюється двома іншими); по-друге, усереднення сигналів трьох каналів зменшує статистичну похибку вимірювань; по-третє, реалізовано алгоритм подачі тривожного сигналу «2 з 3», що мінімізує ймовірність хибних спрацьовувань.

На завершальному етапі вимірювальний блок підключається до інформаційно-контрольної системи АЕС. Сигнали з детекторів надходять до щита радіаційного контролю АЕС, що забезпечує моніторинг у реальному часі з автоматичною фіксацією перевищень заданих порогів і оповіщенням персоналу.

Доцільність розробки та впровадження системи безперервного контролю тритію. Запропонований метод безперервного контролю тритію має низку переваг. Передусім, вчасне виявлення витоків дозволяє знизити ризик розвитку аварійної ситуації і тим самим уникнути величезних витрат на ліквідацію її наслідків. Друга перевага – операційна стабільність: безперервний контроль запобігає

незапланованим зупинкам енергоблоку, забезпечуючи безперервне виробництво електроенергії та виконання графіка генерації. Окрім того, впровадження такої системи гарантує дотримання встановлених норм радіаційної безпеки. У сукупності ці факти означають, що запропонований метод безперервного контролю тритію крім того, що запобігає потенційним витратам, ще і забезпечує стабільну і безпечну роботу АЕС.

Що стосується витрат на розробку та впровадження запропонованого методу моніторингу тритію на АЕС України, то це питання потребує подальших досліджень.

Висновки

Для раннього виявлення витоків тритію з трубопроводів та обладнання першого та другого контурів АЕС та його витоків у зовнішні скидні комунікації система моніторингу тритію, яка в даний час застосовується на АЕС, потребує розширення та доповнення системою безперервного моніторингу проточних вод.

У перспективі необхідно оснастити зливні комунікації АЕС автоматизованими системами безперервного визначення вмісту тритію в стічній воді, що дозволить підвищити радіаційну безпеку АЕС та знизити ризики для довкілля, населення та персоналу.

Література

1. Долін В.В., Пушкаръов О.В., Шраменко І.Ф. та ін. Тритій у біосфері/ Під ред. Е. В. Соботовича та В.В. Доліна. - К.: Наукова думка 2012 - 224 с.
2. СОУ-Н ЯЕК 1.008:2008. Моніторинг тритію у поверхневих водних об'єктах, гідравлічно з'єднаних із скидними каналами та водоймами-охолоджувачами АЕС України. – К.: Мінпаливенерго України, 2008 – 22 с.
3. 21.5.59.ОППБ.14. Звіт з періодичної переоцінки безпеки енергоблоку №5 ВП ЗАЕС. Фактор безпеки №14. Вплив експлуатації на навколишнє середовище. - К.: ДП НАЕК, 2019 – 241 с.
4. «LabLogic Radiation Detection Online Water Quality Monitoring System», United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-13/228.