

Визначення коефіцієнта ослаблення потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання матеріалом оболонки циліндричних контейнерів для тимчасового зберігання рідких радіоактивних відходів

Розглянуто питання математичного моделювання в процесі визначення коефіцієнта (кратності) ослаблення потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання (ПЕД) матеріалом оболонки циліндричних контейнерів об'ємом 200 літрів типів ЗП 551.040.00.00, А 2201.00.000 (клас безпеки 3Н) та КРО-200 (клас безпеки 4Н), призначених для тимчасового зберігання сольового плаву на АЕС України. За допомогою розробленої математичної моделі, що враховує основні фізичні процеси розсіяння гамма-квантів та фізичні характеристики матеріалів, отримано коефіцієнти ослаблення ПЕД оболонкою для бочок-контейнерів, які використовуються на Хмельницькій АЕС. Виконано аналіз радіаційно-захисних властивостей оболонок розглянутих контейнерів.

Ключові слова: радіоактивні відходи, захисний бар'єр, циліндричний контейнер, гамма-випромінювання, коефіцієнт ослаблення потужності еквівалентної дози.

Я. А. Жигалов, В. А. Пшеничний

Определение коэффициента ослабления мощности эквивалентной дозы гамма-излучения материалом оболочки цилиндрических контейнеров для временного хранения жидких радиоактивных отходов

Рассмотрены вопросы математического моделирования при определении коэффициента (кратности) ослабления мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД) материалом оболочки цилиндрических контейнеров объемом 200 литров типов ЗП 551.040.00.000, А 2201.00.000 (класс безопасности 3Н) и КРО-200 (класс безопасности 4Н), предназначенных для временного хранения солевого плава на АЭС Украины. С помощью разработанной математической модели, учитывающей основные физические процессы рассеяния гамма-квантов и физические характеристики материалов, получены коэффициенты ослабления МЭД оболочкой бочек-контейнеров, которые используются на Хмельницкой АЭС. Выполнен анализ радиационно-защитных свойств оболочек рассмотренных контейнеров.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, защитный барьер, цилиндрический контейнер, гамма-излучение, коэффициент ослабления мощности эквивалентной дозы.

© Я. А. Жигалов, В. А. Пшеничний, 2014

В умовах нормальної експлуатації, планово-переджувальних ремонтів і відновлення нормального регламентного режиму експлуатації обладнання на АЕС з реакторами типу ВВЕР неминуче утворюються експлуатаційні рідкі радіоактивні розчини різного складу — трапні води. На практиці вони є сумішшю мінералізованих розчинів з істотним вмістом солей та змінними вмістом і кількістю механічних, хімічних та органічних домішок, зумовлених застосуванням різних хімічних реагентів.

Продуктами первинної переробки трапних вод АЕС на випарних апаратах є оборотний конденсат і кубовий залишок — рідкий радіоактивний розчин з вмістом солей близько 300 г/л, який зберігається в баках сховищ рідких радіоактивних відходів (РРВ). З метою звільнення баків сховищ РРВ і ефективного зменшення об'єму РАВ, що зберігаються, на АЕС України кубовий залишок перероблюється на установках глибокого упарювання (УГУ).

Продуктом переробки на УГУ кубового залишку АЕС з реакторами типу ВВЕР є сольовий плав, який при температурі 140—160 °С розливається в металеві циліндричні бочки-контейнери об'ємом 200 л, охолоджується і, після ствердіння, стає монолітом.

В Україні переробка кубового залишку до сольового плаву наразі виконується на Запорізькій, Рівненській та Хмельницькій АЕС. Проектами АЕС не передбачені спеціальні сховища для зберігання контейнерів із сольовим плавом, тому вони тимчасово зберігаються в комірках сховищ твердих радіоактивних відходів (СТРВ), які за вихідними проектами призначалися для зберігання контейнерів з бітумним компаундом. Герметично закриті бочки-контейнери із сольовим плавом тимчасово розміщуються в СТРВ на майданчиках АЕС згідно з технологічними регламентами і санітарним паспортами сховищ.

Відповідно до визначень Закону [1], «...кондиціонування радіоактивних відходів — операції з підготовки радіоактивних відходів для перевезення, зберігання та захоронення. Кондиціонування може здійснюватися шляхом розміщення радіоактивних відходів у контейнері або їх іммобілізації». Таким чином, контейнери із сольовим плавом розглядаються як радіоактивні відходи, кондиціоновані для зберігання.

Оскільки бочки-контейнери зберігаються на АЕС тимчасово і надалі мають транспортуватися для остаточного захоронення (тривалого зберігання) до відповідних сховищ або для переробки на спеціалізовані підприємства, важливим є питання реалістичної оцінки їх радіаційно-захисних якостей, вирішення якого, по суті, зводиться до визначення коефіцієнта (кратності) ослаблення потужності еквівалентної дози (ПЕД) γ -випромінювання матеріалом оболонки контейнерів.

Аналіз нормативної бази з питань класифікації за безпекою контейнерів для тимчасового зберігання сольового плаву на майданчиках АЕС України. На АЕС України для тимчасового зберігання сольового плаву використовуються бочки-контейнери об'ємом 200 літрів таких трьох типів:

А 2201.00.000 — виготовлені Нововоронезьким заводом «Атомэнергозапчасть» згідно з ТУ 95.2424–93 «Контейнер для радиоактивных отходов А 2201.00.000. Технические условия А 2201.00.000ТУ»;

ЗП 551.040.00.000 — виготовлені тим самим підприємством згідно із ТУ «Контейнер ЗП 551.040.00.000. Технические условия»;

КРО-200 — виготовляються Запорізьким заводом НСОіТ ВП «Атоменергомаш» ДП НАЕК «Енергоатом» згідно з ТУ У 21474825-001–98 «Контейнер “КРО-200” для радиоактивных отходов. Технические условия».

Таблиця 1. Основні технічні характеристики контейнерів

Тип контейнера	Розміри контейнера, мм		Основний матеріал контейнера		Зовнішнє антикорозійне покриття	Гарантійний термін зберігання соляного плаву, років
	Висота	Діаметр	Марка сталі	Товщина сталі, мм		
A 2201.00.000	910	560	Ст 3	3,5	Кремнієво-органічна композиція ОС-51-03	15
ЗП 551.040.00.000	910	560	Ст 20	3,9		10
КРО-200	928	560	Ст 20	3,9	Перший шар — газотермічне алюмінієве покриття ТН.А.140, другий шар — кремнієво-органічна композиція ОС-51-С3 20	20

Контейнери типу КРО-200, за Технічними умовами на них, були з самого спочатку класифіковані як елемент систем нормальної експлуатації 4-го класу безпеки (4Н), і на них отримано сертифікат відповідності. Контейнери типу А 2201.00.000 та ЗП 551.040.00.000 (відповідно до Технічних умов) були класифіковані як елемент систем нормальної експлуатації 3-го класу безпеки (3Н) на підставі вимог нормативного документа [2] за ознакою «елементи, що містять радіоактивні речовини, вихід яких у навколишнє середовище при відмові перевищує гігієнічні нормативи».

Дію документа [2] в Україні було скасовано набранням чинності нормативного документа [3]. Згідно з вимогами [3, п. 4.5] цим контейнерам знову був присвоєний клас безпеки 3Н. У свою чергу, чинність документа [3] скасовано введенням нормативного документа ОПБ-2008 [4], в якому при класифікації систем та елементів АЕС за впливом на безпеку ознака «елементи, що містять радіоактивні речовини, вихід яких у навколишнє середовище при відмові перевищує гігієнічні нормативи» не застосовується. Замість цієї ознаки, для віднесення елементів систем нормальної експлуатації до класу безпеки 3Н, у [4] введено таку ознаку: «елементи, що виконують функції радіаційного захисту персоналу та населення». Згідно з НРБУ-97 [5], радіаційний (протирадіаційний) захист — це «сукупність нормативно-правових, проектно-конструкторських, медичних, технічних та організаційних заходів, що забезпечують радіаційну безпеку». Отже, використання бочок-контейнерів як захисних бар'єрів може кваліфікуватися щонайменш як технічний захід для забезпечення радіаційної безпеки.

У науково-методичній літературі з дозиметрії для визначення радіаційно-захисних властивостей матеріалів (конструкцій, захисних бар'єрів, екранів тощо), які повинні забезпечувати радіаційний захист, застосовується поняття «кратність (коефіцієнт) ослаблення гамма-випромінювання». Наприклад, у [6] кратність (коефіцієнт) ослаблення γ -випромінювання визначається відношенням розрахованої (або вимірної) експозиційної дози (потужності дози) γ -випромінювання без захисту до максимальної експозиційної дози (потужності дози) в тій самій точці за захисним екраном відомої товщини.

Очевидно, що контейнери типів А 2201.00.000, ЗП 551.040.00.000 і КРО-200 за своїми технічними характеристиками (див. далі) та через відсутність у їх конструкції захисту від іонізуючих випромінювань практично виконують лише функцію зовнішнього захисного бар'єра для фізичної локалізації соляного плаву в певному об'ємі, але не можуть ефективно виконувати функцію радіаційного захисту персоналу та населення, яка фактично перенесена на будівельні

конструкції сховищ РАВ. Проте щоб довести це, потрібно визначити коефіцієнти ослаблення ПЕД γ -випромінювання оболонкою контейнерів типів А 2201.00.000, ЗП 551.040.00.000 та КРО-200, які реально наповнені соляним плавом і зберігаються на майданчиках АЕС.

Основні властивості соляного плаву та технічні характеристики контейнерів типів А 2201.00.000, ЗП 551.040.00.000 і КРО-200. Соляний плав у кінцевому (ствердженному) стані є монолітом твердого кристалогідрату багатокомпонентного складу внаслідок наявності в кубових залишках значної концентрації борної кислоти. До основних властивостей плаву належать:

- вибухо- та пожежна безпечність;
- вміст значних надлишків гідратної лужності, через що плав має фунгіцидні властивості (життєдіяльність мікроорганізмів у ньому унеможливлена);
- надлишок лугу з метаборатом, внаслідок чого продукт має виключно високі інгібіторні властивості, які запобігають корозії вуглецевої сталі, котра контактує безпосередньо із соляним продуктом;
- розрідження плаву при температурі близько 120 °С;
- гігроскопічність (тобто плав розріджується у воді);
- відсутність розбухання та газовиділення із соляного продукту в процесі тривалого зберігання (відсутність розбухання підтверджується правильною геометричною формою бочок-контейнерів на усіх АЕС України за результатами періодичного контролю, а відсутність газовиділення — результатами контролю заповнених контейнерів на ХАЕС);
- відсутність розм'якшення соляного плаву в процесі тривалого зберігання (підтверджується результатами періодичного контролю бочок-контейнерів із соляним плавом на РАЕС та ХАЕС).

Соляний плав АЕС з реакторами типу ВВЕР має такі фізико-хімічні характеристики [7]:

- вміст кристалогідратної вологи у твердому соляному плаві — до 5 %;
- густина соляного плаву — 2...2,2 кг/дм³;
- вміст вологи — 70...120 г/кг;
- середній хімічний вклад, г/кг: H₃BO₃ — 310,0; Na⁺ — 180,0...223,0; K⁺ — 55,0; Cl⁻ — 5,0; Fe²⁺ — 0,014...0,025; SO₄²⁻ — 29...95; радіонуклідний склад — ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co.

Бочки-контейнери типів А 2201.00.000, ЗП 551.040.00.000 і КРО-200 — металеві тонкостінні 200-літрові, циліндричної форми. Зверху вони мають горловину для заливання соляного плаву, на дні — металеву «склянку». В контейнерах типів А 2201.00.000 та КРО-200 у верхню кришку уварено бобишку, яка використовується для встановлення датчика рівня та контролю стану соляного плаву в контейнері під час зберігання.

Основні технічні характеристики цих контейнерів наведено в табл. 1.

Усі типи контейнерів виготовляються відповідно до Технічних умов, затверджених у встановленому порядку, в яких регламентовані характеристики контейнерів. Кожна партія контейнерів, які поставляються на АЕС і використовуються для зберігання сольового плаву, супроводжується відповідним паспортом.

Опис фізико-математичної моделі для розрахункового визначення радіаційно-захисних властивостей оболонок циліндричних контейнерів. Експериментально визначити коефіцієнт ослаблення ПЕД γ -випромінювання оболонкою контейнера можна тільки для обмеженої кількості конкретних матеріалів наповнень контейнерів та конструкцій контейнерів, і до того ж потрібні два виміри ПЕД: один — на поверхні оболонки заданого контейнера, другий — за відсутності оболонки контейнера, що пов'язано із значними технічними складнощами проведення таких вимірювань та забезпечення радіаційної безпеки персоналу. З урахуванням цього, а також беручи до уваги, що в матеріалі, який заповнює контейнер, можуть бути присутні різноманітні радіонукліди з різними концентраціями, а сам матеріал складається з десятка (або навіть більше) хімічних елементів, визначення радіаційно-захисних властивостей оболонки контейнера для зберігання РАВ можливе лише з використанням розрахункових методів.

Створення математичної моделі для розрахунків ПЕД γ -випромінювання для оцінки спектрів γ -квантів у процесах їх 1-, 2- та 3-го розсіянь у матеріалі РАВ надало би змогу визначити найвагоміші механізми впливу на значення ПЕД. Суттєвим також є процес ослаблення потоків γ -квантів залежно від енергії після кожного розсіяння. Обов'язково треба враховувати вплив на величину ПЕД γ -квантів, розсіяних з поверхні (як з матеріалу наповнювача, так і з матеріалу оболонки контейнера). Забезпечення такою моделлю розрахунку ПЕД в межах до 30 % відхилення від реальних значень ПЕД задовільнило би вимоги щодо реалістичності визначення коефіцієнта ослаблення для практичного використання.

На сьогодні у світі для розв'язання подібних задач існує серія програмних кодів MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code), розроблених у Los Alamos National Laboratory (США), які дають змогу проводити обчислення ПЕД γ -випромінювання від контейнерів з РАВ різного складу та концентрацій активності. Це потужні розрахункові програми на основі статистичних моделювань процесів перенесення іонізуючого випромінювання в матеріалі (метод Монте-Карло). Але результати розрахунків за допомогою MCNP дозволяють аналізувати лише сумарний внесок різних процесів взаємодії γ -квантів з речовиною, і часто неможливо визначити, які процеси враховані та які є найбільш значущими.

У Державному науково-інженерному центрі систем контролю та аварійного реагування (ДНІЦ СКАР) розроблена та використовується математична модель для розрахунків ефективності реєстрації γ -квантів у детекторі для характеристичних γ -ліній, що супроводжують розпад радіонуклідів. У цій моделі розглядається детектор, що розташований поруч з досить великим за розміром контейнером, в якому є матеріали з радіоактивними ізотопами. Якщо параметри радіоактивного середовища відомі (густина наповнення, ступінь рівномірності, товщина оболонки тощо), то можна розв'язувати обернену задачу: за відкликом детектора визначити концентрації активностей певних радіонуклідів

за допомогою реєстрації піків γ -квантів розпаду. Для цього використовується складання вкладів потоків γ -квантів, що реєструються детектором, від кожного елемента об'єму контейнера, на які умовно розбивається середовище контейнера. Повна активність кожного такого елемента умовно вважається зосередженою в центрі цього об'єму з координатами, за допомогою яких можна визначити відстань до іншого елемента або детектора. Це дає змогу розрахувати ослаблення потоку γ -квантів, що реєструються детектором. Таким чином розраховується довжина пробігу γ -квантів у матеріалі наповнювача контейнера та оболонки самого контейнера. Чим менший елементарний об'єм, тим вища точність розрахунку. За цією моделлю можна враховувати практично всі фізичні процеси взаємодії γ -квантів з речовиною.

Подібний підхід використано одним з авторів статті для розрахунків ефективності реєстрації нейтронів, розсіяних під різними кутами, в фізичних експериментах на дослідницькому атомному реакторі в Інституті ядерних досліджень НАН України [8, 9]. Основна суть реалізованого в цій роботі підходу до розрахунку ПЕД γ -випромінювання полягає в тому, що контейнер з радіоактивним наповненням умовно розбивається на елементарні об'єми (поділ по висоті H , радіусу R та азимутальному куту φ).

Елементарний об'єм V_0 навколо будь-якої точки «0» визначається за формулою

$$V_0 = R_0 \cdot dR \cdot dH \cdot d\varphi, \quad (1)$$

де R_0 — відстань від осі бочки до точки «0», см; dH , dR , $d\varphi$ — елементи поділу за висотою H , радіусом R та азимутальним кутом φ .

Елементарний об'єм V_0 можна описати сферою такого самого об'єму з ефективним радіусом R_E . Далі вважаємо, що елементарний об'єм має активність $V_0 \cdot A_0$, яка зосереджена в центрі цього об'єму та опромінює інший елементарний об'єм навколо точки «1» з ефективним радіусом R_1 . Таким чином, потік γ -квантів з точки «0» в ефективну сферу навколо точки «1» дорівнює

$$I_1 = V_0 \cdot A_0 \cdot \frac{\pi R_1^2}{4\pi L_{01}^2} \cdot T_{01}, \quad (2)$$

де A_0 — питома активність речовини в контейнері, Бк/см³; πR_1^2 — площа перерізу елементарного об'єму навколо точки «1», см²; L_{01} — відстань між точками «0» та «1», см; T_{01} — ослаблення (проходження) потоку γ -квантів між точками «0» та «1».

Аналогічний підхід використовується для розрахунку потоку γ -квантів, що попадають в об'єм детектора D під тілесним кутом $d\Omega$, який визначається як

$$d\Omega = \frac{S_d}{L_{1d}^2}, \quad (3)$$

де $S_d = 1 \text{ см}^2$ — площа перерізу площини детектора D ; L_{1d} — відстань між точкою «1» та центром детектора, см.

При цьому треба враховувати поглинання потоку γ -квантів при проходженні ним відстані між точками «1» та «Z».

На рис. 1 схематично показано основні процеси, що описують «накопичення» γ -квантів, які проходять через площину детектора D , у точці розміщення детектора:

пряме попадання γ -квантів у детектор без розсіяння («0»-розсіяння); шлях проходження γ -кванта: «0» — «D»;

попадання γ -квантів у детектор після першого розсіяння («1»-розсіяння); шлях проходження γ -кванта: «0» – «1» – «D». Кут θ_{01D} між напрямками «0» – «1» та «1» – «D» визначає величину зміни енергії кванта при розсіянні;

попадання γ -квантів у детектор після другого розсіяння («2»-розсіяння); шлях проходження γ -кванта: «0» – «1» – «2» – «D». Кут θ_{12D} між напрямками «1» – «2» та «2» – «D» визначає величину зміни енергії кванта при розсіянні;

розсіяння γ -квантів оболонкою контейнера та матеріалом його наповнювача; напрямки руху γ -квантів у детектор перетинають оболонку контейнера в точці «Z», що визначає довжину L_z , на якій ослаблюється потік перед попаданням у детектор.

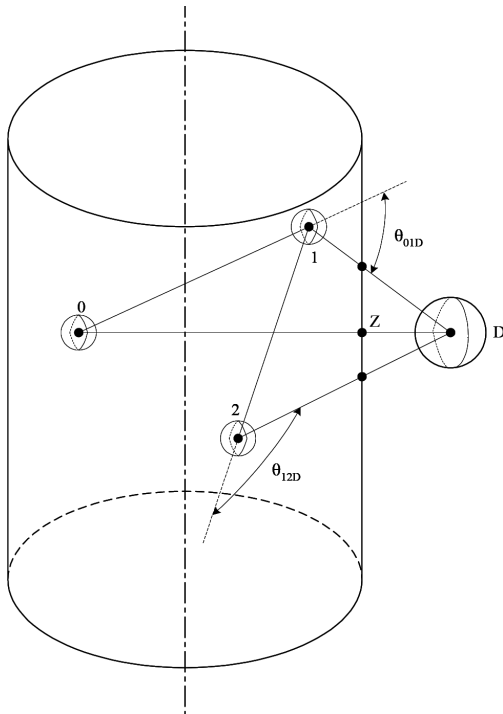


Рис. 1. Схематичне зображення процесів попадання γ -квантів з бочки-контейнера в детектор

Енергії E'_γ кожного γ -кванта після розсіяння розраховуються за формулою

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{\gamma \cdot (1 - \cos \theta) + 1}, \quad (4)$$

де E_γ — початкова енергія γ -кванта, кеВ; θ — кут розсіяння, радіан; $\gamma = E_\gamma/511$ — безрозмірна константа.

Для розрахунків розсіянь γ -квантів використовується повний переріз комптонівського розсіяння в інтервалі енергій від 50 до 3000 кеВ, оскільки в цьому інтервалі комптонівське розсіяння переважає всі інші різновиди розсіянь γ -квантів.

У нашій моделі використовується 12 енергетичних інтервалів у межах 50—3000 кеВ, для кожного з яких задаються поперечні перерізи взаємодій γ -квантів (у барнах) для певного хімічного елемента: а) повний поперечний переріз взаємодії — σ_{tot} ; б) поперечний переріз фотопоглинання та утворення електронно-позитронних пар — σ_{abs} . Переріз комптонівського розсіяння σ_c визначається як різниця цих величин: $\sigma_{\text{tot}} - \sigma_{\text{abs}}$.

Величини поперечних перерізів σ_{tot} , σ_{abs} та σ_c взаємодії γ -квантів з хімічними елементами добре відомі і табульовані (див., наприклад, [10]). Для розрахунків у модель вводяться дані 10—20 наборів поперечних перерізів σ_{tot} , σ_{abs} та σ_c для хімічних елементів, що можуть входити до складу наповнювача. Значення перерізів для кожної конкретної енергії γ -кванта визначається інтерполяцією в середині відповідного енергетичного інтервалу.

У розрахунках поглинання або розсіяння γ -квантів використовується лінійний коефіцієнт розсіяння (ослаблення або поглинання) μ , см^{-1} , який у загальному вигляді пов'язаний з поперечним перерізом взаємодії σ таким співвідношенням:

$$\mu = \frac{N_A \cdot \rho}{M} \cdot \sigma, \quad (5)$$

де N_A — число Авогадро, атом/моль; ρ — густина речовини, г/см^3 ; M — моль речовини, г.

Для речовини, що складається з кількох хімічних елементів,

$$\mu = N_A \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{M_i} \sigma_i, \quad (5a)$$

де δ_i — масова частка i -го хімічного елемента в речовині наповнення контейнера; M_i — моль i -го хімічного елемента, г; σ_i — поперечний переріз взаємодії i -го хімічного елемента, барн.

Диференційний поперечний переріз $\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}$ та повний поперечний переріз комптонівського розсіяння σ_c описуються загальновідомими формулами Клейна—Нішини:

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \frac{F}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{2} + \frac{\gamma^2(1 - \cos \theta)^2}{2 + 2\gamma(1 - \cos \theta)} \right) \cdot \frac{1}{(1 + \gamma(1 - \cos \theta))^2}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_c &= F \cdot \int_{\theta} \int_{\phi} \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \cdot \sin \theta \, d\theta \, d\phi = \\ &= \frac{F}{\gamma} \cdot \left(\left(1 - \frac{2(\gamma + 1)}{\gamma^2} \right) \cdot \ln(2\gamma + 1) + \frac{4}{\gamma} + \frac{2\gamma(1 + \gamma)}{(1 + 2\gamma)^2} \right), \quad (7) \end{aligned}$$

де F — амплітуда розсіяння для хімічного елемента з порядковим номером Z .

У моделі, яка використовується в цій роботі, у розрахунках використовується теоретичне відношення $\left(\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} / \sigma_c \right)^{\text{теор}}$, яке при множенні на величину σ_c (яка протабульована в [10]) дає значення $\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}$ для конкретного хімічного елемента.

Запишемо вигляд формул для розрахунку інтенсивності потоку γ -квантів, які проходять крізь площу S_d детектора D ($S_d = 1 \text{ см}^2$).

Подібно до формули (2), інтенсивність потоку γ -квантів у детектор для «0»-розсіяння

$$N_0 = A_0 \cdot V_0 \cdot \frac{S_d}{4\pi L_{0d}^2} \cdot T_{0Z}, \quad (8)$$

де L_{0d} — відстань між точкою «0» та центром детектора D , см; T_{0Z} — ослаблення потоку γ -квантів на відстані між точкою «0» і точкою Z на поверхні контейнера (див. рис. 1).

Для цього процесу накопичення інтенсивності потоку від кожної комбінації просторових координат точки «0» визначає потужність дози від усього контейнера. По суті, це відповідає розрахунку трикратного інтеграла. Формула для розрахунку ПЕД γ -випромінювання, Зв/год, у цьому разі має вигляд

$$P_0 = 1,715 \cdot 10^{-11} \cdot E_0 \cdot \sum_i (N_0)_i, \quad (9)$$

де E_0 — початкова енергія γ -кванта, кеВ; i — порядковий індекс елементарного об'єму.

Щоб спростити розрахунки для різних енергій γ -квантів у (9) і в подальших виразах для визначення ПЕД, коефіцієнт перед E_0 вважається константою, хоча в загальному випадку він залежить від енергії. Але ця залежність для різних енергій змінюється дуже незначно — менше ніж на 5 %.

Для «1»-розсіяння під кутом θ_1 інтенсивність потоку N_1 γ -квантів у детектор розраховується за формулою

$$N_1 = A_0 \cdot V_0 \cdot \frac{V_1}{4\pi L_{01}^2} \cdot T_{01} \cdot \mu'_S \cdot \frac{S_d}{L_{1d}^2} \cdot T_{1Z}, \quad (10)$$

де V_1 — елементарний об'єм навколо точки «1», см³; μ'_S — лінійний коефіцієнт розсіяння γ -кванта в кут θ_1 із зміною енергії відповідно до (5а), см⁻¹; T_{1Z} — ослаблення потоку γ -квантів на відстані між точками «1» та Z .

При цьому величина ПЕД від усього контейнера визначається накопиченням інтенсивності потоку від кожної комбінації просторових координат точки «0» і таких самих координат для точки «1». Це відповідає розрахунку шестикратного інтеграла. У цьому разі формула для розрахунку ПЕД γ -випромінювання, Зв/год, має вигляд

$$P_1 = 1,715 \cdot 10^{-11} \cdot \sum_i (N_1 \cdot E_1)_i, \quad (11)$$

де E_1 — енергія γ -кванта після «1»-розсіяння, кеВ; i — порядковий індекс елементарного об'єму.

Для «2»-розсіяння під кутом θ_2 інтенсивність потоку N_2 γ -квантів у детектор

$$N_2 = A_0 \cdot V_0 \cdot \frac{V_1}{4\pi L_{01}^2} \cdot T_{01} \cdot \mu'_S \cdot T_{12} \cdot \mu''_S \cdot \frac{V_2}{L_{12}^2} \cdot \frac{S_d}{L_{2d}^2} \cdot T_{2Z}, \quad (12)$$

де V_2 — елементарний об'єм навколо точки «2», см³; μ''_S — лінійний коефіцієнт розсіяння γ -кванта у кут θ_2 із зміною енергії відповідно до (5), см⁻¹; T_{2Z} — ослаблення потоку γ -квантів на відстані між точками «2» та Z ; L_{2d} — відстань між точкою «2» та центром детектора, см.

У цьому разі величина ПЕД від усього контейнера визначається накопиченням інтенсивності потоку від кожної комбінації просторових координат точки «0», тих самих координат для точки «1» і для точки «2», та відповідає розрахунку 9-кратного інтеграла. Формула для розрахунку ПЕД γ -випромінювання, Зв/год, має вигляд

$$P_2 = 1,715 \cdot 10^{-11} \cdot \sum_i (N_2 \cdot E_2)_i, \quad (13)$$

де E_2 — енергія γ -кванта після «2»-розсіяння, кеВ.

Розсіяння γ -квантів оболонкою контейнера та матеріалом його наповнювача підвищує кількість γ -квантів, що попадають у детектор D . Тілесний кут, під яким детектор «бачить» потік γ -квантів з ефективного об'єму відповідної

точки всередині контейнера, визначає площу S_Z (навколо точки Z на поверхні оболонки контейнера). Якщо збільшити площу S_Z вдвічі, то додаткова площа розсіюватиме γ -кванти в детектор із зміною їх енергії. Це призведе до збільшення значення ПЕД.

Вище не обговорювалися деякі деталі «1»-розсіяння, одна з яких полягає в тому, що точки «0» та «1» можуть збігатися. Цей процес фактично є розсіянням γ -квантів, що випромінюються об'ємом елементарної сфери, в матеріалі речовини, яка знаходиться в цьому об'ємі.

Враховуючи, що частина цих подій відбувається поблизу точки розміщення детектора, внесок таких процесів у ПЕД може бути досить суттєвим. У цьому випадку проводяться розрахунки для ряду розсіянь під кутами від 0° до 180° з урахуванням зміни енергії γ -кванта при цьому.

Сумарна ПЕД γ -випромінювання, Зв/год, від усього контейнера за рахунок усіх вищеозначених процесів розсіяння

$$P = P_0 + P_1 + P_2. \quad (14)$$

Тоді розраховані значення коефіцієнтів (кратності) ослаблення ПЕД γ -випромінювання k (частки) для кожного конкретного контейнера визначаються за формулою

$$k = \frac{P_{X=0}^{\text{розрах}}}{P_X^{\text{розрах}}}, \quad (15)$$

де $P_{X=0}^{\text{розрах}}$ — розрахункове значення ПЕД впритул до бічної поверхні бочки-контейнера без урахування поглинання γ -квантів у матеріалі його оболонки, Зв/год; $P_X^{\text{розрах}}$ — розрахункове значення ПЕД впритул до бічної поверхні бочки-контейнера (в тій самій точці) з урахуванням поглинання γ -квантів у матеріалі його оболонки завтовшки X , Зв/год.

Для реалізації описаної математичної моделі створено дві обчислювальні програми (PDBOCH2P та PDBOCH3P) у програмному середовищі Turbo Basic.

Перша програма є варіантом, у якому процеси, відображені на рис. 1, математично спрощені. За її допомогою можна розрахувати значення ПЕД від «0»-розсіяння, «1»-розсіяння та «2»-розсіяння, а внесок у ПЕД «3»-розсіяння оцінюється із співвідношення $\frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2}{P_3}$. Детальні роз-

рахунки інтенсивності потоку N_3 γ -квантів для «3»-розсіяння було би ускладненим через необхідність обчислення 12-кратного інтеграла, що є проблематичним навіть у разі використання сучасних доступних обчислювальних машин.

Друга програма математично більш обґрунтована і дає змогу розрахувати «0»-розсіяння, «1»-розсіяння та «2»-розсіяння та виконати оцінку спектра «3»-розсіяння. Для цього розсіяння виконано оцінку з використанням спектра «2»-розсіяння як «0»-розсіяння. При цьому розрахункове «1»-розсіяння вважалося за оцінене «3»-розсіяння. Таке моделювання відповідає розрахунку 6-кратного інтеграла. Зауважимо, що такий підхід є математично недостатньо обґрунтованим.

Поділ бочки-контейнера по висоті H , радіусу R та азимутальному куту φ призводить до досить значного зростання елементарних об'ємів із збільшенням відстані від осі контейнера до його поверхні. Так, ефективний радіус R_E елементарного об'єму на поверхні контейнера при поділі 10 (по H) — 5 (по R) — 8 (по φ) становить близько 5,9 см, а при поділі 20 — 5 — 16 дорівнює 3,7 см. Вважати такі розміри малими буде великим перебільшенням, адже значення коефіцієнта лінійного поглинання μ в інтервалі

Рис. 2. Розрахункові спектри γ -квантів з бочки-контейнера об'ємом 200 л для $E_\gamma=662$ кеВ, отримані за допомогою програми PDBOCH3P: 1, 3 — за наявності оболонки із заліза 4 мм завтовшки; 2, 4 — за відсутності оболонки; 3, 4 — спектри 1 та 2, збільшені в 5 разів

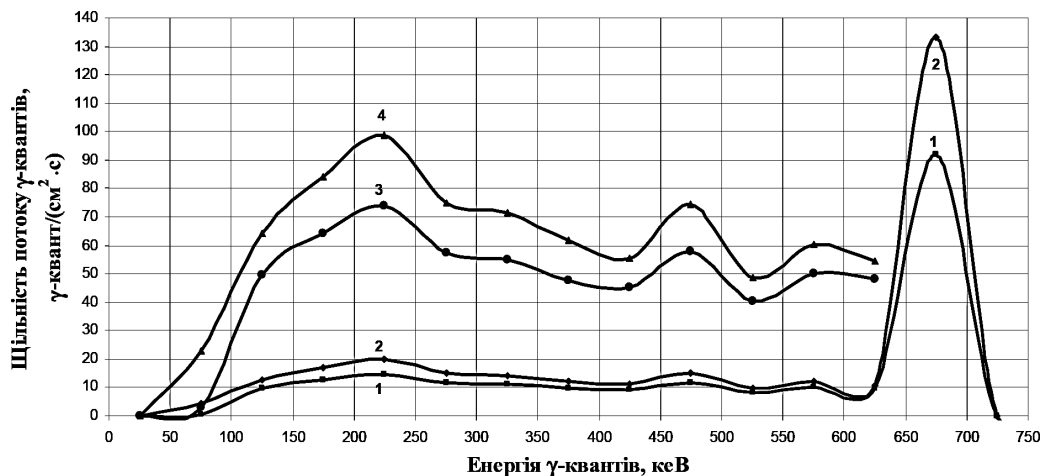
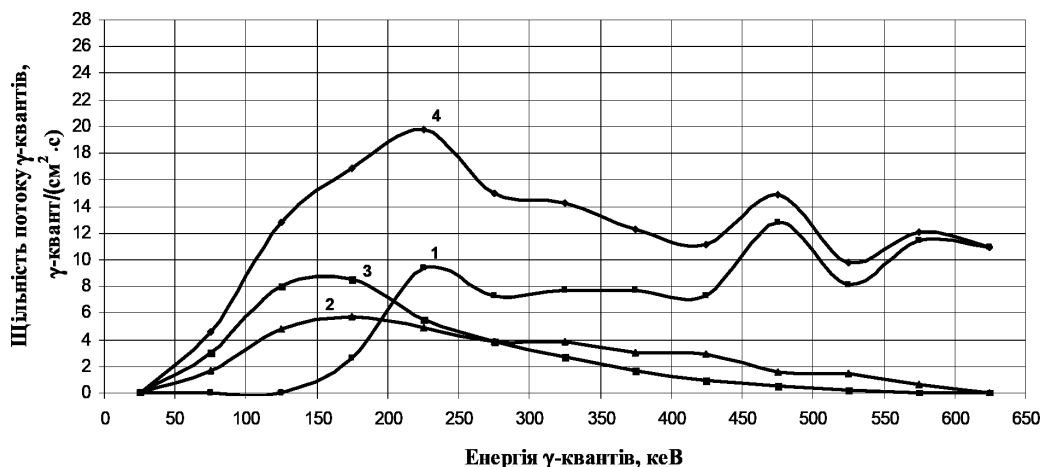


Рис. 3. Розрахункові спектри γ -квантів з бочки-контейнера об'ємом 200 л для $E_\gamma = 662$ кеВ після кратних розсіянь, отримані за допомогою програми PDBOCH3P: 1, 2, 3 — спектри «1», «2» та «3»-розсіяння, відповідно; 4 — сумарний спектр трьох розсіянь



енергій 300—600 кеВ близько $0,2 \text{ см}^{-1}$. Тоді значення μR_E , які визначають товщину поглинаючого шару в елементарному об'ємі, лежить у межах $0,74...1,2$. Ослаблення потоку γ -квантів для таких товщин становить $0,3...0,5$. У такому разі потрібен інтегральний підхід до розрахунку потоку γ -квантів, які реєструються детектором. Використовувати лінійний підхід до розрахунку потоку γ -квантів можна лише для малих тілесних кутів розсіяння.

Виконання розрахунків ПЕД у рамках запропонованої моделі за допомогою програм PDBOCH2P та PDBOCH3P можна значно прискорити, якщо ввести масштабний множник. При поділі 10 (по H) — 5 (по R) — 8 (по ϕ) та поділі 20 — 5 — 16 значення цього множника становить $1,95 \pm 0,03$, і він не залежить від енергії γ -квантів у діапазоні від 550 кеВ до 1250 кеВ. Використовуючи цей множник, навіть у разі досить «грубого» поділу розрахунок ПЕД здійснюється в десятки (до 80) разів швидше.

Програма PDBOCH3P математично є більш послідовною порівняно з програмою PDBOCH2P, тому значення ПЕД γ -випромінювання, розраховане за її допомогою, приблизно на 20 % більше від значення, розрахованого спрощеною програмою PDBOCH2P.

Розраховані за допомогою програми PDBOCH3P спектри γ -квантів, що опромінюють детектор, який розміщено на відстані 3 см від бічної поверхні наповнювача бочки-контейнера РАВ, наведені на рис. 2 та 3 (на цих рисунках, а також на рис. 4 по осі ординат відкладено щільність потоку γ -квантів в енергетичних інтервалах шириною 50 кеВ).

На рис. 2 показано два спектри γ -квантів з початковою енергією $E_\gamma = 662$ кеВ (^{137}Cs), що попадають в об'єм детектора: один спектр — за відсутності оболонки контейнера, другий — за наявності оболонки із заліза. Слід відмітити деякі розрахункові варіації в спектрах в області 400—650 кеВ, що пов'язані з використанням завеликих елементарних об'ємів та досить широкими енергетичними інтервалами «складання» γ -спектрів (50 кеВ).

На рис. 3 наведено спектри γ -квантів у діапазоні енергій 25—625 кеВ для «1», «2», «3»-го розсіянь та їх сумарний спектр за відсутності залізної оболонки контейнера. Спектр «1»-розсіяння вказує на фізичність моделювання: для більш високих енергій γ -квантів проходження крізь матеріал РАВ більше, а підняття кривої 1 при енергії близько 200 кеВ відповідає кутам розсіяння γ -квантів приблизно в 180° . Спектр «2»-розсіяння вказує на значний перерозподіл енергії γ -квантів у бік енергій нижче за 200 кеВ. «3»-розсіяння підсилює внесок γ -квантів з енергіями меншими за 175 кеВ і значно зменшує внесок γ -квантів з енергіями в інтервалі 275—625 кеВ.

Аналогічний розрахунок за таких самих умов виконано за допомогою програмного коду MCNP (рис. 4).

Порівнюючи розрахункові спектри γ -квантів на рис. 2 та 4, бачимо, що вони в цілому подібні, хоча дещо розрізняються в деяких енергетичних діапазонах.

У низько-енергетичній області 50—200 кеВ спектри різняться через те, що в PDBOCH3P не враховуються більше ніж трикратні розсіяння.

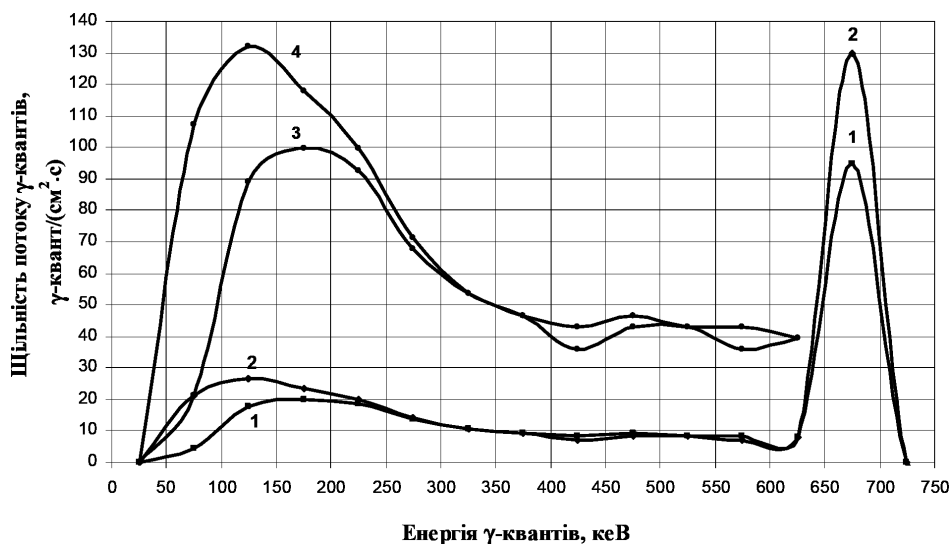


Рис. 4. Розрахункові спектри γ -квантів з бочки-контейнера об'ємом 200 л для $E_\gamma = 662$ кеВ, отримані за допомогою коду MCNP: 1, 3 — за наявності оболонки із заліза 4 мм завтовшки; 2, 4 — за відсутності оболонки; 3, 4 — спектри 1 та 2, збільшені в 5 разів

В області енергій 400–650 кеВ спектри мають певну особливість. Використовуючи код MCNP, у зазначеному інтервалі спектра спостерігається більше γ -квантів від залізної оболонки контейнера, ніж у разі її відсутності: $I(\text{Fe}) / I(0) = 1,091$, а при розрахунках з PDBOCH3P — 0,83 (див. рис. 2). Це можна пояснити впливом розсіянь γ -квантів з оболонки контейнера та матеріалу наповнення біля поверхні контейнера. Без урахування впливу ефекту розсіянь з оболонки $I(\text{Fe}) / I(0) = 0,71$. Відсутність можливості точно врахувати ефект впливу оболонки за допомогою PDBOCH3P (порівняно з MCNP) пов'язано з виключно якісним урахуванням цього ефекту в PDBOCH3P.

Дещо подібне спостерігається і в області фотопіка ^{137}Cs ($E_\gamma = 662$ кеВ). Розрахункове значення, отримане з використанням MCNP, дорівнює $I(\text{Fe}) / I(0) = 0,73$, а з використанням PDBOCH3P — 0,69 (з урахуванням впливу оболонки) та 0,64 (без урахування цього впливу).

Зрозуміло, що, виконуючи розрахунки з розбиттям на дрібніші елементарні об'єми, ефект впливу оболонки можна було би не враховувати. Проте, як показала практика, навіть при обраному підході до вибору елементарних об'ємів можна констатувати, що вищеописані ефекти впливають на значення сумарної ПЕД γ -випромінювання не суттєво. Значення величин P , які розраховані по γ -спектрах PDBOCH3P (рис. 2) та MCNP (рис. 4), розрізняються в межах від -2% до $+8\%$.

Як показано нижче, порівняння результатів розрахунків ПЕД γ -випромінювання за програмою PDBOCH3P з експериментально отриманими значеннями ПЕД для реальних бочок-контейнерів на ХАЕС доводить правильність реалізованого модельного підходу. Достовірність результатів розрахунків характеризується середньою величиною відносного відхилення розрахункового значення ПЕД від фактично виміряного. Середня величина відносного відхилення для 15 розглянутих контейнерів близька до нуля, а середньоквадратична похибка цього відхилення дорівнює 13% (див. табл. 4).

Крім розрахунку значень ПЕД, використання PDBOCH2P та PDBOCH3P дає змогу дістати відповіді на деякі важливі практичні запитання. Наприклад, який внесок у ПЕД γ -квантів від протилежної відносно детектора половини циліндричного контейнера з РАВ? Або: чи рівномірно розподілена активність твердих РАВ у циліндричних контейнерах для їх тимчасового зберігання?

Відповідь на перше запитання полягає в наступному: для γ -квантів з $E_\gamma = 565$ кеВ сумарний внесок усіх розглянутих процесів від протилежної половини контейнера в ПЕД становить близько 1% , для γ -квантів з $E_\gamma = 662$ кеВ — 2% , а для γ -квантів з $E_\gamma = 1250$ кеВ — близько 4% . Тільки для розсіянь третьої кратності внески від протилежної половини контейнера більш помітні і сягають 30% , що пов'язано з багатократними взаємодіями γ -квантів з матеріалом РАВ. Щодо другого запитання, можна зробити реалістичну оцінку рівномірності розподілу активності твердих РАВ за допомогою кількох вимірів ПЕД навколо контейнера.

Дані, використані у розрахунках коефіцієнтів ослаблення ПЕД γ -випромінювання оболонкою циліндричних контейнерів. Для розрахунків коефіцієнтів (кратності) ослаблення ПЕД γ -випромінювання матеріалом оболонки циліндричних бочок-контейнерів типів ЗП 551.040.00.000, А 2201.00.000 та КРО-200 за допомогою описаної математичної моделі використано середні значення параметрів сольового плаву, які були визначені виходячи з наведених раніше основних фізико-хімічних характеристик плаву:

густина сольового плаву — $2,1$ кг/дм³;

вміст хімічних елементів (масова частина у вагових частках): Na — 0,160; O — 0,630; K — 0,025; Ca — 0,043; N — 0,045; C — 0,022; B — 0,054; S — 0,014; H — 0,007.

Основні технічні характеристики контейнерів усіх означених типів бралися у розрахунках за Технічними умовами на них.

Інформацію, надану ХАЕС щодо питомої активності радіонуклідів ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co та маси сольового плаву в деяких заповнених контейнерах різних типів, що тимчасово зберігаються на території підприємства, наведено в табл. 2. Необхідні для розрахунків енергії характеристичних γ -ліній ізотопів ^{60}Co , ^{134}Cs і ^{137}Cs та їх γ -виходи взяті за [11].

Дані щодо хімічного складу матеріалу сталей Ст3 та Ст20, які використовуються для виготовлення контейнерів, наведено в табл. 3

Результати розрахункової оцінки радіаційно-захисних властивостей оболонок бочок-контейнерів для зберігання сольового плаву. Розрахунки значень ПЕД γ -випромінювання з використанням програми PDBOCH3P, яка реалізує описану математичну модель, проведені на основі фактичних даних, наведених у табл. 2, для кожної з 15 бочок-контейнерів. При цьому не враховувалися домішки хімічних елементів

Таблиця 2. Дані для розрахунків коефіцієнтів ослаблення ПЕД γ -випромінювання матеріалом оболонки контейнерів типів ЗП 551.040.00.000, А 2201.00.000 та КРО-200

№ з/п	№ бочки-контейнера	Дата завантаження сольового плаву	Питома активність на момент завантаження, Бк/кг			Маса сольового плаву в контейнері, кг
			^{137}Cs	^{134}Cs	^{60}Co	
Тип ЗП 551.040.00 — елемент систем нормальної експлуатації класу безпеки 3Н за [3]						
1	2040	25.12.1991	4,14E+07	2,04E+07	5,99E+05	348
2	1843	04.06.1992	5,88E+07	1,15E+07	4,51E+05	310
3	1746	23.02.1993	6,66E+06	1,37E+07	5,74E+05	249
Тип А 2201.00.000 — елемент систем нормальної експлуатації класу безпеки 3Н за [3]						
4	12	17.12.1993	9,62E+06	1,55E+07	4,44E+05	330
5	336/1	04.05.1995	2,29E+07	9,25E+06	9,25E+04	316
6	1117	30.04.1998	2,13E+07	5,44E+07	4,03E+05	310
7	1558	10.10.2000	4,85E+07	2,13E+07	4,00E+05	315
8	1934	30.04.2002	5,18E+07	3,07E+07	1,89E+05	340
9	2363	27.12.2004	8,51E+07	6,29E+07	3,18E+05	320
10	2562	18.01.2006	9,62E+07	7,77E+07	3,00E+05	330
11	3055	23.05.2008	8,14E+07	5,55E+07	2,63E+05	330
Тип КРО-200 — елемент систем нормальної експлуатації класу безпеки 4Н згідно з ТУ У 21474825–001–98						
12	3314/1591	07.12.2009	2,74E+07	1,55E+07	1,67E+05	338
13	3518/629	14.12.2010	3,40E+07	2,96E+07	7,40E+04	344
14	3533/1213	06.01.2011	3,22E+07	2,74E+07	4,07E+04	350
15	3729/1757	14.02.2012	2,74E+07	1,18E+07	1,55E+05	344

Таблиця 3. Хімічний склад матеріалу сталей Ст3 та Ст20

Марка сталі	Хімічний склад, %										
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As	Fe
Ст 3, ДСТУ [12]	0,14–0,22	0,15–0,3	0,4–0,65	До 0,3	До 0,05	До 0,04	До 0,3	До 0,008	До 0,3	До 0,08	Більше 98
Ст 20, ГОСТ [13]	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	До 0,25	До 0,04	До 0,04	До 0,25	–	До 0,25	До 0,08	Більше 97

у матеріалі оболонки контейнерів (залізо — 100 %), оскільки їх концентрація в сталях марок Ст3 та Ст20 є незначною (див. табл. 3).

Значення ПЕД γ -випромінювання $P_{X=0}^{\text{розрах}} \text{ та } P_X^{\text{розрах}}$ і відповідних коефіцієнтів k (кратностей) ослаблення ПЕД, які розраховані на момент завантаження сольового плаву для точок, розташованих впритул до бічної поверхні бочок-контейнерів, наведено в табл. 4. Також у табл. 4 наведено для порівняння фактичні значення ПЕД γ -випромінювання, отримані фахівцями ХАЕС за допомогою безпосередніх вимірювань у тих самих точках відразу після завантаження сольового плаву в контейнери.

Як видно з табл. 4, застосована математична модель дає змогу досить точно розрахувати значення ПЕД

γ -випромінювання. Максимальне відхилення розрахункового значення ПЕД впритул до поверхні контейнерів ($P_X^{\text{розрах}}$) від експериментально визначеного (фактичного) значення в тій самій точці ($P_X^{\text{вим}}$) становить близько 38 % (для контейнера А 2201.00.000 № 2562), а мінімальне — 0,6 % (для контейнера КРО-200 № 3533/1213).

Достовірність отриманих результатів розрахунків підтверджується також тим, що величина $\frac{P_X^{\text{розрах}} - P_X^{\text{вим}}}{P_X^{\text{розрах}}}$, яка

є величиною відносного відхилення розрахункового значення ПЕД від фактично виміряного (див. четвертий стовпчик табл. 5), близька до нуля. Середнє значення цієї величини дорівнює $+0,03 \pm 0,13$. Іншими словами: середня

Таблиця 4. Результати розрахунків для визначення радіаційно-захисних властивостей оболонки бочок-контейнерів ЗП 551.040.00.000, А 2201.00.000 та КРО-200

№ з/п	№ бочки-контейнера	Тип бочки-контейнера	Присвоєний клас безпеки	$P_{X=0}^{розр}$, мЗв/год	$P_X^{розр}$, мЗв/год	$P_X^{вим}$, мЗв/год	$k = \frac{P_{X=0}^{розр}}{P_X^{розр}}$, частки
1	2040	ЗП 551.040.00	3Н	7,49	4,62	5,11	1,62
2	1843	ЗП 551.040.00	3Н	7,01	4,28	5,15	1,64
3	1746	ЗП 551.040.00	3Н	2,05	1,24	1,22	1,65
4	12	А 2201.00.000	3Н	4,02	2,57	1,96	1,56
5	336/1	А 2201.00.000	3Н	3,64	2,30	2,36	1,59
6	1117	А 2201.00.000	3Н	10,70	6,79	5,50	1,58
7	1558	А 2201.00.000	3Н	8,14	5,15	5,19	1,58
8	1934	А 2201.00.000	3Н	10,03	6,39	6,59	1,57
9	2363	А 2201.00.000	3Н	16,04	10,25	8,47	1,57
10	2562	А 2201.00.000	3Н	19,20	12,01	8,69	1,59
11	3055	А 2201.00.000	3Н	14,63	9,29	8,38	1,59
12	3314/1591	КРО-200	4Н	5,24	3,22	3,41	1,63
13	3518/629	КРО-200	4Н	8,25	5,23	5,15	1,58
14	3533/1213	КРО-200	4Н	7,91	4,86	4,89	1,63
15	3729/1757	КРО-200	4Н	4,52	2,78	3,14	1,63

Таблиця 5. Величина відносного відхилення значень $P_X^{розр}$ від $P_X^{вим}$ для розглянутих бочок-контейнерів

№ бочки-контейнера	$P_X^{розр}$ (впритул до бічної поверхні контейнера), мЗв/год	$P_X^{вим}$ (впритул до бічної поверхні контейнера), мЗв/год	$\frac{P_X^{розр} - P_X^{вим}}{P_X^{розр}}$, частки
2040	4,62	5,11	-0,106
1843	4,28	5,15	-0,203
1746	1,24	1,22	+0,016
12	2,57	1,96	+0,237
336/1	2,30	2,36	-0,026
1117	6,79	5,50	+0,189
1558	5,15	5,19	-0,008
1934	6,39	6,59	-0,031
2363	10,25	8,47	+0,174
2562	12,01	8,69	+0,276
3055	9,29	8,38	+0,098
3314/1591	3,22	3,41	-0,059
3518/629	5,23	5,15	+0,015
3533/1213	4,86	4,89	-0,006
3729/1757	2,78	3,14	-0,130
Середня величина відносного відхилення та її середньоквадратична похибка			+0,03±0,13

величина відносного відхилення $\frac{P_X^{\text{розра}} - P_X^{\text{вим}}}{P_X^{\text{розра}}}$ стано-

вить 3 %, а середньоквадратична похибка відхилення — 13 % при 68 %-довірчому інтервалі (26 % — для 95 %-довірчого інтервалу).

Порівнюючи значення $P_X^{\text{розра}}$ та $P_X^{\text{вим}}$, потрібно взяти до уваги, що:

дозиметричні прилади (дозиметри, дозиметри-радіометри), які використовуються для визначення ПЕД γ -випромінювання на АЕС України (наприклад, МКС-01Р, ДКС-96М), зазвичай мають основну відносну похибку вимірювань від ± 20 % до ± 40 % у діапазоні вимірюваних ПЕД для розглянутих контейнерів;

спектрометричні прилади дають змогу визначати активності окремих радіонуклідів у сольовому плаві також з деякою похибкою, яка може досягати 5 % при використанні германієвих детекторів та відборі проб сольового плаву, а в разі використання сцинтиляційних детекторів на основі NaI (ТІ) похибка може сягати 45 %;

будь-яка математична модель має систематичні похибки, пов'язані з наближеннями й обмеженнями, які накладаються на неї як через суб'єктивні, так і об'єктивні фактори.

Тому можна впевнено стверджувати, що розрахункові та фактичні значення ПЕД γ -випромінювання в цілому добре корелюють між собою.

Висновки

1. Розроблена математична модель, яка враховує основні впливові механізми розсіяння γ -квантів у речовині наповнювача циліндричного контейнера РАВ та в його оболонці, дає змогу коректно розраховувати ПЕД γ -випромінювання в будь-якій точці поза контейнером і може бути використана для оцінок як радіаційно-захисних властивостей оболонки, так і для прогнозування дозових навантажень при поводженні з РАВ.

2. Із табл. 4 видно, що для всіх розглянутих бочок-контейнерів значення коефіцієнта (кратності) ПЕД γ -випромінювання однакові (в діапазоні від 1,56 до 1,65). Більше того, для контейнерів типу А 2201.00.000, які наразі належать до більш високого класу безпеки 3Н, коефіцієнт ослаблення γ -випромінювання навіть дещо менший, ніж для контейнерів типу КРО-200, які належать до нижчого класу безпеки 4Н. Для контейнерів типу ЗП 551.040.000 (клас безпеки 3Н) і КРО-200 (клас безпеки 4Н) значення коефіцієнтів ослаблення ПЕД γ -випромінювання практично однакові.

3. Отримані значення коефіцієнтів (кратності) ослаблення ПЕД γ -випромінювання є досить незначними. Для порівняння наведемо значення цих коефіцієнтів, вказані у [14] для деяких об'єктів і конструкцій: автомобіль, критий вагон — 2; бульдозер — 4; перекриття дерев'яного одноповерхового будинку — 2...3; перекриття приміщень верхнього поверху багатопверхового будинку — 50.

4. Вочевидь, усі розглянуті типи контейнерів практично однакові з точки зору їх радіаційно-захисних властивостей, тому доцільно було би віднести їх до одного класу безпеки. За результатами розрахунків та аналізу радіаційно-захисних властивостей контейнерів можна констатувати, що контейнери усіх трьох типів фактично є зовнішніми захисними бар'єрами для локалізації сольового плаву в певному об'ємі, але не можуть реально забезпечувати протирадіаційний

захист персоналу та населення. Тому логічно розглянути питання щодо класифікації бочок-контейнерів усіх згаданих типів як елементів систем нормальної експлуатації 4-го класу безпеки (4Н).

Наприкінці автори статті вважають своїм приємним обов'язком широко подякувати Константінову В. В. за надання фактичної інформації відносно бочок-контейнерів, які тимчасово зберігаються на ХАЕС, та Громихало А. К. — за проведення розрахунків з використанням кодів МСНР.

Список використаної літератури

1. Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами» від 30.06.1995 № 255/95-ВР // Відомості Верховної Ради України (ВВР). — 1995. — № 27. — Ст. 198.
2. ПН АЭ Г-1-011-89. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88). — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 48 с.
3. НП 306.1.02/1.034-2000. Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій (ЗПБ-2000). — К.: Державна адміністрація ядерного регулювання України, 2000. — 24 с.
4. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій (ЗПБ-2008). — К.: Державний комітет ядерного регулювання України, 2008. — 41 с.
5. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Державні гігієнічні нормативи: Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). — К., 2003. — 135 с.
6. Голубев Б. П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений / Б. П. Голубев. — 4-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 464 с.
7. Поводження з радіоактивними відходами при експлуатації АЕС ДП НАЕК «Енергоатом»: Звіт (станом на 31.12.2010) / ДП НАЕК «Енергоатом». — К., 2011. — 65 с.
8. Пшеничний В. А. Математична модель вимірювань кутових розподілів розсіяння нейтронів / В. А. Пшеничний // Ядерні та радіаційні технології. — 2005. — Т. 5, № 3-4. — С. 5-12.
9. Пшеничний В. А. Особливості обробки результатів вимірювань кутових розподілів розсіяння на фільтрованих нейтронних пучках / В. А. Пшеничний // Ядерні та радіаційні технології. — 2006. — Т. 6, № 3-4. — С. 5-21.
10. Немец О. Ф. Справочник по ядерной физике / О. Ф. Немец, Ю. В. Гофман. — К.: Наук. думка, 1975. — 416 с.
11. Table of Isotopes. 7-th edition / Edited by C. M. Lederer, V. S. Shirley. — N.Y., 1978. — 1523 с.
12. ДСТУ 2651:2005/ГОСТ 380-2005. Сталь вуглецева звичайної якості. Марки. — К.: Держспоживстандарт, 2005. — 28 с.
13. ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 24 с.
14. Гражданская оборона: Учеб. Пособие / Под ред. В. Н. Завьялова. — М.: Медицина, 1989. — 272 с.

References

1. Law of Ukraine «On Radioactive Waste Management» from 30.06.1995, № 255/95-ВР // News of Supreme Council of Ukraine (ВВР). — 1995. — № 27. — P.198.(Рус)
2. ПНАЕ Г-1-011-89. General provisions of nuclear power plants safety (ОПБ-88). — Moskva: Energoatomizdat, 1990. — 48 p.(Рус)
3. НП 306.1.02/1.034-2000. General provisions of nuclear power plants safety (ЗПБ-2000). — Kyiv: State Nuclear Regulation Administration of Ukraine, 2000. — 24 p. (Рус)
4. НП 306.2.141-2008. General provisions of nuclear power plants safety (ЗПБ-2008). — Kyiv: State Nuclear Regulation Committee of Ukraine, 2008. — 41 p. (Рус)
5. DGN 6.6.1.-6.5.001-98. State hygienic standards. Radiation safety standards of Ukraine (NRBU-97) — Kyiv: 2003. — 135 p. (Рус)

6. Golubew B.P. Dosimetry and Protection against Ionizing Radiation/ B.P. Golubew. — 4-th ed. — Moskva : Energoatomizdat, 1986. — 464 p. (Rus)
7. Radioactive waste management under operation of nuclear power plants of the State Enterprise NAEK “Energoatom”: Report (as of 31.12 2010). — Kyiv : SE NAEK “Energoatom”, 2011. — 65 p. (Rus)
8. Pshenychniy V.A. Mathematical model for measurements of angular distributions of the neutron scattering / V.A. Pshenychniy // Yadernie i Radiatsionnye Technologii (Nuclear and Radiation Technologies). — 2005. — Vol. 5, № 3–4. — P. 5–12. (Rus)
9. Pshenychniy V.A. Features of processing of the results of scattering angular distributions measurements on the filtered neutron beams / V.A. Pshenychniy // Yadernie i Radiatsionnye Technologii (Nuclear and Radiation Technologies). — 2006. — Vol. 6, № 3–4. — P. 5–21. (Rus)
10. Nemets O.F. Handbook of Nuclear Physics / O. F. Nemets, Yu. V. Gofman. — Kyiv : Naukova Dumka, 1975. — 416 p. (Rus)
11. Table of Isotopes. 7-th edition / Edited by C. M. Lederer, V. S. Shirley. — N.Y., 1978. — 1523 p.
12. DSTU 2651:2005/GOST 380–2005. Ordinary quality carbon steel. Grade. — Kyiv : Derzhspozhivstandart, — 28 p. (Rus)
13. GOST 1050–88. Rolled steel, calibrated with special finishing of surface from quality carbon structural steel. General specifications. — Moskva: Izdatelstvo standartov, 1989. — 24 p. (Rus)
14. Civil defense: Textbook / Edited by V. N. Zavyalov. — Moskva : Medicina, 1989. — 272 p. (Rus)

Отримано 03.12.2013.

Правила для авторів

1. Рукопис статті журналу подається у вигляді твердої копії з підписами всіх авторів на останній сторінці, а також електронної версії (на електронному носії або електронною поштою). До публікації приймаються лише оригінальні твори, присвячені проблемам ядерної та радіаційної безпеки.

2. Стаття має містити УДК. Українською, російською та англійською мовами наводяться анотація, назва статті, ключові слова, прізвище, ім'я та по батькові автора, назва організації, де працює автор.

3. Загальний обсяг статті разом з графічними матеріалами не повинен перевищувати 18 сторінок формату А4. На одній сторінці може бути не більш як 30 рядків та до 60 знаків (з урахуванням розділових знаків і проміжків між словами) у кожному рядку. Розмір шрифту підготовленого на комп'ютері матеріалу — 14; міжрядковий інтервал — 1,5. Розміри полів, мм: зліва — 30, справа — 10, зверху — 20, знизу — 25.

4. Текст набирається шрифтом Times New Roman у редакторі Microsoft Word. Графічний матеріал (чорно-білий) подається у форматі EPS, TIFF або JPG-файлів з густиною точок на дюйм 300–600 dpi. Ілюстрації подаються окремо від тексту.

5. Статті, які є результатами робіт, проведених в організаціях, повинні мати супровідний документ від цих організацій.

6. Разом зі статтею до редакції журналу має бути поданий документ про можливість відкритої публікації матеріалів, а також про згоду на поширення їх через мережу Інтернет.

7. До авторського оригіналу статті на окремому аркуші додаються: прізвище, ім'я, по батькові (повністю) автора, організація, в якій він працює, посада, вчений ступінь, звання, мобільний, службовий і домашній номери телефону, службова та домашня адреси.

8. Скорочення слів, словосполучень, назв, термінів, за винятком загальноприйнятих, можливе тільки після їх повного першого згадування в тексті.

9. Зміст наукових статей будується за такою структурою: *коротка анотація* — стислі відомості про статтю (до 10 рядків); *вступ* — постановка наукової проблеми, її актуальність, зв'язок з державними науковими та практичними програмами, значення вирішення проблеми;

основні дослідження і публікації — аналітичний огляд останніх досліджень і публікацій з даної проблеми, виокремлення не розв'язаних раніше питань;

формування мети статті — опис головної ідеї даної публікації, чим вона відрізняється, доповнює та поглиблює вже відомі підходи, які нові факти, закономірності висвітлює (до 15 рядків);

викладення основного змісту проведеного дослідження — головна частина статті, де висвітлюються основні положення дослідження, програма і методика експерименту, отримані результати та їх обґрунтування, виявлені закономірності, аналіз результатів, особистий внесок автора;

висновки — основні підсумки, рекомендації, значення для теорії й практики, перспективи подальших досліджень;

список літератури — перелік літературних джерел, на які є посилання в тексті статті; вказати автора та назву твору, місце публікації (для книжки — місто та видавництво, для статті — назву збірника чи журналу, його номер або випуск), дату публікації, кількість сторінок у книжці або сторінки, на яких вміщено статтю.

10. Матеріали, які неохайно оформлені і не відповідають зазначеним вимогам, редакцією не розглядаються.

11. Для скорочення витрат на видання журналу виплата авторського гонорару не передбачається.

12. Матеріали, що надійшли до редакції, авторам не повертаються.