

Л. М. СОЛОДОВНИКОВА, В. О. ТАРАСОВ, В. М. ЗУБЕР, Ю. М. СОРОКА, Н. Д. СІЗОВА

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ОЦІНКИ І ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ РАДОНОНЕБЕЗПЕКИ СХОВИЩ РАВ

В роботі розглянуто методичні аспекти оцінки і зниження рівня радоннебезпеки сховищ радіоактивних відходів (РАВ) закритого та відкритого типів. Запропоновано алгоритм оцінки рівня радоннебезпеки сховищ РАВ, який, окрім безпосередньо вимірювань і оцінки радоннебезпеки, включає етап калібрування приладів з використанням еталонних джерел радону-222 і розробку протирадонових засобів для сховищ РАВ. На прикладі дослідження радоннебезпеки закритого сховища твердих РАВ Харківського ДМСК УкрДО «Радон» і II секції відкритого Сухачівське хвостосховища колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» показано застосування алгоритму оцінки рівня радоннебезпеки сховищ. Визначена об'ємна активність радону-222 для закритого сховища РАВ і густина потоку радону для відкритого сховища РАВ. Запропоновано ефективні протирадонові заходи для досліджених сховищ РАВ.

Ключові слова: радоннебезпека, еталонне джерело радону-222, об'ємна активність радону-222, густина потоку радону-222, сховища РАВ.

L. M. SOLODOVNIKOVA, V. A. TARASOV, V. M. ZUBER, Yu. N. SOROKA, N. D. SIZOVA

METHODOLOGICAL ASPECTS OF ASSESSMENT AND REDUCTION RADON DANGER STORAGE RADIOACTIVE WASTE

The paper proposes methodological support for determining the level of radon hazard of radioactive waste repositories of closed and open types, which consists of an algorithm for estimating the level of radon hazard of repositories. The algorithm includes: determination of the type of storage (closed or open), analysis of the composition of radioactive waste for the content of uranium-238 and radium-226, selection of radon-222 flux density measurement parameters in open and volume activity of radon in closed radioactive waste storage, calibration of radon-222 measuring instruments with the help of a standard radon-222 sources, determination of the level of radon hazard of storages, which was investigated. The use of the proposed algorithm for radon hazard assessment of closed and open storage facilities contributes to the development of effective anti-radon measures for the storage facilities under study.

Key words: radon hazard, standard radon-222 sources, radon-222 volumetric activity, radon flux density-222, tailing dump of radioactive waste.

Л. Н. СОЛОДОВНИКОВА, В. А. ТАРАСОВ, В. М. ЗУБЕР, Ю. Н. СОРОКА, Н. Д. СІЗОВА

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ И СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ РАДОНОБЕЗОПАСНОСТИ ХРАНИЛИЩ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

В работе рассмотрены методические аспекты оценки и снижения уровня радон безопасности хранилищ радиоактивных отходов (РАО) закрытого и открытого типов. Предложен алгоритм оценки уровня радон безопасности хранилищ РАО, который, кроме непосредственно измерений и оценки радон безопасности, включая этап калибровки приборов с использованием эталонных источников радона-222 и разработку противорадоновых средств для хранилищ РАО. На примере исследования радон безопасности закрытого хранилища твердых РАО Харьковского ГМСК УкрГО «Радон» и II секции открытого Сухачевского хвостохранилища бывшего ПО «Приднепровский химический завод» показано применение алгоритма оценки уровня радон безопасности хранилищ. Определена объемная активность радона-222 для закрытого хранилища РАО и плотность потока радона для открытого хранилища РАО. Предложены эффективные противорадоновые меры для исследованных хранилищ РАО.

Ключевые слова: радон безопасность, эталонный источник радона-222, объемная активность радона-222, плотность потока радона-222, хранилища РАО.

Вступ. Значна частина території України розташована на кристалічному щиті з великим вмістом U-238 та Th-232. Це є причиною інтенсивних еманцій радіоактивних газів Rn-222 та Rn-220. Найбільший внесок в формування індивідуальної ефективної еквівалентної дози опромінення населення від земних джерел радіації вносить Rn-222 разом зі своїми дочірніми продуктами розпаду (близько 74%) [1]. Наявність в Україні урановидобувної і переробної промисловості, робота АЕС, використання радіоактивних ізотопів в наукових та медичних центрах, сільському господарстві, а також накопичення продуктів цих видів діяльності у сховищах РАВ, підвищують

ризик опромінення людей. РАВ розміщуються в зоні відчуження Чорнобильської АЕС, в Державних спеціалізованих комбінатах УкрДО «Радон» та на відкритій місцевості урановидобувних підприємств. Вони мають відпрацьовані джерела U-238 та Ra-226, які виділяють в атмосферне повітря радіоактивний газ Rn-222. Розташування відкритих сховищ РАВ поблизу населених пунктів може підвищувати дозове навантаження на населення. В закритих сховищах РАВ додаткове дозове навантаження від Rn-222 поширюється на виробничий персонал [2].

© Солодовнікова Л.М., Тарасов В.О., Зубер В.М., Сорока Ю.М., Сізова Н.Д., 2020

Для достовірної оцінки радононебезпеки в обох випадках необхідна певна послідовність дій.

Показником радононебезпеки є об'ємна активність радону у повітрі. Цей показник безпосередньо вказує на ступень небезпеки потрапляння радону до організму і його внутрішнього опромінення. Коректні оцінки об'ємної активності радону у повітрі можливі в першу чергу у закритих приміщеннях. На відкритому повітрі такі оцінки значно ускладнені і часто неможливі через дію різних метеорологічних факторів, навіть при використанні математичних моделей, які прогнозують зміни об'ємної активності радону при варіації факторів. Однак у цьому випадку також можлива кількісна оцінка радононебезпеки різних ділянок території шляхом визначення густини потоку радону-222 з поверхні цих ділянок.

В цілому підходи для визначення рівня радононебезпеки сховищ РАВ закритого та відкритого типів характеризуються певною спільністю, але вони відрізняються на деяких етапах проведення досліджень. Можна скласти наступну послідовність етапів дослідження радононебезпеки сховищ РАВ закритого і відкритого типу [3]:

- аналіз інформації відносно типу сховища РАВ (закрите або відкрите), складу РАВ і можливості вмісту урану-238 та радію-226;
- вибір засобів та методики вимірювання радону-222 залежно від типу сховища РАВ;
- калібрування засобів вимірювання радону-222 за допомогою еталонного джерела;
- безпосереднє вимірювання об'ємної активності радону в повітрі закритих сховищ або густини потоку радону з поверхні відкритих сховищ РАВ;
- визначення рівня радононебезпеки дослідженого сховища РАВ.

Наведений алгоритм визначення радононебезпеки сховищ РАВ природно доповнюється етапом розробки протирадонових засобів, які повинні зменшити негативний вплив радону.

В даній статті на прикладі досліджень сховищ РАВ двох типів (відкритого і закритого) показані спільності і відмінності підходів для оцінки і зниження радононебезпеки цих об'єктів. Нижче наведено результати досліджень на кожному етапі вказаного алгоритму.

Характеристика об'єктів дослідження

В роботі досліджувалося закрите сховище твердих РАВ Харківського ДМСК Українського державного об'єднання (УкрДО «Радон»). УкрДО «Радон» виконує роботи зі збирання, транспортування, переробки та захоронення РАВ в межах України. В сховищі твердих РАВ Харківського ДМСК УкрДО «Радон» накопичено близько 5000 м³ РАВ, які в своєму складі містять відпрацьовані джерела U-238 та Ra-226, в тому числі

низько та середньоактивні РАВ об'ємом 1608,1 м³ в підземних секціях сховища [4]

Дослідження рівня радононебезпеки в цьому сховищі стало необхідним у зв'язку з постійною його експлуатацією. Радон-222 при проведенні робіт у підземних секціях сховища твердих РАВ створює небезпеку для виробничого персоналу сховища.

В роботі також досліджувалася II секція відкритого Сухачівське хвостосховища колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод». Це одне з сховищ заводу, розташованого біля м. Кам'янське (м. Дніпродзержинськ). За час роботи заводу з 1949 по 1991 рік утворилися відкриті сховища РАВ: «Західне», «Центральний Яр», «Південно-східне», «Дніпровське», «Сухачівське»: I - секція, II - секція, «База С», «Лантанова фракція», «Доменна піч №6» [3]. В них РАВ накопичувалися після видобутку і переробки уранової руди у вигляді відвалів супутніх і збалансованих руд, а також технологічних пульп у хвостосховищах.

В II секції Сухачівського хвостосховища за період її експлуатації накопичилося приблизно 19 млн. тон РАВ, які в своєму складі містять U-238 та Ra-226. За попередніми оцінками річне надходження радону-222 в приземний шар атмосфери з II секції Сухачівського хвостосховища складає $2,16 \cdot 10^6$ Бк/м³.

Визначення рівня радононебезпеки II секції хвостосховища «Сухачівське» пов'язано з реконструкцією і перепрофілюванням для подальшого використання вільного обсягу чаші [5]. Необхідність зниження рівня радононебезпеки хвостосховищ РАВ з переробки уранових руд базується на рекомендаційних звітах [6, 7] та на використанні нормативних документів [8, 9].

Ця інформація щодо сховищ отримана в результаті першого етапу досліджень згідно наведеного вище алгоритму визначення радононебезпеки сховищ РАВ.

Засоби вимірювань радону

У даній роботі радононебезпека досліджуваних об'єктів оцінювалася за значеннями об'ємної активності радону в повітрі сховища закритого типу і по густині потоку радону з поверхні хвостосховища відкритого типу.

Для сховищ закритого типу можливі прямі вимірювання об'ємної активності радону-222 з допомогою радонетрів. Кількість радону в приземному шарі атмосфери відкритого хвостосховища визначається за значенням густини потоку радону-222 з його поверхні, яке вимірюється радіометрами.

Вимірювання об'ємної активності радону-222 в сховищі твердих РАВ Харківського ДМСК Укр ДО «Радон» і густини потоку радону з поверхні II секції Сухачівського хвостосховища колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» проводились за допомогою камери, яка накопичує радон-222 та

радонометру Alpha GUARD PQ 2000 і радіометром РГА-09, в якому діапазон виміру еквівалентної об'ємної активності радону-222 може складати від 50 до $1 \cdot 10^4$ Бк/м³.

Еталонне джерело радону і калібруванні засобів вимірювання

Важливим етапом виконання цього алгоритму є калібрування засобів вимірювання Rn-222, що забезпечує надійність результатів вимірювань. Реалізація цього етапу стала можливою завдяки створенню еталонного джерела радону-222 [10].

При створенні еталонного джерела радону-222 було проведено аналіз існуючих джерел радону-222, що входять до складу національних еталонів США, Англії, Німеччини та інших країн світу. Існуючі еталонні джерела виготовлені з розчинів солей радію, порошку радію, евтектичних сумішей солей-носіїв радію. Недоліки цих джерел такі: висока вартість, складність в експлуатації, радіоекологічна небезпечність. Тому, вимогами до створеного еталонного джерела радону-222 стали: екологічна безпечність, економічність і доступність матеріалу, що генерує радон-222, ефективність технічного застосування та простота в експлуатації.

Так, в якості матеріалу, що генерує радон-222 було використано стандартні зразки малоактивної уранової руди, яка видобувається в Україні. В процесі створення еталонного джерела були проведені дослідження стандартних зразків уранової руди на вміст ^{238}U та ^{226}Ra . Для створення еталонного

джерела було обрано стандартний зразок уранової руди УР-768С, тому що він мав найбільш оптимальну кількість ^{238}U та ^{226}Ra для відтворення еталонним джерелом необхідної активності радону.

При створенні еталонного джерела було досліджено питому еманацию E стандартного зразка УР-768С відносно радону-222, яка визначалася на альфа-, бета-спектрометричній системі «Quantulus 1220» в процесі встановлення радіоактивної рівноваги між Ra-226 та Rn-222. Рівновага між Ra-226 та Rn-222 настає на 30 добу і рівноважне значення питомої еманации E становить $5,56 \pm 0,057$ Бк/г (рис. 1). Визначення питомої еманации E є необхідним для розрахунку маси стандартного зразка УР-768С, яка потрібна для виготовлення еталонного джерела.

Підтримка оптимального температурного режиму еманування є необхідною умовою для відтворення еталонним джерелом стабільного значення активності радону-222. Для цього методом R- функцій були проведені теоретичні дослідження розподілу температур у стандартному зразку УР-768С під час нагрівання в різних капсулах: з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, титану ВТ-4, ВТ-6 та вольфраму. Найбільш рівномірний нагрів стандартного зразка спостерігався в капсулі, виготовленої з нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т (рис. 2). Її було обрано для підтримки оптимального температурного режиму еманування радону-222 в еталонному джерелі.

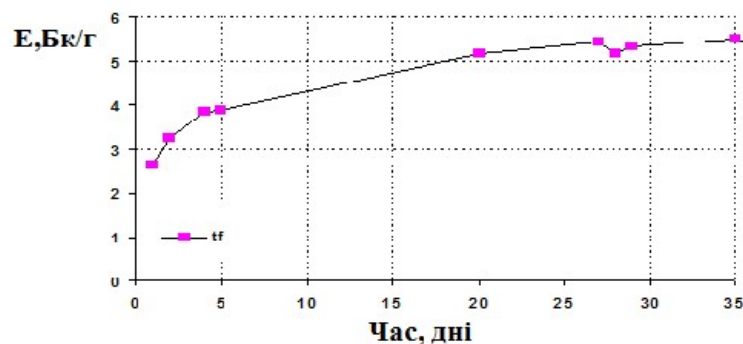


Рис. 1 – Залежність питомої активності E стандартного зразка УР-768С відносно радону-222 від часу

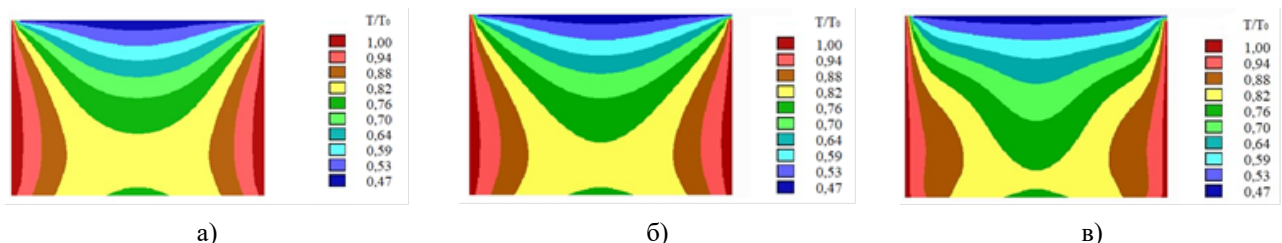


Рис. 2 – Лінії рівня температурного поля для матеріалів стінки капсули з нержавіючої сталі (а), титану (б) і вольфраму (в).

Було створено три еталонних джерела радону-222, активності яких становлять:

$$A_1 = 9,59 \times 10^3 \text{ Бк,}$$

$$A_2 = 9,56 \times 10^3 \text{ Бк,}$$

$$A_3 = 9,48 \times 10^3 \text{ Бк відповідно.}$$

Еталонні джерела радону-222 за спеціальною програмою і методикою атестації, що задовольняє вимоги ГОСТу 16327-88 і ДСТУ 3215-95, були

досліджені на герметичність та відповідність вимогам радіаційного захисту. Були підтверджені: екологічна безпека, економічна вигідність і простоту в експлуатації створеного еталонного джерела радону-222 на базі стандартного зразка уранової руди УР-768С.

Еталонні джерела увійшли до складу Державного первинного еталона об'ємної активності

радону-222 (ДЕТУ 12-01-11), який відтворює, зберігає і передає одиницю об'ємної активності радону-222 в діапазоні від 30 до $3 \cdot 10^4$ Бк/м³ [10].

Схема калібрування засобів вимірювання радону-222 за допомогою еталонних джерел, які використовуються при дослідженні рівнів радонебезпеки в сховищах РАВ закритого та відкритого типів, показана на рис. 3.

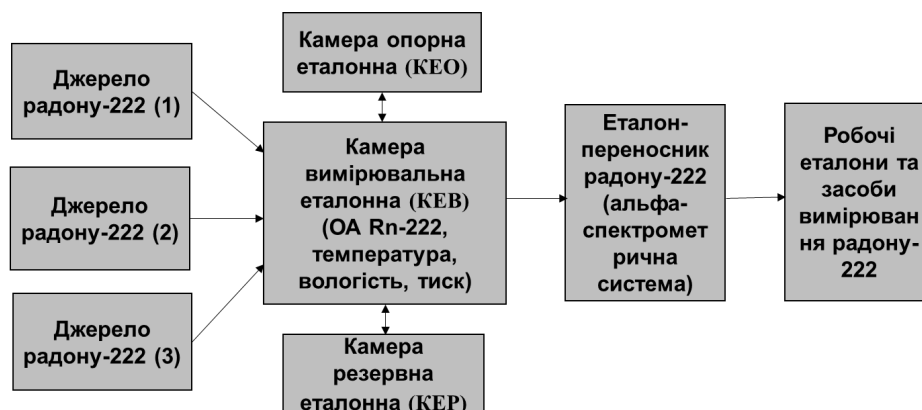


Рис. 3 – Схема калібрування засобів вимірювання радону-222 за допомогою еталонних джерел.

За цією схемою були відкалібровані засоби вимірювання радону для визначення рівня радонебезпеки сховищ РАВ закритого та відкритого типів.

Вимірювання радону і оцінка радонебезпеки в досліджених сховищах РАВ

Експериментальні визначення об'ємної активності радону-222 в повітрі сховища твердих РАВ Харківського спецкомбінату УкрДО «Радон» проводилося при відкритому стані підземних секцій.

Заміри радону-222 здійснювалися радон-монітором Alpha GUARD PQ 2000.

Визначення значень об'ємної активності радону в секції з твердими радіоактивними відходами було виконано на дні чарунки Z глибиною 4,0 м в таких точках: А (0,5; 2,0; -4,0); В (0,5; 6,0; -4,0); С (0,5; 10,0; -4,0); D (2,5; 2,0; -4,0); Е (2,5; 6,0; -4,0); F (2,5; 10,0; -4,0); та на глибині чарунки Z – 2,0 м в таких точках: А' (0,5; 2,0; -2,0); В' (0,5; 6,0; -2,0); С' (0,5; 10,0; -2,0); D' (2,5; 2,0; -2,0); Е' (2,5; 6,0; -2,0); F' (2,5; 10,0; -2,0). Результати досліджень представлені в таблиці 1 [11].

Таблиця 1 – Результати вимірювань об'ємної активності радону-222 в секції сховища ТРВ

Точки вимірювання при z = 2м	Об'ємна активність радону-222 Бк·м ⁻³	Точки вимірювання при z = 4м	Об'ємна активність радону-222 Бк·м ⁻³
А'	1000	А	1250
В'	960	В	1200
С'	1000	С	1250
Д'	993	Д	1243
Е'	955	Е	1200
Ф'	994	Ф	1247

Вихід радону з секції створює підвищений рівень радонебезпеки в повітрі сховища ТРВ Харківського ДМСК.

Визначення показників радонебезпеки відкритого сховища РАВ II секції Сухачівського хвостосховища колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод», а саме, густини потоку радону з поверхні хвостосховища за допомогою радон-монітора AlphaGuard PQ-2000 та і камери, яка накопичує радон з поверхні певного розміру.

Вимірювання еквівалентної рівноважної об'ємної активності (ЕРОА) радону в атмосферному

повітрі хвостосховища проводилося та радіометра РГА-09М. Вимірювання ЕРОА радону-222 в атмосферному повітрі санітарно-захисної зони (СЗЗ) II секції Сухачівського хвостосховища проводились радіометром РГА-09М.

Значення ЕРОА радону коливалися в широкому діапазоні під впливом змінних метеорологічних факторів, що не дало можливості оцінити рівень радонебезпеки хвостосховища.

В той же час результати вимірювань густини потоку радону-222 з поверхні ґрунту показали, що в межах СЗЗ хвостосховища (радіус 1 км) є окремі ділянки зі значеннями густини потоку радону-222 від

162±8 до 373±14 мБк/м²·с (табл. 2), що підтверджує хвостосховища [12].
радононебезпеку цих ділянок II секції Сухачівського

Таблиця 2 – Результати вимірювань густини потоку та ЕРОА радону-222 в межах СЗЗ хвостосховища (небезпечні ділянки)

Номер точки вимірювання	Точки вимірювання	ЕРОА радону-222 в повітрі, Бк/м ³	Густина потоку радону-222 з поверхні, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	Координати точки вимірювання		
				N48 ⁰	E034 ⁰	H, см
3	S47		373±14	25,448	43,057	132
9	S82A	5,23	162±8	25,307	43,171	122
10	S85	4,83	257±9	25,363	43,137	117
11	S99	4,8	181±7	25,433	43,073	128
16	S170	13,28	317±12	25,239	43,338	120

Протирадонові заходи у досліджених сховищах РАВ

Для зменшення рівня радононебезпеки сховища ТРВ Харківського ДМСК і відповідно зниження дозового навантаження на персонал категорії А було розраховано необхідну кратність повітрообміну приміщення будівлі сховища ТРВ, що досягається за допомогою використання примусової системи вентиляції [13].

Кратність повітрообміну в приміщенні сховища n розраховується за формулою:

$$n = \frac{A_0 \cdot v \cdot S - C_b \cdot \lambda \cdot V}{C_b \cdot V} = 0,5 \text{ разів/год,}$$

де C_b – активність радону в приміщенні сховища ТРВ, 250 Бк·м⁻³;

λ – стала розпаду радону (0,00756 1/год);

n – кратність повітрообміну в приміщенні, год⁻¹;

V – внутрішній обсяг досліджуваного приміщення, 718 м³;

v – швидкість перенесення радону з чарунки в приміщення сховища, 3,6 м/год;

S – площа чарунки, 36м²;

A_0 – об'ємна активність радону-222, яка виділяється при висоті чарунки

$h = 0$ м, 735 Бк/м³.

Проведені оцінки показують, що для досягнення в приміщенні сховища ТРВ ХДМСК об'ємної активності радону 250 Бк/м³, за швидкості надходження радону-222 в приміщення сховища 3,6 м/год, необхідно за допомогою примусової вентиляції кожні дві години забезпечувати одноразовий обмін повітря.

Таку систему протирадонового захисту можна застосувати і на інших спецкомбінатах об'єднання УкрДО «Радон» [13].

Для II секції Сухачівського хвостосховища були використані критерії оцінки радононебезпеки територій, призначених під забудову. Можливість такого підходу пов'язана з реконструкцією та перефільюванням хвостосховища, що складаються з передбачуваного будівництва промислових споруд, та подальшим раціональним використанням вільного об'єму чаші хвостосховища, що негативно впливає на екологічну безпеку територій, прилеглих до хвостосховища та населення.

Зменшити потік радону-222 з поверхні відходів уранової сировини можна, використовуючи ізоляційні покриття. В роботі була розв'язана задача екранування радононебезпечних ділянок II секції Сухачівського хвостосховища ізоляційними покриттями (протирадоновими покриттями) з щільних глин, мулистих пісків та суглинків.

Товщина захисного шару h_e , що забезпечує повне екранування радону-222 з поверхні хвостосховища, розраховується за формулою:

$$h_e = \ln \left[\frac{q_0}{q} + \sqrt{\left(\frac{q_0}{q} \right)^2 - 1} \right] / \sqrt{\frac{\lambda}{D_e}}$$

Розраховані товщини захисного протирадонового шару для конкретних ізоляційних матеріалів отримані з використанням відповідних коефіцієнтів дифузії D_e радону-222 в матеріалах покриттів. Результати розрахунків мінімальних товщин протирадонових покриттів з щільних глин, мулистих пісків та суглинків для радононебезпечних ділянок II секції Сухачівського хвостосховища наведено в таблиці 3.

Також в роботі розраховано тришарове протирадонове покриття для радононебезпечних ділянок II секції Сухачівського хвостосховища, виконане з щільних глин, мулистих пісків та суглинків, товщиною 0,4м (x_{c1}), 0,4м (x_{c2}), 0,6м (x_{c3}) відповідно (рис. 4).



Рис. 4 Структура тришарового протирадонового покриття радононебезпечних ділянок II секції Сухачівського хвостосховища

Густина потоку радону на поверхні тришарового протирадонового покриття q_{ci} розраховується згідно з формулою [6]:

$$q_{ci} = q_0 \cdot \exp\left(-\sum_{j=1}^{j=i} \sqrt{\lambda / D_{ci}} \cdot x_{ci}\right),$$

де q_0 – густина потоку радону без протирадонового покриття, $0,373 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{с}$;

λ – стала розпаду радону-222, $2,06 \cdot 10^{-6} \text{ 1/с}$;
 D_{ci} – сумарний коефіцієнт дифузії радону-222 в тришаровому протирадоновому покритті з щільних глин, мулистих пісків та суглинків (табл. 3);

x_{ci} – сумарна товщина в тришаровому протирадоновому покритті зі щільних глин, мулистих пісків та суглинків, $1,4 \text{ м}$.

Отримане значення густина потоку радону: $q_{ci} = 0,05 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{с}$.

Таблиця 3 – Мінімальні товщини протирадонових покриттів для радонебезпечних ділянок II секції Сухачівського хвостосховища

Матеріал покриття	Коефіцієнт дифузії радону в матеріалі покриття, D , $\text{м}^2/\text{с}$	Розрахована товщина покриття, h_e , м	Густина потоку радону без покриття, q_0 , $\text{Бк/м}^2 \cdot \text{с}$	Густина потоку радону з покриттям, q , $\text{Бк/м}^2 \cdot \text{с}$	Показник зменшення потоку радону, разів
Щільні глини	$2,5 \cdot 10^{-6}$	3,6	0,373	0,028	13,3
Мулисті піски	$4 \cdot 10^{-7}$	1,5	0,373	0,024	15,5
Суглинки	$1,5 \cdot 10^{-6}$	2,7	0,373	0,031	12,0

Таким чином, використовуючи тришарове покриття з щільних глин, мулистих пісків та суглинків для радонебезпечних ділянок II секції Сухачівського хвостосховища, можна також значно знизити значення густини потоку радону-222 з поверхні хвостосховища [13].

Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку.

Методичні підходи достовірної оцінки радонебезпеки сховищ РАВ відкритого і закритого типу пов'язані з калібруванням вимірювальних приладів за допомогою еталонного джерела радону-222, створеного на основі стандартного зразка уранової руди УР-768С, яка видобувається в Україні.

Для сховищ закритого типу критерієм радонебезпеки є величина об'ємної активності радону-222 в повітрі сховища РАВ, а для сховищ РАВ відкритого типу об'єктивним критерієм радонебезпеки є величина густини потоку радону з його поверхні.

Аналіз значень об'ємної активності радону-222 в повітрі сховища твердих РАВ Харківського ДМСК показав його радонебезпеку для персоналу. Результати вимірювань густини потоку радону-222 з поверхні території СЗЗ (радіус 1 км) II секції Сухачівського хвостосховища показали значну радонебезпеку його окремих ділянок.

Зниження радонебезпеки закритого сховища РАВ для персоналу досягається за допомогою примусової вентиляції приміщення будівлі сховища з певною кратністю обміну повітря. Таку систему протирадонового захисту можна застосувати і на інших спецкомбінатах об'єднання УкрДО «Радон».

Для зниження радонебезпеки II секції Сухачівського хвостосховища знайдено необхідну товщину варіантів протирадонових захисних покриттів: для тришарового покриття зі щільних глин, мулистих пісків та суглинків і для

одношарових покриттів зі щільних глин або з мулистих пісків, або з суглинків.

Список літератури

1. UNSCEAR 2006 Report: Annex E. Source-to-effects assessment for radon in homes and workplaces / United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. – New York: United Nations, 2009. – 138 p.
2. Molchanov O., Y. Soroka, M. Buzinny Dispersion of Radon in the atmosphere around old Uranium mill tailing. *Radon in environment 2009: book abstr. Intern. conf. (Zakopane, May 10–14, 2009)*. The Henryk Niewodniczanski institute of nuclear physics. 2009. – P. 22.
3. Солодовникова Л.Н., Тарасов В.А., Шабатин В.Н. Снижение радоноопасности хранилищ радиоактивных отходов. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. Сер. Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, 2018. № 40 (1316). С. 60 – 66
4. Обращение с отработанными источниками ионизирующего излучения в Украине / Кретинин А.А. и др. Киев: Издво «Куприянова», 2006. 320 с.
5. Солодовникова Л.Н., Тарасов В.А. Эколого-химические проблемы и радоноопасность отходов при переработке уранового сырья в Украине. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2/11 (62). 2013. – с. 24–27.
6. Measurement and calculation of radon releases from uranium mill tailings. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992. No. 333.
7. Measurement and calculation of radon releases from NORM residues. – Vienna: international atomic energy agency, 2013. No. 474.
8. U.S. Nuclear regulatory commission regulatory guide 3.64 (Task WM 503-4) Calculation of radon flux attenuation by earthen uranium mill tailings covers. 1989. – 45 p.
9. Санитарные правила ликвидации, консервации и перепрофилирования предприятий по добыче и переработке радиоактивных руд (СП ЛКП-91), 1991. – 27 с.
10. Солодовникова Л.М., Тарасов В.О., Сизова Н.Д. Стандартне джерело радіоактивного радону-222 для системи високоточного моніторингу

- радононебезпечних об'єктів в Україні. *Functional Materials*. 2018. Vol. 25. No. 1, с. 193–199.
11. Кравченко Н.И., Солодовникова Л.Н., Шаров В.Е. Высокоточный мониторинг радона и его дочерних продуктов распада в ГМСК УкрГО «Радон». Метрологія та вимірювальна техніка: Наук. пр. V міжнар. наук.-техн. конф. (10-12 жовтня 2006р. Харків) Т. 2., Надруковано в ХФ ДП «УкрНДНЦ», Харків, 2006, с. 341–343.
 12. Солодовникова Л.Н., Тарасов В.А. Особенности оценки радоноопасности Сухачёвского хвостохранилища радиоактивных отходов. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХП"». Сер. Інноваційні дослідження у науко-вих роботах студентів*. 2017. № 41 (1263), с. 81–86.
 13. Солодовникова Л.М. Протирадонні заходи в сховищах РАВ. Проблеми сучасної ядерної енергетики: тези доп. XV міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та фахівців (Харків, 13–15 лист. 2019 р.). Х.: Фінарт, 2019. С. 53–54.
 5. Solodovnikova L.N., Tarasov V.A. *Jekologo-himicheskie problemy i radonoopasnost' othodov pri pe-rerabotke uranovogo syr'ja v Ukraine. Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij*. 2/11 (62). 2013, – pp.24-27.
 6. Measurement and calculation of radon releases from uranium mill tailings. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992. No. 333.
 7. Measurement and calculation of radon releases from NORM residues. — Vienna: international atomic energy agency, 2013. No. 474.
 8. U.S. Nuclear regulatory commission regulatory guide 3.64 (Task WM 503-4) Calculation of radon flux attenuation by earthen uranium mill tailings covers. 1989. – 45 p.
 9. Sanitarnye pravila likvidacii, konservacii i pereprofilirovaniya predpriyatij po dobyche i pere-rabotke radioaktivnyh rud (SP LKP-91), 1991. – 27 p.
 10. Solodovnikova L.M., Tarasov V.O., Sizova N.D. Standartne dzherelo radioaktivnogo radonu-222 dlja sistemi visokotochnogo monitoringu radononebezpečnih ob'ektiv v Ukraїni. *Functional Materials*. 2018. Vol. 25. No. 1, pp. 193–199.

Bibliography (transliterated)

1. UNSCEAR 2006 Report: Annex E. Source-to-effects assessment for radon in homes and workplaces / United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. – New York: United Nations, 2009. – 138 p.
2. Molchanov O., Y. Soroka, M. Buzinny Dispersion of Radon in the atmosphere around old Uranium mill talling. *Radon in environment 2009: book abstr. Intern. conf. (Zakopane, May 10–14, 2009)*. The Henryk Niewodniczanski institute of nuclear physics. 2009, p. 22.
3. Solodovnikova L.N., Tarasov V.A., Shabatin V.N. Snizhenie radonoopasnosti hranilishh radioaktivnyh othodov. *Вісник NTU «KhPI»». Ser. Innovacijni doslidzhennja u naukovih robotah studentiv*, 2018. № 40 (1316), pp. 60 – 66
4. Obrashhenie s otrabotannymi istochnikami ionizirujushhego izluchenija v Ukraine / Kretinin A.A. i dr. Kiev: Izdvo «Kuprijanova», 2006. – 320 p.
11. Kravchenko N.I., Solodovnikova L.N., Sharov V.E. Vysokotochnyj monitoring radona i ego dochernih produktov raspada v GMSK UkrGO «Radon». *Metrologija ta vimirjuval'na tehnika: Nauk. pr. V mizhnar. nauk.-tehn. конф. (10-12 zhovtnja 2006r. Kharkiv) T. 2., Nadrukovano v HF DP «UkrNDNC»*, Kharkiv, 2006, pp. 341–343.
12. Solodovnikova L.N., Tarasov V.A. Osobennosti ocenki radonoopasnosti Suhachjovskogo hvostohrani-lishha radioaktivnyh othodov. *Вісник NTU KhPI»». Ser. Innovacijni doslidzhennja u naukovih robotah studentiv*. 2017. No. 41 (1263), pp. 81–86.
13. Solodovnikova L.M. Protiradonovi zahodi v shovishhah RAV. *Problemi suchasnoї jadernoj energetiki: tezi dop. XV mizhnar. nauk.-tehn. конф. molodih vchenih ta fahivciv (Harkiv, 13–15 list. 2019 r.)*. Kharkiv : Finart, 2019, pp. 53–54.

Надійшла (received) 19.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Солодовникова Лідія Миколаївна (Солодовникова Лидия Николаевна, Solodovnikova Lidiya Nikolayevna) – завідувач відділу екології ДНУ «НТК «Інститут монокристалів» НАН України, м. Харків, Україна.

E-mail: lidy@ukr.net

Тарасов Володимир Олексійович (Тарасов Владимир Алексеевич, Tarasov Vladimir Alekseevich) – д.ф-м .наук, завідувач відділу сцинтиляційної радіометрії Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України, м. Харків, Україна.

E-mail: tarasov@isk.kharkov.com

Зубер Валерій Михайлович (Зубер Валерий Михайлович, Zuber Valeriy Mihaylovich) – заступник завідувача відділу сцинтиляційної радіометрії Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України, м. Харків, Україна.

E-mail: zuber@isma.kharkov.ua

Сорока Юрій Миколайович (Сорока Юрий Николаевич, Soroka Yuriy Nikolayevich) – к.т.н. доцент кафедри екології та охорони навколишнього природного середовища Дніпровського державного технічного університету. м. Кам'янське, Україна.

E-mail: yuriy_sor@ukr.net

Сізова Наталія Дмитрівна (Сизова Наталья Дмитриевна, Sizova Natalia Dmitriyevna) – д.ф-м .наук, професор кафедра економічної кібернетики та інформаційних технологій Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна.

E-mail: sizova@ukr.net

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0103-1939>