

В.А. Краснов, Н.В. Рашкевич

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ОЦІНКА РАДІАЦІЙНОГО ВПЛИВУ ПІД ЧАС АВАРІЇ НА СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

Досліджено напрями удосконалення системи управління екологічною безпекою сховищ відпрацьованого ядерного палива під час аварії. Запропоновано підхід для проведення оцінки радіаційного впливу на довкілля та населення, що забезпечує прогнозування доз опромінення, розрахунок радіаційного ризику й підтримку рішень для мінімізації наслідків небезпеки.

Ключові слова: радіаційна безпека, сховище відпрацьованого ядерного палива, аварійний викид, моделювання поширення радіонуклідів, оцінка радіаційного ризику.

Постановка проблеми

В умовах воєнних дій зростає ризик пошкодження ядерної інфраструктури. Порушення цілісності конструкцій, відмова систем охолодження або втручання зовнішніх факторів можуть призвести до викиду радіонуклідів в атмосферу, ґрунт та водне середовище. Такі події створюють загрозу радіаційного впливу на природні екосистеми та здоров'я населення. Таким чином, актуальною є науково-практична задача удосконалення системи управління екологічної безпеки сховищ відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) як об'єкта підвищеного екологічного ризику, що потребує постійного контролю стану інженерних бар'єрів, оперативної оцінки рівнів радіаційного забруднення та прогнозування можливих сценаріїв поширення радіонуклідів у компонентах довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Першочерговим завданням моніторингу у сфері поводження з ВЯП є виявлення та оцінка радіаційних викидів у навколишнє середовище, що дозволяє вчасно ідентифікувати джерела забруднення та оцінити їхній вплив на атмосферу, ґрунт та водні об'єкти [1]. Для цього застосовуються як стаціонарні, так й мобільні системи контролю з безперервною передачею даних у центри спостереження [2].

Серед завдань – контроль дотримання норм радіаційної безпеки населення та персоналу, зокрема відповідно до вимог МАГАТЕ та міжнародних стандартів захисту людини та довкілля [3].

Раннє попередження про можливі аварійні ситуації дозволяє оперативно активувати аварійні протоколи та мінімізувати наслідки потенційних викидів чи пошкоджень сховищ [4].

Окрім оперативного контролю, моніторинг виконує роль накопичення довгострокових даних для аналізу змін стану довкілля в зоні впливу ядерних об'єктів [5]. Ці дані є основою для прогнозування тенденцій забруднення, удосконалення моделей розповсюдження радіонуклідів та планування природоохоронних заходів.

Моніторинг радіаційного забруднення традиційно базується на гамма-спектрометрії високого дозволу, альфа/бета-лічильниках та радіохімічних методах відокремлення та підрахунку ізотопів. HPGe-спектрометри є «золотим стандартом» для кількісного визначення нуклідів у ґрунті, осадах та пробах води завдяки високій енергетичній роздільній здатності [6].

Класичні методи пробовідбору (ґрунт, донні відкладення, поверхневі та підземні води, рослинність, харчові продукти) залишаються фундаментальними – вони дозволяють проводити повноцінні радіохімічні та ізотопні аналізи, оцінювати поступове накопичення, побудувати радіонуклідне навантаження [7].

Перспективний напрям – дистанційне картографування за допомогою БПЛА та автономних наземних платформ. БПЛА, оснащені компактними γ -детекторами, забезпечують швидке покриття складної місцевості та високу просторову роздільну здатність карт [8]. Однак, точність даних залежить від висоти польоту, калібрування сенсорів та геоприв'язки, тому результати часто інтегруються з наземними вимірами для валідації.

Математичне моделювання розповсюдження радіонуклідів відображає процеси – адвекція, турбулентне розсіювання, сухе та вологе осадження, радіоактивний розпад, хімічні перетворення і взаємодія з поверхнями [9].

Метеорологічні параметри – напрямок та швидкість вітру, температура, вологість, атмосферний тиск – впливають на моделювання розповсюдження радіонуклідів. За результатами робіт [10, 11] навіть незначні зміни атмосферної стабільності здатні істотно вплинути на траєкторії перенесення радіоактивних частинок.

У роботі [12] представлено розробку мобільного лабораторного комплексу радіаційного контролю, який забезпечує оперативне визначення рівнів забруднення довкілля безпосередньо на місці події, що є елементом системи реагування під час аварійних ситуацій.

У дослідженні [13] проведено оцінку радіаційної ситуації у Чорнобильській зоні відчуження після лісової пожежі, де показано механізми повторного перерозподілення радіонуклідів у приземному шарі атмосфери та ґрунті. Подальший розвиток підходів до екологічного моніторингу відображено у роботі [14], де обґрунтовано концептуальні засади створення системи моніторингу зон радіаційних аварій, здатної забезпечувати інтеграцію даних, оцінку ризику та підтримку управлінських рішень.

Для інтеграції польових/лабораторних даних, результатів моделювання та соціально-просторових індикаторів у єдине картографічне середовища використовують геоінформаційні системи (ГІС) [15, 16].

Автори [15] показали, що космічні знімки високої роздільної здатності дають змогу оперативно картувати зони руйнувань, затоплень і радіоактивного забруднення, підтримуючи ухвалення рішень у перші дні після аварії.

У статті [16] розроблено методику картування екологічного ризику потенційного забруднення від покинутих уранових шахт з використанням ГІС та багатокритеріального просторового аналізу (MCDA). Дослідження поєднує природні, техногенні та соціальні фактори для визначення зон високого ризику, демонструючи ефективність інтеграції геопросторових даних, експертних оцінок та моделей прийняття рішень для пріоритизації заходів захисту.

Таким чином, системи моніторингу навколо ядерних об'єктів представляють собою стаціонарні пости, пересувні комплекси та автоматизовані дистанційні системи, що забезпечують контроль гамма-випромінювання, концентрації радіонуклідів, метеорологічних параметрів та стану водойм та ґрунтових вод. В умовах воєнних дій, підвищується необхідність розширення екологічного спостереження та інтеграції його в загальну архітектуру ядерної безпеки для своєчасного реагування на потенційні загрози та мінімізації ризиків для населення та довкілля.

Мета та завдання статті

Метою дослідження є удосконалення системи управління екологічною безпекою сховищ відпрацьованого ядерного палива під час аварійних ситуацій, що враховує вплив зовнішніх загроз, сучасні підходи до оцінювання ризиків та інструменти моделювання.

Об'єктом дослідження є процеси формування та поширення радіаційного впливу в навколишньому середовищі під час аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива.

Предметом дослідження є методи та інструменти оцінювання рівнів радіаційного забруднення та моделювання розповсюдження радіонуклідів у компонентах довкілля для забезпечення екологічної безпеки сховищ відпрацьованого ядерного палива під час аварій.

Для досягнення поставленої мети необхідно: розглянути основні процедури оцінки радіаційного впливу на довкілля та населення; виділити основні характеристики забруднення повітря та ґрунту; виділити основні обмеження математичного апарату оцінки радіаційного впливу на довкілля та населення.

Виклад основного матеріалу

Оцінку радіаційного забруднення доцільно розпочинати зі збору вихідних даних, таких як кількість та тип радіонуклідів, що потрапляють у навколишнє середовище, а також параметри джерела викиду, такі як висота, швидкість та напрямок викиду. Слід зібрати метеорологічні дані, зокрема швидкість вітру, температуру, вологість та стабільність атмосфери, а також враховувати тип місцевості, що визначає, як саме забруднення поширюватиметься на даній території.

Після збору даних – моделювання поширення забруднень у атмосфері. Для цього використовуються моделі дифузії, які дозволяють розрахувати концентрацію радіонуклідів у повітрі на різних відстанях від джерела викиду, а також оцінити часову залежність цієї концентрації в залежності від погодних умов та турбулентності атмосфери.

Надалі розраховується осідання часток – процес, під час якого частки радіоактивних матеріалів осідають на поверхню.

Наступним етапом є оцінка дози опромінення, що враховує зовнішнє та внутрішнє опромінення для персоналу та населення. Для цього розраховується зовнішня доза опромінення, яка залежить від концентрації радіонуклідів у повітрі та часу перебування в забрудненій зоні, а також внутрішнє опромінення через вдихання або споживання забруднених часток через їжу та воду.

На основі цих даних проводиться оцінка радіаційного ризику, де використовуються коефіцієнти ризику для обчислення ймовірності серйозних наслідків, таких як соматичні або генетичні захворювання для здоров'я людей.

Аварійний викид радіонуклідів може бути як висотним, так й приземистим. Висотний викид впливає на подальше розповсюдження радіоактивних часток, адже вони можуть підніматися на великі висоти, розповсюджуватися в різних шарах атмосфери, залежно від швидкості вітру та атмосферних умов. Це впливає на концентрацію радіонуклідів у повітрі.

Під впливом вітру та турбулентності радіонукліди можуть переміщуватися на великі відстані, що створює забруднення ґрунту через осідання часток. Це осідання може бути сухим або відбуватися через вимивання опадами. У випадку сухого осідання частки осідають на поверхню без участі дощу, що змінює концентрацію радіонуклідів на землі. Але опади можуть значно прискорити цей процес, адже вимивання опадами переносить частки радіонуклідів на поверхню, збільшуючи рівень забруднення ґрунту.

Одночасно з цим вплив на концентрацію забруднень у повітрі може здійснювати аеродинамічна тінь. Це явище виникає, коли в атмосфері є перешкоди, які змінюють потоки

повітря та створюють зони, де концентрація радіонуклідів зменшується. Коли аеродинамічна тінь є об'ємним джерелом, концентрація забруднень може знижуватись не лише на земній поверхні, але й на різних висотах атмосфери, що дає можливість точніше оцінити вплив забруднення на навколишнє середовище та здоров'я людей.

Згідно з рекомендаціями Міжнародного агентства з атомної енергії, для оцінки та прогнозування поширення радіоактивних речовин у повітрі після аварій чи при нормальній експлуатації ядерних об'єктів широко застосовується Гауссова модель дифузії. Ця модель базується на припущенні, що концентрація домішок у повітрі має нормальний (гаусів) розподіл у горизонтальному та вертикальному напрямках відносно осі шлейфу.

Об'ємна активність радіонуклідів у повітрі для миттєвого викиду є функція часу, що описується формулою (1):

$$C(t) = Q_0 \cdot G_0(t), \quad (1)$$

де Q_0 – інтегральна величина миттєвого викиду, Бк; $G_0(t)$ – фактор, що залежить від часу, метрологічного розбавлення для миттєвого викинутого об'єму домішки, м^{-3} . Фактор розбавлення G_0 хмари викиду задається формулою:

$$G_0(x, y, z, t) = \frac{F(x)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(t) \sigma_y(t) \sigma_z(t)} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-V \cdot t)^2}{\sigma_x^2(t)} + \frac{y^2}{\sigma_y^2(t)} \right) \right] \times \left\{ \exp \left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right) + \exp \left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right) \right\}, \quad (2)$$

де x, y, z – координати точки у просторі (вісь x – уздовж шлейфу в напрямку вітру); V – швидкість вітру, м/с ; t – час, який минув після викиду, с ; H – висота хмари викиду над землею на відстані x , м ; $F(x)$ – функція виснаження хмари; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – стандартні відхилення розподілу домішки в хмарі димового викиду у напрямку відповідних координатних осей, м . Ці коефіцієнти характеризуються монотонно зростаючими функціями часу, їхній вигляд і розмір залежать від погодних умов та визначаються за наступними формулами:

$$\sigma_i^2 = S^2 + 0,02(1 + 0,03k_f)HVt + ss_i^2(Vt)^2, \quad (3)$$

де k_f – коефіцієнт фонові турбулентності; ss_i – кутові дисперсії напрямку вітру, що залежать від стану стійкості атмосфери.

Варто підкреслити, що у заданих формулах для дисперсії перша складова S^2 характеризує дисперсію домішки в початковий момент часу, друга – відповідає за механізм розсіювання домішки дрібномасштабною турбулентністю, тобто відхилення, викликані фонові турбулентністю в атмосфері, а третя – враховує внесок великомасштабних вихорів, які виникають у повітрі та розсіюють домішку на великих відстанях.

Для чинника розведення G_0 хмари викиду на рівні землі, вважаючи $z = 0$, отримуємо формулу (4). Якщо $z = H$, отримуємо формулу (5):

$$G_0(x, y, t) = \frac{2F(x)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(t) \sigma_y(t) \sigma_z(t)} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-V \cdot t)^2}{\sigma_x^2(t)} + \frac{y^2}{\sigma_y^2(t)} + \frac{H^2}{\sigma_z^2(t)} \right) \right], \quad (4)$$

$$G_0(x, y, t) = \frac{F(x)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(t) \sigma_y(t) \sigma_z(t)} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-V \cdot t)^2}{\sigma_x^2(t)} + \frac{y^2}{\sigma_y^2(t)} \right) \right] \times \left(1 + \exp \left(-\frac{2H^2}{\sigma_z^2(t)} \right) \right), \quad (5)$$

Інтенсивність осідання домішки на поверхні C_s [$\text{Бк/с} \cdot \text{м}^2$] внаслідок сухого осідання дорівнює:

$$C_s(x, y, t) = V_g \cdot C(x, y, t), \quad (7)$$

де C є приземною об'ємною активністю в точці x , Бк/с·м³; V_g – швидкість сухого осідання, м/с.

Для опису дисперсійного складу найбільш виправдано логарифмічно-нормальний розподіл для функції щільності розподілу $F(X)$ числа частинок за розмірами діаметрів, X :

$$F(X) = \frac{1}{X \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp(-(\ln X - \mu)^2 / 2\sigma^2), \quad (8)$$

де μ – медіана; σ – стандартне відхилення величини $\ln X$.

Перевага, що надається логарифмічно-нормальним розподілом, пов'язаним зі зручністю вирішення практичних завдань, а також з тим фактом, що він пов'язаний з фізичною суттю утворення аерозольних систем в результаті специфічних процесів диспергування.

Значення μ та σ можуть бути отримані з результатів статистичної обробки вибору вимірювання розмірів частинок за такими формулами:

$$\begin{aligned} \mu &= (\ln(X_{10}) + \ln(X_{90}))/2, \\ \mu &= (\ln(X_{90}) - \mu)/1,28, \end{aligned} \quad (9)$$

де X_{10} (10-й квантиль) – це значення параметра, нижче якого знаходиться 10 % усіх спостережень (або ймовірності); X_{90} (90-й квантиль) – це значення, нижче якого знаходиться 90 % усіх спостережень.

Параметри логарифмічно-нормального розподілу X_G та σ_G можуть бути використані для характеристики середньої поверхні та середнього об'єму частинок з тим же стандартним відхиленням осі на підставі співвідношення

$$\ln X_{Gv} = \ln X_G + v \cdot \ln^2 \sigma_G, \quad (10)$$

Не тільки розподіл часток за розмірами, але і пов'язані з ними фізичні характеристики підкоряються логнормальному закону. Так, при $v = 2$ активність накопичується на поверхневих частинах, а при $v = 2$ активність міститься в обсязі частки.

Для реалізації дискретної моделі аварійного джерела у вигляді сукупності радіоактивних частинок, статистичні розміри яких розподілені за логнормальною законом (рис. 1, де на осі абсцис позначено діаметр частинок в умовних одиницях, на осі ординат – ймовірність появи частинок відповідного розміру), використовуються процедури Монте-Карло.

Логнормальний розподіл характеризується тим, що логарифм діаметра частинок має нормальний розподіл, унаслідок чого крива є асиметричною та має подовжений «хвіст» у бік більших частинок. Максимальне значення кривої відповідає найбільш

імовірному діаметру частинок. Менші частинки зустрічаються частіше, але зі збільшенням розміру їхня кількість зменшується, хоча поодинокі частинки значного розміру залишаються можливими. Такий тип розподілу добре описує реальні дисперсні системи, оскільки процеси утворення, подрібнення та агрегації часток мають мультиплікативну природу.

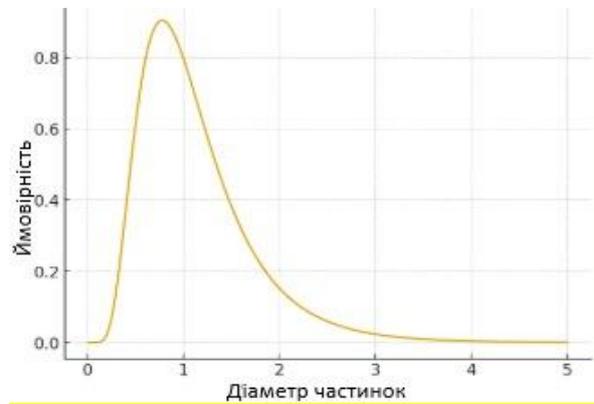


Рис. 1. Логнормальний розподіл частинок.

Припускаємо, що X_i – випадковий розмір частинок з інтервалу $[X_{min}, X_{max}]$. Виходячи з застосування про вид функцій розподілу, за допомогою методу Монте-Карло побудуємо вибір розміру n :

$$X_{min} \leq X_1, X_2, X_3, \dots, X_n \leq X_{max}. \quad (11)$$

З вибору (11) можна знайти всі характеристики, включаючи середнє значення, моду, медіану, стандартне відхилення на інтервалі $[X_{min}, X_{max}]$. Побудувавши на підставці (11) інтегральну функцію розподілу, можемо знайти чисельні оцінки для квантилів розподілу будь-якого порядку.

При наявності в викиді декількох типів аерозолів дискретна ймовірнісна модель аварійного джерела представляється сумою за всіма n -частинками кожної з фракцій Q^k :

$$Q = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n Q_j^i. \quad (12)$$

де k – кількість фракцій аерозолів; Q_j^i – кількість радіонуклідів для i -ї частинки в j -ї фракції; n – кількість частинок у кожній фракції.

Розміри частинок, щільність аерозолу та концентрація частинок впливають на поведінку радіоактивних матеріалів у процесі перенесення та осадження при атмосферній дифузії.

Густину поверхневого забруднення зберігаємо інтегруванням за часом загальної інтенсивності осадження домішки на поверхні землі:

$$S(x, y) = \int_0^\infty C_s'(x, y, t) dt. \quad (13)$$

Обчислення $S(x, y)$ можна організувати більш раціонально, якщо визначити верхню та нижню межі інтегрування по t , враховуючи, що хмара впливає на точку (x, y) лише в період, коли вона проходить поблизу від цієї точки:

$$S(x, y) = \int_{g_1(x)}^{g_2(x)} C_s^i(x, y, t) dt. \quad (14)$$

Межі інтегрування визначаються через функції $g_1(x)$ та $g_2(x)$, які описують момент часу, коли хмара знаходиться в певному відрізку шляху від джерела до точки спостереження.

$$g_1(x) = \frac{1}{v} \cdot (x - 3\sigma(x)), \quad (15)$$

$$g_2(x) = \frac{1}{v} \cdot (x + 3\sigma_x(x) + 3\sigma_x(x)). \quad (16)$$

Застосування Гауссової моделі розповсюдження радіонуклідів у повітрі має низку обмежень.

Модель базується на гіпотезі просторової та часової однорідності метеорологічних параметрів – швидкості та напрямку вітру, температурного градієнта й турбулентності. У реальних умовах ці характеристики змінюються, що призводить до відхилень у прогнозах концентрацій радіонуклідів. Крім того, модель передбачає рівнинний рельєф місцевості, не враховуючи топографічні особливості, забудову, лісові масиви чи інші перешкоди.

Модель не враховує вплив вертикальних конвективних потоків, характерних для нестійкої атмосфери. Окрім цього, модель передбачає лінійність процесів перенесення.

Врахування процесів осідання, вимивання та радіоактивного розпаду здійснюється у спрощеній формі через узагальнені коефіцієнти, що не відображають їхньої залежності від висоти, типу опадів або дисперсного складу частинок.

Сучасні дослідження показують, що для підвищення точності моделювання розповсюдження радіонуклідів доцільно застосовувати Лагранжеві моделі та методи комп'ютерної гідродинаміки (CFD). Лагранжеві моделі типу ARTM (Atmospheric Radionuclide Transport Model), докладно описані у роботі [17], забезпечують врахування просторово-часової мінливості метеорологічних умов, дозволяють моделювати перенесення окремих частинок та враховують складні механізми депозиції. CFD-моделі, описані у роботах [18], а також у дослідженнях [19], дають змогу детально враховувати вплив рельєфу та забудови, моделювати циркуляцію повітря у вузьких вулицях, дворах-колодязях, промислових зонах та навколо інженерних споруд сховищ радіоактивних матеріалів. Вони дозволяють аналізувати складні нелінійні ефекти атмосферної динаміки та

формуванню високоточні карти поширення забруднення навіть за нестійких метеорологічних умов.

Імовірність серйозного порушення здоров'я населення від дії радіації можна представити за формулою (17):

$$P(E, t) = \gamma[H(E, t)_{ext} + H(E, t)_{int}], \quad (17)$$

де γ – коефіцієнт ризику, який характеризує ймовірність виникнення соматичних та генетичних наслідків опромінювання на одиницю дози; $H(E, t)_{ext}$ – доза зовнішнього опромінювання, обумовлена впливом випромінювання радіонуклідів з хмари диму та шлейфу випадіння радіоактивних частинок на поверхню; $H(E, t)_{int}$ – доза внутрішнього опромінення, обумовлена вдиханням радіоактивних частинок з повітрям, яке надходить через шлунково-кишковий тракт та відкриті рани.

Сумарний радіаційний ризик для персоналу, від внутрішнього та зовнішнього опромінення, можна визначити за формулою [18]:

$$R = R_{ext} + R_{int} = \int_0^t \alpha_{ext} H_{ext}(E, t)_i dt + \int_0^t \alpha_{int} H_{int}(E, t)_i dt, \quad (18)$$

де R_{ext} , R_{int} – радіаційний ризик від зовнішнього та внутрішнього опромінення; α_{ext} , α_{int} – коефіцієнти ризику для зовнішнього та внутрішнього опромінення відповідно; $H_{ext}(E, t)_i$, $H_{int}(E, t)_i$ – еквівалентна доза зовнішнього та внутрішнього опромінення персоналу i -го радіонукліду.

На рис. 2 наведена блок-схема послідовності оцінки радіаційного впливу.

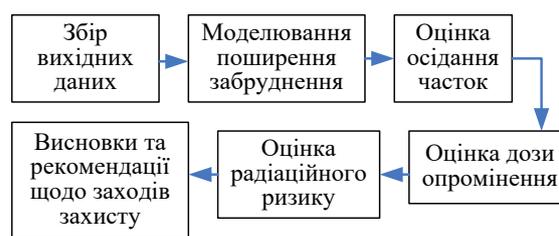


Рис. 2. Блок-схема послідовності оцінки радіаційного впливу.

Межа радіаційного ризику для населення може перевищувати гранично допустимий рівень, у такому випадку необхідно застосовувати спеціальні заходи захисту. До них належать евакуація населення, обмеження доступу до забруднених територій, контроль та карантин продуктів харчування й води, а також проведення ремедіаційних робіт. Одночасно здійснюється постійний моніторинг рівня радіації та стану

здоров'я людей у зоні впливу для своєчасного коригування заходів захисту.

Висновки

1. Установлено, що оцінка радіаційного впливу на довкілля та населення включає поетапний збір вихідних даних про параметри джерела викиду (висоту, швидкість, напрямок), кількісний і якісний склад радіонуклідів, метеорологічні характеристики (швидкість і напрямок вітру, температуру, вологість, стабільність атмосфери) та тип місцевості. На основі цих даних здійснюється моделювання процесів дифузії, осідання й міграції радіоактивних часток у повітрі, ґрунті та водному середовищі, з урахуванням впливу аеродинамічної тіні, опадів та турбулентності атмосфери.

2. До основних характеристик забруднення належать: об'ємна активність радіонуклідів у повітрі, щільність їх осідання на поверхню ґрунту, швидкість вітру, коефіцієнти турбулентного розсіювання, сорбційна здатність ґрунтів та ефективність радіоактивного розпаду.

3. Гауссова модель поширення радіонуклідів має кілька обмежень. Вона передбачає однорідну атмосферу, сталий напрям і швидкість вітру, рівнинний рельєф без перешкод, не враховує вертикальні потоки та конвекцію. Точність моделі знижується поблизу джерела викиду та при зміні погодних умов. Також вона не враховує взаємодію домішок, радіоактивний розпад у просторі.

Література

1. IAEA. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. – Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14 (Rev. 1). – Vienna: IAEA, 2022. – https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1963_web.pdf
2. IAEA. Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring. – Safety Reports Series № 64. – Vienna: IAEA, 2010. – https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1427_web.pdf
3. IAEA Nuclear Energy Series. Environmental Protection in New Nuclear Power Programmes. No. NG-T-3.11 (Rev. 1). – Vienna: IAEA, 2022. – https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB2076_web.pdf
4. IAEA. Accident Monitoring Systems for Nuclear Power Plants. – Nuclear Energy Series. No. NP-T-3.16. – Vienna: IAEA, 2015. – https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1676_web.pdf
5. UK Government. Environmental Radiological Monitoring: Planning and Implementing Your Programme. – London, 2024. – URL: <https://www.gov.uk/guidance/environmental-radiological-monitoring-planning-and-implementing/context-and-scope>
6. Zhong, N. Analytical Methods for the Determination of 90 Sr and 239,240 Pu in Environmental Samples / N. Zhong, L. Li, X. Yang, Y. Zhao // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27(6). – 1912. – DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27061912>
7. Methods for radioactivity measurements in drinking water using gamma spectrometry / C. Cantaluppi, D. Zannoni, A. Cianchi, W. Giacetti, B. Lovisetto, E. Pagnin, T. Favero //

- Journal of Environmental Radioactivity*. – 2021. – Vol. 232. – 106566.
8. Automated UAV to survey and monitor ionising radiation levels in a closed environment / R. Anand, K. Harshith, A. Raghavan, R. Maddara, P. Anand // *Power Electronics and Drives*. – 2022. – Vol. 7(42). – P. 134–145.
9. Leelössy, A. A review of numerical models to predict the atmospheric dispersion of radionuclides / Á. Leelössy, I. Lagzi, A. Kovács, R. Mészáros // *Journal of environmental radioactivity*. – 2018. – Vol. 182. – P. 20–33.
10. Spatiotemporal variation of radionuclide dispersion from nuclear power plant accidents using FLEXPART mini-ensemble modeling / S. O. Nabavi, T. Christoudias, Y. Proestos, C. Fountoukis, H. Al-Sulaiti, J. Lelieveld // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2023. – Vol. 23(13). – P. 7719–7739.
11. Research on predicting the diffusion of radionuclide in complex building scenarios based on a hybrid deep learning model / Y. Li, T. Wang, J. Wang, W. Guo, W. Li, H. Qiu, Y. Lin, Y. Fang, M. Lv // *Nuclear Engineering and Design*. – 2025. – Vol. 441. – 114187. – <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114187>
12. Азаров, С.І., Мобільний лабораторний комплекс радіаційного контролю [Текст] / С.І. Азаров, Ю.В.Литвинов, О.Б., Сіднєв В.Л. Сидоренко // *Екологічні науки*. – 2013. – Вип. 4. – С. 36–44.
13. Сидоренко, В.Л. Оцінка радіаційної ситуації у Чорнобильській зоні відчуження після лісової пожежі [Текст] / В.Л.Сидоренко, С.І. Азаров, Ю.П. Серєда // *Вісник ЛДУ БЖД*. – 2016. – № 13. – С. 122–128.
14. Сидоренко, В.Л. Концептуальні засади розробки системи комплексного моніторингу зони радіаційної аварії [Текст] / В.Л. Сидоренко, С.І. Азаров // *Вісник Кременчуцького Національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2017. – Вип. 1(2017). – № 102. – С. 82–87.
15. Kaku, K. Space-based response to the 2011 Great East Japan Earthquake: Lessons learnt from JAXA's support using earth observation satellites // K. Kaku, N. Aso, F. Takiguchi / *International journal of disaster risk reduction*. – 2015. – Vol. 12. – P. 134–153. – <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.12.009>
16. Environmental risk mapping of potential abandoned uranium mine contamination on the Navajo Nation, USA, using a GIS-based multi-criteria decision analysis approach // Y. Lin, J. Hoover, D. Beene, E. Erdei, Z. Liu / *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27(24). – P. 30542–30557. – <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09257-3>
17. The Lagrangian Atmospheric Radionuclide Transport Model (ARTM)–sensitivity studies and evaluation using airborne measurements of power plant emissions / R. Hanfland, D. Brunner, C. Voigt, A. Fiehn, A. Roiger, M. Pattantyús-Ábrahám // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2024. – Vol. 24(4). – P. 2511–2534.
18. Gousseau, P. CFD simulation of pollutant dispersion around isolated buildings: On the role of convective and turbulent mass fluxes in the prediction accuracy / P. Gousseau, B. Blocken, G.J.F. Van Heijst // *Journal of Hazardous Materials*. – 2011. – Vol. 194. – P. 422–434.
19. Яремич, А.В. CFD моделювання поширення забруднюючих речовин атмосферного повітря в середовищі міської забудови [Текст] / А.В. Яремич, С.Д. Ісаєв // *Екологічна безпека та природокористування*. – 2016. – № (3-4). – С. 40–50.

References

1. IAEA. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. – Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14

- (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2022. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1963_web.pdf
2. IAEA. *Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring*. – Safety Reports Series № 64. – Vienna: IAEA, 2010. – https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1427_web.pdf
3. IAEA Nuclear Energy Series. *Environmental Protection in New Nuclear Power Programmes*. No. NG-T-3.11 (Rev. 1), Vienna: IAEA, 2022. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB2076_web.pdf
4. IAEA. Accident Monitoring Systems for Nuclear Power Plants. *Nuclear Energy Series*. No. NP-T-3.16. Vienna: IAEA, 2015. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1676_web.pdf
5. UK Government. *Environmental Radiological Monitoring: Planning and Implementing Your Programme*. London, 2024. <https://www.gov.uk/guidance/environmental-radiological-monitoring-planning-and-implementing/context-and-scope>
6. Zhong, N., Li, L., Yang, X., Zhao, Y. (2022). Analytical Methods for the Determination of ^{90}Sr and $^{239,240}\text{Pu}$ in Environmental Samples. *Molecules*, 27(6), 1912. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27061912>
7. Cantaluppi, C. Zannoni, D., Cianchi, A., Giacetti, W., Lovisetto, B., Pagnin, E. Favero, T. (2021). Methods for radioactivity measurements in drinking water using gamma spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*, 232, 106566.
8. Anand, R., Harshith, K., Raghavan, A., Maddara, R., Anand, P. (2022). Automated UAV to survey and monitor ionising radiation levels in a closed environment. *Power Electronics and Drives*, 7(42), 134–145.
9. Leelőssy, Á., Lagzi, I., Kovács A., Mészáros R. (2018). A review of numerical models to predict the atmospheric dispersion of radionuclides. *Journal of environmental radioactivity*, 182, 20–33.
10. Nabavi, S. O. Christoudias, T., Proestos, Y., Fountoukis, C., Al-Sulaiti, H., Lelieveld, J. (2023). Spatiotemporal variation of radionuclide dispersion from nuclear power plant accidents using FLEXPART mini-ensemble modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(13), 7719–7739.
11. Li, Y., Wang, T., Wang, J., Guo, W., Li, W., Qiu, H., Lin, Y., Fang, Y., Lv, M. (2025). Research on predicting the diffusion of radionuclide in complex building scenarios based on a hybrid deep learning model. *Nuclear Engineering and Design*, 441, 114187. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114187>
12. Azarov, S.I., Lytvynov, Y.V., Sidnev, O.B., Sydorenko, V.L. (2013). Mobile radiological laboratory complex. *Ecological Sciences*, 4, 36–44.
13. Sydorenko, V., Azarov, S., Sereda, Yu. (2016). Assessment of radiation situation Chernobyl exclusion zone after a forest fire. *Bulletin of the Lviv State University of Life Safety*, 13, 122–128.
14. Sydorenko, V., Azarov, S. (2017). Conceptual basis for the development of complex monitoring system zone radiation accidents. *Scientific journal "Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University"*, 1(2017), 102, 82–87.
15. Kaku, K., Aso, N., Takiguchi, F. (2015). Space-based response to the 2011 Great East Japan Earthquake: Lessons learnt from JAXA's support using earth observation satellites. *International journal of disaster risk reduction*, 12, 134–153. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.12.009>
16. Lin, Y., Hoover, J., Beene, D., Erdei, E., Liu, Z. (2020). Environmental risk mapping of potential abandoned uranium mine contamination on the Navajo Nation, USA, using a GIS-based multi-criteria decision analysis approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 30542–30557. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09257-3>
17. Hanfland, R., Brunner, D., Voigt, C., Fiehn, A., Roiger, A., Pattantyús-Ábrahám, M. (2024). The Lagrangian Atmospheric Radionuclide Transport Model (ARTM)–sensitivity studies and evaluation using airborne measurements of power plant emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(4), 2511–2534.
18. Gousseau, P., Blocken, B., Van Heijst, G. J. F. (2011). CFD simulation of pollutant dispersion around isolated buildings: On the role of convective and turbulent mass fluxes in the prediction accuracy. *Journal of Hazardous Materials*, 194, 422–434.
19. Yaremich, A.V., Isaiev, S.D. (2016). CFD modeling of pollutant dispersion in atmospheric air in an urban environment. *Ekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, (3–4), 40–50.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Шевченко Р.І., заступник начальника центру – начальник відділу організації науково-дослідної діяльності науково-інноваційного центру Національного університету цивільного захисту України, м. Черкаси.

Автор: КРАСНОВ Вячеслав Анатолійович
здобувач вищої освіти
Національний університет цивільного захисту України
E-mail – krasnov.viacheslav_2022phd@nuczu.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8037-9636>

Автор: РАШКЕВИЧ Ніна Владиславна
доктор філософії, доцент кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки
Національний університет цивільного захисту України
E-mail – nine291085@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5124-6068>

ASSESSMENT OF RADIATION IMPACT DURING AN ACCIDENT AT A SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE FACILITY

V. Krasnov, N. Rashkevich

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

The study addresses the assessment and management of environmental safety at spent nuclear fuel (SNF) storage facilities under emergency conditions. The research aims to improve environmental safety management by integrating modern risk assessment approaches, external threat analysis, and advanced modeling tools. The focus is on understanding the processes of radiation formation, propagation, and deposition during accidents at SNF storage facilities, as well as on developing methods for evaluating contamination levels and the dispersion of radionuclides in the surrounding environment.

A detailed sequence of procedures for radiation impact assessment is proposed, beginning with the collection of comprehensive data on the emission source, including radionuclide composition, activity levels, release height,

speed, and direction. Meteorological data such as wind speed and direction, temperature, humidity, and atmospheric stability are incorporated, alongside topographic characteristics, which together determine the spatial and temporal spread of radioactive contamination. Diffusion models, particularly the Gaussian model, are employed to predict concentrations of radioactive admixtures, evaluate horizontal and vertical distributions in the atmosphere, describe dry deposition of particles, and estimate soil contamination. Mathematical relationships are presented for calculating radionuclide concentrations, dispersion coefficients, surface contamination density, and radiation doses to both personnel and the general population.

The study also critically analyzes the limitations of the Gaussian model, including its assumptions of atmospheric homogeneity, simplified treatment of deposition processes, and lack of corrections for complex terrain, urban structures, convective flows, and variable turbulence. To address these limitations, complementary approaches, such as Lagrangian particle models and computational fluid dynamics (CFD) simulations, are discussed to provide more accurate predictions under heterogeneous and dynamic conditions. Emphasis is placed on integrating these methods with statistical analysis of particle size distributions, deposition rates, and emission scenarios to enhance reliability and applicability in real-world conditions.

Based on the modeling results, a comprehensive framework for radiation risk assessment is developed, enabling the calculation of external and internal exposure through integral formulas and the estimation of the probability of adverse health effects. The proposed methodology allows for quantitative evaluation of risks that exceed permissible exposure levels and supports timely decision-making regarding protective measures. The findings can be applied to enhance environmental monitoring systems, improve the accuracy of predicting radioactive impact zones, and optimize the management of SNF storage facilities during emergency scenarios, ultimately contributing to increased environmental and public safety, as well as the development of guidelines for emergency preparedness and response.

Keywords: radiation safety, spent nuclear fuel storage, accidental release, radionuclide dispersion modeling, radiation risk assessment.