

С. С. Підберезний, Є. А. Меньшенін, Д. В. Федорченко

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна*

## Тривимірне моделювання як інструмент підвищення культури безпеки під час проведення робіт на радіаційно-ядерних об'єктах

*Ключові слова:*

ChNPP VRdose Planner Pro v. 2.2.2, гамма-випромінювання, об'єкт «Укриття»

Засобами програми ChNPP VRdose Planner Pro побудовано тривимірну модель зовнішньої оболонки покрівлі об'єкта «Укриття» із джерелами гамма-випромінювання та будівельними конструкціями, які мають властивості захисних екранів. Виконано аналіз радіаційної обстановки та показано візуальне відображення радіаційного поля над покрівлею. Створено моделі будівельних конструкцій, які деякою мірою екранують гамма-випромінювання, що виходить із центрального залу (ЦЗ) об'єкта «Укриття». Здійснено тривимірне моделювання процесу «раннього» демонтажу будівельних конструкцій у програмі ChNPP VRdose Planner Pro v. 2.2.2. Застосування методів моделювання радіаційних умов під час планування та виконання робіт у радіаційно небезпечних умовах дасть змогу оптимізувати проектні рішення щодо демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», оптимізувати структуру радіаційного захисту персоналу. Програмний комплекс є зручним засобом для виконання розрахунків оцінених доз опромінення в радіаційно небезпечних умовах, уможливорює швидке та начне моделювання альтернативних варіантів виконання робіт, дає змогу здійснювати оптимізацію процесу виконання робіт та поведінки персоналу в радіаційно небезпечних умовах. На основі виконаного моделювання можна створити інтерактивний програмний комплекс у навчально-тренувальному центрі Чорнобильської АЕС для детального навчання та підготовки персоналу. Результати аналізу радіаційної обстановки можуть бути використані при плануванні виконання робіт у радіаційно небезпечних умовах для забезпечення захисту персоналу відповідно до принципу ALARA.

### Вступ

В Інституті проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України (далі — ІПБ АЕС НАН України) комп'ютерне моделювання широко використовувалося для вирішення різних груп завдань, включно з моделюванням радіаційної обстановки в об'єкті «Укриття» і поблизу нього, а саме: об'ємний розподіл полів гамма-випромінювання [1]; забезпечення радіаційної безпеки у процесі діяль-

ності в радіаційно небезпечних зонах [2]; моделювання радіаційно небезпечних зон з метою зниження рівня опромінення персоналу [3, 4]; розробка технічних пропозицій щодо організації процесу вилучення паливовмісних матеріалів [5, 6] та ін.

Під час планування робіт на об'єкті «Укриття» велике значення має мінімізація доз персоналу, який бере участь у цих роботах. Це набуває особливого значення для виконання робіт з демонтажу конструкцій, що характеризуються великими колективними

© С. С. Підберезний, Є. А. Меньшенін, Д. В. Федорченко, 2023

ефективними дозами, які отримує персонал під час їхньої реалізації. У зв'язку з цим уже на етапі проектування виникає необхідність визначення доз персоналу, а також оптимізації заходів протирадіаційного захисту і, у першу чергу, біологічного захисту.

Перелік нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», що підлягають «ранньому» демонтажу, указаний у технічному завданні на розробку проектної документації об'єкта будівництва «Новий безпечний конфайнмент (НБК). Пусковий комплекс 2». У цьому документі міститься 17 найменувань основних будівельних металоконструкцій і вузлів об'єкта «Укриття».

Оскільки під час проведення робіт із демонтажу нестабільних конструкцій радіаційна обстановка буде змінюватися, то проектні рішення повинні враховувати можливі зміни дози опромінення під час планування захисних заходів. Для розрахунку потужності дози (ПД) гамма-випромінювання при виконанні робіт пропонується застосувати метод математичного моделювання на основі моделі «точкового джерела» (point kernel) [7]. Цей підхід дає змогу проводити розрахунок і аналіз радіаційної обстановки практично в реальному масштабі часу [8]. Для проведення такого розрахунку використовувався програмний продукт ChNPP VRdose Planner Pro v. 2.2.2 (далі — ChNPP VRdose Planner Pro), розроблений у рамках проекту «Центр візуалізації зняття з експлуатації ЧАЕС — розширення і оптимізація Планувальника ЧАЕС» в Інституті енергетичних технологій (IFE), Норвегія [9]. Цей програмний продукт включає в себе розрахунковий модуль на основі моделі точкового джерела, а також сучасні засоби візуалізації та аналізу отриманих даних у результаті розрахунків. Необхідно зазначити, що у випадку застосування цієї програми залишається можливість візуалізації й аналізу даних, таких як експериментальні вимірювання або розрахунок методом Монте Карло.

У цій роботі за допомогою програмного продукту ChNPP VRdose Planner Pro проведено аналіз радіаційної обстановки над покрівлею об'єкта «Укриття», зокрема створено моделі будівельних конструкцій, які екранують гамма-випромінювання ЦЗ, а також зроблено висновки про основні джерела випромінювання.

Для аналізу радіаційної обстановки потрібен ефективний метод розрахунку просторового розподілу ПД іонізуючого випромінювання, а також засоби візуалізації результатів розрахунків. Програмний продукт (далі — програма) ChNPP VRdose

Planner Pro являє собою інструмент для моніторингу навколишніх умов та планування дій у реальному часі. Цей додаток дозволяє в динаміці візуалізувати радіологічні умови методами віртуальної реальності, а також здійснювати персональний моніторинг ПД й сумарної дози в реальному часі для «манекенів», що імітують рух реальних людей.

### Методика розрахунків

Результати аналізу радіаційної обстановки можуть бути використані під час планування проведення робіт у радіаційно небезпечних умовах для забезпечення захисту персоналу відповідно до принципу ALARA.

Ранні версії програми HVRC VRdose (на базі якого розроблено ChNPP VRdose Planner Pro) забезпечували лише простий дозиметричний метод [10] розрахунку ПД випромінювання й візуалізації радіаційних полів, що створюються джерелами гамма-випромінювання. В основі дозиметричного методу лежить базовий метод точкового ядра, який широко застосовується для розрахунків радіаційного захисту. В основі методу лежить розділення просторового джерела випромінювання на малі елементи; ПД, що утворюється кожним таким елементом, розраховується за формулою

$$H_i = A \frac{B \exp(-\mu r_i)}{r_i^2}, \quad (1)$$

де  $A$  — відповідний дозовий коефіцієнт;  $B$  — фактор накопичення;  $\mu$  — коефіцієнт ослаблення випромінювання;  $r_i$  — відстань від елемента джерела до точки, де обчислюється ПД випромінювання.

Доза від усього просторового джерела в цьому випадку визначається як сума доз від усіх точкових джерел і визначається за формулою

$$H = \sum H_i. \quad (2)$$

Метод точкового джерела дозволяє моделювати динаміку зміни радіаційних умов у реальному масштабі часу. При цьому зміна характеристик джерел випромінювання і властивостей захисту призводить до автоматичного коригування розрахункової радіаційної обстановки й усіх пов'язаних із нею візуальних уявлень [4].

Цей підхід дає хорошу оцінку в більшості простих ситуацій (наприклад, стандартний енергетичний спектр фотонів, проста геометрія екранів), од-

нак зміни стандартної стратегії радіаційного захисту та наявність додаткових вхідних даних вимагають більш сучасного та ефективного підходу.

Під час розробки ранньої версії програми швидкість і простота обчислень мали першорядне значення. Наявні вхідні дані були інтегровані в реалізацію програми. Це забезпечує високу швидкість обчислень, але не дозволяє користувачам розширювати список підтримуваних ізотопів і матеріалів або оновлювати застосовувані стандартні радіологічні вхідні дані (коефіцієнти послаблення і поглинання, фактори накопичення тощо). Крім того, спрощений підхід не забезпечує користувачів достатньою гнучкістю, наприклад для вибору бажаної вихідної інформації зі списку застосовуваних у цей час радіометричних і дозиметричних величин. Оскільки основною метою програмного інструмента є підтримка робіт, що пов'язані з потенційним радіаційним опроміненням, важливо, щоб розраховане радіаційне навантаження можна було порівняти з межами, застосованими до конкретної ситуації.

Досить поширеною є ситуація, коли джерело знаходиться поза кількома твердими і/або рідкими екранами, а детектор розташований у повітрі на певній відстані від екрана. Оскільки повітря не підтримується як матеріал, то як послаблення, так і накопичення фотонів у повітрі не враховуються. Хоча повітря слабо взаємодіє з проникаючим випромінюванням, великий шар повітря може мати помітний вплив, призводячи до збільшення похибки на великих відстанях від джерел випромінювання.

У попередній версії програми просторові джерела гамма-випромінювання рівномірно розподілялися на точкові джерела на основі різниці між найгіршим і найкращим сценаріями. Ця рівномірна техніка розподілу призводить або до низької ефективності (якщо виконується дуже тонке розділення), або до погіршення точності (якщо застосовується більш грубе розділення), коли детектор знаходиться поблизу великого просторового джерела.

З моменту розробки ранньої версії програми було опубліковано оновлення та доповнення раніше опублікованих даних про фактори накопичення [11] для додаткових енергій фотонів та екранів різної товщини та складу. Користувачі попередньої дозиметричної моделі не можуть використовувати ці оновлення, оскільки база даних для них недоступна. Це стосується, наприклад, найбільшої товщини екрана, що становить 40 λ (довжина вільного пробігу) у попередній версії [12], а в наступних версіях використовуються фактори накопичення для екранів з товщинами до 100 λ [13, 14].

Указані вище проблеми звужують область застосування моделі. Новий дозиметричний підхід [7, 8] дає змогу мінімізувати ці недоліки. При цьому нова версія програми була розроблена як додаток до попередньої версії програми і є ще більш потужним інструментом для підвищення культури безпеки в атомній галузі.

Нова версія програми заснована на більш сучасному та гнучкому застосуванні наближення базового точкового ядра:

$$\dot{R} = \sum_i \left( \frac{A y_i}{4\pi r^2} \cdot \exp(-\sum r(E_i)) \cdot CF(E_i) \cdot B(\sum r(E_i)) \right), \quad (3)$$

де  $\dot{R}$  — відгук точкового ізотропного детектора (ПД) ( $R \cdot h^{-1}$ ,  $Gy \cdot c^{-1}$ ,  $Sv \cdot c^{-1}$ );  $A$  — активність точкового ізотропного джерела ( $Bq$ );  $y_i$  — вихід фотонів при енергії фотона  $E_i$ ;  $r$  — відстань від джерела до детектора (см);  $\sum r$  — оптична товщина середовища між детектором та джерелом (включаючи повітря);  $CF$  — коефіцієнт перетворення енергії  $E_i$  ( $R \cdot cm^2$ ,  $Gy \cdot cm^2$ ,  $Sv \cdot cm^2$ );  $B(\sum r(E_i))$  — є відповідним коефіцієнтом накопичення.

У цій новій реалізації вхідні радіологічні константи і, як наслідок цього, розрахунковий відгук детектора обробляються гнучкіше, що дозволяє адаптувати дозиметричний підхід до конкретної ситуації. Вибір стандартних радіологічних даних до застосування в детермінованих розрахунках перенесення випромінювання постійно вдосконалюється. Щоб надати користувачам широкий спектр параметрів, що обираються, усі стандартні радіологічні вхідні дані, що використовуються (коефіцієнти послаблення й поглинання, коефіцієнти перетворення, фактори накопичення тощо), отримуються з доступної для користувача бази даних. Ця база даних містить великий вибір вхідних параметрів на основі міжнародних стандартних публікацій з можливістю оновлення та розширення даних.

У сучасній версії користувач має змогу переглядати константи, що застосовуються в дозиметричному моделюванні на основі сучасних даних. Рання версія програми використовує коефіцієнти ослаблення, які ігнорують або неправильно враховують гальмівне випромінювання і не враховують когерентне розсіювання. У новій версії вхідний файл, що настраюється, дозволяє користувачам застосовувати дані, що враховують ці незначні ефекти [12, 15], для більш правильного розрахунку послаблення в екранах.

Нова версія програми, яка розглядається в цій роботі, використовує результати останніх розробок у галузі радіаційного захисту та включає більшу кількість

стандартних вхідних даних (наприклад, коефіцієнти перетворення дози та фактори накопичення), отримані в результаті моделювання та експериментальних зусиль різних дослідницьких груп у світі. Нова версія програми відповідає новим рекомендаціям таких установ, як ICRP (Міжнародна комісія з радіологічного захисту) [16], ICRU (Міжнародна комісія з радіаційних одиниць та вимірювань) [17], Відділ радіаційного захисту та екранування Американського ядерного товариства [12], Німецький інститут радіаційного захисту (Bundesamt für Strahlenschutz) [18], Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) та Національний інститут стандартів і технологій.

Як і в попередньому дозиметричному підході, просторові джерела також замінюються сукупністю точкових джерел. У новій версії програми процес поділу просторових джерел на точкові ґрунтується на критерію, за яким джерело можна вважати точковим. Згідно з визначенням, джерело випромінювання можна вважати точковим, якщо його геометричними розмірами можна знехтувати в порівнянні з відстанню від детектора. Для практичних розрахунків захисту від іонізуючого випромінювання зазвичай приймають, що джерело можна вважати точковим, якщо його максимальний геометричний розмір не перевищує 10 % відстані від джерела до детектора. Таким чином, у новій версії програми просторові джерела за замовчуванням розбиваються на частини, з розмірами менше 10 % від відстані до детектора, а критерій поділу джерел може бути налаштований користувачем. Зазначимо, що, виходячи з цього визначення, максимальний розмір «точкового джерела» залежить від відстані до детектора, тому просторові джерела фрагментуються нерівномірно (адаптивно) [8]. Метод адаптивного перетворення забезпечує найкращий результат у ситуаціях, коли детектор знаходиться близько до просторових джерел, а моделювання точкового ядра на основі рівномірної сітки не працює. При цьому підвищена точність розрахунків вимагає більших обчислювальних ресурсів.

У рамках роботи [8], на додаток до раніше реалізованої моделі на основі точкового ядра, було розроблено та реалізовано новий алгоритм оцінки ПД в системі моделювання в реальному часі HVRC VRdose. Новий алгоритм вимагає більших обчислювальних ресурсів, але забезпечує більшу гнучкість і більш точні результати. Для валідації нового алгоритму було проведено порівняльний аналіз результатів розрахунків для простих ситуацій опромінення з використанням ChNPP VRdose Planner Pro з резуль-

татами розрахунків у MicroShield (версії 5 та 6) та на онлайн-калькуляторі Rad Pro Calculator [8]. Результати аналізу показують, що для більшості загальних завдань радіаційного захисту на ядерних установках, пов'язаних, зокрема, з технічним обслуговуванням, зупиненням або виведенням з експлуатації, ChNPP VRdose Planner Pro забезпечує точну оцінку ПД у реальному часі. Крім того, висока продуктивність та простота введення вихідних даних робить ChNPP VRdose Planner Pro ефективним інструментом для вирішення таких завдань:

- моделювання умов впливу, що динамічно змінюються;

- оперативне надання інформації для прийняття рішень у стресових ситуаціях;

- оптимізація робочих завдань у режимі реального часу з погляду радіаційного захисту;

- моделювання в реальному часі для навчання та інструктажу персоналу.

У багатьох додатках ці можливості дають величезні переваги в порівнянні з більш складними моделями, заснованими на детальному моделюванні перенесення випромінювання.

### **Побудова комп'ютерної моделі в програмі ChNPP VRdose Planner Pro**

Моделювання здійснюється в безпосередньо існуючому середовищі при оптимізації захисту від гамма-випромінювання та дає можливість підготовки звітів про плани роботи з оцінками доз. Методика побудови моделі зводиться до таких основних етапів.

**Побудова тривимірних моделей** будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» засобами комп'ютерної графіки у форматі файлів \*.vrm, \*.dae, \*.kmz. Внутрішній формат файла, що використовується для 3D-моделей у банку моделей програми ChNPP VRdose Planner Pro — ISO VRML97 (мова моделювання віртуальної реальності). Також можна імпортувати моделі, що зберігаються в дедалі популярніших форматах COLLADA (DAE — Digital Asset Exchange) та KMZ. Багато пакетів САПР та 3D-моделювання можуть експортувати дані до цих форматів. Більшість онлайн-архівів 3D-моделей пропонують моделі як мінімум в одному з цих трьох форматів, що підтримуються.

**Вимірювання ПД.** Реальні вимірювання ПД можна імпортувати до бази даних вимірювань ChNPP VRdose Planner Pro і їх можна візуалізувати. Слід наголосити, що розширена візуалізація резуль-

татів така ж важлива, як і сучасне моделювання перенесення випромінювання. Це забезпечує ефективну підтримку прийняття рішень та планування заходів, пов'язаних із радіаційною безпекою. У 2021 р. почався процес проектування заходів із демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття». На першому етапі проектування були виконані передпроектні дослідження характеристик радіаційного стану в зонах виконання будівельно-демонтажних робіт (ЗВР). Відповідні радіаційні дослідження було виконано фахівцями ІПБ АЕС у період вересень — грудень 2021 р. Основною метою їхнього проведення було отримання достатньої кількості вихідних даних для проектування будівельно-демонтажної діяльності у ЗВР. Під час проведення радіаційних вимірювань досліджувалися такі параметри:

- величини ПД гамма-випромінювання;
- кутові розподілення гамма-випромінювання;
- характеристики поверхневого забруднення ЗВР;
- об'ємна активність радіонуклідів у повітрі ЗВР.

Радіаційні дослідження здійснювалися у складних радіаційних умовах. З цієї причини перед початком досліджень було прийнято низку принципів положень, які, з одного боку, забезпечили виконання всього обсягу вимірювань, необхідного для проектування, а з іншого — мінімізували дози опромінення

персоналу [19]. Отримані дані ПД стали підґрунтям для розробки проектних рішень щодо «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій, а також для розробки моделі, що описується в цій роботі. Результати радіаційних досліджень будуть використані під час розробки технологічних проектних рішень, заходів з екранування робочих місць, оцінки дозових навантажень, заходів щодо мінімізації радіаційних впливів на персонал і довкілля та підтримання наявного рівня радіаційної безпеки.

Під час виконання радіаційних обстежень ЗВР були зафіксовані радіаційні параметри на час вимірювань, проте реальні показники радіаційного стану в ЗВР під час демонтажу нестабільних конструкцій можуть відрізнятися. Це обумовлено тим, що діяльність з демонтажу призведе до зміни конфігурації просторового розподілу гамма-випромінювання всередині об'єкта «Укриття», оскільки будуть переміщуватися масивні конструкції та видалятися завали, що містять високоактивні відходи. З цієї причини для розрахунку ПД гамма-випромінювання під час виконання робіт пропонується застосувати програмний продукт ChNPP VRdose Planner Pro. Виміряні значення ПД гамма-випромінювання можна вводити, переглядати та контролювати у вікні «Вимірювання потужності дози» (Dose-Rate Measurements) (рис. 1).

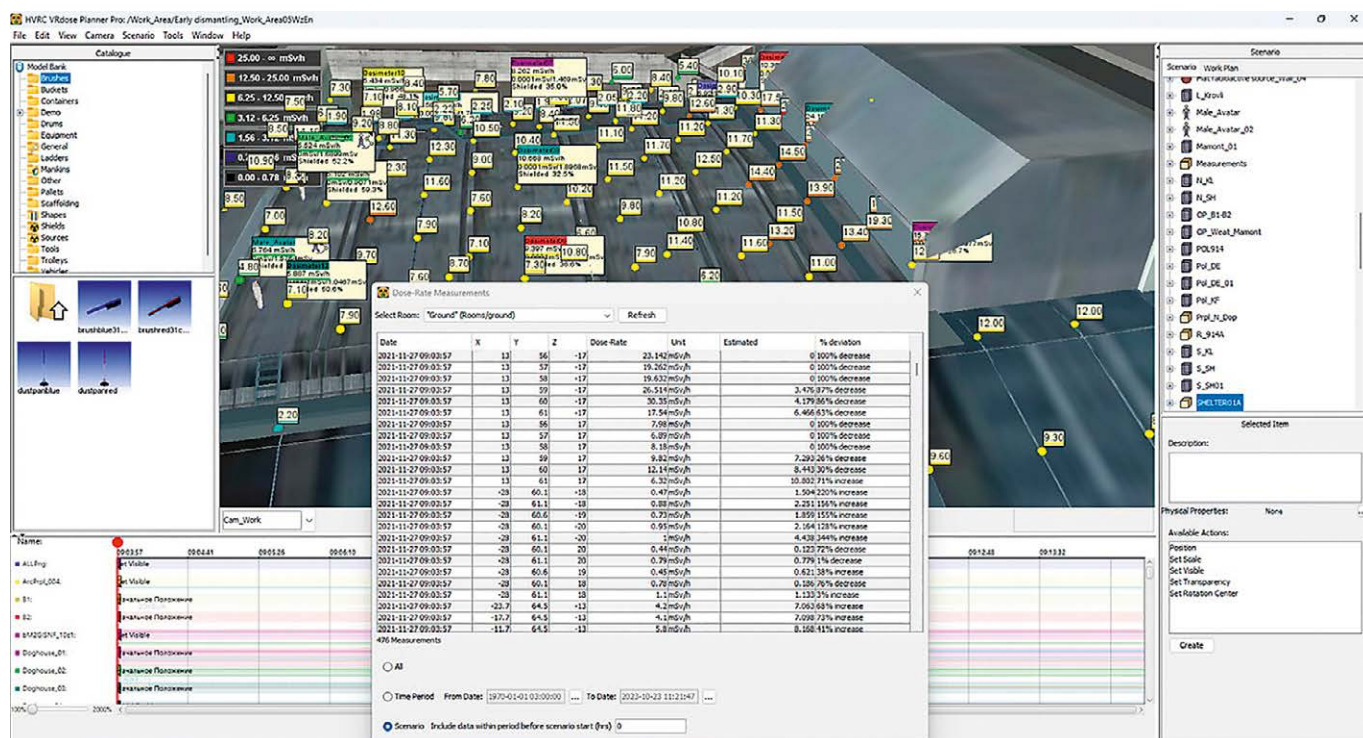


Рис. 1. Модель об'єкта «Укриття», показано точки вимірювання ПД гамма-випромінювання та вікно «Вимірювання потужності дози»

**Радіаційні об'єкти.** Планувальник може візуалізувати випромінювання. Випромінювання розраховується від джерел та екранів у сценарії. Користувач має змогу обрати форму джерела випромінювання: точкове джерело, лінійне джерело, джерело із закритою моделлю. Кожне джерело має певний ізотопний склад та активність. До джерела можна додати екранування, яке відповідає об'єкту, що оточує джерело, наприклад трубі. Положення джерела можна встановити в моделі так само, як і для інших об'єктів.

**Калькулятор радіації** — це набір калькуляторів для розрахунків ПД згідно з методом розрахунку, закладеним у ньому. Калькулятори можуть використовувати джерела та екрани на місці події, вимірювання ПД або картки дози як основу для розрахунків.

Source Activity Editor — «Калькулятор активності джерел» — це інструмент для зміни активності джерел з метою узгодження розрахункових значень ПД з експериментальними вимірюваннями. Інструмент складається зі списку всіх джерел моделі з лівого боку і списку вимірювань, які виконувались у приміщенні, праворуч (рис. 2). Є можливість змінювати параметри окремих джерел вручну, але для складної моделі цей процес може бути досить складним. У цьому випадку на основі набору вимірювань, набору джерел

та інформації про екранування можна автоматично змінити активність окремих джерел так, щоб результати розрахунку ПД були близькими до вимірюваних.

Приклади визначення кількості, параметрів та геометрії розміщення джерел гамма-випромінювання описані в роботах [20, 21]. Відповідна картограма потужності амбієнтного еквівалента дози, яка побудована за підібраними даними джерел гамма-випромінювання, наведена на рис. 3.

Заміна методу побудови картограм ПД за значеннями ПД у точках вимірювання методом інтерполяції на побудову за підібраними даними джерел гамма-випромінювання за допомогою Source Activity Editor дає можливість розраховувати ПД під час демонтажу будівельних конструкцій, тобто зміни екрануючих властивостей моделі.

## ChNPP VRdose Planner Pro для навчання та моделювання

Сьогодні навчання є одним із найпопулярніших напрямів досліджень у галузі віртуальної реальності (VR). Безпечне віртуальне середовище може використовуватися для моделювання реального або планованого середовища, яке надто небезпечне, складне або дороге для навчання. Існує потенціал для підви-

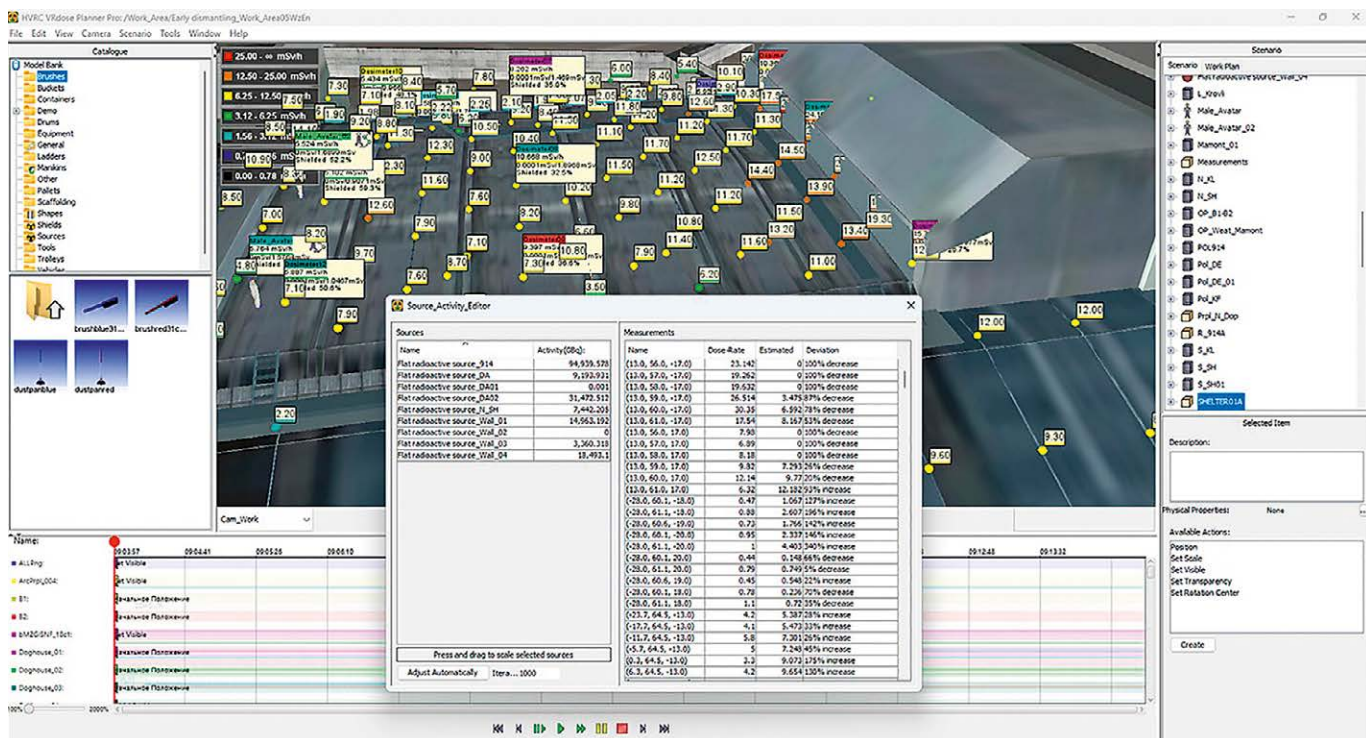


Рис. 2. Точки вимірювання ПД гамма-випромінювання та вікно Source Activity Editor

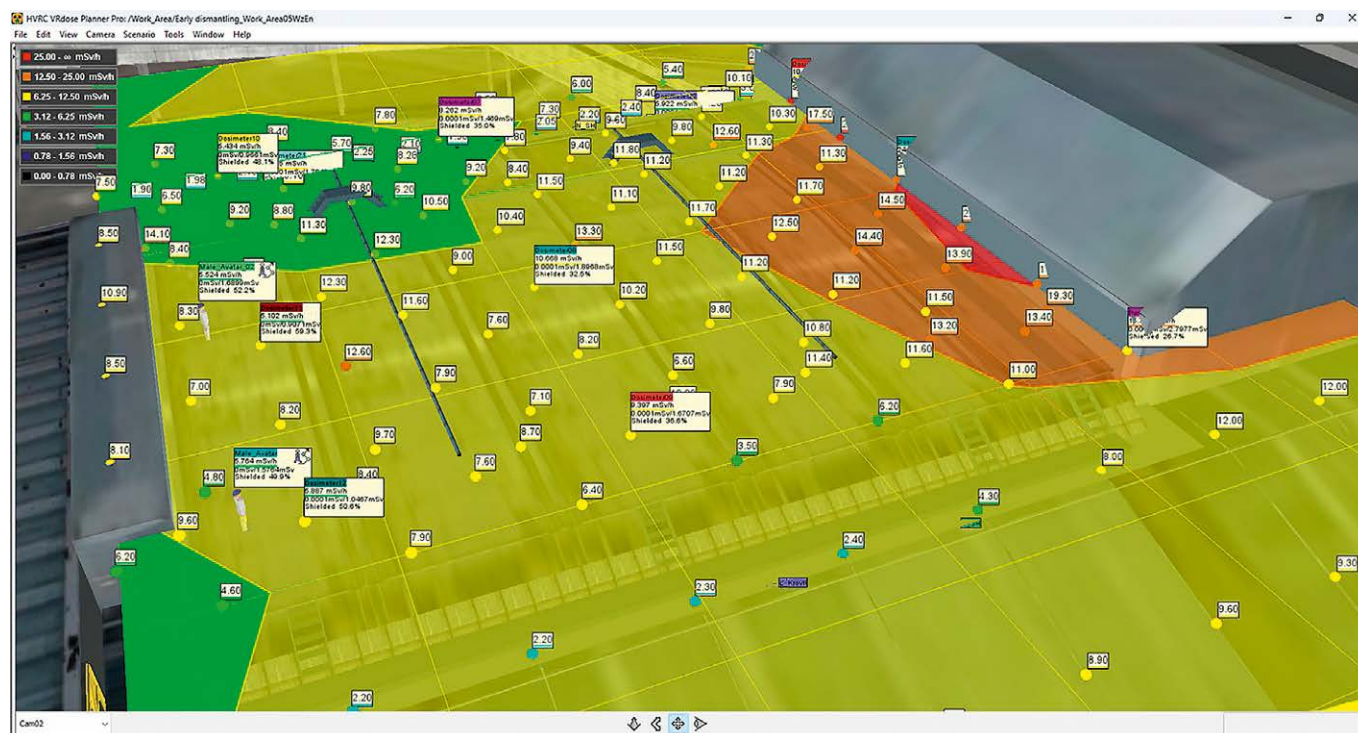


Рис. 3. Картограма ПД (мЗв/г) над ЦЗ, побудована за підібраними даними джерел гамма-випромінювання за допомогою Source Activity Editor

щення стандартів безпеки, підвищення ефективності та зниження загальних витрат на навчання. Навчання на основі віртуальної реальності особливо добре підходить для ситуацій, коли важливі когнітивні та просторові навички.

Технологія VR часто використовується для створення тренажерів. Знання, закодовані в таких системах, зазвичай орієнтовані лише на те що, щоб дозволити середовищу моделювання поводитися реалістично. Хоча в цих системах зазвичай немає інтегрованої підтримки комп'ютерного навчання, вони можуть працювати паралельно з такими системами, як комп'ютеризовані системи процедур, для поліпшення навчання. Ці системи зазвичай управляються в присутності досвідченої людини-інструктора. Навчальні системи віртуальної реальності можуть піти ще далі, інтегруючи інтелектуальні функції комп'ютера навчання з симулятором. На додаток до поведінкових знань симулятор може мати знання про правильні або відповідні реакції на ситуації, для того щоб система могла направляти учня або для навчання правильної процедури, або для допомоги користувачеві у виконанні відповідних коригуючих дій [7]. Такі системи можуть використовуватися з інструкторами в класі, але також можуть використовуватися стажистами для ефективної практики без присутності людини-інструктора.

## Висновки

Засобами програми ChNPP VRdose Planner побудована тривимірна модель зовнішньої оболонки покриття об'єкта «Укриття» з будівельними конструкціями, що мають властивості захисних екранів, а також підібраними даними джерел гамма-випромінювання.

Методи 3D (типу віртуальної реальності) є потужним і простим для розуміння засобом візуалізації розподілу загальної та радіоізотопної ПД, особливо в складних ядерних середовищах.

Поінформованість про розподіл ПД гамма-випромінювання від радіонуклідів має застосування під час технічного обслуговування та демонтажу об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями. Це важливо для служб радіаційного захисту та інженерних підрозділів, які планують комплексні втручання. Його також можна використовувати як освітній інструмент для навчання/тренування, щоб передати найкращі практики ALARA.

Програмний комплекс є зручним та наочним засобом для проведення як розрахунків оцінених доз опромінення в радіаційно небезпечних умовах, так і уможливорює швидке та наочне моделювання альтернативних варіантів виконання робіт, тобто дає змогу проводити оптимізацію процесу виконання

робіт та поведінки персоналу в радіаційно небезпечних умовах.

Застосування цієї просторової моделі розподілу гамма-випромінювання для моделювання радіаційних умов під час планування та виконання монтажних операцій, а також операцій з обслуговування, ремонту та заміни обладнання в радіаційно небезпечних умовах об'єкта «Укриття» дасть змогу:

оптимізувати проектні рішення демонтажу нестабільних конструкцій;

розраховувати та оптимізувати структуру радіаційного захисту персоналу;

зменшити відмінність показників радіаційної обстановки під час проведення передпроектних досліджень від реальних значень;

створити інтерактивний програмний комплекс для детального навчання та підготовки персоналу в навчально-тренувальному центрі Чорнобильської АЕС.

### Список використаної літератури

1. Батий В. Г. Объемное распределение полей гамма-излучения в зоне центрального зала 4-го энергоблока ЧАЭС / В. Г. Батий, С. С. Подберезный, А. И. Стоянов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2014. — Вып. 23. — С. 66–73.
2. Результати використання HVRC VRDOSE PLANNER для оцінки доз опромінення персоналу при виконанні робіт у радіаційно-небезпечних умовах / М. В. Пашинов, С. С. Підберезний, С. А. Паскевич [та ін.] // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2018. — Вып. 31. — С. 127–134.
3. Моделювання радіаційної обстановки під час «раннього» демонтажу будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, Ф. В. Ланських, С. А. Паскевич, С. С. Підберезний // Ядерна енергетика та довкілля. — 2021. — № 3 (22). — С. 67–77.
4. Моделювання радіаційної обстановки при поводженні з відпрацьованим ядерним паливом / О. В. Балан, С. А. Паскевич, С. С. Підберезний, Д. В. Федорченко // Ядерна фізика та енергетика. — 2021. — Т. 22 — № 3. — С. 249–258. — doi.org/10.15407/jnpae2021.03.249
5. Компьютерное моделирование процесса извлечения топливосодержащих материалов с верхних отметок объекта «Укрытие» / В. Г. Батий, Д. Н. Романов, С. С. Подберезный [и др.] // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2014. — Вып. 23. — С. 74–81.
6. Принципові технологічні рішення з вилучення паливовмісних матеріалів з верхніх відміток об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, В. Г. Батий, С. І. Глебкін [та ін.] // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2015. — Вып. 25. — С. 83–93.
7. Szőke I. New computational model for areal and personal monitoring in nuclear environments (HWR-1030). OECD Halden Reactor Project / I. Szőke. — Norway : Institutt for energiteknikk (IFE), 2012.
8. Szőke I. Real-time 3D radiation risk assessment supporting simulation of work in nuclear environments / I. Szőke, M. N. Louka, T. R. Bryntesen, [et al.] // Journal of Radiological Protection. — 2014. — Vol. 34. — P. 389–416.
9. Центр візуалізації зняття з експлуатації ЧАЕС: моделювати безпеку // ДСП ЧАЕС : офіційний веб-сайт. — Режим доступу: <https://chnpp.gov.ua/ua/infotsentr/novyny/5228-tsentr-vizualizatsiji-znyattya-z-ekspluatatsiji-chaes-zmodelyuvati-bezpeku?layout=default>.
10. Vabø R. 3D representation of radioisotopic dose rates within nuclear plants for improved radioprotection and plant safety / R. Vabø, L. Piotrowski, G. Rindahl // Nucl. Saf. Simul. — 2010. — Vol. 1. — P. 127–133.
11. Durani L. A. Update to ANSI/ANS-6.4.3-1991 for low-Z and compound materials and review of particle transport theory / L. A. Durani. — Department of Mechanical Engineering, University of Nevada, Las Vegas, 2009. — P. 221.
12. American National Standard for Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials (ANSI/ANS-6.4.3) / American Nuclear Society — Working Group ANS-6.4.3. — 1992.
13. Shimizu A. Calculation of gamma-ray buildup factors up to depths of 100 mfp by the method of invariant embedding, (III). Generation of an improved data set / A. Shimizu, T. Onda and Y. Sakamoto // J. Nucl. Sci. Technol. — 2004. — Vol. 41. — P. 413–424.
14. Yoshida Y. Development of fitting methods using geometric progression formulae of gamma-ray buildup factors / Y. Yoshida // J. Nucl. Sci. Technol. — 2006. — Vol. 43. — P. 1446–1457.
15. Hubbell J. H. Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients / J. H. Hubbell // The International Journal of Applied Radiation and Isotopes. — 1982. — Vol. 33. — P. 1269–1290.
16. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP Publication no. 103; Ann. ICRP 37 (2–4). — ICRP, 2007.
17. Measurements of dose equivalents from external photon and electron radiations (Report 47) / International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). — Bethesda, MD : ICRU Publications, 1992.
18. Becker D. Radiological Protection / D. Becker [et al.] // Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional

- Relationships in Science and Technology, ed. by W. Martienssen; Group VIII Advanced Materials and Technologies. — Berlin : Springer, 2005.
19. Павловський Л. І. Визначення радіаційних умов у зонах робіт з демонтажу нестабільних конструкцій / Л. І. Павловський, Д. О. Хоменко, В. В. Єгоров // Ядерна енергетика та довкілля. — 2022. — № 3 (25). — С. 16–23.
  20. Моделювання радіаційної обстановки під час «раннього» демонтажу будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, Ф. В. Ланських, С. А. Паскевич, С. С. Підберезний // Ядерна енергетика та довкілля. — 2021. — № 3 (22). — С. 67–77.
  21. FCM atlas, classification, 2D models / Атлас, классификация, 2-D модели TCM. SIP-EBPD-R-0093, issue 1.

**S. S. Pidbereznyi, Ye. A. Menshenin, D. V. Fedorchenko**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,  
NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine*

### **Three-Dimensional Modeling as a Tool for Improving the Safety Culture During Work at Radiation-Nuclear Facilities**

As work is planned at the Shelter object (SO), minimizing doses to the personnel involved in these work is of great importance. This is of particular importance for the construction work with the dismantling of the structure, which is characterized by large collective effective doses, which are taken by the personnel during the hour of its implementation. The need to assign personnel doses, as well as optimize approaches to the radiation protection and, first of all, biological protection, is related to this already at the design stage. As the radiation situation will change during the dismantling of unstable structures, design solutions must take into account possible changes in the radiation dose when planning protective measures.

To determine the intensity of the gamma radiation dose, a method of mathematical modeling based on the “point kernel” model is proposed. This approach makes it possible to carry out calculation and analysis of the radiation situation practically in real time.

By means of the ChNPP VRdose Planner Pro program, a three-dimensional model of the SO roof outer shell with selected sources of gamma radiation and building structures with the protective screens properties was built. The radiation situation analysis was made and a radiation field visual display above the roof was shown. Models of building structures were created, which to some extent shield gamma radiation emanating from the SO Central Hall. Three-dimensional modeling of the early dismantled building structures was carried out using the program ChNPP VRdose Planner Pro v. 2.2.2.

The application of methods of modeling radiation conditions during planning and execution of work in radiation-hazardous conditions will make it possible optimizing design solutions regarding the dismantling of unstable structures of the Shelter object, as well as optimizing the structure of radiation protection of personnel. The software package is a convenient tool for performing calculations of estimated exposure doses in radiation-hazardous conditions, enables quick and visual modeling of alternative work execution options, and enables optimization of the work performance process and personnel behavior in radiation-hazardous conditions. Based on the simulation, it is possible to create an interactive software package on the Chornobyl nuclear power plant training center for detailed personnel education and training. The results of the radiation situation analysis can be used in the performance of work planning in radiation-hazardous conditions to ensure the personnel protection in accordance with the ALARA principle.

*Keywords:* ChNPP VRdose Planner Pro v. 2.2.2, gamma radiation, Shelter object.

### **References**

1. Batii V. G., Pidbereznyi S. S., Stoianov A. I. (2014). [Volume distribution fields of gamma radiation in the area of the central hall of the 4th unit of Chornobyl NPP]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 23, pp. 66–73. (in Rus.)
2. Pashynov M. V., Pidbereznyi S. S., Paskevych S. A., Balan O. V., Lanskykh F. M. (2018). [The results of the HVRC VRDOSE PLANNER test for assessing doses for personnel with radiation-insecure minds]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 31, pp. 127–134. (in Ukr.)
3. Balan O. V., Lanskykh F. V., Paskevych S. A., Pidbereznyi S. S. (2021). [Modeling of the radiation situation during the “early” dismantling of building structures of the Shelter object]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 22, no. 3, pp. 67–77. (in Ukr.)
4. Balan O. V., Paskevych S. A., Pidbereznyi S. S., Fedorchenko D. V. (2021). [Modeling of the radiation situation when handling spent nuclear fuel]. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, vol. 22, no. 3, pp. 249–258. doi.org/10.15407/jnpae2021.03.249. (in Ukr.)
5. Batii V. G., Romanov D. N., Pidbereznyi S. S., Stoianov A. I., Scherbin V. N. (2014). [Computer modeling of the process of extracting fuel-containing materials from

- the upper elevations of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 23, pp. 74–81. (in Ukr.)
6. Balan O. V., Batii V. G., Glebkin S. I., Lagunencko A. S., Pidberezhnyi S. S., Rudko V. M., Shcherbin V. N. (2015). [The basic technological solutions of fuel containing materials removal from the upper levels of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 25, pp. 83–93. (in Ukr.)
  7. Szőke I. (2012). New computational model for areal and personal monitoring in nuclear environments (HWR-1030), OECD Halden Reactor Project, Institutt for energiteknikk (IFE), Norway.
  8. Szőke I., Louka M. N., Bryntesen T. R., Bratteli J., Edvardsen S. T., Rø-Eitrheim K. K., Bodor K. (2014). Real-time 3D radiation risk assessment supporting simulation of work in nuclear environments. *Journal of Radiological Protection*, vol. 34, pp. 389–416.
  9. *Chernobyl Decommissioning Visualization Center: to model the safety*. SSE ChNPP : official website. Available at: <https://chnpp.gov.ua/en/infocenter/news/5230-chernobyl-decommissioning-visualization-center-to-model-the-safety?layout=default>.
  10. Vabø R., Piotrowski L., Rindahl G. (2010). 3D representation of radioisotopic dose rates within nuclear plants for improved radioprotection and plant safety. *Nucl. Saf. Simul.*, no. 1, pp. 127–133.
  11. Durani L. (2009). *Update to ANSI/ANS-6.4.3–1991 for low-Z and compound materials and review of particle transport theory*. Department of Mechanical Engineering, University of Nevada, Las Vegas, p. 221.
  12. American Nuclear Society — Working Group ANS-6.4.3 (1992). *American National Standard for Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials* (ANSI/ANS-6.4.3–1991).
  13. Shimizu A., Onda T., Sakamoto Y. (2004). Calculation of gamma-ray buildup factors up to depths of 100 mfp by the method of invariant embedding, (III) — generation of an improved data set. *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 41, no. 4, pp. 413–424.
  14. Yoshida Y. (2006) Development of fitting methods using geometric progression formulae of gamma-ray buildup factors. *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 43, no. 12, pp. 1446–1457.
  15. Hubbell J. H. (1982). Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, vol. 33, no. 11, pp. 1269–1290.
  16. ICRP (2007). *The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103; Ann. ICRP 37 (2–4).
  17. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) (1992). *Measurements of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations (Report 47)*. Bethesda, MD: ICRU Publications.
  18. Becker D., Kaul A. (eds) (2005). *Radiological Protection*. Landolt-Bornstein — Group VIII Advanced Materials and Technologies. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. Vol. 4. Berlin: Springer, 455 p. Pavlovskiy L. I., Khomenko D. O., Yehorov V. V. (2022). [Determination of radiation conditions in the areas of work on the dismantling of unstable structures]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 25, no. 3, pp. 16–23. (in Ukr.)
  19. Pavlovsky L. I., Khomenko D. O., Yehorov V. V. (2022). [Determination of radiation conditions in the areas of work on the dismantling of unstable structures]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 3 (25), pp. 16–23. (in Ukr.)
  20. Balan O. V., Lansikh F. V., Paskevych S. A., Pidberezhnyi S. S. (2021). [Modeling of the radiation situation during the “early” dismantling of building structures of the Shelter object]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 22, no. 3, pp. 67–77. (in Rus.)
  21. *FCM atlas, classification, 2D models*. SIP-EBPD-R-0093 (Issue 1).

Надійшла 15.07.2023

Received 15.07.2023