

О. В. Балан<sup>1</sup>, Ф. В. Ланських<sup>2</sup>, С. А. Паскевич<sup>1</sup>, С. С. Підберезний<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

<sup>2</sup> ДСП «Чорнобильська АЕС», Славутич, 07101, Україна

## Моделювання радіаційної обстановки під час «раннього» демонтажу будівельних конструкцій об'єкта «Укриття»

*Ключові слова:*

ChNPP VRdose Planner,  
гамма-випромінювання,  
потужність амбієнтного  
еквівалента дози,  
об'єкт «Укриття»

Розроблено модель процесу «раннього» демонтажу будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» у програмі ChNPP VRdose Planner. На основі експериментальних даних проведено математичне моделювання гамма-полів і побудовано просторові розподіли потужності дози гамма-випромінювання над покрівлею центрального залу об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС. Отримані розподіли проаналізовано з метою уточнення розташування найбільш інтенсивних джерел гамма-випромінювання, визначено характеристики й місця розташування джерел іонізуючого випромінювання, показано візуальне відображення зміни радіаційного поля над покрівлею об'єкта «Укриття».

### Вступ

В Інституті проблем безпеки АЕС НАН України комп'ютерне моделювання широко використовувалося для вирішення різних груп завдань включно з моделюванням радіаційної обстановки в об'єкті «Укриття» й поблизу нього, а саме:

об'ємний розподіл полів гамма-випромінювання [1];  
забезпечення радіаційної безпеки у процесі діяльності в радіаційно небезпечних зонах [2];

моделювання радіаційно небезпечних зон з метою оптимізації дозових навантажень персоналу [3, 4];

розробка технічних пропозицій щодо організації процесу вилучення паливовмісних матеріалів (ПВМ) [5, 6] та ін.

Під час планування робіт на об'єкті «Укриття» велике значення приділяється мінімізації доз персоналу, який бере участь у цих роботах. Особливе значення це набуває під час виконання будівельно-монтажних робіт з демонтажу конструкцій, що характеризуються великими колективними ефективними дозами, затраченими під час їхньої реалізації.

У зв'язку з цим уже на етапі проектування виникає необхідність в оцінці доз персоналу, а також оптимізації заходів протирадіаційного і, у першу чергу, біологічного захисту.

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

Оскільки під час проведення робіт із демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» радіаційні умови будуть змінюватися, то проектні рішення повинні враховувати можливі зміни дози опромінення під час планування захисних заходів. Для розрахунку потужності дози гамма-випромінювання під час виконання робіт пропонується застосувати метод математичного моделювання на основі моделі «точкового джерела» (point kernel) [7]. Такий підхід дає змогу проводити розрахунок та аналіз радіаційних умов практично в реальному масштабі часу [8]. У цій роботі

для проведення такого розрахунку використовувався програмний продукт ChNPP VRdose Planner Pro v. 2.2DEV-0, розроблений у рамках проекту «Центр візуалізації зняття з експлуатації ЧАЕС — розширення і оптимізація Планувальника ЧАЕС» в Інституті енергетичних технологій (IFE), Норвегія [9]. Програмний продукт включає в себе розрахунковий модуль на основі моделі точкового джерела, а також сучасні засоби візуалізації та аналізу даних, отриманих у результаті розрахунків. Необхідно зазначити, що у випадку застосування цієї програми залишається можливість візуалізації та аналізу даних, отриманих із зовнішніх джерел, таких як експериментальні вимірювання або розрахунок методом Монте Карло.

У статті наведено аналіз радіаційної обстановки над покрівлею об'єкта «Укриття», зокрема створені моделі будівельних конструкцій, які деякою мірою екранують гамма-випромінювання із центрального залу (ЦЗ) об'єкта «Укриття», а також зроблено висновки про основні джерела випромінювання.

#### **Центральний зал об'єкта «Укриття» як основне джерело формування гамма-випромінювання**

Підлога ЦЗ знаходиться на позначці 35,50 м між будівельними осями І–Н, 40–49 і займає площу  $\approx 1\,130\text{ м}^2$ . Вигляд ЦЗ до аварії 1986 р. показано на рис. 1. Слід зазначити, що в умовах штатної роботи енергблока в ЦЗ проводилися різні роботи з втручанням в активну зону (АЗ) реакторної установки 4-го енергблока Чорнобильської АЕС: завантаження в технологічні канали тепловидільних касет (ТВК), перевантаження ТВК з одного каналу в інший, вивантаження відпрацьованих ТВК у басейн витримки, установка каналів із датчиками контролю енерговиділення іонізаційних камер. У технологічних каналах розташовувалися ТВК, що складаються з двох паливних тепловидільних збірок — нижньої і верхньої у зборі з підвіскою і запірної пробкою. Кожна тепловидільна збірка зібрана з 18 стрижневих твелів із цирконієвого сплаву з довжиною тепловидільної частини 3,5 м з таблетками з двоокису урану. В АЗ було розміщено 1 661 технологічний канал, 227 каналів системи управління захистом і 156 каналів охолодження відбивача АЗ.

«Свіже» паливо у вигляді ТВК розташовувалось на східній стіні ЦЗ, де знаходився так званий вузол розвішування, до складу якого входили сходи та майданчики для огляду й контролю розвіша-

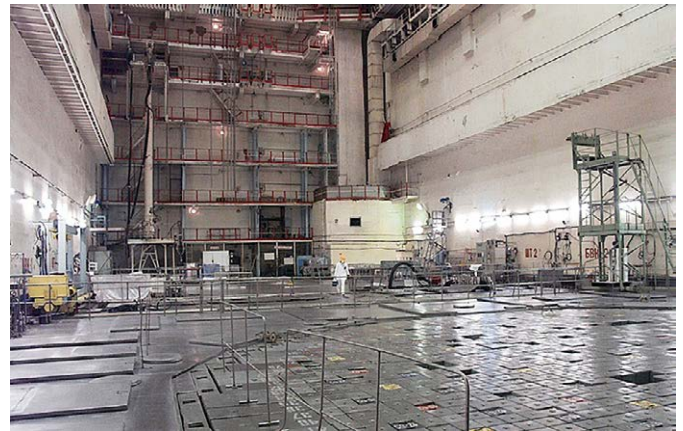


Рис. 1. Загальний вигляд ЦЗ енергблока ЧАЕС із верхньою плитою біологічного захисту реакторної установки. На стіні розташовано вузол розвішування «свіжого» палива — ТВК

них ТВК. Крім того, ЦЗ був оснащений великим мостовим краном для монтажних і демонтажних робіт та малим мостовим краном для переміщення розвантажувально-завантажувальної машини (РЗМ), яка у свою чергу здійснювала вивантаження/завантаження ТВК і каналів системи управління захистом у реакторну установку [10].

У підлозі ЦЗ були розташовані люки північного й південного басейнів витримки відпрацьованого ядерного палива, де на момент аварії в південному басейні витримки знаходилися 129 відпрацьованих ТВК.

У результаті запроектої аварії, пов'язаної з перегрівом реакторної установки та вибухом накопиченого водню, будівля 4-го енергблока разом із ЦЗ була зруйнована, що спричинило викид елементів АЗ, загоряння та ураження території позамежними дозами радіоактивного випромінювання.

За наявними даними обстежень 4-го енергблока було встановлено, що АЗ у шахті реактора (приміщення 504/2) відсутня. Частина АЗ (близько 10%) було виявлено на покрівлях 3-го і 4-го енергблоків і блока В (рис. 2). Частина графітової кладки та інших фрагментів активної зони (ФАЗ) виявилася в ЦЗ 4-го енергблока, особливо біля східної стіни (рис. 3), на конструкціях колишнього вентиляційного центру та на перекриттях приміщень барабан-сепараторів (див. рис. 2) [10].

Як наведено в роботі [10], місця накопичення ФАЗ у ЦЗ визначалися двома процесами. Перший процес — це розлітання дрібних ФАЗ, які сформували шар, що покрив ділянки ЦЗ, найближче розташованих до центру вибуху. Це безпосередньо сам ЦЗ, перекриття приміщень барабан-сепараторів і дах блока В біля вентиляційної труби. Другий процес — це

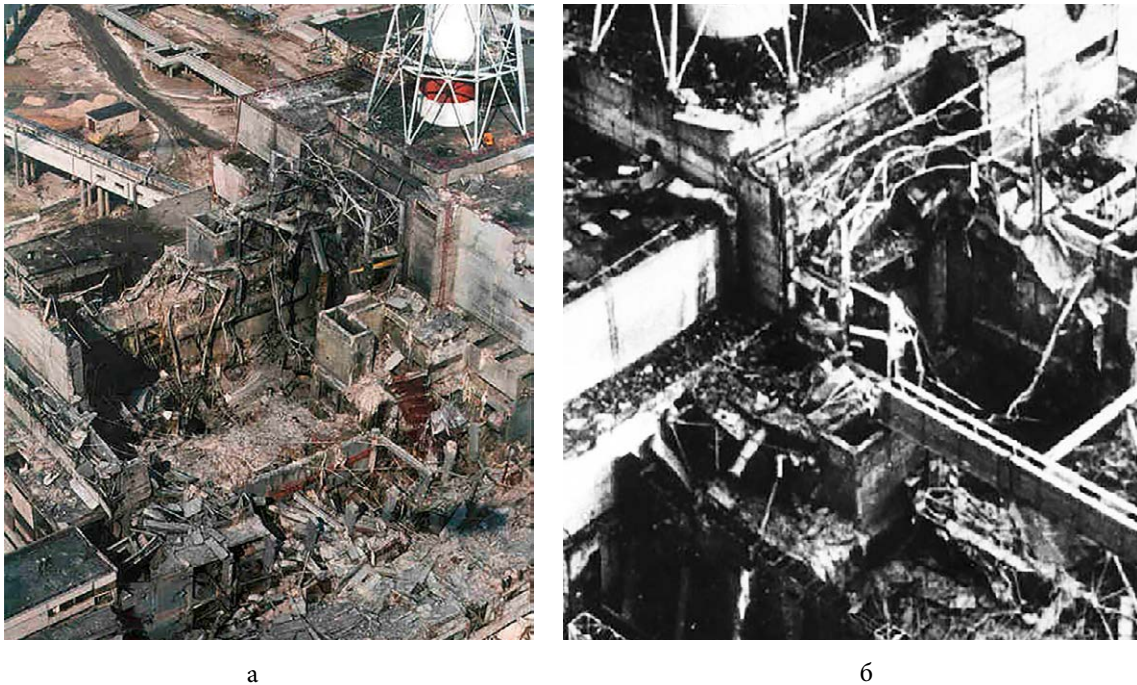


Рис. 2. Зруйнований 4-й енергоблок (а) і східна стіна ЦЗ (б) із залишками елементів вузла розвішування «свіжого» палива

зрушення цілісних конструктивів, основним з яких є верхня плита біологічного захисту реакторної установки (схема «Е») із залишками компонентів АЗ. Виходячи з такого твердження, оцінка кількості ФАЗ в ЦЗ також може проводитися двома методами:

умовно рівномірний розподіл ФАЗ по всьому ЦЗ — у цьому випадку визначальним фактором є щільність випадання ФАЗ і площа ЦЗ;

локальні, компактні скупчення ФАЗ, що склалися в результаті аварійних процесів і заходів з ліквідації наслідків аварії (схема «Е» із залишками АЗ, завал біля східної стіни, ФАЗ на майданчиках вузла розвішування ТВК східної стіни ЦЗ).

На рис. 4 наведена картограма потужності експозиційної дози над ЦЗ до демонтажу «легкої» покрівлі й накату з труб, побудована за даними роботи [1]. Як



Рис. 3. Вузол розвішування «свіжого» палива після аварії (а), зруйновані «свіжі» ТВК (б)

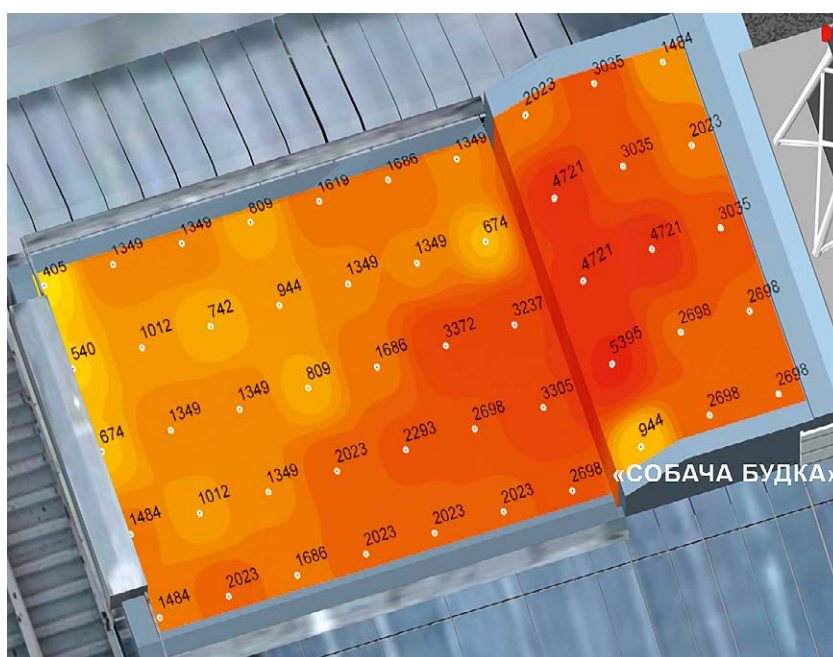


Рис. 4. Картограма потужності експозиційної дози (мР/год) над ЦЗ за показниками на 2015 р.

видно з картограми, максимальні значення потужності експозиційної дози, що перевищують її мінімальні значення в кілька разів, зафіксовані над східною частиною ЦЗ. Найбільші скупчення уламків ТВК спостерігаються біля східної стіни ЦЗ і на перекритті приміщення 1005/2 як результат скидання ФАЗ з даху блока В (рис. 5 і 6). На рис. 7 показано розташування місць зйомки фотографій, наведених на рис. 3 і 6.

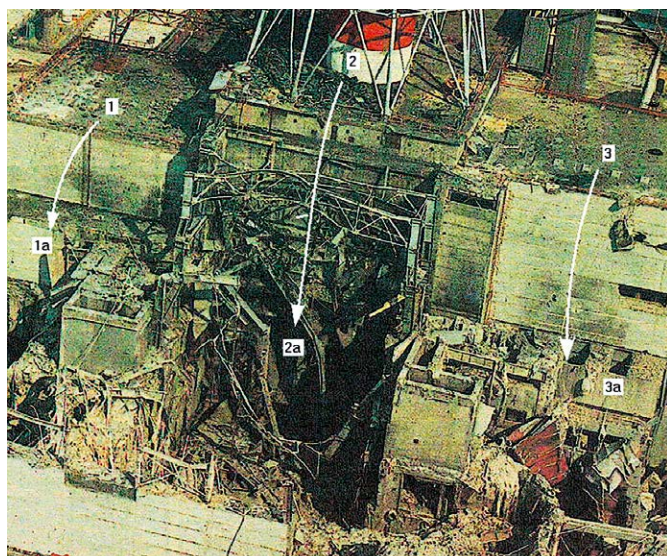


Рис. 5. Напрямки скидання ФАЗ із ділянок покрівлі блока В і майданчиків вентиляційної труби у розвал ЦЗ (стрілки 2 і 2а) і на перекритті приміщень, що межують із ЦЗ (стрілки 1 і 1а та 3 і 3а)

Високі значення потужності експозиційної дози обумовлені наявністю ФАЗ і ПВМ, розкиданих вибухом на верхні позначки східної стіни ЦЗ та майданчики обслуговування вузла розвішування «свіжих» ТВК, тобто джерела радіаційного випромінювання, що розташовані на малій відстані від накату з труб. Максимальні значення потужності експозиційної дози зафіксовані над металоконструкціями блока «собака будка», де накат із труб відсутній, що призводить до зменшення екрануючого ефекту від джерел гамма-випромінювання.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок, що східна стіна ЦЗ — це скупчення фрагментів АЗ у вертикальній площині, розташоване від висотної позначки 38,0 м до висотної позначки 64,0 м (заввишки близько 26 м, шириною близько 23 м і товщиною 3 м).

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

ChNPP VRdose Planner є програмним інструментом для комп'ютерного моделювання радіологічного середовища у реальному часі та планування послідовності дій. Моделювання здійснюється в безпосередньо існуючому середовищі, в умовах оптимізації захисту від гамма-випромінювання та дає можливість підготовки звітів про плани роботи з оцінками доз. У програмі ChNPP VRdose Planner Pro реалізовані



Рис. 6. Приміщення 1005/2 (операторська РЗМ), графітові блоки і ФАЗ

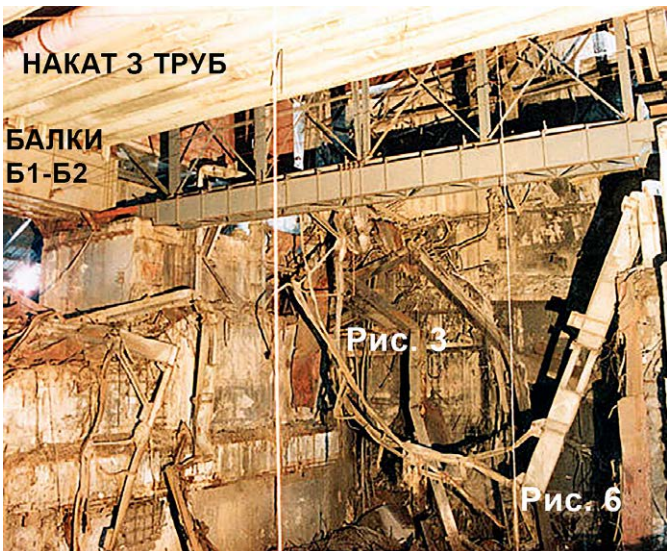


Рис. 7. Вигляд ЦЗ з елементами будівельних конструкцій, розташування місць фотографування зображень на рис. 3 і 6

такі алгоритми розрахунку дозових еквівалентів гамма-випромінювання для віртуальних дозиметрів:

1. Базова розрахункова модель основана на методі «точкового джерела» (point kernel), яка використовує коефіцієнти ослаблення випромінювання в речовині та чинники накопичення для визначення еквівалентної дози.

2. Розширена розрахункова модель — це розширена версія базової моделі, яка використовує для розрахунку коефіцієнти перетворення флюенсу в дозу та відповідні коефіцієнти накопичення. Вона використовується для розрахунку амбієнтного еквівалента дози  $H^*(10)$  і застосовується під час розрахунку

ку потужності амбієнтного еквівалента дози (ПЕД) у цій роботі.

3. Алгоритм для розрахунку еквівалентної індивідуальної дози  $H_p(10,00)$ .

Питання теорії та принципи моделювання потужності дози (створення алгоритмів розрахунку, моделі тощо) детально викладені розробниками цього програмного засобу в [7, 8].

На рис. 8 наведено інтерфейс програми ChNPP VRdose Planner з моделлю зовнішньої оболонки покрівлі об'єкта «Укриття», будівельними конструкціями, які мають властивості захисних екранів, джерел гамма-випромінювання, а також картограмою ПЕД на позначці 67,5 м.

### Моделювання полів дозового навантаження над «легкою» покрівлею і накатом із труб над ЦЗ

Метою проведення роботи було отримання якісних оцінок полів дозового навантаження в місцях виконання робіт з демонтажу «легкої» покрівлі та накату з труб, необхідних для розробки робочого проекту демонтажу (розрахунку необхідного біологічного захисту, зменшення колективної дози персоналу тощо). Було запропоновано розглянути два сценарії опромінення.

Сценарій 1 — фаза після завершення будівництва НБК (існуючі конструкції об'єкта «Укриття» і машинного залу 4-го блока після демонтажу вентиляційної труби ВТ-2, враховуючи конструкції арки НБК разом із західною і східною торцевими стінами).

Сценарій 2 — фаза закінчення «раннього» демонтажу (те саме, що і сценарій 1, але з видаленими конструкціями об'єкта «Укриття», передбаченими «раннім» демонтажем).

На рис. 8 подана картограма ПЕД над ЦЗ до демонтажу «легкої» покрівлі та накату з труб, побудована геостатистичним методом інтерполяції кригінг. Дані вимірювань ПЕД на 2000 р. (69 точок вимірювань у діапазоні висот 64,7–74 м) узяті з роботи [1] і перераховані на 2022 р. У роботі [11] як основне джерело гамма-випромінювання об'єкта «Укриття» вказаний  $^{137}\text{Cs}$ . У процесі радіоактивного розпаду  $^{137}\text{Cs}$  випромінюються гамма-кванти переважно з енергією 662 кеВ. У результаті подальшої взаємодії з речовиною ці гамма-кванти втрачають частину своєї енергії. Наприклад, гамма-квант, одноразово розсіяний під кутом  $90^\circ$ , має енергію 288 кеВ, а під кутом  $180^\circ$  — 184 кеВ. Середня енергія гамма-квантів різняться по приміщеннях об'єкта «Укриття» та знаходиться в діапазоні 150–400 кеВ.

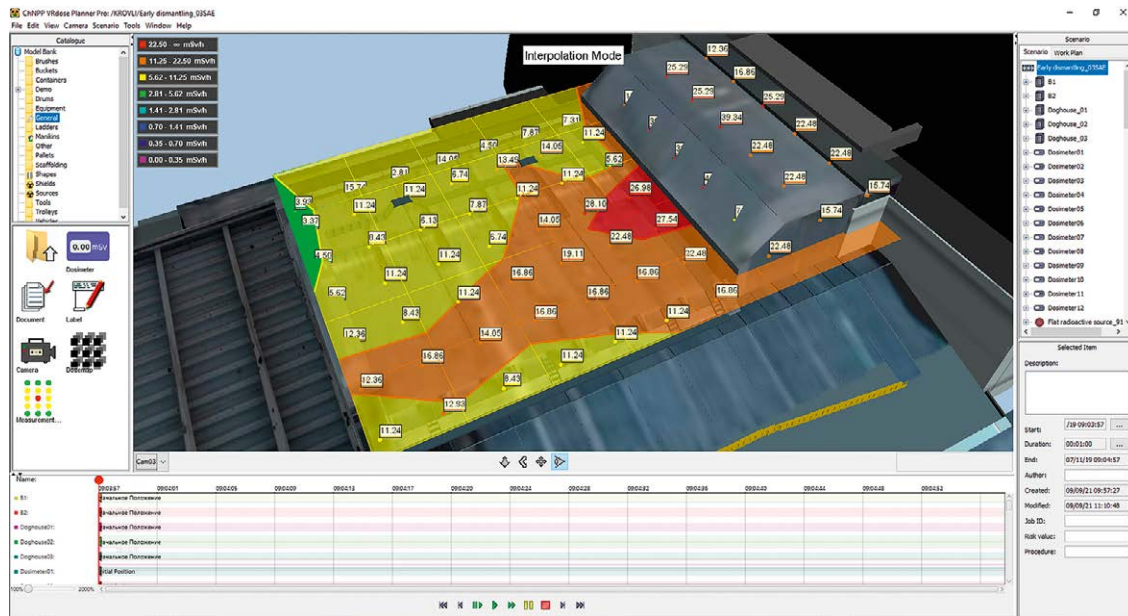


Рис. 8. Комп'ютерна модель об'єкта «Укриття» у програмі ChNPP VRdose Planner. Картограма ПЕД ( $\text{м}^3\text{в}/\text{год}$ ) над ЦЗ за показниками на 2022 р. Конструкції НБК умовно не показані

Слід зазначити, що доступна на сьогодні інформація про енергетичний склад випромінювання має дуже обмежений характер. Тому в нашому випадку було змодельовано джерело з ефективною енергією 662 keV (як уособлення ефективної енергії випромінювання біля об'єкта «Укриття»). Під «ефективною енергією» в цій роботі розуміється енергія моноенергетичного гамма-випромінювання, кратність ослаблення якого дорівнює кратності ослаблення реального гамма-випромінювання з певним спектральним розподілом [12].

Подальше уточнення й підвищення достовірності оцінок доз неможливе без отримання уточнених входних даних про характеристику джерел, у першу чергу енергетичних і кутових, а також верифікації модельних припущень шляхом прямих вимірювань гамма-полів у повітряному просторі об'єкта «Укриття».

Для оцінки ефекту демонтажу покрівлі ЦЗ виникла потреба в детальній інформації про конструкції покрівлі об'єкта «Укриття» і матеріалах, з яких вони виконані, включаючи металоконструкції «легкої» покрівлі та накату з труб. При цьому береться до уваги, що накат із труб складається з 27 сталевих труб довжиною 35,1 м, діаметром 122 см, товщиною стінки 1,52 см.

Інше модельне припущення стосується матеріалу та внутрішньої структури будівлі об'єкта «Укриття». У розробленій моделі було прийнято, що всі структури об'єкта «Укриття», які моделюються, складаються з монолітного бетону. Для більшої частини елементів об'єкта «Укриття» (каскадна стіна, піонерна стіна, контрфорсна стіна) це припущення абсолютно виправдане, для

інших елементів (машинний зал, ЦЗ) має місце деяке спрощення, яке, за нашими оцінками, не повинно мати істотного впливу на результати розрахунків.

Іншим елементом прийнятої моделі, що стосується характеристик джерела, є представлення гетерогенних джерел у вигляді суперпозиції джерел різної інтенсивності і форми. Необхідність такого представлення була викликана тим, що картограми радіаційної обстановки на покрівлях об'єкта «Укриття» вказують на неоднорідність поля гамма-випромінювання, наявність плям і локальних максимумів потужності дози.

З аналізу результатів вимірювань [10] випливає висновок про наявність інтенсивних локальних джерел гамма-випромінювання в районах підлоги і східної стіни ЦЗ. Проте конкретних даних про місце розташування та характеристики вказаних джерел отримати не вдалося. Можна констатувати, що дефіцит такої інформації може сильно вплинути на результати моделювання.

Тому при проведенні розрахунків ПЕД у зонах проведення робіт, що розташовані на зовнішніх поверхнях об'єкта «Укриття», більш прийнятними є розрахунки з використанням еквівалентного поверхневого джерела.

Як основне джерело гамма-випромінювання була обрана площина, яка рівномірно забруднена  $^{137}\text{Cs}$  та розташовується на поверхні ЦЗ. Тобто ця площа практично дорівнює площі підлоги ЦЗ. Інші джерела розташовані на східній стіні ЦЗ. Параметри джерел випромінювання та розташування їх підібрані таким

чином, щоб створити поле, аналогічне наведеному на рис. 4. З цієї метою в моделі використовуються віртуальні дозиметри в кількості 12 шт., використання яких значно спрощує визначення параметрів джерел і розташування їх у просторі (рис. 9).

Радіаційний калькулятор ChNPP VRdose Planner використовується для розрахунку показників дози за допомогою методів візуалізації, дозових графіків та інших радіаційних інструментів. Калькулятори можуть використовувати джерела гамма-випромінювання й екрани в моделі, вимірювання

дози випромінювання або карти дози випромінювання як основи розрахунків.

У деяких ситуаціях може бути відоме місцезнаходження джерел гамма-випромінювання та вид активності, але не значення активності. ChNPP VRdose Planner підтримує функцію «Калькулятора активності джерел» — Source Activity Calculator.

«Калькулятор активності джерел» — це інструмент для зміни активності джерел, щоб розраховані значення потужності дози збігалися з вимірюваннями. Інструмент складається зі списку всіх

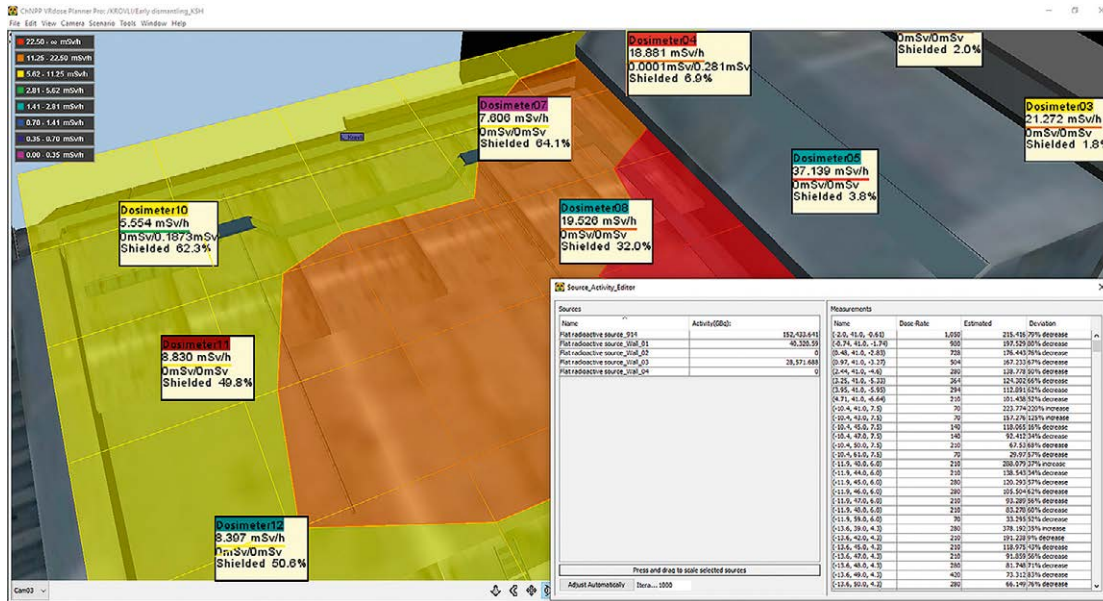


Рис. 9. Картограма ПЕД (мЗв/год) над ЦЗ. Показано розташування віртуальних дозиметрів і вікно «Source Activity Calculator»

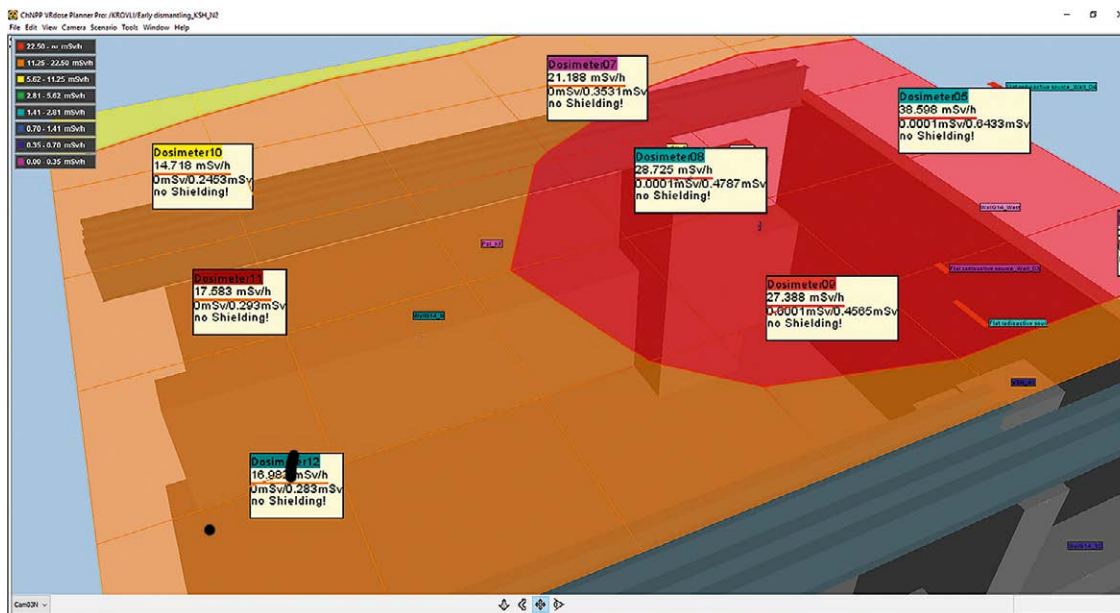


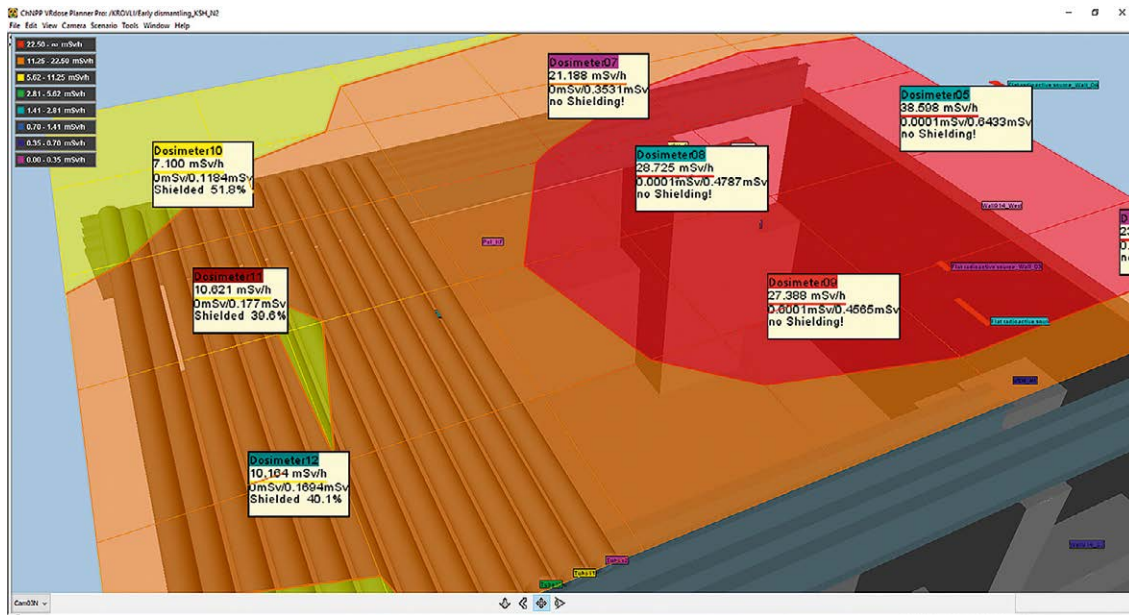
Рис. 10. Картограма ПЕД на позначці 67,5 м об'єкта «Укриття» після виконання «раннього» демонтажу конструкцій

джерел моделі з лівого боку і списку вимірювань, що виконувались у приміщенні, праворуч (див. рис. 9). Змінити окремі джерела можна вручну, але в складних середовищах це може бути дуже важко. Натиснення кнопки «Adjust Automatically» автоматично налаштовує активність усіх джерел так, щоб мінімізувати відхилення. Алгоритм використовує інтерактивний пошук для пошуку рішення. Враховуючи набір вимірювань, набір джерел та інформацію про екранування, можна змінити активність

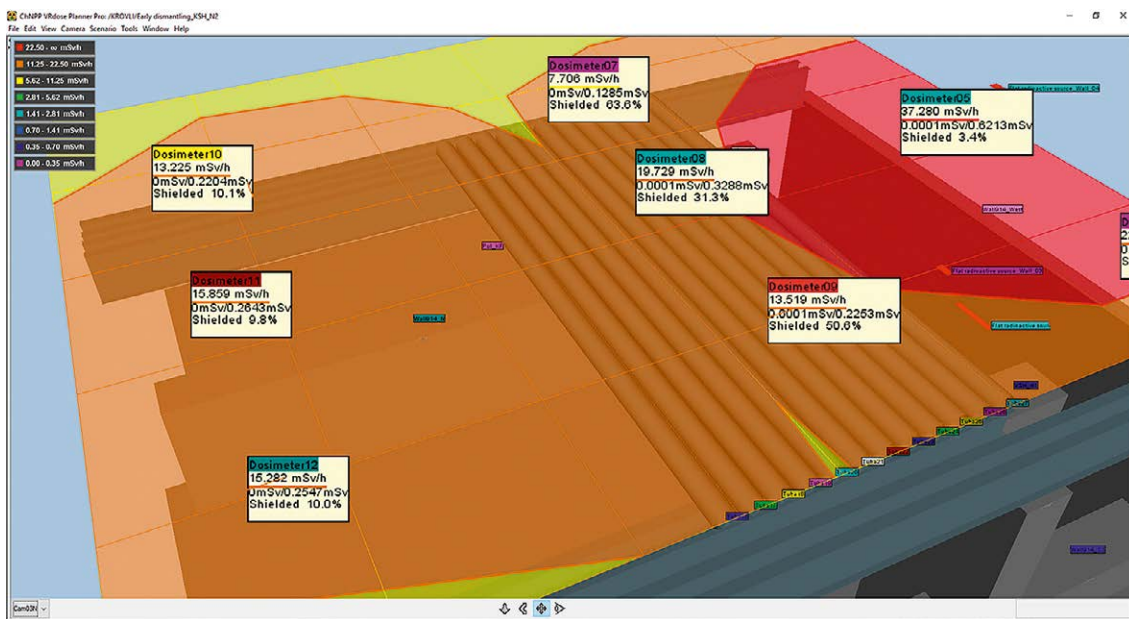
окремих джерел так, щоб результат розрахунку потужності дози в тій же точці, що й вимірювання, був близький до однакового.

### Результати оцінки розподілення гамма-полів над «легкою» покрівлею та накатом із труб ЦЗ

Тривимірний масив точок був побудований для об'єму ЦЗ розміром у напрямку «північ — південь» 50 м, у напрямку «схід — захід» 45 м та на висоті 26 м,



a



6

Рис. 11. Картограма на позначці 67,5 м після демонтажу частини накату з труб



точки якого розташовані за регулярною мережею з кроком 8,6 м, і для джерел з ефективною енергією 662 кеВ.

Основний внесок в екранування вносять елементи накату з труб, видалення їх призведе до значного зростання значень ПЕД, як показано на рис. 10.

Запропонована модель може дати вихідну інформацію для оцінювання потенційних дозових навантажень на персонал у разі ситуацій, пов'язаних із виконанням робіт з демонтажу «легкої» покрівлі та накату з труб ЦЗ.

На рис. 11 наведено картограму ПЕД після демонтажу накату з труб над ЦЗ, який виконується в напрямку зі сходу на захід (а) та із заходу на схід (б). З рисунка видно, що під час виконання демонтажу накату з труб із західного боку об'єкта «Укриття» забезпечується менший рівень ПЕД.

Дослідження, виконані фахівцями ППБ АЕС НАН України до та після встановлення арки НБК у проектне положення в характерних ключових зонах на об'єкті «Укриття», виявили істотні зміни у просторовому розподілі іонізуючого гамма-випромінювання навколо об'єкта «Укриття» [13].

Подальший аналіз результатів досліджень показав, що суттєву роль у формуванні просторового розподілу відіграють два фактори: екранування оболонкою арки розсіяного у шарі повітря випромінювання (ефект «skyshine») та відбиття випромінювання об'єкта «Укриття» від оболонки. Детальніше ці питання розглядаються в [13, 14].

Програма ChNPP VRdose Planner дозволяє експортувати дані ПЕД для масиву точок у вигляді таблиць формату \*.xlsx. З даних отриманих таблиць видно, що після демонтажу «легкої» покрівлі та накату з труб для цієї конфігурації і параметрів джерел гамма-випромінювання ПЕД зростає від 1,1 до 2,8 раза залежно від товщини екрануючих металоконструкцій. Отримані дані добре узгоджуються з наведеними в роботі [14], де зазначалося: «У даний час існує покриття об'єкта («легка» покрівля та накат із труб, сумарною товщиною близько 30 мм сталі) зменшує ПЕД над покриттям приблизно в три рази (для енергії випромінювання 400 кеВ)».

## Висновки

Східна стіна ЦЗ — це скупчення фрагментів АЗ у вертикальній площині, розташоване від висотної позначки 38,0 м до висотної позначки 64,0 м (заввишки близько 26 м, шириною близько 23 м і товщиною 3 м).

Засобами програми ChNPP VRdose Planner побудовано тривимірну модель зовнішньої оболонки покрівлі

об'єкта «Укриття» з будівельними конструкціями, що мають властивості захисних екранів, а також підібраними даними джерел гамма-випромінювання. Установлено, що демонтаж накату з труб слід починати із західного боку об'єкта «Укриття», тому що при цьому забезпечується менший рівень ПЕД.

Після демонтажу «легкої» покрівлі та накату з труб ПЕД на позначці 67,5 м зростає від 1,1 до 2,8 раза.

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 об'єкта «Укриття»;

розрахувати й оптимізувати структуру радіаційного захисту персоналу;

зменшити відмінність показників радіаційних умов 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 і Чернобиля. — 2014. — Вып. 23. — С. 66–73.
2. Компьютерное моделирование деятельности в радиационно-опасных зонах / А. А. Ключников, В. М. Рудько, В. Г. Батий [и др.] // Сб. науч. тр. Севастопол. нац. ин-та ядерной энергии и промышленности. — 2004. — Вып. 12. — С. 310–315.
3. Перспективы применения компьютерного моделирования радиационно-опасных зон в целях оптимизации дозовых нагрузок персонала / М. Н. Коротенко, И. К. Кравченко, В. М. Рудько [и др.] // Сб. науч. тр. Севастопол. нац. ин-та ядерной энергии и промышленности. — 2005. — Вып. 15. — С. 113–120.
4. Результаты 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 і Чернобиля. — 2018. — Вып. 31. — С. 127–134.

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 і Чернобиля. — 2014. — Вип. 23. — С. 74–81.
6. Принципові технологічні рішення із вилучення паливовмісних матеріалів з верхніх відміток об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, В. Г. Батий, С. І. Глебкін [та ін.] // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2015. — Вип. 25. — С. 83–93.
7. Szóke I. New Computational Model for Areal and Personal Monitoring in Nuclear Environments (HWR-1030) / I. Szóke, OECD Halden Reactor Project. — Institutt for energiteknikk (IFE), Norway, 2012.
8. Real-time 3D radiation risk assessment supporting simulation of work in nuclear environments / I. Szóke, M. N. Louka, T. R. Bryntesen [et al.] // J. Radiol. Prot. — 2014. — Vol. 34. — P. 389–416.
9. Створення та розвиток Центру візуалізації зняття з експлуатації блоків ЧАЕС. ДСП «ЧАЕС»: офіційний веб-сайт. Режим доступу: <https://chnpp.gov.ua/ru/186-proekty/zavershennye-proekty/4252-sozdanie-i-razvitie-tsentra-vizualizatsii-snyatiya-s-ekspluatatsii-blokov-chaes>.
10. FCM atlas, classification, 2D models / Атлас, классификация, 2-D модели ТСМ. SIP-EBPD-R-0093 (Issue no. 1).
11. Батий В. Г. Энергетические характеристики гамма-излучения объекта «Укрытие» в зонах производства работ по стабилизации / В. Г. Батий, Л. И. Павловский, В. М. Рудько // Проблемы Чернобиля. — 2004. — Вип. 1. — С. 58–64.
12. Отчет о состоянии безопасности объекта «Укрытие», т. 2, ред. 2. — ЧАЭС, 2006. — 443 с.
13. Проблемні питання в дослідженні радіаційної обстановки під час реалізації проєктів на об'єкті «Укриття» та шляхи вирішення їх / В. В. Єгоров, Л. І. Павловський, О. І. Стоянов, Д. В. Федорченко // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2017. — Вип. 29. — С. 85–90.
14. Динамика изменения радиационной обстановки вблизи объекта «Укрытие» после строительства нового кон-файнмента / В. Г. Батий, Н. А. Кочнев, В. А. Кузьменко, В. М. Рудько // Проблемы Чернобиля. — 2001. — Вип. 8. — С. 85–87.

---

**O. V. Balan<sup>1</sup>, F. V. Lanskyh<sup>2</sup>, S. A. Paskevych<sup>1</sup>, S. S. Pidbereznii<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine*

<sup>2</sup>*SSE “Chornobyl NPP”, Slavutych, Kyiv region, 07100, Ukraine*

## **Simulation of the Radiation Situation during the “Early” Dismantling of the Building Structures of the Shelter Object**

A model of the “early” dismantling of the building structures of the Shelter object is developed in the ChNPP VRdose Planner program. The ChNPP VRdose Planner software product was developed at the Institute for Energy Technology (IFE), Norway. ChNPP VRdose Planner is a tool for real-time computer simulation of the radiological environment and actions sequence planning. The simulation is performed in a directly existing environment, while optimizing radiation protection, and makes it possible to prepare reports on work plans with dose estimates.

Based on experimental data, mathematical modeling of gamma fields was carried out and spatial distributions of the power of gamma-radiation dose over the roof of the central hall of the “Shelter” object ChNPP. The distributions were analyzed to clarify the location of the most intense sources of gamma radiation, the characteristics and locations of the sources of ionizing radiation were determined, a visual display of the change in the radiation field above the roof of the Shelter object is shown.

The eastern wall of the central hall is an accumulation of fragments of the reactor core in the vertical plane, located from an altitude mark of 38.0 m to an altitude of 64.0 m — about 26 m high, about 23 m wide and 3 m thick.

It has been established that the dismantling of the roll-off from the pipes should be started from the western side of the Shelter, since this provides a lower level of ambient equivalent dose rate.

After dismantling the “light” roof and rolling up from pipes, the ambient equivalent dose rate at the 67.5 m mark increases from 1.1 to 2.8 times.

The use of the ChNPP VRdose Planner program for planning and performing installation activities, as well as the activities for the maintenance, repair and replacement of the equipment in the radiation-hazardous conditions will allow:

make justified decisions about the feasibility of a particular activity;

choose the best technical solutions to achieve set goals;

calculate or optimize the structure of radiation protection of the personnel.

The use of a computer model will allow selecting and optimizing design solutions for the unstable structures deconstruction, verify them for the compliance with the established characteristics and requirements, and create an interactive software package for the personnel training.

*Keywords:* ChNPP VRdose Planner, gamma radiation, ambient dose equivalent rate, the Shelter object.

## References

1. Batiy V. G., Pidbereznyi S. S., Stoyanov A. I. (2014). [Volume distribution of gamma radiation fields in the area of the central hall of the ChNPP power unit 4]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 23, pp. 66–73. (in Russ.)
2. Klyuchnikov A. A., Rudko V. M., Batiy V. G., Pidbereznyi S. S., Fedorchenko D. V. (2004). [Computer simulation of activities in the radiation-hazardous areas]. *Collection of Scholarly Works of the Sevastopol National Institute of Nuclear Energy and Industry*, vol. 12, pp. 310–315. (in Russ.)
3. Batiy V. G., Korotenko M. N., Kravchenko I. K., Pidbereznyi S. S., Rudko V. M. (2005). [Prospects for the use of computer simulation of the radiation-hazardous areas in order to optimize personnel dose burdens]. *Collection of Scholarly Works of the Sevastopol National Institute of Nuclear Energy and Industry*, vol. 15, pp. 113–120. (in Russ.)
4. Pashynov M. V., Pidbereznyi S. S., Paskevych S. A., Balan O. V., Lanskyh F. V. (2018). [Results of the HVRC VRDOSE PLANNER test for assessing the doses to be determined by the personnel at the visit to the radio-insecure minds]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 31, pp. 127–134. (in Ukr.)
5. Batiy V. G., Romanov D. N., Pidbereznyi S. S., Stoyanov A. I., Shcherbin V. N. (2014). [Computer simulation of the process of fuel-containing materials removal from the upper elevations of the Shelter Object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 23, pp. 74–81. (in Russ.)
6. Balan O. V., Batiy V. G., Glebkin S. I., Lagunencko O. S., Pidbereznyi S. S., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2015). [Principal technological solutions for the fuel-containing materials removal from the upper elevations of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 25, pp. 83–93. (in Ukr.)
7. Szóke 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. Szóke I., Louka M. N., Bryntesen T. R., Bratteli J., Edvardsen S. T., RøEitrheim K. K., Bodor K. (2014). Real-time 3D radiation risk assessment supporting simulation of work in nuclear environments. *J. Radiol. Prot.*, vol. 34, pp. 389–416.
9. Establishment and development of ChNPP Units Decommissioning Visualization Center (CDVC). Chornobyl Nuclear Power Plant: official website. Available at: <https://chnpp.gov.ua/en/187-projects/completed-projects/4262-chnpp-units-decommissioning-visualization-center-creation-and-development>.
10. FCM Atlas, Classification, 2D Models. SIP-EBPD-R-0093 (Issue 1).
11. Batiy V. G., Pavlovskiy L. I., Rudko V. M. (2004). [Energy characteristics of gamma radiation of the Shelter object in the areas of stabilization work]. *Problems of Chornobyl*, vol. 1, pp. 58–64. (in Russ.)
12. «Shelter» Object Safety Report. Volume 2, edition 2. Chornobyl NPP, 2006. 443 p. (in Russ.)
13. Yehorov V. V., Pavlovsky L. I., Stoyanov A. I., Fedorchenko D. V. (2017). [Problems of investigation of radiological conditions in the implementation of projects on the Shelter Object and the ways of their solutions]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, no. 29, pp. 85–90. (in Ukr.)
14. Batiy V. G., Kochnev N. A., Kuzmenko V. A., Rudko V. M. (2001). [Dynamics of changes of the radiation situation near the Shelter object after the construction of the New Safe Confinement]. *Problems of Chornobyl*, vol. 8, pp. 85–87.

Надійшла 20.10.2021

Received 20.10.2021