

**В. В. Деренговський, Є. А. Меньшенін**

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

## **Моделювання та візуалізація радіаційного стану на майданчику зберігання контейнерів ЦСВЯП за допомогою програмного комплексу ChNPP VRDose Planner**

### *Ключові слова:*

моделювання,  
візуалізація,  
радіаційний стан,  
потужність дози,  
відпрацьоване ядерне паливо,  
централізоване сховище  
відпрацьованого ядерного палива,  
VRDose Planner

Представлено результати тривимірного моделювання умов роботи персоналу в радіаційно небезпечних умовах Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива (ЦСВЯП) реакторів типу ВВЕР вітчизняних АЕС, виконаного за допомогою програмного комплексу ChNPP VRDose Planner. Оцінено дозові навантаження на персонал при здійсненні дозиметричного контролю під час виконання технологічних операцій та для контролю радіоактивного забруднення. Отримані дані моделювання показали високу збіжність з даними, що були отримані в умовах виконання науково-технічного супроводу робіт з будівництва і введення в експлуатацію ЦСВЯП.

### **Вступ**

Енергетичною стратегією України на період до 2030 року, схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 1071-р, передбачено будівництво централізованого сховища для довгострокового зберігання відпрацьованого ядерного палива Рівненської, Хмельницької та Южно-Української АЕС. Централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива (ЦСВЯП) реакторів типу ВВЕР вітчизняних АЕС розміщується в Чорнобильській зоні відчуження (Київська область, Іванківський район). Створення ЦСВЯП дозволить зміцнити енергетичну незалежність України, відмовившись від послуг Російської Федерації зі зберігання ВЯП, вартість яких постійно зростає. ЦСВЯП призначене для зберігання протягом 100 років 12 010 відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ВТВЗ) ВВЕР-1000 та 4 519 ВТВЗ ВВЕР-440 Рівненської, Хмельницької і Южно-Української АЕС. Зберігання відпрацьованого ядерного палива у ЦСВЯП реалізується

за технологією «сухого» зберігання компанії Holtec International. Відповідно до положень нормативного документа ОСПРБУ-2005 [1] категорія потенційної небезпеки підприємства (об'єкта) встановлюється з огляду на можливості опромінення персоналу та населення внаслідок потенційної радіаційної аварії на цьому підприємстві (об'єкті), згідно з яким ЦСВЯП належить до об'єктів з використанням радіаційно-ядерних технологій і відноситься до 1-ї (найбільш небезпечної) категорії підприємств. Тому контроль радіаційного впливу на довкілля та його мінімізація на персонал є актуальним завданням будівництва та введення в експлуатацію ЦСВЯП.

Система контролю процесу зберігання ВЯП у контейнері HI-STORM 190 на майданчику включає в себе:

- контроль процесу відведення тепла під час зберігання ВЯП у HI-STORM 190;

- контроль радіаційного стану на майданчику зберігання;

- контроль цілісності захисних і локалізуючих бар'єрів;

© В. В. Деренговський, Є. А. Меньшенін, 2021

контроль температури на поверхні контейнера HI-STORM 190.

На ЦСВЯП буде введено ступеневу систему радіаційного контролю, яка включає:

індивідуальний дозиметричний контроль переносними датчиками;

дозиметричний контроль у контрольних точках на майданчику зберігання і майданчику ЦСВЯП;

дозиметричний контроль зони спостереження за допомогою системи АСКРС (автоматизованої системи контролю радіаційного стану).

Технологія поводження з ВТВЗ у ЦСВЯП передбачає такі технологічні операції:

приймання вагон-контейнерного спецешелону в ЦСВЯП;

перевантаження багатоцільового контейнера (БЦК) із транспортного контейнера HI-STAR у контейнер для зберігання HI-STORM у будівлі приймання;

транспортування контейнера HI-STORM із БЦК на майданчик зберігання за допомогою вертикального контейнерного транспортера;

довгострокове зберігання контейнерів HI-STORM із ВТВЗ.

Для мінімізації доз персоналу під час обходів, дозиметричних вимірювань і контролю за технічним станом обладнання та інженерних систем були розроблені маршрути пересування персоналу. Для здійснення дозиметричного контролю під час виконання технологічних операцій та для контролю радіоактивного забруднення в складі системи радіаційного контролю ЦСВЯП застосовується переносне дозиметричне та радіометричне обладнання. Переносними приладами та лабораторним обладнанням здійснюється контроль радіаційних параметрів, які не можуть миттєво змінитися або пов'язані з тривалим часом накопичення через низьку концентрацію радіоактивних речовин, або в разі неможливості чи недоцільності контролю параметрів автоматизованої системи радіаційного контролю, наприклад контроль забрудненості поверхонь обладнання.

Для оцінки дозового навантаження на персонал сьогодні існує ефективний інструмент — програмний комплекс ChNPP VRDose Planner (далі — VRDose) [2], розроблений Інститутом енергетичних технологій (Норвегія). Програмний комплекс VRDose дозволяє створювати віртуальні моделі кожного робітника та відтворити детальний технологічний процес виконання робіт за участю людини. При цьому створюється візуальне зображення поведінки персоналу на всіх етапах проведення робіт. Програмний комплекс, створений для планування та здійснення робіт

у складних радіаційних умовах, дозволяє провести оптимізацію радіологічного захисту та вибрати найбезпечніші сценарії виконання операцій.

Отже, верифікація результатів, отриманих на етапі будівництва та введення в експлуатацію ЦСВЯП за допомогою програмного комплексу, є гарною нагодою для оцінки придатності застосування VRDose для інших проектних робіт, що будуть виконуватись як у рамках робіт з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, так і в інших проектах будівництва, експлуатації та виводу з експлуатації об'єктів з використанням радіаційно-ядерних технологій.

### Методи досліджень

Ефективним засобом розрахунку отриманих доз опромінення людини під час виконання радіаційно небезпечних робіт є програмний комплекс VRDose, який дає змогу інтерпретувати радіологічну інформацію на основі тривимірних моделей радіаційно небезпечних об'єктів, де планується здійснюватися діяльність людини. Це програмне забезпечення у своєму коді має математичний апарат, який здатен розраховувати накопичені дози персоналу в режимі реального часу.

Формування карти радіаційного забруднення можливе за допомогою самої програми, в інтерфейсі якої є база даних з вибором типу джерела і можливості задання фізичних параметрів (активність, густина, маса тощо). Також є можливість формувати радіаційний стан використовуючи точні дані вимірів на об'єктах — режим Dose Map. У базі даних програми є манекен, який можна наділяти різними приладами для кращого відображення роботи, а також моделювати рух по необхідній траєкторії. Крім того, у VRDose є можливість імпортувати 3D-моделі будь-яких об'єктів і будь-якої складності.

### Вихідні дані для моделювання джерела іонізуючого випромінювання

Майданчик ЦСВЯП є об'єктом на стадії будівництва і його ще не ввели в експлуатацію, отже на ньому немає джерел іонізуючого випромінювання, здатних вплинути на результати моделювання. Для моделювання радіаційного стану в цих умовах було використано та розширено модель точкового джерела. За допомогою віртуальних джерел іонізуючого випромінювання змодельовано 6 контейнерів HI-STORM 190, кожний з яких завантажено контейнерами МЦК-31 з 31 ВТВЗ.

**Таблиця 1. Ізотопний склад палива на ТВЗ (наведені дані по ізотопному складу палива для ізотопів, внесок яких у сумарну активність більше 0,1 %) і його активність**

Ізотоп	ВТВЗ ВВЕР-1000 вигорання 55 000 МВт · добу/т(U), витримка 6 років, збагачення 4,34 % <sup>235</sup> U (г)	$T_{1/2}$ , с	а. е. м., г/моль	N, Бк	N, ГБк
<sup>238</sup> Pu	$2,53 \cdot 10^2$	$1,66 \cdot 10^{11}$	238,0496	$2,67 \cdot 10^{12}$	2 671,28
<sup>241</sup> Pu	$9,13 \cdot 10^2$	$2,72 \cdot 10^{10}$	241,0569	$5,80 \cdot 10^{13}$	58 003,33
<sup>241</sup> Am	$3,51 \cdot 10^2$	$8,18 \cdot 10^{11}$	241,0568	$7,43 \cdot 10^{11}$	742,96
<sup>244</sup> Cm	63,1	$3,43 \cdot 10^{10}$	244,0628	$3,15 \cdot 10^{12}$	3 148,28
<sup>85</sup> Kr	12,3	$2,03 \cdot 10^{10}$	84,9125	$2,98 \cdot 10^{12}$	2 979,91
<sup>90</sup> Sr*	$3,40 \cdot 10^2$	$5,51 \cdot 10^{10}$	89,9077	$2,86 \cdot 10^{13}$	28 638,78
<sup>90</sup> Y*	$8,83 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^7$	89,9072	$2,96 \cdot 10^{13}$	29 645,22
<sup>106</sup> Ru*	2,15	$1,91 \cdot 10^9$	105,9073	$4,44 \cdot 10^{12}$	4 437,98
<sup>125</sup> Sb	1,5	$5,24 \cdot 10^9$	124,9053	$9,56 \cdot 10^{11}$	956,08
<sup>134</sup> Cs	16,4	$3,90 \cdot 10^9$	133,9067	$1,31 \cdot 10^{13}$	13 098,36
<sup>137</sup> Cs	$8,51 \cdot 10^2$	$5,68 \cdot 10^{10}$	136,9071	$4,57 \cdot 10^{13}$	45 692,66
<sup>137m</sup> Ba*	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$9,19 \cdot 10^3$	136,9058	$4,31 \cdot 10^{13}$	43 128,09
<sup>144</sup> Ce	1,04	$1,47 \cdot 10^9$	143,9136	$2,05 \cdot 10^{12}$	2 046,03
<sup>144</sup> Pr	$4,40 \cdot 10^{-5}$	$6,22 \cdot 10^4$	143,9133	$2,05 \cdot 10^{12}$	2 050,82
<sup>147</sup> Pm	21,1	$4,96 \cdot 10^9$	146,9151	$1,21 \cdot 10^{13}$	12 073,01
<sup>154</sup> Eu	17,7	$1,67 \cdot 10^{10}$	153,9230	$2,88 \cdot 10^{12}$	2 881,72

\* Радіонукліди, які відсутні в бібліотеці програмного комплексу VRDose.

Як вихідні дані для джерела іонізуючого випромінювання взято ТВЗ із відпрацьованим паливом ВВЕР-1000 зі ступенем вигорання 55 000 МВт · добу/т (U), витримкою 6 років і збагаченням 4,34 % по <sup>235</sup>U [3]. Ізотопний склад у [3] наведено в грамах. Для його перерахунку в Бк використовується формула

$$N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N_a \cdot \frac{m}{\mu}, \quad (1)$$

де  $N$  — активність елемента, Бк;  $T_{1/2}$  — період напіврозпаду елемента, с;  $N_a$  — число Авогадро,  $6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>;  $m$  — маса елемента, г;  $\mu$  — атомна одиниця маси елемента, г/моль.

Ізотопний склад ВЯП і перерахунок активності в ГБк представлено в табл. 1. Перерахунок у ГБк необхідний для зручності введення інформації в програмному комплексі VRDose.

ВТВЗ складається з таких зон: голівка, плenum, паливовмісна зона і хвостовик [3]. Вміст <sup>60</sup>Co в конструкційних матеріалах ТВЗ ВВЕР-1000 в перерахунку на 6 років витримки представлено в табл. 2. Консервативно вибираються ТВЗ-W із вмістом гадолінію, ступенем вигорання 55 000 МВт · добу/т (U), витримкою 3 роки і масовою часткою <sup>235</sup>U 2 %. Період напіврозпаду <sup>60</sup>Co становить 5,2713 року.

**Таблиця 2. Вміст <sup>60</sup>Co в конструкційних матеріалах ТВЗ ВВЕР-1000**

Зона	Витримка 3 роки, ГБк	Витримка 6 років, ГБк	Витримка 6 років, ГБк
Голівка	0,516	0,348	347,7984
Пленум	1,032	0,696	695,5969
Паливовмісна зона	5,158	3,477	3 476,636
Хвостовик	1,032	0,696	695,5969
$\Sigma$ <sup>60</sup> Co			5215,63

### Модель джерела іонізуючого випромінювання

Як джерело іонізуючого випромінювання в програмному комплексі VRDose вибирається модель лінійного джерела довжиною 4,57 м (довжина ВТВЗ) (рис. 1). Інформація з табл. 1 і 2 вноситься в якості джерела. У властивостях джерела зі списку підтримуваних ізотопів вибирається необхідний і вказується його активність в ГБк.

Усього в МЦК-31 локалізовано 31 ВТВЗ. Розташування ВТВЗ в МЦК-31 і модель, яка отримана

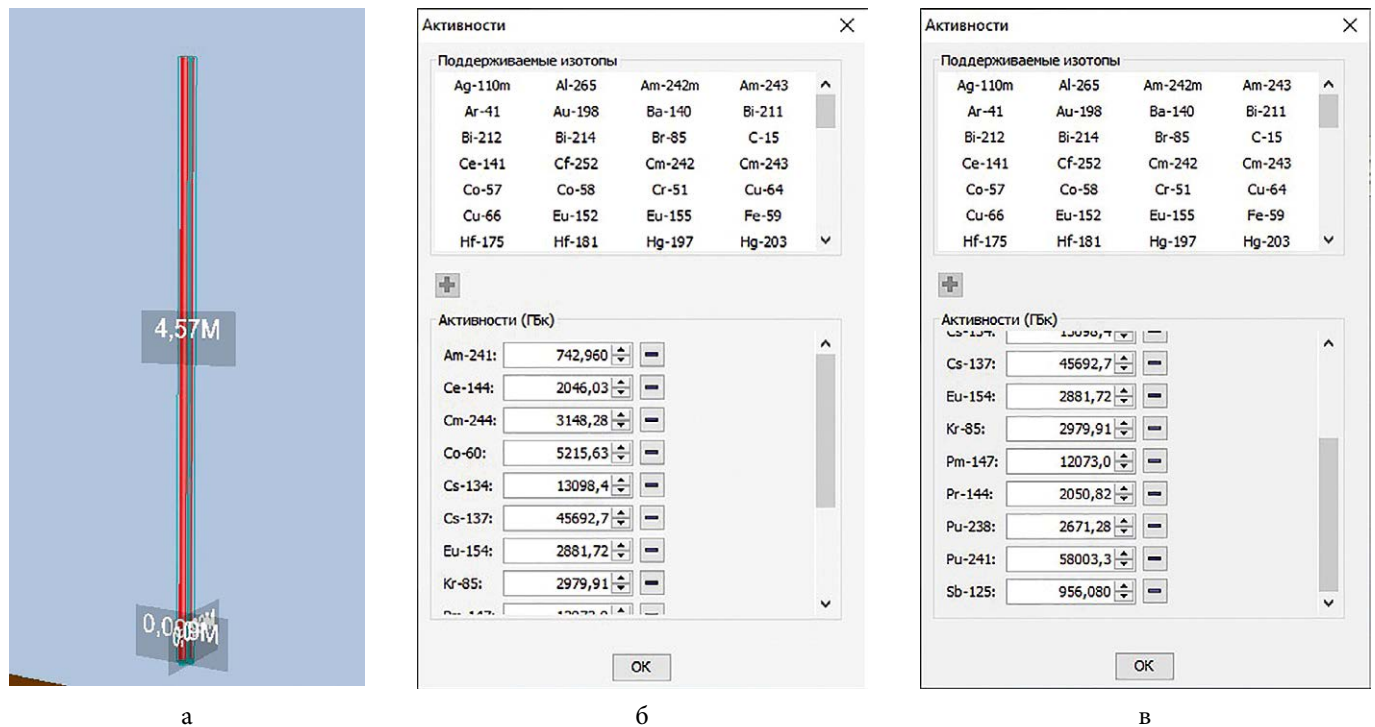


Рис. 1. Зовнішній вигляд лінійного джерела (а) і його радіонуклідний склад (б, в)

відповідно до цієї схеми за допомогою програмного комплексу VRDose, представлені на рис. 2.

### Модель МЦК-31 та HI-STORM 190

Контейнер МЦК-31 з 31 ВТВЗ поміщається всередину захисного контейнера HI-STORM 190 і встановлюється на майданчику зберігання ЦСВЯП на тривале зберігання. Геометричні характеристики і зовнішній вигляд контейнерів МЦК-31 і HI-STORM 190 представлені в [4]. Моделі обох контейнерів побудовані засоба-

ми програмного комплексу VRDose із циліндричних екранів (захистів). Геометричні характеристики елементів складових моделі контейнерів наведено в табл. 3. Матеріалом всіх складових елементів моделей МЦК-31 і HI-STORM 190, за винятком бетонного наповнювача контейнера і кришки HI-STORM 190, є сталь (рис. 3).

### Модель майданчика

Модель майданчика виконана в програмі для моделювання відносно простих тривимірних об'єктів

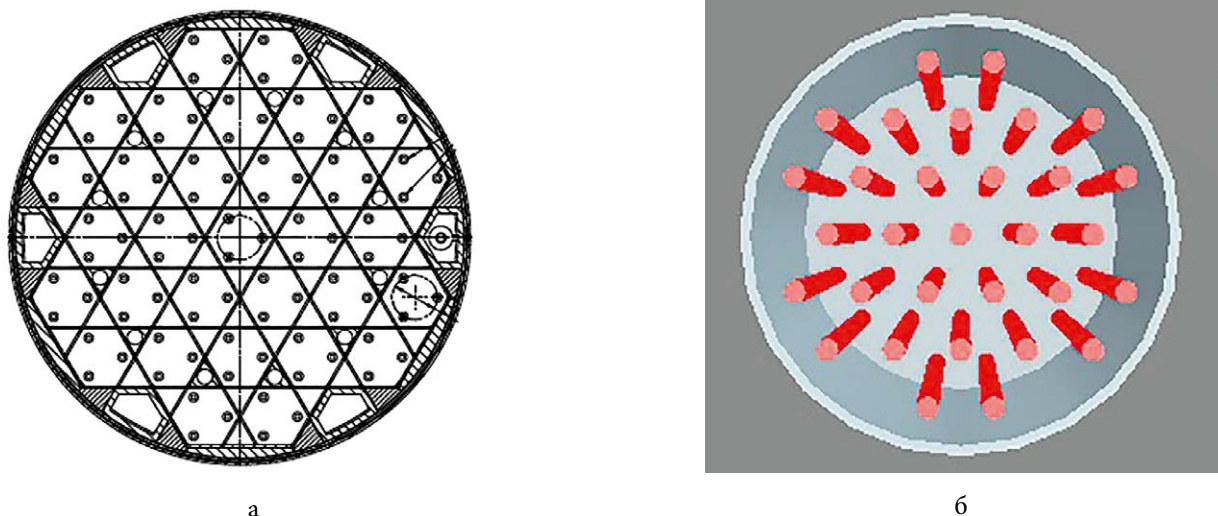


Рис. 2. Схематичне розташування ВТВЗ в МЦК-31 (а) і модель у програмному комплексі VRDose (б)

Таблиця 3. Геометричні характеристики елементів складових моделі контейнерів МЦК-31 та HI-STORM 190

Геометрична характеристика, мм	МЦК-31			HI-STORM 190					
	Дно	Обичайка	Кришка	Дно	Зовнішня обичайка	Внутрішня обичайка	Бетонний наповнювач	Пластина	Кришка бетонна
Висота	127	4618	302	76	5097	5097	5097	25	273
Зовнішній радіус	962	962	962	1778	1765	1047	1746	1765	1589
Внутрішній радіус	–	917	–	–	1746	1028	1047	–	–

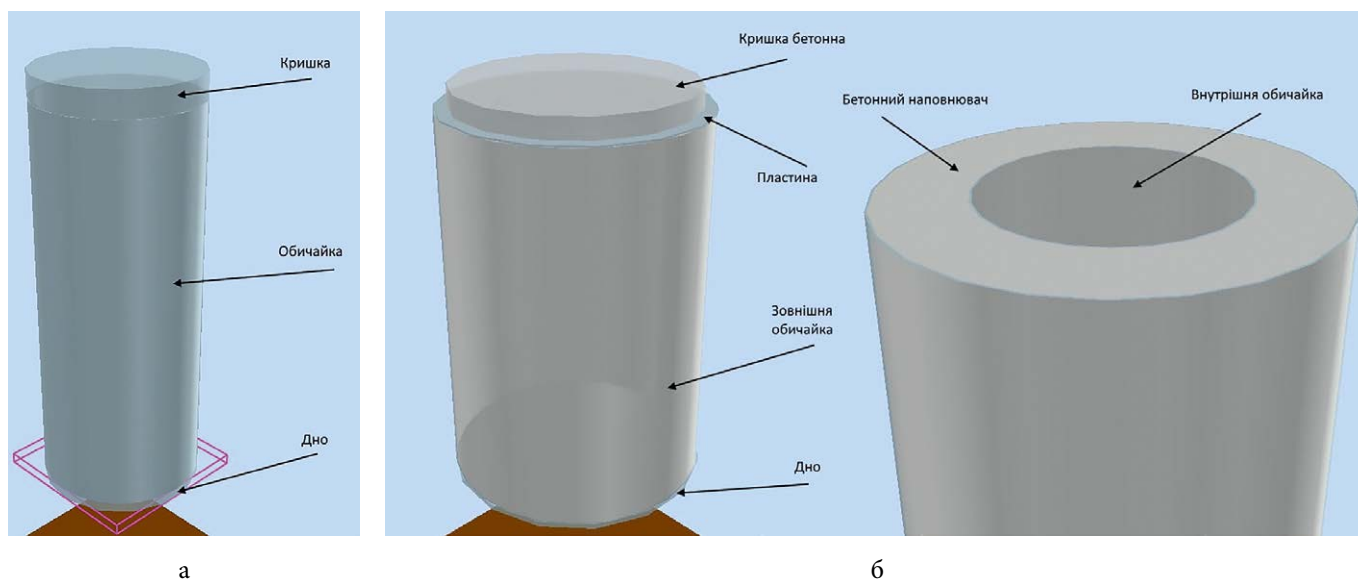


Рис. 3. Зовнішній вигляд і склад моделей МЦК-31 (а) та HI-STORM 190 (б)

SketchUp і є частиною майданчика ЦСВЯП, покритою асфальтом, розміром 67,5×63,0 м, по короткій стороні якої розташовані 3 лінії бетонних основ, згрупованих із трьох бетонних основ розміром 16,5×9,0 м. Зовнішній вигляд зверху і місця установки (центри установки) 6 контейнерів на одній з бетонних основ показано на рис. 4.

Модель майданчика імпортована в проєкт, створений у VRDose. Розташування моделей контейнерів HI-STORM 190 на одній з бетонних основ представлено на рис. 5. HI-STORM 190 № 1 і МЦК-31 показано на рис. 6. Для надання результатам моделювання більшої достовірності під 3D-моделлю майданчика змодельовано засобами програмного комплексу VRDose бетонну основу згідно з проєктом.

### Візуалізація радіаційного стану

Програмний комплекс VRDose дозволяє моделювати і представляти радіаційну обстановку в зручному і зрозумілому для кінцевого користувача вигляді.

В якості моделі використовувалася розширена модель точкового джерела. Моделювання проводилося з урахуванням фактора накопичення. Найбільш інформативними видами візуалізації є 2D-зріз і згладжена ізоповерхня. Результати візуалізації радіаційної обстановки програмним комплексом VRDose представлено на рис. 7 і 8.

Як видно з рис. 7, 2D-зріз поля потужності дози показано ізолініями і в легенді до рисунка показано інтервалами потужності дози. Для швидкого визначення потужності дози в потрібному користувачеві місці в програмному комплексі VRDose існує інструмент — дозиметр. Приклад використання такого інструмента наведено на рис. 9.

### Розрахункові значення потужності дози, отримані за допомогою побудованої моделі в програмному комплексі VRDose

Для оцінки потужності дози в певній точці в програмному комплексі VRDose використовується

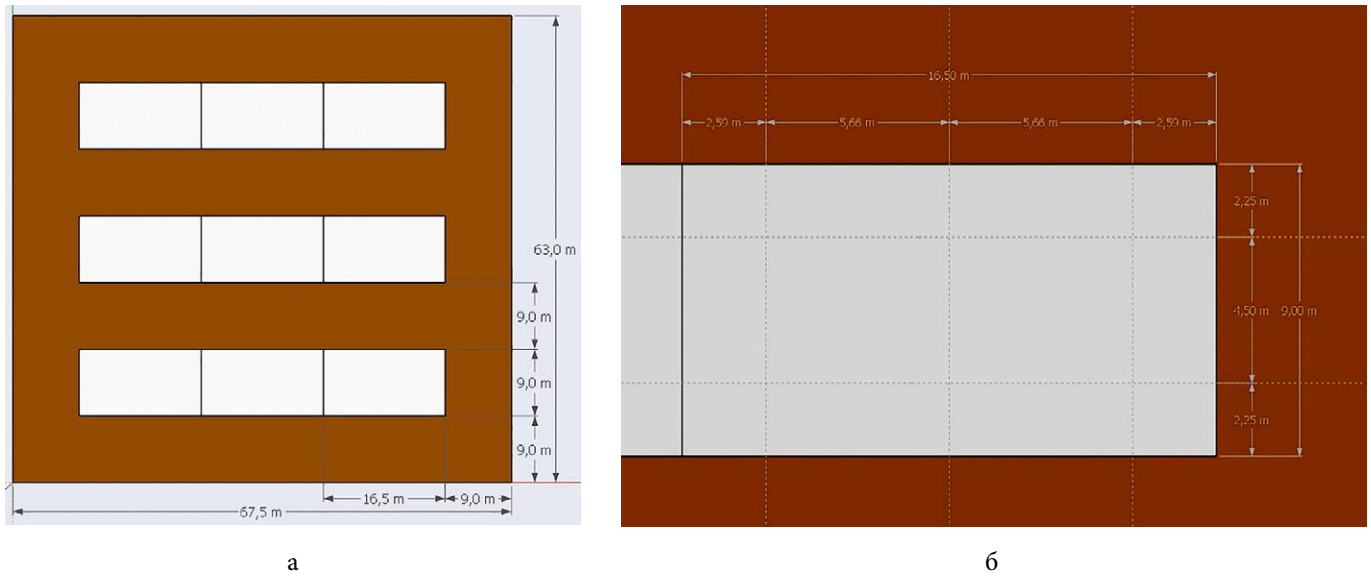


Рис. 4. Моделі частини майданчика ЦСВЯП (а) і місця установки (центри установки) 6 контейнерів на бетонній основі (б)

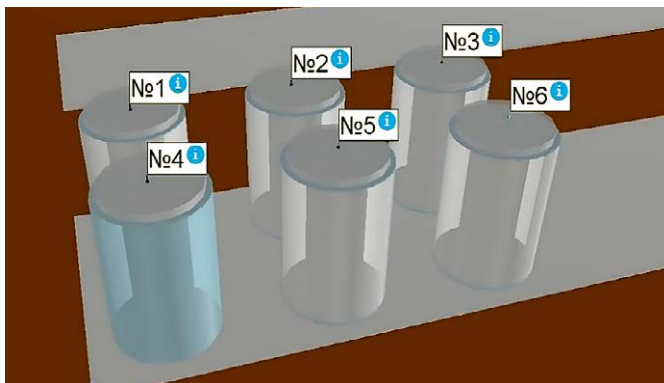


Рис. 5. Модель 6 контейнерів HI-STORM 190 на одній з бетонних основ

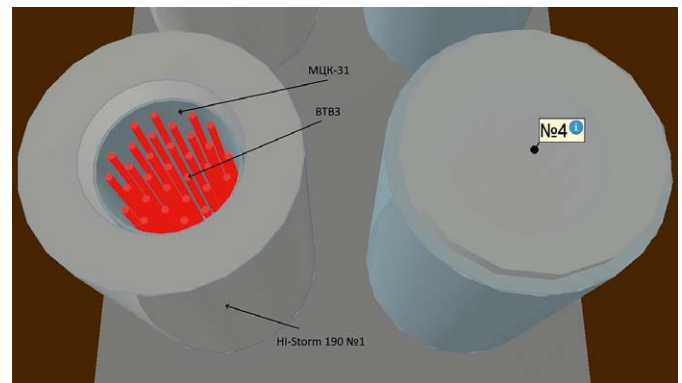


Рис. 6. Модель контейнера HI-STORM 190 № 1 зі знятою кришкою і МЦК-31 без кришки

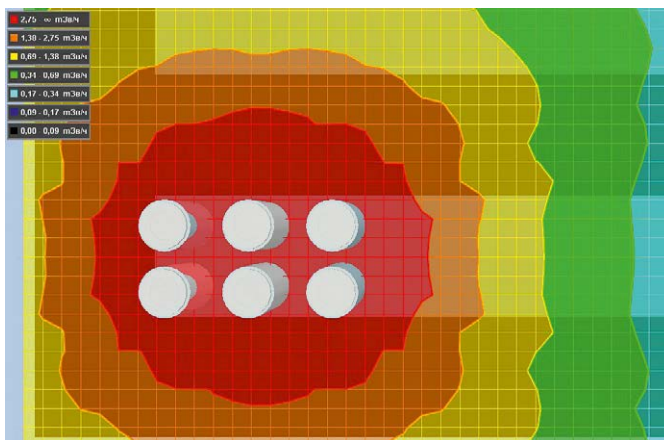


Рис. 7. 2D-зріз поля потужності дози на висоті 1,5 м над рівнем бетонної основи

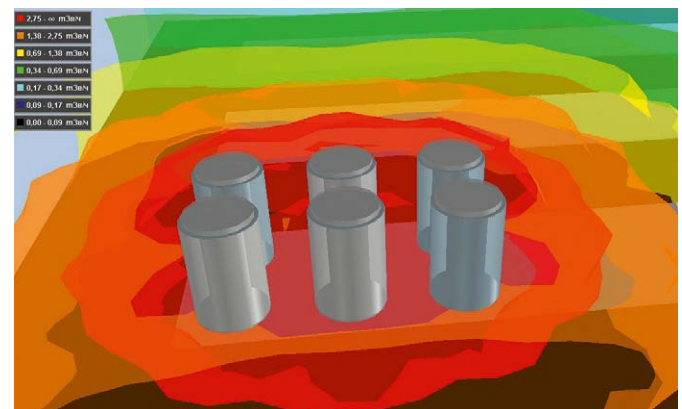


Рис. 8. Об'ємний вигляд поля потужності дози (згладжена ізоповерхня) навколо контейнерів HI-STORM 190

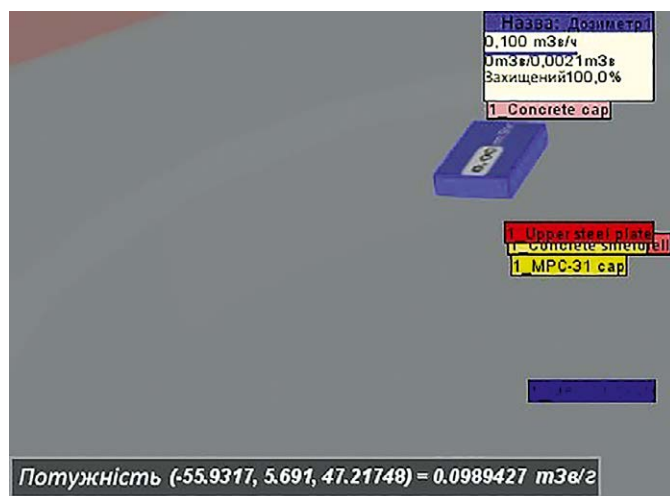


Рис. 9. Потужність дози в місці розташування стаціонарно закріпленого на кришці контейнера HI-STORM 190 віртуального дозиметра «Дозиметр1»

поняття віртуального дозиметра, за допомогою якого йде відображення потужності дози в точці знаходження цього віртуального дозиметра. На рис. 10 показано розташування віртуальних дозиметрів № 1 — № 13 на поверхні контейнера HI-STORM 190 № 1. Відображення розрахункових величин потужності дози проводилося на бетонній кришці і на бічних поверхнях моделі контейнера № 1, розташованих усередині (а) і зовні (б) групи контейнерів. Для цього віртуальний дозиметр № 1 був розташований у центрі бетонної кришки контейнера № 1, дозиметри № 2 і № 9 розташовані в місцях з максимальною потужністю дози на бетонній кришці контейнера. Віртуальні дозиметри № 4, № 5, № 7, № 10 та № 12 розташовані на висоті 1,5 м від поверхні бетонної основи, на якій розташовані контейнери. Віртуальні

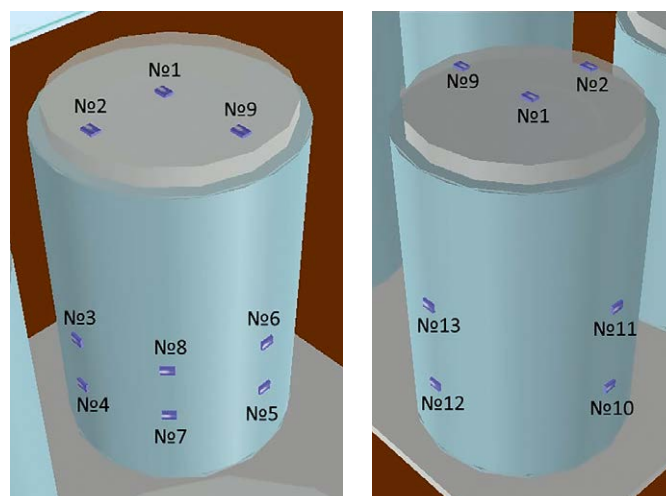


Рис. 10. Положення віртуальних дозиметрів № 1 — № 13 на поверхні моделі контейнера HI-STORM 190 № 1

дозиметри № 3, № 6, № 8, № 11 та № 13 розташовані в місцях з максимальною потужністю дози на поверхні контейнера. Висота розташування дозиметрів при цьому варіюється від 2,5 до 3,0 м від поверхні бетонної основи. Розрахункові значення потужності дози від віртуальних дозиметрів № 1 — № 13 наведено в табл. 4.

Як видно з табл. 4, значення потужності дози по висоті контейнера зовні групи змінюються несуттєво.

Показання розрахункових значень потужності дози в точках розташування віртуального дозиметра на території навколо контейнерів HI-STORM 190. Як впливає з рис. 7, поле потужності дози навколо контейнерів має симетричну форму. Горизонтальна вісь симетрії проходить між контейнерами № 1 і № 3, № 2 та № 4, № 3 та № 6. Вертикальна вісь си-

Таблиця 4. Розрахункові значення потужності дози в точках розміщення віртуальних дозиметрів № 1 — № 13 на поверхні контейнера HI-STORM 190 № 1

Кришка контейнера № 1						
Віртуальний дозиметр	№ 1	№ 2	№ 9			
Розрахункове значення потужності дози, мЗв/ч	0,10	110,07	115,10			
Бічна сторона контейнера всередині групи № 1						
Віртуальний дозиметр	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Розрахункове значення потужності дози, мЗв/ч	15,00	13,65	12,67	13,12	16,41	17,34
Бічна сторона контейнера зовні групи № 1						
Віртуальний дозиметр	№ 10	№ 11	№ 12	№ 13		
Розрахункове значення потужності дози, мЗв/ч	7,82	7,96	8,10	8,16		

метрії проходить по центрах контейнерів № 2 і № 4. Для визначення потужності дози на території поблизу розташування контейнерів був обраний лівий верхній квадрант. Розташування точок вимірювання представлено на рис. 11. У програмному комплексі VRDose в цих точках були розставлені віртуальні до-

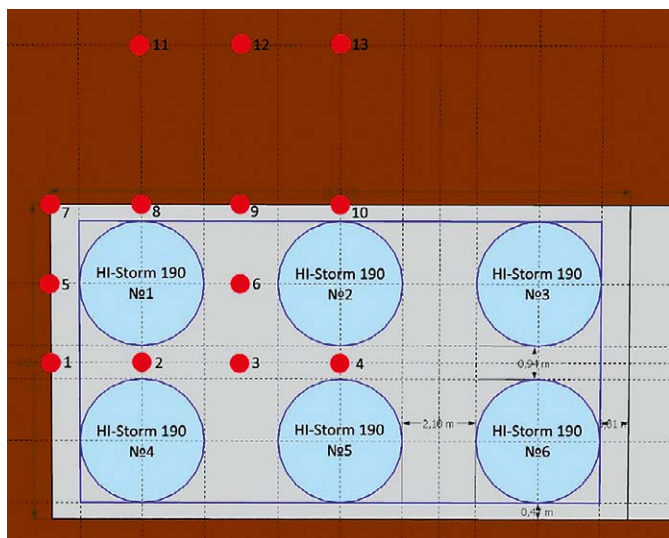


Рис. 11. Розташування точок вимірювання біля контейнерів на висоті 1,5 м від асфальтованої поверхні

зиметри № 14 — № 26. Точки вимірювання 11–13 відповідають середині між лініями бетонних основ. При розташуванні контейнерів на сусідній лінії бетонних основ у цих точках буде зафіксовано мінімальне значення потужності дози (оптимальний маршрут руху обслуговуючого персоналу). Значення потужності дози в точках 1–13 наведено в табл. 5.

### Дозове навантаження персоналу під час виконання робіт

Як робота, що виконується манекеном, вибирається операція «Контроль контейнерів HI-STORM на майданчику під час зберігання» [5]. У табл. 6 представлено періодичність, умови виконання роботи, а також перелік обладнання для вимірювання параметрів радіаційного стану.

У [5] із таблиці з переліком робіт із радіаційного контролю, які виконуються персоналом ЦСВЯП у режимі нормальної експлуатації, обрана операція № 32 «Контроль потужності дози гамма і нейтронного випромінювання завантаженого контейнера зберігання HI-STORM на майданчику зберігання (на поверхні HI-STORM на висоті 1,5 м від дна в 4 точках по периметру)».

Таблиця 5. Значення потужності дози в точках 1–13 на території навколо контейнерів HI-STORM 190

Точка вимірювання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Номер дозиметра	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Потужність дози, мЗв/ч	7,12	15,35	13,31	18,59	7,07	12,97	3,79	7,74	7,72	9,37	3,15	3,31	4,03

Таблиця 6. Параметри радіаційного контролю, що вимірюються (контролюються) за допомогою переносних приладів

Найменування параметра	Обладнання для вимірювання параметрів радіаційного стану	Проектне значення параметра контролю	Періодичність, умови
Контроль контейнерів HI-STORM на майданчику під час зберігання			
Контроль потужності дози гамма- та нейтронного випромінювання впритул від бокової поверхні від контейнера зберігання HI-STORM 190 ML	Дозиметр-радіометр МКС-07 «Пошук» з блоками детектування БДБГ-07, БДПН-07	Для БЦК-31 0,428 мЗв/год	Один раз на місяць, упритул від бокової поверхні від контейнера зберігання HI-STORM 190 ML з картограмою

Таблиця 7. Порівняльна таблиця

Точка вимірювання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Номер дозиметра	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$PD_{VRDose}$ , мЗв/ч	7,12	15,35	13,31	18,59	7,07	12,97	3,79	7,74	7,72	9,37	3,15	3,31	4,03
$PD_{звіт}$ , мЗв/ч*	1,35	2,41	2,33	2,70	1,29	2,14	0,60	1,14	1,48	1,60	–	–	–
$PD_{VRDose} / PD_{звіт}$	5,27	6,37	5,71	6,89	5,48	6,06	6,32	6,79	5,22	5,86	–	–	–

\* Дані у відповідних точках розташування віртуальних дозиметрів [6].



У табл. 7 зроблено порівняння значень потужності дози, розрахованих за допомогою побудованої моделі в програмному комплексі VRDose та значень потужності дози (ПД) у відповідних точках розташування віртуальних дозиметрів, отриманих під час виконання робіт з науково-технічного супроводу будівництва та введення в експлуатацію ЦСВЯП [6].

Для дозиметрів № 24 — № 26 (точки вимірювання 11–13) даних у [6] немає, бо розрахунки для цих точок не виконувались. Значення потужності дози, розраховані за допомогою побудованої моделі в програмному комплексі VRDose, у середньому в 6 разів перевищують значення, отримані в [6]. З огляду на те, що значення потужності дози в [6] також отримані в результаті розрахунків на основі іншої моделі, то такі розбіжності можна вважати достатньою кореляцією отриманих результатів.

Для розрахунку дозового навантаження манекена в програмному комплексі VRDose змодельовано сценарій, при якому манекен рухається по території до контейнера № 2, виконує операцію № 32 і повертається у вихідне положення. Виконання кожного з чотирьох вимірювань проводиться протягом 1 хв [7]. Загальний час виконання операції з прибуттям і вибуттям від місця проведення становив 5 хв 3 с. За час виконання операції № 32 манекен отримав дозу 0,962 мЗв (рис. 12).

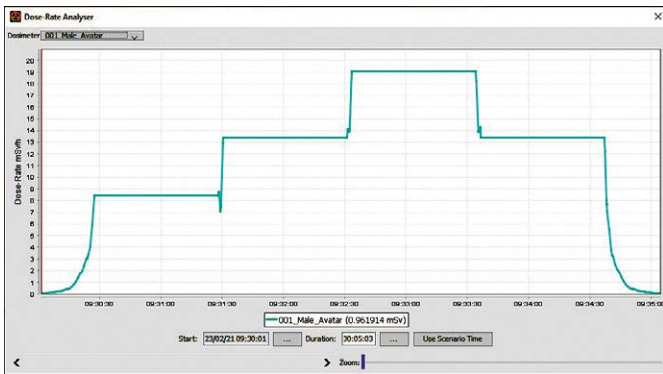


Рис. 12. Зразок карти дозового навантаження манекена під час виконання операції № 32

У результаті виконаного моделювання за допомогою програмного комплексу VRDose визначено внесок основних випромінюючих нуклідів і потужність дози при виконанні вимірювань з кожної сторони контейнера (рис. 13–16). Як видно з рисунків, основний внесок у дозові навантаження манекена вносять такі радіонукліди, %:  $^{60}\text{Co}$  — 63,  $^{134}\text{Cs}$  — 15,  $^{137}\text{Cs}$  — 11,2,  $^{154}\text{Eu}$  — 9,9,  $^{144}\text{Pr}$  — 0,8,  $^{125}\text{Sb}$  — 0,1.

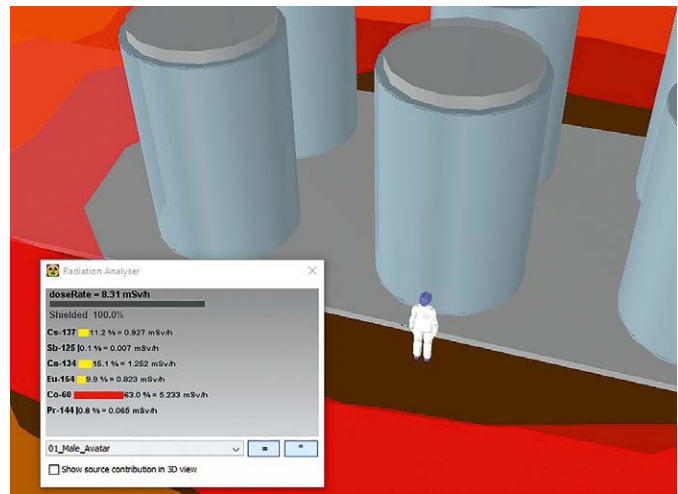


Рис. 13. Східна сторона контейнера при вимірюванні потужності дози

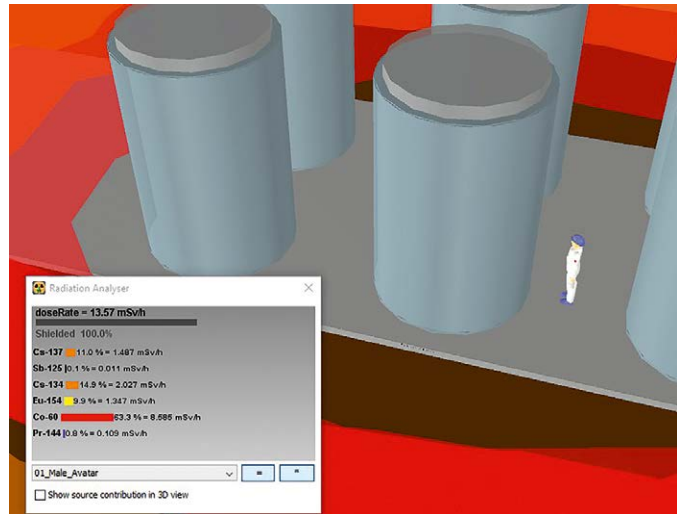


Рис. 14. Північна сторона контейнера при вимірюванні потужності дози

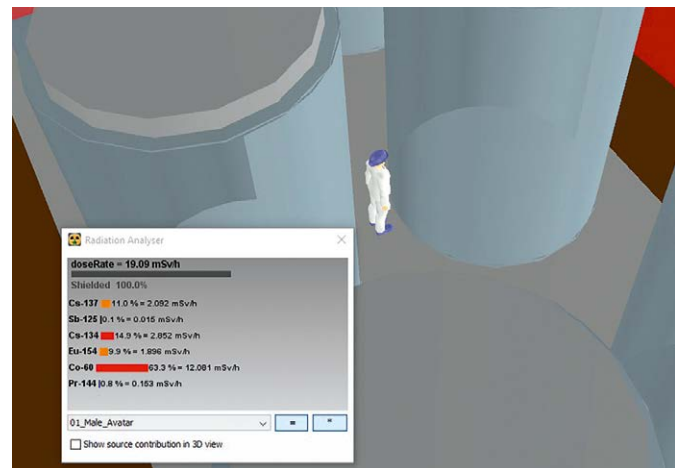


Рис. 15. Західна сторона контейнера при вимірюванні потужності дози



Рис. 16. Південна сторона контейнера при вимірюванні потужності дози

## Висновки

1. Отримано прогнозовані значення потужності дози на поверхні моделі контейнера і моделі території майданчика зберігання. У середині групи контейнерів потужність дози на поверхні контейнера HI-STORM № 1 може становити 12,67–17,34 мЗв/год, зовні групи контейнерів потужність дози на поверхні контейнера HI-STORM № 1 — 7,82–8,16 мЗв/год. На висоті 1,5 м від поверхні моделі майданчика в районі розташування групи контейнерів потужність дози 3,79–18,59 мЗв/год. На відстані 4,5 м від групи контейнерів (точки 11–13) потужність дози може становити 3,15–4,03 мЗв/год.

2. Змодельовано та оцінено дозу для манекена при виконанні операції № 32 «Контроль потужності дози гамма- і нейтронного випромінювання завантаженого контейнера зберігання HI-STORM на майданчику зберігання (на поверхні HI-STORM на висоті 1,5 м від дна в 4 точках по периметру)» за час виконання операції з прибуттям і вибуттям від місця її проведення (прогнозований час виконання 5 хв 3 с, прогнозована доза 0,962 мЗв).

3. Визначено внесок основних випромінюючих нуклідів у потужність дози під час вимірювання з кожної сторони контейнера. Основний внесок (у процентному співвідношенні) у дозове навантаження персоналу буде від таких радіонуклідів, %:  $^{60}\text{Co}$  — 63,  $^{134}\text{Cs}$  — 15,  $^{137}\text{Cs}$  — 11,2,  $^{154}\text{Eu}$  — 9,9,  $^{144}\text{Pr}$  — 0,8,  $^{125}\text{Sb}$  — 0,1.

4. Оцінено можливість використання програмного комплексу ChNPP VRDose Planner для контролю радіаційного впливу на довкілля та мінімізації радіаційного впливу на персонал при будівництві та введенні в експлуатацію ЦСВЯП. Виконавши верифікацію результатів, що отримані при виконанні

робіт з науково-технічного супроводу будівництва та введення в експлуатацію ЦСВЯП, з даними, отриманими за допомогою програмного комплексу ChNPP VRDose Planner, можна стверджувати про їхню достатню кореляцію.

Після введення в експлуатацію ЦСВЯП та встановлення 6 завантажених контейнерів зберігання HI-STORM на майданчику зберігання необхідно виконати порівняння реальних значень потужності дози і розрахованих за допомогою побудованої тривимірної моделі у програмному комплексі ChNPP VRDose Planner. За умов достатньої кореляції отриманих даних програмний комплекс ChNPP VRDose Planner можна рекомендувати для використання в рамках робіт з науково-технічного супроводу експлуатації ЦСВЯП та контролю радіаційного впливу на оточуюче середовище і його мінімізації на персонал для інших проектних робіт, що будуть виконуватись як у рамках робіт з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, так і в інших проектах будівництва, експлуатації та виводу з експлуатації об'єктів з використанням радіаційно-ядерних технологій.

## Список використаної літератури

1. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПРБУ-05). — Київ, 2005. — 141 с.
2. HVRC VRdose System Overview, User Documentation, HVRC VRdose® Overview Issue 2, Revision 1, 16 November 2020. — Available at: <http://www2.hrp.no/vr/vrdose/pdf/vrdose-overview.pdf>.
3. Актуализированный предварительный отчет по анализу безопасности ЦХОЯТ, ДС-17/17-07. Гл. 7. Биологическая защита, ред. 1.
4. Приложение П (обязательное). Отчет НОЛТЕС HI-2084031. Строительство централизованного хранилища отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР АЭС Украины. Проект. Т. 1.2.1. Исходные данные. Кн. 1. Окончательная ред. 571402.201.001-ПЗО2.01.
5. Регламент радіаційного контролю при експлуатації Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива (ЦСВЯП), РГ-Т.0.46.166-20.
6. Звіт про науково-дослідну роботу. Виконання робіт з науково-технічного супроводу на етапах будівництва і введення в експлуатацію ЦСВЯП. Етап 7. Виконання комплексу робіт з обґрунтування заходів із забезпечення радіаційної безпеки (договір № 36-146-08-19-0016, додаткова угода № 2).

7. Дозиметр-радиометр гамма-бета-излученный поисковый МКС-07 «ПОИСК». Техническое описание и инструкция по эксплуатации, ВІСТ.412129.003-01 ТО.

**V. V. Derenhovskiy, Y. A. Menshenin**

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

### **Modeling and Visualization of the Radiation State on the Site of the Storage of Containers of CSNFSF with the Use of the Software Complex ChNPP VRDose Planner**

The results of three-dimensional modeling of working conditions of personnel in radiation-hazardous conditions of the Centralized Spent Nuclear Fuel Storage Facility (CSNFSF) of WWER type reactors of domestic NPPs, are presented using the software complex ChNPP VRDose Planner. Today, the software package ChNPP VRDose Planner, developed by the Institute of Energy Technology (Norway), is an effective tool for estimating the dose load on personnel. It allows interpreting radiological information based on three-dimensional models of radiation-hazardous objects where human activities are planned. The VRDose software complex allows creating virtual models of each worker and reproducing detailed technological process of performance of works with participation of the person. This creates a visual representation of the behavior of staff at all stages of work. The software complex is created for planning and implementation of works in difficult radiation conditions, allows carrying out optimization of radiological protection and choosing the safest scenarios of performance of operations.

Using this software package:

- 1) the predicted values of the dose rate on the surface of the container model and the model of the storage site were obtained;
- 2) the dose for the dosimeter was simulated and evaluated during the operation no. 32 "Control of gamma dose rate and neutron radiation of the loaded storage container HI-STORM at the storage site" for the time of operation on arrival and departure with the arrival and departure from the venue;
- 3) the contribution of the main emitting nuclides to the dose rate when measured on each side of the container is determined;

4) the possibility of its use to control the radiation impact on the environment and its minimization on the person during the construction and commissioning of the CSNFSF was assessed. By verifying the results obtained during the work on scientific and technical support of construction and commissioning of CSNFSF with the data obtained using the software package ChNPP VRDose Planner, it can be argued that they are sufficiently correlated.

Given the above, the software package ChNPP VRDose Planner can be recommended for use during the work on scientific and technical support of the operation of CSNFSF and control of radiation exposure to the environment and its minimization for personnel for other design work to be performed, as part of work on the transformation of the Shelter object into an ecologically safe system, as well as in other projects of construction, operation and decommissioning of facilities using radiation and nuclear technologies.

*Keywords:* modeling, visualization, radiation state, dose rate, spent fuel, CSNFSF, VRDose Planner.

### **References**

1. *Basic sanitary rules for ensuring radiation safety of Ukraine* (OSPRBU-05). Kyiv, 2005, 141 p.
2. *HVRC VRdose System Overview*, User Documentation, HVRC VRdose® Overview Issue 2, Revision 1, 16 November 2020, [www2.hrp.no/vr/vrdose/pdf/vrdose-overview.pdf](http://www2.hrp.no/vr/vrdose/pdf/vrdose-overview.pdf).
3. *Updated Preliminary Report on Safety Analysis of CSNFSF*, DS-17/17-07, Chapter 7, Biological Protection, Revision 1.
4. Appendix P (mandatory) HOLTEC Report HI-2084031, Construction of a Centralized Spent Nuclear Fuel Storage Facility for WWER NPPs in Ukraine, Project, Volume 1.2.1, Initial Data, Book 1, Final Edition, 571402.201.001-П3О2.01.
5. *Regulations for radiation control during operation of the Centralized Spent Nuclear Fuel Storage Facility (CSNFSF)*, PT-T.0.46.166-20.
6. Research report. *Execution of works on scientific and technical support at the stages of construction and commissioning of CSNFSF*. Stage 7. Implementation of a set of works to substantiate measures to ensure radiation safety (contract № 36-146-08-19-0016, additional agreement № 2).
7. *Dosimeter-radiometer of gamma-beta radiation search MKS-07 "Poisk"*. Technical description and operating instructions, ВІСТ.412129.003-01 ТО.

Надійшла 05.08.2021

Received 05.08.2021