

*Кочанов Е.О., канд. військ. наук, доц., ХНУ,  
Попов І.І., канд. техн. наук, доц., НУЦЗУ,  
Толкунов І.О., заст. нач. каф., НУЦЗУ,  
Туркін І.Б., д-р техн. наук, зав. каф., НАКУ «ХАІ»,  
Шахов М.А., курсант, НУЦЗУ*

## **ОЦІНКА РАДІАЦІЙНОЇ ОБСТАНОВКИ ПРИ ПОЗАПРОЕКТНИХ АВАРІЯХ СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА**

(представлено д-ром техн. наук Туркіним І.Б.)

Запропонована модель щодо оцінки радіаційної обстановки, яка може виникнути внаслідок руйнування оболонок пеналів, в яких зберігається відпрацьоване ядерне паливо в сховищі «мокрого» типу Чорнобильської атомної електростанції. Також наведені розрахункові показники радіоактивного забруднення в зоні відчуження та в межах промислового майданчика станції при можливих позапроектних аваріях сховища відпрацьованого ядерного палива.

**Ключові слова:** радіоактивні матеріали, басейн витримки, ядерне паливо

**Постановка проблеми.** Потенційна небезпека експлуатації радіаційно-небезпечних об'єктів (РНО) полягає в можливості виникнення «критичності» і, відповідно, самопідтримуючої ланцюгової реакції при аварійних ситуаціях, а також при переробці, зберіганні та транспортуванні ядерного палива. Основний показник ступеня їх потенційної небезпеки, за інших рівних умов (надійність технологічних процесів, якість професійної підготовки фахівців тощо), – це загальна кількість радіоактивних речовин, які знаходяться на об'єкті.

Головними місцями накопичення радіоактивних відходів є атомні станції (АЕС), на яких здійснюється їх первинна переробка та тимчасове зберігання. На АЕС не існує повного циклу первинної переробки відходів відповідно до вимог та стандартів з ядерної і радіаційної безпеки, що призводить до нерационального використання сховищ та збільшує ризик радіаційних аварій [1].

У 30-кілометровій зоні Чорнобильської АЕС (ЧАЕС) у тимчасових, не пристосованих для зберігання сховищах, зна-

ходиться велика кількість радіоактивних відходів, серед яких є відходи ядерної енергетики. Головним джерелом небезпеки у 30-кілометровій зоні Чорнобильської АЕС залишаються сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП), в яких зосереджені небезпечні радіоактивні речовини та ядерні матеріали, радіоактивність яких становить близько 20 МКюрі. При цьому забезпечення радіаційної безпеки потребує завчасного прогнозування наслідків можливих надзвичайних ситуацій радіаційного характеру. Тому оцінка радіаційної обстановки при позапроектних аваріях сховищ відпрацьованого ядерного палива ЧАЕС є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** 15 грудня 2000 року відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України №598 «Про дострокове зняття з експлуатації ЧАЕС» від 29 березня 2000 року був зупинений енергоблок № 3. Із зупинкою 3-го енергоблоку ЧАЕС була повністю зупинена, і почався етап вивантаження ядерного палива із зупинених ядерних енергетичних реакторів. В даний час основна частина палива знаходиться в СВЯП-1, яке розташовується на території промайданчика ЧАЕС на північний захід від головного корпусу II-ої черги АЕС. СВЯП-1 - це сховище «мокрого типу», призначене для прийому і зберігання відпрацьованих тепловідділяючих збірок (ВТВЗ) після попередньої, не менше ніж 1,5-річної витримки їх в басейнах витримки (БВ) або реакторах енергоблоків, а також для операцій вивантаження ВТВЗ зі СВЯП-1 з наступним переміщенням їх в сховище «сухого типу», що будується (СВЯП-2). СВЯП-1 введено в експлуатацію у вересні 1986 року.

У тому ж 1986 році були розпочаті роботи з вивантаження відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) з БВ блоків №1 і №2 та розміщення його в БВ СВЯП-1. Експлуатація СВЯП-1 планується до введення в експлуатацію «сухого» сховища СВЯП-2 з урахуванням часу, необхідного для вивезення ВТВЗ зі СВЯП-1 в СВЯП-2. Планується, що сховище СВЯП-2 буде введено в експлуатацію в 2015 році. При цьому СВЯП-1 буде звільнено від ВЯП протягом 9-9,5 років (приблизно до 2025 року) [2].

Дані по кількості ВТВЗ, що знаходяться в басейнах витримки блоків та СВЯП-1 і наявності вільних місць для розміщення ВТВЗ на блоках та СВЯП-1, а також повне енергови-

ділення  $Q$  палива ТВЕЛ у ВТВЗ з початковим збагаченням 2,4% по  $^{235}\text{U}$ , глибиною вигорання 24 МВт · добу/кг залежно від часу витримки (табл. 1), дозволяють розрахувати сумарне енерговиділення ВТВЗ при виникненні позапроектних аварій СВЯП-1 ЧАЕС [3, 4].

**Таблиця 1 - Повне енерговиділення  $Q$  палива ТВЕЛ у ВТВЗ**

$Q$ , [МВт]	Витримка, років					
	7	10	20	30	50	100
	53,8	46,1	36,1	29,8	20,9	10,4

Кількість відпрацьованого палива у БВ приблизно однакова. При проведенні прогностичної оцінки наслідків позапроектної аварії СВЯП-1 різниця в енерговиділенні буде не істотна. При цьому доцільно оцінювати наслідки руйнування ВТВЗ в БВ при максимальному 10% виході активності. Існуюче нормативно-методичне забезпечення оцінки радіаційної обстановки при аваріях РНО не в повній мірі враховує особливості радіоактивного забруднення при можливому руйнуванні СВЯП [5-7].

**Постановка завдання та його вирішення.** Задача даної роботи полягає в удосконаленні методичного забезпечення оцінки радіаційної обстановки при аваріях РНО, яка повинна враховувати особливості ситуації, що пов'язана з повним зневодненням басейнів витримки СВЯП, та визначені вірогідних показників радіоактивного забруднення при даних видах аварій.

Мета роботи – визначення площі території забруднення радіоактивними речовинами в результаті позапроектної аварії СВЯП-1 ЧАЕС, а також дозові навантаження персоналу станції і населення, що проживає на даній території, на основі удосконалення моделі оцінки радіаційної обстановки при аварії (руйнуванні) РНО.

Значення показників радіоактивного забруднення залежать від концентрації радіоактивних речовин в аерозольній хмарі. Точність оцінки значення концентрації буде залежати від моделі джерела забруднення та моделі розповсюдження радіоактивних речовин у приземному шарі атмосфери. Для визначення початкової потужності джерела радіоактивного

забруднення для СВЯП використовується вираз, що визначає енерговиділення СВЯП і час, який минув після аварії [8, 9]

$$Q_0 \approx 2,3 \cdot 10^{14} P \cdot t^{-0,21}, \quad (1)$$

де  $Q_0$  – потужність джерела радіоактивного забруднення, МеВ/с;  $P$  – повне енерговиділення ВТВЗ, кВт;  $t$  – час, що минув після аварії, с;  $2,3 \cdot 10^{14}$  – коефіцієнт перерахунку потужності джерела зараження, МеВ/кВт·с.

Визначення залишкової концентрації радіоактивних речовин у хмарі проводиться за формулою [9, 10]

$$q'_i = \frac{Q_0}{\pi^{3/2} C_x \cdot C_y \cdot C_z \cdot \xi^{3(2-n)/2}} \cdot \exp\left(-\frac{4v_g \xi^{n/2}}{n \cdot u \cdot \pi^{1/2} C_z^{n/2}} - \frac{x^2}{C_x^2 \cdot \xi^{2-n}}\right) \times \\ \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{C_y^2 \cdot \xi^{2-n}} - \frac{z^2}{C_z^2 \cdot \xi^{2-n}}\right), \quad (2)$$

де  $q'_i$  – концентрація радіоактивних речовин у хмарі, МэВ/с·м<sup>3</sup>;  $Q_0$  – початкова потужність джерела, МеВ/с;  $n$  – безрозмірний параметр, що пов'язаний зі стійкістю атмосфери;  $\xi$  – параметр, що враховує зміну концентрації радіоактивних речовин при проходженні радіоактивною хмарою відстані в напрямку вітру за інтервал часу від 0 до  $t$ , м;  $u$  – середнє значення швидкості вітру, м/с;  $x, y, z$  – координати об'єкта оцінки обстановки, м;  $C_x^2, C_y^2, C_z^2$  – коефіцієнти дифузії відповідно в напрямку осей  $OX, OY, OZ$ , м;  $v_g$  – швидкість осідання радіоактивних речовин із хмари на поверхню землі, м/с.

Розміри зони забруднення місцевості, тимчасові показники і показники небезпеки такі, як потужність дози іонізуючих випромінювань і доза випромінювання від радіоактивного забруднення місцевості, визначаються концентрацією радіоактивних речовин у поверхні землі або щільністю радіоактивного забруднення. При визначенні щільності радіоактивного забруднення значення координати  $z$  дорівнює нулю. Для визначення значення концентрації радіоактивних речовин біля поверхні землі шляхом інтегрування за часом і по координаті  $x$  використовується вираз

$$q'_{mi} = \frac{2Q_0 \cdot v_g}{u \cdot \pi \cdot C_y \cdot C_z \cdot \xi^{2-n}} \exp\left(-\frac{4v_g \xi^{n/2}}{n \cdot u \cdot \pi^{1/2} C_z} - \frac{y^2}{C_y^2 \cdot \xi^{2-n}}\right), \quad (3)$$

де  $q'_{mi}$  – концентрація радіоактивних речовин біля поверхні землі,  $\text{MeV}/\text{с} \cdot \text{м}^2$ ;  $v_g$  – швидкість осідання радіоактивних речовин із хмари на поверхню землі,  $3,1 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $C_y^2$ ,  $C_z^2$  – коефіцієнти дифузії відповідно в напрямку осей  $OY$ ,  $OZ$ , м [9, 10]

$$C_y^2 = C_z^2 = \frac{4\nu^n}{(1-n) \cdot (2-n) \cdot u^n} (tg\sigma_\alpha)^{2 \cdot (1-n)}, \quad (4)$$

де  $\sigma_\alpha$  – середньоквадратичне відхилення горизонтального напрямку вітру від середнього напрямку;  $\nu$  – коефіцієнт молекулярної дифузії повітря або кінематична в'язкість повітря, яка є постійною величиною,  $\nu = 1,323 \cdot 10^{-10}$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Величина показників небезпеки радіоактивного забруднення визначається за значенням концентрації радіоактивних речовин в хмарі і біля поверхні землі. Перший показник, який необхідно оцінити, – це значення еквівалентної дози опромінювання, яку отримає людина від радіоактивної хмари. Ця доза може бути визначена за співвідношенням,  $\text{MeV}/\text{г}$  [8]

$$D_{uzli}^P = \mu_m \int_0^t F_n(\tau) dt, \quad (5)$$

де  $\mu_m$  – масовий коефіцієнт послаблення,  $\text{м}^2/\text{г}$ ;  $F_n$  – флюенс енергії гама-випромінювання,  $\text{MeV}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $1 \text{ мЗв} = 6,25 \cdot 10^7 \text{ MeV}/\text{г}$ .

Дозу гама випромінювання, яку отримає людина від радіоактивної хмари, не можна визначити без урахування умов перебування населення, коли необхідно врахувати ступінь ослаблення іонізуючих випромінювань захисними спорудами і різними будівлями. На практиці ступінь ослаблення враховується шляхом введення додаткового параметра – коефіцієнта послаблення. Коефіцієнт послаблення для різних об'єктів є довідковою величиною. Виходячи із зазначеного, вираз для визначення дози опромінювання, яку отримає людина від радіоактивної хмари, буде мати вигляд, мЗв

$$D_{изл\ i}^P = \frac{\mu_m}{6,25 \cdot 10^7 K_{осл}} \int_0^t \frac{q'_i \cdot z \cdot f(t)}{3} dt, \quad (6)$$

де  $q'_i$  – концентрація радіоактивних речовин у хмарі,  $\text{MeV}/\text{с} \cdot \text{м}^3$ ;  $K_{осл}$  – коефіцієнт ослаблення;  $z$  – висота підйому аерозольної радіоактивної хмари, м;  $f(t)$  – функція, що враховує середній спад активності радіоактивних речовин;  $\mu_m$  – масовий коефіцієнт ослаблення іонізуючих випромінювань, який для організму людини дорівнює  $5,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{г}$ ;  $t$  – час, на який відбувається визначення дози гама-випромінювання від радіоактивної хмари, с (при виборі останнього параметра необхідно дотримуватися умови:  $t \leq x/u$ ).

Значення інгаляційної дози визначається за формулою, мЗв [8]

$$D_{изл\ вн\ i} = V \cdot t \cdot k \cdot q_i, \quad (7)$$

де  $V$  – об'єм легеневої вентиляції людини (для дорослої людини при середньому фізичному навантаженні  $V = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $t$  – час надходження радіоактивного йоду в організм людини, с;  $k$  – коефіцієнт пропорційності між питомою активністю газоподібних радіоактивних речовин у повітрі та дозою випромінювання в організмі людини,  $\text{мЗв} \cdot \text{с}/\text{MeV}$ ;  $q_i$  – концентрація газоподібних радіоактивних речовин в аерозольній хмарі, яка залежно від умов зниження концентрації радіоактивних речовин в хмарі визначається, як  $q'_i/10$ ,  $\text{MeV}/\text{с} \cdot \text{м}^3$ .

В результаті взаємодії радіоактивних речовин, які принесені з радіоактивної хмари, з поверхнею землі відбувається радіоактивне забруднення місцевості. Дозу опромінювання населення від забрудненої радіоактивними речовинами місцевості пропонується визначати залежністю, мЗв [8]

$$D_{изл\ РЗМ\ i}^P = \frac{P_1 \cdot K_{опр}}{K_{осл}}, \quad (8)$$

де  $P_1$  – потужність дози через одну годину після руйнування ядерного реактору,  $\text{мЗв}/\text{год}$ ;  $K_{опр}$  – коефіцієнт опромінення,

який визначається як функція часу початку ( $t_{np}$ ) і тривалості ( $T_{np}$ ) знаходження на забрудненій місцевості

$$K_{obl} = \zeta \cdot [(t_{np} + T_{np})^{0,71} - t_{np}^{0,71}]. \quad (9)$$

**Таблиця 2 – Значення показників радіоактивного забруднення за результатами оцінки радіаційної обстановки при поза-проектній аварії СВЯП за межами промайданчика ЧАЕС**

№ з/п	Показник радіоактивного забруднення	Кількість відпрацьованого ядерного палива	Відстань від енергоблоку, км									
			2	5	10	15	20	25	30	35	40	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	Внутрішня доза опромінення, мЗв	У басейнах витримки СВЯП-1 зберігається 2435253 кг відпрацьованого ядерного палива з енерговиділенням 112265,166 кВт	26,1	22,8	20,7	19,6	14,2	12,7	8,6	3,4	2,5	
	Потужності доз ІВ на 1 годину після аварії БВ, мЗв/год		1,5	1,2	1,1	1,1	0,8	0,7	0,5	0,2	0,14	
	Доза від зовнішнього опромінення за 4 доби, мЗв		20,3	17,7	16,0	15,2	11,1	10,6	6,6	2,6	2,0	
	Доза від зовнішнього опромінення за 14 діб, мЗв		29,7	25,9	23,5	2,3	16,2	15,6	9,7	3,9	2,9	
	Доза від зовнішнього опромінення за 1 годину, мЗв		16,1	14,1	12,8	12,1	8,8	8,5	5,3	2,1	1,6	

Потужність дози опромінення визначається із співвідношення, мЗв/год

$$P = \alpha \cdot t^{-0,29} \cdot q'_{mi}, \quad (10)$$

де  $t$  – час, на момент якого відбувається визначення потужності дози гама-випромінювання, с;  $\alpha$  – чисельний коефіцієнт, що враховує лінійний коефіцієнт ослаблення, середній спад активності за одну годину і перерахунок розмірності часу, на момент якого відбувається визначення потужності дози гама-випромінювання в годину,  $\alpha = 7,18 \cdot 10^{-14} \text{ мЗв} \cdot \text{м}^2 / \text{МэВ} \cdot \text{с}$ .

**Таблиця 3 – Значення показників радіоактивного забруднення за результатами оцінки радіаційної обстановки при позапроектній аварії СВЯП в межах проммайданчика ЧАЕС**

№ з/п	Показник радіоактивного забруднення	Кількість відпрацьованого ядерного палива	Відстань від енергоблоку, м			
			100	200	500	1000
1	Внутрішня доза опромінення, мЗв	У басейнах витримки СВЯП-1 зберігається 2435253 кг відпрацьованого ядерного палива з енерговиділенням 112265,166 кВт	46,5	39,7	33,1	29,2
2	Потужності доз ІВ на 1 годину після аварії БВ, мЗв/год		2,6	2,2	1,8	1,6
3	Доза від зовнішнього опромінення за 4 доби, мЗв		41,3	30,8	25,6	23,2
4	Доза від зовнішнього опромінення за 14 діб, мЗв		52,8	45,1	37,6	33,2
5	Доза від зовнішнього опромінення за 1 годину, мЗв		28,7	24,5	20,4	18,1

Результати моделювання радіаційної обстановки в межах промислової площадки ЧАЕС і в зоні відчуження при 10% викиді радіоактивних речовин наведено в таблиці 2 та таблиці 3.

Оцінка радіаційної обстановки при позапроектних аваріях сховища відпрацьованого ядерного палива



ці 3. Дози опромінювання розраховувалися для населення, яке знаходиться на території зони відчуження з моменту початку аварії.

**Висновки.** Запропонована модель оцінки радіаційної обстановки при позапроектних аваріях СВЯП АЕС, яка дозволяє визначити площу території та ступінь забруднення радіоактивними речовинами в результаті означеної аварії, а також дозові навантаження персоналу станції і населення, що проживає на забрудненій території.

Результати моделювання наслідків можливої позапроектної аварії СВЯП-1 ЧАЕС показують, що в зоні радіоактивного забруднення складається радіаційна обстановка, яка призводить до променевого ураження населення. В усіх випадках значення сумарних доз опромінювання протягом перших двох тижнів після аварії не досягають рівня, при якому відповідно до НРБУ-97 здійснюється негайна евакуація населення. Однак перевищений нижній рівень (5 мЗв), що передбачає укриття людей [11, 12].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Владимиров В.А., Измалков В.И., Измалков А.В. Оценка риска и управление техногенной безопасностью. – М.: Деловой экспресс, 2002.
2. Концепция снятия с эксплуатации ЧАЭС. – Славутич: Державне спеціалізоване підприємство «ЧАЭС», 2002.
3. Гарабаев Б.А. и др. Данные о составе топлива для хранилища отработавших ТВС ЧАЭС. Отчет НИИ атомной энергетики 16.900 От, Проект С-2, декабрь 1997.
4. Комплект отчетов по результатам комплексного инженерного и радиационного обследования энергоблоков № 1, 2 ЧАЭС. – Славутич: Державне спеціалізоване підприємство «ЧАЭС», 2008. – 168 с.
5. Методика спостережень щодо оцінки радіаційної та хімічної обстановки. Наказ МНС України №186 від 06.08.2002р.
6. Дуриков А.П. Оценка радиационной обстановки на объекте народного хозяйства. – М.: Воениздат, 1975. – 95 с.
7. Владимиров В.А. и др. Методика выявления и оценки радиационной обстановки при разрушении (авариях) атомных электростанций. – М.: ГИИ ВС СССР, 1989.

8. Кочанов Э.А. Оценка последствий разрушений экологически опасных объектов /Э.А.Кочанов, В.Ф.Пахоменко, П.В.Маркин // Зб. наук.пр. Харк. військ. ун-т. – Х., 1999. – Вып. 4 (26). – С. 130-137.
9. Хоскер Р.П. Оценки сухого осаждения и уменьшения факела над лесами и лугами. / Р.П. Хоскер // Труды симпозиума по физическому поведению радиоактивных загрязнителей в атмосфере (Proc.Symp. on Physical Behavior of Radioactive Contaminants in the Atmosphere). – Вена: МАГАТЭ, 1974. – С.74-78.
10. Смит Ф.Б. Схема оценки вертикальной дисперсии факела от источника вблизи уровня земли. / Ф.Б. Смит // Труды 3-го совещания экспертной комиссии по моделированию загрязнения воздуха”(Proc. 3rd Meeting of an expert panel on air pollution modeling). – Париж: октябрь 1972. – С.112-116.
11. Нормы радиационной безопасности Украины. НРБУ 97. ДГН 6.6.1-6.5.001-98, ДНАОП 0.03-3.24-97.
12. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности Украины. ГСП 6.177-2005-09-02.

Кочанов Э.А., Попов И.И., Толкунов И.А., Туркин И.Б., Шахов М.А.

**Оценка радиационной обстановки при внепроектных авариях хранилища отработанного ядерного топлива**

Предложена модель для оценки радиационной обстановки, которая может возникнуть вследствие разрушения оболочек пеналов, в которых хранится отработанное ядерное топливо в хранилище «мокрого» типа Чернобыльской атомной электростанции. Также приведены расчетные показатели радиоактивного загрязнения в зоне отчуждения и в пределах промышленной площадки станции при возможных внепроектных авариях хранилища отработанного ядерного топлива.

**Ключевые слова:** радиоактивные материалы, бассейн выдержки, ядерное топливо

Kochanov E.A., Popov I.I., Tolkunov I.A., Turkin I.B., Shakhov M.A.

**Assessment of radiation environment during beyond design basis accidents storage for spent nuclear fuel**

The model of evaluation of the radiation situation that may occur due to the destruction of the membranes of the canisters containing spent nuclear fuel in storage «wet» type Chernobyl nuclear electrostation. Also shown are calculated indicators of radioactive contamination in the exclusion zone and within the industrial site of the station if possible beyond design basis accidents storage for spent nuclear fuel.

**Key words:** radioactive materials, cooling pool, nuclear fuel