

РОЗРОБКА ЙМОВІРНІСНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ СХОВИЩА РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

Д. М. Бахчеван

Одеський спецкомбінат ОДМСК «Радон»

На підставі аналізу відомих методів і підходів в області оцінок безпеки об'єктів по поводженню з радіоактивними відходами (РАВ) та ядерних енергетичних установок у рамках ризик-орієнтованого підходу вперше розроблено ймовірнісний метод аналізу безпеки сховищ РАВ, що враховує ймовірність вихідних аварійних подій та їхніх наслідків.

Ключові слова: радіоактивні відходи, безпека, ймовірнісні методи.

У рамках ризик-орієнтованого підходу розроблено ймовірнісний метод оцінки безпеки (ІАБ) системи завантаження РАВ, що включає:

1) констатацію області, для якої проводиться ІАБ - аналіз експлуатації приповерхневого поховання радіоактивних відходів (ПСРВ) Одеського державного міжобласного спецкомбінату (ОДМСК) у частині проведення завантаження сховищ РАВ;

2) розробку переліку аварійних подій, що впливають на сформульований ймовірнісний критерій безпеки - падіння плити перекриття в бункер з упаковками РАВ сховища для твердих радіоактивних відходів (ТРВ) і застрягання й/або випадання джерела іонізуючого випромінювання (ДІВ) при завантаженні високорадіоактивних відходів (ВРВ);

3) оцінку частот виконання транспортно-технологічних операцій (ТТО) по завантаженню сховищ ТРВ й ВРВ;

4) проведення якісного аналізу устаткування для ТТО з погляду його впливу на ймовірнісний критерій безпеки;

5) оцінку ймовірності виникнення аварії при проведенні ТТО по завантаженню сховищ ТРВ й ВРВ;

6) порівняння ймовірнісних оцінок із критеріальним значенням, проведення аналізу значимості, розробку рекомендацій з підвищення безпеки.

Відповідно до міжнародної практики вважається, що ризик дуже малий, якщо ймовірність смерті за рік менш 10^{-6} , ризик прийнятний для персоналу, якщо ймовірність смерті за рік не вище 10^{-4} , границя індивідуального ризику для опромінення осіб з персоналу приймається рівної 10^{-3} у рік.

На підставі аналізу компонентів і режимів роботи ПСРВ ОДМСК можна сформулювати наступний *ймовірнісний* критерій безпеки: ПСРВ має прийнятний ступінь безпеки, якщо виконується нерівність

$$N_k > \sum_{j=1}^n I_j P_{kj}, \quad (1)$$

де N_k – k -та нормативна величина; I_j – кількість аварійних подій за рік, що ініціюють можливість j -ї вихідної події, що приводить до реалізації різного роду негативних наслідків; P_{kj} – ймовірність реалізації k -го негативного наслідку з появою j -ї вихідної події; n – загальна кількість можливих вихідних подій, при яких можливі різного роду негативні наслідки; k – номер негативного наслідку: $k = 1$ – смертельні випадки (фатальні й не фатальні раки, важкі спадкоємні дефекти нащадків), $N_1 = 10^{-4}$; $k = 2$ – випадки граничного припустимого опромінення персоналу, $N_2 = 10^{-3}$.

Ймовірність смертного випадку через опромінення становитиме

$$P_j = 1 - \exp(-KD_j), \quad (2)$$

де K – коефіцієнт ймовірності стохастичних ефектів (фатальні та нефатальні раки, важкі спадкоємні дефекти нащадків) при опроміненні дорослих працюючих становить $5,6 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$;

D_j – максимально можлива доза опромінення при аварії на j -му типі сховища РАВ ($D_1 = 1,3 \cdot 10^{-1}$ Зв). Тоді ймовірність смертного випадку при виникненні аварії на сховищах ТРВ становитиме (верхня границя) $P_1 = 7,25 \cdot 10^{-3}$.

Для сховища ДІВ проведено аналіз, пов'язаний з падінням захисного контейнера й/або заклинюванням ДІВ у захисному контейнері типу УКТІВ-80. Тому максимально можлива доза опромінення D_2 у цьому випадку відраховується не від накопиченого рівня радіоактивності (як для ТРВ), а за максимально можливою дозою ДІВ, що транспортуються у контейнері й завантажуються у сховище ВРВ.

Максимальне припустиме завантаження пакувальних комплектів, обумовлене потужністю експозиційної дози гамма-випромінювання становить $7,06 \cdot 10^{-2}$ Зв/ч.

Ймовірність смертного випадку при виникненні аварії на сховищі ВРВ становитиме (верхня границя) $P_2 = 3,95 \cdot 10^{-4}$.

Остаточний ймовірнісний критерій безпеки ПСРВ ОДМСК у частині проведення завантаження сховищ ТРВ і ВРВ

$$7,25 \cdot 10^{-3} I_1 + 3,95 \cdot 10^{-4} I_2 < 10^{-4}, \quad (3)$$

де I_1 – частота аварійних подій, що виникають при завантаженні ТРВ; I_2 – частота аварійних подій, що виникають при завантаженні ВРВ.

Частоти аварійних подій I_j визначаються як

$$I_j = L_j P_{Tj}, \quad (4)$$

де L_j – частота виконання ТТО по завантаженню j -го сховища; P_{Tj} – ймовірність виникнення аварії при проведенні ТТО по завантаженню j -го сховища.

Частота виконання ТТО по завантаженню j -го сховища L_j визначається за статистикою на підставі даних журналу одержання РАВ.

Ймовірності виникнення аварії при ТТО по завантаженню j -го сховища визначаються на підставі якісного аналізу надійності, міцнісних розрахунків і теорії відмов.

Частота виконання ТТО по завантаженню j -го сховища становитиме

$$L_j = \frac{n_j}{M_j T_j}, \quad (5)$$

де n_j – загальна кількість фактів завантаження по j -му компоненті сховища; M_j – кількість сховищ, що входять в один j -й компонент; T_j – період спостереження, протягом якого було реалізовано n_j фактів завантаження.

Результати розрахунку за формулою (5) зведено в табл. 1.

Таблиця 1. Розрахунок частот виконання ТТО по завантаженню сховищ РАВ

Номер сховища	n_j	M_j	T_j	L_j
7–11	39	5	3	2,6
13	12	1	3	4

Результати визначення вмісту радіонуклідів ^{137}Cs , ^3H , ^{226}Ra , ^{232}Th і ^{60}Co у пробах, відібраних у ємностях для зберігання РРВ і спостережних свердловинах на ПСРВ Одеського спецкомбінату, наведено в табл. 2.

На підставі проведеного аналізу (літературних джерел, варіаційних розрахунків, фізичної прийнятності) встановлено, що прийнятним є використання наступних видів розподілів випадкових величин:

розподіл Вейбулла для опису величин міцності металу компонентів устаткування;

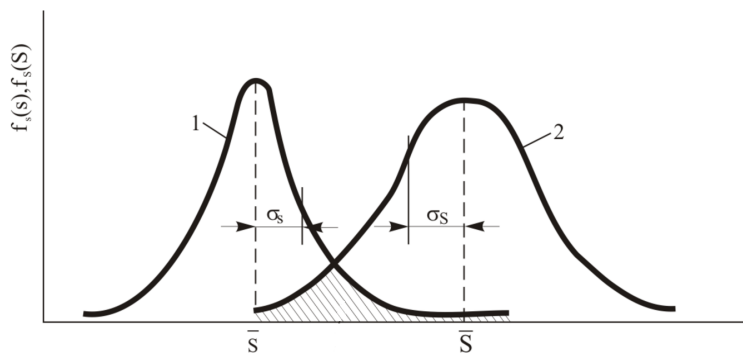
логарифмічно нормальний розподіл для опису таких міцнісних характеристик, як вантажопідйомність або міцності фабрично виконаних складальних одиниць, таких як опори-маточини колеса;

логарифмічно нормальний розподіл для опису напруги, що може викликати руйнування матеріалу компонентів устаткування.

Таблиця 2. Результати визначення вмісту радіонуклідів ^{137}Cs , ^3H , ^{226}Ra , ^{232}Th й ^{60}Co у пробах, відібраних у ємностях для зберігання РРВ і спостережних свердловинах на ПСРВ Одеського спецкомбінату

Місце відбору	Питома активність проби, Бк/кг				
	^{137}Cs	^3H	^{226}Ra	^{232}Th	^{60}Co
РРВ верхній шар	$2,25 \cdot 10^3$	$5,29 \cdot 10^5$	$0,0016 \cdot 10^4$	-	-
РРВ середній шар	$2,7 \cdot 10^3$	$4,84 \cdot 10^5$	$0,0046 \cdot 10^4$	-	-
РРВ нижній шар	$3,2 \cdot 10^3$	$4,33 \cdot 10^5$	$0,0059 \cdot 10^4$	-	-

Приклад, що ілюструє застосування теорії відмов, представлено на рисунку. Заштрихована ділянка показує область перекриття розподілу напруги й міцності. Площа заштрихованої ділянки дорівнює ймовірності відмови елемента даної міцності при впливі даного навантаження (з урахуванням їхньої ймовірнісної природи).



Перекриття розподілів напруги $f_s(s)$ (1) і міцності $f(S)$ (2)

Ймовірність відмови через функції (щільності) розподілу випадкових величин напруги й міцності виражається загальною залежністю

$$P = 1 - \int_0^{\infty} \frac{1}{sx\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2s^2} - cx^\alpha\right) dx, \quad (6)$$

де μ , s - параметри логнормального розподілу для напруги; α , z - параметри розподілу Вейбулла для міцності.

Ймовірність виникнення аварії при проведенні ТТО по завантаженню сховищ за допомогою кран-балки в загальному випадку становитиме

$$P_{Т1} = P_a \cdot P_b \cdot P_c, \quad (7)$$

де P_a – ймовірність відмови кран-балки, що приводить до падіння плити перекриття; P_b – ймовірність влучення плити перекриття в бункер зберігання ТРВ; P_c – ймовірність руйнування пакувань ТРВ у випадку падіння на них плити перекриття.

Результат розрахунків ймовірності відмови елементів кран-балки й захисного контейнера ДІВ наведено в табл. 3.

З урахуванням цих даних у результаті одержимо:

$I_1 = 1,06 \cdot 10^{-3}$ 1/рік – частота аварійних подій, що виникають при завантаженні сховища з ТРВ;

$I_2 = 8,19 \cdot 10^{-3}$ 1/рік – частота аварійних подій, що виникають при завантаженні сховища ДІВ.

Сумарна частота аварійних подій, що приводять до можливого перевищення припустимих значень річних доз опромінення персоналу, становить $I_1 + I_2 = 9,25 \cdot 10^{-3}$ 1/рік.

Наступним результатом є порівняння з ймовірнісним критерієм безпеки (сформульованим вище) частоти смертних випадків (фатальні та нефатальні раки, важкі спадкоємні дефекти в нащадків) через опромінення при проведенні ТТО по завантаженню ТРВ і ДІВ на ПСРВ ОДМСК:

$$R = 7,25 \cdot 10^{-3} I_1 + 3,95 \cdot 10^{-3} I_2 = \mathbf{1,09 \cdot 10^{-5}} < \mathbf{10^{-4}} \text{ 1/рік.} \quad (8)$$

З наведених порівняльних оцінок випливає, що потенційно більше небезпечними є операції по завантаженню ТРВ порівняно із завантаженням ДІВ. Пояснюється це головним чином тим, що аварія на сховищі ТРВ може торкнутися більших обсягів РАВ із загальною максимальною експозиційною дозою до 1,35 Р/г. У той час як при завантаженні ДІВ не можуть бути порушені РАВ, що перебувають усередині сховища колодязного типу, і небезпека пов'язана тільки із джерелом, що завантажуються безпосередньо, потужність експозиційної дози якого не перевищує 0,73 Р/г.

Аналіз значимості по показнику зниження ризику наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Аналіз значимості по показнику зниження ризику

Елемент ТТО	P_i	R, при $P_i = 0$	$\frac{R - R(0)}{R(0)} \cdot 100 \%$
Електротельфер	$2,22 \cdot 10^{-4}$	$6,749 \cdot 10^{-6}$	61,861
Бічна стійка (4 шт.)	$2,57 \cdot 10^{-13}$	$1,092 \cdot 10^{-5}$	$1,775 \cdot 10^{-7}$
Опорна планка (2 шт.)	$6,67 \cdot 10^{-8}$	$1,092 \cdot 10^{-5}$	0,051
Болтове кріплення (2 шт.)	$1,48 \cdot 10^{-7}$	$1,092 \cdot 10^{-5}$	0,023
Двотаврова балка	$1,73 \cdot 10^{-4}$	$7,662 \cdot 10^{-6}$	42,573
Опора-маточина колеса (4 шт.)	$2,74 \cdot 10^{-6}$	$1,068 \cdot 10^{-5}$	2,271
Захисний контейнер	$2,05 \cdot 10^{-3}$	$7,688 \cdot 10^{-6}$	42,083

З аналізу випливає, що максимальний ефект від підвищення надійності буде для електротельфера. У цей час електротельфер працює при навантаженнях, близьких до граничного. Вантажопідйомність електротельфера становить 500 кг, маса плити перекриття 420 кг. Тому ймовірність відмови електротельфера відносно більша ($2,22 \cdot 10^{-4}$). При заміні електротельфера на інший, з вантажопідйомністю в 1,5 рази більше (750 кг), можна знизити ймовірність його відмови практично до 0, що знизить загальний ризик на 62 %.

Як шляхи подальшого розширення й уточнення ймовірнісних оцінок безпеки сховищ РАВ слід відзначити:

1. Розширення ІАБ на операції по транспортуванню РАВ від виробника РАВ до місця поховання.

2. Визначення оптимальної періодичності перевірок/оглядів сховищ на підставі мінімізації ймовірності виходу радіоактивності вище норми - Р. Занадто часте розкриття сховищ приводить до росту відмови через можливість падіння перекриття на контейнери і т.д. Занадто рідке розкриття не дає можливості виявити можливе руйнування стінок сховища, контейнерів тощо, що так само приводить до росту відмови. Для такого аналізу додатково розробленої вище моделі потрібна модель для розрахунку ймовірності руйнування контейнера і/або сховища з виходом радіоактивності вище норми в процесі зберігання на ПСРВ.

3. Для уточнення ймовірнісних характеристик по окремих елементах необхідно зібрати статистику відмов даного типу устаткування в умовах роботи спецкомбінатів РАДОН.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бахчеван Д.Н., Комаров Ю.А., Кочнева В.Ю., Скалзубов В.И. Вероятностные оценки безопасности загрузки приповерхностного захоронения радиоактивных отходов // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2007. – Вип. 7. – С. 48 - 54.

Таблиця 3. Дані та результати розрахунку ймовірності відмови елементів кран-балки й захисного контейнера ДІВ

Конструктивний елемент	Одиниця виміру даних міцності та навантаження	Дані по міцності				Дані по навантаженню				Імовірність відмови
		Середнє значення \bar{S}	Середньоквад-ратичне відхилення σ_s	Параметри розподілу Вейбулла		Середнє значення \bar{s}	Середньоквад-ратичне відхилення σ_s	Параметри балк-нормального розподілу		
				α	c			μ	s	
Електротельфер у зборі*	кг	587,5	37,5	6,37	$6,376 \cdot 10^{-2}$	420	30	6,04	$7,134 \cdot 10^{-2}$	$2,22 \cdot 10^{-4}$
Стійки бічні (для однієї стійки)	МПа	425	45	7,15	$9,9 \cdot 10^{-20}$	1,695	1,365	0,278	0,707	$2,57 \cdot 10^{-13}$
Опорна планка (для однієї планки)	МПа	425	45	7,15	$9,9 \cdot 10^{-20}$	11,3	9,12	2,175	0,708	$1,48 \cdot 10^{-7}$
Болтове кріплення (з чотирьох болтів для однієї стійки)	МПа	425	45	7,15	$9,9 \cdot 10^{-20}$	10,1	8,11	2,063	0,706	$6,67 \cdot 10^{-8}$
Двотаврова балка	МПа	425	45	7,15	$9,9 \cdot 10^{-20}$	41,1	31,4	3,49	0,679	$1,73 \cdot 10^{-4}$
Опора-маточина колеса (для однієї маточини)*	кг	1500	500	7,26	0,325	260	52,5	5,54	0,20	$2,74 \cdot 10^{-6}$
Захисний контейнер	МПа	2340	270	6,67	$2,18 \cdot 10^{-23}$	624,2	274,4	6,35	0,420	$2,05 \cdot 10^{-3}$

* Для електротельфера й опори-маточини колеса оцінка міцності проводиться з використанням логарифмічно нормального розподілу з оцінкою параметрів μ і σ (замість α і c відповідно).

2. *Бахчеван Д.Н.* Общие вопросы регулирования и оценки безопасности объектов по обращению с радиоактивными отходами (обзор) // Ядерная и радиационная безопасность. - 2004. - № 3. - С. 39 - 45.
3. *Бахчеван Д.Н., Пионтковский А.И.* Анализ состояния хранилищ радиоактивных отходов на Одесском спецкомбинате // Там же. - 2005. - № 2. - С. 67 - 74.

РАЗРАБОТКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ХРАНИЛИЩА РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Д. Н. Бахчеван

На основании анализа известных методов и подходов в области оценок безопасности объектов по обращению с радиоактивными отходами (РАО) и ядерных энергетических установок в рамках риск-ориентированного подхода впервые разработан вероятностный метод анализа безопасности хранилищ РАО, учитывающий вероятность исходных аварийных событий и их последствий.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, безопасность, вероятностные методы.

DEVELOPMENT OF PROBABILISTIC METHODS OF SAFETY ASSESSMENT OF RADIOACTIVE WASTE (RAW) STORAGE

D. N. Bakhchevan

Based on the analysis of known methods and approaches in area of safety assessment of establishments treating RAW and nuclear power plants a probabilistic method to analyse safety of RAW storages is first developed in the frames of the risk-informed approach. This method takes into account probability of initiating events and their consequences.

Keywords: radioactive waste, security, probabilistic methods.

Надійшла до редакції 16.03.09