

В. В. Деренговський*, А. В. Носовський

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль, Україна

*Відповідальний автор: v.derengovsky@isnpp.kiev.ua

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ ІЗ РАДІАЦІЙНО-ЯДЕРНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

У результаті включення отриманих нових знань до рекомендованого МКРЗ методу багатокритеріального аналізу було вдосконалено цей метод шляхом визначення основних критеріїв оцінки варіантів зміни стану екологічної безпеки об'єктів, простих у застосуванні і дієвих для умов неповноти і недостатньої достовірності вхідних даних функцій бажаності та отримання вагових коефіцієнтів обраних критеріїв для узагальненої оцінки варіантів зміни стану екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями.

Ключові слова: радіаційна безпека, об'єкти з радіаційно-ядерними технологіями, функція бажаності, багатокритеріальний аналіз, експертні оцінки.

1. Вступ

Перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему є одним з пріоритетних завдань із підвищення рівня радіаційної безпеки. У процесі цього перетворення постає завдання вибору оптимального варіанта виконання цих робіт. На даний час багато об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями знаходяться на території чорнобильської зони відчуження. Крім того, тут планується будівництво та експлуатація сховищ відпрацьованого ядерного палива і радіоактивних відходів (РАВ), сонячних електростанцій, котелень на твердому паливі та ін. Для забезпечення мінімізації впливу такої діяльності на довкілля стає актуальним питання проведення аналізу безпеки та вибору оптимального варіанта виконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями у зв'язку з тим, що всі ці об'єкти розміщені на радіоактивно забрудненій території і можуть бути задіяні у технологічному процесі поводження з радіоактивно забрудненими матеріалами.

Згідно з рекомендаціями [1] у практиці радіаційної безпеки, протирадіаційного захисту людини і навколишнього середовища обґрунтування доцільності застосування того чи іншого заходу базується на процедурі порівняння зиску від реалізації заходу з відповідними витратами, пов'язаними з його реалізацією. При цьому під витратами розуміється загальна міра всіх негативних факторів, що виникають або можуть виникнути під час або внаслідок реалізації заходу. Це може бути шкода здоров'ю, економічні збитки, психологічні, політичні та інші наслідки. Для порівняння витрат і зиску вони повинні бути кількісно виражені в тих самих величинах. Вартість кожного заходу визначається проектом. Визначення грошового

еквівалента як зиску, так і витрат від реалізації цього заходу пов'язано з деякими труднощами. Тому в процесі прийняття рішень важливо правильно зіставити всі витрати і зиск від реалізації даного заходу. Захід буде виправданим, якщо зиск від його реалізації буде більшим, ніж загальні витрати, пов'язані з його реалізацією, і оптимальним, якщо чистий зиск від його реалізації – різниця загального зиску і загальних витрат – буде максимальною. Основними показниками витрат і зиску будуть виступати колективна ефективна доза та колективний радіаційний ризик для персоналу і населення. Ці показники можна назвати критеріями оцінки. Оскільки дані критерії уявити в грошовому еквіваленті складно і при існуючій точності визначення значення критеріїв їхні величини можна вважати близькими між собою, то кращим для вирішення такого роду задач є багатокритеріальний аналіз, що застосовується в теорії управління [4].

У результаті дослідження сучасного стану проблеми щодо проведення багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями [2] сформульована мета досліджень – удосконалення методу багатокритеріального аналізу безпеки об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями. Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

визначити та обґрунтувати кількісні та якісні критерії вибору оптимального варіанта виконання робіт;

побудувати функції бажаності, що відповідають вимогам удосконаленого методу багатокритеріального аналізу;

провести дослідження вагових коефіцієнтів для обчислення узагальненого показника ефективності прийнятого рішення.

© В. В. Деренговський, А. В. Носовський, 2018

2. Кількісні та якісні критерії вибору оптимального варіанта виконання робіт

На шляху досягнення поставленої мети одним із завдань є визначення та обґрунтування кількісних та якісних критеріїв вибору оптимального варіанта виконання робіт. Використовуючи досвід виконаних робіт з оцінки екологічної безпеки і вибору кращого варіанта виконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями, базові критерії прийняття рішень визначимо таким чином: C – вартість виконання робіт (включаючи витрати на протирадіаційний захист і поводження з РАВ); D – колективна ефективна доза (КЕД) при реалізації заходів; R_p – колективний радіологічний ризик персоналу (без урахування КЕД при реалізації заходу); R_N – колективний радіологічний ризик населення; F – фінансовий ризик; T – час реалізації проекту; Q – величина ризику погіршення умов проведення регламентних робіт, вилучення паливовмісних матеріалів (ПВМ) і т.д. Усі перераховані критерії залежно від ступеня опрацювання проектних рішень, повноти та достовірності вхідних даних можуть бути розраховані із зазначенням відносної похибки. При відсутності повноти і/або достовірності вхідних даних, а також недостатньої детальності опрацювання проектних рішень за допомогою експертних систем проводиться оцінка необхідних даних, і відповідні значення критеріїв матимуть оціночні значення із зазначенням відносної похибки або закону розподілу. Крім того, у загальному випадку всі критерії можуть бути як кількісними, так і якісними. Найчастіше якісними є критерії, для яких неможливо отримати розраховані значення із зазначенням відносної похибки. Такі критерії можуть бути оцінені за допомогою системи експертних оцінок.

Розглянемо детальніше визначені основні критерії. У більшості випадків перші шість критеріїв є кількісними. Значення критеріїв C (у тис. грн.), D (у люд.-Зв) і T (у роках) визначаються в ході опрацювання проекту реалізації робіт. Колективний радіологічний ризик персоналу R_p можна представити у вигляді $R_p = r_E^p \cdot \sum_{i \in \Omega} (p_i \cdot \sum_{j \in \Theta} N_j \cdot D_j)$, де $r_E^p = 5,6 \cdot 10^{-2}$ – коефіцієнт ризику на одиницю дози, Зв⁻¹ [3]; p_i – імовірність події, що призводить до опромінення персоналу, рік⁻¹; N_j – кількість персоналу в зоні виконання робіт; D_j – доза на певному віддаленні й у певному напрямку від місця аварії, Зв; Ω – множина аварій, радіологічний ризик від яких для персоналу перевищує значення $2 \cdot 10^{-4}$ рік⁻¹; Θ – множина місць локалізації персоналу в санітарній зоні радіаційно-небезпечного об'єкта. Ко-

лективний радіологічний ризик населення R_N можна представити у вигляді $R_N = r_E^N \cdot \sum_{i \in \Omega} (p_i \cdot \sum_{j \in \Theta} N_j \cdot D_j)$, де $r_E^N = 7,3 \cdot 10^{-2}$ – коефіцієнт ризику на одиницю дози, Зв⁻¹ [3]; p_i – імовірність події, що призводить до опромінення населення, рік⁻¹; N_j – кількість населення, зосередженого в певному місці; D_j – доза на певному віддаленні й у певному напрямку від місця аварії, Зв; Ω – множина аварій, радіологічний ризик від яких для населення перевищує значення $5 \cdot 10^{-5}$ рік⁻¹; Θ – множина місць локалізації населення в санітарній зоні радіаційно-небезпечного об'єкта. Фінансовий ризик F можна представити у вигляді $F = \sum_{i \in \Omega} p_i \cdot C_i^p$, де p_i – імовірність події, що призводить до опромінення персоналу або населення, рік⁻¹; C_i^p – вартість ліквідації наслідків аварії з імовірністю p_i , тис. грн; Ω – множина аварій, радіологічний ризик від яких для персоналу (населення) перевищує значення $2 \cdot 10^{-4}$ рік⁻¹ ($5 \cdot 10^{-5}$ рік⁻¹).

3. Побудова функцій бажаності

Визначені базові критерії проведення аналізу екологічної безпеки мають різну природу формування і значення, що не дозволяє проводити безпосереднє порівняння загального показника екологічної безпеки виконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями. Для проведення такого аналізу необхідно визначити адекватне перетворення числових значень указаних критеріїв у безрозмірний математичний простір для отримання загальної оцінки екологічної безпеки. За таке математичне перетворення в даній роботі пропонується застосувати метод багатокритеріального аналізу функції бажаності. Суть методу багатокритеріального аналізу функції бажаності полягає у введенні узагальненого критерію (узагальнений показник ефективності W), в якому об'єднуються всі інші критерії. З цією метою для кожного критерію здійснюється побудова функції бажаності $u_j(x)$, яка відображає область зміни кожного з критеріїв x у діапазоні балів, що змінюються від 0 до 1. Узагальнений показник ефективності W_i i -го варіанта зміни стану екологічної безпеки об'єкта з радіаційно-ядерними технологіями (виконання робіт) визначається як сума відповідних функцій бажаності [1, 4]

$$W_i = \sum_{j=1}^n k_j \cdot u_j(x_{ji}) \quad (1)$$

з ваговими коефіцієнтами k_j , які вибираються так, щоб

$$\sum_{j=1}^n k_j = 1. \tag{2}$$

Вигляд функцій бажаності u_i і значення вагових коефіцієнтів k_j вибираються залежно від вхідних даних, проектних рішень, прийнятих критеріїв і способів отримання їхніх абсолютних значень, а також ступеня значимості обраних критеріїв. Для застосування запропонованої моделі необхідно побудувати функції бажаності, дослідити вагові коефіцієнти та обчислити узагальнений показник ефективності прийнятого рішення.

Для побудови функції бажаності для всіх кількісних критеріїв запропоновано такі варіанти:

1) для критеріїв, які мають межу зверху, монотонно спадають і байдужі до ризику, – прості лінійні функції, як наприклад,

$$u_i = 1 - \frac{X}{X_{\max}}, \tag{3}$$

де $i = 1, 7$; X – значення критерію; X_{\max} – максимальне значення критерію;

2) коли встановити верхню межу значення критерію не видається можливим, і для деяких випадків побудови функції бажаності всіх кількісних критеріїв необхідне виконання таких умов: в області малих значень вартості та дози функція повинна мати високі значення і бути малочутливою до змін аргументу; в області великих значень вартості та дози функція повинна мати низькі значення й бути малочутливою до змін аргументу; в інтервалі близьких значень аргументу функція повинна мати високу роздільну здатність.

Провівши дослідження можливих варіантів для функції бажаності з перерахованими вище властивостями, була вибрана функція $e^{-ax} + b \cdot e^{-cx}$, при всіх x , $\{a, b, c\} > 0$. Ця функція є однією з групи функцій, які були запропоновані американськими вченими Р. Кіні і Х. Райфа для побудови функцій бажаності, що відображають спадаючу несхильність до ризику [4]. У процесі адаптації вказаної функції до перерахованих умов було знайдено нову функцію бажаності, що максимально відповідає поставленим вимогам,

$$u_i = EXP(-0,7 \cdot (X / A)^4), \tag{4}$$

де $i = 1, \dots, 7$; X - значення критерію; A - константа, яка визначається як середнє значення i -го критерію всіх розглянутих варіантів. Графічне зображення групи зазначених вище функцій бажаності залежно від вибраної константи при аргументі представлено на рис. 1.

Для порівняння якісних критеріїв використо-

вується адаптована система експертних оцінок методом безпосереднього оцінювання на основі універсальної 9-бальної шкали, яку запропонував у своїх роботах Т. Сааті [5]. Тоді функцію бажаності для якісних критеріїв можна визначити як ($i = 1 \dots 7$): $u_i(9) = 0$; $u_i(8) = 0,125$; $u_i(7) = 0,25$; $u_i(6) = 0,375$; $u_i(5) = 0,5$; $u_i(4) = 0,625$; $u_i(3) = 0,75$; $u_i(2) = 0,875$; $u_i(1) = 1$.

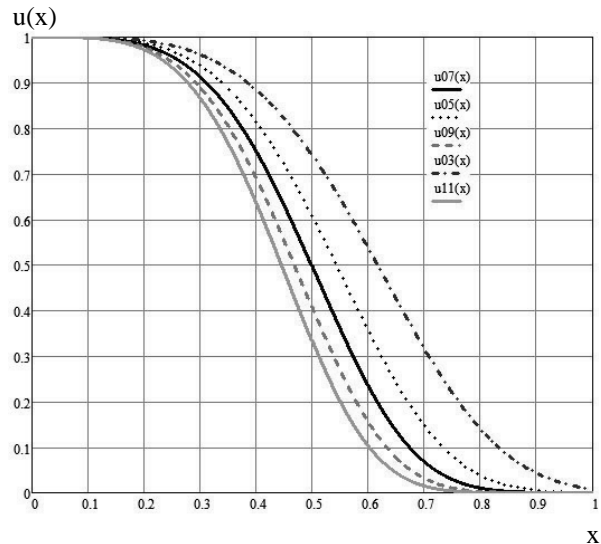


Рис. 1. Функція бажаності u при різних значеннях константи для критеріїв, що не мають верхньої межі значень.

Нехай $U_{11}, U_{21}, \dots, U_{M1}$ – вартості запропонованих M варіантів, $U_{12}, U_{22}, \dots, U_{M2}$ – КЕД, $U_{13}, U_{23}, \dots, U_{M3}$ – колективний радіологічний ризик персоналу; $U_{14}, U_{24}, \dots, U_{M4}$ – колективний радіологічний ризик населення; $U_{15}, U_{25}, \dots, U_{M5}$ – фінансовий ризик; T_1, T_2, \dots, T_M – час реалізації проекту; Q_1, Q_2, \dots, Q_M – величини ризику погіршення умов проведення робіт для всіх запропонованих M варіантів. Тоді для порівняння варіантів можна записати формулу

$$W_i = \sum_{l=1}^5 k_l \cdot EXP(-0,7 \cdot (M \cdot U_{il} / (\sum_{j=1}^M U_{jl}))^4) + k_6 \cdot u_6(T_i) + k_7 \cdot u_7(Q_i). \tag{5}$$

У тому випадку, коли критерії мають однакові ранги, формулу (5) можна записати у вигляді

$$W_i = (\sum_{l=1}^5 EXP(-0,7 \cdot (M \cdot U_{il} / (\sum_{j=1}^M U_{jl}))^4) + u_6(T_i) + u_7(Q_i)) / 7. \tag{6}$$

Оптимальним вважається варіант, що має найбільше значення узагальненого показника ефективності $W_{\max} = \max(W_i, i = 1 \dots M)$.

4. Вагові коефіцієнти для обчислення узагальненого показника ефективності прийнятого рішення

Для визначення вагових коефіцієнтів можна скористатися адаптованою системою експертних оцінок методом безпосереднього оцінювання на основі універсальної 9-бальної шкали [5]. Метод безпосереднього оцінювання – найбільш поширений метод у практиці прийняття рішень. Він дає змогу експерту використовувати більш чутливий інструмент взаємного порівняння варіантів. При використанні цього методу перед експертом ставиться задача – оцінити якісну властивість критерійного показника в балах (попередньо встановлюється діапазон змін цієї оцінки). Експерти повинні відобразити ступінь відповідності варіанта до властивості, яку розглянуто. Бали – це штучні числові оцінки якісної властивості.

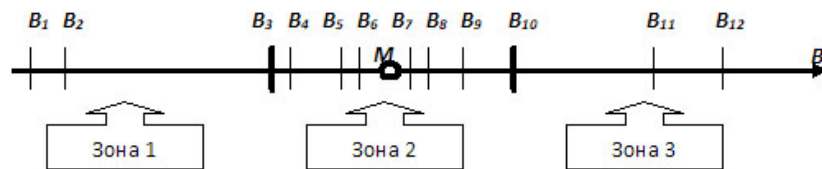


Рис. 2. Шкала оцінок експертів.

Усі відповіді експертів у порядку зростання їхніх значень розташовують на загальній шкалі і визначають зону оптимізму (зона 3), зону песимізму (зона 1) і зону середніх оцінок (зона 2). До зони 1 і зони 3 відносять по $\frac{1}{4}$ виставлених оцінок. Медіана M визначається для середньої зони оцінок.

Необхідною умовою достовірності отриманої оцінки є достатній рівень узгодженості думок експертів. Його перевіряють на основі аналізу дисперсії оцінок проміжку між $B_1 - B_{12}$. Якщо ОПР вважає неприйнятним ступінь розбіжності виставлених оцінок, то авторам оцінок із зони 1 і зони 3 пропонується аргументувати свою точку зору. Це може бути проведено в письмовому вигляді або на підставі спільного обговорення результатів. Після цього процедура експертного оцінювання повторюється. Найкращий варіант вирішення буде задовольняти умові: $\max_j \{B_{j\text{серед}}\}$

або $\max_j \{M_j\}$, де M_j – медіана оцінок експертами

j -го варіанта рішень. За допомогою удосконаленого методу безпосереднього оцінювання на основі універсальної 9-бальної шкали вагові коефіцієнти можуть бути отримані як $k_l = \frac{M_l}{\sum_{i=1}^n M_i}$, де

M_l – медіанна оцінка експертів по визначенню ваги критерію l на основі універсальної 9-бальної

Уся безліч оцінок експертів одного варіанта рішення $\{B_i^l\}$, $l=1, m, l=1, L$, що визначені різними фахівцями, можна відобразити на відповідній шкалі. На рис. 2 наведено приклад розміщення оцінок варіанта по властивості L , який визначений 12 експертами. Спочатку необхідно визначитися в допустимості рівня розбіжностей оцінок експертів, які знаходяться в діапазоні $B_1 - B_{12}$. Якщо особа, яка приймає рішення (ОПР), вважає її допустимою, то в якості загальної оцінки (результат обробки думок експертів) може бути використано середнє значення $B_{\text{серед}}$ або медіанне

значення M : $B_{\text{серед}} = \frac{\sum_{i=1}^m B_i}{m}$, де B_i – значення показань в оцінці i -го експерта.

шкали. Більш детально процедура проведення експертних оцінок для об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями описана в публікації [6]. В якості базового припущення можна стверджувати, що всі критерії рівнозначні між собою:

$k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = k_6 = k_7 = \frac{1}{7}$. Якщо ж існують

будь-які дані або співвідношення між обраними критеріями, або ОПР має своє уявлення про переваги критеріїв, то необхідно, використовуючи метод безпосереднього оцінювання на основі універсальної 9-бальної шкали, вагові коефіцієнти визначити у відповідності із визначеними перевагами критеріїв. В якості міри узгодженості думок експертів можна прийняти розбіжність в оцінках не більше 2 балів, що відповідає приблизно 20 % похибки всієї шкали. Отримувати більш точні значення не має сенсу, оскільки кількісні критерії не можуть бути обчислені з більшою точністю (похибки приладів вимірювань, складань проекту виконання робіт, вихідних даних тощо).

5. Аналіз чутливості

Оскільки деякі з критеріїв мають оціночний характер, необхідно провести аналіз чутливості отриманого вибору від варіації параметрів у межах змін, тобто визначити, чи не зміниться вибір оптимального варіанта при різних значеннях параметрів розрахунків за межі змін. Для кожного

варіанта обчислюється узагальнений показник ефективності W , серед яких визначено W_{\max} і найближче за величиною значення узагальненого показника ефективності $W_{\max-1}$ (максимальне з решти значень). Далі визначається мінімальне значення узагальненого показника ефективності для оптимального варіанта при варіації параметрів $\min(W_{\max})$ і максимальне значення узагальненого показника ефективності для найближчого варіанта при варіації параметрів $\max(W_{\max-1})$. Якщо $\min(W_{\max}) > \max(W_{\max-1})$, то отриманий варіант буде оптимальним. Якщо ж $\min(W_{\max}) \leq \max(W_{\max-1})$, то або всі варіанти рівноцінні між собою, або необхідно провести повторне коригування переліку критеріїв, уточнення меж зміни параметрів, оцінок якісних критеріїв і визначення вагомості критеріїв. Для остаточного затвердження вибору необхідно, щоб $\min(W_{\max}) > \max(W_{\max-1})$, або, як наслідок, $\min(W_{\max}) - \max(W_{\max-1}) > 0$. Тоді отриманий варіант буде оптимальним з урахуванням похибок визначення значень критеріїв. Після виконання розрахунків отримуємо результати для похибок наших критеріїв

$$\Delta_U < \frac{\sqrt[5]{U_{\max-1}} - \sqrt[5]{U_{\max}}}{\sqrt[5]{U_{\max}} + \sqrt[5]{U_{\max-1}}}. \quad (7)$$

Умова (7) є достатньою для обґрунтованого висновку. Однак ця умова диктує твердження, що всі значення критеріїв для варіанта W_{\max} повинні бути менше відповідних значень для варіанта $W_{\max-1}$. У такому випадку можна зробити висновок про вибір найкращого варіанта не проводячи обчислення функцій бажаності. Тому одночасне виконання умови (7) для всіх критеріїв не обов'язкове. Обов'язковою є умова $\min(W_{\max}) - \max(W_{\max-1}) > 0$, виконання якої гарантує коректність вибору найкращого варіанта.

6. Висновки

Визначено базові принципи прийняття рішень для різних за фізичним змістом показників проведення оцінки стану безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями: вартість виконання, колективна ефективна доза, колективний радіологічний ризик персоналу, колективний радіологічний ризик населення, фінансовий ризик,

час виконання робіт, величина ризику виникнення аварійних ситуацій.

У результаті проведеного аналізу можливих функцій бажаності, які відповідають вимогам задачі багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями, було вперше знайдена спеціальна функція бажаності всіх кількісних критеріїв, що в області малих значень вартості та дози функція має високі значення і малочутлива до змін аргументу, в області великих значень вартості та дози функція має низькі значення і малочутлива до змін аргументу, в інтервалі близьких значень аргументу функція має високу роздільну здатність.

У результаті проведеного дослідження методів отримання вагових коефіцієнтів вибрано найбільш прийнятний для умов задачі багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями метод безпосереднього оцінювання на основі універсальної 9-бальної шкали та вказано похибку їхнього визначення.

Удосконалений метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями впроваджено у практичну діяльність НАЕК "Енергоатом" під час вибору майданчика для будівництва централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива та під час стабілізаційних заходів на об'єкті «Укриття» Чорнобильської АЕС [7 - 9].

Даний метод дозволяє в умовах недостатності вихідних даних проводити аналіз і порівняння варіантів реалізації таких робіт:

зняття енергоблоків атомних електростанцій з експлуатації;

вибору оптимальних технологій поводження з РАВ;

вибору майданчика розміщення об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями;

вибору технологічної схеми і технологій вилучення ПВМ;

вибору методів і технологій демонтажу нестійких будівельних конструкцій об'єкта «Укриття»;

інших робіт, в яких критеріїв оцінки кілька і вони не можуть порівнюватися в початковому вигляді.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. International Commission on Radiological Protection. Optimization and Decision Making in Radiological Protection. ICRP Publication 55, Ann. ICRP 20(1) (1990) 1.
2. В.В. Деренговський, А.В. Носовський. Стан проблеми щодо проведення багатокритеріального аналізу безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями. Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 19 (2018) 31.
3. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи (МОЗ України, 1998).

4. Р. Кини, Х. Райфа. *Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения*. Пер. с англ. (М.: Радио и связь, 1981) 560 с.
5. T.L. Saaty. *The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation* (McGraw-Hill, New York, 1980)
6. В.В. Деренговский. Применение метода экспертных оценок при проектировании и организации радиационно-опасных работ по преобразованию объекта «Укрытие». *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 7 (2007) 90.
7. В.В. Деренговский и др. Проведение анализа доз/затрат/выгод по стабилизационным мероприятиям 14, 14а, 4 и б/н. *Проблеми Чорнобиля* 13 (2003) 108.
8. В.В. Деренговский и др. Выбор площадки для строительства централизованного хранилища отработавшего ядерного топлива. *Проблеми Чорнобиля* 13 (2003) 24.
9. В.В. Деренговский, В.М. Рудько, В.О. Говоров. Результат порівняльного аналізу «доз - витрат - вигоди» для двох варіантів «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття». *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля* 25 (2015) 94.

В. В. Деренговский*, А. В. Носовский

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль, Украина

*Ответственный автор: v.derengovsky@ispnpp.kiev.ua

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЙ МЕТОД МНОГОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗА ЕКОЛОГІЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ С РАДІАЦІОННО-ЯДЕРНЫМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

В результате включения полученных новых знаний к рекомендованному МКРЗ методу многокритериального анализа был усовершенствован этот метод путем определения основных критериев оценки вариантов изменения состояния экологической безопасности объектов, простых в применении и действенных для условий неполноты и недостаточной достоверности входных данных функций желательности и получения весовых коэффициентов выбранных критериев для обобщенной оценки вариантов изменения состояния экологической безопасности объектов с радиационно-ядерными технологиями.

Ключевые слова: радиационная безопасность, объекты с радиационно-ядерными технологиями, функция желательности, многокритериальный анализ, экспертные оценки.

V. V. Derengovskiy*, A. V. Nosovskiy

Institute for Safety Problems of NPP, National Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl, Ukraine

*Corresponding author: v.derengovsky@ispnpp.kiev.ua

IMPROVED METHOD OF MULTI-CRITERIAN ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF OBJECTS WITH RADIATION-NUCLEAR TECHNOLOGIES

As a result of incorporating the new knowledge received for the recommended multi-criteria analysis method, has been improved by defining the main criteria for evaluating variants of the state of environmental safety of objects, defining simple in application and effective for conditions of incompleteness and inadequate reliability of input data of desirable functions and obtaining weight coefficients. Selected criteria for generalized assessment of variations of the state of environmental safety of objects with radiation-nuclear technologies was obtained.

Keywords: radiation safety, objects with radiation-nuclear technologies, desirability function, multicriteria analysis, expert assessments.

REFERENCES

1. International Commission on Radiological Protection. *Optimization and Decision Making in Radiological Protection*. ICRP Publication 55, Ann. ICRP 20(1) (1990) 1.
2. V.V. Derengovskiy, A.V. Nosovskiy. State of the problem of multi-criterial safety analysis of objects with radiation-nuclear technologies. *Problemy*
3. Bezpeky Atomnykh Electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl) 30 (2018) 31. (Ukr)
4. Law of Ukraine "On the Use of Nuclear Energy and Radiation Safety" (Verkhovna Rada of Ukraine; Law of February 8, 1995 No. 39/95-BP). (Ukr)
5. R. Keeney, H. Raiffa. *Decisions with Multiple Ob-*

- jectives: Preferences and Value Tradeoffs* (IIASA Working Paper, 1975) 1131 p.
5. T.L. Saaty. *The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation* (McGraw-Hill, New York, 1980).
 6. V.V. Dergenovskiy. Use of expert estimations technique during designing and organization of radiation-danger works on the shelter transformation. *Problemy Bezpeky Atomnykh Electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl)* 7 (2007) 90. (Rus)
 7. V.V. Dergenovskiy et al. Dose/Cost/Benefit Analysis of Stabilization Measures 14, 14a, 4 and w/n. *Problemy Chornobylya (Problems of Chornobyl)* 13 (2003) 108. (Rus)
 8. V.V. Dergenovskiy et al. Selection of a site for the construction of a centralized spent nuclear fuel storage facility. *Problemy Chornobylya (Problems of Chornobyl)* 13 (2003) 24. (Rus)
 9. V.V. Dergenovskiy, V.M. Rudko, V.A. Govorov. Methodology for the comparative analysis of "dose - cost – be nefit" for the two options "early" deconstruction of unstable structures of the "Ukryttya" object. *Problemy Bezpeky Atomnykh Electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl)* 25 (2015) 94. (Ukr)

Надійшла 15.06.2018
Received 15.06.2018