

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

Системний підхід до формування методики порівняльного аналізу сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему

Ключові слова:

об'єкт «Укриття»,
аналіз сценаріїв,
системний підхід,
експертні методи,
методи багатокритеріальної
оптимізації,
багатофакторні моделі

Представлено дослідження, пов'язані з системним підходом до формування методики порівняльного аналізу сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. Визначено індикатори та фактори оцінки сценаріїв, проведено їхнє групування за критеріями екологічної безпеки. Запропоновано системний підхід до реалізації методики оцінки сценаріїв за допомогою трьох класів методів. Системність визначення цінностей сценаріїв реалізується етапністю досліджень. На першому етапі аналізу запропоновано методику якісного порівняння сценаріїв на основі колегіального експертного оцінювання. На другому етапі запропоновано методику багатокритеріальної оптимізації для параметричної деталізації цінностей сценаріїв та прийняття рішень. На третьому етапі системного підходу розроблено алгоритм побудови багатофакторних моделей для визначення параметрів управління.

Вступ

За визначенням [1] новий безпечний конфайнмент (НБК) — це споруда, яка включає в себе комплекс технологічного обладнання для вилучення ядерних матеріалів, поводження з радіоактивними відходами (РАВ) та інші системи, призначена для діяльності з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему (ЕБС) для забезпечення безпеки персоналу, населення та довкілля.

Введення в експлуатацію НБК є другим етапом реалізації завдання з перетворення об'єкта «Укриття» на ЕБС [2]. Початок робіт з реалізації третього етапу передбачає як складову вибір сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на ЕБС.

Підходи до вибору сценаріїв повинні базуватись на створенні методики їхнього порівняльного аналі-

зу. У роботі [3] зазначено, що об'єкт дослідження являє собою складну систему і формування методики оцінки сценаріїв повинно базуватися на врахуванні множини якісно різномірних факторів та індикаторів. Тому завдання створення методики порівняльного аналізу сценаріїв потребує, крім аналізу технічних, технологічних, економічних, фінансових показників, які будуть супроводжувати процес перетворення об'єкта «Укриття», також системного підходу до оцінки та порівняння станів об'єкта дослідження, методів прийняття рішень та управління.

Такий підхід до створення методики аналізу сценаріїв дасть змогу оптимально використовувати економічні та фінансові ресурси, безпекові характеристики персоналу й навколишнього середовища та сформува-ти оптимальні управлінські рішення під час реалізації сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на ЕБС.

© I. С. Скітер, 2023

Постановка проблеми та завдання дослідження

Згідно з аналізом норм, правил України [4] та рекомендацій МАГАТЕ [5], критерії прийняття рішень для проведення оцінки екологічного рівня безпеки визначені таким чином:

- запобігання ядерному інциденту;
- критерії протирадіаційного захисту;
- критерії поводження з РАВ;
- загальнотехнічні критерії.

Зазначені критерії здійснення аналізу екологічної безпеки варіантів виконання робіт під час реалізації сценаріїв поетапного вилучення паливовмісних матеріалів (ПВМ) визначаються за допомогою семи показників екологічної безпеки:

- вартість виконання робіт (з витратами на протирадіаційний захист і поводження з РАВ);
- колективна ефективна доза (КЕД) під час реалізації заходів;
- колективний радіологічний ризик персоналу (без урахування КЕД під час реалізації заходу);
- колективний радіологічний ризик населення (з урахуванням потенційного опромінення населення в умовах можливих аварійних ситуацій під час виконання чи невиконання запланованих робіт);
- фінансовий ризик (з урахуванням потенційних витрат на ліквідацію наслідків можливих аварійних

ситуацій під час виконання чи невиконання запланованих робіт);

- час реалізації проекту;
- величина можливої невизначеності.

Для порівняльного аналізу сценаріїв поетапного вилучення ПВМ з об'єкта «Укриття» зазначені вище сім показників екологічної безпеки було визначено за допомогою 11 індикаторів [6], наведених у таблиці.

Об'єктом дослідження є порівняльний аналіз сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на ЕБС. Предметом дослідження є методика проведення порівняльного аналізу сценаріїв. Виходячи з визначення об'єкта та предмета досліджень у межах статті, можна сформулювати завдання дослідження:

- опис та визначення основних параметрів масиву індикаторів, на основі яких буде проводитись порівняльний аналіз сценаріїв, формулювання критеріїв оцінки сценаріїв;
- вибір та характеристика методів і моделей оцінки факторів та індикаторів, їхніх зв'язків та впливів на результуючу ознаку;
- створення алгоритму системного аналізу сценаріїв.

Поставлені завдання дають змогу реалізувати основну мету дослідження — систематизувати процес створення методики порівняльного аналізу на основі основних принципів теорії систем.

Індикатори для порівняльного аналізу сценаріїв поетапного вилучення ПВМ

№ п/п	Індикатор	Позначення
1	Експлуатаційні витрати на забезпечення поточної безпеки об'єкта «Укриття», тис. грн	$OE_{ЗПБ}$
2	Витрати на створення захисних бар'єрів для утримання та ізоляції ПВМ після зняття з експлуатації НБК, тис. грн	$OE_{ЗБ}$
3	Витрати на створення додаткової інфраструктури для вилучення та подальшого поводження з ПВМ та іншими РАВ після зняття з експлуатації НБК, тис. грн	$OE_{СДІ}$
4	Ступінь використання інфраструктури НБК для вилучення та подальшого поводження з ПВМ та іншими РАВ, %	$L_{ВІ}$
5	Ризики неготовності сховищ для проміжного зберігання вилучених ПВМ, %	$R_{НСПЗ}$
6	Ризики неготовності геологічного сховища для остаточного захоронення ПВМ, %	$R_{НГС}$
7	Радіологічні ризики, люд./рік	$R_{Рад}$
8	Ризики змінності властивостей (деградації) ПВМ з плином часу, %	$R_{Д}$
9	Ризики недофінансування робіт з поетапного вилучення ПВМ та подальшого поводження з ними, тис. грн/рік	$R_{НДФ}$
10	Ризики руйнувань захисних бар'єрів навколо скупчень ПВМ з плином часу, %	$R_{РЗБ}$
11	Час реалізації проекту (сценарію), роки	T

Системність при формуванні методики порівняльного аналізу сценаріїв

Використання системного аналізу при оцінці сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на ЕБС дає змогу провести не тільки аналіз предмета дослідження — порівняльного аналізу сценаріїв — але й дослідити методи прийняття рішень щодо їхнього оптимального вибору/ранжування за відносною цінністю та формування управлінських рішень щодо процесу реалізації сценаріїв.

Реалізація основних принципів теорії систем — ієрархічності, збереження та причиново-наслідкових обмежень — може бути проведена шляхом етапності досліджень та трактування отриманих на кожному етапі результатів з метою прийняття ефективних організаційно-управлінських рішень.

Системний підхід до реалізації завдання розробки методики порівняльного аналізу сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на ЕБС представлено на рис. 1.

Критерії прийняття рішень для проведення оцінки екологічного рівня безпеки (блок 1) визначено вище. Вони є базою для подальшого формування системи аналізу сценаріїв.

Зазначені критерії для практичного застосування — здійснення аналізу екологічної безпеки робіт під час ре-

алізації сценаріїв поетапного вилучення ПВМ — визначені сімома показниками екологічної безпеки (блок 2).

Для порівняльного аналізу сценаріїв поетапного вилучення ПВМ зазначені показники екологічної безпеки визначаються за допомогою 11 індикаторів (блок 3) (див. таблицю) [7]. Індикатори 1–11 можна згрупувати за факторіальними ознаками, а саме:

безпекові складові сценаріїв (індикатори 7, 8, 10, 11);
фінансові складові (індикатори 1, 2, 3, 9);

інфраструктурні складові сценаріїв (індикатори 4, 5, 6).

Згруповані таким чином індикатори є основою для використання відповідних методів (блок 4) для оцінювання та подальшого порівняння сценаріїв:

експертні методи (блок 4.1) дають змогу на основі колегіальних *експертних оцінок* груп факторів та їхніх індикаторів визначити чисельну оцінку окремому сценарію і провести їхнє ранжування за величиною їхньої відносної цінності;

моделі багатокритеріальної оптимізації (БКО) (блок 4.2) дають змогу на основі масиву *параметричних оцінок* індикаторів для відповідного фактора, а також для набору факторів проводити оцінку «цінності» сценаріїв згідно з уподобаннями особи, яка приймає рішення (ОПР), проводити ранжування сценаріїв за запитом ОПР, їхню корекцію та вибір;

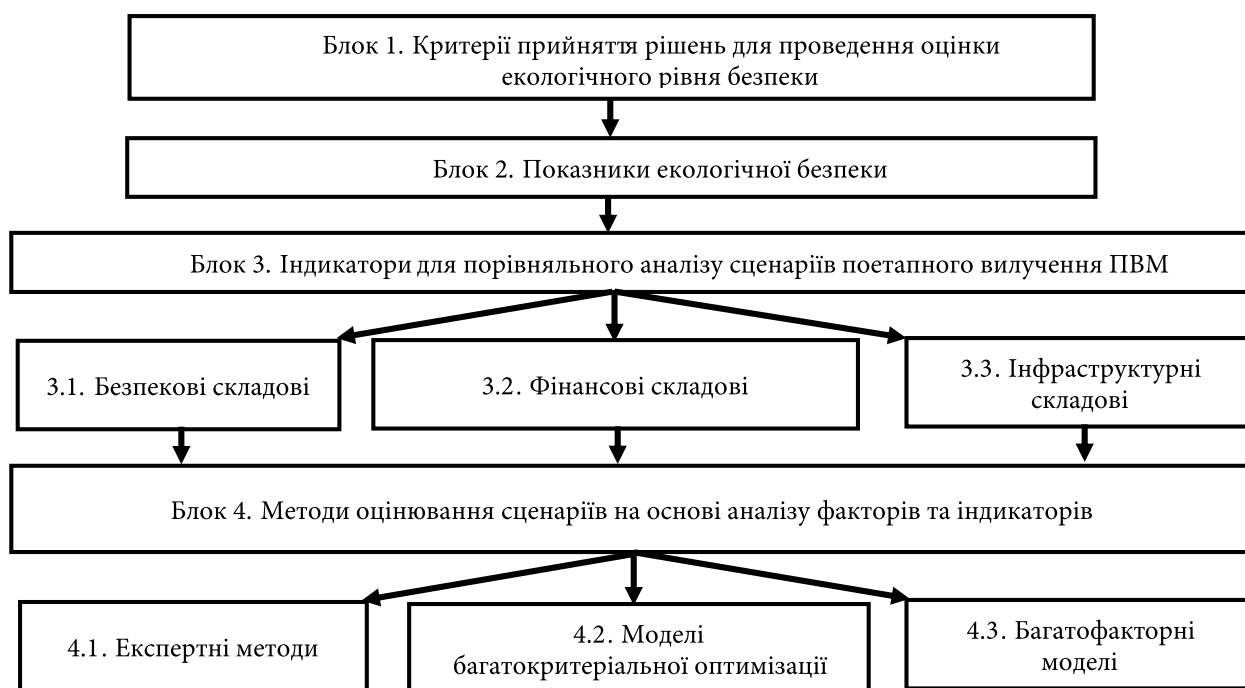


Рис. 1. Системний підхід до реалізації завдання розробки методики порівняльного аналізу сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на ЕБС

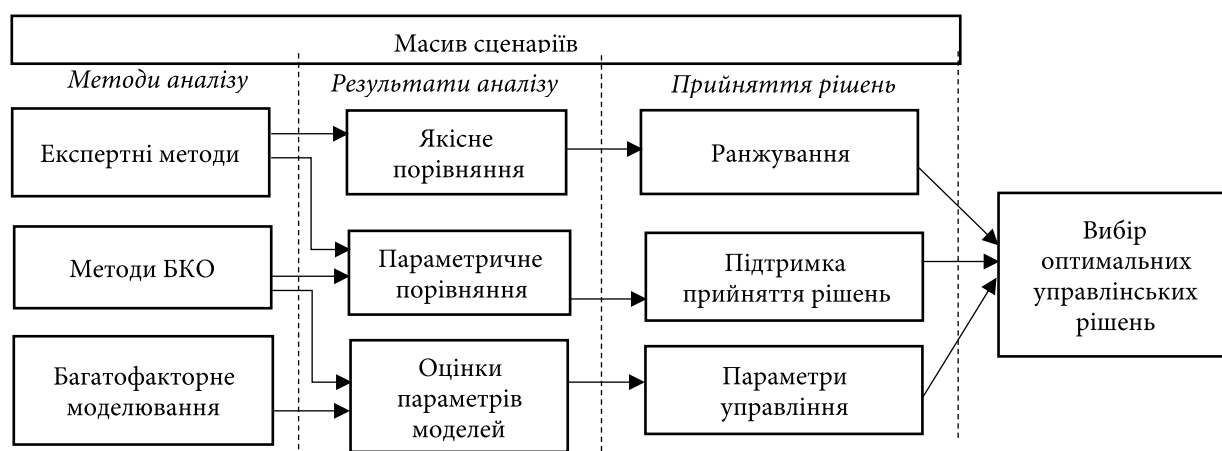


Рис. 2. Інформаційне наповнення методів порівняльного аналізу сценаріїв

багатофакторні моделі (блок 4.3) також повинні базуватись на *параметричних оцінках* факторів та їхніх індикаторів. Дають змогу визначити «значущість» індикаторів у межах відповідної моделі, їхню еластичність, норми заміщення та інші параметри управління та прийняття рішень.

Особливості використання системного підходу для порівняльного аналізу сценаріїв

Запропоновані методи оцінювання та порівняльного аналізу сценаріїв 4.1, 4.2 та 4.3 (див. рис. 1) можуть бути використані як окремо, для відповідного оцінювання та порівняння сценаріїв, так і комплексно — з метою більш детального аналізу, порівняння, прийняття рішень та управління. На кожному етапі використання методів до вхідних даних висуваються різні вимоги щодо представлення даних та їхньої формалізації. Крім того на кожному етапі можна отримати висновки різного класу інформаційного наповнення щодо процесу прийняття рішень (рис. 2).

Використання експертних методів пропонується проводити за допомогою бального колегіального оцінювання як окремих груп факторів, так і їхніх складових — індикаторів. Визначення відносних цінностей сценаріїв проводиться попарним порівнянням окремих оцінок та визначенням відносних цінностей сценаріїв [8]. Перевага цієї групи методів — узагальнене оцінювання індикаторів за відносною величиною цінності сценарію. Як результат — якісне порівняння сценаріїв, їхнє ранжування за величиною відносної оцінки. До недоліків слід віднести необхідність ретельного підбору експертів, визначення їхньої компетентності та досягнення ними єдиного колегіального рішення щодо оцінок факторів та індикаторів.

Отримані таким чином порівняльні величини сценаріїв за потреби ОПР можуть бути деталізовані за допомогою використання методів БКО. При цьому можливе уточнення оцінок сценаріїв, ранжованих за відносними величинами, за допомогою визначення їхніх параметричних характеристик (абсолютних величин) — безпекових, фінансових, інфраструктурних з індикативною деталізацією їх. Перевагою методів БКО є параметрична деталізація ранжованих сценаріїв за групами факторів та їхніми відповідними індикаторами, можливість формування ОПР прийняття рішень на основі таких оцінок. Як результат — підтримка прийняття рішень за запитом ОПР, корегування значень індикаторів за запитом ОПР тощо. До недоліків слід віднести необхідність та труднощі визначення параметричних характеристик сценаріїв як за відповідними групами, так і за їхніми індикаторами.

Методи багатофакторного моделювання дають змогу проводити побудову математичних моделей, в яких оцінки параметрів при відповідних змінних за знаком та величиною вказують на силу впливу відповідного фактора чи індикатора на результуючу ознаку. Крім того, на основі оцінок параметрів моделі, середніх значень результуючої ознаки та факторних (індикаторних) змінних можуть бути розраховані коефіцієнти еластичності факторів (індикаторів), норми заміщення їх та ін. Перевагами методів факторного моделювання є можливість ОПР крім вибору оптимальних варіантів реалізації сценаріїв оцінити можливість управління процесом прийняття рішень при виборі сценаріїв. Як результат — установлення регресійних залежностей із визначенням значущості, сили та напрямку впливу відповідних індикаторів, прогноз станів та визначення параметрів управління. До недоліків слід віднести необхідність параметрич-

ної оцінки індикаторів, які включають у моделі, що не завжди може бути визначено (наприклад, до групи фінансових індикаторів).

Отже, використання системного підходу дасть змогу провести не тільки якісний порівняльний аналіз сценаріїв та їхнє ранжування, але й враховувати індикативні ознаки факторів. Крім того, також визначати характеристики управління процесами реалізації сценаріїв на основі оцінок параметрів управління, визначених за допомогою моделювання.

Формалізація етапів системного підходу

Масив індикаторів для оцінки сценаріїв на основі функції їхніх цінностей SF_i (significance function) [3], які тотожно дорівнюють прогнозованому рівню екологічної безпеки при реалізації i -го сценарію з відповідними групами факторів Φ_j та їхніми складовими критеріями, представлено в такому вигляді:

$$\begin{aligned} SF_i &= \{\Phi_1 \langle R_{Д}, R_{РЗБ}, R_{Рад}, T \rangle_i; \\ \Phi_2 \langle OE_{ЗПБ}, OE_{ЗБ}, OE_{СДІ}, R_{НДФ} \rangle_i; \\ \Phi_3 \langle L_{ВІ}, R_{НСПЗ}, R_{НГС} \rangle_i\}, \end{aligned} \quad (1)$$

де i — окремий сценарій, $i = \overline{1, p}$, $\bar{p}$ — кількість сценаріїв; $j = \overline{1, k}$, $\bar{k} = 3$ — кількість груп факторів;

$$\Phi_1 \left\{ \begin{array}{cccc} R_{Д,1} & R_{РЗБ,1} & R_{Рад,1} & T_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{Д,p} & R_{РЗБ,p} & R_{Рад,p} & T_p \end{array} \right\} - \text{безпековий фактор}$$

сценаріїв зі своїми індикаторами;

$$\Phi_2 \left\{ \begin{array}{cccc} OE_{ЗПБ,1} & OE_{ЗБ,1} & OE_{СДІ,1} & R_{НДФ,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ OE_{ЗПБ,p} & OE_{ЗБ,p} & OE_{СДІ,p} & R_{НДФ,p} \end{array} \right\} - \text{фінансовий}$$

фактор сценаріїв зі своїми індикаторами;

$$\Phi_3 \left\{ \begin{array}{ccc} L_{ВІ,1} & R_{НСПЗ,1} & R_{НГС,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{ВІ,p} & R_{НСПЗ,p} & R_{НГС,p} \end{array} \right\} - \text{інфраструктурний}$$

фактор сценаріїв зі своїми індикаторами.

Використання показника SF_i (1) зі своїми складовими дасть змогу реалізувати послідовно блоки 4.1, 4.2 та 4.3, представлені на рис. 1, та методи аналізу, наведені на рис. 2.

Таким чином, початковими умовами до використання методики оцінки сценаріїв на основі колективних експертних оцінок (блок 4.1, див. рис. 1) є множина факторів Φ_1 , Φ_2 та Φ_3 з групами визначених для них індикаторів (1).

Критерії з першого по одинадцятий (див. таблицю) оцінюються *непараметрично* групою експертів (у балах), колегіально, з визначенням спільно узгодженої бальної оцінки критеріїв для кожного сценарію.

Алгоритм оцінювання сценаріїв за допомогою експертних методів включає в себе [3]:

1. Формування масиву індикаторів для порівняльного аналізу сценаріїв

$$\begin{aligned} Sc_i &= (OE_{ЗПБ(i)}, OE_{ЗБ(i)}, OE_{СДІ(i)}, \\ &L_{ВІ(i)}, R_{НСПЗ(i)}, R_{НГС(i)}, R_{Рад(i)}, \\ &R_{Д(i)}, R_{НДФ(i)}, R_{РЗБ(i)}, T_i). \end{aligned} \quad (2)$$

2. Групування масиву індикаторів за характеристиками індикаторів

$$\Phi = \{\Phi_1; \Phi_2; \Phi_3\}. \quad (3)$$

3. Групове експертне оцінювання факторів та індикаторів у межах факторів за бальними оцінками. Оцінювання проводиться двома групами користувачів — інженерами із знань (експертами) та ОПР. При цьому можливе первинне якісне оцінювання значущості факторів (індикаторів) та оцінювання сценаріїв.

Визначення відносних цінностей $\{\Omega^1, \dots, \Omega^{k=3}\}$ факторів та індикаторів $\{\omega_1^i, \dots, \omega_p^i\}$ у межах груп факторів на основі матриць попарних порівнянь

$$\begin{cases} A^\Phi = (a_{ij}^\Phi) \\ A^{\text{інд}} = (a_{ij}^{\text{інд}}) \end{cases}, \quad (4)$$

де a_{ij}^Φ та $a_{ij}^{\text{кр}}$ — перевага i -го фактора/індикатора над j -м.

4. Формування вектора комплексних показників для оцінки комплексних цінностей сценаріїв:

$$W = [\langle (\omega_1^1, \dots, \omega_l^1), \Omega^1 \rangle; \langle (\omega_1^2, \dots, \omega_m^2), \Omega^2 \rangle; \dots; \langle (\omega_1^p, \dots, \omega_z^p), \Omega^k \rangle], \quad (5)$$

де l, m, z — кількість індикаторів, що формують відповідний фактор.

5. Визначення комплексних цінностей сценаріїв на основі виразу (5) геометричної зваженої від мультиплікативної згортки виду

$$W_{(Sc_i)} = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^k \left[(\omega_j^i)^{\Omega^k} \right]_{(Sc_i)}}, \quad i = \overline{1, p}, j = \overline{1, k}, \quad (6)$$

де $0 < W_{(Sc_i)} < 1$; $Sc_i \in Sc$ — масив сценаріїв; ω_j^i — ваги критеріїв, які формують фактори відповідних сценаріїв; Ω^k — ваги факторів для сценаріїв.

6. Ранжування сценаріїв за величиною їхньої комплексної цінності

$$Ranc(Sc) = W_{(Sc_i)}^* > \dots > W_{(Sc_i)}^0, \quad (7)$$

де $W_{(Sc_i)}^* = \operatorname{argmax}(W_{(Sc_i)}), W_{(Sc_i)}^0 = \operatorname{argmin}(W_{(Sc_i)})$.

Результати, отримані за виразом (7), є основою для первинного якісного порівняння сценаріїв, визначення послідовності їхньої реалізації тощо.

Вхідними даними до реалізації *методики багатокритеріальної оптимізації* є індикатори, наведені в таблиці, та «цінності сценаріїв» SF_i , формалізовані у виразі (2) та визначені у формулі (6). Тоді в загальному вигляді багатокритеріальну задачу оцінки сценаріїв вилучення ПВМ можна розглядати як задачу одночасної оптимізації декількох цільових функцій на заданій множині допустимих планів:

$$\begin{cases} SF_i = f_i(x) \rightarrow \operatorname{opt}, & i = \overline{1, p}, \\ x \in X \end{cases} \quad (8)$$

де p — кількість цільових функцій, що підлягають оптимізації; f_i — окрема i -та функція з індикаторного набору ($i = 1, \dots, p$); f_i ($OE_{ЗПБ(i)}, OE_{ЗБ(i)}, OE_{СДІ(i)}, L_{ВІ(i)}, R_{НСПЗ(i)}, R_{НГС(i)}, R_{Рад(i)}, R_{Д(i)}, R_{НДФ(i)}, R_{РЗБ(i)}, T_{(i)}$); X — множина допустимих планів; $x = \{OE_{ЗПБ}, OE_{ЗБ}, OE_{СДІ}, L_{ВІ}, R_{НСПЗ}, R_{НГС}, R_{Рад}, R_{Д}, R_{НДФ}, R_{РЗБ}, T\}$ — окремий план із множини допустимих планів X .

Цільовою функцією є максимізація/мінімізація величини SF_i на множині визначених сценаріїв, що характеризуються наборами критеріїв, визначених вище.

Допустимими планами виступають набори сценаріїв вилучення ПВМ із відповідними значеннями індикаторів, які можуть бути реалізовані відносно завдання забезпечення екологічної безпеки.

Набори допустимих сценаріїв формуються зіставленням оцінок індикаторів для сценаріїв із урахуванням можливих/допустимих меж варіації. При цьому оцінка довільного допустимого плану/сценарію багатокритеріальної задачі є векторною величиною f_i ($OE_{ЗПБ(i)}, OE_{ЗБ(i)}, OE_{СДІ(i)}, L_{ВІ(i)}, R_{НСПЗ(i)}, R_{НГС(i)}, R_{Рад(i)}, R_{Д(i)}, R_{НДФ(i)}, R_{РЗБ(i)}, T_{(i)}$).

Дослідження багатокритеріальної задачі та опрацювання методики багатокритеріальної оптимізації зручно проводити, якщо поряд з вихідною багатокритеріальною задачею розглянути таку допоміжну однокритеріальну задачу:

$$\begin{cases} SF_i = \sum_{i=1}^p \alpha_i f_i(x) \rightarrow \max/\min, \\ f_i(x) \{ \geq \leq \} \psi_i, & i = \overline{1, p} \\ x \in X \end{cases} \quad (9)$$

де α_i, ψ_i — деякі дійсні числа та векторні критеріальні характеристики, причому знаки перших з них, а також

знаки нерівностей в індикаторних обмеженнях узгоджуються з оптимізаційною спрямованістю (до максимуму або до мінімуму) відповідних цільових функцій.

Алгоритм реалізації оцінювання сценаріїв на основі методики багатокритеріальної оптимізації включає в себе [8]:

1. Визначення множини планів реалізації сценаріїв, відсів неефективних планів, формування множини допустимих (ефективних) планів та визначення (або наближене оцінювання) меж варіації кожної з цільових функцій (значень індикаторів) на множині ефективних планів. У межах параметричних характеристик індикаторів y_i визначаються найкращі y_i^* та найгірші y_i^0 значення відповідно, а саме:

$$\begin{cases} y_i^* = (OE_{ЗПБ(i)}^*, OE_{ЗБ(i)}^*, OE_{СДІ(i)}^*, L_{ВІ(i)}^*, R_{НСПЗ(i)}^*, \\ R_{НГС(i)}^*, R_{Рад(i)}^*, R_{Д(i)}^*, R_{НДФ(i)}^*, R_{РЗБ(i)}^*, T_i^*) \\ y_i^0 = (OE_{ЗПБ(i)}^0, OE_{ЗБ(i)}^0, OE_{СДІ(i)}^0, L_{ВІ(i)}^0, R_{НСПЗ(i)}^0, \\ R_{НГС(i)}^0, R_{Рад(i)}^0, R_{Д(i)}^0, R_{НДФ(i)}^0, R_{РЗБ(i)}^0, T_i^0) \end{cases} \quad (10)$$

2. Визначення вагових коефіцієнтів для індикаторів, які формують загальну функцію цінності SF_{Σ} сценарію:

$$\begin{cases} SF_i = f_i(x) \rightarrow \operatorname{opt}, & i = \overline{1, p}, \\ x \in X \end{cases} \quad (11)$$

У результаті отримуємо чисельні оцінки вагових коефіцієнтів індикаторів — критеріїв оцінки сценаріїв:

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_{OE_{ЗПБ}} \\ \alpha_{OE_{ЗБ}} \\ \alpha_{OE_{СДІ}} \\ \alpha_{L_{ВІ}} \\ \alpha_{R_{НСПЗ}} \\ \alpha_{R_{НГС}} \\ \alpha_{R_{Рад}} \\ \alpha_{R_{Д}} \\ \alpha_{R_{НДФ}} \\ \alpha_{R_{РЗБ}} \\ \alpha_T \end{pmatrix}, [\alpha] = \begin{pmatrix} [\text{тис. грн}]^{-1} \\ [\text{тис. грн}]^{-1} \\ [\text{тис. грн}]^{-1} \\ [\%]^{-1} \\ [\%]^{-1} \\ [\%]^{-1} \\ [\%]^{-1} \\ [\%]^{-1} \\ [\%]^{-1} \\ [\%]^{-1} \\ [\%]^{-1} \end{pmatrix} \quad (12)$$

3. Визначення узагальнених адитивних функцій цінностей сценаріїв $SF_i, i = \overline{1, p}$ для всієї множини допустимих планів X :

$$SF_i = \sum_{i=1}^p \alpha_i f_i(x). \quad (13)$$

4. На множині сценаріїв (допустимих планів) визначається такий — ефективний, який відповідає максимуму/мінімуму узагальненої адитивної функції цінності залежно від оптимізаційної спрямованості параметрів індикаторів:

$x^{(1)} \equiv \max(SF_{\Sigma(i)}), i = \overline{1, p}$ при оптимізаційній спрямованості параметрів індикаторів до максимуму;
 $x^{(1)} \equiv \min(SF_{\Sigma(i)}), i = \overline{1, p}$ при оптимізаційній спрямованості параметрів індикаторів до мінімуму.

Його оцінка $y^{(1)} = f(x^{(1)})$ разом із параметричними значеннями індикаторів передається ОПР.

5. Якщо ОПР погоджується обрати сценарій $x^{(1)}$ за розв'язок багатокритеріальної задачі, то вказаний сценарій пропонується до реалізації, робота алгоритму закінчена. Якщо ОПР не погоджується із параметрами критеріїв для визначеного сценарію $x^{(1)}$, то по кожному з індикаторів вказати такі припустимі рівні $\psi_i \in [y_i^0; y_i^*], i = \overline{1, p}$ які вона вважає прийнятними.

6. Визначення реальності рівнів параметрів індикаторів, які ОПР визначила як припустимі на попередньому етапі та здійснюється їхня корекція або в бік покращення, якщо вони є реальними, або в бік послаблення, щоб зробити реальними. Для цього розв'язують однокритеріальну задачу відносно параметра t :

$$\begin{cases} t \rightarrow \max \\ \frac{f_i(x) - \psi_i}{y_i^* - \psi_i} \geq t, i = \overline{1, p}. \\ x \in X \end{cases} \quad (14)$$

Для цільових функцій, спрямованих до максимуму

$$f_i(x) \geq \psi_i + t(y_i^* - \psi_i). \quad (14.1)$$

Для спрямованих до мінімуму

$$f_i(x) \leq \psi_i - t(y_i^* - \psi_i). \quad (14.2)$$

Випадок $t \geq 0$ свідчить про реальність припустимих рівнів, а випадок $t < 0$ — про їхню нереальність. Для реальних припустимих рівнів ψ_i^* проводиться оцінка величини функції цінностей $SF_{\Sigma(k)}$. Для нереальних припустимих рівнів проводиться корегування параметрів індикаторів та повторне визначення їхньої реальності.

7. На множині сценаріїв (допустимих планів) знаходять такий ефективний план $x^{(2)}$, який за величиною функції цінностей максимально наближений до реальних припустимих рівнів усіх критеріальних показників, указаних ОПР.

8. Якщо ОПР не погоджується з рекомендацією обрати ефективний план $x^{(2)}$ за розв'язок багатокритеріальної задачі вибору найкращого сценарію, то проводиться корекція первісних припустимих рівнів цільової функ-

ції ψ_i . Для забезпечення збіжності методу нові рівні $\psi_i^{(1)}$ повинні бути слабкішими від попередніх.

Робота алгоритму закінчується при досягненні затвердження ОПР визначеного ефективного плану з відповідними параметрами індикаторів. Ефективний план $x^{(2)}$ є основою для формування управлінських рішень на базі аналізу параметрів його індикаторів.

Згідно зі схемою процесу порівняльного аналізу сценаріїв (див. рис. 2) *побудова багатофакторних (індикаторних) моделей* може виступати як окремим методом дослідження, так і доповнювати та деталізувати результати, отримані на попередніх етапах — експертний аналіз та методологію БКО. Узагальнена математична модель аналізу може бути представлена як

$$Y(t) = F_0(\overline{X(t)}, \overline{B}) + \overline{E(t)}, \quad (15)$$

де — вектор залежної змінної (у термінах дослідження SF — «цінність сценаріїв»);

$$\overline{X(t)} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{k1} & \cdots & x_{kp} \end{pmatrix} - \text{матриця незалежних}$$

змінних, предикторів (у термінах дослідження $\{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3\}$ — «фактори оцінки» або $\{\text{OE}_{\text{зпб}}, \text{OE}_{\text{зб}}, \text{OE}_{\text{сдп}}, L_{\text{вп}}, R_{\text{нспз}}, R_{\text{нгс}}, R_{\text{рад}}, R_{\text{д}}, R_{\text{ндф}}, R_{\text{рзб}}, T\}$ — «параметри індикаторів для відповідних факторів» на глибшому рівні узагальнення); $\overline{B} = \{b_0, b_1, \dots, b_p\}$ — вектор параметрів моделі, «вектор управління»; $\overline{E(t)} = \{e_1, \dots, e_p\}$ — вектор похибок моделі, стохастична складова; F_0 — управляюча функція, перетворювач, операнд; k, p — кількість факторів (індикаторів) у моделі та кількість сценаріїв відповідно, $i = \overline{1, k}; j = \overline{1, p}$.

Характерною особливістю вхідних даних є те, що в процесі реалізації сценаріїв вони можуть бути представлені також у вигляді динамічних рядів. Це означає, що формалізовані моделі можуть бути доповнені також додатковою змінною — t -час. І завдання опису цієї системи може бути реалізовано за допомогою моделей динаміки виду $Y(t) = F_0(t)$, які повинні включати взаємозв'язки змінних у часі. Така формалізація завдання дослідження дасть змогу проводити оцінку змін оцінок параметрів у часі та оцінювати прогнози значення цінностей сценаріїв за визначеними тенденціями на прогнозовані періоди їхньої реалізації.

Завдання факторного (індикаторного) аналізу впливу предикторів $X(t)$ на змінну $Y(t)$, представлене в загальному вигляді (15), можна реалізувати розв'язанням системи одночасних структурних рівнянь у вигляді

$$\begin{cases} SF_i = f(\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3) \\ SF_{i(\Phi_1)} = f(R_{Д,i}, R_{РЗБ,i}, R_{Рад,i}, T_i) \\ SF_{i(\Phi_2)} = f(OE_{ЗПБ,i}, OE_{ЗБ,i}, OE_{СДЛ,i}, R_{НДФ,i}) \\ SF_{i(\Phi_3)} = f(L_{ВЛ,i}, R_{НСПЗ,i}, R_{НГС,i}) \end{cases} \quad (16)$$

Перше рівняння в системі — багатофакторна модель цінностей сценаріїв на основі колективного експертного оцінювання трьох груп факторів (1), дає змогу отримати оцінки параметрів впливу факторів на цінності сценаріїв.

Друге, третє та четверте рівняння системи — деталізуючі моделі для відповідних факторів — безпечового, фінансового та інфраструктурного. У моделі включені набори індикаторів, що формують відповідні фактори. Побудова моделей дає змогу деталізувати силу на напрямок впливу на відповідний фактор конкретних індикаторів.

Алгоритм реалізації оцінювання сценаріїв на основі методики багатофакторного моделювання включає в себе:

1. Синтез системи (16) моделями в якісній формі [9]

$$\hat{Y}_j = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_i x_i + \dots + b_n x_n + e_j \quad (17)$$

або

$$\hat{Y}_j = b_0 \prod_{i=1}^n b_i^{x_i} = b_0 \cdot b_1^{x_1} \cdot \dots \cdot b_i^{x_i} \cdot \dots \cdot b_n^{x_n} + e_j \quad (18)$$

2. Оцінка вектора параметрів моделей $B = \{b_0, b_1, \dots, b_n\}$, який виступає аналогом вектора управління, а x_i — параметрами впливу на функцію (Y_j). Оцінка проводиться згідно з критерієм мінімізації суми квадратів відхилень $\sum e_i^2 \rightarrow \min$ за допомогою однокрокового методу найменших квадратів за стандартною схемою [9].

3. Перевірка адекватності моделі. Проводиться шляхом перевірки нульової гіпотези H_0 : для F -статистики як

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \times \frac{m-n-1}{m} \quad (19)$$

4. Перевірка статистичних гіпотез H_0 : та H_1 : на значущість оцінок параметрів моделі. Проводиться на основі t -статистики як

$$t_{b_i} = b_i \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-b_i^2}} \quad (20)$$

із заданим рівнем значущості, як правило в межах $\alpha = (0,01-0,05)$.

5. Оцінка достовірності апроксимації вхідних даних синтезованими моделями. Проводиться за допомогою коефіцієнта детермінації

$$R^2 = 1 - \frac{\sum e_i^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{\sum (Y_i - Y_t)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (21)$$

де Y_p , Y_t — статистичні дані та теоретичні значення (оцінки функції), розраховані за моделлю відповідно; $\bar{Y}$ — середнє значення для вхідної вибірки.

6. Оцінка якості моделі та якості прогнозування. Проводиться за допомогою абсолютної середньої відсоткової похибки (*mean absolute percent error*) [10]:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_j - \hat{Y}_j}{Y_j} \right| \cdot 100 \% \quad (22)$$

Оцінені значення достовірності апроксимації R^2 , F та $MAPE$ для заданого рівня значущості α вказують на рівень достовірності, адекватності та якості побудованих моделей.

На основі побудованої моделі (17) або (18) проводиться аналіз параметрів моделі (і відповідно факторів чи індикаторів) за силою та напрямком впливу на результуючу ознаку та формування проєктів управлінських рішень.

Крім того, аналіз моделей «цінність сценарію» $Y_i = SF_i$ до факторів впливу чи індикаторів (система рівнянь (16)) може бути проведений на основі аналізу показників еластичності

$$\epsilon_{x_i(Y)} = \frac{Mf}{Af}, \quad (23)$$

де Mf — маржинальне значення функції SF_i в точці x_i , $Mf = \frac{dSF_i}{dx_i}$; Af — середнє значення функції SF_i у точці x_i , $Af = \frac{\bar{x}_i}{SF_i}$.

У дискретному випадку, а також при визначенні еластичності по дискретному набору даних визначення ϵ_x доцільно проводити на основі середньої (дугової) еластичності [11]

$$\epsilon_{x_i(SF_i)} = b_i \frac{\bar{x}_i}{\bar{SF}_i} \quad (24)$$

Визначені за виразом (24) часткові еластичності показують, на скільки відсотків зміниться значення SF_i при зміні відповідного фактора/індикатора x_i на 1 %. Доцільним також є визначення узагальнених еластичностей на основі сумісної дії на SF_i визначеного набору критеріїв $\epsilon_{x_i, x_j, x_k(SF_i)}$ та сумарної еластичності $\epsilon_\Sigma = \sum \epsilon_{x_i(SF_i)}$. У таких випадках визначені еластичності будуть показувати, як зміниться результуюча ознака SF_i при зміні на 1 % відповідного набору (x_p, x_j, x_k) чи всіх критеріїв ($x_i, i = \overline{1, p}$).

Висновки

Представлене дослідження пов'язане з формуванням системного підходу до створення методики порівняльного аналізу сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на ЕБС і дає змогу систематизувати процес на основі основних принципів теорії систем. Системність дослідження реалізується шляхом його етапності. На першому етапі проведено формування масиву індикаторів та групування їх за факторами, які забезпечують екологічну безпеку. На наступному етапі запропоновано методику порівняння та оцінювання сценаріїв за допомогою обробки результатів колегіального експертного оцінювання, що дає змогу провести якісне порівняння сценаріїв. На третьому етапі запропоновано методику багатокритеріальної оптимізації для параметричної деталізації цінностей сценаріїв та напрацювання на їхній основі характеристик прийняття рішень. На заключному етапі системного підходу розроблено алгоритм побудови багатофакторних моделей для визначення параметрів управління.

Використання системного підходу дає змогу сформувати методику порівняльного аналізу сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на ЕБС, яка забезпечить процес ранжування сценаріїв за їхніми якісними та параметричними характеристиками, формування якісних управлінських рішень та ефективне управління процесом реалізації сценаріїв.

Список використаної літератури

1. Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему: Закон України № 309-XIV від 11.12.1998 зі змінами, внесеними 01.01.2015. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/309-14#Text>.
2. Про Загальнодержавну програму зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему: Закон України № 886-VI від 15.01.2009 зі змінами, внесеними 16.10.2018. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/886-17#Text>.
3. Деренговський В. В. Трирівнева модель оцінки потенційних сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему на основі глобального факторально-індикаторного критерію / В. В. Деренговський, І. С. Скітер // Ядерна енергетика та довкілля. — 2022. — № 1 (23). — С. 45–55. — doi.org/10.31717/2311-8253.22.1.5.
4. Про додаткові заходи щодо перетворення ОУ на екологічно безпечну систему та відродження територій,

що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи: Указ Президента України № 141/2016 від 13.04.2016. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/141/2016#Text>.

5. Радиационная защита населения и охрана окружающей среды. Общее руководство по безопасности № GSG-8. — Вена : МАГАТЭ, 2023. — 86 с. — Режим доступа: www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1781R_web.pdf.
6. Комплексний аналіз потенційних сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему після введення в експлуатацію нового безпечного конфайнмента: Проміжний звіт про науково-дослідну роботу. ДР № 01U109339. — 2022.
7. Круковский П. Новый безопасный конфайнмент Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации) / П. Круковский, М. Метель, Д. Складенко; ред.: П. Круковский, В. Краснов, В. Сулимов. — Київ : ООО «Франко Пак», 2019. — 300 с.
8. Skiter I. Development of the matrix material selection algorithm for immobilization of transurane elements using the modified method of analysis of hierarchies / I. Skiter, E. Vtornikova // Nuclear and Radiation Safety. — 2018. — No. 2. — P. 36–42.
9. Heroux M. A. Parallel Processing for Scientific Computing / Michael Allen Heroux, Padma Raghavan, Horst D. Simon. — Philadelphia : SIAM, 2006. — 390 p.
10. Implementation of novel evolutionary algorithm for 3-dimensional radiation mapping and gamma-field reconstruction within the Chornobyl sarcophagus / Maxim Saveliev [et al.] // Algorithms. — 2023. — Vol. 16, no. 4. — P. 204. — doi.org/10.3390/a16040204.
11. Вітлінський В. В. Економіко-математичні методи та моделі: оптимізація: навч. посібник / В. В. Вітлінський, Т. О. Терещенко, С. С. Савіна. — Київ : КНЕУ, 2016. — 303 с.

I. S. Skiter

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

A Systematic Approach to the Development of a Methodology for Comparative Analysis of Scenarios for the Shelter Object Transformation into an Ecologically Safe System

The subject of the study is the New Safe Confinement. Its commissioning is the second stage of the task to transform the

Shelter object into an ecologically safe system. Works on the implementation of the third stage require the election of scenarios for the Shelter object transformation into an ecologically safe system. Approaches to the selection of scenarios should be based on the development of a methodology for their comparative analysis. The object of this study is a complex system, and the development of a methodology for assessing scenarios should be based on the consideration of a set of qualitatively heterogeneous factors and indicators. Therefore, the task of creating a methodology for comparative analysis of scenarios requires, in addition to the analysis of technical, technological, economic, and financial indicators that will accompany the Shelter object transformation process, a systematic approach to assessing and comparing the states of the research object, decision-making and management methods. The presented research related to the systematic approach to the formation of a methodology for comparative analysis of scenarios for transforming the Shelter object into an ecologically safe system. Indicators and factors for assessing scenarios were identified and grouped according to environmental safety criteria. A systematic approach to the implementation of the scenario assessment methodology using three classes of methods is proposed. The systematic nature of determining the values of scenarios is realized by the stages of research. At the first stage of the analysis, a methodology for qualitative comparison of scenarios based on peer reviews is proposed. A multi-criteria optimization methodology for parametric detailing of scenario values and decision-making was proposed in the second stage. At the third stage of the systematic approach, an algorithm for constructing multifactor models for determining control parameters was developed.

Keywords: Shelter object, scenario analysis, systematic approach, expert methods, multi-criteria optimization methods, multifactor models.

References

1. Law of Ukraine "On General Principles of Further Operation and Decommissioning of the Chornobyl NPP and Transformation of the Destroyed Fourth Power Unit of this NPP into an Environmentally Safe System" no. 309-XIV dated 11.12.1998, with changes dated 01.01.2015. Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine, 1999, no. 4, art. 33. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/309-14#Text> (in Ukr.).
2. Law of Ukraine "On the national program of decommissioning of the Chornobyl NPP and transformation of the Shelter object into an ecologically safe system", no. 886-VI dated 15.01.2009, with changes dated 01.01.2019. Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine, 2009, no. 24, art. 300. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/886-17#Text>. (in Ukr.)
3. Derenhovskyi V. V., Skiter I. S. (2022). Three-level model assessment of potential scenarios of the Shelter object transformation into an ecologically safe system based on global factor. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 23, no. 1, pp. 45–55. doi.org/10.31717/2311-8253.22.1.5. (in Ukr.)
4. Decree of the President of Ukraine "On additional measures to transform the EI into an environmentally safe system and revitalize the territories affected by radioactive contamination as a result of the Chornobyl disaster" no. 141/2016 dated 13.04.2016. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/141/2016#Text>. (in Ukr.)
5. IAEA (2023). *Radiation Protection of the Public and Environmental Protection*. General Safety Guidelines IAEA Safety Standards Series No. GSG-8. STI/PUB/1781. Vienna: International Atomic Energy Agency, 86 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1781_web.pdf.
6. [Comprehensive Analysis of Potential Scenarios for Transformation of the Shelter Object into an Environmentally Safe System after Commissioning of the New Safe Confinement]. Interim Report on Research and Development. State registration number 01U109339, 2022. (in Ukr.)
7. Krukovsky P. G., Metel M. A., Sklyarenko D. I. (2019). *Novyi bezopasnyi konfaynment Chornobyl'skoy AES (raschetno-eksperimental'nyi analiz pri proyektirovanii i ekspluatatsii)* [New Safe Confinement of the Chornobyl NPP (calculation and experimental analysis in design and operation)]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 300 p. (in Rus.)
8. Skiter I., Vtornikova E. (2018). Development of the matrix material selection algorithm for immobilization of transurane elements using the modified method of analysis of hierarchies. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 2, pp. 36–42.
9. Heroux M. A., Raghavan P., Simon H. D. (eds.) (2006). *Parallel Processing for Scientific Computing*. Philadelphia: SIAM, 390 p. doi.org/10.1137/1.9780898718133.
10. Saveliev M., Pantin M., Skiter I., Scott T. B., Martin P. G. (2023). Implementation of novel evolutionary algorithm for 3-dimensional radiation mapping and gamma-field reconstruction within the Chornobyl sarcophagus. *Algorithms*, vol. 16, no. 4, p. 204. doi.org/10.3390/a16040204.
11. Vitlinskyi V. V., Tereshchenko T. O., Savina S. S. (2016). *Ekonomiko-matematychni metody ta modeli: optymizatsiya* [Economic and mathematical methods and models: optimization] (3rd ed.). Kyiv: Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, 303 p. (in Ukr.)

Надійшла 27.06.2023

Received 27.06.2023