

**В. В. Деренговський, І. С. Скітер**

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

## **Трирівнева модель оцінки потенційних сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему на основі глобального факторально-індикаторного критерію**

### *Ключові слова:*

аналіз сценаріїв,  
об'єкт «Укриття»,  
складна система структурного типу,  
факторально-індикаторна модель,  
корегування рівня узгодженості,  
глобальний критерій цінностей

У роботі викладено дослідження, пов'язані з аналізом сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. Визначено параметри оцінки сценаріїв та вимоги до їхнього представлення. Розроблено алгоритм побудови моделі оцінки сценаріїв на основі факторально-індикаторних наборів. Запропоновано модель підвищення рівня узгодженості попарних порівнянь альтернатив під час визначення глобального критерію цінності сценаріїв. Створено трирівневу модель оцінки сценаріїв. Запропоновано корекцію методу аналізу ієрархій з метою формування узгоджених матриць попарних порівнянь індикаторів у окремих факторах та загальної узгодженої матриці порівнянь факторів. Розроблена модель дає змогу проводити визначення глобальних цінностей сценаріїв на основі факторально-індикаторних оцінок. Використання запропонованої методики дозволяє впорядкувати, алгоритмізувати і коригувати процедуру експертного оцінювання якісно та кількісно різнорідних факторів та підвищити якість отримуваних результатів для формування процесу прийняття рішень перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему.

### **Вступ**

Створення нового безпечного конфайнмента (НБК) є другим етапом перетворення об'єкта «Укриття» (ОУ) на екологічно безпечну систему. Основні наукові проблеми, пов'язані з реалізацією цього глобального завдання, охоплюють: завдання з моніторингу рівня ядерної та радіаційної безпеки; контроль і прогноз стану ядерних матеріалів; поводження з радіоактивними матеріалами; розробку та впровадження технологій демонтажу конструкцій та вилучення ядерних матеріалів; оцінку екологічного стану територій та вплив на них кожного зі скупчень паливовмісних матеріалів (ПВМ) тощо.

За визначенням [1], 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 ОУ на екологічно безпечну систему для забезпечення безпеки персоналу, населення та довкілля.

Основними функціями НБК є: забезпечення нерозповсюдження РАВ поза межами НБК; технологічне забезпечення — розміщення і функціонування систем та елементів, забезпечення нормальної експлуатації НБК тощо; фізичний захист ядерних та радіоактивних матеріалів, забезпечення системи гарантій Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ).

Вказані функції свідчать про те, що НБК є багатофункціональним об'єктом, експлуатація якого потребує врахування численних систем, підсистем,

© В. В. Деренговський, І. С. Скітер, 2022

елементів, зв'язків між ними. Причому це стосується як наявних, так і тих, які будуть створені в процесі експлуатації НБК.

Тому реалізація поставлених завдань створення та експлуатації НБК потребує, крім технічних та технологічних ресурсів, системного підходу до оцінки станів НБК, їхнього функціонування, поведінки, динаміки. Використання сучасного апарату імітаційного моделювання, математичних методів прийняття рішень дасть змогу оптимізувати наявні людські та фінансові ресурси, час, дозові навантаження на персонал та населення, радіаційний вплив на навколишнє природне середовище та формувати оптимальні управлінські рішення під час аналізу сценаріїв з перетворення ОУ на екологічно безпечну систему.

Слід, однак, зазначити, що процес перетворення ОУ на екологічно безпечну систему є багатоетапним і передбачає такі етапи:

зменшення ризиків впливу іонізуючого випромінювання;

створення додаткових захисних бар'єрів, зокрема таких, що забезпечуватимуть належні умови для виконання робіт на наступному етапі;

вилучення з ОУ ПВМ, високоактивних та довгоіснуючих РАВ, переведення їх у безпечний стан, проміжне контрольоване зберігання та захоронення у глибинних сховищах (стабільних геологічних формаціях) у разі, якщо до початку їхнього вилучення (орієнтовно 30–50 років) не запропоновано альтернативного шляху забезпечення безпеки зберігання матеріалів у ОУ.

Введення в експлуатацію НБК є тільки другим етапом реалізації цього завдання [2]. Нині розпочалися роботи з реалізації третього етапу, і вибір сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему є початком його реалізації.

Незважаючи на завершення будівництва та введення в експлуатацію НБК, скупчення ПВМ, що утворилися внаслідок запроектої аварії на четвертому енергоблоці, і надалі залишаються головним джерелом небезпеки ОУ. Причому потенційна небезпека ПВМ з часом може зростати внаслідок спонтанного руйнування поверхні лавоподібних ПВМ з утворенням високоактивного пилу. Утворення такого пилу в ОУ несе певні загрози, що можуть призвести до зниження рівня безпеки НБК під час періоду його експлуатації.

Незважаючи на тривалий термін експлуатації НБК, який складає 100 років, наявність трансуранових елементів у складі ПВМ буде обумовлювати

загрозу для довкілля ще багато тисяч років. Це свідчить про те, що проблема вибору сценаріїв подальшого перетворення ОУ на екологічно безпечну систему зберігає свою актуальність [3] і після введення в експлуатацію НБК та потребує проведення спеціальних наукових досліджень. Серед завдань аналізу потенційних сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему після введення в експлуатацію НБК є: визначення та аналіз факторів, що впливають на вибір сценаріїв перетворення ОУ;

розробка методики порівняльного аналізу сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему;

порівняльний аналіз сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему та вибір найкращого для реалізації.

Об'єкт дослідження представляє собою складну систему структурного типу, яка описується масивами факторів — технічних, технологічних, соціальних, економічних тощо, які в свою чергу формуються під впливом індикаторів, характерних тільки для них. Крім того, набори факторів та їхніх індикаторів можуть мати як параметричні характеристики, так і бути оціненими якісно за допомогою експертів. Тому ефективно вирішення завдань порівняльного аналізу сценаріїв також потребує системного підходу та створення алгоритмів і моделей для підтримки прийняття рішень на основі множини якісно та кількісно різнорідних факторів та їхніх індикаторів. Це дасть змогу особам, які приймають рішення (ОПР), усунути проблему оцінювання не лише окремого сценарію перетворення ОУ на екологічно безпечну систему, але й альтернатив на основі визначених факторів та їхніх індикаторів.

### Стан проблеми та аналіз літературних даних

Проблема перетворення ОУ на екологічно безпечну систему на різних етапах детально описана у працях [4–15]. Зокрема, у монографії [7], яка оснований на висновках і результатах робіт, що проводилися протягом 30 років після аварії на ЧАЕС і пов'язані з вивченням стану ОУ та його перетворення на екологічно безпечну систему, представлено причини аварії на ЧАЕС, і особлива увага приділяється питанням перетворення ОУ на екологічно безпечну систему та теперішньому стану справ у цій проблемі. У роботі [9] розроблено загальну послідовність проведення робіт та принципові технологічні рішення з урахуванням технічних особливостей дистанційно керованих агре-

гатів та системи основних кранів НБК для вилучення ПВМ і супутніх РАВ з верхніх відміток ОУ. У роботі [13] за допомогою методу аналізу «доз — витрат — вигоди» проаналізовано стан проблеми доцільності дезактивації радіоактивно забруднених об'єктів, що утворилися під час аварії на ЧАЕС, що будуть утворюватися під час діяльності з перетворення ОУ на екологічно безпечну систему, а також діяльності зі зняття з експлуатації ЧАЕС. У роботі [15] представлено концептуальні рішення щодо «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій ОУ.

Питання побудови математичних моделей і методів планування та прийняття рішень у складних системах в умовах невизначеності в Україні висвітлюються в працях провідних українських науковців [16–19] та ін. У роботі [20] представлено вдосконалений метод багатокритеріального аналізу об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями в умовах невизначеності шляхом вибору оптимального варіанта втручання в стан екологічної безпеки цих об'єктів. У роботі [21] вивчається багаторівнева факторна модель з глобальними і локальними індикаторами, характерними до кожного окремого об'єкта дослідження. Глобальні і локальні фактори моделі оцінюються окремо, без аналізу взаємного впливу. Розподіл між ними здійснюється на основі канонічного кореляційного аналізу, що не зовсім прийнятно до об'єктів чи, як у нашому випадку, сценаріїв, які мають параметричні та непараметричні оцінки факторів, індикаторів. У роботі [22] дається оцінка впливу експертних знань на побудову моделей у системах з якісно неоднорідними факторами; представлено метод для обліку неточних даних і різного досвіду експертів на основі нечітких систем виведення (fuzzy inference systems, FIS). У роботі [23] розглянуто підходи до формування процесу прийняття рішень за наявності конфліктуючих критеріїв та в умовах зростання тенденції до росту масиву даних у системі, яка характеризується.

Поряд із наявністю публікацій з тематики аналізу складних систем з якісно неоднорідними факторами огляд пропонованих моделей є неоднозначним, має певні обмеження і значною мірою обмежений параметричними даними. Крім того, вплив експертних знань на оцінку станів систем є занадто суб'єктивним, більшість методологій припускають, що взаємозв'язки між змінними є лінійними і можуть бути оцінені кореляційними методами.

Саме тому, на наш погляд, необхідно розглядати об'єкт дослідження саме як систему факторів, у межах кожного з яких існує система індикаторів, які

його визначають і, відповідно, формують якість та вагу відповідного фактору. Це означає, що система формуючих індикаторів також набуває актуальності не лише як показник оцінки альтернативи, але й як оціночний показник ефективності управління в цілому [24]. Розглядаючи об'єкт дослідження, слід зазначити, що серед масиву факторів і критеріїв та індикаторів, які їх формують, можна виділити як якісні, так і кількісні показники. Якщо перші можна застосувати для оцінки будь-якого рішення, то використання критеріїв другої групи потребує суворої формалізації процесу вибору. Прагнення до значного узагальнення і неврахування якісних критеріїв, індикаторів, факторів, які описують сценарії перетворення ОУ на екологічно безпечну систему, може призводити до спрощення для ОПР ситуації і в подальшому негативно відіб'ється на кінцевому результаті за рахунок потенційного неврахування окремих складників. Доцільність ухвалення ефективних управлінських рішень залежить від обґрунтованого вибору критеріїв, які формують фактори оцінки сценаріїв, їх «ваги» та значущості в наборі тощо. Тож постає питання визначення показників подібного оцінювання та ранжування масиву факторів за рівнем їхньої значущості в моделях прийняття рішень щодо оцінки сценаріїв.

Об'єкт дослідження — ОУ — представляє собою складну систему структурного типу, яка поєднує в собі різні технологічні, технічні, економічні та інші фактори, які впливають на оцінку її стану. Крім того, набори індикаторів, характерних для вказаних факторів, можуть бути представлені якісно та кількісно, належати до різних факторів чи бути унікальними. Саме це вносить невизначеність у процеси оцінювання. У разі постановки завдань оцінювання сценаріїв, які базуються на факторах та індикаторах щодо поводження з ПВМ, значною мірою виявляється вплив зовнішнього середовища, внутрішніх технічних та технологічних умов, запитів та вимог ОПР тощо. Оцінка сценаріїв за таких умов та стану системи може бути проведена за допомогою алгоритму, який може проводити ранжування факторів з урахуванням їхньої внутрішньої структури (відповідного набору індикаторів). Чисельною мірою оцінки сценарію може виступати інтегральний (глобальний системний) критерій, визначений на основі повного структурного аналізу факторів. При цьому також повинні бути враховані несистемні параметри оцінки — зовнішні та внутрішні чинники, переваги ОПР тощо.

Виходячи з вищеприписаного, метою дослідження є створення алгоритму аналізу сценаріїв та на його

основі моделі оцінки факторів потенційних сценаріїв за допомогою визначення глобального факторально-індикаторного критерію, створення методики підвищення рівня узгодженості матриці попарних порівнянь сценаріїв з урахуванням факторально-індикаторної структури.

### Алгоритм ранжування факторів та процесу побудови багатшарової моделі оцінки сценаріїв

Аналізуючи потенційні сценарії перетворення ОУ на екологічно безпечну систему слід зазначити, що їхня оцінка проводиться як за кількісними, так і за якісними критеріями. Крім того, залучення до аналізу експертів та проведення ними експертних оцінок факторів призводить до збільшення невизначеності в процесі формування управлінських рішень. Усунення цього недоліку може бути реалізоване за рахунок формалізації процедур представлення факторів та їхніх індикаторів, чисельних оцінок попарних порівнянь тощо, «оцифруванням» під час порівняння якісних критеріїв. Основними проблемами при цьому є, по-перше, включення в факторально-індикаторні набори якісних критеріїв та додаткові процедури з їхньої параметризації; по-друге, під час формування критеріїв необхідно враховувати те, що оптимальність цільової функції не може бути досягнута, наприклад, за рахунок «заміщення» параметрів — збільшення/зменшення одного фактора чи індикатора за рахунок зменшення/збільшення іншого; ОПР повинна мати достатній рівень кваліфікації для трактування отриманих результатів та формування на їхній основі оптимальних управлінських рішень [25].

Аналіз сценаріїв перетворення ОУ на системному рівні передбачає оперування набором факторів оцінювання. Особливістю формування масиву даних для комплексного оцінювання та порівняння сценаріїв є те, що обрані для аналізу фактори містять у собі на другому рівні декомпозиції набір індикаторів, які значною мірою визначають вагомість факторів та їхню значущість. Таким чином, загальний опис системи «оцінка сценаріїв» може бути формально представлений, як і у [24], у вигляді кортежу виду:

$$S = \langle F, R(F), I, R(I) \rangle, \quad (1)$$

де  $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^{1m}\}$  — множина критеріїв оцінки станів системи, факторів оцінки сценарію;  $f^i = \{I^1, \dots, I^j, \dots, I^k\}$  —  $i$ -й фактор, представлений за допомогою набору індикаторів  $I^j \in I$ ;

$R_{(F)}, R_{(I)}$  — функціональні перетворювачі для множини факторів та їхніх індикаторів відповідно.

Оцінку рівня значущості факторів, сформованих своїми наборами індикаторів у межах окремого сценарію, доцільно проводити за допомогою методики аналізу ієрархій (МАІ), запропонованої Т. Сааті [26]. Використання МАІ в такому випадку дасть змогу проводити експертні оцінки (порівняння) не тільки узагальнених факторів, але й їхньої внутрішньої структури. Цим самим буде досягнуто виконання основних принципів теорії систем — ієрархії, збереження і причинно-наслідкових обмежень [25].

Вхідними умовами до використання методики є множини факторів для  $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^m\}$  та масиви індикаторів для кожного із факторів:  $f^i : I^j = \{i_1^j, \dots, i_k^j\}$ . Тоді завдання визначення цінностей сценаріїв буде модифіковано до визначення ваг факторів, які визначені характерними саме для них наборами індикаторів. Тоді окремий сценарій буде представлений глобальним чи інтегральним критерієм цінності  $W_{glob}^j$ , визначеним на основі ваг індикаторів та ваг факторів.

Процес комплексного аналізу сценаріїв з урахуванням факторів та індикаторів, які їх формують, представлений на рис. 1.

Модель визначення глобальних цінностей сценаріїв є поетапним процесом визначення на кожному рівні ваг факторів та з урахуванням їхньої внутрішньої структури — ваг наборів індикаторів у межах окремого сценарію.

На першому етапі — *першому рівні моделі* — формуються масиви факторів  $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^m\}$ . Формування масивів факторів та індикаторів проводиться двома групами користувачів — інженером зі знань (експертом, експертами) та ОПР. При цьому можливе первинне якісне оцінювання значущості факторів та оцінювання сценаріїв.

На другому етапі — *другому рівні моделі* — визначаються критеріальні набори, які характеризують окремі фактори відповідними їм індикаторами  $f^i : I^j = \{i_1^j, \dots, i_k^j\}$ . При цьому в межах кожного окремого фактора набір індикаторів має якісно однорідні показники, які формуються на основі груп факторів. Залежно від характеристики групи (технологічна, технічна, економічна та інші) фактор може характеризуватися як параметричними наборами індикаторів, які мають результати вимірювань, так і непараметричними індикаторами, визначеними якісно, лінгвістично, на основі експертних оцінок тощо. У межах кожного факторального набору  $f^i : I^j = \{i_1^j, \dots, i_k^j\}$

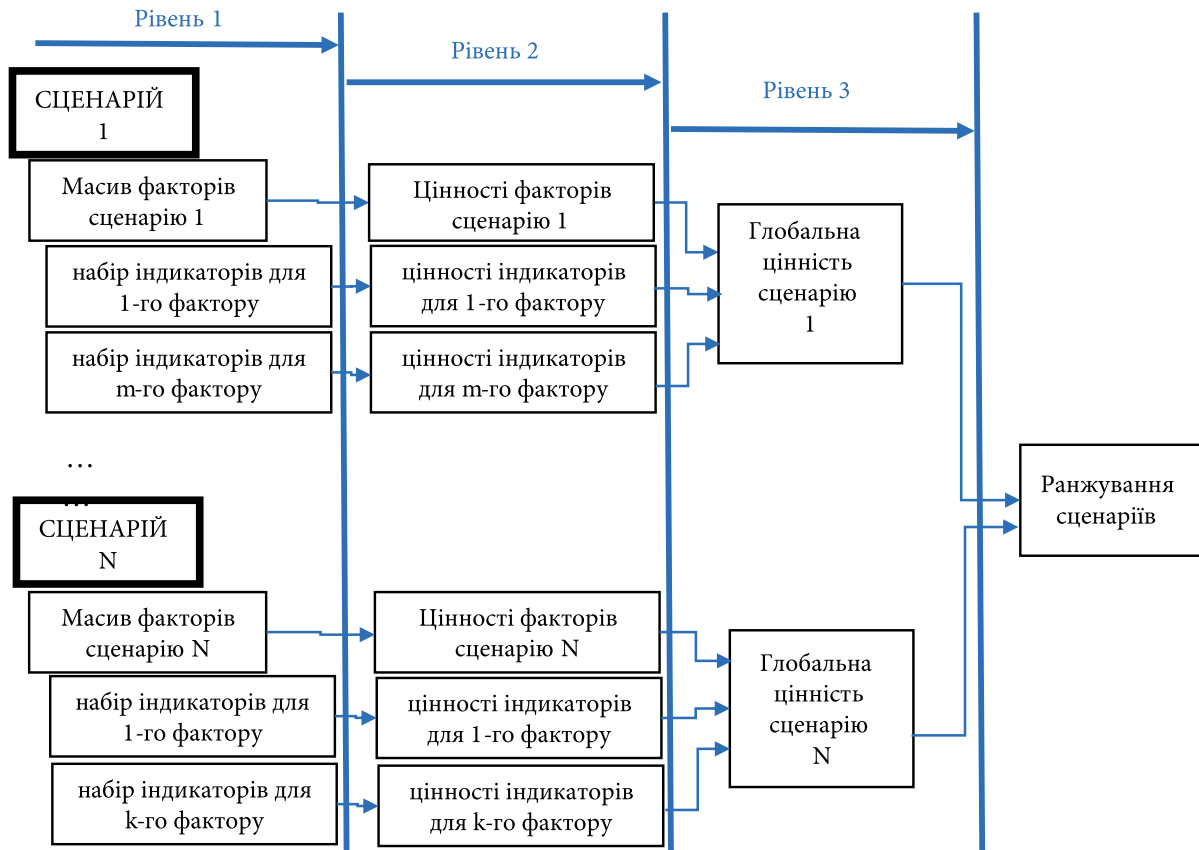


Рис. 1. Процес визначення цінностей сценаріїв на основі факторально-індикаторного оцінювання

необхідно визначити вектор відносних цінностей для індикаторів, які його формують  $\{\omega_1^i, \dots, \omega_k^i\}$ . На основі методики Сааті [26] проводиться попарне порівняння індикаторів. Для кожного фактора  $f^i$  з набору  $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^m\}$  формується матриця попарних порівнянь  $A^F = (a_{ij}^F)$  індикаторів  $f^i : I^j = \{i_1^j, \dots, i_k^j\}$ , на основі якої визначається їхній вектор відносних цінностей — чисельних мір впливу на елементи наступних рівнів ієрархії. Реалізація другого рівня моделі дає можливість проводити чисельне ранжування індикаторів за їх вагами та значущостями в факторальних наборах; якість оцінки факторів і порівняння сценаріїв підвищується.

На третьому етапі — *третьому рівні моделі* — проводиться аналогічна процедура, але вже на вищому рівні узагальнення — визначення ваг  $\{\Omega^1, \dots, \Omega^m\}$  факторів  $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^m\}$  та їх чисельне порівняння. При цьому побудова матриці попарних порівнянь факторів характеризується якісною і кількісною різноманітністю факторальних наборів  $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^m\}$ , параметри яких можуть змінюватися залежно від сценарію та його характеристик. Тому на цьому етапі доцільно залучати для формування матриці  $A^F = (a_{ij}^F)$  кваліфікованих експертів чи інженера зі знань з відповідною кваліфікаційною направленістю.

пертів чи інженера зі знань з відповідною кваліфікаційною направленістю.

Таким чином, після реалізації третього рівня моделі отримуємо вектор комплексних показників  $W = W(\Omega, \omega)$ , який включає в себе оцінки факторів на основі визначення їхніх ваг  $\{\Omega^1, \dots, \Omega^m\}$  та оцінки індикаторів, які їх формують  $\omega_1^i, \dots, \omega_k^i$ :

$$[\Omega^1(\omega_1^1, \dots, \omega_l^1), \Omega^2(\omega_1^2, \dots, \omega_l^2), \dots, \Omega^m(\omega_1^m, \dots, \omega_z^m)], \quad (2)$$

де  $k, l, z$  — кількість індикаторів, які формують відповідний фактор, причому можливий варіант коли  $k \neq l \neq \dots \neq z$ .

На останньому етапі проводиться визначення глобальних показників ваг (цінностей) сценаріїв  $W = \Omega, \omega$  з урахуванням ваг факторів  $\Omega$  та внутрішньої структури на основі визначення ваг відповідних індикаторів  $\omega$ . У роботі [27] визначення глобальних критеріїв на основі уточнення ваг їхньої внутрішньої структури проводиться за допомогою адитивної згортки виду

$$W_{(X_j)} = \sum_{i=1}^m \Omega^i \omega_{i(X_j)}^j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

де  $X_j \in X$  — масив альтернатив вибору,  $\omega_{i(X_j)}^j$  — ваги критеріїв, які формують альтернативи,  $\Omega^i$  — ваги альтернатив, оцінені за методикою Сааті.

Методика оцінювання глобального критерію у згаданих роботах, як правило, проводиться в завданнях багатокритеріальної оптимізації, за умови, коли об'єкти дослідження описуються стандартизованими та однойменними критеріями.

### Підвищення рівня узгодженості попарних порівнянь у моделі визначення глобальних цінностей сценаріїв

Характерною особливістю оцінки сценаріїв є саме їхня різнокритеріальність — оцінка ваг факторів, які описують сценарій, проводиться власними наборами індикаторів, які формуються в межах кожного фактора окремо —  $f^i : I^j = i_1^j, \dots, i_k^j$ . Тому для визначення глобального критерію використання МАІ потребує коректного попарного порівняння альтернатив на різних рівнях оцінювання — на рівні індикаторів та на рівні факторів.

Використання попарних порівнянь у МАІ дає змогу проводити коректне визначення ваг показників та проводити їхнє ранжування тільки за умови, коли індекс узгодженості (consistency index, CI) не перевищує 10% [27]. У випадку аналізу індикаторів та факторів, які мають чисельні характеристики (технічні параметри, експериментальні дані, грошові оцінки тощо), проблема узгодженості попарних порівнянь дещо знижується. Коли проводиться оцінка та попарне порівняння непараметричних, якісних показників та комбінацій параметричних і непараметричних факторів чи індикаторів, то проблема узгодженості значною мірою залежить від експертних оцінок. У таких випадках може статись, що отримані вектори відносних цінностей альтернатив чи вектори ваг (як індикаторів у факторах, так і самих факторів) можуть мати значну міру неузгодженості в порівнянні з ідеальним випадком.

У роботі [28] міру неузгодженості/узгодженості попарних порівнянь пропонується оцінювати за допомогою співставлення ідеального випадку — абсолютно узгодженої матриці, для якої виконується умова  $\frac{a_{ij}}{a_{kj}} = const$  для всіх  $j$ , та реального випадку — матриці, отриманої на основі експертного оцінювання, для якої  $\frac{a_{ij}}{a_{kj}} \neq const$ .

Рядки матриці попарних порівнянь  $A^F = (a_{ij}^F)$  можна трактувати, як вектори  $a_i = (a_{i1}, \dots, a_{in})$ . Тоді для абсолютно узгодженої матриці вони повинні бути колінеарними  $a_i \parallel a_j$ , і косинус кута між векторами  $\cos \angle a_i a_j = 1$ . Тоді поряд із традиційним індексом узгодженості CI матриці попарних порівнянь мож-

на ввести додаткову міру узгодженості, якою може виступати значення  $\cos \angle a_i a_j$ . У такому випадку його величина буде вказувати на те, якою є залежність між елементами матриці. Чим неузгодженішими є попарні порівняння, тим більшим буде величина кута між векторами рядків матриці. Міра неузгодженості — косинус кута між векторами — визначається як

$$\cos \alpha = \frac{\overline{a_i a_j}}{|\overline{a_i}| \times |\overline{a_j}|} \quad \text{або} \quad \cos = \frac{\overline{a_i a_j}}{\sqrt{a_i a_j a_j a_i}}, \quad (4)$$

де  $\langle \overline{a_i a_j} \rangle$  — скалярний добуток векторів.

Для матриці попарних порівнянь  $A^F = (a_{ij}^F)$  рівень узгодженості CI на основі залежності між елементами матриці — косинус кута між векторами — можна представити як [12]

$$CI_i^F \equiv \cos \pm = \frac{\sum_{k=1}^n a_{ik} a_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n a_{ik}^2 \sum_{k=1}^n a_{jk}^2}}. \quad (5)$$

Тоді при побудові матриць попарних порівнянь альтернатив для масиву сценаріїв для кожної пари векторів можна отримати матриці мір узгодженості попарних порівнянь:

$$CI^F = \begin{pmatrix} 1 & \dots & ci_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ci_{n1} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Чисельні значення параметрів матриці (6)  $0 \leq CI_{ij} \equiv |\cos \pm| \leq 1$  дають змогу оцінити рівні узгодженості парних порівнянь конкретних елементів і є індикатором для необхідності їх корегування задля досягнення коректного припустимого рівня ( $CI \leq 10\%$ ). Це дає змогу підвищити рівень експертного оцінювання і, таким чином, зменшити рівень невизначеності під час порівняння сценаріїв на основі факторально-індикаторного підходу.

Реалізація пропонованої методики корегування попарних порівнянь доцільна також і на другому та третьому рівнях моделі — на факторальних наборах  $\{\Omega^1, \dots, \Omega^m\}$  та на рівні формування глобальних критеріїв — узагальнений вектор ваг  $W = \Omega, \omega$  виду (2).

Ієрархічність виразу (2) полягає в тому, що оцінювання відносних цінностей факторів  $\{\Omega^1, \dots, \Omega^m\}$  проводиться на основі векторів відносних цінностей індикаторів  $\{\omega_1^i, \dots, \omega_k^i\}$ . Тобто формування глобального критерію оцінки сценарію буде проводитись на основі факторального набору, а його ранжування повинно проводитися з урахуванням векторів ваг

індикаторів. Для формування глобального критерію цінностей окремого сценарію з урахуванням його структури пропонується ввести коригуючий коефіцієнт виду

$$\Phi(\cos a) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j=1}^n a_{ij}. \quad (7)$$

Його суть полягає в можливості проводити чисельну оцінку міри подібності відносних цінностей факторів та індикаторів. Тоді глобальний скорегований критерій відносних цінностей сценаріїв на основі та визначення ваг факторів та ваг індикаторів, що їх формують, буде мати вигляд

$$W_{(F/I)} = \sum_{i=1}^n \Omega^i \omega_{i(F/I)}^j \Phi(\cos a)_{(F/I)}. \quad (8)$$

Пропонована методика оцінки скорегованого глобального критерію цінностей сценаріїв на основі структурного підходу дасть змогу зменшити рівень невизначеності експертного оцінювання різномірних факторів, алгоритмізувати процес комплексного оцінювання сценаріїв та підвищити якість формування процесу прийняття рішень.

## Висновки

Вибір напрямів переведення ОУ в екологічно безпечний стан визначається проектом зняття об'єкта з експлуатації відповідно до наявних технічних та фінансових ресурсів. Кінцевим станом ОУ в технічному вимірі буде переведення залишених у ньому радіоактивних матеріалів до умов, що відповідають нормам, правилам і стандартам з безпеки під час поводження з РАВ (у тому числі радіаційний моніторинг, регламентне обслуговування законсервованого об'єкта тощо) або їхнє передання на зберігання до спеціалізованих підприємств. В екологічному вимірі головна відмінність сучасного стану ОУ як екологічної підсистеми від екологічно безпечного стану як кінцевого полягає в гарантуванні безпеки, тобто у виключенні загрози. Гарантування безпеки є можливим тільки після переведення ПВМ, які залишаються в ОУ, у контрольований стан. Досягнення такого стану можливе різними шляхами. Для вирішення питання вибору найкращого варіанта й була виконана ця робота.

У результаті проведеного дослідження розроблено алгоритм та запропоновано модель оцінки сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему на основі глобального факторально-індикаторного

критерію з урахуванням особливостей формування факторів їхніми індикаторами.

Розроблена модель оцінки сценаріїв представляє собою декомпозицію завдання визначення ваги факторів з урахуванням їхньої внутрішньої структури — наборів індикаторів. Виконано завдання дослідження, що дає змогу стверджувати:

1) створена трирівнева модель оцінки сценаріїв дозволяє проводити процес прийняття рішень на кожному етапі залежно від вимог ОПР до рівня якості;

2) запропонована корекція методу аналізу ієрархій має на меті формування узгоджених матриць попарних порівнянь індикаторів у окремих факторах  $A^F = (a_{ij}^F)$  та загальної узгодженої матриці порівнянь факторів;

3) розроблена модель дає змогу визначати глобальні цінності сценаріїв на основі факторально-індикаторних оцінок.

Використання запропонованої методики дозволяє впорядкувати, алгоритмізувати і коригувати процедуру експертного оцінювання різномірних факторів та підвищити якість отримуваних результатів на формування процесу прийняття рішень під час оцінки сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему.

## Список використаної літератури

1. Закон України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» // Відомості Верховної Ради України. — 1999. — № 4. — Ст. 33.
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 // Відомості Верховної Ради України. — 2009. — № 24. — Ст. 300. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/886-17#Text>.
3. Постанова Президії НАН України № 141 від 16.05.2018 р.
4. Перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему: актуальність рекомендованого курсу дій / С. Ф. Свєрчков, Д. А. Стельмах, Л. Є. Шумилова // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2017. — Вип. 29. — С. 62–68.
5. Новый безопасный конфайнмент Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации) : монография / П. Г. Круковский, М. А. Метель, Д. И. Скляренко и др.; под ред. П. Г. Круковского, В. А. Краснова, В. П. Су-

- лимова. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2019. — 300 с.
6. Высотский Е. Д. Экспертная оценка текущего уровня подкритичности скоплений топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» после установки нового безопасного конфайнмента / Е. Д. Высотский, К. А. Сущенко, Р. Л. Годун // Ядерная энергетика та довілля. — 2020. — Вип. 1 (16). — С. 49–56. — doi.org/10.31717/2311-8253.20.1.6.
  7. Об'єкт «Укриття»: 30 років після аварії : монографія / В. О. Краснов, А. В. Носовський, В. М. Рудько, В. М. Щербін; НАН України, Ін-т проблем безпеки АЕС. — Чорнобыль : Ін-т проблем безпеки АЕС, 2016. — 512 с.
  8. Батій В. Г. Критерії щодо перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему / В. Г. Батій, В. В. Єгоров, В. М. Рудько, В. М. Щербін // Проблеми безпеки атомних станцій і Чорнобиля. — 2015. — Вип. 24. — С. 85–91.
  9. Балан О. В. Принципові технологічні рішення з вилучення паливовмісних матеріалів із верхніх відміток об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, В. Г. Батій, С. І. Глебкін та ін. // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2015. — Вип. 25. — С. 83–93.
  10. Балан О. В. Особливості вилучення паливовмісних матеріалів із нижніх позначок об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, В. Г. Батій, С. С. Підберезний, В. М. Рудько // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2018. — Вип. 31. — С. 76–84.
  11. Батій В. Г. Майбутнє об'єкта «Укриття» після створення Арки / В. Г. Батій, С. А. Паскевич, В. М. Рудько та ін. // Проблеми Чорнобильської зони відчуження. — 2016. — Вип. 15–16. — С. 4–13.
  12. Батій В. Г. Комп'ютерне моделювання при експлуатації та перетворенні об'єкта «Укриття» / В. Г. Батій, С. С. Підберезний, В. М. Рудько, В. М. Щербін // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2016. — Вип. 27. — С. 67–79.
  13. Деренговський В. В. Результати порівняльного аналізу «доз — витрат — вигоди» для двох варіантів «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта Укриття» / В. В. Деренговський, В. М. Рудько, В. О. Говоров // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2015. — Вип. 25. — С. 94–101.
  14. Балан О. В. Концептуальні рішення щодо демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, С. А. Паскевич, М. В. Пашинов // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2019. — Вип. 32. — С. 15–21.
  15. Рудько В. М. Концептуальні рішення щодо «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» / В. М. Рудько, А. М. Бамбура, П. О. Корчагін, В. О. Говоров // Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECО 18) : збірник матеріалів III Міжнародної конференції (25–27 квітня 2018 року, м. Славутич). — Чернігів : ЧНТУ, 2018. — С. 301–309.
  16. Згуровский М. З. Принятие решений в сетевых системах с ограниченными ресурсами : монография / М. З. Згуровский, А. А. Павлов. — Киев : Наук. думка. — 2014. — 573 с.
  17. Штанькевич О. С. Багатокритеріальний вибір в умовах неповноти та поганої узгодженості експертних оцінок. // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2012». — Вип. 2. Том 1. — Одесса, 2012. — С. 50–59.
  18. Павлов А. А. Использование модифицированного метода анализа иерархий при принятии решений в иерархическом планировании / А. А. Павлов, Т. Н. Лисецкий // Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ-ОДЕСА 2012) : тези доповідей. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (17–18 жовтня 2012 р.). — Одеса-Суми : Друкарський дім «Папірус», 2012. — С. 130.
  19. Машков О. А. Прийняття управлінських рішень у складних організаційних системах з погляду системного підходу (частина 1) (вступ) / О. А. Машков, В. Р. Косенко // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. — Київ : ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2010. — Вип. 55. — С. 131–148.
  20. Деренговський В. В. Удосконалений метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01 / Валерій Володимирович Деренговський; Ін-т проблем безпеки АЕС НАН України. — Чорнобыль, 2019. — 168 с.
  21. In Choi. A multilevel factor model: Identification, asymptotic theory and applications / In Choi, Dukpa Kim, Yun Jung Kim, Noh-Sun Kwark // Journal of Applied Econometrics. — 2018. — Vol. 33, No. 3. — P. 1–19. — doi.org/10.1002/jae.2611.
  22. Daniel J. A fuzzy multi-layer assessment method for EFQM / Jay Daniel, Mohsen Naderpour, Chin-Teng Lin // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. — 2018. — Vol. 27, No. 6. — P. 1252–1262. — doi.org/10.1109/TFUZZ.2018.2874019.
  23. Tzeng G.-H. New concepts and trends of hybrid multiple



- criteria decision making / G.-H. Tzeng, K.-Y. Shen. — Boca Raton : CRC Press, 2017. — 362 p.
24. Скітер І. С. Розробка моделі та модифікація методу аналізу ієрархій для оцінки рівня енергоефективності / І. С. Скітер, Д. В. Маргасов, Е. Ю. Сахно // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2015. — № 5 (2). — С. 26–32.
  25. 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.
  26. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. Пер. с англ. / Т. Л. Саати; науч. ред. А. В. Андрейченков. — Москва : Издательство ЛКИ, 2008. — 360 с.
  27. Saaty T. Mathematics of the brain: generalization from eigen vectors to eigen functions / T. Saaty // J Psychol Cognition. — 2017. — Vol. 2. — P. 113–122.
  28. Куренных А. Е. О повышении индекса согласованности матрицы парных сравнений в системах поддержки принятия решений / А. Е. Куренных, В. П. Осипов, А. И. Посадский, В. А. Судаков // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. — 2018. — № 196. — 16 с.

## V. V. Derenhovskiy, I. S. Skiter

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

### Three-Level Model Assessment of Potential Scenarios of the Shelter Object Transformation into an Ecologically Safe System Based on Global Factor

The paper presents research related to the analysis of scenarios for the transformation of the Shelter object into an ecologically safe system. Despite the long lifetime of the New Safe Confinement (NSC), which is 100 years, the presence of transuranic elements in fuel-containing materials (FCM) will pose a threat to the environment for many thousands of years. This indicates that the problem of choosing scenarios for further transformation of the Shelter object into an ecologically safe system remains relevant even after the commissioning of the NSC and requires special research. Among the tasks of analysis of potential scenarios for the transformation of the SO into an ecologically safe system after the commissioning of the NSC are:

identification and analysis of factors influencing the choice of scenarios for the transformation of the SO;

development of a methodology for comparative analysis of scenarios for the transformation of the SO into an ecologically safe system;

comparative analysis of scenarios for the transformation of the SO into an ecologically safe system and the choice of the best one for implementation.

The parameters of scenario evaluation and requirements for their submission are defined. An algorithm for building a model for estimating scenarios based on factorial-indicator sets has been developed. A model for increasing the level of consistency of pairwise comparisons of alternatives in determining the global criterion of the value of scenarios is proposed. A three-level scenario assessment model has been created. The correction of the method of analysis of hierarchies for the purpose of formation of the coordinated matrices of pairwise comparisons of indicators in separate factors and the general coordinated matrix of factors comparisons is proposed. The developed model makes it possible to determine the global values of scenarios on the basis of factor-indicator estimates. The use of the proposed methodology allows us to streamline, algorithmize and adjust the procedure of expert evaluation of qualitatively and quantitatively heterogeneous factors and improve the quality of the results to form a decision-making process to transform the SO into an ecologically safe system.

*Keywords:* scenario analysis, Shelter object, complex structural type system, factor-indicator model, level of consistency adjustment, global value criterion.

## 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”. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], 1999, no. 4, art. 33. (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. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy* [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. Resolution of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine no. 141 dated 16.05.2018.

4. Svierchkov S. F., Stelmakh D. A., Shumilova L. Ye. (2017). [Transformation of the Shelter object into an ecologically safe system: relevance of the recommended course of action]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 29, pp. 62–68. (in Ukr.)
5. Krukovsky P. G., Metel M. A., Sklyarenko D. I. (2019). *Novyi bezopasnyi konfaynment Chernobyl'skoy AES (raschetno-eksperimental'nyi analiz pri proyektirovanii i ekspluatatsii)* [New Safe Confinement of the Chernobyl NPP (calculation and experimental analysis in design and operation)]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 300 p. (in Rus.)
6. Vysotskyi Ye. D., Sushchenko K. O., Godun R. L. (2020). Expert assessment of the current criticality level of clusters of fuel-containing materials after the New Safe Confinement installing. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 16, no. 1, pp. 49–56. doi.org/10.31717/2311-8253.20.1.6. (in Rus.)
7. Krasnov V. O., Nosovskyi A. V., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2016). *Obiekt "Ukryttya": 30 rokov pislia avariyi* [Shelter object: 30 years after the accident]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 512 p. (in Ukr.)
8. Batiy V. G., Yehorov V. V., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2015). [Criteria for the Shelter object transformation into an ecologically safe system]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 24, pp. 85–91. (in Ukr.)
9. Balan O. V., Batiy V. G., Glebkin S. I., Lagunenکو O. S., Pidberezhnyi S. S., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2015). [Fundamental technological solutions for the removal of fuel-containing materials from the upper marks of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 25, pp. 83–93. (in Ukr.)
10. Balan O. V., Batiy V. G., Pidberezhnyi S. S., Rudko V. M. (2018). [Features of removal of fuel-containing materials from the lower marks of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 31, pp. 76–84. (in Ukr.)
11. Batiy V. G., Paskevych S. A., Rudko V. M., et al. (2016). [The future of Shelter object after the Arch is installed]. *Problems of the Chornobyl Exclusion Zone*, no. 15–16, pp. 4–13. (in Ukr.)
12. Batiy V. G., Pidberezhnyi S. S., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2016). [Computer simulation during operation and transformation of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 27, pp. 67–79. (in Ukr.)
13. Derengovskyi V. V., Rudko V. M., Govorov V. A. (2015). [Results of the comparative analysis of “doses — costs — benefits” for two options for “early” dismantling of unstable structures of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 25, pp. 94–101. (in Ukr.)
14. Balan O. V., Paskevych S. A., Pashynov M. V., Pidberezhnyi S. S., Rudko V. M. (2019). [Conceptual solutions for dismantling unstable structures of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 32, pp. 15–21. (in Ukr.)
15. Rudko V. M., Bambura A. M., Korchagin P. A., Govorov V. O. (2018). [Conceptual solutions for “early” dismantling of unstable structures of the Shelter object]. Proceedings of the III International Conference “Problems of decommissioning of nuclear power facilities and environmental restoration” (INUDECO 18) (April 25–27, 2018, Slavutych). Chornobyl: ChNTU, 2018, pp. 301–309. (in Ukr.)
16. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. (2014). *Prinyatiye resheniy v setevykh sistemakh s ogranichennymi resursami* [Decision making in network systems with limited resources]. Kyiv: Naukova Dumka, 573 p. (in Rus.)
17. Shtankevych O. S. (2012). [Multi-criteria choice in conditions of incompleteness and poor consistency of expert assessments]. Collection of scientific works SWorld. Proceedings of the International Scientific-Practical Conference “Prospective innovations in science, education, production and transport 2012” (Odesa, 2012), vol. 2, no. 1, pp. 50–59. (in Ukr.)
18. Pavlov A. A., Lisetsky T. N. (2012). [The use of a modified method of analysis of hierarchies in decision-making in hierarchical planning]. Proceedings of the All-Ukrainian scientific-practical conference Information control systems and technologies (IUST-Odesa 2012) (October 17–18, 2012). Odesa-Sumy: Papyrus Printing House LLC, p. 130. (in Rus.)
19. Mashkov O. A., Kosenko V. R. (2010). [Adoption of management decisions in complex organizational systems in terms of system approach (part 1) (introduction)]. Collection of scientific works of the Institute of Modeling Problems in Energy named after G. Ye. Pukhov of the NAS of Ukraine, vol. 55, pp. 131–148. (in Ukr.)
20. Derengovskyi V. V. (2019). *Udoskonalenyi metod bagatokryterialnogo analizu ekologichnoi bezpeky obektiv iz radiatsiino-yadernymy tehnologiyamy* [The improved method of multicriteria analysis of environmental safety of objects with radiation and nuclear technologies] (PhD Dissertation). Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 24 p. (in Ukr.)
21. In Choi, Dukpa Kim, Yun Jung Kim, Noh-Sun Kwark (2018). A multilevel factor model: Identification, asymptotic theory and applications. *Journal of Applied Econometrics*, vol. 33, no. 3, pp. 1–19. doi.org/10.1002/jae.2611.
22. Daniel J., Naderpour M., Lin C.-T. (2018). A fuzzy multi-layer assessment method for EFQM. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 27, no. 6, pp. 1252–1262. doi.org/10.1109/TFUZZ.2018.2874019.

23. Tzeng G.-H., Shen K.-Y. (2017). *New concepts and trends of hybrid multiple criteria decision making*. Boca Raton: CRC Press, 362 p.
24. Skeeter I. S., Margasov D. V., Sakhno E. Yu. (2015). Development of a model and modification of the method of hierarchy analysis to assess the level of energy efficiency. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 26–32.
25. 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.
26. Saaty T. L.; Andreichenkov A. V. (sc. ed.) (2008). *Prinyatiye resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: analiticheskiye seti* [Dependence and feedback decision making: analytical networks]. Moscow: LKI Publishing House, 360 p. (in Russ.)
27. Saaty T. (2017). Mathematics of the brain: generalization from Eigen vectors to eigen functions. *J Psychol Cognition*, vol. 2, pp. 113–122.
28. Kurennykh A. E., Osipov V. P., Posadskiy A. I., Sudakov V. A. (2018). On increasing the consistency index of the matrix of pairwise comparisons in decision support systems. *Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics*, vol. 196, 16 p.

Надійшла 17.03.2022

Received 17.03.2022