

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗПЕКИ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

**ДЕРЕНГОВСЬКИЙ ВАЛЕРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ**

**УДК 504.064:629.039.58**

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

**Спеціальність: 21.06.01 – Екологічна безпека**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Київ 2019**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у відділенні проектування об'єктів з радіаційними та ядерними технологіями Інституту проблем безпеки АЕС НАН України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Носовський Анатолій Володимирович**,  
Інститут проблем безпеки АЕС  
Національної академії наук України,  
директор

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук  
**Бондарьков Михайло Дмитрович**,  
ДНДУ Чорнобильський центр з проблем  
ядерної безпеки, радіоактивних відходів та  
радіоекології,  
генеральний директор

доктор технічних наук  
**Комаров Юрій Олексійович**,  
Одеський національний політехнічний  
університет, кафедра АЕС,  
старший викладач

Захист відбудеться \_\_\_ березня 2019 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 27.201.01 Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Лисогірська, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Лисогірська, 12.

Автореферат розісланий « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 27.201.01,  
к.т.н., с.н.с.



О. А. Кучмагра

### **Загальна характеристика роботи**

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день на території України знаходиться понад 8000 об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями: АЕС України; уранодобувна і переробна промисловість; зона відчуження Чорнобильської АЕС; науководослідний реактор у м. Київ; медичні, наукові та інші підприємства і організації, в яких використовуються понад 100 тис. джерел іонізуючого випромінювання.

Будь-які роботи на цих об'єктах або невиконання робіт із підвищення екологічної безпеки таких об'єктів можуть призвести до погіршення екологічної ситуації та виникнення небезпеки для життя та здоров'я людини. Тому для забезпечення мінімізації впливу такої діяльності на довкілля стає актуальним питання проведення аналізу екологічної безпеки та вибору оптимального варіанта виконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями, що є одним із пріоритетів діяльності у природоохоронній сфері Уряду України по реалізації заходів, які сприяли б підвищенню рівня екологічної безпеки таких об'єктів.

Екологічна безпека – це такий стан навколишнього середовища, коли гарантується запобігання погіршенню екологічної ситуації та виникнення небезпеки для життя та здоров'я людини. Одним із чинників (у першу чергу антропогенного характеру), що спричиняє погіршення екологічної ситуації та виникнення небезпеки для життя та здоров'я людини, є об'єкти з радіаційно-ядерними технологіями.

Для оцінки впливу об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями на екологічний стан довкілля необхідно аналізувати такі показники, як радіоактивне забруднення довкілля, індивідуальні дози опромінення персоналу та населення, колективні дози опромінення персоналу та населення, витрати на протирадіаційний захист та ліквідацію можливих аварійних ситуацій, вартість виконання запланованих робіт, час виконання робіт та багато інших факторів. Усі ці показники мають різний фізичний зміст та розмірність і порівняння сукупності всіх цих показників для різних варіантів стає складною проблемою. Для вирішення такого роду задач Міжнародна комісія з радіаційного захисту (МКРЗ) рекомендує метод багатокритеріального аналізу як найбільш універсальний метод. Але, у той же час, цей метод є і найбільш складним у застосуванні. Крім того, бувають випадки, коли деякі з показників оцінки екологічної безпеки неможливо оцінити кількісно.

Враховуючи зазначене вище, вибір оптимального варіанта виконання чи невиконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями можливий при використанні вдосконаленого методу багатокритеріального аналізу. Тому вдосконалення методу багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями є актуальною науково-технічною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Наукові дослідження за темою дисертації виконано відповідно до статті 16 Конституції України (Забезпечення екологічної безпеки і підтримання екологічної рівноваги на території України, подолання наслідків Чорнобильської катастрофи - катастрофи планетарного масштабу, збереження генофонду Українського народу є обов'язком держави), Закону України “Про основні засади (Стратегію) державної екологічної політики на період до 2020 року” та Національним планом дій з охорони навколишнього природного середовища на 2011 – 2015 рр., постанови Кабінету Міністрів України № 421-П від 31.03.2003 р. “Про затвердження Порядку

виконання Плану здійснення заходів на об'єкті "Укриття", "Плану заходів на 2006 – 2010 роки стосовно реалізації Енергетичної стратегії України на період до 2030 року" (затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України № 436 від 27.07.2006 р.). Основні положення дисертаційної роботи використовувались при виконанні звіту ІІБ АЕС НАН України про науково-дослідну роботу "Оптимізація протирадіаційного захисту та ймовірнісний аналіз безпеки при здійсненні діяльності з перетворення об'єкта "Укриття" № ДР 0101U002572 (здобувач розробив "Комплексну методикау оптимізації радіаційного захисту" - розділ 5 звіту), контракту SIP 03-2-016 КСК з Групою управління проектом Державного спеціалізованого підприємства "Чорнобильська атомна електростанція" від 16.05.2002 р. на розробку детального проекту зі стабілізаційних заходів (у межах завдань ПЗЗ № 4, 14, 14а та Б/Н здобувач розробив методикау аналізу "доз/витрат/зиску" зі стабілізаційних заходів та виконав розрахунки доцільності проведення цих заходів), Договору з Акціонерним товариством "Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут "Енергопроект" № 175/2006 від 20.02.2006 р. на виконання розрахункових обґрунтувань у рамках техніко-економічних обґрунтувань інвестицій для сховища відпрацьованого ядерного палива водо-водяних енергетичних реакторів (СВЯП ВВЕР) (здобувач розробив методикау аналізу вибору майданчика будівництва СВЯП та виконав розрахунки для вибору найкращого варіанта) та контракту SIP09-2-001 КСК з Групою управління проектом Державного спеціалізованого підприємства "Чорнобильська атомна електростанція" від 14.04.2009 р. на надання послуг Інженер-клієнта (здобувач розробив методикау аналізу "доз/витрат/зиску" варіантів демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта "Укриття" та виконав розрахунки для вибору найкращого варіанта).

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є удосконалення методу багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями. Для досягнення мети дисертаційної роботи було сформульовано та вирішено такі задачі наукового дослідження:

1. Аналіз норм, правил, принципів і критеріїв, які застосовуються при оцінці стану екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями, а також виявлення недоліків прийняття оптимальних рішень на основі методу багатокритеріального аналізу і методу експертних оцінок таких об'єктів.
2. Визначення та наукове обґрунтування кількісних та якісних показників екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями.
3. Відшукування виду функцій бажаності, які відображають кожне значення з області значень визначених показників екологічної безпеки в одне значення з безрозмірної області значень  $[0, 1]$  та вибір найбільш прийнятних функцій для цих показників екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями.
4. Розробка методу отримання вагових коефіцієнтів, проведення аналізу узгодженості отриманих вагових коефіцієнтів.
5. Визначення узагальненого показника ефективності виконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями при можливій зміні екологічного стану довкілля.

6. Розробка процедури вибору оптимального варіанта виконання чи невиконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями в умовах невизначеності за допомогою удосконаленого методу багатокритеріального аналізу.
7. Обґрунтування коректності отриманих аналітичних розрахунків удосконаленим методом багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями під час вибору майданчика для будівництва СВЯП ВВЕР та при виконанні стабілізаційних заходів на об'єкті "Укриття".

**Об'єкт дослідження** – процес вибору оптимального варіанта втручання у стан екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями.

**Предмет дослідження** – метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями.

**Методи дослідження.** Виконання дисертаційної роботи потребувало проведення теоретичних досліджень із використанням системного підходу. Системний підхід до вивчення техносфери полягав у визначенні її елементів, структури, принципів функціонування, регламенту робіт, границь безпечної роботи, можливих аварій та їхніх наслідків, проектування, будівництва, введення в експлуатацію та виведення з експлуатації. Для цього було використано такі основні методи: спостереження за техносферою; порівняння варіантів екологічного стану техносфери; вимірювання компонентів екологічного стану техносфери; експеримент; метод експертних оцінок; кореляційний аналіз; факторний аналіз; метод імплікаційних шкал; моделювання стану техносфери; метод багатокритеріального аналізу.

Достовірність отриманих результатів підтверджується впровадженням отриманих за допомогою вдосконаленого методу багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями прийнятих рішень, що пройшли Державну експертизу України та Міжнародної експертної комісії, експериментальним підтвердженням аналітичних розрахунків із використанням повірених приладів та атестованих методик.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Отримані наукові положення, висновки та рекомендації дозволили вдосконалити метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями в умовах невизначеності для вибору оптимального варіанта виконання робіт на цих об'єктах, а саме:

визначено показники екологічної безпеки та сформульовано метод оцінки якісних показників екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями в умовах невизначеності методом експертних оцінок та наведено рекомендації для їхнього практичного використання;

визначено метод отримання вагових коефіцієнтів показників екологічної безпеки, а також розроблено спеціальні шкали для ухвалення рішень;

уперше знайдено спеціальний вид функції бажаності, що відображає кожне значення з області значень визначених показників екологічної безпеки в одне значення безрозмірної області значень  $[0, 1]$  особливим чином: функція є монотонно-спадаючою; в області крайніх значень мало залежна від значень критеріїв; в області середніх значень має високу залежність від значень критеріїв;

удосконалено метод багатокритеріального аналізу шляхом його адаптації до специфіки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями в умовах невизначеності шляхом вибору оптимального варіанта втручання в стан екологічної безпеки цих об'єктів, який відрізняється від існуючих тим, що об'єднує в собі метод багатокритеріального аналізу та метод експертних оцінок із застосуванням знайдених функцій бажаності спеціального виду.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у створенні інструментарію для прийняття оптимальних рішень щодо проведення робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями та варіантів його застосування у сфері використання ядерної енергії. Удосконалений метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями шляхом мінімізації отриманої колективної ефективної дози та завдяки оптимальному використанню матеріально-технічних і фінансових ресурсів дозволяє мінімізувати негативний вплив радіаційних факторів на екологічний стан довкілля.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в практичну діяльність НАЕК "Енергоатом" під час вибору майданчика для будівництва СВЯП ВВЕР та під час стабілізаційних заходів на ЧАЕС (акти впровадження додаються).

**Особистий внесок автора.** Автору належать основні ідеї та підходи до удосконалення методу багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями. Автором проведено наукове дослідження можливих видів функції бажаності, за результатами якого вперше знайдено функцію бажаності спеціального виду, яка відображає кожне значення з області значень визначених показників екологічної безпеки в одне значення безрозмірної області значень  $[0, 1]$  та є найбільш прийнятна для цих показників екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями. Автором розроблено метод оцінки якісних показників в умовах невизначеності з використанням методу експертних оцінок для об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями та наведено рекомендації для його практичного використання. Автор брав безпосередню участь на всіх етапах наукового дослідження - у розробці моделі та програм, методів досліджень, аналізі отриманих результатів, підготовці рекомендацій для практичного використання на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями. Усі основні положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримані автором особисто.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та отримали схвалення на міжнародних конференціях та семінарах: International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy", Kyiv, 2006; VI Конференции Международного чернобыльского центра "Международное сотрудничество - Чернобылю". 9 - 12 вересня 2003 р.; ICSEM'01, 8th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Bruges, Belgium, September 30 – October 4, 2001.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 14 у спеціалізованих фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженого ВАК України, та одна, яка входить до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний

об'єм дисертації складає 168 сторінок, основний текст дисертації викладено на 140 сторінках. Робота включає 10 ілюстрацій, 38 таблиць, 2 додатки, список використаної літератури із 137 джерел (14 сторінок). У додатках містяться два акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано вибір напрямку досліджень, його актуальність, сформульовано мету й завдання роботи, показано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** проаналізовано стан проблеми щодо проведення багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями.

Цей аналіз показав, що існують методи аналізу екологічної безпеки техногенно небезпечних об'єктів, але вони мають багато недоліків, зокрема:

1) метод витрат і зиску строго обмежується кількісним порівнянням між витратами на захист і колективною дозою. При застосуванні міжнародних рекомендацій по оцінці дози в грошовому еквіваленті під час економічної кризи людське життя може бути оцінене в незначну суму. Такий підхід неприпустимий при виборі варіанта виконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями;

2) у багатокритеріальному методі з використанням теорії нечітких множин відсутня можливість вибору оптимального варіанта втручання в екологічний стан об'єктів на стадії проектування, будівництва, вибору майданчика;

3) метод декартового добутку графів не дає можливості вибору оптимального варіанта втручання в екологічний стан об'єктів на стадії проектування, будівництва, вибору майданчика;

4) у методі геоінформаційного еколого-техногеохімічного моделювання та нечітких експертних оцінок методом Дельфі з перетворенням їх у функції багатокритеріальної корисності за узагальнюючий показник корисності (або бажаності) вибрана адитивна функція з коефіцієнтами, рівними одиниці. Також у даній роботі нема критерію, що відповідає за радіаційний фактор безпеки та отриману дозу опромінення персоналом та населенням;

5) метод багатокритеріального аналізу функції корисності потребує побудови або вибору спеціальних функцій корисності та визначення вагових коефіцієнтів, а також побудову спеціальної процедури включення якісних оцінок.

Отже, необхідно вдосконалити метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями шляхом його адаптації до специфіки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями в умовах невизначеності шляхом вибору оптимального варіанта виконання чи невиконання робіт на цих об'єктах, який відрізняється від існуючих тим, що об'єднує в собі метод багатокритеріального аналізу та метод експертних оцінок із застосуванням функцій бажаності спеціального виду.

Результати аналізу в розділі 1 дали змогу вибрати напрямок подальших досліджень для досягнення мети даної роботи.

У **другому розділі** розглянуто методичні основи проведення досліджень. Об'єктом дослідження дисертаційної роботи став процес вибору оптимального варі-

анта виконання чи невиконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями, яких на території України знаходиться понад 8 тисяч.

Для проведення досліджень обрано об'єкти, розташовані на території 30-км зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення та Чорнобильська АЕС разом із об'єктом "Укриття", які об'єднані терміном "техносфера".

Предметом дослідження дисертаційної роботи обрано метод багатокритеріального аналізу та особливості його застосування до об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями.

Основні методи досліджень такі: спостереження за техносферою; порівняння варіантів екологічного стану техносфери; вимірювання компонентів екологічного стану техносфери; експеримент; метод експертних оцінок; кореляційний аналіз; факторний аналіз; метод імплікаційних шкал; моделювання стану техносфери; метод багатокритеріального аналізу.

У **третьому розділі** наведено аналіз норм, правил, принципів і критеріїв, які застосовуються при оцінці екологічного стану об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями, аналіз витрат і зиску, процедури вирішення багатоцільових завдань та прийняття рішень в умовах невизначеності. Розглядаючи принцип необхідності і достатності критеріїв прийняття рішення з використанням методу багатокритеріального аналізу в роботі зроблено висновок про необхідність використовувати мінімум три критерії. Якщо критеріїв прийняття рішення менше трьох, то можна використати, наприклад, метод витрат і зиску або інші більш прості методи. Щодо достатності кількості критеріїв, то в роботі зроблено висновок, що для прийняття рішення про оптимальний варіант виконання чи невиконання запланованих робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями в більшості випадків цілком достатньо семи критеріїв, які охоплюють усі аспекти впливу радіоактивних компонентів на довкілля. Але ці сім критеріїв можуть бути складними і включати підкритерії в разі необхідності. На наступному етапі роботи зроблено визначення критеріїв для проведення аналізу екологічної безпеки варіантів виконання чи невиконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями за допомогою семи показників екологічної безпеки:  $C$  - вартість виконання робіт (включаючи витрати на протирадіаційний захист і поведження з радіоактивними відходами (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 (з урахуванням потенційного опромінення населення при можливих аварійних ситуаціях при виконанні чи невиконанні запланованих робіт);  $F$  - фінансовий ризик (з урахуванням потенційних витрат на ліквідацію наслідків можливих аварійних ситуацій при виконанні чи невиконанні запланованих робіт);  $T$  - час реалізації проекту;  $Q$  - величина можливої невизначеності. Усі перераховані показники 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 методів експертних оцінок проводиться оцінка необхідних даних, і відповідні значення показників матимуть оціночні значення із зазначенням відносної похибки або закону розподілу. Крім того, у загальному випадку всі показники можуть бути як кількісними, так і



якісними. Найчастіше якісними є показники, що оцінені за допомогою методу експертних оцінок.

Далі розглянуто детальніше визначені основні показники. У більшості випадків перші шість показників є кількісними. Значення показників  $C$  (тис. грн.),  $D$  (люд.-Зв) і  $T$  (роки) 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 (визначений в НРБУ-97), Зв<sup>-1</sup>;  $p_i$  – імовірність події, що призводить до опромінення персоналу, рік<sup>-1</sup>;  $N_j$  – кількість персоналу в зоні виконання робіт;  $D_j$  – доза на певному віддаленні й у певному напрямку від місця потенційної аварії, Зв;  $\Omega$  – множина потенційних аварій, радіологічний ризик від яких для персоналу перевищує значення  $2 \cdot 10^{-4}$  рік<sup>-1</sup> (визначений в НРБУ-97);  $\Theta$  – множина місць локалізації персоналу в санітарній зоні об'єкта з радіаційно-ядерними технологіями. Колективний 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 (визначений в НРБУ-97), Зв<sup>-1</sup>;  $p_i$  – імовірність події, що призводить до опромінення населення, рік<sup>-1</sup>;  $N_j$  – кількість населення, зосередженого в певному місці;  $D_j$  – доза на певному віддаленні й у певному напрямку від місця потенційної аварії, Зв;  $\Omega$  – множина потенційних аварій, радіологічний ризик від яких для населення перевищує значення  $5 \cdot 10^{-5}$  рік<sup>-1</sup> (визначений в НРБУ-97);  $\Theta$  – множина місць локалізації населення в санітарній зоні об'єкта з радіаційно-ядерними технологіями. Фінансовий ризик  $F$  – це фінансові витрати на ліквідацію потенційних аварій. Його 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<sup>-1</sup>;  $C_i^p$  – вартість ліквідації наслідків потенційної аварії з імовірністю  $p_i$ , тис. грн;  $\Omega$  – множина потенційних аварій, радіологічний ризик від яких для персоналу (населення) перевищує значення  $2 \cdot 10^{-4}$  рік<sup>-1</sup> ( $5 \cdot 10^{-5}$  рік<sup>-1</sup>). Величина можливої невизначеності  $Q$  має якісний характер і зразу виникає проблема включення якісних оцінок у набір кількісних оцінок.

Визначені основні показники проведення аналізу екологічної безпеки мають різну природу формування і значення, що не дозволяє проводити безпосереднє порівняння їхніх чисельних значень. Для проведення такого аналізу необхідно визначити адекватне перетворення числових значень указаних показників екологічної безпеки в безрозмірній математичний простір для отримання загальної оцінки безпеки. Для цього в даній роботі було використано метод багатокритеріального аналізу функції бажаності. Суть методу багатокритеріального аналізу функції бажаності спеціального виду полягає у введенні спеціальної багатовимірної функції – узагальненого показника ефективності, який включає в себе всі інші показники. З цією метою для кожного показника здійснюється побудова функції бажаності  $u_j(x)$ , яка відображає область зміни кожного з показників  $x$  у діапазон балів, що змінюється від 0 до 1. Узагальнений показник ефективності  $W_i$   $i$ -го варіанта виконання (або невиконання) робіт у загальному випадку визначається як сума відповідних функцій бажаності

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

з ваговими коефіцієнтами  $k_j$ , які вибираються так, щоб  $\sum_{j=1}^n k_j = 1$ .

Вид функцій бажаності  $u_j(x)$  і значення вагових коефіцієнтів  $k_j$  в загальному випадку може бути визначений будь-яким способом. На шляху використання методу багатокритеріального аналізу функції бажаності постає задача відшукування найбільш коректних функцій бажаності та значень вагових коефіцієнтів. Для вирішення задачі прийняття оптимальних рішень щодо проведення робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями в роботі розроблено процедуру проведення аналізу екологічної безпеки під час проектування, будівництва та експлуатації об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями. Для застосування запропонованої процедури необхідно знайти вид функцій бажаності, які найбільше відповідають вимогам даної задачі, дослідити вагові коефіцієнти і обчислити узагальнений показник ефективності прийнятого рішення.

Після вивчення досвіду використання методу багатокритеріального аналізу функції бажаності та дослідження можливих видів функцій бажаності для всіх кількісних показників у роботі запропоновано такі види функцій бажаності:

1) для показників, які мають межу зверху, монотонно спадають і байдужі до ризику, прості лінійні функції виду (загальний вид таких функцій був описаний у роботах американських учених Р. Кіні і Х. Райфа)

$$u_i(x) = 1 - \frac{x}{x_{\max}}, \quad (2)$$

де  $i = 1, \dots, 7$ ;  $x$  - значення показника;  $x_{\max}$  - максимальне значення показника;

2) коли встановити верхню межу значення показника неможливо (наприклад значень вартості або дози), необхідно виконання таких умов: в області малих значень вартості (або дози) функція  $u_j(x)$  повинна мати високі значення й бути малочутлива до змін аргументу; в області великих значень вартості (або дози) функція  $u_j(x)$  повинна мати низькі значення й бути малочутлива до змін аргументу; в інтервалі середніх значень аргументу, що близькі між собою, функція  $u_j(x)$  повинна мати високу роздільну здатність.

Провівши дослідження можливих варіантів для виду функції бажаності з перерахованими вище властивостями, була вибрана функція  $u(x) = EXP(-a \cdot x) + EXP(-b \cdot x)$ , при всіх  $x$ ,  $\{a, b, c\} > 0$ . Дана 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. У вибраній функції спочатку було прийнято, що  $b = 0$  і проведено аналіз поведінки графіку функції  $u(x) = e^{-ax}$ . Після виконаного аналізу було прийняте рішення далі розглядати функції виду  $u(x) = EXP(-a \cdot x^n)$ . Дослідивши залежність графіку даної функції від значення степені змінної  $x$ , було прийняте рішення, що поставленим задачам відповідає  $n = 4$ . Тоді наша функція буде мати вид  $u(x) = EXP(-a \cdot x^4)$ . Графічне зображення групи зазначених вище функцій залежно від вибраної константи  $a$  при аргументі показано на рис. 1. На даному рисунку можна побачити, що при

$a = 0,7$  значення функції  $u(0,5) = 0,5$ , тому остаточно функція мала вид  $u(x) = EXP(-0,7 \cdot x^4)$ . Отже у процесі адаптації функції  $u(x) = EXP(-a \cdot x) + EXP(-b \cdot x)$  до перерахованих умов було знайдено функцію бажаності спеціального виду, яка відповідає поставленим вимогам і має такий вид:

$$u_i(x) = EXP(-0,7 \cdot (x / A)^4), \quad (3)$$

де  $i = 1, \dots, 7$ ;  $x$  - значення показника;  $A$  - константа, що визначається як середнє значення  $i$ -го показника всіх розглянутих варіантів;

3) для порівняння якісних показників екологічної безпеки використано метод експертних оцінок безпосереднього оцінювання на основі 9-бальної шкали, яку вперше запропонував американський математик Томас Сааті. Ця шкала є дискретною і складається з набору значень:  $\{1, 2, \dots, 9\}$ . Тоді функцію бажаності  $u_i$  для якісних показників можна визначити як  $u_i(9) = 0$ ;  $u_i(8) = 0,125$ ;  $u_i(7) = 0,25$ ;  $u_i(6) = 0,375$ ;  $u_i(5) = 0,5$ ;  $u_i(4) = 0,625$ ;  $u_i(3) = 0,75$ ;  $u_i(2) = 0,875$ ;  $u_i(1) = 1$ .

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;

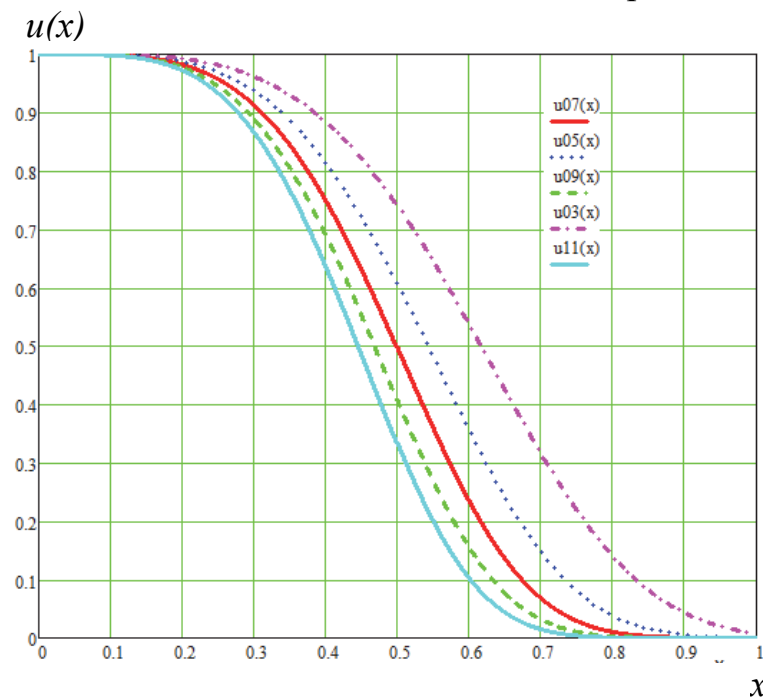


Рис. 1. Вид функції  $u(x) = EXP(-a \cdot x^4)$  при різних значеннях константи  $a$

$U_{14}, U_{24}, \dots, U_{M4}$  - 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 перших п'яти показників, що не мають верхньої межі, використаємо функцію корисності  $u_i(X) = EXP(-0,7 \cdot (X / A)^4)$ , а для двох останніх - визначену вище функцію бажаності  $u_i$  для якісних показників.

Для порівняння варіантів можна записати формулу

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

У тому випадку, коли показники екологічної безпеки мають однакову вагу, формулу (4) можна записати в такому вигляді:

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

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

Для визначення вагових коефіцієнтів можна скористатися системою експертних оцінок методом безпосереднього оцінювання на основі 9-бальної шкали. Метод

безпосереднього оцінювання - найбільш поширений метод у практиці прийняття рішень. Він дозволяє експерту використовувати більш чутливий інструмент взаємного порівняння варіантів. При використанні цього методу перед експертом ставиться задача - оцінити якісну властивість показника в балах (попередньо встановлюється діапазон змін цієї оцінки). Експерти повинні відображати ступінь відповідності варіанта до властивості, яку розглянуто. Бали - це штучні числові оцінки якісної властивості. В якості експертів можуть виступати особи, які задовольняють вимоги наказу Міністерства регіонального розвитку № 26 від 27.01.2014 р. та погоджену з Міністерством соціальної політики України зміну № 8 до розділу 1 “Керівники, професіонали, фахівці” (кваліфікаційні характеристики професій: “інженер-проектувальник” – код КП-2142.2, “експерт будівельний” – код КП-2142.2, “інженер з технічного нагляду (будівництво)” – код КП-2142.2), випуску 64 довідника кваліфікаційних характеристик професій працівників “Будівельні, монтажні та ремонтно-будівельні роботи”. Ці вимоги: повна вища освіта відповідного напрямку підготовки (магістр, спеціаліст), стаж роботи за професією експерта будівельного I категорії (за спеціалізацією) – не менше 2 років, підвищення кваліфікації згідно із законодавством, наявність кваліфікаційного сертифіката на виконання відповідних робіт щодо об’єктів будівництва класу наслідків (відповідальності) СС3 (значні наслідки). Крім експертів будівельної галузі до експертизи необхідно долучати технічних експертів із галузі екології.

Усі оцінки 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  $B$  за властивістю  $L$ , що визначений 12 експертами.

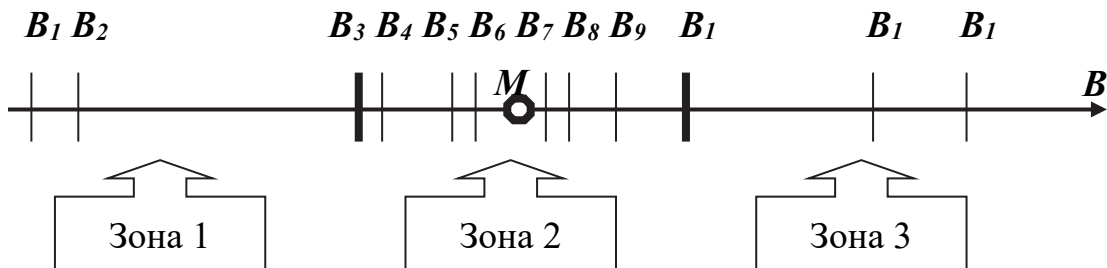


Рис. 2. Шкала оцінок експертів

Спочатку необхідно визначитися в допустимості рівня розбіжностей оцінок експертів, які знаходяться в діапазоні  $B_1 - B_{12}$ . Якщо особа, яка приймає рішення (ОПР) вважає таку оцінку розбіжностей допустимою, то в якості загальної оцінки (результат обробки думок експертів) може бути використано середнє значення  $B_{серед}$

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

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 достатньої достовірності отриманої оцінки є рівень узгодженості думок експертів. Його пере-

віряють 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 9-бальної шкали вагові коефіцієнти можуть бути отримані як

$$k_l = \frac{M_l}{\sum_{i=1}^n M_i}, \text{ де } M_l \text{ – медіанна оцінка експертів по визначенню ваги показника } l \text{ на}$$

основі 9-бальної шкали. В якості базового припущення приймемо, що всі показники рівнозначні між собою:  $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = k_6 = k_7 = \frac{1}{7}$ . Якщо ж існують які-небудь дані або співвідношення між обраними показниками або ОПР має своє уявлення про значущість показників екологічної безпеки, то необхідно за допомогою методу безпосереднього оцінювання на основі 9-бальної шкали визначити вагові коефіцієнти відповідно до пріоритетів показників. В якості міри узгодженості думок експертів можна прийняти розбіжність в оцінках не більше двох 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, вхідних даних тощо).

Оскільки деякі з показників екологічної безпеки 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  $W_i$ , 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 ці варіанти рівноцінні між собою, або необхідно провести повторне коригування переліку показників, уточнення меж зміни параметрів, оцінок якісних показників і визначення вагомості показників. Для остаточного затвердження вибору нам 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 показників. Після виконання розрахунків отримуємо наступний результат для обчислення похибок всіх показників

$$\Delta_U < \frac{\sqrt[5]{U_{\max-1}} - \sqrt[5]{U_{\max}}}{\sqrt[5]{U_{\max}} + \sqrt[5]{U_{\max-1}}} \quad (6)$$

Умова (6) є достатньою для остаточного виводу. Однак ця умова диктує твердження, що всі значення критеріїв для варіанта  $W_{\max}$  повинні бути менше відповідних значень для варіанта  $W_{\max-1}$ . При виконанні умови (6) для всіх показників можна зробити висновок про вибір найкращого варіанта не проводячи обчислення функцій бажаності (умова достатності). Але одночасне виконання умови (6) для всіх показників необов'язкове. Необхідною умовою вибору оптимального варіанта є умова  $\min(W_{\max}) - \max(W_{\max-1}) > 0$  (умова необхідності).

Також у цьому розділі проведено дослідження виду можливих функцій бажаності, на основі якого вперше запропоновано три функції бажаності спеціального виду, які можуть бути застосовані практично до всіх показників проведення оцінки рівня екологічної безпеки та вибору оптимального варіанта. Дві функції мають безперервний вигляд і застосовуються для кількісних показників. А третя функція визначена тільки в дев'яти точках і застосовується для якісних показників оцінки. Далі в роботі проведено дослідження побудови вагових коефіцієнтів і запропоновано для їх визначення використовувати метод експертних оцінок на основі безпосереднього оцінювання на базі 9-бальної шкали. Для цього проведені додаткові дослідження роботи висококваліфікованих фахівців у галузі радіаційної та екологічної безпеки на основі робіт, які виконувалися в зоні відчуження та об'єкті "Укриття". Після проведеного аналізу отримано значення вагових коефіцієнтів. Використовуючи запропоновані функції бажаності та визначені вагові коефіцієнти, далі було знайдено узагальнений показник ефективності прийнятого рішення. Оскільки деякі з показників мають оціночний характер, виконано аналіз чутливості отриманого вибору від варіації вхідних параметрів у межах змін, тобто визначено, чи не зміниться вибір оптимального варіанта при різних значеннях параметрів розрахунків за межі змін.

Використовуючи результати вирішення поставлених наукових завдань до загальновідомого методу багатокритеріального аналізу, отримано вдосконалений метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями.

У **четвертому розділі** виконана перевірка коректності аналітичних розрахунків удосконаленого методу багатокритеріального аналізу, екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями з точки зору погіршення екологічного стану довкілля під час вибору майданчика для будівництва СВЯП ВВЕР, при виконанні стабілізаційних заходів на ЧАЕС та порівняльного аналізу для двох варіантів "раннього" демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта "Укриття".

У рамках проекту ТАСІС "Чорнобильський блок 4. Короткострокові і довгострокові заходи - Заходи 2 + 4" в 1996 р. було розроблено "Рекомендований курс дій", в якому запропоновано розробити потенційні короткострокові і довгострокові заходи і комплекс першочергових заходів щодо перетворення об'єкта "Укриття" на екологічно безпечну систему. Даним проектом було запропоновано спочатку провести стабілізацію стану існуючого об'єкта "Укриття".

Стабілізація стану існуючого об'єкта "Укриття" - це підвищення експлуатаційної надійності та довговічності конструкцій та систем, які забезпечують стабілізацію та контроль показників безпеки "Укриття", що полягає в зниженні вірогідності обвалення будівельних конструкцій на період до 15 років. Проект стабілізації реалізовувався в чотири етапи: 1-й етап – визначення переліку стабілізаційних заходів, 2-й етап – концептуальні рішення зі стабілізації, 3-й етап – робоче проектування, 4-й етап – будівництво, введення в експлуатацію.

У ході виконання 3-го етапу підготовки проекту стабілізації будівельних конструкцій об'єкта „Укриття” в рамках плану здійснення заходів за допомогою багатокритеріального аналізу безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями було виконано обґрунтування доцільності/недоцільності реалізації заходу № 4 - підсилення східних опор балок Б1/Б2 (вентиляційних шахт) з точки зору потенційного погіршення екологічної безпеки в зоні відчуження. При виконанні аналізу факторів, що впливають на рішення про доцільність реалізації стабілізаційного заходу № 4, розглядалися такі показники екологічної безпеки:

1)  $F$  - фінансовий ризик (включаючи  $C$  - вартість виконання робіт як фінансовий ризик з імовірністю, яка дорівнює одиниці, витрати на протирадіаційний захист та поводження з РАВ);

2)  $R$  - колективний радіаційний ризик персоналу і населення (з урахуванням КЕД при реалізації заходу і аварійних ситуацій);

3)  $Q$  - величина зміни умов проведення регламентних робіт, будівництва безпечного конфайнмента, вилучення паливовмісних матеріалів і т.д.

При розрахунках значення мінімального фінансового ризику  $F_{min}$  і мінімального радіаційного ризику  $R_{min}$  приймаються рівними нулю. При розрахунках  $F_{max}$  і  $R_{max}$  ймовірність події приймалася рівною граничному значенню аварійної ситуації поточної експлуатації  $p = 10^{-2}$  рік<sup>-1</sup>. Результати розрахунків показників проведення аналізу такі:

Фінансовий ризик при реалізації заходу $F_1$ , тис. грн·рік <sup>-1</sup>	75
Фінансовий ризик при відмові від реалізації заходу $F_2$ , тис. грн·рік <sup>-1</sup>	0,02
Максимальний фінансовий ризик $F_{max}$ , тис. грн·рік <sup>-1</sup>	77
Колективний радіаційний ризик персоналу і населення при реалізації заходу $R^p$ , люд.-рік <sup>-1</sup>	0,26
Колективний радіаційний ризик персоналу і населення при відмові від реалізації заходу $R^p$ , люд.-рік <sup>-1</sup>	0,00022
Максимальний колективний радіаційний ризик $R_{max}$ , люд.-рік <sup>-1</sup>	0,28
Величини ризику погіршення умов при реалізації заходу $Q_1$ (можливість додаткового контролю радіаційної обстановки та стану конструкцій в районі вентиляційних шахт після організації доступу до них)	3
Величини ризику погіршення умов при відмові від реалізації заходу $Q_2$ (немає можливості додаткового контролю)	7

Зробивши припущення, що всі показники мають однакову вагу для кожного з варіантів, обчислимо узагальнений показник ефективності  $W_i$  як

$$W_i = \left( \frac{F_{max} - F}{F_{max} - F_{min}} + \frac{R_{max} - R}{R_{max} - R_{min}} + u_3(Q_i) \right) / 3.$$

Використовуючи попередню формулу різницю  $\Delta W = W_1 - W_2$  можна представити у вигляді

$$\Delta W = \left( \frac{F_2 - F_1}{F_{\max} - F_{\min}} + \frac{R_2 - R_1}{R_{\max} - R_{\min}} + u_3(Q_1) - u_3(Q_2) \right) / 3.$$

Тепер скориставшись останньою формулою, можна обчислити значення різниці узагальнених функцій бажаності для реалізації заходу № 4:

$$\Delta W = \left( \frac{0,02 - 75}{77} + \frac{0,00022 - 0,26}{0,28} + 0,75 - 0,25 \right) / 3 \approx -0,47.$$

Згідно з отриманим результатом навіть без урахування вартості обладнання шляхів доступу і побудови екранування різниця узагальнених функцій бажаності  $\Delta W$  менше 0 (вона може змінюватися в інтервалі -1...+1), тому при даних умовах реалізація заходу № 4 недоцільна.

Застосовуючи викладений вище метод оцінки, аналогічно був проведений аналіз доцільності/недоцільності реалізації заходів № 14, 14а та Б/Н, виконаний у процесі підготовки проекту стабілізації будівельних конструкцій об'єкта "Укриття" в рамках плану здійснення заходів. Дані висновки підтверджені позитивним висновком міжнародної експертної комісії та державної експертної комісії регулюючих органів України. Використовуючи удосконалений метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями з точки зору потенційного погіршення екологічної безпеки було проведено аналіз трьох можливих майданчиків будівництва СВЯП ВВЕР. Об'єкт СВЯП ВВЕР - це сухе сховище з проектною потужністю 20 тис. т ВЯП і терміном експлуатації не менше 50 років. Зберігання тепловиділяючих збірок реакторів типу ВВЕР-1000 і ВВЕР-440 здійснюється в бетонних модулях із товщиною стінок 1 м. Площа промислового майданчика сховища не перевищує 0,21 км<sup>2</sup>. Висота вентиляційної труби на будівлі сховища 40 м. Аналіз проводився для таких економічно прийнятних варіантів розміщення об'єкта: майданчик на території, що прилегла до блока № 1 Хмельницької АЕС (Хмельницька обл., м. Нетішин) (далі - майданчик "ХАЕС"); майданчик на території зони відчуження, що прилегла до СВЯП-2 (ДСП "Чорнобильська АЕС") (далі - майданчик "ЧАЕС"); майданчик на території зони відчуження, що прилегла до НПК "Вектор" (Центр по переробці та захороненню РАВ) (далі - майданчик "ЦПЗ"). За ступенем радіаційної небезпеки об'єкт СВЯП ВВЕР відноситься до підприємств I категорії. У зв'язку з цим при аналізі впливу об'єкта на компоненти навколишнього середовища в районах його можливого розміщення попередньо було прийнято максимальне значення радіуса зони спостереження (ЗС) об'єкта - 30 км. Таким чином, вибір кращого майданчика здійснювався на підставі порівняння поточних параметрів навколишнього середовища в радіусі 30 км від майданчика та розрахункових впливів на нього при будівництві та експлуатації об'єкта СВЯП ВВЕР. При цьому система показників вибору майданчиків складалася з трьох основних груп, що включають в себе відповідні первинні показники (табл. 1).

Для проведення розрахунків були визначені діапазони кількісних і якісних параметрів установлених показників, а також їхня відносна значимість (вага показника) при виборі кращого майданчика. У результаті подальших розрахунків отримано підсумкові значення функцій бажаності для кожного з порівнюваних майданчиків (табл. 2).



**Система показників вибору майданчиків для будівництва СВЯП ВВЕР**

Групи показників	Показники порівняння майданчиків
Вплив будівництва та експлуатації СВЯП ВВЕР на навколишнє середовище	1. Колективна ефективна доза (КЕД) опромінення персоналу та населення при будівництві, нормальній експлуатації і можливих аваріях 2. Характер впливу на соціальне середовище 3. Необхідність відводу земель під промисловий майданчик і комунікації
Групи показників	Показники порівняння майданчиків
Вплив навколишнього середовища на будівництво і експлуатацію СВЯП ВВЕР	1. Величина розрахункової КЕД опромінення персоналу при будівництві та експлуатації 2. Спрямованість і характер громадської думки 3. Імовірність підтоплення і затоплення майданчика 4. Радіаційний, хімічний та пожежонебезпечний вплив найближчих промислових і транспортних об'єктів
Інші фактори, що впливають на вибір кращого майданчика для СВЯП ВВЕР	1. Умови міграції радіонуклідів у ЗС проектного об'єкта: рельєф місцевості і наявність природних геохімічних бар'єрів міграції радіонуклідів; віддаленість і параметри проточних водойм; тип водного режиму місцевості і рівень залягання ґрунтових вод 2. Кількість і статус об'єктів природно-заповідного фонду, а також кількість рідкісних видів рослин і тварин, що охороняються на території зони спостереження проектного об'єкта 3. Відповідність проектною діяльності довгостроковим планам регіонального розвитку

Таблиця 2

**Підсумкові значення функцій корисності порівнюваних майданчиків**

Показник	Вага показника	Значення функції бажаності		
		"ХАЕС"	"ЧАЕС"	"ЦПЗ"
x <sub>1</sub> - чисельність населення в районі майданчика	0,75	0	0,96	1,00
x <sub>2</sub> - доза опромінення персоналу та населення	1,00	0,05	0,95	0,92
x <sub>3</sub> - перевищення щільності радіоактивного забруднення території	0,75	0	1,00	0,93
x <sub>4</sub> - кількість об'єктів природно-заповідного фонду	0,25	0	0,80	0,64
x <sub>5</sub> - кількість рідкісних видів і видів, що охороняються	0,25	0	1,00	1,00
x <sub>6</sub> - об'єкти гідрографічної мережі	0,75	0,20	0,004	0,96
x <sub>7</sub> - кількість небезпечних об'єктів в 5 км зоні об'єкта	0,25	1,00	0	0,75
x <sub>8</sub> - наявність природних факторів, що впливають на безпеку експлуатації об'єкта	0,25	0,20	0	1,00
x <sub>9</sub> - необхідність відведення землі	0,25	0	1,00	1,00
x <sub>10</sub> - необхідність створення під'їзних шляхів	0,25	1,00	0	0
x <sub>11</sub> - спрямованість громадської думки	1,00	0	1,00	1,00
Сумарне значення функції корисності	-	0,13	0,72	0,90

За даними табл. 2 майданчик “ХАЕС”, порівняно з майданчиками “ЦПЗ” і “ЧАЕС”, є неприйнятним для будівництва СВЯП ВВЕР по ряду важливих показників - висока щільність населення ( $x_1$ ), негативна спрямованість громадської думки ( $x_{11}$ ), можливість значного аварійного забруднення призначених для заселення територій і природоохоронних об'єктів ( $x_3$  і  $x_5$ ). Вирішальними показниками екологічної безпеки, що визначили більш високі значення інтегрального показника майданчика “ЦПЗ” порівняно з майданчиком “ЧАЕС”, були сприятливе розташування об'єктів гідрографічної мережі ( $x_6$ ), що значно зменшує ризик міграції радіонуклідів із поверхневими водами, і нульова ймовірність підтоплення/затоплення майданчика ( $x_8$ ).

Таким чином, кращим майданчиком для будівництва СВЯП ВВЕР на території України є майданчик “ЦПЗ”, що має найбільше сумарне значення функції бажаності 0,90 порівняно з майданчиком “ЧАЕС” з показником 0,72. Дані висновки підтверджені позитивним висновком державної експертної комісії регулюючих органів України.

Наступною роботою, що була виконана з використанням удосконаленого методу багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями, був порівняльний аналіз двох варіантів “раннього” демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта “Укриття” в рамках плану здійснення заходів. Стратегія перетворення об'єкта “Укриття” передбачає три основні етапи перетворення об'єкта “Укриття” ЧАЕС в екологічно безпечну систему: стабілізація будівельних конструкцій об'єкта “Укриття”, будівництво нового безпечного конфайнмента (НБК) над існуючим об'єктом “Укриття” та вилучення ПВМ. Діяльність із перетворення об'єкта “Укриття” здійснюється відповідно до прийнятого в 1997 р. плану здійснення заходів. Перший етап (стабілізація) успішно завершено. Другий етап складається з двох пускових комплексів - ПК-1 і ПК-2. ПК-1 передбачає власне будівництво НБК. ПК-1 зараз реалізується і повинен бути закінчений найближчим часом. Робоче проектування ПК-2 повинно було розпочатись у 2017 р., але виникла затримка із завершенням етапу ПК-1. Реалізовуватися він буде відразу після завершення ПК-1. Мета цієї роботи полягає в отриманні уточнених вихідних даних та обґрунтувань для прийняття рішення щодо вибору найбільш пріоритетного (з урахуванням усіх факторів, включаючи умови фінансування) варіанта “раннього” демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта “Укриття”, який буде покладено в основу виконання робіт 2-го етапу проектування ПК-2 НБК “Розробка робочого проекту ПК-2 НБК - інфраструктура для демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта “Укриття”. Для вирішення даного завдання представлено результати порівняльного аналізу “доз/витрат/зиску” для двох варіантів “раннього” демонтажу. Результати переоцінки складу нестабільних конструкцій об'єкта “Укриття”, що підлягають “ранньому” демонтажу, виконано в рамках завдання 2 ПК-2. У табл. 3 наведено значення функцій бажаності у зазначений рік двох варіантів реалізації “раннього” демонтажу.

Таблиця 3

## Значення функцій бажаності

Рік	Показники		Рік	Показники	
	$u_1(t)$	$u_2(t)$		$u_1(t)$	$u_2(t)$
2019	0,333		2027		0,668
2020	0,686	0,484	2028		0,668
2021	0,699	0,498	2028		0,668
2022	0,622	0,626	2029		0,668
2023		0,668	2030		0,668
2024		0,668	2031		0,658
2025		0,668	2032		0,430
2026		0,668			

Тоді показники узагальненої ефективності двох варіантів реалізації “раннього” демонтажу та їхня різниця будуть такими:  $U_1 = 0,585$ ,  $U_2 = 0,619$ ,  $U_1 - U_2 = -0,034$ .  $\Delta U = -0,034 < 0$ ; це означає, що варіант 2 (демонтаж з відкладеним поводженням) більш бажаний від варіанта 1 (інтегрований демонтаж/поводження). Якщо врахувати, що варіант 1 порівняно з варіантом 2 більш бажаний за вартістю приблизно у 2 рази і по КЕД опромінення персоналу більше на 8 %, а в кінцевому підсумку варіант 1 виявляється менш привабливим, то очевидно, що ключовим фактором, що впливає на вибір варіанта демонтажу, є величина ризиків реалізації (у частині готовності інфраструктури щодо поводження з РАВ). Імовірності готовності інфраструктури щодо поводження з РАВ для варіанта 2 за всі роки близькі або дорівнюють 1, що свідчить про мінімальний ризик реалізації даного варіанта. Навпаки, ризики реалізації варіанта 1 високі й визначаються низькими ймовірностями готовності таких об’єктів інфраструктури: додаткових установок машинного залу I черги ЧАЕС (з переробки металевих РАВ та тимчасові сховища ВАР і НСА-ДІВ); сховищ типу ТРВ-II комплексу “Вектор” для поховання НСА-КІВ “навалом”.

Для проведення аналізу невизначеностей розглянуто зміну значення ймовірності  $p_1(t)$  для варіанта 1 на 25 % як у бік оптимістичного сценарію, так і в бік песимістичного сценарію. Зазначені величини ймовірностей наведено в табл. 4.

Таблиця 4

#### Варіація значень ймовірностей для варіанта 1

Рік	$p_1(t) - 25 \%$	$p_1(t) + 25 \%$
2020	0,452	0,753
2021	0,506	0,844
2022	0,591	0,985

Показники узагальненої ефективності двох варіантів реалізації “раннього” демонтажу  $p_1(t) + 25 \%$  - оптимістичний сценарій):  $U_1 = 0,628$ ,  $U_2 = 0,619$ ,  $U_1 - U_2 = 0,009$ . Показники узагальненої ефективності двох варіантів реалізації “раннього” демонтажу ( $p_1(t) - 25 \%$  - песимістичний сценарій):  $U_1 = 0,542$ ,  $U_2 = 0,619$ ,  $U_1 - U_2 = -0,077$ . Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що підвищення на 25 % ймовірності готовності низки об’єктів інфраструктури (додаткових установок машинного залу I черги ЧАЕС і сховищ комплексу “Вектор”) призводить до того, що варіант 1 при  $p_1(t) + 25 \%$  стає кращим.

У разі песимістичного сценарію  $p_1(t) - 25 \%$  перевага варіанта 2 зростає (показник узагальненої ефективності збільшується приблизно в 2,3 рази порівняно з аналогічним показником без варіації. Дані висновки підтверджені позитивним висновком міжнародної експертної комісії та державної експертної комісії регулюючих органів України.

За результатами виконаних робіт було складено та затверджено два акти впровадження вдосконаленого методу багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об’єктів із радіаційно-ядерними технологіями при проектуванні, будівництві та експлуатації таких об’єктів.

#### ВИСНОВКИ

У дисертації представлено результати вирішення актуальної наукової проблеми, пов’язаної з вибором оптимального варіанта виконання чи невиконання робіт на об’єктах із радіаційно-ядерними технологіями. Відповідно до отриманих результатів дисертаційної роботи можна зробити такі висновки:

1. З проведеного огляду літературних джерел можна стверджувати, що існують різні методи аналізу екологічної безпеки техногенно небезпечних об’єктів, але вони мають багато недоліків. При оцінці показників екологічної безпеки об’єктів із радіаційно-ядерними технологіями встановлено, що аналіз альтернативних варіантів та знаходження оптимального рішення дозволяє уникнути надлишкових фінансових витрат та зменшити

ризик для здоров'я персоналу та населення. Міжнародний досвід і рекомендації МКРЗ свідчать про необхідність проведення оптимізації з використанням методу багатокритеріального аналізу при проектуванні та виконанні робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями. Але використання методу багатокритеріального аналізу потребує побудови чи вибору спеціальних функцій бажаності та визначення вагових коефіцієнтів, а також побудови спеціальної процедури включення якісних оцінок. Для вирішення поставлених наукових завдань і була виконана дана робота.

2. Уперше визначено показники екологічної безпеки прийняття рішень для різних за фізичним змістом показників екологічної 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 можливої невизначеності.

3. З проведеного аналізу можливого виду функцій бажаності, що відповідають вимогам задачі багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями, було вперше знайдено функцію бажаності спеціального виду для всіх кількісних критеріїв, яка є монотонно-спадаючою і відображає кожне значення з області значень визначених показників екологічної безпеки в одне значення з безрозмірної області значень  $[0, 1]$  так, що в області малих значень вартості та дози функція має високі значення і є малочутлива до змін аргументу, в області великих значень вартості та дози функція має низькі значення і є малочутлива до змін аргументу, в інтервалі середніх значень аргументу, що близькі між собою, функція має високу роздільну здатність.

4. У результаті вивчення методів отримання вагових коефіцієнтів визначено найбільш прийнятний для умов задачі багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями метод безпосереднього оцінювання на основі 9-бальної шкали та вказана похибка їхнього визначення.

5. Після виконаного наукового дослідження проблеми застосування багатокритеріального аналізу визначено узагальнений показник ефективності виконання чи невиконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями при можливій зміні екологічного стану довкілля.

6. У результаті виконаних наукових досліджень та отриманих нових знань рекомендований МКРЗ метод багатокритеріального аналізу вдосконалено шляхом його адаптації до специфіки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями в умовах невизначеності при виборі оптимального варіанта виконання чи невиконання робіт на цих об'єктах, який відрізняється від існуючих тим, що об'єднує в собі метод багатокритеріального аналізу та метод експертних оцінок із застосуванням знайдених функцій бажаності спеціального виду та визначених за допомогою 9-бальної шкали вагових коефіцієнтів.

7. Коректність отриманих аналітичних розрахунків за допомогою вдосконаленого методу багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями було підтверджено результатами вибору майданчика для будівництва СВЯП ВВЕР і виконанням стабілізаційних заходів на об'єкті "Укриття" та засвідчено позитивними висновками регулюючих органів України та міжнародної експертної комісії.

За рахунок впровадження вдосконаленого методу багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями при виконанні стабілізаційних заходів на об'єкті "Укриття" при відмові від реалізації заходу № 4 було зекономлено приблизно 12 тис. євро і 4,6 люд.-Зв, а при відмові від реалізації стабілізаційних заходів № 14, 14а та Б/Н на ліквідацію можливих наслідків аварії на об'єкті "Укриття" необхідно було витратити не менше 250 тис. євро і 200 люд.-Зв.

Виконуючи дослідження показників екологічної безпеки об'єктів, розташованих на території 30-км зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення та на Чор-

нобильській АЕС разом із об'єктом "Укриття", і планів переведення їх у більш безпечний стан у подальших роботах, розглянуто можливість застосування вдосконаленого методу багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями. За результатами аналізу можна зробити висновок, що даний метод при деякій адаптації можна застосовувати не тільки до об'єктів, розташованих на території 30-км зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення, а й до інших об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями на території України та за її межами.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Деренговский В. В. Анализ безопасности реализации проекта стабилизации опорных узлов блоков балок Б1 и Б2 / Деренговский В. В., Алешин, Батий В. Г., Глухенький В. Н., Закревский Ю. А., Козориз В. И., Ключников А. А., Кочнев Н. А., Кузьменко В. А., Лебединский Л. Л., Павловский Л. И., Рубежанский Ю. И., Сидоренко Н. В., Рудько В. М., Сизов А. А., Стоянов А. И, Щербин В. Н. // Проблемы Чернобиля. – 2000. - Вип. 6. - С. 25 - 35. *(Здобувач розробив методичний підхід та виконав оптимізацію дозових лімітів та екранування.)*
2. Деренговский В. В. Погрешность расчета коллективной эффективной дозы внешнего облучения при проведении работ на объекте "Укрытие" / Деренговский В. В., Батий В. Г., Кочнев Н. А., Кузьменко В. А., Павловский Л. И., Рудько В. М., Сизов А. А. // Наукові та технічні аспекти міжнародного співробітництва в Чорнобилі. - Вип. 3. – Київ: Вища шк., 2001. - С. 619 – 624. *(Здобувач розробив методичний підхід по оцінці визначення похибки колективної ефективної дози при недостатності вхідних даних.)*
3. Деренговский В. В. Анализ радиационной безопасности при проведении стабилизационных мероприятий на объекте "Укрытие" / Деренговский В. В., Алешин А. М., Батий В. Г., Егоров В. В., Кочнев Н. А., Кузьменко В. А., Павловский Л. И., Рубежанский Ю. И., Рудько В. М., Сизов А. А., Стоянов А. И. // Проблемы Чернобиля. – 2001. - Вип. 7. - С. 65 – 71. *(Здобувач розробив методичний підхід та виконав оптимізацію додаткових заходів, що дає змогу знизити колективну ефективну дозу.)*
4. Деренговский В. В. План управления ALARA / Деренговский В. В., Батий В. Г., Егоров В. В. Кузьменко В. А., Михайлюк В. П., Павловский Л. И., Рубежанский Ю. И., Рудько В. М., Сизов А. А. // Проблемы Чернобиля. – 2003. - Вип. 12. - С. 121 – 126. *(Здобувач розробив алгоритм дій при управлінні ALARA при проведенні стабілізаційних заходів на об'єкті "Укриття".)*
5. Деренговский В. В. Методика выбора площадки радиационных объектов / Деренговский В. В., Батий В. Г. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2004. - Вип. 1. - С. 43 – 50. *(Здобувач розробив методичний підхід на базі багатокритеріального методу по вибору оптимального майданчика розміщення об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями.)*
6. Деренговский В. В. Оптимизация противорадиационной защиты и вероятностный анализ безопасности при осуществлении деятельности по преобразованию объекта "Укрытие" / Деренговский В. В., Батий В. Г., Рудько В. М., Закревский Ю. А., Алешин А. М., Кузьменко В. А., Павловский Л. И., Михайлюк В. П., Рубежанский Ю. И., Федорченко Д. В., Правдивый А. А., Егоров В. В, Сизов А. А., Стоянов А. И., Глебкин С. И., Кордюков П. Л. // Проблемы Чернобиля. – 2004. - Вип. 14. - С. 65 – 72. *(Здобувач удосконалив метод проведення аналізу "доз/витрат/зиску" в умовах недостатності вхідних даних.)*
7. Деренговский В. В. Проведение анализа доз/затрат/выгод по стабилизационным мероприятиям 14, 14а, 4 и Б/Н / Деренговский В. В., Батий В. Г., Михайлюк В. П., Рубежанский Ю. И., Рудько В. М., Щербин В. Н. // Проблемы Чернобиля. – 2003. - Вип. 13.- С. 108 – 115. *(Здобувач розробив методичний підхід на базі багатокритеріального методу*

для проведення аналізу “доз/витрат/зиску” та виконав розрахунки по стабілізаційних заходах 14, 14а, 4 та Б/Н.)

8. Деренговский В. В. Выбор площадки для строительства централизованного хранилища отработавшего ядерного топлива / Деренговский В. В., Батий В. Г., Городецкий Д. В., Кузьменко В. А., Рубежанский Ю. И., Рудько В. М., Сизов А. А., Щербин В. Н., Байбузенко Т. Ю., Шевченко Н. Е., Шендерович В. Я. // Проблемы Чернобиля. – 2003. - Вип. 13. - С. 24 – 32. (Здобувач розробив методичний підхід на базі багатокритеріального методу по вибору оптимального майданчика розміщення об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями та виконав розрахунки для трьох можливих варіантів.)

9. Деренговский В. В. Методика выбора оптимальных решений при производстве работ в радиационно-опасных условиях / Деренговский В. В., Батий В. Г., Малахов Ю. В. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2006. - Вип. 6. - С. 77 – 81. (Здобувач розробив методичний підхід на базі багатокритеріального методу по вибору оптимального варіанта виконання робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями.)

10. Деренговский В. В. Применение метода экспертных оценок при проектировании и организации радиационно-опасных работ по преобразованию объекта "Укрытие" // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2007. - Вип. 7. - С. 90 - 96.

11. Деренговский В. В. Методика проведения сравнительного анализа “доз-затрат-выгод” для двух вариантов “раннего” демонтажа нестабильных конструкций объекта "Укрытие" / Деренговский В. В., Рудько В. М., Говоров В. А. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2015. - Вип. 24. - С. 110 – 117. (Здобувач розробив методичний підхід для проведення аналізу “доз/витрат/зиску” для двох варіантів “раннього” демонтажу нестабильных конструкций об'єкта "Укриття".)

12. Деренговский В. В. Результат порівняльного аналізу “доз-витрат-вигоди” для двох варіантів “раннього” демонтажу нестабильных конструкций об'єкта "Укриття" / Деренговский В. В., Рудько В. М., Говоров В. О. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2015. - Вип. 25. - С. 94 – 99. (Здобувач виконав розрахунки за допомогою удосконаленого методу “доз/витрат/зиску” для двох варіантів “раннього” демонтажу нестабильных конструкций об'єкта "Укриття".)

13. Деренговський В. В. Проблема визначення доцільності дезактивації радіоактивно забруднених об'єктів на території зони відчуження та шляхи її вирішення / Деренговський В. В., Городецький Д. В., Павловський Л. І. // Проблемы Чернобильської зони відчуження: наук.-техн. зб. - 2017. - Вип. 17. - С. 66 – 73. (Здобувач проаналізував можливість застосування методу “доз/витрат/зиску” при прийнятті рішення про доцільність виконання дезактивації радіоактивно забруднених об'єктів на території зони відчуження.)

14. Деренговський В. В. Проблема визначення доцільності дезактивації радіоактивно забруднених об'єктів при перетворенні об'єкта "Укриття" на екологічно безпечну систему та шляхи її вирішення / Деренговський В. В., Городецький Д. В., Павловський Л. І. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2017. - Вип. 28. - С. 34 – 41. (Здобувач проаналізував можливість застосування методу “доз/витрат/зиску” при прийнятті рішення про доцільність виконання дезактивації радіоактивно забруднених об'єктів при перетворенні об'єкта "Укриття" на екологічно безпечну систему.)

15. Деренговський В. В. Пропозиції щодо удосконалення нормативно-правових документів для забезпечення радіаційної безпеки під час перетворення об'єкта "Укриття" / Деренговський В. В., Городецький Д. В., Павловський Л. І. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2017. - Вип. 29. - С. 91 – 96. (Здобувач проаналізував мож-

лівість застосування методу “доз/витрат/зиску” при виборі оптимального варіанта проєктних і технічних рішень під час перетворення об’єкта “Укриття”).

16. Деренговський В. В. Стан проблеми щодо проведення багатокритеріального аналізу безпеки об’єктів із радіаційно-ядерними технологіями / Деренговський В. В., Носовський А. В. // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2018. - Вип. 30. - С. 31 – 39. (Здобувач виконав дослідження сучасного стану щодо проблеми проведення багатокритеріального аналізу безпеки об’єктів із радіаційно-ядерними технологіями.)

17. Деренговський В. В. Удосконалений метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об’єктів із радіаційно-ядерними технологіями / Деренговський В. В., Носовський А. В. // Ядерна фізика та енергетика. – 2018. - Т. 19, № 2. - С. 166 – 172. (Здобувач виконав дослідження сучасного стану щодо проблеми проведення багатокритеріального аналізу безпеки об’єктів із радіаційно-ядерними технологіями.)

18. Derengovskiy V. V. Calculation of Inhalation Dose Received Due to Work Implementation at “Shelter” / Derengovskiy V. V., Batiy V. G., Kouzmenko V. A., Rudko V. M., Sizov A. A. // Abstracts of The 8 International Conference on Environmental Management, Sept. 30 — Oct. 4, 2001, Bruges, Belgium, ICEM’01, Abs. 111. (Здобувач розробив методичний підхід до розрахунку дози внутрішнього опромінення від інгаляційного надходження радіонуклідів.)

19. Деренговский В. В. Использование метода многокритериального анализа при выборе оптимальных проектных решений при проведении деятельности по преобразованию объекта “Укрытие” / Деренговский В. В., Батий В. Г., Михайлюк В. П. // Тез. докл. VI Конф. Международного чернобыльского центра “Международное сотрудничество - Чернобылю”. м. Славутич, 9 - 12 вересня 2003 р., 120 с. (Здобувач розробив методичний підхід на базі багатокритеріального методу по вибору оптимального майданчика розміщення радіаційно небезпечних об’єктів.)

20. Деренговский В. В. Многокритериальная система поддержки принятия решений выбора новых типов реакторов и площадок их размещения / Деренговский В. В., Батий В. Г. // International Conference “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (NPAE-Kyiv 2006), May 29 - June 03, 2006, Kyiv, Ukraine, p. 723 – 731. (Здобувач розробив методичний підхід на базі багатокритеріального методу по вибору оптимального варіанта нових типів реакторів та вибору майданчика їхнього розміщення.)

## АНОТАЦІЯ

Деренговський В. В. Удосконалений метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об’єктів із радіаційно-ядерними технологіями. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 “Екологічна безпека” (101 – Екологія). - Робота виконана в Інституті проблем безпеки (ІПБ) АЕС НАН України. Захист відбудеться у спеціалізованій ученій раді ІПБ АЕС НАН України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню проблеми багатокритеріального аналізу екологічної безпеки та економічної ефективності виконання робіт на об’єктах із радіаційно-ядерними технологіями шляхом оптимізації обсягу робіт і витрат. Запропонований метод проведення багатокритеріального аналізу екологічної безпеки під час виконання робіт на об’єктах із радіаційно-ядерними технологіями дає змогу зменшити негативний вплив радіаційних факторів на довкілля шляхом вибору оптимального варіанта виконання чи невиконання робіт. Для цього були визначені та обґрунтовані кількісні та якісні показники екологічної безпеки об’єктів із радіаційно-ядерними технологіями та отримано спеціаль-

ний вид функцій бажаності, досліджено процес отримання числових значень вагових коефіцієнтів і обчислено узагальнений показник ефективності прийнятого рішення. Крім того, для використання якісних оцінок вхідних даних було вдосконалено метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки із застосуванням системи експертних оцінок при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями.

Коректність отриманих аналітичних розрахунків за допомогою вдосконаленого методу багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями було підтверджено результатами вибору майданчика для будівництва СВЯП ВВЕР і виконанням стабілізаційних заходів на об'єкті "Укриття" та засвідчено позитивними висновками регулюючих органів України та Міжнародної експертної комісії.

За рахунок впровадження вдосконаленого методу багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями при виконанні стабілізаційних заходів на об'єкті "Укриття" при відмові від реалізації заходу № 4 було зекономлено приблизно 12 тис. євро і 4,6 люд.-Зв, а при відмові від реалізації стабілізаційних заходів № 14, 14а та Б/Н на ліквідацію можливих наслідків аварії на об'єкті "Укриття" необхідно було б витратити не менше 250 тис. євро і 200 люд.-Зв.

*Ключові слова:* екологічна безпека, багатокритеріальний аналіз, радіаційний захист, довкілля, оптимальний варіант, радіаційна небезпека.

### АННОТАЦІЯ

*Деренговский В. В.* Усовершенствованный метод многокритериального анализа экологической безопасности объектов с радиационно-ядерными технологиями. - Квалификационная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 21.06.01 "Экологическая безопасность" (101 - Экология). – Работа выполнена в Институте проблем безопасности (ИПБ) АЭС НАН Украины. Защита состоится в специализированном ученом совете ИПБ АЭС НАН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена решению проблемы многокритериального анализа экологической безопасности и экономической эффективности выполнения работ на объектах с радиационно-ядерными технологиями путем оптимизации объема работ и затрат. Предложенный метод проведения многокритериального анализа экологической безопасности при выполнении работ на объектах с радиационно-ядерными технологиями дает возможность уменьшить негативное влияние радиационных факторов на окружающую среду путем выбора оптимального варианта выполнения работ. Для этого были определены и обоснованы количественные и качественные показатели экологической безопасности объектов с радиационно-ядерными технологиями и определен специальный вид функций желательности, исследован процесс получения числовых значений весовых коэффициентов и вычислен обобщенный показатель эффективности принятого решения. Кроме того, для использования качественных оценок входных данных был усовершенствован метод многокритериального анализа экологической безопасности с применением системы экспертных оценок при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов с радиационно-ядерными технологиями.

Корректность аналитических расчетов с помощью усовершенствованного метода многокритериального анализа подтверждена результатами выбора площадки для строительства ХОЯТ ВВЭР и выполнением стабилизационных мероприятий на объекте "Укрытие", а также засвидетельствовано положительными выводами регулирующих органов Украины и Международной экспертной комиссии.

За счет внедрения усовершенствованного метода многокритериального анализа экологической безопасности объектов с радиационно-ядерными технологиями при выпол-



нении стабилизационных мероприятий на объекте "Укрытие" при отказе от реализации мероприятия № 4 было сэкономлено около 12 тыс. евро и 4,6 чел.-Зв, а при отказе от реализации стабилизационных мер № 14, 14а и Б/Н на ликвидацию возможных последствий аварии на объекте "Укрытие" необходимо было бы потратить не менее 250 тыс. евро и 200 чел.-Зв.

*Ключевые слова:* экологическая безопасность, многокритериальный анализ, радиационная защита, окружающая среда, оптимальной вариант, радиационная опасность.

### ABSTRACT

*Derengovskiy V. V.* The improved method of multicriteria analysis of environmental safety of objects with radiation and nuclear technologies. - Qualification work on the rights of the manuscript.

PhD Thesis in Technical Sciences: Specialty 21.06.01 "Ecological safety" (101 - Ecology). - The work was performed at the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine. Defense will be held in the specialized academic council of the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 2019.

The dissertation is devoted to solving the problem of multicriteria analysis of ecological safety and economic efficiency of objects with radiation and nuclear technologies by optimizing the volume of work and expenses. The proposed method of conducting multicriteria analysis of ecological safety during the operation of objects with radiation and nuclear technologies enables to reduce the negative impact of radiation factors on the environment by choosing the optimal variant of the work.

The thesis analyzes the norms, rules, principles and criteria used in the assessment of the environmental status of objects with radiation and nuclear technologies, analysis of costs and benefits, procedures for solving multipurpose tasks and making decisions with not clear input data. Considering the principle of the necessity and adequacy of decision criteria using the method of multicriteria analysis, the conclusion is made on the need to use at least three criteria. If the decision criteria are less than three, you can use, for example, the method of expense and profit or other less complicated methods. Concerning the sufficiency of the number of criteria, the conclusion is made that in order to decide on the optimal option for performing or not performing of planned works on objects with radiation and nuclear technologies in most cases, there are quite enough seven criteria that cover all aspects of the influence of radioactive components on the environment. But these seven criteria can be complex and include subcriteria if necessary. At the next stage of work, the definition of criteria for carrying out the analysis of ecological safety for the options of performance or non-performance of works on objects with radiation and nuclear technologies with the help of seven criteria of ecological safety is made:  $C$  - cost of execution of works (including expenses for radiation protection and management of radioactive waste);  $D$  - collective effective dose (CED) when implementing activities;  $R_p$  - collective radiological risk of the personnel (without taking into account the CED during the implementation of the course);  $R_N$  - collective radiological risk of the population;  $F$  - financial risk;  $T$  - time of project implementation;  $Q$  - the magnitude of the risk of deterioration of the conditions for conducting regulatory work, the removal of fuel-containing materials (FCM), etc. All of these criteria, depending on the degree of development of the design decisions, the completeness and reliability of the input data can be calculated with the indication of the relative error. In the absence of the completeness and/or reliability of the input data, as well as the insufficient detail of the design of the design decisions, expert assessment methods are used to assess the required data, and the relevant indicators will be estimated by indicating the relative error or distribution law. In addition, in the

general case, all indicators can be both quantitative and qualitative. Most often, qualitative indicators are evaluated using the expert estimation method.

The essence of the method of multicriteria analysis of the function of the desirability of a special form consists in the introduction of an integral criterion, which combines all other criteria. For this purpose, for each criterion, a function of the desirability  $u_j(x)$  is constructed, which represents the region of change of each criterion  $x$  in the range of points, which varies from 0 to 1. A generalized measure of  $W_i$  i's performance (or non-performance) performance is defined as the sum of the corresponding desirability functions

$$W_i = \sum_{j=1}^n k_j \cdot u_j(x_{ji}) \text{ with weighted coefficients } k_j, \text{ which are chosen so that } \sum_{j=1}^n k_j = 1$$

The type of desirable functions  $u_j(x)$  and values of weight coefficients  $k_j$  in general, can be determined in any way. After studying the experience of using the method of multicriterial analysis of the desirability function and investigating possible types of desirability functions for all quantitative indicators, the following types of functions of desirability are proposed:

1. for criteria that have a boundary above, monotonously decrease and which are indifferent to risk, simple linear functions of the form (the general type of such functions was described in the works of American scientists Ralph L. Keeney and Howard Raiffa)

$$u_i(X) = 1 - \frac{X}{X_{\max}},$$

where  $i = 1, \dots, 7$ ;  $X$  is a indicator value;  $X_{\max}$  is the maximum value of the indicator;

2. for most cases desirable functions has the following form:

$$u_i(X) = \text{EXP}(-0.7 \cdot (X / A)^4),$$

where  $i = 1, \dots, 7$ ;  $X$  is an indicator value;  $A$  is a constant, which is defined as the average value of the  $i$ -th indicator of all considered options;

3. then the desirability function  $u_i$  for qualitative indicators of environmental safety can be defined as follows:  $u_i(9) = 0$ ;  $u_i(8) = 0,125$ ;  $u_i(7) = 0,25$ ;  $u_i(6) = 0,375$ ;  $u_i(5) = 0,5$ ;  $u_i(4) = 0,625$ ;  $u_i(3) = 0,75$ ;  $u_i(2) = 0,875$ ;  $u_i(1) = 1$ .

The correctness of analytical calculations with the help of the improved method of multicriteria analysis was proven during the choice of the site for the construction of the WWERSSF, with the implementation of stabilization measures at the Shelter object and the implementation of a comparative analysis for two variants of the "early" dismantling of unstable structures of the Shelter Object. According to the results of the performed work, two acts of introduction of the advanced method of multicriteria analysis of ecological safety with the use of the system of expert assessments in the design, construction and operation of objects with radiation-nuclear technologies were compiled and approved.

Due to the implementation of an improved method of multicriteria analysis of environmental safety of objects with radiation-nuclear technologies during the implementation of stabilization measures at the "Shelter" object, at the refusal of the implementation of measure No. 4, it was saved approximately 12 thousand euros and 4.6 people-Sv., and in case of refusal to implement stabilization measures No. 14, 14a and W/N to eliminate the possible consequences of the accident at the "Shelter" object, it would have been necessary to spend at least 250 thousand euros and 200 people-Sv.

*Keywords:* environmental safety, multicriteria analysis, radiation protection, environment, optimal variation, radiation hazard.

Підп. до друку 29.01.2019. Формат паперу 60×90/16. Папір офс.  
Друк на різнографі. Ум.-друк. арк. 1.5. Тираж 100 пр. Зам. № 10

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України  
07270, Київська обл., м. Чорнобиль, вул. Кірова, 36а  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2114 від 25.02.2005 р.

---