

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

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

## **СТАН ПРОБЛЕМИ ЩОДО ПРОВЕДЕННЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ ІЗ РАДІАЦІЙНО-ЯДЕРНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ**

Розглянуто нормативні, експлуатаційні та регламентні документи, міжнародні рекомендації з проведення аналізу безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями. Проведено аналіз можливих методів аналізу безпеки таких об'єктів та проектування робіт на них. Виконано дослідження сучасного стану щодо проблеми проведення багатокритеріального аналізу безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями.

*Ключові слова:* радіаційна безпека, об'єкти з радіаційно-ядерними технологіями, принцип ALARA, багатокритеріальний аналіз.

### **Вступ**

Згідно з чинним Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» (ст. 9) кожний громадянин України має право на безпечне для його життя та здоров'я навколишнє природне середовище. Це право гарантується заходами, спрямованими на захист навколишнього природного середовища, запобігання та ліквідацію наслідків аварій техногенного характеру, стихійних лих, а також проведення аналізу безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями. З огляду на це, одним із пріоритетів діяльності в природоохоронній сфері Уряду України залишається реалізація заходів, які сприяли б підвищенню рівня радіаційної безпеки таких об'єктів шляхом вибору оптимального варіанта виконання робіт.

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

### **Аналіз норм, правил, принципів і критеріїв, які застосовуються при створенні протирадіаційного захисту**

Усі види робіт на об'єктах із радіаційно-ядерними технологіями здійснюються відповідно до законів України та інших законодавчих актів, що регулюють відносини в галузі використання ядерної енергії та поводження з РАВ.

Повнота використання діючих в Україні норм і правил ядерної та радіаційної безпеки стосовно до таких об'єктів встановлюється Міністерством екології та природних ресурсів України; Міністерством охорони здоров'я України; Міністерством внутрішніх справ України.

При аналізі безпеки при виконанні робіт на об'єктах в умовах іонізуючого випромінювання повинні бути враховані вимоги таких документів: законів України; нормативних, концептуальних та програмних документів України; основних документів експлуатуючих організацій.

Рекомендації МКРЗ і МАГАТЕ використовуються в тих їх частинах, які не суперечать вимогам перелічених вище документів і спрямовані на зменшення радіаційного впливу на персонал, населення та навколишнє природне середовище. Основні принципи забезпечення безпеки в умовах радіаційного впливу на персонал, населення та навколишнє середовище сформульовані в документах [1 - 3] та ін.

Радіаційна безпека та протирадіаційний захист щодо практичної діяльності будується з використанням основних принципів [3]:

будь-яка практична діяльність, що супроводжується опроміненням людей, не повинна здійснюватися, якщо вона не приносить більшої користі опроміненним особам або суспільству в цілому в порівнянні зі шкодою, яку вона завдає (принцип виправданості);

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

рівні опромінення від усіх значимих видів практичної діяльності не повинні перевищувати встановлених меж доз (принцип неперевищення);

рівні індивідуальних доз та/або кількість осіб, які опромінюються по відношенню до кожного джерела випромінювання, повинні бути настільки низькими, наскільки це може бути досягнуто з урахуванням економічних і соціальних факторів (принцип оптимізації).

Принципи протирадіаційного захисту:

здійснення протирадіаційного захисту персоналу, населення та природного середовища згідно з вимогами законів, норм і правил, прийнятих в Україні;

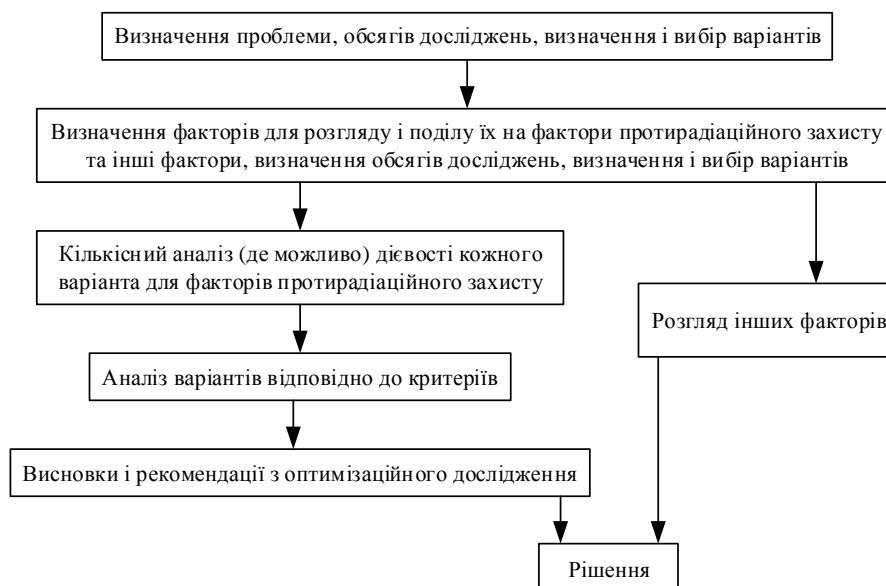
здійснення протирадіаційного захисту персоналу відповідно до принципу ALARA;

оцінка радіаційних наслідків для персоналу, що враховує опромінення, обумовлене як діяльністю при реалізації основної задачі, так і знаходженням у зоні відчуження;

оцінка радіаційних наслідків потенційних аварій для персоналу, населення та навколишнього природного середовища.

На стадії реалізації проектів повинні проводитися заходи щодо подальшої оптимізації процесу проведення робіт на основі принципу ALARA. Так, поточний аналіз динаміки зміни колективної дози допоможе в плануванні, забезпечивши раннє виявлення збільшення дози в порівнянні з розрахунковими значеннями. Це дає змогу прийняти коригуючі заходи і зменшити дозу опромінення персоналу. Використання спеціальних тренажерів призведе до зменшення часу проведення робіт, зниження індивідуальних і колективної доз, а також зниження кошторисної вартості робіт за рахунок оптимізації технологічних операцій і підвищення рівня підготовки персоналу. При реалізації проектів повинно максимально використовуватися існуюче обладнання та інфраструктура, враховуватися досвід проведення подібних робіт, здійснюватися координація з іншими роботами на об'єктах в умовах іонізуючого випромінювання.

Згідно з рекомендаціями [4] у практиці радіаційної безпеки, протирадіаційного захисту людини і навколишнього середовища обґрунтування доцільності застосування того чи іншого заходу базується на процедурі порівняння зиску від реалізації заходу з відповідними витратами, пов'язаними з його реалізацією. При цьому під витратами розуміється загальна міра всіх негативних факторів, що виникають або можуть виникнути під час або внаслідок реалізації заходу. Це може бути шкода здоров'ю, економічні збитки, психологічні, політичні та інші наслідки. Для порівняння витрат і зиску вони повинні бути кількісно виражені в тих самих величинах. Вартість кожного заходу визначається проектом. Визначення грошового еквівалента як зиску, так і витрат від реалізації цього заходу пов'язано з деякими труднощами. Тому в процесі прийняття рішень важливо правильно зіставити всі витрати і зиск від реалізації даного заходу. Захід буде виправданим, якщо зиск від його реалізації буде більшим, ніж загальні витрати, пов'язані з його реалізацією, і оптимальним, якщо чистий зиск від його реалізації - різниця загального зиску і загальних витрат - буде максимальною. Усі основні методи оцінки виправданості та проведення оптимізації проектних рішень у ситуаціях втручання базуються на структурному підході. Загальна схема даного підходу, його основні елементи та послідовність показані на рисунку.



Структура дій при проведенні процедури оптимізації проектних рішень.

Ця схема спрощена й не відображає всіх можливих ситуацій, що можуть виникнути при проведенні досліджень. Наприклад, дана схема не включає зворотний зв'язок між етапами або можливість перегляду деяких проміжних результатів під час аналізу. На першому етапі дуже важливим є вибір варіантів реалізації проєктів, який складається з трьох операцій: перелік усіх можливих варіантів; проведення попереднього аналізу для відсікання тих варіантів, які очевидно неможливі; відбір варіантів, які безпосередньо братимуть участь у процедурі оптимізації.

Після визначення проблеми, обсягів робіт і можливих варіантів дій дуже важливим етапом є визначення факторів (критеріїв) дослідження. Невключення факторів, які можуть впливати на ефективність заходу, або неправильна оцінка їхньої ролі може призвести до помилкового кінцевого результату. При оптимізації можуть бути враховані не тільки ті фактори, що належать (прямо чи опосередковано) до факторів протирадіаційного захисту (фактори протирадіаційного захисту), але і фактори поза його сферою. Фактори протирадіаційного захисту - це дози, витрати, ризики потенційних аварій тощо, які можна розділити на дві категорії. До першої категорії відносяться фактори, які завжди необхідно включати в аналітичну процедуру оптимізації. Це вартість заходу і величина колективної дози. До другої категорії належать такі чинники, що не завжди включаються в аналіз, але вони можуть бути включені особою, яка приймає рішення, для деталізації аналізу з метою отримання більш точних результатів. Це розподіл індивідуальної дози, імовірність подій, надійність конструктивного рішення тощо. Коли всі фактори, які необхідно розглянути, визначені, може трапитися так, що деякі з них неможливо виразити кількісно для включення в аналітичну процедуру. У такому випадку особа, яка приймає рішення, має оцінити ці фактори якісно, а результат цієї оцінки далі бере участь у подальшому аналізі. Щоб полегшити завдання знаходження оптимального варіанта, можна скористатися теорією експертних систем, методами багатокритеріального аналізу і теорією нечітких моделей. Оскільки ефективність варіанта в даному випадку не може бути повністю охарактеризована за допомогою одного фактора, тому завдання вибору є багатокритеріальним. Для вирішення такого роду завдань Міжнародна комісія з радіаційного захисту (МКРЗ) розробила ряд рекомендацій, представлених нижче. Найважливішим компонентом підходу МКРЗ до оптимізації є кількісне визначення результатів оптимізаційних досліджень у тих випадках, коли це можливо. У випущених раніше публікаціях [4, 5] рекомендованим методом був аналіз витрат і зиску. У [6] метод аналізу витрат і зиску наводиться як приклад, проте в цьому ж документі розроблені та рекомендовані для використання й інші методи. Практичні керівні матеріали щодо застосування цих методів викладені в [7, 8].

Результат застосування будь-якого кількісного методу сприяння прийняттю рішень називають аналітичним рішенням. Однак при формуванні рекомендацій стосовно до оптимуму його необхідно поєднувати з якісною оцінкою виконання роботи щодо інших чинників радіологічного захисту. Результат цього поєднання вводиться потім в остаточний процес прийняття рішень. Із різних наявних методів у [6] описано чотири: аналіз ефективності витрат, аналіз витрат і зиску, багатфакторний аналіз корисності і багатокритеріальний аналіз корисності. Найважливішою обставиною, яка не завжди визнається, є те, що результат визначається не обраним методом, а завданням факторів радіологічного захисту та критеріїв, які повинні використовуватися при аналізі. Якщо прийнято рішення про те, що актуальними є лише два фактори, наприклад витрати і колективна доза, то такий простий метод, як аналіз витрат і зиску, дасть аналітичне рішення, прямо вказуючи оптимум. Застосування більш складного методу до настільки простої проблеми є зайвим, однак у разі, якщо це буде зроблено, буде отримано таке ж аналітичне рішення і вибір оптимуму. Однак якщо приймається рішення про те, що актуальним є ряд факторів, і особливо, якщо деякі з них важко визначити кількісно, то простий метод може врахувати лише деякі з цих факторів, і аналітичне рішення не вказує оптимуму. Для знаходження оптимуму цей метод слід використовувати в поєднанні з якісною оцінкою варіантів відносно решти факторів. Необхідність такого поєднання кількісних і якісних вкладів у рішення щодо оптимуму не завжди чітко розуміють. Хоча аналіз ефективності витрат і використовується, він дозволяє лише робити вибір варіанта, при якому або мінімізується колективна доза при фіксованих витратах на захист, або мінімізуються витрати на захист при заданій економії колективної дози. Однак жодна з цих процедур аналізу ефективності витрат не відповідає оптимізації захисту, оскільки всі вони не включають фундаментального компромісу між витратами на захист і дозою.

### **Аналіз витрат і зиску в радіаційному захисті**

Наступним більш високим етапом у порівнянні з аналізом ефективності витрат є аналіз витрат і зиску. Це старий метод, і він був першим методом, уведеним МКРЗ у контексті оптимізації. Основ-

на увага в цьому методі приділяється сукупним грошовим заходам витрат і зиску, пов'язаних із варіантами, і при цьому ставиться мета визначення варіанта, що характеризується мінімальними сумарними витратами. Ця мета досягається шляхом аналізу сумарних витрат за допомогою диференціального аналізу. Вони є всього лише різними математичними методами. У ранніх публікаціях МКРЗ було наведено просте формулювання аналізу витрат і зиску. При цьому єдиними факторами, що, як видається, мали безпосереднє відношення до оптимізації, були фінансові витрати по здійсненню захисних заходів і пов'язані з ними рівні колективної дози. У таких умовах простий аналіз витрат і зиску може бути проведений за допомогою перетворення колективної дози в грошову вартість із використанням контрольного значення вартості одиниці колективної дози, зазвичай позначається як величина  $\alpha$ . Потім у ході аналізу проводять підсумовування витрат на захист  $X$  і похідних витрат, пов'язаних зі шкодою для здоров'я, із тим щоб отримати сумарні витрати  $X + Y$ . Критерій, який задається зовнішнім чином, необхідний для отримання цифр і являє собою вартість одиниці колективної дози  $\alpha$ . Сумарні витрати для кожного варіанта являють собою порівняльний показник якості, а аналітичне рішення відповідає варіанту, мінімізуючи сумарні витрати. Однак у цьому аналітичному рішенні враховуються лише два фактори, а саме витрати і колективна доза, і тому при переході від цього аналітичного рішення до рекомендованого оптимального варіанта необхідно враховувати в якісному відношенні будь-які інші фактори.

Розглянутий вище метод витрат і зиску строго обмежується кількісним порівнянням між витратами на захист і колективною дозою. Однак рамки аналізу витрат і результатів у принципі можуть бути розширені. Одне з можливих розширень полягає в обліку розподілу індивідуальних доз. Один із факторів радіологічного захисту, що розглядається в якості актуальних, полягає в тому, чи є індивідуальні дози високими або низькими. Це може бути виражено у вигляді різниці між колективною дозою, утвореною великим числом низьких індивідуальних доз, і тією ж самою колективною дозою, отриманою меншою популяцією, кожен представник якої отримує більш високі дози. Один із методів включення цього судження полягає в зміні значення, приписуваного одиниці колективної дози, за допомогою додавання додаткового члена до витрат у зв'язку зі шкодою для здоров'я. Цей новий компонент витрат у зв'язку зі шкодою для здоров'я був виражений МКРЗ в [4, 6] як член  $\beta$ . Тоді шкода для здоров'я визначається як  $Y = \alpha S + \beta_j S_j$ , де  $\beta_j$  – додаткова вартість, приписувана одиниці колективної дози;  $S_j$  – функція рівня індивідуальної дози у групі відповідних працівників.

Застосовуючи цю формулу, можна оцінити витрати у зв'язку зі шкодою для здоров'я як суму члена  $\alpha$ , колективної дози і членів  $\beta$ , а також з урахуванням розподілу індивідуальних доз. Включення допуску на розподіл індивідуальних доз веде до збільшення витрат у зв'язку зі шкодою для здоров'я  $Y$  і змінює сумарні витрати для кожного варіанта. Однак інші відповідні фактори можуть все ж бути пропущені в кількісному аналізі і їх необхідно включати лише якісним способом.

Аналіз витрат і зиску – це досить універсальний метод, однак можна використовувати також метод іншого роду, що відрізняється не тільки в принципах побудови, але й у тому, яким чином у ньому трактуються відповідні фактори. Цей метод відомий як багатofакторний аналіз корисності. Суть методу полягає у використанні для відповідних факторів оціночної схеми так званої функції корисності, яка відрізняється тим, що якщо оцінка або корисність для двох варіантів виявляється однаковою, то жоден із них не є переважаючим по відношенню до іншого. Варіант розглядається як кращий, якщо його оцінка вища, ніж оцінка іншого варіанта. У [5] на основі простого прикладу дається уявлення про те, яким чином вводиться поняття багатofакторного аналізу корисності і як фактори, що піддаються і не піддаються обчисленню, використовуються спільно з процесами винесення суджень для прийняття рішення. Наприклад, при купівлі автомобіля ми оцінюємо такі фактори, як ціна, витрати на технічне обслуговування та ефективність з точки зору витрат палива. Ці чинники можна врахувати без зусиль, якщо ставиться завдання проведення аналізу витрат і результатів, можливо, із загальним обмеженням, що представляє собою грошову суму, яку ми маємо. Однак при оцінці інших факторів, таких, як бажана швидкість розгону або максимальна швидкість, колір автомобіля або якість звукової системи, застосування аналізу витрат і зиску виявляється нелегким. Тим не менш ми визнаємо всі ці міркування в якості факторів при прийнятті рішення, ми оцінюємо кожен варіант – кожен розглянутий для купівлі автомобіль – відповідно нашому ставленню до певного фактора, і потім досягаємо компромісу між різними факторами з використанням наших особистих критеріїв. У проведених нами «дослідженнях» використовується та сама база даних – характеристики різних автомобілів, проте прийняті рішення можуть відрізнятися через наше індивідуальне ставлення до різних факторів і власних критеріїв при компромісному виборі між різними факторами. Наприклад, одні можуть надавати більшого значення економії палива і швидкості розгону, у той час як інші – кольору автомобіля або якості акустичної системи. Безумовно, остаточне рішення буде залежати від судження особи, яка приймає це рішення.

Повертаючись до застосування багатофакторного аналізу корисності, спочатку необхідно задати фактори радіологічного захисту і кількісно визначити наслідки кожного варіанта захисту з точки зору цих факторів; іншими словами, провести ту саму початкову процедуру, як у випадку аналізу витрат і зиску. Потім для кожного фактора необхідно створити функцію корисності, що визначає відносну бажаність можливих результатів для цього фактора. Найкращому результату або найменшим несприятливим наслідкам для кожного фактора надається корисність, що дорівнює 1, а найгіршим наслідкам - корисність, що дорівнює 0. Основною перевагою цього методу є те, що зазначені функції корисності не обов'язково повинні бути лінійними. Це дає змогу ввести в кількісний процес прийняття рішень зміни ставлення залежно від величини наслідків. Можна також використовувати метод багатофакторного аналізу корисності для включення факторів, які не можна визначити кількісно, за допомогою завдання функцій корисності для різних значень фактора. Наприклад, якщо в деяких випадках потрібно використовувати захисний одяг, то це вплине на легкість виконання завдань. Максимальне значення корисності, що дорівнює 1, очевидним чином приписується варіанту, не пов'язаному з використанням захисного одягу, а мінімальне значення корисності, що дорівнює 0, - варіанту, при якому важко проводити роботи.

Усі розглянуті до теперішнього часу методи - це агрегатні методи в тому значенні, що в них є всі ознаки, що представляють відповідні фактори, які впливають на рішення, об'єднуються в єдиний порівняльний показник якості, будь то сумарні витрати, як це має місце в аналізі витрат і зиску, або функція загальної корисності, як це проводиться в багатофакторному аналізі корисності. Однак для забезпечення такої агрегації необхідно виконання двох умов. По-перше, необхідно, щоб усі фактори були порівнянними з одним із факторів, величина якого остаточно визначена і внесок у наслідки кожного з інших факторів можна однозначно оцінити за допомогою вибраного фактора. По-друге, особа, яка приймає рішення, має погодитися з тим, що погані показники по відношенню до одного фактора можуть бути компенсовані підвищеними показниками по інших факторах і такі компроміси прийнятні для всього діапазону наслідків, що впливають з усіх розглянутих варіантів захисту. При виконанні двох зазначених умов можуть виникнути певні труднощі, якщо розглянуті чинники виявляються різномірними або вони можуть бути оцінені тільки в якісному відношенні. В іншому випадку, коли деякі наслідки варіантів захисту виявляються досить екстремальними, може бути зроблено висновок про те, що компроміс не-прийнятний для всього діапазону наслідків. У цих умовах може виявитися більш корисним метод, в якому діапазон наслідків трактується іншим чином. Такий метод більш детально викладено в [6] в якості прикладу іншого підходу до оптимізації радіологічного захисту.

Останній метод застосовується в теорії управління й використовується, коли монетарне уявлення параметрів (факторів або критеріїв) управління ускладнене або неможливе. Найбільш ефективно використання методу забезпечується в разі, якщо сумарні витрати за різними альтернативами дають приблизно однакові результати [9, 11]. У той же час цей метод є найбільш складним при проведенні аналізу і побудові функцій бажаності.

Оскільки такі критерії, як колективна ефективна доза, колективний радіаційний ризик для персоналу і населення, уявити в грошовому еквіваленті складно, і при існуючій точності визначення значення критеріїв їхні величини можна вважати близькими між собою, то кращим із перерахованих методів є багатокритеріальний аналіз, що застосовується в теорії управління.

### **Аналіз методів вибору оптимального варіанта**

При виборі найкращого варіанта доводиться враховувати багато різних вимог, що висувуються до вирішення, і серед цих вимог зустрічаються такі, що суперечать одна одній. Однак майже всі математичні методи оптимізації призначені для знаходження екстремуму однієї функції - для однієї мети. Тому найчастіше намагаються звести багатоцільову задачу до одноцільової [10]. Ця процедура в більшості випадків призводить до серйозного спотворення суті проблеми і, отже, до невиправданої заміни однієї задачі іншою.

Якщо при вирішенні одноцільових задач методологічних проблем не виникає, а можливі тільки обчислювальні труднощі, то інакша ситуація з багатоцільовими рішеннями. Тут основні нюанси пов'язані з проблемою: що слід вважати найкращою альтернативою в задачі з декількома цільовими функціями, які суперечливі і досягають максимуму в різних точках безлічі альтернатив? Сьогодні не існує єдиної думки, тому оцінка якості системи в разі векторного показника якості є однією з головних проблем у теорії ефективності та дослідження операцій.

Багатовимірні цілі можуть перебувати між собою в таких відносинах: цілі взаємно нейтральні (система може характеризуватися й розглядатися незалежно стосовно до окремих цілей); цілі кооперуються (тут, як правило, систему вдається розглянути щодо однієї цілі, а інші досягаються одночасно); цілі конкурують (у цьому випадку одну з цілей можна досягти лише за рахунок іншої).

Якщо цілі частково нейтральні, частково кооперовані і частково конкурують між собою, то завдання сформулюється таким чином, що потрібно брати до уваги тільки конкуруючі цілі. Розгляд нейтральних або кооперативних цілей не становить труднощів, так що проблеми, орієнтовані на безліч цілей, перш за все, повинні бути розглянуті в частині конкуруючих цілей, оскільки всі вони разом не можуть бути виражені одновимірним параметром.

Можна запропонувати структуру існуючих на сьогоднішній день процедур вирішення такого роду багатоцільових завдань - за методом використання інформації: апріорні, апостеріорні, адаптивні (на основі методів теорії чутливості); за методом прийняття рішення: скалярна (метод головної компоненти, метод поступок, метод комплексного критерію, метод Гермейера, метод справедливого компромісу, метод умовного центра мас, метод на основі функції Харрінгтона, метод ідеальної точки); векторна (виділення парето-оптимальної області, графоаналітичний метод, ЛПт-пошук); за характером використаної інформації: детерміновані, імовірнісні.

У процедурах апріорного типу робиться явне або неявне припущення, що вся інформація, що дає змогу визначити оптимальне рішення, прихована у формальну модель завдання і за допомогою деяких перетворень може бути з цієї формальної моделі вилучена та використана. Вважається, що множин альтернатив  $U$  і цільових функцій  $W_1(u)$ ,  $W_2(u)$ , ... цілком достатньо для об'єктивного визначення оптимального рішення, що залежить від відсутніх у даній моделі факторів. Процедури даного типу засновані на припущенні про можливість апріорного визначення найкращого співвідношення між вимогами, що висуваються різними критеріями. Зрозуміло, що така можливість існує не завжди. Крім того, вибір конкретного виду глобальної функції мети не може бути здійснений у відриві від розв'язуваної задачі.

В основі апостеріорних процедур лежить припущення, що формальна модель багатоцільового завдання не містить інформації, достатньої для однозначного вибору найкращої альтернативи. Отже, рішення, прийняті за допомогою апостеріорних процедур, мають принципово суб'єктивний характер, що зумовлює необхідність залучення суб'єктивних суджень конструктора. Облік переваг проектанта в цьому випадку є одним із найбільш ефективних методів зняття наявної невизначеності.

Апостеріорні процедури прийняття рішень полягають у формулюванні додаткових вимог, що накладаються на вподобання проектанта, виконання яких дозволяє однозначно відновити деяку скалярну функцію корисності  $P(u)$ , після чого завдання прийняття рішень зводиться до скалярної оптимізації.

Типова структура апостеріорної процедури розв'язання багатокритеріальних задач така. Спочатку виконується перевірка гіпотези про незалежність по корисності. Якщо відповіді проектанта дозволяють зробити висновок, що незалежність дійсно має місце, то за допомогою спеціальних методів (часто використовується принцип лотереї) відновлюються всі величини, необхідні для ідентифікації шуканої функції корисності.

Основною перевагою апостеріорних процедур у порівнянні з апріорними є чітке визначення умов, при виконанні яких ними можна користуватися. Але їхнє практичне використання часто наштовхується на необхідність збору надзвичайно великої кількості інформації, а також на те, що проєктант у багатьох випадках або не може дати інформацію, необхідну для реалізації процедури, або дає її з великими помилками. Це пов'язано, як правило, із невідповідністю проектанта до вирішення такого роду завдань.

Як відомо, у кібернетиці під адаптацією розуміється процес накопичення і використання інформації в системі, спрямований на досягнення певного, зазвичай оптимального в деякому сенсі стану або поведінки системи при початковій невизначеності або зовнішніх умовах [12]. Із наведеного вище визначення в результаті аналізу можна сформулювати деякі загальні принципи адаптації: адаптація, як правило, безперервний динамічний керований випадковий процес; у процесі адаптації управління процесом повинне бути оптимальним по якомусь одному або декількох критеріях (показниках).

У процесі адаптації (адаптивного управління) можуть змінюватися параметри, структура системи, алгоритм функціонування, управляючі впливи тощо. Як відомо, процес оптимального проектування може інтерпретуватися у вигляді завдання оптимального управління. Тому до нього можуть бути повністю застосовані як загальні принципи, так і методи адаптації. При цьому адаптація тут мо-

же розглядатися із двох точок зору: по-перше, у ході проектування відбувається безперервне надходження й накопичення знань про умови застосування майбутнього об'єкта, нових даних про матеріали, їхню поведінку при діючих навантаженнях тощо, які повинні враховуватися при прийнятті оптимальних рішень; по-друге, деякі виробниці після їхнього створення працюють у найрізноманітніших і невизначених умовах, що вимагає, у свою чергу, від конструктора забезпечення максимальної пристосованості рішення до постійно змінюваних умов.

У викладених вище матеріалах зазначалося про постановки та методи вирішення завдань, що не містять невизначеностей. Однак, як правило, більшість реальних завдань містять у тому чи іншому вигляді невизначеність. Можна навіть стверджувати, що рішення задач з урахуванням різного виду невизначеностей є загальним випадком, а прийняття рішень без урахування їх - приватним. Однак через концептуальні та методичні труднощі в даний час не існує єдиного методологічного підходу до вирішення таких завдань. Проте накопичена досить велика кількість методів формалізації постановки і прийняття рішень з урахуванням невизначеностей. При використанні цих методів слід мати на увазі, що всі вони носять рекомендаційний характер, і вибір остаточного рішення завжди залишається за особою, яка приймає рішення (ОПР).

При вирішенні конкретних завдань з урахуванням невизначеностей ОПР стикається з різними їхніми типами. У дослідженні операцій прийнято розрізняти три типи невизначеностей [13]: невизначеність цілей; невизначеність наших знань про навколишнє оточення і діючі у даному явищі фактори (невизначеність природи); невизначеність дій активного або пасивного партнера, або противника.

У наведеній вище класифікації тип невизначеностей розглядається з позицій того чи іншого елемента математичної моделі. Так, наприклад, невизначеність цілей відбивається при постановці завдання на виборі або окремих критеріїв, або всього вектора корисного ефекту.

З іншого боку, два інші типи невизначеностей впливають в основному на складання цільової функції рівнянь обмежень і методу прийняття рішення.

За цією ознакою можна розрізняти стохастичну (імовірнісну) невизначеність, коли невідомі фактори статистично стійкі і тому являють собою звичайні об'єкти теорії ймовірностей - випадкові величини (або випадкові функції, події тощо). При цьому повинні бути відомі або визначені при постановці завдання всі необхідні статистичні характеристики (закони розподілу та їхні параметри).

Іншим крайнім випадком може бути невизначеність нестохастичного типу (за висловом Вентцеля [14] - "погана невизначеність"), при якій ніяких припущень про стохастичну стійкість не існує. Нарешті, можна говорити про проміжний тип невизначеності, коли рішення приймається на підставі будь-яких гіпотез про закони розподілу випадкових величин. При цьому ОПР повинен мати на увазі небезпеку розбіжності його результатів з реальними умовами. Ця небезпека розбіжності формалізується за допомогою коефіцієнтів ризику.

## Висновки

У результаті дослідження сучасного стану проблеми щодо проведення багатокритеріального аналізу безпеки об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями сформульована мета подальших досліджень - удосконалення методу багатокритеріального аналізу безпеки об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями. Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

- провести адаптацію та удосконалення методу багатокритеріального аналізу;
- визначити та обґрунтувати кількісні та якісні критерії вибору оптимального варіанта виконання робіт;
- побудувати функції бажаності, що відповідають вимогам поставленої задачі;
- провести дослідження вагових коефіцієнтів для обчислення узагальненого показника ефективності прийнятого рішення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України "Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку", Верховна Рада України; Закон від 08.02.1995 № 39/95-ВР.
2. НП 306.2.141-2008 Загальні положення безпеки атомних станцій.
3. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. - МОЗ України, 1998.
4. Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection. ICRP Publication 37. Ann. ICRP 10 (2-3), 1983.

5. *Рекомендации* Международной комиссии по радиологической защите. Публикация 26. Пергамон Пресс, Оксфорд и Нью-Йорк, 1977.
6. ICRP Publication 55. "Optimization and Decision-Making in Radiological Protection" A report of a Task Group of Committee 4 of the International Commission on Radiological Protection. - Oxford, New York – Toronto: Pergamon Press, 1988. - 60 p.
7. *Commission of the European Communities, ALARA: From Theory Towards Practice*, Rep. EUR 13796, CEC, Luxembourg (1991).
8. *National council on radiation protection and measurements, Dose Control at Nuclear Power Plants*, NCRP Rep. No. 120, NCRP, Bethesda, MD (1994).
9. *Лось І. П.* Оцінка вартості одиниці колективної дози опромінення / І. П. Лось, К. І. Шепелевич // Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. 1999, № 13.
10. *Кини Р.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Кини, Х. Райфа ; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1981. - 560 с.
11. *Михалевич В. С.* Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В. С. Михалевич, В. Л. Волкович. - М. : Наука, 1982. - 288 с.
12. *Реализация прототипа системы поддержки принятия решений реального времени на основе инструментального комплекса G2* / А. П. Еремеев и др. // Программные продукты и системы. - 1996. – Вып. 3. - С. 21 - 26.
13. *Левнатов А. Ю.* Принятие решений об оценке качества сложных объектов при нечетких основаниях / А. Ю. Левнатов // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. - 1980. - № 1. - С. 190 - 195.
14. *Обработка нечеткой информации в системах принятия решений* / А. Н. Борисов, А. В. Алексеев, Г. В. Меркурьева и др. - М. : Радио и связь, 1989. - 304 с.

**В. В. Деренговский, А. В. Носовский**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова, 36а, Чернобыль, 07270, Украина*

#### **СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОВЕДЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ С РАДИАЦИОННО-ЯДЕРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

Рассмотрены нормативные, эксплуатационные и регламентные документы, международные рекомендации проведения анализа безопасности объектов с радиационно-ядерными технологиями. Проведен анализ возможных методов анализа безопасности таких объектов и проектирование работ на них. Выполнено исследование современного состояния проблемы проведения многокритериального анализа безопасности объектов с радиационно-ядерными технологиями.

*Ключевые слова:* радиационная безопасность, объекты с радиационно-ядерными технологиями, принцип ALARA, многокритериальный анализ.

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

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

#### **STATE OF THE PROBLEM OF MULTI-CRITERIAL SAFETY ANALYSIS OF OBJECTS WITH RADIATION-NUCLEAR TECHNOLOGIES**

The transformation of the Ukryttya object into an ecologically safe system is one of the priority tasks of Ukraine to increase radiation safety. In the process of this transformation the task of choosing an optimal version of these works. At present, many objects with radiation-nuclear technologies are located on the territory of the Chernobyl exclusion zone. In addition, construction and operation of spent fuel storage facilities and radioactive waste, solar power plants, solid fuel boilers, etc. are planned here. In order to minimize the impact of such activities on the environment, the issue of conducting safety analysis and selecting the optimal option for work on objects with radiation-nuclear technologies becomes relevant, due to the fact that all these objects are located on radioactive contaminated territories and can be involved in the technological process of handling radioactive contaminated materials. As a result of the study of the current state of the problem of conducting multi-criterial analysis of the safety of objects with radiation-nuclear technologies, the goal of further research is being formulated: improvement of the method of multi-criterion analysis of the safety of objects with radiation-nuclear technologies. To achieve the goal, you must complete the task: to adapt and improve the method of multi-criteria analysis; to determine and substantiate the quantitative and qualitative criteria for choosing an optimal version of the work; to construct desirability functions that meet the requirements of the task; carry out a study of weighting factors for calculating the generalized efficiency indicator of the decision.

*Keywords:* radiation safety, radiation safety, objects with radiation-nuclear technologies, ALARA principle, multi-criteria analysis.

#### **REFERENCES**

1. *Law of Ukraine "On the Use of Nuclear Energy and Radiation Safety"*, Verkhovna Rada of Ukraine; Law of February 8, 1995 No. 39/95-BP. (Ukr)



2. *NP 306.2.141-2008*. General provisions of the safety of nuclear power plants. (Ukr)
3. *ДГН 6.6.1.-6.5.001-98*. Norms of Radiation Safety (NRBU-97). The Ministry of Health of Ukraine, 1997. (Ukr)
4. *Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection*. ICRP Publication 37. Ann. ICRP 10 (2-3), 1983.
5. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Publication 26. Pergamon Press, Oxford, New York, 1977.
6. ICRP Publication 55. "Optimization and Decision-Making in Radiological Protection" A report of a Task Group of Committee 4 of the International Commission on Radiological Protection. - Oxford, New York – Toronto : Pergamon Press, 1988. - 60 p.
7. *Commission of the European communities, ALARA: From Theory Towards Practice*, Rep. EUR 13796, CEC, Luxembourg (1991).
8. *National council on radiation protection and measurements, Dose Control at Nuclear Power Plants*, NCRP Rep. No. 120, NCRP, Bethesda, MD (1994).
9. *Los I. P.* Evaluation of the cost of a unit dose of radiation / I. P. Los, K. I. Shepelevich // Bulletin of the ecological status of the exclusion zone and the zone of unconditional (mandatory) resettlement. – 1999. - № 13. (Ukr)
10. *Keeney Ralph I.* Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs / Ralph I. Keeney, Howard Raiffa. – IIASA Working Paper, 1975. - 1131 p.
11. *Mikhalevich V. S.* Computational methods for studying and designing complex systems / V. S. Mikhalevich, V. L. Volkovich. - Moskva : Nauka, 1982. - 288 p. (Rus)
12. *Implementation of the prototype of the system for supporting decision-making on real-time based on the G2 toolbox* / A. P. Ereemeev et al. // Programnie produkty i systemy. - 1996. – Iss. 3. - P. 21 - 26. (Rus)
13. *Levnatov A. Y.* Decision-making on the estimation of the quality of complex objects under obscure bases / A. Y. Levnatov // Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Technicheskaya Cybernetica. - 1980. - № 1. - P. 190 - 195. (Rus)
14. *Processing of fuzzy information in decision-making systems* / A. N. Borisov, A. V. Alekseev, G. V. Merkur'eva et al. - Moskva : Radio i svyaz, 1989. - 304 p. (Rus)

Надійшла 28.03.2018  
Received 28.03.2018