

С. О. ГОРБАЧИК, С. В. КЛЕВЦОВ

МОЖЛИВОСТІ ЗАЛУЧЕННЯ ІМОВІРНІСНОГО АНАЛІЗУ БЕЗПЕКИ ДЛЯ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ ЯДЕРНИХ УСТАНОВОК

Представлено аналіз можливості використання такого інструменту, як імовірнісний аналіз безпеки атомних електростанцій для кількісної оцінки рівня фізичного захисту ядерних установок. Впровадження даного інструменту дозволить суттєво підвищити стан фізичної ядерної безпеки та надасть можливість визначити критичні проблеми в системах фізичного захисту від зовнішніх та внутрішніх правопорушників. На основі проведення імовірнісного аналізу безпеки для фізичного захисту ядерних установок можливо здійснити процес модернізації систем фізичного захисту, приймаючи до уваги, як економічні, так і захисні можливості для раціонального розподілення ресурсів.

Ключові слова: Фізичний захист, ядерна захищеність, імовірнісний аналіз безпеки, неправомірне вилучення ядерних матеріалів, радіаційна безпека, критерії успіху, диверсія.

S. GORBACHYK, S. KLEVTSOV

POSSIBILITIES OF INVOLVING PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS FOR PHYSICAL PROTECTION OF NUCLEAR FACILITIES

The purpose of this study is to analyze the applicability of probabilistic analysis of the safety of nuclear power plants for the quantitative evaluation of nuclear security level of nuclear facilities. Such a tool as probabilistic safety analysis has shown itself to be excellent in identifying the sources of the accident, predicting the progress of the accident and emergency processes that are related to the operation of equipment used directly in the operation of reactors. Therefore, if a probabilistic analysis is implemented for the physical protection of nuclear facilities, it will make it possible not only to identify previously unknown critical vulnerabilities, but also to rationally allocate material and human resources to achieve the appropriate level of physical protection of nuclear facilities. After analytical observations and research, it is planned to conduct a calculation process based on the development of a methodology and procedure for the analysis of the success criteria of the probabilistic analysis of nuclear security.

Key words: Physical protection, nuclear security, probabilistic safety analysis, illegal extraction of nuclear materials, radiation safety, success criteria, sabotage.

Вступ

На сьогоднішній день, не дивлячись на те, що Запорізька атомна електростанція тимчасово знаходиться під окупацією країни-агресорки, атомна енергетична галузь нашої держави залишається досить широко розвиненою. Її основну потужність складають Рівненська, Хмельницька та Південно-Українська атомні електричні станції, виробництво електроенергії яких складає біля 50 % по відношенню до всіх генеруючих потужностей України [1]. До того, відповідно до «Енергетичної стратегії України на період до 2050 року», кількість об'єктів використання мирного атома буде тільки зростати, нарощення потужності в атомній галузі має складати не менше 30 ГВт [2].

Атомні електричні станції (АЕС) завжди мали статус об'єкта підвищеної небезпеки, а у зв'язку з повномасштабним вторгненням, питання безпечної експлуатації АЕС та захист території, де вони розміщуються, набувають все більшого значення, зокрема, через підступні дії по відношенню до енергосистеми України, які призвели до порушення процесів постачання електроенергії кінцевим споживачам, що викликало логістичні проблеми в транспортуванні електроенергії.

Тому у наш час важливим, як ніколи, постає питання безпеки об'єктів генерації електроенергії, зокрема і об'єктів атомної промисловості, де паливом слугують матеріали, що можуть бути викорис-

тані для виготовлення так званої «брудної бомби» або для створення повноцінної ядерної зброї.

Мета роботи

Відомо, що саме держава встановлює національну політику з питань державного регулювання ядерної та радіаційної безпеки, шляхом впровадження різних юридичних документів, законодавчих актів та законів [3]. Проте, якщо виконати аналіз нормативно-правової бази у сфері фізичного захисту ядерних об'єктів, то питання ядерної захищеності АЕС вимагає більш глибокої та якісної оцінки її стану.

Загальна ціль державного режиму фізичної ядерної безпеки – це захист, лиць, майна, суспільства (людей) і навколишнього середовища від протиправних дій, що пов'язані з ядерними матеріалами та іншими радіоактивними джерелами. Цілі державного режиму фізичного захисту, що є ключовим компонентом державного режиму фізичної ядерної безпеки, полягають в наступному [4]:

1) Забезпечити захист від несанкціонованого вилучення. – Захист від крадіжки або іншого незаконного захвату ядерного матеріалу.

2) Визначення місцезнаходження і забезпечення повернення зниклих ядерних матеріалів. – Забезпечення оперативних та комплексних заходів щодо виявлення та повернення ядерних матеріалів.

3) Забезпечити захист від диверсії. – Захист

ядерних матеріалів і ядерних установок від диверсії.

4) Пом'якшити або звести до мінімуму наслідки диверсії. – Пом'якшення або зведення до мінімуму радіаційних наслідків диверсії.

Дані цілі досягаються шляхом [4]:

1) Попередження протиправних дій шляхом утримання і захисту чутливої інформації.

2) Запобігання намаганням злочинних намірів за допомогою інтегрованої системи виявлення, затримки проникнення та реагування.

3) Пом'якшення наслідків протиправних дій.

Слід забезпечити, щоб досягнення вище вказаних цілей здійснювалось з врахуванням різних ризиків, яким мають протидіяти заходи по забезпеченню фізичної ядерної безпеки [4].

З огляду на вищезазначене, для досягнення мети повноцінної ядерної захищеності та покращення рівня якості прогнозування подій (протиправних дій з ядерними матеріалами) і шляхів їх протікання, пропонується розглянути можливість залучення імовірнісного аналізу безпеки для фізичного захисту ядерних установок.

В загальному, мета дослідження полягає в тому, щоб показати, що імовірнісний аналіз безпеки для фізичного захисту дозволить не тільки визначити раніше не враховані проблематичні аспекти ядерної захищеності, але й надасть можливість прогнозувати характер протікання подій, що пов'язані із протиправними діями по відношенню до ядерних матеріалів, при цьому раціонально залучивши ресурси без негативних наслідків для фізичного захисту об'єктів.

Виклад основного матеріалу

Сам процес повноцінного залучення імовірнісного аналізу безпеки для фізичного захисту ядерних об'єктів потребує розробки відповідної методології, значної витрати часу, залучення великих матеріальних та людських ресурсів. Тому, у подальшій роботі у цьому напрямку пропонується зосередитись на розробці методів аналізу критеріїв успіху функцій безпеки систем фізичного захисту як складової загальної методології імовірнісного аналізу фізичної ядерної безпеки.

У зв'язку з тим, що дослідження реальних ядерних установок є неможливим через засекреченість відповідної інформації та наявність ряду обмежень, що не дозволить в повній мірі розкрити питання та визначити вхідні дані для розрахункового процесу, за об'єкт проведення досліджень взято гіпотетичну ядерну установку. Зокрема, до таких обмежень належить перелік об'єктових проектних загроз ядерних установок, які ще на етапі їх формулювання відносять до державної таємниці.

Під проектною загрозою в контексті дослідження розуміють властивості та характеристики

потенційних правопорушників, дії яких можуть бути спрямовані на вчинення неправомірного вилучення радіоактивних матеріалів. Зокрема, розглядається подія, що пов'язана з потраплянням правопорушника на гіпотетичну ядерну установку для незаконного вилучення ядерних або радіоактивних матеріалів.

На основі проектної загрози, визначаються цілі правопорушника, тобто вразливі об'єкти критичної інфраструктури по відношенню до яких може бути здійснена протиправна діяльність.

Розглянувши проектну загрозу, що пов'язана з незаконним вилученням ядерних або радіоактивних матеріалів, визначаються цілі правопорушника, а саме об'єкти (з відповідними визначеними характеристиками) по відношенню до яких здійснюється протиправна діяльність:

1) Реакторна установка (ядерна енергетична установка) – у зв'язку з наявністю великої кількості збагаченого урану, існує ймовірність використання його для створення ядерного заряду, при цьому слід зазначити, що кількість ядерних матеріалів низького збагачення вразі більша, що несе за собою можливість виготовлення великої кількості «брудних бомб». Проте, через великі дозовані навантаження, що присутні в реакторній установці, імовірність того, що така подія, як неправомірне вилучення опроміненого ядерного матеріалу з реактора відбудеться – близька нулю.

2) Сховище відпрацьованого ядерного палива – не дивлячись на те, що ядерні матеріали в даному випадку є вже використаними, там знаходиться велика кількість подільного урану, що не був використаний в процесі експлуатації, та напрацьованого плутонію. Згідно досліджень, кількість невідпрацьованого палива у тепловиділяючій збірці доволі суттєва. Тому мотиви правопорушника по відношенню до даного об'єкту можуть бути пов'язані з неправомірним вилученням радіоактивного матеріалу для створення ядерної боеголовки або «брудної бомби». Слід зазначити, що як і в попередньому випадку, наявність «самозахищеності» мінімізує ймовірність неправомірного вилучення ядерних та радіоактивних матеріалів, до того ж, відпрацьоване ядерне паливо знаходиться в середині гермооб'єму.

3) При виконанні технологічних операцій у системах перевантаження, тимчасового зберігання та транспортування ядерного палива існує ймовірність неправомірного вилучення збагаченого палива або ВЯП для створення ядерної зброї або радіоактивних брудних бомб.

4) Сховище радіоактивних відходів – наявність доволі великої кількості «забруднених» матеріалів несе за собою ймовірність крадіжки радіоактивних матеріалів для створення «брудної бомби».

Рівень захисту ядерних матеріалів напряду залежить від їх класифікації по категоріям з точки зору можливості використання в цілях створення ядерного вибухового пристрою. Тобто, для кожної категорії ядерного матеріалу визначаються вимоги по їх захисту від несанкціонованого вилучення. Одним із основних критеріїв цих вимог є те, що слід враховувати вимоги до захисту від диверсії [6].

Основним фактором, що впливає на визначення заходів фізичного захисту від несанкціонованого вилучення є сам ядерний матеріал. В табл. 1 наведено різновид ядерного матеріалу, що поділений на категорії із зазначенням елемента, ізотопу, кількості та ступеня опромінення. Така категоризація є основою для застосування диференційного підходу в забезпеченні захисту від несанкціонованого вилучення ядерного матеріалу, що може

застосовуватися в ядерному вибуховому пристрої, що в свою чергу, залежить від типу ядерного матеріалу, ізотопного складу, фізичної та хімічної форми, збагачення, величини випромінювання і кількості:

a – весь плутоній, за виключенням того, де ізотопна концентрація перевищує 80 % по ^{238}Pu ;

b – матеріал, що не був опромінений в реакторі або матеріал, що був опромінений в реакторі, але з рівнем опромінення рівним 1 Гр/год (100 рад/год) або менше на відстані 1 м без біологічного захисту;

v – інше паливо, яке по своєму початковому складу ізотопів, що діляться, класифікується по категорії I або II до опромінення, може бути понижене на одну категорію, якщо його рівень опромінення перевищує 1 Гр/год (100 рад/год) на відстані 1 м без біологічного захисту.

Таблиця 1 – Категорія ядерного палива

Матеріал	Форма	Категорія I	Категорія II	Категорія III
1	2	3	4	5
Плутоній (<i>a</i>)	Неопромінений (<i>b</i>)	2 кг і більше	Менше 2 кг, але більше 0,5 кг	0,5 кг і менше, але більше 0,015 кг
Уран-235 (неопромінений (<i>b</i>))	Збагачення по ^{235}U від 20 % і більше	5 кг і більше	Менше 5 кг, але більше 1 кг	Більше 0,015 кг, але менше 1 кг
	Збагачення по ^{235}U від 10 %, але менше 20 %	–	10 кг або більше	Менше 10 кг, але більше 1 кг
	Збагачення по ^{235}U більше природнього, але менше 20 %	–	–	10 кг і більше
Уран-233	Неопромінений (<i>b</i>)	2 кг і більше	Менше 2 кг, але більше 0,5 кг	0,5 кг і менше, але більше 0,015 кг
Опромінене паливо (Категоризація опроміненого палива, що наведена в таблиці, враховує вимоги міжнародних перевезень (транспортування). З врахуванням всіх відповідних факторів, держава може встановлювати іншу категорію для внутрішньодержавного використання, зберігання і перевезення)	–	–	Збіднений або природній уран, торій чи низько збагачене паливо (з вмістом менше 10 % ізотопів, що діляться) (<i>v</i>)	–

В залежності від категорії ядерного матеріалу, рівень фізичного захисту змінюється. Вимог та рекомендацій щодо рівня фізичного захисту досить багато [4]. Але раціональність застосування таких вимог та їх актуальність змінюється з часом так, як прогрес технологій непинно зростає, і складові фізичного захисту, які донедавна вважалися такими, що відповідають вимогам фізичної захищеності, на сьогодні можна обійти, використовуючи засоби та інформацію, які є у вільному доступі.

По відношенню до кожної ядерної установки необхідно виконувати аналіз, який має відповідати

встановленим нормам та перевірятися компетентним органом, щоб визначити характеристики ядерного матеріалу по відношенню до неприйнятних радіаційних наслідків, які визначаються державою, враховуючи при цьому акти диверсії, що успішно проведені за відсутності заходів фізичного захисту чи заходів пом'якшення від неправомірних дій щодо ядерного матеріалу.

Держава, беручи до уваги аналіз ядерної установки, розглядає весь спектр радіаційних наслідків, відповідно до чого встановлюються рівні захисту.

На основі диференційного підходу визначаються ряд проектних цілей фізичного захисту та заходи, відповідно до рівня захисту.

Використовуючи проектні загрози і оцінку загроз держава в співпраці з оператором розробляє/розглядає сценарії, відповідно до яких правопорушник може здійснити диверсію. При цьому враховується можливість появи зовнішніх правопорушників або внутрішніх правопорушників, які неправомірно в своїх корисних цілях намагаються здійснити акт диверсії. Слід зазначити, що одночасно розглядається поява, як зовнішніх, так і внутрішніх правопорушників, які можуть співпрацювати.

Для виконання основних функцій та підтримання режиму фізичного захисту створюється система фізичного захисту. До системи фізичного захисту відносяться заходи, що призначені для запобігання, виявлення, затримки, реагування, переривання незаконних дій правопорушників [7]:

1) Запобігання. Функція системи фізичного захисту, що полягає у запобіганні здійсненню незаконних дій потенційним правопорушником щодо ядерних установок та ядерних матеріалів.

2) Виявлення. Функція системи фізичного захисту, що полягає в недопущенні силами реагування виконання правопорушником своєї задачі.

3) Затримка. Функція системи фізичного захисту, що полягає у сповільненні дій правопорушника при виконанні ним своєї задачі.

4) Реагування. Функція системи фізичного захисту, що полягає в недопущенні силами реагування виконання правопорушником своєї задачі.

5) Переривання. Функція системи фізичного захисту, що полягає у своєчасному перериванні силами реагування дій правопорушників до виконання ними своїх цілей.

Для того, щоб розробити імовірнісну модель сценаріїв реалізації намірів правопорушника необхідно якісно та в повній мірі виконати аналіз критеріїв успіху. Тоді як результат, буде відомо, чи функції безпеки системи фізичного захисту були виконані, чи ні для кожного з сценаріїв дій правопорушника. Такий аналіз критеріїв успіху в порівнянні з традиційним імовірнісним аналізом безпеки атомних станцій є більш складним і вимагає розробку своєї методології та процедури виконання. Таку методологію та процедуру виконання можна розробити і виконати по відношенню до гіпотетичної ядерної установки для апробації.

Висновки

В роботі, основний акцент зроблено саме на появі зовнішніх/внутрішніх правопорушників, що намагаються здійснити диверсію на гіпотетичної ядерної установки, де система фізичного захисту представлена в якості складового елементу інтег-

рованої системи для запобігання ймовірного диверсії з врахуванням надійності інженерно-технічних засобів та експлуатаційних особливостей систем фізичного захисту.

З огляду на можливі цілі для заволодіння правопорушником радіоактивних матеріалів, можна виділити три основні шляхи, де ця подія відбудеться: безпосередньо на об'єкті генерації (АЕС), під час транспортування радіоактивних матеріалів та на об'єкті зберігання відпрацьованого ядерного палива. Тобто, знаючи цілі правопорушника, формуються наміри правопорушника по відношенню до об'єкту, чи це заволодіння ядерними матеріалами для створення ядерної зброї, чи це заволодіння матеріалами для виготовлення «брудної бомби». Маючи якісну характеристику об'єктів, до яких можуть бути здійснені неправомірні дії, формуються критерії успіху з подальшим їх аналізом. В будь-якому випадку, критерієм успіху буде вважатися порушення планів правопорушника. Вразі, коли у кінцевому випадку, критерії успіху будуть не виконані, система фізичного захисту вважається такою, що є неефективною та з'являється необхідність її вдосконалення.

Таким чином, на основі проведення імовірнісного аналізу безпеки системи фізичного захисту із запровадженням методології стандартного імовірнісного аналізу безпеки щодо критеріїв успіху при диверсії, можна шукати слабкі місця у системі та прораховувати наслідки, що в подальшому дозволить провести модернізацію фізичного захисту та вийти на необхідний рівень захищеності. Але сам механізм та процедура залучення імовірнісного аналізу в даному випадку вимагає додаткових досліджень, так як методологія стандартного імовірнісного аналізу безпеки кардинально відрізняється від методології, що може використовуватись для фізичної ядерної безпеки.

Список літератури

1. Електроенергія, вироблена українськими АЕС в умовах російського терору проти енергетичних об'єктів України, утримала вітчизняну енергосистему / ДП «НАЕК «Енергоатом». – 2023. – Назва з екрану. – URL: <https://www.energoatom.com.ua/o-2808233.html> (дата звернення: 07.12.2023).
2. Стратегія майбутнього: Україна – це енергетичний хаб, який допоможе Європі позбутися залежності від росії / Міністерство енергетики України. – 2023. – Назва з екрану. – URL: [https://www.kmu.gov.ua/news/stratehiia-maibutnoho-ukraina-tse-enerhetychnyi-khab-iakyi-dopomozhe-ievropi-pozbutysia-zalezhnosti-vid-rosii#:~:text=\(дата звернення: 07.12.2023\).](https://www.kmu.gov.ua/news/stratehiia-maibutnoho-ukraina-tse-enerhetychnyi-khab-iakyi-dopomozhe-ievropi-pozbutysia-zalezhnosti-vid-rosii#:~:text=(дата звернення: 07.12.2023).)
3. Основні завдання / Державна інспекція ядерного регулювання України. – 2020. – Назва з екрану. – URL: <https://snriu.gov.ua/pro-nas/zagalna-informaciya/osnovni-zavdannya> (дата звернення: 07.12.2023).
4. Рекомендації по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерных материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/REVISION 5). Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 13 / Международное агентство по атомной энергии. – вид. 5-е. –

- Вена : МАГАТЭ, 2012. – 69 с. – ISBN 978-92-0-424110-5. – ISSN 1816-9317. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1481r_web.pdf (дата звернення: 07.12.2023).
- Закон України «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання». – 2000. – Назва з екрану. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2064-14#Text> (дата звернення: 07.12.2023).
 - Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся радиоактивных материалов и связанных с ними установок. Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 14 / Международное агентство по атомной энергии. – Вена : МАГАТЭ, 2011. – 35 с. – ISBN 978-92-0-422310-1. – ISSN 1816-9317. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1487r_Web.pdf (дата звернення: 07.12.2023).
 - Використання імерсивних технологій у навчанні та підготовці фахівців з фізичного захисту : магістерська робота / Дмитро Балашевський. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – ТЗ-з21мп.023.0000.001.МД.
 - Derzhavna inspekciya yadernogo reguluvannya Ukrainy` [State Inspection of Nuclear Regulation of Ukraine] (2020), *Osnovni zavdannya* [Main tasks], Access mode: <https://snriu.gov.ua/pro-nas/zagalna-informaciya/osnovni-zavdannya> (accessed 07 December 2023).
 - IAEA (2012), *Rekomendacii po fizicheskoy yadernoj bezopasnosti, kasayushhiesya fizicheskoy zashhity yadernyx materialov i yadernyx ustanovok* [Recommendations on physical nuclear safety concerning the physical protection of nuclear materials and nuclear installations (INFCIRC/225/REVISION 5)], Seriya izdanij MAGATE' po fizicheskoy yadernoj bezopasnosti, no 13 [Series published by the IAEA on physical nuclear safety, No. 13], 69 p, ISBN 978-92-0-424110-5, ISSN 1816-9317, Access mode: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1481r_web.pdf (accessed 07 December 2023).
 - (2000), *Zakon Ukrainy` "Pro fizychny`y zaxy`st yaderny`x ustanovok, yaderny`x materialiv, radioaktyvny`x vidxodiv, inshy`x dzherel ionizuyuchogo vy`prominyuvannya"* [Law of Ukraine "On physical protection of nuclear installations, nuclear materials, radioactive waste, other sources of ionizing radiation"], Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2064-14#Text> (accessed 07 December 2023).

References (transliterated)

- DP "NAEK "Energoatom" (2023), *Elektroenergiya, vy`roblena ukrainy`ny` AES v umovax rosijs`kogo teroru proty` energety`chny`x ob`yektiv Ukrainy`, utry` mala vitchy`znyanu energosy`stemu*, [The electricity produced by Ukrainian nuclear power plants in the conditions of russian terror against Ukraine's energy facilities maintained the domestic energy system], Access mode: <https://www.energoatom.com.ua/o-2808233.html> (accessed 07 December 2023).
- Ministerstvo energety`ky` Ukrainy` (2023), *Strategiya majbut`ogo: Ukraina – ce energety`chny`j xab, yaky`j dopomozhe Yevropi pozbuty`sya zalezhnosti vid rosiyi*, [Future strategy: Ukraine is an energy hub that will help Europe get rid of dependence on russia], Access mode: <https://www.kmu.gov.ua/news/stratehiia-maibutnoho-ukrainatse-enerhetychnyi-khab-iakyi-dopomozhe-ievropi-pozbutysiazalezhnosti-vid-rosii#:~:text=> (accessed 07 December 2023).
- IAEA (2011), *Rekomendacii po fizicheskoy yadernoj bezopasnosti, kasayushhiesya radioaktivnyx materialov i svyazannyx s nimi ustanovok* [Recommendations on Physical Nuclear Safety Concerning Radioactive Materials and Related Installations], Seriya izdanij MAGATE' po fizicheskoy yadernoj bezopasnosti, no 14 [IAEA Physical Nuclear Safety Series, No. 14], 35 p, ISBN 978-92-0-422310-1, ISSN 1816-9317, Access mode: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1487r_Web.pdf (accessed 07 December 2023).
- Balashhevskiy D. (2023), *Usage of Immersive Technologies in Education and Training of Specialists on Physical Protection*, Master degree theses, ТЗ-з21мп.023.0000.001.МД, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

Надійшла (received) 06.12.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Горбачик Сергій Олександрович (Horbachyk Serhii) – аспірант кафедри атомної енергетики, інституту атомної та теплової енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського; м. Київ; тел.: (098) 818–92–56; e-mail: s.horbachyk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4293-2064>.

Клецов Сергій Валерійович (Klevtsov Serhii) – кандидат технічних наук, доцент кафедри атомної енергетики, інституту атомної та теплової енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського; м. Київ; e-mail: s.klevtsov@kpi.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1405-5048>.