

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИКОРИСТАННЯ ОБЛІКУ ТА КОНТРОЛЮ ЯДЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФІЗИЧНОЇ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ

Курс лекцій

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
за освітньою програмою «Фізичний захист та облік і контроль ядерних матеріалів»,
спеціальності 143 Атомна енергетика

Укладач: С.В. Клевцов

Електронне мережне навчальне видання

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського
2024

УДК 621.039
К48

Укладач: *Клевцов Сергій Валерійович, к.т.н., доцент*

Рецензент: *Сімейко К. В., доктор технічних наук, старший дослідник, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України.*

Відповідальний редактор: *Воробйов М.В., к.т.н., доцент*

*Гриф надано Методичною радою КПІ імені Ігоря Сікорського
(протокол №8 від 20.06.2024 р.) за поданням Вченої ради НН ІАТЕ
(протокол №12 від 10.06. 2024 р.)*

«Використання обліку та контролю ядерних матеріалів для забезпечення фізичної ядерної безпеки. Курс лекцій» [Електронний ресурс]: навч. посіб. для другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Фізичний захист та облік і контроль ядерних матеріалів» спеціальності 143 Атомна енергетика / уклад.: С.В. Клевцов – Електронні текстові дані (1 файл: 4,88 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 232 с.

В навчальному посібнику викладені основи використання обліку та контролю ядерних матеріалів для забезпечення фізичної ядерної безпеки. Розглянуто відомості про облік та контроль ядерних матеріалів, фізичну інвентаризацію ядерних матеріалів, методи вимірювання та аналізу ядерних матеріалів, законодавчу базу та виявлення злочинних чи несанкціонованих дій для обліку ядерних матеріалів. Метою навчального посібника є формування у студентів знань і умінь фундаментального характеру стосовно обліку та контролю ядерних матеріалів для забезпечення фізичної ядерної безпеки при використанні ядерних матеріалів та боротьбі з їх протиправним розповсюдженням.

УДК 621.039

Ресстр. № НП 23/24-626. Обсяг 20,5 авт. арк.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056 <https://kpi.ua>
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК №
5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Тема 1. Введення в облік та контроль ядерних матеріалів. Визначення.....	9
1.1. Загрози поширення ЯЗ протидіють міжнародні та національні системи гарантій нерозповсюдження, системи експортного контролю.....	10
1.2. Основні поняття системи вимірюваного матеріального балансу ядерних матеріалів.....	17
Тема 2. Завдання системи ОКЯМ. Категоризація ядерних матеріалів.....	22
2.1. Категоризація ядерних матеріалів в Україні.....	23
2.2. Партія ядерних матеріалів.....	25
Тема 3. Огляд основних елементів системи ОКЯМ.....	27
Тема 4. Взаємозв'язки між ОКЯМ та фізичною ядерною безпекою.....	35
Тема 5. Управління системою ОКЯМ.....	53
Тема 6. Зони балансу матеріалу.....	63
6.1. Конструювання/проектування ЗБМ.....	64
6.2. Визначення потоків та інвентарних кількостей ЯМ у ЗБМ.....	67
Тема 7. Фізична інвентаризація ядерних матеріалів. Період балансу матеріалу.....	72
7.1. Деякі вступні визначення.....	72
7.2. Цілі фізичної інвентаризації.....	73
Тема 8. Необлікований (неврахований) матеріал.....	92
Тема 9. Показники ефективності системи ОКЯМ.....	99
Тема 10. Вимірювання ЯМ. Основні поняття, що застосовуються під час вимірювання ядерних матеріалів.....	106
Тема 11. Методи руйнуючого аналізу.....	112
11.1. Відбір проб.....	112
11.2. Розчинення зразків ядерних матеріалів.....	114

11.3. Екстракція ЯМ із розчину.....	115
11.4. Іонообмінний поділ.....	115
11.5. Гравіметрія.....	116
11.6. Титрування за методом Девіса-Грея для кількісного аналізу вмісту урану.....	118
11.7. Мас-спектрометрія.....	121
11.8. Метод ізотопного розведення.....	125
11.9. Метод Resin-bead.....	126
11.10. Комплексне застосування методів вимірів ЯМ.....	127
Тема 12. Методи неруйнуючого аналізу.....	130
12.1. Загальні положення методів неруйнуючого аналізу.....	130
12.2. Визначення вмісту ЯМ шляхом вимірювання їх власних гамма- випромінювань.....	136
12.3. Контроль відходів. Сегментоване гамма-сканування.....	138
12.4. Аналізовані випромінювання.....	138
12.5. Проведення вимірювань та обробка результатів.....	139
12.6. Контроль відкладень.....	140
12.7. Гамма-спектрометричні виміри збагачення урану.....	143
12.8. Вимірювання відносної інтенсивності гамма-випромінювань ^{235}U та ^{238}U	147
12.9. Неруйнівні вимірювання ізотопного складу плутонію за допомогою гамма-спектрометрії.....	149
12.10. Аналізи розчинів ЯМ. Денситометрія.....	154
12.11. Аналізи розчинів ЯМ. Рентгено-флюоресцентний аналіз(РФА).....	159
12.12. Нейтронні виміри ЯМ.....	163
12.13. Прилади для нейтронних вимірювань ЯМ.....	170
12.14. Метод калориметрії.....	174

Тема 13. Законодавча база обліку та контролю ядерних матеріалів.....	181
Тема 14. Виявлення злочинних чи несанкціонованих дій з використанням ядерних та інших радіоактивних матеріалів поза межами регулятивного контролю.....	219
Перелік посилань.....	230

Перелік скорочень

АЕС	- Атомна електрична станція
ВЗУ	- високозбагачений уран
ДІЯРУ	- Державна інспекція ядерного регулювання України
ГЯП	- Група ядерних постачальників
ДЗП	- довгострокове забезпечення працездатності
ДНЯЗ	- Договір про нерозповсюдження ядерної зброї
ДСЗ	- Державні стандартні зразки
ДСОК	- Державна система обліку і контролю
ЕК	- експортний контроль
ЗБМ	- Зона балансу ядерних матеріалів
ЗВЯЗ	- зони, вільні від ядерної зброї
ЗК	- зареєстрована кількість
ЗМІ	- засоби масової інформації
ІДІЛ	- Ісламська держава Іраку і Леванте
ІР	- інвентаризаційна різниця
КНДР	- Кореїська народно-демократична республіка
КТВ	- ключова точка вимірювань
МАГАТЕ	- Міжнародне агентство атомної енергетики
МБЗ	- матеріально-балансовий звіт
МБП	- міжбалансовий період
МВО	- матеріально відповідальна особа
МЯВ	- мирні ядерні вибухи
НРА	- неруйнуючий аналіз
ОКЯМ	- облік і контроль ядерних матеріалів
ОО	- облікова одиниця
ООН	- Організація об'єднаних націй
ПД	- продукт поділу
ПІВ	- пристрій індикації втручання
РА	- руйнуючий аналіз
РАВ	- радіоактивні відходи
РІК	- робоча інвентаризаційна комісія

РКРО	- режим контролю над ракетними озброєннями
РРП	- радіологічний розпилюючий пристрій
РФА	- рентгено-флюорісцентний аналіз
СФЗ	- система фізичного захисту
СФНК	- список фактично наявної кількості
СНК	- список наявних кількостей
СРСР	- Союз радянських соціалістичних республік
ССП	- сегментований сканувальний пристрій
США	- Сполучені штати Америки
ТБФ	- трибутилфосфат
ТВЗ	- тепловиділяюча збірка
ТВЕЛ	- тепловиділяючий елемент
ФЗ	- фізичний захист
ФІ	- фізична інвентаризація
ФЯБ	- фізична ядерна безпека
ЦК	- центральна інвентаризаційна комісія
ЯЗ	- ядерна зброя
ЯМ	- ядерні матеріали

Вступ

У рамках навчальної дисципліни «Використання обліку та контролю ядерного матеріалу для фізичної ядерної безпеки» розглядається система обліку та контролю ядерних матеріалів, її завдання та функція на об'єктах ядерної галузі та поводження з радіоактивними матеріалами, а також під час транспортування ядерних та радіоактивних матеріалів. Також, деяка увага приділяється питанням виявлення та заходів у відповідь на випадки кримінального чи незаконного вилучення ядерних та радіоактивних матеріалів з-під регулюючого контролю. Наголошується на необхідності встановлення другої лінії захисту у державі, тобто створення ефективних можливостей щодо виявлення та припинення незаконного переміщення ядерних та інших радіоактивних матеріалів на кордоні та всередині держави. Розглядаються фундаментальні елементи, необхідні для розробки та впровадження ефективних стратегій виявлення та обслуговування систем виявлення, а також заходів у відповідь на кримінальне або незаконне вилучення ядерних і радіоактивних матеріалів. Наведені докладні описи всіх аспектів заходів у відповідь включаючи вимірювання радіоактивності та засоби особистого захисту, характеризування місця подій, управління заходами у відповідь і аварійні процедури, радіологічну оцінку, контроль забруднення та надання першої медичної допомоги.

До основних завдань курсу, які мають опанувати студенти, відносять наступні:

- описати завдання системи обліку і контролю ядерних матеріалів (ОКЯМ);
- розібратися як встановлюється ОКЯМ для ядерної або радіологічної установки;
- вивчити основні методи вимірювання та в яких випадках вони застосовуються, а також познайомитися з основними труднощами обліку ядерних матеріалів.

Тема 1. Введення в облік та контроль ядерних матеріалів. Визначення

Необхідність обліку та контролю ядерних матеріалів виникла після появи ядерної зброї та початком її масового поширення/виробництва в економічно та технологічно розвинених країнах, у тому числі в рамках протистояння по осі США-СРСР. Таким чином, виникла проблема ядерного нерозповсюдження, яка не повинна сприяти мирному використанню ядерних технологій (енергетика, промисловість, медицина, космос тощо).

Ідеєю безпечного поводження з ядерними матеріалами (ЯМ) перейнято будь-яке використання ядерної енергії, включаючи ядерну енергетику. Ця ідея є основою для міжнародних угод та національних законів. Вона покладена й у основу закону використання атомної енергії, прийнятого в нашій країні 1995 р. **Безпека ЯМ з погляду суспільства – це контроль над використанням ЯМ і забезпечення виключно мирного їх використання.**

Визначимо, що надалі розумітимемо під терміном ядерні матеріали. Слідуватимемо термінології, визначеної в законі про використання атомної енергії, в якому вводяться три основні види матеріалів:

- ядерні матеріали – будь-який вихідний або спеціальний матеріал, що розщеплюється, наприклад, - плутоній-239; уран-233; уран, збагачений ізотопами 235 і 233 або будь-який матеріал, що містить одну або декілька із зазначених речовин;
- радіоактивні матеріали - джерела іонізуючого випромінювання, ядерні матеріали та радіоактивні відходи;
- радіоактивні відходи (РАВ) – матеріальні об'єкти та речовини, активність радіонуклідів або радіоактивне забруднення яких перевищує межі, встановлені чинними нормами.

Зазначимо, що нас, головним чином, цікавитиме перший вид матеріалів. Крім цього, у нормативних вимогах чітко визначено список ядерних матеріалів, який надалі буде детально розглянутий нами.

Суперечна особливість ЯМ полягає в тому, що поряд із глобальним поширенням мирної ядерної енергетики самі ядерні матеріали не підлягають вільному поширенню через свою потенційну небезпеку бути використаними для створення ядерної зброї (ЯЗ). Ця суперечлива особливість ЯМ лежить в основі так званої проблеми нерозповсюдження.

1.1. Загрози поширення ЯЗ протидіють міжнародні та національні системи гарантій нерозповсюдження, системи експортного контролю

США та СРСР були першими ядерними державами, що розвивали ядерний військовий потенціал і ядерну енергетику і з початку 1960-х рр. постійно розширювалося співтовариство ядерних держав.

У 1960 році своє перше ядерне випробування провела Франція, потім у 1964 р. – Китай. Деякі промислово розвинені країни значно наростили свій технологічний рівень у ядерній галузі та були здатні приступити до створення ядерної зброї. Спостерігалось інтенсивне будівництво ядерних енергетичних установок.

Поширення ядерних технологій у 1950–1960 роках стало викликати занепокоєння світової громадськості щодо розповзання ядерної зброї планетою. Багато країн були готові відмовитися від виробництва власної ядерної зброї, але за умови, що інші держави (передусім сусідні) теж взяли б на себе аналогічні зобов'язання. У цих умовах Ірландією було висунуто проект резолюції ООН щодо нерозповсюдження ядерної зброї. Генеральна Асамблея ООН у 1961 р. одноголосно ухвалила Ірландську резолюцію, яка закликає держави до всебічної протидії поширенню ядерної зброї у світі. Таким чином, ця резолюція показала,

що у світовому співтоваристві склалося розуміння необхідності укладання глобального договору про нерозповсюдження ядерної зброї. Проте, минуло 9 років, як ця резолюція знайшла своє юридично обов'язкове втілення – Договір про нерозповсюдження ядерної зброї (1970 р.).

У 1960-х роках світовим співтовариством було здійснено низку кроків у напрямку обмеження поширення ЯЗ та посилення контролю над використанням ЯМ. У 1963 р. було укладено Договір про заборону ядерних випробувань на землі та в атмосфері. Цей Договір став знаменною перемогою в історії приборкання гонки озброєнь, оскільки став ефективним засобом у зупинці поширення ЯЗ на неядерні держави.

Ядерна загроза, що нависла над світом під час кубинської кризи, підштовхнула держави Центральної та Південної Америки до утворення зони вільної від ядерної зброї. Договір про заборону ядерної зброї в Латинській Америці (Договір Тлателолко, укладений у 1967 р.) забороняє не лише придбання та розробку ядерної зброї в Латинській Америці, а також розміщення ядерної зброї в цьому регіоні іноземним державам.

Першою у 1958 р. предметно поставила перед ООН проблему запобігання ядерній зброї Ірландія. З середини 1960-х рр. Сполучені Штати та Радянський Союз розпочали активне обговорення питань створення всесвітнього договору про нерозповсюдження, який міг би стати основою міжнародного режиму ядерного нерозповсюдження. Ці переговори вилилися, зрештою, на закінчення Договору про нерозповсюдження ядерної зброї (ДНЯЗ), який набув чинності в 1970 р. [1]. ДНЯЗ змістив чинні постулати епохи вільної ядерної торгівлі у бік запровадження конкретних та твердих зобов'язань щодо використання ЯМ.

Визнання переважною більшістю світової спільноти офіційних зобов'язань не розвивати і не набувати ядерної зброї було головним успіхом ДНЯЗ. Не приєдналися до Договору лише Індія, Пакистан, Ізраїль та Куба. Тому, як всесвітній договір, **ДНЯЗ є правовою основою здійснення**

міжнародних гарантій нерозповсюдження. Договір дозволив запровадити у міжнародне та внутрішньодержавне життя норми та правила ядерного нерозповсюдження.

Починаючи з часу набуття чинності (березень 1970 р.), ДНЯЗ грав і продовжує відігравати ключову роль у припиненні поширення ядерної зброї. Він є головним міжнародним договором у галузі ядерного нерозповсюдження. Завдяки ньому міжнародний режим нерозповсюдження стає все більш впливовим та універсальним і, саме завдяки йому, після Херосіми та Нагасакі ЯЗ більше не застосовувалося.

Перші дві статті Договору є ключовими та містять основні зобов'язання ядерних та неядерних держав щодо нерозповсюдження. Ядерні держави зобов'язуються не передавати ЯЗ та технології, а також здійснюють контроль над ними, а неядерні країни зобов'язуються не купувати та не виробляти їх.

У ході переговорів щодо ДНЯЗ сторони, що беруть участь, виходили з принципу обов'язковості контролю за дотриманням ДНЯЗ на території неядерних держав. Цій умові присвячено статтю III п. 1 Договору. Головне в цій статті, що міжнародні гарантії застосовуються до всіх ЯМ у всій мирній ядерній діяльності держави в межах території такої держави, під її юрисдикцією або здійснюваною під її контролем будь-де.

Друга частина статті III Договору вимагає, щоб неядерні країни-імпортери прийняли міжнародні гарантії на ЯМ і обладнання, що поставляється ним, що об'єктивно сприяє поширенню гарантій Міжнародного агентства атомної енергетики (МАГАТЕ). Фактично у статті III п.2 закладено міжнародно-правову основу для всієї існуючої на сьогоднішній день системи контролю за ядерним експортом.

Стаття IV присвячена проблемі мирного використання атомної енергії. Розвиток ядерної енергії, так чи інакше, створює основу для її застосування як у мирних, так і військових цілях. Тому у цій статті викладено зобов'язання

учасників Договору, що використання ядерної енергії в мирних цілях має відбуватися на основі дотримання вимог щодо нерозповсюдження (статей I та II).

Стаття V пов'язана із мирними ядерними вибухами. Ініціатором включення цієї статті до Договору була Мексика. Суть статті полягає в тому, що ядерні держави можуть надати послуги неядерним державам щодо проведення ядерних вибухів у мирних цілях (МЯВ) за їх міжнародного контролю. Однак жодна неядерна держава досі не порушувала офіційно питання про надання послуг з МЯВ. Основними причинами є певний ризик для довкілля та відсутність переконливих потреб у МЯВ. У СРСР за статтями МЯВ, що з'явилися в засоби масової інформації (ЗМІ), застосовувалися з наступними цілями:

- утворення підземних порожнин для цілей зберігання (наприклад, газосховища);
- спрямований вибух для гасіння свердловини, що горить;
- для геолого-розвідувальних робіт (дослідження сейсмохвиль допомагало виявляти корисні копалини).

Делегації Єгипту та Мексики запропонували включити до договору спеціальну статтю про ядерне роззброєння. Питання про те, наскільки певні і тверді зобов'язання з ядерного роззброєння взяли на себе ядерні держави відповідно до статті VI, був і залишається предметом гострих розбіжностей і суперечок. Багато неядерних країн вважають, що ці положення договору щодо переговорів про ефективні заходи щодо припинення гонки ядерних озброєнь у задовільній мірі не виконані.

Стаття VII присвячена зонам, вільним від ядерної зброї (ЗВЯЗ). У ньому підтверджується право держав освіти регіональних ЗВЯЗ. У ЗВЯЗ має

заборонятися як виробництво, придбання чи отримання ЯЗ неядерними учасниками, а й розміщення ЯЗ, належить ядерним державам.

У 1995 р. відбулася конференція з продовження ДНЯЗ, оскільки на той час закінчувався термін дії договору. Головним підсумком конференції стало ухвалення юридично обов'язкового рішення про безстрокове продовження ДНЯЗ. Однак на конференції пролунало занепокоєння деякими невіршеними проблемами, серед них проблема універсальності договору.

Як відомо, режим ядерного нерозповсюдження включає низку міжнародних домовленостей і організацій, в яких беруть участь як ядерні, так і неядерні держави. Режим закріплений у формі взаємопов'язаних міжнародних угод, центральне місце серед яких посідає ДНЯЗ. Однак поряд із ДНЯЗ існують інші важливі угоди:

- угода про гарантії; Статут МАГАТЕ; конвенції, укладені під егідою Агентства та ін;
- внутрішнє законодавство, яке регулює ядерну діяльність у країнах-учасниках режиму;
- з режимом нерозповсюдження пов'язані російсько-американські договори у сфері скорочення ядерної зброї;
- договори про створення зон, вільних від ядерної зброї: Тлателолко, Раротонга, Пеліндаба та Бангкокський договір.

Невід'ємною частиною режиму є низка міжнародних організацій. У тому числі значну роль у підтримці режиму нерозповсюдження відіграє Міжнародне агентство з атомної енергії. За допомогою спеціально розвиненої системи заходів, які називаються гарантіями МАГАТЕ, Агентство контролює і намагається не допустити перемикань ЯМ для немирного використання.

Великий внесок у вирішення проблеми нерозповсюдження роблять міжнародні режими експортного контролю (ЕК). Основним засобом у

здійсненні експортного контролю є обмеження на передачі матеріалів, обладнання та відповідних технологій, що входять до спеціально складених контрольних списків. Кожна країна-учасниця режиму експортного контролю виконує такі умови:

- створює національну правову базу, що відповідає прийнятим домовленостям;
- дотримується принципів режиму ЕК у політиці країни;
- бере участь у форумах країн-учасників.

У ядерній галузі існує три основних режими експортного контролю матеріалів, обладнання та технологій – один у рамках Комітету Цангера і два – в рамках Групи ядерних постачальників (ГЯП). Але в ЕК входить також режим РКРО (режим контролю над ракетними озброєннями), Австралійська група (контроль експорту товарів та технологій хімічного та біологічного профілю) та Вассенаарські домовленості (контроль експорту для звичайних озброєнь, товарів та технологій подвійного використання).

Чому існує занепокоєння світової громадськості щодо можливого немирного застосування ЯМ нині?

На жаль, вирішити проблему ядерного нерозповсюдження повністю і остаточно неможливо, оскільки існує низка проблем. У процесі формування міжнародного режиму ядерного нерозповсюдження для частини цих проблем було знайдено прийнятні рішення, інші вимагають адекватних спільних дій для свого вирішення. Зупинимось докладніше на деяких з них:

1. Серйозною проблемою збереження режиму нерозповсюдження залишається вкрай повільне скорочення арсеналів ядерних озброєнь. Неядерні держави вбачають у цьому відсутність бажання ядерних держав робити реальні значущі кроки у цьому напрямі. До того ж проблема ускладнюється тим, що скорочення ядерних озброєнь – дорогий процес. Тому під час обговорення

результатів дії Договору постійно звучить критика на адресу ядерних держав щодо надто повільного виконання зобов'язання щодо скорочення ядерних озброєнь.

2. В даний час список держав, що не належать до ядерних держав, досить широкий. Тому ухвалення спільних рішень щодо ядерного нерозповсюдження часто зустрічає певні труднощі. Так, наприклад, низка країн мають військові ядерні програми. Деякі з них уже мають ядерну зброю. До таких держав відносять Ізраїль, Індію, КНДР та Пакистан. Ці держави перебувають поза режимом ядерного нерозповсюдження, маючи ядерну зброю, але утримуючись від її бойового розгортання. Інші держави є у певному сенсі «пороговими», оскільки тією чи іншою мірою ініціювали програми створення ядерної зброї, але з різних причин ЯЗ не створили. До таких держав належать Лівія, Іран, Бразилія, Аргентина. Серед порогових держав особливе місце займає Південно-Африканська Республіка, яка створила, а потім (1990 р.) знищила свій арсенал ЯЗ. У більшості випадків прагнення до володіння ЯЗ викликане регіонально-політичними проблемами між державами та спробами набути домінуючої ролі в регіоні.

Треба також не забувати, що деякі держави (Японія, Німеччина, Швеція, Австралія та ін) мають повною мірою економічний і науково-технічний потенціал для створення ЯЗ.

Однак вони твердо дотримуються добровільно ухваленого без'ядерного статусу.

Індикатором ступеня напруги у світі, викликаного наявністю та загрози застосування ЯЗ, є годинник судного дня, який відображає експертну оцінку провідних світових учених про початок ядерної війни. Останнім часом цей годинник показує час від 23:45 до 23:58, що не може не викликати тривогу у простих жителів планети.

Таким чином, можна сформулювати **основну причину, чому необхідний облік і контроль ядерних і радіоактивних матеріалів – це недосконалість світу, в якому ми живемо.** Звідси прямують і основні цілі системи ОКЯМ:

- Вести та своєчасно доповідати достовірну інформацію про місце знаходження, кількість та характеристики ядерних матеріалів.
- Встановити контроль над ядерними матеріалами для забезпечення безперервності знань щодо вдосконалення недопущення та виявлення несанкціонованого вилучення.
- Забезпечити основу для своєчасного розслідування та ухвалення рішення без затримок, які можуть призвести до втрати ядерного матеріалу.
- Надати корисну інформацію для повернення втраченого ядерного матеріалу.

1.2. Основні поняття системи вимірюваного матеріального балансу ядерних матеріалів

Щодо ядерних матеріалів одним із основних є поняття облікової категорії ядерних матеріалів. Якщо матеріал підпадає під облікову категорію, то до нього повинні застосовуватись певні правила обліку, контролю та фізичного захисту. Якщо матеріал не підпадає під облікову категорію, таких жорстких правил до нього не застосовується. Питання у зв'язку з обліковою категорією матеріалів виникає таке: які матеріали слід відносити до облікових?

Обліку та контролю підлягають ядерні матеріали, подані в таблиці 1.1.

Крім основних елементів уран-плутонієвого та торієвого циклів до цього списку входять трансуранові елементи. Крім цього, до списку включені деякі спеціальні неядерні матеріали через їх значущість та використання під час виробництва збройових матеріалів та ядерних вибухових пристроїв. Наприклад, каліфорній-252, літій-6, тритій використовуються при виробництві ядерної та

термоядерної зброї. Тяжка вода застосовується як сповільнювач в ядерних реакторах-наробниках збройового плутонію.

Таблиця 1.1 – Перелік ядерних та спеціальних неядерних матеріалів, що підлягають обліку та контролю

Матеріали	Найменування
Ядерні	Плутоній
	Уран
	Уран-233
	Уран-235
	Торій
	Нептуній-237
	Америцій-241
	Америцій-243
	Каліфорній-252
Спеціальні неядерні	Літій-6
	Тритій
	Дейтерій, за виключенням дейтерію, котрий міститься у важкій воді, яка використовується у якості сповільнювача в ядерних реакторах
	Важка вода

Предметом міжнародних гарантій з боку МАГАТЕ є список ядерних матеріалів, близький до розглянутого вище.

Облік здійснюється за вагою ЯМ: для урану, плутонію – у грамах, для торію – у кілограмах. Ядерні матеріали підлягають державному обліку та контролю, якщо значення їх мас, що перебувають на підприємстві, що транспортуються на одному транспортному засобі, дорівнюють або перевищують мінімальні кількості, як зазначено нижче.

Державному обліку підлягають ЯМ в будь-якому фізичному стані або хімічних сполуках [2], крім:

- ЯМ, що містяться в руді під час її видобутку або обробки;
- плутонію з концентрацією ізотопу плутонію-238, яка перевищує 80%;

- джерела іонізуючого випромінювання, що містять плутоній-239 і звільнені від регулюючого контролю за активністю;
- виробів, на які в початкових документах відсутні дані про кількість ЯМ, а вагові значення, отримані за довідковими даними чи за результатами розрахунків, є значно меншими за 1 г і округлюються до нуля за правилами математичного округлення;
- виробів, вага ЯМ у яких за даними початкових документів менша за 1 грам і округлюється до нуля за правилами математичного округлення.

Якщо маса ядерних матеріалів на підприємстві менша від зазначених вище значень, то вони підлягають обліку та контролю відповідно до вимог, що пред'являються до обліку радіоактивних речовин.

Взяття на облік ЯМ здійснюється за даними початкових документів за його фактичним місцезнаходженням та за фактом його надходження на територію ліцензіату незалежно від бухгалтерського обліку; у разі, якщо початкові документи відсутні - відразу після визначення складу та кількості ЯМ за результатами його аналізу та складання відповідних документів.

Розглянемо деякі основні визначення в області ОКЯМ.

Зона балансу ядерних матеріалів (ЗБМ) - ділянка території, на якій ведеться державний облік ядерних матеріалів і відповідно до встановленої процедури визначається фактично наявна кількість ядерних матеріалів та їх кількість при кожній передачі в зону (із зони) балансу ядерних матеріалів;

Контроль ядерних матеріалів - контроль за наявністю та переміщенням ядерних матеріалів з метою своєчасного виявлення та запобігання їх втрати або несанкціонованого використання, який здійснюється суб'єктами державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів у межах їх повноважень;

Облік ядерних матеріалів - визначення фактично наявної кількості ядерних матеріалів, складення, реєстрація та ведення облікових та звітних документів;

Фізична інвентаризація - визначення фактично наявної кількості на даний момент ядерних матеріалів у відповідній зоні балансу ядерних матеріалів.

Аномалія - це незвичайні обставини, які вказують прямо або викликають підозру, що:

- відбувся несанкціонований доступ до ЯМ або їх втрата;
- кількість ЯМ у зоні балансу ЯМ не відповідає зареєстрованій кількості ЯМ;
- вказано в документах відправника кількість ЯМ не відповідає кількості ЯМ, отриманій одержувачем.

Високкозбагачений уран – уран, який містить 20% або більше ізотопу урану-235, або урану-233, або їхньої суміші.

Низькозбагачений уран – уран, який містить менше 20% ізотопу урану-235, або урану-233, або їхньої суміші.

Засоби збереження та спостереження – засоби, які забезпечують збереження та спостереження за ЯМ (засіб індикації втручання, відеокамера, пристрій радіаційного контролю тощо) та доповнюють заходи з обліку ЯМ, а також забезпечують їх збереженість.

Засіб індикації втручання – технічний засіб або пристрій, призначений для виявлення несанкціонованого доступу до ЯМ та який має унікальний номер;

Початкові документи – документи, на яких базується первинна інформація про кожну партію ЯМ (супровідна та технічна документація, технічні паспорти, протоколи вимірювань, транспортні накладні).

Інші терміни вживаються у значеннях, наведених в Угоді між Україною та Міжнародним агентством з атомної енергії щодо застосування гарантій у зв'язку з Договором про нерозповсюдження ядерної зброї ([995_028](#)), Законом України

"Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку" ([39/95- ВР](#)), Положення про державну систему обліку та контролю ядерних матеріалів, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 8.12.96 N 1525 ([1525-96-п](#)) (у редакції постанови Кабінету Міністрів України від 25.03.2009 N 257) ([257-20 д](#)).

Контрольні запитання

1. Які сучасні проблеми режиму ядерного нерозповсюдження можна сформулювати?
2. Які з цих речовин підлягають обліку в ДСОК: 10 кг металевого ^{238}U , оксид природного урану U_3O_8 масою 1 тонна, масою 1 гр ^{239}Pu у складі ДІВ, ^{232}Th масою 50 тонн?
3. Вкажіть одиниці виміру кожного з матеріалів, що діляться, прийняті в ДСОК.
4. Паливо з яким збагаченням використовується у дослідницьких реакторах та реакторах типу ВВЕР?
5. Що включають в себе ядерні технології?

Тема 2. Завдання системи ОКЯМ. Категоризація ядерних матеріалів

Ядерні матеріали класифікують за категоріями з метою забезпечення диференційованого підходу до визначення методів та засобів їх обліку, контролю та захисту. Це дозволяє зосередити увагу насамперед на тих ядерних матеріалах, які можна досить просто переводити в збройові форми.

Розглянемо, за якими правилами будується категоризація ядерних матеріалів у світі на прикладі системи категоризації ядерних матеріалів у США, розробленої для використання на підприємствах Міністерства енергетики.

У розпорядженні Міністерства енергетики США є мережа національних лабораторій та промислових підприємств. Воно також опікується питаннями озброєнь (ядерна зброя). Саме до них має відношення ця категоризація.

Категоризація установок, що належать до Міністерства енергетики США, здійснюється відповідно до двох параметрів.

Перший параметр – кількісний. Залежно кількості ядерних матеріалів установка, що містить певну кількість ЯМ, відноситься до I, II, III, IV категорії. А другий параметр використовується для характеристики привабливості ядерних матеріалів. Привабливість оцінюється з погляду швидкості переведення ядерного матеріалу у форму, придатну виготовлення ядерної зброї.

Слід звернути увагу, що опромінене паливо має найменший рівень привабливості. Причина проста. Його самозахищеність (висока активність), по суті, виключає можливість розкрадання або можливість якогось неправильного використання. Те саме стосується і низькозбагаченого урану, тому що для його безпосереднього використання в ядерній зброї потрібно значне збагачення.

2.1. Категоризація ядерних матеріалів в Україні

Категорії ядерних матеріалів встановлюються залежно від форми продукту, що містить ЯМ типу ЯМ та їх маси. Прийнято категоризацію на основі Конвенції про фізичний захист ядерного матеріалу та ядерних установок [3]. Відповідно до категоризації ядерних матеріалів у нас в країні встановлюються вимоги до їх фізичного захисту, обліку та контролю. Таким чином, зазначені категорії ядерних матеріалів використовуються у системі фізичного захисту, тоді як у системі ОКЯМ використовується інша класифікація, яка більше відповідає завданням державної системи обліку і контролю (ДСОК) і буде обговорюватися далі.

Можливі випадки, коли в зоні, що розглядається, знаходяться різні продукти, різні типи ЯМ. У цій ситуації, визначаючи категорію наявних ЯМ, слід виходити із сумарної маси ядерних матеріалів кожного продукту та зазначених у таблиці 2.1 кількісних меж мас ядерних матеріалів тих продуктів, які потрапляють у вищу категорію.

Усі ядерні матеріали можна віднести до однієї з наступних двох форм:

Штучна форма ЯМ – це очохловані матеріали. Вони мають свій унікальний ідентифікаційний номер. Прикладами штучної форми ЯМ є твели, тепловиділяючі зборки.

Ядерні матеріали в балк-формі – це будь-які ЯМ, які не очохловані, тобто знаходяться у формі, яка не має оболонки: гази, рідини, порошки, пігулки. Постійна ідентифікація таких матеріалів неможлива, оскільки при знаходженні в контейнерах їх кількість та склад можуть бути змінені.

Залежно від наявної форми ЯМ їхнього обліку застосовують різні засоби виміру та ідентифікації. Наприклад, до ядерних матеріалів в балк-формі застосовуються руйнівні методи з взяттям зразків та їх подальшим аналітичним дослідженням. А до ЯМ у формі облікових одиниць ці методи не

застосовуються. Зате для їх вимірювання часто використовують неруйнівні методи.

Таблиця 2.1 – Класифікація ядерних матеріалів [2]

Матеріал	Форма	Категорії		
		I	II	III ^{c)}
Плутоній ^{a)}	Неопромінений ^{b)}	2 кг або більше	Менше 2 кг, але більше 500 г	500 г або менше, але більше 15 г
Уран-235	Неопромінений ^{b)} -			
	уран, збагачений ізотопом U-235 від 20% або вище	5 кг або більше	Менше 5 кг, але більше 1 кг	1 кг або менше, але більше 15 г
	уран, збагачений ізотопом U-235 від 10 до 20%		10 кг або більше	Менше 10 кг, але більше 1 кг
	уран зі збагаченням ізотопу U-235 вище природнього але нижче 10%			10 кг або більше
Уран-233	Неопромінений ^{b)}	2 кг або більше	Менше 2 кг, але більше 500 г	500 г або менше, але більше 15 г
Неопромінене паливо			Збіднений або природний уран, торій, або слабкозбагачене паливо (з вмістом ізотопів, що діляться, менше 10% ^{d) e)}	

a) Весь плутоній, за винятком плутонію, ізотопна концентрація якого перевищує 80% плутонію-238.

b) Матеріал, що не опромінений у реакторі, або матеріал, опромінений у реакторі, але з рівнем опромінення, рівним або менше 100 рад/годину на відстані одного метра без захисту.

c) Кількість, що не підпадає під категорію III, та природний уран слід захищати, виходячи з міркувань практичної доцільності.

d) Хоча рекомендується цей рівень захисту, держави можуть, виходячи з оцінки конкретних обставин, визначити іншу категорію фізичного захисту.

e) Інше паливо, яке до опромінення входило, залежно від початкового складу матеріалу, що ділиться, в категорію I або II, може бути знижено за рівнем не більше ніж на одну категорію, якщо рівень випромінювання палива перевищує 100 рад/годину на відстані одного метра без захисту.

2.2. Партія ядерних матеріалів

Винятково важливе поняття, яке використовується і в старій (бухгалтерській), і в новій системі – це партія ядерних матеріалів. За допомогою цього поняття в новій системі обліку (як, втім, і в старій) здійснюється реєстрація ЯМ у штучній та у балк-формі.

Партія ЯМ – це група однотипних виробів, які містять ЯМ, параметри яких визначаються єдиним комплексом вимірів.

Однотипність означає, що, наприклад, однієї партії не допускаються вироби з різними збагаченнями.

Кожна партія ЯМ містить п'ять елементів даних:

- ім'я партії ЯМ. Найменування партії – ідентифікатор, який містить певну кількість символів. В ідентифікаторі вказується код виробника, порядковий номер партії та ін. Таким чином, за допомогою імені передбачається унікальна ідентифікація партії ЯМ;
- кількість однотипних виробів, що у партії. Часто кількість виробів дорівнює 1. Для позначення партії ЯМ у разі використовують термін «облікова одиниця». Приклади партій:
 - твел - кількість виробів у партії дорівнює 1;
 - Контейнер з UF_6 – кількість виробів у партії також 1;
 - П'ять контейнерів із порошком UO_2 . Під партією розуміється ця група контейнерів, кожен із яких сприймається як виріб.
- лігатурна маса ЯМ (Млиг) – маса матеріалу, що містить хімічну або фізичну композицію ЯМ з деякою інертною речовиною. Наприклад, під лігатурною масою ЯМ, що знаходяться в сплаві U-Al, що використовується як паливо деяких дослідницьких реакторів, розуміється маса сплаву U-Al. Під лігатурною масою ЯМ, що у вигляді хімічної сполуки двоокису урану (паливо легководних енергетичних реакторів), розуміється маса сполуки UO_2 ;

- маса елемента (Мел). Наприклад, для з'єднання UO_2 маємо елементні маси: $M_{ел} = MU$, $M_{ел} = MO$;
- маса ізотопу (МІЗ). При обліку, в першу чергу, розглядають ізотопи, що діляться: для урану - ізотоп $U-235$, а для плутонію ізотопи $Pu-239$, 241 . Іноді, замість маси $U-235$ розглядається аналогічний параметр – збагачення.

Зазначені п'ять параметрів партії ЯМ є ключовими для обліку та підбиття балансу ЯМ. Ці параметри застосовуються до ЯМ як і форми штучних одиниць, і у балк-формі. Однак для матеріалів у штучній формі всі дані, які супроводжують неопромінений матеріал – це дані заводу-виробника, а для матеріалів у балк-формі дані згодом, як правило, змінюються.

Контрольні запитання

1. Як визначається категорія ЯМ, якщо в ЗБМ одночасно знаходяться різні ізотопи, що діляться, з різною масою?
2. Для яких категорій ЯМ застосовуються "засоби індикації втручання"?
3. Чи підлягає обліку та контролю ЯМ, що містить суміш ізотопів ^{235}U та ^{239}Pu у кількості 14.5 грамів?
4. До якої категорії відноситься неопромінений ^{239}Pu у кількості 2.6 грамів у ДСОК?
5. Як узгоджуються (поєднуються) між собою "зони обмеженого доступу" та категорії ЯМ, радіоактивних відходів та джерел радіоактивного випромінювання?

Тема 3. Огляд основних елементів системи ОКЯМ

Залежно від території застосування Система обліку та контролю може бути міжнародною, державною та об'єктовою. Нас насамперед у рамках цієї оглядової лекції цікавить об'єктовий рівень, тобто застосування системи ОКЯМ на ядерних або радіаційно небезпечних об'єктах.

Загалом для ефективного функціонування система ОКЯМ повинна включати вісім основних елементів [4]:

- Управління;
- Ведення обліку;
- Фізична інвентаризація;
- Вимірювання;
- Контроль ядерних та радіоактивних матеріалів;
- Передача (транзакція) ядерних матеріалів;
- Виявлення та реагування, розслідування несанкціонованих дій;
- Оцінка ефективності системи.

Елемент системи ОКЯМ «Управління» на об'єкті (підприємстві) реалізується через програму, яка за сучасними уявленнями включає наступне:

- Оптимальну та адекватну організаційну структуру;
- У рамках організаційної структури має місце чіткий розподіл функцій, повноважень, прав та відповідальності посадових осіб;
- Виділені зони балансу матеріалу;
- Програму розвитку;
- Посадові інструкції, процедури та документообіг;
- Управління конфігурацією;
- Підбір кадрів, навчання та тренування.

Для досягнення наступних цілей:

- визначення стратегії фіззахисту;
- відстеження при отриманні, переміщенні, використанні в технологічному ланцюжку на виробництві, та відправленні ядерного матеріалу з підприємства кудись;
- локалізації ядерного матеріалу;
- підвищення здатності своєчасного виявлення несанкціонованого використання чи переміщення ядерного матеріалу.

На об'єктах виділяються окремі простори (приміщення, частини приміщень), тобто **зони балансу матеріалу**, призначені для:

- визначення кількості ядерного матеріалу при кожному його переміщенні в та із зони;
- визначення фізичного запасу ядерного матеріалу у будь-який момент часу, коли потрібно, або у відповідності до процедур, щоб можна було встановити матеріальний баланс.

Більш детально зони балансу матеріалу будуть розглянуті у наступних лекціях.

Ведення обліку ЯМ має на увазі:

- Ведення записів про запас ядерних матеріалів, транзакції та уточнення в частині:
 - кількості та місце знаходження ЯМ на об'єкті;
 - переміщення ЯМ по об'єкту.
- Структура обліку ЯМ;
- Проведення перевірок та звіряння балансів таким чином, щоб одна особа не могла вносити незатверджені зміни до системи обліку;

- Виявлення фальсифікації даних чи несанкціонованого втручання;
- Початкова та оперативні записи;
- Зберігання резервних копій записів.

Завданням **фізичної інвентаризації** є підтвердження того, що ядерні матеріали знаходяться у певних для них місцях та у кількостях, що відповідають обліковим записам. Основною метою фізичної інвентаризації є своєчасне виявлення несанкціонованого переміщення ядерних матеріалів.

Для підприємств, що по-різному використовують ядерні матеріали, існують різні підходи до фізичної інвентаризації:

- Підприємства з штучними ЯМ:
 - Визначити місце локалізації / порахувати ЯМ;
 - Порівняти результат із обліковими записами;
 - Виявити відсутній штучний ЯМ.
- Підприємства з ЯМ у балк-формі:
 - Виміряти запаси ЯМ;
 - Виміряти ЯМ у технологічному процесі;
 - Визначити неврахований ЯМ.
- Підприємства не пов'язані з ядерними установками чи штучними ЯМ:
 - Оцінити неврахований ЯМ та порівняти результат зі статистичними межами.

Тут, неврахований матеріал (Material Unaccounted For) являє собою різницю між обліковим записом та фізичною кількістю:

$$MUF = (BI + X - Y) - PB, \quad (3.1)$$

де PB – попередній обліковий запис (тобто попередній результат фізичної інвентаризації у вигляді запису), X – надходження ЯМ до ЗБМ за звітний період,

Y – спад ЯМ у ЗБМ за звітний період, VI – поточний запас ЯМ (поточний результат фізичної інвентаризації)

Іноді неврахований матеріал називають інвентаризаційною різницею (IP). Ці два поняття є еквівалентними (див. формулу 6.1).

Що означає оцінка та порівняння результату зі статистичними межами:

- Грунтуючись на знанні невизначеностей (наприклад, похибки вимірів, похибки виготовленого продукту), що виникають у технологічному процесі та оцінка їх впливу на фізичну інвентаризацію стосовно:
 - до окремих періодів між фізичною інвентаризацією,
 - до періоду часу, що охоплює кілька послідовних фізичних інвентаризацій (з метою оцінки трендів).

Як здійснюється оцінка неврахованого ЯМ? Для відповіді на це питання необхідно встановити причини його виникнення, оскільки практичний досвід показує, що невраховані ЯМ не рівні “0” для процесів з балк-ЯМ:

- Похибки виміру;
- Невимірювані втрати;
- Помилки/відмови технологічного процесу;
- Порухення технологічного процесу;
- Людський фактор;
- Неправильне налагодження/налаштування обладнання, в тому числі вимірювальних приладів;
- Крадіжка / диверсія.

Нижче наведено огляд наступного елемента ОКЯМ – «вимірювання».

- У рамках цього елемента вирішується завдання поточних вимірювань параметрів та їх невизначеностей для:

- Запасу ЯМ;
- Отримання та відправлення ЯМ;
- Виробленого або занепалого ЯМ.
- Для реалізації вищезазначеного завдання на підприємстві діє програма контрольних вимірювань, яка:
 - встановлює та керує вимогами щодо вибору та кваліфікації методів вимірювання;
 - забезпечує необхідну якість вимірювань для цілей ОКЯМ (наприклад, відповідність цілям точності вимірювань).

Елемент **«Контроль ядерних матеріалів»** спрямований на контроль місцезнаходження ядерних матеріалів, забезпечення доступу до них, а також використання ядерних матеріалів та інформації про них. Для реалізації цих завдань передбачені різні огорожувальні системи та системи контролю та спостереження, які:

- забезпечують використання, переробку чи зберігання ядерних матеріалів лише у спеціально призначених при цьому місцях;
- встановлюють межі зон, де розміщуються ядерні матеріали, забезпечують контроль меж зон та використання ядерних матеріалів у межах цих кордонів;
- забезпечують доступ без супроводу до зон зі зберіганням та використанням ядерних матеріалів тільки уповноваженого персоналу;
- реалізує механізм своєчасного виявлення несанкціонованого доступу до ядерних матеріалів, що зберігаються і перевозяться.

Таким чином, контроль ядерних матеріалів включає наступне:

1. Огородження ядерного матеріалу

- огороження відповідно до класифікації зон балансу матеріалу або меж фіззахисту,
2. Контроль доступу до ядерних матеріалів
- Заходи, спрямовані на організацію доступу до ядерних матеріалів, які розробляються та діють на основі комплексу технологій та процедур.
3. Контроль та спостереження
- Автоматичне та/або пряме візуальне спостереження,
4. Виявлення та оцінка
- Поєднання комплексу технологій та процедур для сьогочасного розкриття та підтвердження несанкціонованого доступу та використання ядерних матеріалів,
 - Застосування різноманітних пломбуючих пристроїв - Tamper-Indicating Devices (TID) або пристроїв індикації втручання (ПІВ).
 - Моніторинг ЯМ
 - Моніторинг технологічного процесу з ядерним матеріалом

Елемент « **Передача ядерних матеріалів** » має на увазі:

- Ведення відповідних облікових записів у системі обліку при прийманні та надсиланні ЯМ;
- Використання вимірних чи розрахункових даних;
- Проведення приймальних перевірок, спрямованих на підтвердження:
 - відповідності облікової одиниці, серійного номера;
 - цілісності пломби;
 - результатів вимірів.
- Оцінку отриманих невідповідностей між даними відправки та приймального контролю.

У разі виявлення невідповідностей у результаті перевірок між обліковими записами та реально вимірними ядерними матеріалами запускається процедура розслідування згідно з наступним елементом системи ОКЯМ – **«Виявлення/розслідування невідповідностей»**, що включає:

- Ознаки несанкціонованого переміщення ядерного матеріалу, наприклад:
 - Відсутність облікової одиниці ЯМ у передбаченому місці;
 - Перевищення встановлених меж для ЯМ, що не враховуються.
- Ознаки несанкціонованих дій щодо ЯМ:
 - Несанкціонований доступ до зони;
 - Порухення правил спостереження та контролю.
- Реагування на порушення:
 - Оповіщення персоналу фіззахисту та координація реагування.

Для підтримки та підтвердження високої ефективності системи обліку та контролю ядерних та радіоактивних матеріалів необхідно проводити періодичну оцінку та перевірку системи, для цього існує такий елемент як **«Оцінка та перевірка ефективності»**, який ґрунтується на:

- оцінці та валідації процедур, обладнання та персоналу;
- вимірі ефективності, включаючи:
 - функціональні тести (підтвердження працездатності);
 - випробування обладнання;
 - випробування в обмеженому обсязі (наприклад, окремих підсистем, обладнання);
 - комплексні випробування (наприклад, інтегровані з тренуванням фіззахисту).
- розробці методології та засобів контролю при випробуваннях, що залежить від типу випробувань та тестованого елемента системи.

Облік специфіки системи ОКЯМ для ядерних реакторів

Безліч майданчиків не мають складних систем обліку та контролю ядерних матеріалів, проте, розглянуті вище принципи та елементи є застосовними:

- облік та контроль всього палива;
- паливні завантаження;
- передача ядерних матеріалів;
- переміщення ядерних матеріалів на майданчику;
- доступ до зони обмеженого доступу.

Експлуатаційна захищеність при плануванні перевантажень ядерного палива

- порядок та послідовність завантаження свіжого палива в активну зону;
- доставка ядерного палива;
- приймання та зберігання ядерного палива;
- верифікація та моніторинг перевантаження палива;
- правило 2-х осіб;
- вивіз відпрацьованого ядерного палива;
- заходи фізичної ядерної безпеки.

Контрольні запитання

1. Які елементи системи ОКЯМ із розглянутих у лекції реалізовані в державній системі обліку та контролю?
2. Які ще ознаки несанкціонованого переміщення ядерного матеріалу можна визначити?

Тема 4. Взаємозв'язки між ОКЯМ та фізичною ядерною безпекою

Нагадаю, що така сфера людської діяльності як облік та контроль ядерних матеріалів з'явилася як засіб контролю за ядерною зброєю та підтвердження мирного використання ядерних матеріалів у рамках держав.

У сучасному світі з'явилися нові тенденції, пов'язані з концентрацією капіталу в окремих руках, корпорацій та терористичних організацій. Останні роблять спроби створити свою власну державу – ІДІЛ. Крім створення власних приватних армій робляться спроби заволодіти зброєю масового ураження. Звідси виникають **НОВІ ЗАГРОЗИ**:

- Можливість того, що недержавний суб'єкт може отримати чи створити ядерну зброю;
- Можливість того, що недержавний суб'єкт може сконструювати та підірвати радіологічний розпилюючий пристрій (РРП) з наміром розсіяти ядерний чи інший радіоактивний матеріал, щоб знищити безневинних людей;
- Реагування на нову загрозу потребує нового підходу та нових заходів протидії.

Це вимагає посилення ОКЯМ та створення нового підходу, що знайшло своє відображення у контролі виконання Угоди про гарантії, яка вимагає, щоб кожна країна, яка підписала Угоду:

- Організувала Державну систему обліку та контролю ядерних матеріалів;
- Надавала в МАГАТЕ періодичні звіти про інвентаризацію ЯМ та відповідної діяльності;
- Дозволяла МАГАТЕ проводити аналіз та інспекційні перевірки.

Цей підхід є фундаментом системи обліку та контролю ядерних матеріалів на державному рівні.

Як держави мають реагувати на загрозу, пов'язану з наміром недержавного суб'єкта викрасти ядерний матеріал та використати його для виготовлення бомби чи створення РРП?

Яких додаткових захисних заходів необхідно вжити?

Які додаткові захисні заходи потрібні для забезпечення захисту від внутрішнього порушника (особи, яка працює на ядерному об'єкті та має санкціонований доступ до ядерного матеріалу або інформації), який має намір викрасти ядерний матеріал або допомагає комусь поза об'єктом зробити таке розкрадання?

Як гарантії, розроблені для протидії загрозі, яку представляє держава, яка не визнає міжнародне право, можуть бути посилені у відповідь на нову загрозу, тобто на загрозу, яка походить від недержавного суб'єкта?

Один із можливих підходів:

- Реагувати на нову загрозу, розширюючи цілі обліку і контролю ядерних матеріалів, передбачаючи в них забезпечення фізичної ядерної безпеки.

Важливість використання ОКЯМ як елемент фізичної ядерної безпеки у справі протидії новій загрозі була визнана нещодавно прийнятими міжнародними резолюціями та заявами:

- 2004 р. – Резолюція Радбезу ООН 1540 – Облік та контроль ядерних матеріалів важливі для фізичної ядерної безпеки.
- 2005 р. - Міжнародна конвенція щодо боротьби з актами ядерного тероризму – Держави повинні розробити заходи щодо захисту ядерних та інших радіоактивних матеріалів від несанкціонованого використання.
- 2006 р. – Глобальна ініціатива боротьби з ядерним тероризмом – Держави повинні розробити, за необхідності, і вдосконалити системи обліку, контролю та фізичного захисту ядерних та інших радіоактивних матеріалів.
- Заяви, ухвалені на Самітах з фізичної ядерної безпеки:

- 2010 р. (Вашингтон) – було визнано “важливість обліку ядерних матеріалів при забезпеченні фізичної ядерної безпеки.”
- 2012 р. (Сеул) – учасники закликали всі держави зміцнювати свої системи фізичної безпеки та обліку ядерних матеріалів.
- 2014 р. (Гаага) – було визнано “крайню важливість” забезпечення безпеки, консолідації та обліку високозбагаченого урану (ВОУ) та виділеного плутонію. Крім того, “Оператори ядерних об’єктів несуть основну відповідальність за забезпечення збереження своїх ядерних матеріалів і власними силами відіграють важливу роль у підтримці працездатності та зміцненні системи фізичної ядерної безпеки. Системи забезпечення безпеки операторів повинні бути ефективними та робити максимальний наголос на ефективній культурі безпеки, фізичному захисті та обліку матеріалів.”
- 2016 р. (Вашингтон) – У Комюніке було підтверджено “основну відповідальність держав, згідно з їхніми відповідними зобов’язаннями, за постійну підтримку ефективної безпеки всіх ядерних та інших радіоактивних матеріалів, включаючи ядерні матеріали, що використовуються в ядерній зброї, а також ядерних установок, що знаходяться під них контролем.” У Комюніке також зазначається, що “Ще доведеться докласти багато зусиль, щоб запобігти отриманню недержавними суб’єктами ядерних та інших радіоактивних матеріалів, які можуть бути використані у зловмисних цілях”.

Таким чином, відповідно до цього підходу всі дії, які потрібно вжити, включають вдосконалення об’єктових систем ОКЯМ:

- Організація захисту ядерних матеріалів шляхом зведення стін, огорож, сховищ та інших перешкод – очевидний спосіб зберегти їх у межах ядерного об’єкта.

- Але стіни та паркани не можуть захистити від внутрішнього порушника, який має санкціонований доступ до ядерного об'єкта, ядерного матеріалу на ньому та інформації про нього.
- Програма ОКЯМ, яка існує на об'єкті, може бути вдосконалена з метою стримування та виявлення дій внутрішнього порушника, який має намір викрасти ядерний матеріал або сприяти зовнішньому порушнику.
- Якщо виникло питання про зникнення або розкрадання ядерних матеріалів з об'єкта, таку проблему можна вирішити лише у разі наявності захищених облікових записів про кількість та місцезнаходження ядерних матеріалів.
- Записи будуть доступні, якщо на об'єкті було реалізовано систему ОКЯМ, що відповідає вимогам фізичної ядерної безпеки.

Передмова до Рекомендацій з фізичної ядерної безпеки щодо фізичного захисту ядерних матеріалів та ядерних установок (INFCIRC/225/Rev5 [5]) гласить:

- "У нинішній глобальній ситуації не можна виключати можливість того, що ядерний або інший радіоактивний матеріал може бути використаний у зловмисних цілях."
- Підхід МАГАТЕ до забезпечення фізичної ядерної безпеки комплексний.
- Діючий національний режим фізичної ядерної безпеки будується на
 - реалізації відповідних міжнародних правових документів;
 - ефективної нормативно-правової бази;
 - захисту інформації;
 - фізичний захист;
 - обліку та контролю матеріалів;
 - виявлення нелегального обороту ядерних матеріалів та реагування;

- національний план реагування та надзвичайних заходів.
- Фізична ядерна безпека – це фізичний захист.
- Традиційні системи ОКЯМ були створені з метою забезпечення звітності у системі міжнародних гарантій для вирішення проблеми перемикання ядерних матеріалів державою для використання з метою розробки ядерної зброї.
- Основи традиційної системи ОКЯМ закладені публікацією Структура та зміст угод між Агентством та державами, які вимагаються у зв'язку з Угодою про нерозповсюдження ядерної зброї, INFCIRC/153 (виправлене видання).
- Ці системи розроблялися до розповсюдження персональних комп'ютерів, коли ведення обліку здійснювалося за допомогою ручки та паперу – у кращому випадку із використанням ручного калькулятора.
- Угода вимагає від держави створити державну систему обліку та контролю.

У структурі ДСОК забезпечуються такі основні елементи, перелічені в документі INFCIRC/153 [6]:

- Створення зон балансу матеріалу;
- Системи вимірювання для визначення кількості отриманих, вироблених, відвантажених, загублених або іншим чином вилучених із інвентарної кількості ядерних матеріалів, а також їх інвентарних кількостей;
- Оцінка прецизійності та точності вимірювань та оцінка похибки вимірювань;
- Процедури проведення фізичних інвентаризацій;
- Процедури визначення, розгляду та оцінки розбіжностей у вимірах відправника та одержувача;
- Процедури оцінки накопичень незмірних інвентарних кількостей та незмірних втрат;

- Система документації та звітів, що підтверджує для кожної зони балансу матеріалу інвентарні кількості ядерних матеріалів та зміни в цих інвентарних кількостях, включаючи надходження матеріалу до ЗБМ або їх переміщення із ЗБМ;
- Положення, що забезпечують правильне застосування процедур та заходів обліку;
- Процедури надання звітів до МАГАТЕ.

Докладніше підхід у рамках режиму гарантій описаний у Довіднику з обліку ЯМ [7]:

- Основним приводом для стурбованості у системі гарантій є кількості ядерних матеріалів, необхідних для виробництва ядерної зброї («значні кількості»).
- Для системи фізичної безпеки малі кількості важливі як і значні кількості.
- З погляду системи гарантій, важлива кількість плутонію, тобто його значуща кількість, становить 8 кілограмів (свого часу ця кількість розглядалася як необхідна для створення ядерної зброї).
- З погляду фізичної безпеки втрата контролю над 500 грамами плутонію є основою спрацьовування сигналізації, причому розкрадання лише одного грама плутонію є приводом для занепокоєння.
- ОКЯМ у системі гарантій має справу зі значними кількостями.
- А що ж робити з кількостями, які не досягають значних величин?

Відділ фізичної ядерної безпеки МАГАТЕ розробив керівний документ, який описує можливі вдосконалення системи ОКЯМ для її використання з метою фізичної ядерної безпеки: видання серії з фізичної ядерної безпеки № 25-

G, Застосування обліку та контролю ядерних матеріалів з метою забезпечення фізичної ядерної безпеки (ФЯБ) на установках, опубліковане в 2015 року.

- Багато елементів системи ОКЯМ, що сприяють розв'язанню задач ФЯБ, ідентичні елементам, що використовуються в системі гарантій (і перерахованим у документі [6]).
- Нове видання з фізичної безпеки рекомендує запровадження додаткових елементів системи ОКЯМ, а також посилення деяких традиційних елементів системи ОКЯМ.
- Видання наголошує на контролі ядерних матеріалів.
- Видання наголошує на важливості документів обліку, які мають бути повними та актуальними.

Для того, щоб відповідати сучасним викликам Програма ОКЯМ, яка вирішує завдання фізичної ядерної безпеки, повинна включати (в тому числі) такі елементи та властивості, багато з яких перетинаються з вимогами режиму гарантій:

- Актуальна інформація про кількість/облікові одиниці ядерних матеріалів та місця зберігання кожної облікової одиниці ЯМ;
- Здатність на вимогу розробити актуальний перелік ядерних матеріалів (тобто серйозна залежність від комп'ютерів);
- Повна документація обліку всіх дій з ядерними матеріалами, у тому числі їх приймання, переміщення в межах установки або ЗБМ, інвентаризацій (за кількістю та місцезнаходженням окремих облікових одиниць), використання, відвантаження тощо;
- Здатність відстежувати використання, переміщення та зберігання ядерних матеріалів;

- Документальний облік переміщень ядерних матеріалів у межах установки або окремих ЗБМ, що дозволяє швидко визначити місцезнаходження облікових одиниць;
- Поділ ЗБМ на зони меншого розміру для підвищення ефективності контролю та звуження рамок розслідування;
- Структура управління з чітким розподілом обов'язків;
- Підготовлений та кваліфікований керівний та лінійний персонал;
- Письмові процедури з інструкціями з усіх аспектів програми ОКЯМ;
- Системи вимірювання всіх ядерних матеріалів на установці;
- Заходи контролю якості вимірювань, у тому числі визначення похибки вимірювань;
- Фізичні інвентаризації не рідше одного разу на 12 місяців;
- Звірка результатів фізичних інвентаризацій з даними документів обліку (zareєстрованими інвентарними кількостями) та врегулювання всіх розбіжностей;
- Програма регулярного контролю випадкової вибірки облікових одиниць, що знаходяться на зберіганні, з метою підтвердження їх ідентифікаційних даних та місцезнаходження у проміжках між фізичними інвентаризаціями;
- Програма моніторингу ядерних матеріалів у процесі обробки з використанням засобів статистичної оцінки для порівняння різниці між кількостями матеріалу на вході та виході з процесу із середніми показниками такої різниці (за умови стабільності технологічного процесу);
- Оцінка та розслідування різниць між даними відправника та одержувача;
- Розслідування та врегулювання ознак зникнення матеріалу та інших розбіжностей;

- Механізми адміністративного та технічного контролю, що обмежують доступ до даних про ядерні матеріали (дані ОКЯМ) навколо уповноважених співробітників;
- Механізми адміністративного та технічного контролю, що обмежують доступ до ядерних матеріалів навколо уповноважених співробітників, які виконують санкціоновані операції;
- Засоби, що перешкоджають проникненню несанкціонованих осіб у незачинені або відкриті сховища без виявлення;
- Заходи, що не дозволяють одній фізичній особі самостійно отримати доступ до контрольованої зони (правило двох осіб);
- Заходи щодо обмеження доступу до обладнання, що використовується для обробки або переміщення ядерних матеріалів, навколо уповноважених співробітників;
- Процедури зберігання ядерних матеріалів, що не використовуються в технологічному процесі, у місцях з обмеженим доступом;
- Періодичні випробування ефективності програми ОКЯМ;
- Програма із забезпечення постійної якості та ефективності системи ОКЯМ;
- Чітко визначені критерії оцінки ефективності елементів програми ОКЯМ;
- Застосування стандартних робочих процедур, що спрощують виявлення несанкціонованих дій;
- Заходи, що забезпечують контроль обладнання, необхідного для переміщення великих облікових одиниць;
- Заходи, що забезпечують використання замків у місцях зберігання та контроль відповідних ключів;
- Використання пристроїв індикації втручання та засобів спостереження для забезпечення цілісності облікових одиниць ЯМ та інформації про ЯМ;

- Використання засобів виявлення випромінювання (наприклад, порталних моніторів) на входах у місця зберігання та використання ядерних матеріалів та виходах із цих місць з метою виявлення несанкціонованого вилучення ядерних матеріалів;
- Резервовані заходи контролю досить різноманітні, щоб усунути наслідки одиначної відмови.

Крім зазначеного вище, також розробляються нові заходи у сфері фізичної ядерної безпеки з урахуванням переваг ОКЯМ:

- Замість обліку великих місць знаходження ядерного матеріалу (ЗБМ) нові елементи наголошують на необхідності використання більш точних даних. Наприклад, «будівля Х» не є точним визначенням місця знаходження ЯМ – точні визначення: «комірка ХХ у басейні відпрацьованого палива» або «місце ХХХ на стелажі ХХ у Будинку Х»;
- Повні оновлювані документи обліку за кожним місцезнаходженням або використанням ядерного матеріалу, які дозволяють швидко знайти матеріал;
- Застосування рекомендованих заходів обліку та контролю підвищує можливість своєчасного виявлення зникнення ядерного матеріалу. Мета – виявити зникнення чи розкрадання доти, як ядерний матеріал залишить межі установки;
- Застосовувані заходи щодо ОКЯМ повинні резервуватися (складатися з кількох ешелонів), щоб уникнути одиначної відмови і повинні бути адекватні привабливості ядерного матеріалу.

Необхідно також зазначити, що підходи до ОКЯМ у системах гарантій та ФЯБ не суперечать один одному:

- Інформація про присутніх на установці ядерних матеріалах, яка є основою для застосування гарантій, корисна також для цілей ФЯБ для виявлення та

стримування розкрадань та врегулювання інцидентів, пов'язаних із підозрами чи звинуваченнями у розкраданні;

- Посилення ДСОК та об'єктових систем обліку та контролю з метою зміцнення фізичної ядерної безпеки може сприяти підвищенню ефективності виявлення та стримування перемикачів матеріалу на державному рівні;
- Разом про те, застосування ОКЯМ з метою щодо ФЯБ, так і гарантій вимагає взаємодії співробітників служб ФЯБ і гарантій всіх рівнях;
- Персонал установки, який відповідає за облік та контроль ядерних матеріалів з метою забезпечення гарантій, може відігравати роль у забезпеченні фізичної ядерної безпеки та захисту ядерних матеріалів.

Таким чином, для підвищення ефективності та віддачі від ОКЯМ важливо забезпечити взаємодію та обмін інформацією між Гарантіями та ФЯБ:

- Режим гарантій та режим фізичної ядерної безпеки мають спільну мету: виявляти неправомірне використання ядерних матеріалів.
- Однією з труднощів, що виникають під час розширення програми забезпечення гарантій у напрямі вирішення завдань фізичної ядерної безпеки, є встановлення обміну інформацією. При цьому обмін інформацією важливий на всіх рівнях:
 - На міжнародному рівні – між відділом гарантій МАГАТЕ та відділом ФЯБ МАГАТЕ;
 - На державному рівні – між державним відомством, що відповідає на направлення звітів по гарантіям, та державним відомством, що відповідає за фізичну ядерну безпеку;
 - На об'єктовому рівні – між підрозділом установки, що відповідає за гарантії, та підрозділом установки, що відповідає за ФЯБ.

Особливо важливим є обмін інформацією з експлуатаційним персоналом:

- Облік та контроль на рівні окремих облікових одиниць потребує взаємодії між службами ОКЯМ, фізичної безпеки, експлуатації, технологічної безпеки та іншим персоналом установки;
- Кожна служба має розуміти та цінувати роль інших служб;
- Експлуатаційний персонал установки має експлуатаційну інформацію та відповідні дані обліку, які важливі для здійснення обліку та підтримки контролю ядерного матеріалу;
- І навпаки: інформація щодо ОКЯМ (наприклад, актуальні документи обліку) можуть підвищити технологічну безпеку та сприяти ефективній експлуатації.

Необхідно враховувати те, що подібне посилення програми ОКЯМ може вимагати попередньої зміни організаційної культури установки.

Також потрібно чітко розуміти і можливі складнощі, що виникають при реалізації посиленої програми ОКЯМ, а це:

- бюджетне питання;
- боротьбою за обмежені ресурси;
- обов'язки, що перетинаються.

Основні риси у вдосконалення системи ОКЯМ представлені нижче:

- Облік окремих облікових одиниць та малих кількостей ядерних матеріалів та їх поточного місцезнаходження (вимагає вдосконалення існуючих систем ОКЯМ);
- Заходи обліку повинні бути здатні підтвердити (або виключити) факт перемикання чи розкрадання протягом кількох годин;

- Заходи контролю повинні бути достатніми, щоб виявити спробу перемикання чи розкрадання, перш ніж ядерний матеріал залишить територію установки;
- Розширення можливостей встановлення з виявлення та стримування розкрадань;
- Контроль доступу до ядерних матеріалів - забезпечене замком сховище ядерних матеріалів, які не використовуються в технологічному процесі, використання засобів спостереження та інші заходи контролю - також повинні сприяти стримуванню розкрадань;
- Удосконалена система ОКЯМ відповідає на загрози з боку недержавних суб'єктів, малих груп та окремих осіб, особливо зловмисних внутрішніх порушників.

Зупинимося докладніше на загрозах, що походять від внутрішнього порушника:

- Повні документи обліку та ефективні ешелоновані засоби контролю є необхідною умовою зниження ризику несанкціонованого вилучення ядерних матеріалів зловмисним внутрішнім порушником та врегулювання питань, пов'язаних із розкраданнями.
- У всіх випадках, коли об'єктова система ОКЯМ визначає наявність проблеми, при розслідуванні необхідно враховувати можливість дій внутрішнього порушника, зокрема:
 - при виявленні облікової одиниці не на своєму місці;
 - при виявленні надмірної інвентарної різниці;
 - у разі незаповнення облікових документів під час переміщення ядерних матеріалів;
 - за фактами несанкціонованого доступу до комп'ютерної системи ОКЯМ;

- при спрацьовуванні портального монітора;
- при незрозумілому пошкодженні пристрою індикації втручання на контейнері;
- при несанкціонованому доступі до бункеру або сховища;
- при несанкціонованому відвантаженні ядерних матеріалів тощо.

Нижче наведено приклади ядерних матеріалів, схильних до ризику втрати, і які повинні бути неможливі при реалізації нового комплексного підходу, що взаємно пов'язує Гарантії, ФЯБ та ОКЯМ:

- Відвантаження контейнерів, які вважаються порожніми (що підтверджується транспортними етикетками), проте фактично містять ядерні матеріали – цебра з пігулками, порожні цирконієві стрижні, навіть цілі паливні зборки;
- Контейнери для низькоактивних відходів, які відвантажуються з установки, але помилково містять ядерні матеріали, що не належать до низькоактивних відходів;
- Співробітник установки з виробництва палива не вніс контейнер із ядерним матеріалом до облікової документації. Контейнер був «виявлений» під час проведення фізичної інвентаризації, але якби його викрали у проміжний період, ніхто цього не помітив;
- Внутрішній порушник регулярно вилучає незначну кількість ядерного матеріалу з установки з його переробки з метою накопичення значної кількості для продажу. Кількість, що вилучається, досить малі, щоб не активувати систему сигналізації;
- Зловмисний внутрішній порушник може використовувати такі сценарії для вилучення матеріалу з установки;
- Ефективна практика ОКЯМ унеможлиблює такі сценарії.

Якщо коротко підбити підсумки, можна ще раз відзначити, що:

- Характер загрози змінився – не тільки держави, а й невеликі групи можуть використовувати ядерний матеріал за призначенням;
- Традиційні заходи в рамках режиму гарантій значною мірою залежать від щорічних фізичних інвентаризацій, однак для захисту від нових загроз така періодичність може бути недостатньою;
- Традиційні системи ОКЯМ здатні виявити переключення державою значних кількостей ядерних матеріалів – достатніх для виробництва зброї, – однак можуть бути не в змозі виявити втрату невеликих кількостей ядерних матеріалів.

Традиційні системи ОКЯМ можуть лягти в основу реагування на нову загрозу, проте потребують удосконалення для ефективного захисту проти нових загроз.

- Традиційні заходи в рамках режиму гарантій спираються на облік партій матеріалу, проте партії можуть мати у своєму складі безліч облікових одиниць, кожна з яких є вразливою перед новою загрозою.
- Актуальні документи обліку окремих облікових одиниць ядерного матеріалу та місць їх знаходження необхідні для врегулювання питань, пов'язаних із розкраданнями (або звинуваченнями у розкраданнях).
- Реагування на нові загрози потребує змін у підході до захисту ядерних матеріалів – потрібні додаткові заходи контролю.
- При посиленні традиційних систем ОКЯМ вони можуть ефективно вирішувати завдання фізичної ядерної безпеки.

Якщо перейти до практичного розгляду взаємодії Гарантій, ФЯБ та ОКЯМ, то його зручно подати у вигляді схеми (Рисунок 4.1). Видно, що кожна

із систем включає безліч різних заходів та засобів. Нині СФЗ та система ОКЯМ активно вдосконалюються та розвиваються. Робота проводиться за такими напрямками:

- вдосконалення правової та нормативної бази на загальнодержавному, галузевому та об'єктовому рівнях;
- розробка, виробництво та застосування сучасних технічних засобів та систем;
- розробка та застосування передових методів аналізу та проектування СФЗ та система ОКЯМ;
- удосконалення системи експортного контролю;
- проведення заходів щодо навчання та підвищення кваліфікації персоналу.

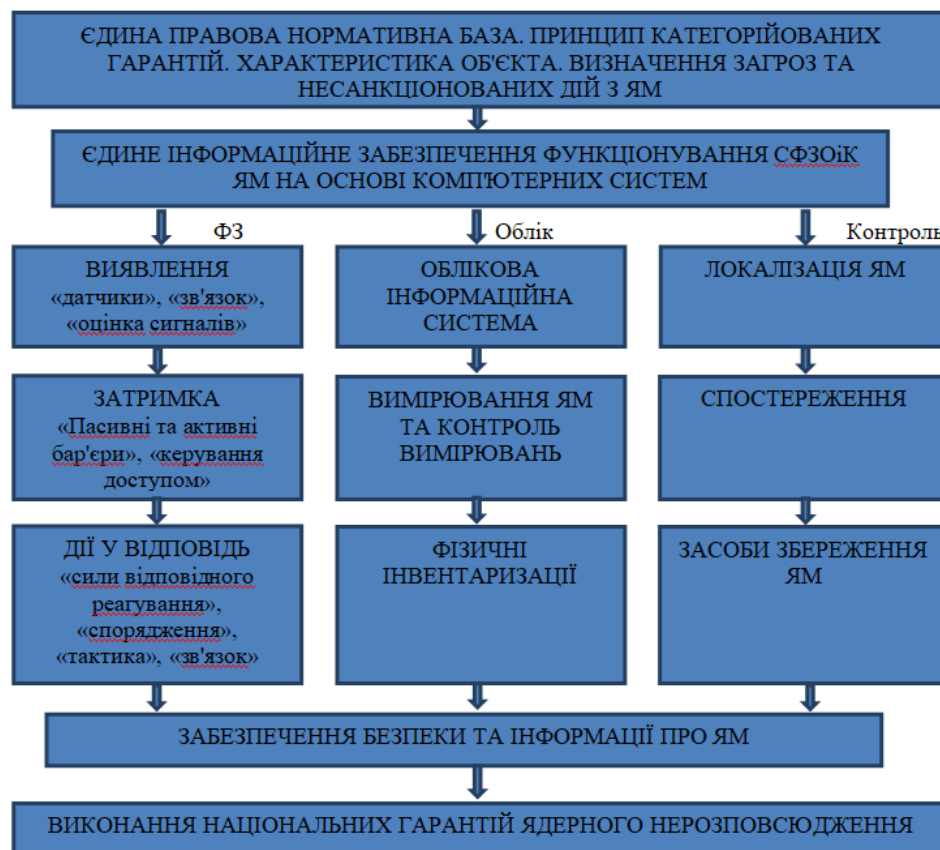


Рисунок 4.1. Схема обліку, контролю та фіззахисту ЯМ

Для того, щоб надійно виконати цілі національних гарантій, необхідно створити ешелонований захист ЯМ. Ешелонований захист означає, що якщо якийсь із заходів не буде виконано належним чином, це не значно підвищить ризик перемикання або крадіжки ЯМ. Облік, контроль та фізичний захист ЯМ у певних ситуаціях є взаємодоповнюючими і таким чином створюють ешелонований захист ЯМ. Така ситуація має місце, якщо будується захист від несанкціонованих дій різних порушників в умовах їхньої змови (наприклад, при змові внутрішнього порушника та охоронців об'єкта). Або при існуванні малих витоків ЯМ з об'єкта, що охороняється.

Фізичний захист забезпечує безпеку ЯМ у реальному масштабі часу. Однак виявлення малих витоків ЯМ є проблематичним через існування порога чутливості в апаратурі, що детектирує ЯМ. У цьому плані система обліку і контролю ЯМ природно доповнює фізичний захист, оскільки малі витoki ЯМ протягом досить великого проміжку часу діагностуються під час проведення періодичних інвентаризацій ЯМ об'єкті.

Створення ефективно діючих систем обліку і контролю та фізичного захисту (ФЗ) ЯМ можливе лише на основі максимального обліку основних умов їх функціонування на об'єкті. Умови проектування та функціонування систем ОКЯМ та ФЗ ЯМ визначаються специфікою технологічних процесів з ЯМ на об'єкті та їх інформаційного забезпечення. Серед них можна виділити:

- привабливість та кількість ЯМ (категорія ЯМ), що знаходяться на об'єкті;
- форми локалізації ЯМ на об'єкті;
- методи інформаційного забезпечення робіт з ЯМ на об'єкті.

Максимальний рівень захисту та контролю забезпечується тим ЯМ, втрата, крадіжка, або переключення яких може завдати найбільшої шкоди національній безпеці, здоров'ю людей або навколишньому середовищу. Такий підхід можна назвати принципом категоризованих гарантій.

Концепція локалізації ЯМ виражається у максимально компактному розміщенні ЯМ та забезпеченні їхньої безпеки за рахунок створення бар'єрів на шляху до них. Зазвичай локалізація полягає в знаходженні ядерних матеріалів всередині зон, що охороняються, будівель, приміщень, технологічного обладнання, сейфів і контейнерів. При цьому чим вище ступінь локалізації, тим простіше здійснювати захист, контроль та облік ЯМ.

Роботи з ЯМ на ядерних об'єктах проводять у рамках концепції інформаційної безпеки. Ця концепція орієнтована на забезпечення повноти інформаційного опису робіт з ЯМ потреб управління технологічними процесами і, одночасно, суворо цільового використання інформації за умови захисту від несанкціонованого доступу. Використання комп'ютерних мереж закладає хороші передумови розвитку та вдосконалення систем ОКЯМ і ФЗ ЯМ на об'єктах з одного боку, з другого робить їх вразливими з погляду комп'ютерної безпеки.

Таким чином, в умовах поділу виконуваних функцій системи ОКЯМ та ФЗ ЯМ активно розвиваються, взаємодіючи у процесі свого функціонування та посилюючи ешелонований захист ЯМ від потенційних несанкціонованих дій порушників.

Контрольні запитання

1. Контроль ядерних матеріалів включає огороження ядерного матеріалу. Як це узгоджується з бар'єрами системи фіззахисту?
2. По яким питанням має місце перетин інтересів ОКЯМ и ФЗ?
3. На вашу думку чи має сенс хоча б частково поєднувати функції та відповідальності систем ОКЯМ та ФЗ? Якщо так (ні), то чому?

Тема 5. Управління системою ОКЯМ

Організація управління будь-яким об'єктом включає ряд загальнодоступних аспектів, які нескладно безпосередньо і щодня спостерігати в навколишньому людському суспільстві. У цьому відношенні управління системою ОКЯМ є рядовим управлінським завданням, яке має низку специфічних властивостей, які необхідно враховувати. Давайте зараз спробуємо створити організаційну структуру, на яку покладено функцію створення та експлуатації системи ОКЯМ, оскільки підприємство вирішило використовувати у своїй діяльності ядерні матеріали.

Перше, що необхідно зробити це наказом на підприємстві призначити начальника нового підрозділу підприємства. Далі протягом виділеного організаційного періоду він має розробити організаційну структуру підрозділу з урахуванням специфіки його діяльності: наявність зон балансу матеріалу, фізичної інвентаризації, правила двох осіб, можливого внутрішнього порушника тощо. Розробка організаційної структури дозволяє вирішити такі завдання:

- Визначитись з кількістю персоналу;
- Визначитись з необхідністю введення таких посад як заступники начальника, начальники відділів та лабораторій;
- Організувати приміщення та робочі місця;
- Оцінити необхідні матеріальні ресурси та фінансові витрати.

Після того, як організаційна структура визначена потрібно для кожної поки що порожній її клітини визначити функції, які на неї покладаються, а для реалізації цих функцій, клітину потрібно наділити відповідними повноваженнями, правами, обов'язками та відповідальністю.

Наприклад, для самої верхньої клітини керівництво підприємства має призначити керівника служби ОКЯМ і поставити цій особі в обов'язки облік і контроль ядерних матеріалів об'єкта, для чого:

- Повинна бути розроблена організаційна структура, яка чітко визначає взаємовідносини між службою ОКЯМ та іншими організаційними підрозділами об'єкта;
- Керівник служби ОКЯМ повинен бути ознайомлений з роботами з ядерними матеріалами, у тому числі – з іншими підрозділами та підрядниками, які не є співробітниками об'єкта, та з відповідною інформацією, та здійснювати належний нагляд над проведеними роботами;
- Керівник служби ОКЯМ має бути наділений повноваженнями для безпосереднього обміну інформацією з керівником найвищої ланки підприємства, наділеною всією повнотою відповідальності за весь об'єкт, у тому числі за ядерні матеріали;
- Щоб уникнути можливого впливу на рішення щодо обліку та контролю ядерних матеріалів, керівник служби ОКЯМ повинен також бути незалежним від керівників інших підрозділів об'єкта, які наприклад:
 - Здійснюють транспортування, переробку чи зберігання ядерних матеріалів;
 - Відповідають за фізичний захист;
 - Відповідають за мережеві системи.

Функції та обов'язки керівника та персоналу служби ОКЯМ повинні бути чітко визначені та зафіксовані документально:

- Для забезпечення ефективної роботи системи ОКЯМ мають бути виділені достатні ресурси (кошти, штат персоналу та обладнання);

- Весь персонал об'єкта, який здійснює роботи з ядерними матеріалами, повинен розуміти, що його дії сприяють ефективному забезпеченню системою ОКЯМ фізичної ядерної безпеки.

З урахуванням специфіки фізичної ядерної безпеки можна додати, що чіткий поділ функцій та сфер відповідальності встановлюється з урахуванням наступного принципу:

- Завдання та обов'язки поділяються на етапи, що виконуються різними людьми, що діють незалежно
 - цей принцип служить як додатковий запобіжний захід та виявлення діяльності внутрішнього порушника і повинен впроваджуватися скрізь, де це можливо
 - він повинен бути достатнім для попередження та виявлення зловмисних дій з боку внутрішнього порушника та несанкціонованого використання ядерних матеріалів.

Які ж функції та обов'язки передбачаються для персоналу служби ОКЯМ:

- До обов'язків служби ОКЯМ входить ведення системи облікової документації для реєстрації всіх ядерних матеріалів об'єкта;
- У рамках цієї функції контролю персонал служби ОКЯМ повинен, з урахуванням доцільності, брати участь у всіх роботах з використанням ядерних матеріалів, проте основна його роль полягає у здійсненні нагляду;
- Служба ОКЯМ має забезпечити необхідне навчання по ОКЯМ для всього персоналу об'єкта, що забезпечує необхідну якість та рівень практичної реалізації вимог щодо ОКЯМ;
- Також мають бути встановлені міцні робочі відносини між відділом ОКЯМ та іншими відділами.

Аспекти, які мають важливе значення для персоналу, залученого до фізичної ядерної безпеки:

- Весь персонал підприємства повинен мати ясне розуміння важливості системи ОКЯМ у справі забезпечення фізичної ядерної безпеки;
- Функції системи ОКЯМ повинні служити контролю над діями інших працівників чи підрозділів та його перевірки;
- Незважаючи на те, що, окрім персоналу служби ОКЯМ, брати участь у роботах з ядерними матеріалами та нести основну відповідальність за ЯМ може інший персонал підприємства, основну відповідальність за облік та контроль ядерних матеріалів має нести підрозділ ОКЯМ.

Після узгодження організаційної структури та функцій кожної її клітини з керівництвом підприємства починається наступний етап - укомплектування служби ОКЯМ персоналом та його навчання:

- Керівництво підприємства має виділити достатній штат персоналу, який дозволяє забезпечити ефективність роботи системи ОКЯМ;
- Служба ОКЯМ та інший персонал підприємства, що відповідає за ОКЯМ:
 - Повинен розуміти систему ОКЯМ та виробничі процеси;
 - Повинен мати належну кваліфікацію, що дозволяє виявляти незвичайні події, які можуть свідчити про несанкціоноване вилучення ядерних матеріалів;
 - Повинен проходити навчання за вимогами до системи ОКЯМ та щодо запобігання загрозам з боку внутрішнього порушника;
 - Перед початком виконання посадових обов'язків повинні проходити атестацію з метою підтвердження кваліфікації для виконання конкретних функцій в організації.
- Весь персонал об'єкта повинен проходити вступне навчання з ОКЯМ.

При підборі та навчанні персоналу повинні враховуватися такі аспекти, які мають важливе значення для фізичної ядерної безпеки:

- Весь персонал об'єкта, який пройшов навчання, повинен розуміти важливість системи ОКЯМ у справі забезпечення фізичної ядерної безпеки;
- Весь персонал об'єкта повинен знати:
 - Потенційні наслідки втрати контролю над ядерними матеріалами;
 - Ступінь секретності інформації, пов'язаної з ОКЯМ;
 - Правила, що підлягають застосуванню для захисту інформації;
 - Потенційні наслідки порушення режиму фізичної ядерної безпеки на об'єкті;
 - Відповідні дії у відповідь можливі порушення.
- Слід приділяти належну увагу культурі безпеки
 - З метою зміцнення системи захисту та контролю ядерних матеріалів;
 - Для забезпечення того, щоб усі працівники, особливо які мають доступ до зон розміщення ядерних матеріалів, розуміли свої індивідуальні обов'язки та свій внесок у підтримку фізичної ядерної безпеки;
- Вимагає найвідповідальнішого підходу керівництва об'єкта.

Після того, як персонал зайняв свої робочі місця і ознайомився зі своїми посадовими функціями, це не означає, що вони можуть відразу приступити до виконання своїх обов'язків. Необхідно ще розробити процедури, інструкції, регламенти та організувати документообіг:

- Повинні бути розроблені офіційна письмова політика та процедури, що включають документацію з усіх практик ОКЯМ та вимог, що стосуються фізичної ядерної безпеки;

- Політика та процедури підлягають затвердженню керівником служби ОКЯМ, керівництвом підприємства, а також, якщо це потрібно, державним компетентним органом;
- Письмова політика та процедури:
 - Повинні бути написані таким чином, щоб забезпечувати безперервність отримання інформації про ядерні матеріали та контролю над ними;
 - Повинні бути частиною програми Довгострокового забезпечення працездатності системи ОКЯМ [4];
 - Дозволяють менше покладатися на згадку;
 - Усувають необхідність формулювання швидких та потенційно помилкових висновків;
 - Розглядають виконання дій лише на рівні ЗБМ чи додатково розбитої частини ЗБМ.
- Приклади тем, що охоплюються письмовими процедурами:
 - Проведення фізичної інвентаризації, включаючи звірку фактично наявної кількості із зареєстрованою кількістю та закриття балансу матеріалів;
 - Вимірювання, включаючи облікові вимірювання та підтверджуючі вимірювання;
 - Управління якістю вимірів;
 - Техобслуговування та експлуатація засобів зберігання, нагляд, пристрої та процедури для контролю матеріалів;
 - Розслідування позаштатних ситуацій та ухвалення відповідних рішень.
- Приклади додаткових тем, що охоплюються письмовими процедурами, для об'єктів, що здійснюють переробку матеріалів у балк-формі:
 - Прийоми відбору проб та методи вимірювання для облікових вимірювань, включаючи оцінку похибки вимірювання;
 - Контроль, моніторинг та оцінка кількості ядерних матеріалів під час переробки;

- Моніторинг та оцінка втрат ядерних матеріалів (вимірювання кількості безповоротних втрат або оцінка кількості безповоротних втрат за результатами минулих вимірів);
- Вимірювання або оцінка, моніторинг та оцінка ядерного матеріалу, що залишився в обладнанні після переробки;
- Оцінка балансу матеріалів, включаючи розрахунок та оцінку кількості неврахованого матеріалу (КНМ), її похибки (S_{MUF}) та сумарного значення КНМ;
- Моделі розрахунку ядерного перетворення елементів (наприклад розпаду).

Отже, на підставі процесів поводження з ЯМ на підприємстві формуються теми процедур, після чого здійснюється їх розробка та супровід:

- Ступінь деталізації залежить від типу виконуваних робіт, типу, форми та кількості наявних ядерних матеріалів;
- Для об'єктів, що здійснюють переробку матеріалів у балк-формі, потрібні детальніші процедури порівняно з об'єктами, що працюють з обліковими одиницями;
- Процедури підлягають перегляду періодично та при внесенні змін до виробничого процесу.

При розробці процедур також важливо врахувати низку аспектів, що мають важливе значення для фізичної ядерної безпеки:

- Особлива увага повинна приділятися процедурам, пов'язаним з контролем доступу до ядерних матеріалів, обладнання та інформації щодо ОКЯМ, здатної сприяти внутрішньому порушнику;

- Застосування стандартних експлуатаційних процедур може надати додаткову можливість виявлення дій внутрішнього порушника завдяки можливості виявлення відхилення від порядку проведення процедури.

Як уже говорилося вище, крім письмової політики та процедур має бути розроблена програма довгострокового забезпечення працездатності (ДЗП) дієвої системи ОКЯМ, що безумовно є специфікою організації служби ОКЯМ на підприємстві. Це пов'язано з тим, що організація довгострокового забезпечення працездатності системи ОКЯМ є важливим фактором безперервної підтримки її ефективності:

- У документі [5] описано програму ДЗП системи фізичного захисту на ядерному об'єкті, яка може бути застосована до системи ОКЯМ
- Елементи програми ДЗП:
 - Письмові процедури (інструкції);
 - Документація;
 - Управління конфігурацією;
 - Укомплектування персоналом та навчання;
 - Контроль якості;
 - Перевірка функціонування;
 - Розділені бази даних із резервуванням.

Зупинимося на такому елементі програми ДЗП як керування конфігурацією та спробуємо зрозуміти навіщо це потрібно:

- Допомагає гарантувати підтримання відповідності робочих показників системи ОКЯМ вимогам до неї та її проекту протягом усього терміну служби;
- Встановлює процес, що дозволяє виконати належне документування, оцінку та затвердження будь-якої зміни будь-якої частини системи ОКЯМ або

будь-якої іншої відповідної системи об'єкта до впровадження та практичної реалізації такої зміни;

- Допомагає виключити погіршення робочих показників системи ОКЯМ або фізичної ядерної безпеки загалом за будь-яких змін;
- З метою управління конфігурацією для забезпечення фізичної ядерної безпеки рекомендується застосування диференційованого підходу.

Управління конфігурацією відіграє важливу роль у забезпеченні функціонування системи ОКЯМ відповідно до проекту, дозволяючи попереджати та виявляти несанкціоноване вилучення ядерних матеріалів.

Якщо коротко сформулювати резюме з питань управління системою ОКЯМ на підприємстві, то:

- Управління системою ОКЯМ на об'єкті є головним обов'язком керівника служби ОКЯМ, призначеного керівником підприємства;
- Усі особи, які займаються роботами з ядерними матеріалами, несуть індивідуальну відповідальність за розуміння своєї ролі у загальній програмі фізичної ядерної безпеки;
- Керівництво об'єкта має виділити достатній штат персоналу, що дозволяє забезпечити ефективність роботи системи ОКЯМ, а також забезпечити належне навчання;
- Необхідно забезпечити культуру безпеки, яка реалізує принципи системи ОКЯМ та загальну програму фізичної ядерної безпеки об'єкта.

Контрольні запитання

1. Яким чином забезпечується незалежність керівника ОКЯМ?
2. Яким чином досягається довгострокове забезпечення працездатності системи ОКЯМ?
3. Які права, повноваження, обов'язки і відповідальності має керівник ОКЯМ?

Тема 6. Зони балансу матеріалу

Зона балансу матеріалів – центральне поняття в новій системі обліку та контролю ЯМ. ЗБМ є елементарною структурною одиницею державної системи обліку та контролю ЯМ.

У бухгалтерській системі цього поняття немає, і баланс ЯМ ведеться лише на рівні всього підприємства. Поняття ЗБМ, вперше введене американцями 1959 р. та «узаконене» МАГАТЕ у документі «Рекомендації для державних систем обліку та контролю ядерних матеріалів» (1980 р.) [8].

Згадаймо визначення Зони балансу ядерних матеріалів - ділянка території, на якій ведеться державний облік ядерних матеріалів і відповідно до встановленої процедури визначається фактично наявна кількість ядерних матеріалів та їх кількість при кожній передачі в зону (із зони) балансу ядерних матеріалів.

Таким чином, у ЗБМ чітко визначено контрольовані вхід-вихід, а наявна (інвентарна) кількість ЯМ підлягає визначенню на періодичній основі під час фізичної інвентаризації (ФІ) ЯМ.

Для порівняння наведемо визначення, прийняте в МАГАТЕ - Параграф 110 документа INFCIRC/153 [6] свідчить: «Зона балансу матеріалів» означає зону в або поза установкою, де: (а) Кількість ядерного матеріалу при кожному переміщенні або з кожної «зони балансу матеріалів» може бути визначено; та (b) фактично наявна кількість матеріалу в кожній «зоні балансу матеріалів» може бути, за необхідності, визначена відповідно до встановлених процедур для того, щоб з метою гарантій Агентства міг бути встановлений матеріальний баланс.

Спеціальні області (зони), створені як основа обліку і контролю ядерних матеріалів – можуть являти собою одне чи кілька взаємозалежних приміщень, одне чи кілька взаємозалежних будинків, діючий енергоблок чи всю ядерну установку загалом.

6.1. Конструювання/проектування ЗБМ

Для забезпечення належного функціонування системи обліку та контролю ЯМ для підприємства важливим завданням є правильний вибір структури зон балансу ЯМ. Однак визначення розмірів та меж ЗБМ є часто непростим завданням. Наприклад, на рис. 6.1 представлено спрощену технологічну схему заводу з виробництва палива енергетичних реакторів.

При визначенні відповідної структури ЗБМ повинні враховуватись вимоги об'єкта, а також державні та міжнародні вимоги:

- Для кожної ЗБМ мають бути розроблені заходи з обліку та контролю
- Об'єкти, на які поширюється система гарантій МАГАТЕ, вже організували ЗБМ, узгоджені між державою та МАГАТЕ
- Будь-які зміни проекту об'єкта можуть призвести до зміни вибраних ЗБМ.

Як видно на рис. 6.1 є багато різних технологічних ділянок. А ЗБМ повинні бути такими, щоб було легко вимірювати вхідні та вихідні потоки та проводити фізичні інвентаризації без великих економічних втрат через зупинку виробництва.

Таким чином, завдання визначення розмірів ЗБМ має оптимізаційний характер, оскільки рішення вибирається з низки суперечливих вимог. Наприклад:

- якщо ЗБМ – велика, то менше документації по підприємству і легше звітувати. Однак у такій ЗБМ важче і дорожче проводити ФІ, оскільки треба зупинити виробництво;
- якщо ЗБМ – маленька, легше проводити ФІ. Однак по всьому підприємству потрібно буде готувати велику кількість звітних документів.

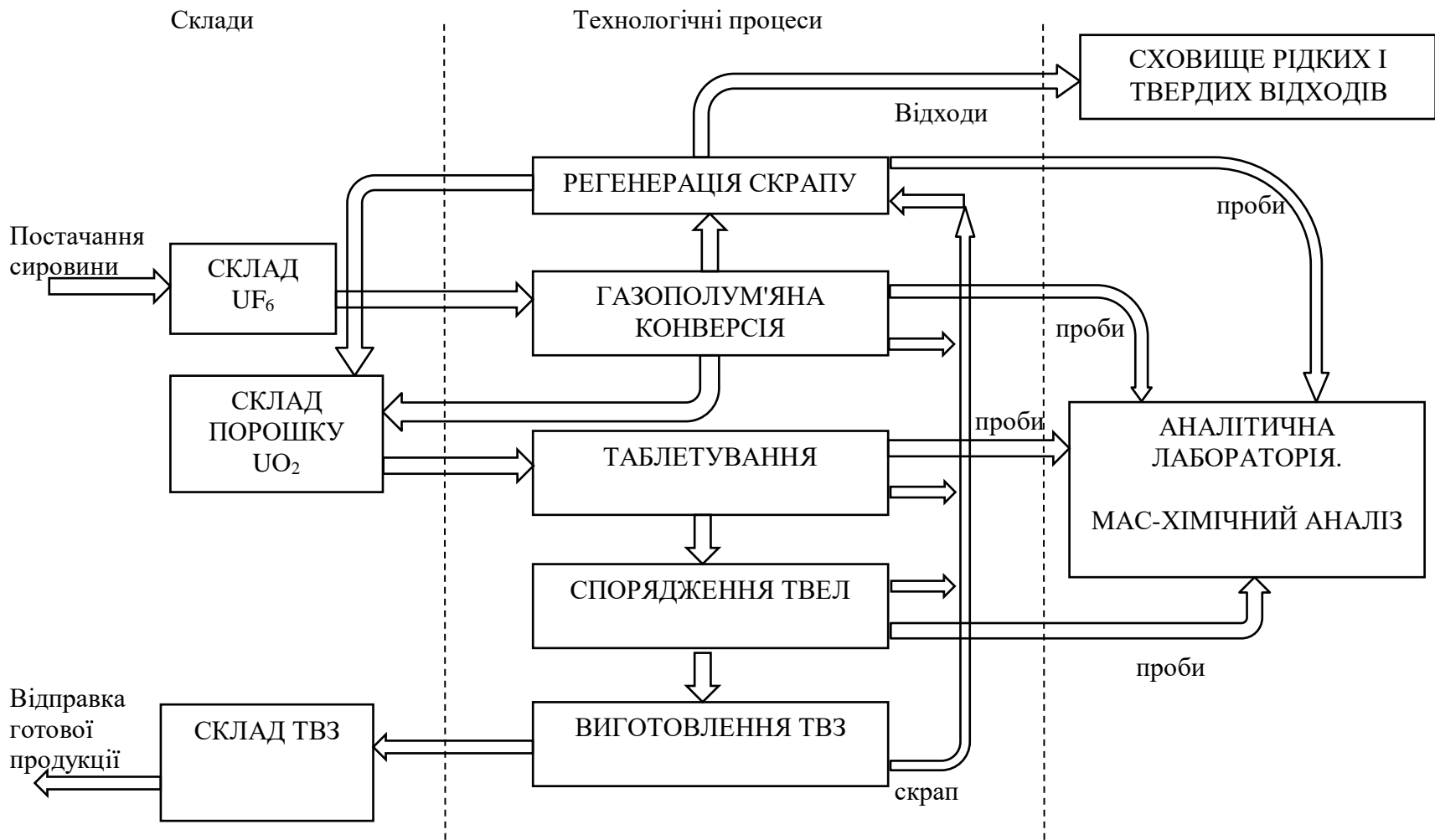


Рисунок 6.1. – Технологічна схема заводу з виробництва палива енергетичних реакторів

Тому МАГАТЕ рекомендує при визначенні ЗБМ враховувати низку аспектів, що мають важливе значення для фізичної ядерної безпеки:

- ЗБМ, організовані на об'єкті з метою забезпечення гарантій МАГАТЕ, повинні бути достатніми для досягнення цілей фізичної ядерної безпеки, інакше вони можуть бути поділені на ЗБМ меншого розміру;
- Підрозділ ЗБМ на одиниці менших розмірів може зміцнити можливості виявлення та розслідування випадків несанкціонованого вилучення ядерних матеріалів;
- Щодо нарощування можливостей загалом, ЗБМ менших розмірів спрощують контроль за ядерними матеріалами та обмежують розміри зони, до яких можуть бути віднесені несанкціоноване вилучення чи втрата.

Кожне підприємство вибирає структуру ЗБМ, виходячи з таких суперечливих умов і дотримуючись деяких загальних рекомендацій щодо вибору ЗБМ:

- кількість ЗБМ на підприємстві обирають так, щоб їх було достатньо для забезпечення обліку та контролю усіх ЯМ. При цьому кожна ЗБМ документально оформляється та затверджується вищою організацією. Зрештою, кількість та межі ЗБМ узгоджуються з ДКЯРУ;
- кожна ЗБМ повинна бути єдиною неподільною ділянкою (однозв'язкова область);
- при визначенні структури зон балансу ЯМ на підприємстві необхідно, щоб кордони ЗБМ були чітко вираженими і відповідали (не перетиналися) кордонам зон, що охороняються. Межі ЗБМ і зон, що охороняються, можуть збігатися;

- якщо межі ЗБМ не зменшують можливості навмисного чи ненавмисного змішування матеріалів із різних ЗБМ, то контроль ЯМ у такій зоні може втратити будь-яке значення;
- щодо меж ЗБМ доцільно враховувати наявність фізичних бар'єрів. Фізичними бар'єрами є будівельні конструкції (стіни, перекриття, ворота, двері), спеціально розроблені конструкції (загородження, протитаранні пристрої, ґрати, посилені двері, контейнери);
- функціональні підрозділи, такі як заводські лабораторії, склади, а також ділянки підприємств, що потребують **спеціального захисту інформації**, виділяються в окремі ЗБМ.

У МАГАТЕ та в деяких приватних організаціях розроблено та використовується спосіб конструювання ЗБМ на основі проектної інформації. Проектна інформація про конструкцію будь-якої установки є запитальником. Відповіді на ці питання дозволяють отримати набір даних, необхідний визначення меж ЗБМ.

6.2. Визначення потоків та інвентарних кількостей ЯМ у ЗБМ

Визначення вхідних та вихідних потоків ЯМ, а також наявної кількості ЯМ в ЗБМ проводиться в ключових точках вимірювання.

Ключова точка вимірювань (КТВ) є місцем, обладнане для вимірювання параметрів ЯМ та його атрибутивних ознак.

Способи визначення інвентарної кількості щодо очохльованих виробів (ТВЗ (тепловиділяюча збірка), окремі тепловиділяючі елементи та ін.) – це штучний облік (ідентифікація виробів плюс їх перерахунок) та вимірювання ЯМ неруйнівними методами.

А щодо матеріалів у балк-формі – це комплекс вимірювальних методів, що застосовуються для визначення наявної кількості з урахуванням можливого

пробовідбору. Вимірювання хімічного та ізотопного складу проводять на відібраних пробах. У зв'язку з цим важливим завданням є забезпечення представництва проб ЯМ.

На рис. 6.2 наведено приклад вимірювань різних форм ЯМ (балк-форма та штучні вироби) у ключових точках для ділянки спорядження твелів у виробництві палива Атомної електричної станції (АЕС). Видно, що для обліку ЯМ використовуються як методи, що руйнують (вхідний потік ЯМ), так і неруйнівний аналіз ЯМ.

Атрибутивні ознаки – дані, що однозначно визначають наявність, або відсутність будь-якої властивості ЯМ.

Приклади атрибутивних ознак:

- У даній обліковій одиниці є ЯМ чи ні?
- Пристрій індикації втручання підтверджує відсутність несанкціонованого доступу до ЯМ чи ні?
- ЯМ того типу, що вказаний у паспорті чи ні?
- Маса-брутто ЯМ не відрізняється від паспортних даних у межах похибки вимірів чи ні?
- Число облікових одиниць у контейнері збігаються з даними документів чи ні?
- Облікова одиниця з цим ідентифікатором знаходиться у визначеному для неї місці чи ні?



Рисунок 6.2. – Вимірювання різних форм ЯМ у ключових точках для ділянки спорядження твелів у виробництві палива АЕС

Атрибутивні ознаки є особливо корисними при виконанні основних облікових процедур. Наприклад, при передачі ЯМ, коли потрібно досить швидко прийняти матеріал, що надійшов. Вхідний контроль матеріалу насамперед здійснюють за його атрибутивними ознаками.

Іншим прикладом ефективного застосування атрибутивних ознак є процедура фізичної інвентаризації ЯМ у ЗБМ. Під час проведення цієї процедури визначають усі наявні кількості ЯМ у ЗБМ шляхом проведення:

- перевірки наявності та цілісності ЯМ;
- перевірки цілісності та ідентифікації пломб та печаток;
- підрахунку наявних облікових одиниць;
- зважування облікових одиниць;
- облікових та підтверджуючих вимірювань.

Під час фізичної інвентаризації перевіряється облікова документація, і складаються списки наявних ЯМ (список наявних кількостей (СНК)). Ядерні матеріали вимірюють і знаходять фактично наявної кількості ЯМ в ЗБМ (список фактично наявної кількості (СФНК)).

Збереження ЯМ та якість їх обліку аналізується за відповідністю між фактично наявною та документально зареєстрованою ЯМ у ЗБМ. Встановлення цієї відповідності називається підбиттям балансу ЯМ у ЗБМ. Формально баланс ЯМ у ЗБМ можна записати у вигляді наступного рівняння, аналогічного 3.1:

$$IP = KK - ДК = KK - ЗБ + ЗМ - НК, \quad (6.1)$$

де IP – інвентаризаційна різниця; KK – фактично наявна кількість ЯМ в ЗБМ, визначена в результаті цієї ФІ; $ДК$ – документально зареєстрована кількість ЯМ у ЗБМ початку інвентаризації; $ЗБ$ – певне та документально зареєстроване збільшення кількості ЯМ за даний міжбалансовий період (МБП); $ЗМ$ – певне та документально зареєстроване зменшення кількості ЯМ за даний МБП; $НК$ – наявна кількість ЯМ в ЗБМ, певна і документально зареєстрована початку даного МБП.

Докладніше питання фізичної інвентаризації розглянуті у наступній лекції.

При організації ЗБМ встановлюють:

- види, форми та кількості ЯМ, які можуть перебувати в ній (тобто категорія ЯМ);
- система санкціонованих положень ЯМ. Кожне положення має мати унікальний ідентифікатор;
- персонал, допущений до ЯМ у цій ЗБМ;

- у ЗБМ визначають ключові точки виміру ЯМ, які забезпечуються необхідним вимірювальним обладнанням;
- розробляється методика проведення фізичної інвентаризації;
- встановлюються форми облікової документації та порядок її ведення.
- відповідальність за зберігання всього ЯМ усередині ЗБМ покладається на одну матеріально відповідальну особу (МВО):
 - оформлення документів на відправлення – отримання ЯМ та
 - здійснення всіх зовнішніх передач ЯМ із ЗБМ та в ЗБМ;
 - ведення облікових документів та підготовкою звітів до вищих організацій;
 - участь у проведенні фізичної інвентаризації;
 - інформування керівництва підприємства про всі випадки виявлення нестач ЯМ.

Контрольні запитання

1. Коротко описати порядок визначення та погодження ЗБМ, у тому числі з МАГАТЕ згідно з Правилами ведення ОКЯМ.
2. Чи має входити інформаційна структура до кордонів ЗБМ?
3. Скільки «ефективних кілограм» урану в 20-ти двохсот кілограмових бочках металевого збідненого урану?
4. Скільки «ефективних кілограм» урану в ТВЗ зі збагаченням 4.4%, якщо маса урану у ТВЗ складає 438 кг?

Тема 7. Фізична інвентаризація ядерних матеріалів. Період балансу матеріалу

Знання щодо ядерних матеріалів припускають, що ми маємо дані про наявній кількості ЯМ, що знаходяться в ЗБМ, і про вхідні і вихідні потоки ЯМ протягом певного періоду часу, званого міжбалансовим періодом. Передачі ЯМ та фізичні інвентаризації ЯМ є головними обліковими процедурами, які забезпечують такі знання ЯМ. Ці процедури мають на увазі, що протягом міжбалансового періоду вимірюють усі вхідні та вихідні потоки ЯМ, а в кінці міжбалансового періоду вимірюють усі наявні ЯМ.

У цій лекції розглянуто процедуру фізичної інвентаризації ЯМ та побудову балансу ЯМ у ЗБМ.

7.1. Деякі вступні визначення [2]

Стратифікація - групування облікових одиниць із близькими характеристиками.

Вид ядерного матеріалу – ядерний матеріал, що має однаковий або близький ізотопний склад (уран однакового або близького збагачення, плутоній однакового або близького ізотопного складу).

Список наявних кількостей ЯМ – перелік наявних ЯМ на даний момент даної ФІ із зазначенням їх кількостей, складений виходячи з облікових даних.

Список фактично наявних кількостей ЯМ – перелік фактично наявних ядерних матеріалів із зазначенням їх кількостей, визначений у результаті фізичної інвентаризації.

Відрізок часу між двома послідовними ФІ називається **міжбалансовим періодом**.

Для зручності узгодження результатів фізичної інвентаризації будь-який матеріал, що надійшов або відправлений із ЗБМ, утворений, що був на початку або в кінці міжбалансового періоду, відноситься або до активних, або пасивних матеріалів. До активних відносяться продукти, які проходили за останній міжбалансовий період або під час інвентаризації облікові вимірювання. Зокрема, до активних ядерних матеріалів відносяться продукти, що зазнали в даний міжбалансовий період переробки; вироблені продукти; відходи, що утворилися у цей міжбалансовий період; продукти, для яких були потрібні облікові вимірювання, щоб створити новий паспорт і т.д. Якщо активні ЯМ проходили облікові виміри до поточної ФІ, всі вони підлягають підтвердним вимірам під час інвентаризації.

До пасивних відносяться продукти, що залишилися на момент інвентаризації в незмінному стані з попередньої інвентаризації; облікові виміри для яких не проводились; що знаходяться під засобами контролю доступу (ЗКД), або мають таку оболонку, яка сама може розглядатися як ЗКД, та ЗКД підтвердили відсутність доступу. У тому числі, до пасивних належать матеріали, що надійшли до ЗБМ у міжбалансовий період, які прийняті на облік за даними постачальника та перебувають під засобами контролю доступу з моменту надходження до інвентаризації. Під час інвентаризації пасивні матеріали підлягають вимірам, що підтверджують.

7.2. Цілі фізичної інвентаризації

У новій системі обліку (система вимірюваного матеріального балансу) є обов'язковим періодичне проведення фізичних інвентаризацій ЗБМ.

Фізична інвентаризація - визначення фактично наявної кількості на даний момент ядерних матеріалів у відповідній зоні балансу ядерних матеріалів. Таким чином, мета фізичної інвентаризації сформульована у її визначенні.

Крім того, під час ФІ перевіряють облікові документи, підводять баланс по кожному виду ЯМ і, зрештою, встановлюють чи є аномалії або недоліки та порушення в обліку та контролі ЯМ.

Фізична інвентаризація є, по суті, масштабним фізичним експериментом і включає низку етапів [9]:

- організаційні заходи щодо проведення ФІ;
- планування інвентаризації;
- підготовка ЗБМ до проведення фізичної інвентаризації;
- проведення ФІ;
- аналіз та оформлення результатів фізичної інвентаризації.

Як основні елементи, що входять до процедури ФІ, можна відзначити такі:

- складання СНК на момент інвентаризації та його вивіряння з обліковими документами;
- вимірювання атрибутивних ознак та параметрів ЯМ;
- оцінка величини незмірних втрат та її похибки;
- визначення інвентаризаційної різниці та її похибки для кожного виду ядерного матеріалу.

Під час проведення ФІ мають на увазі такі виміри:

- перевірка наявності та цілісності ЯМ;
- ідентифікація ЯМ;
- перевірка цілісності та ідентифікації пломб та печаток;
- підрахунок наявних облікових одиниць;
- зважування облікових одиниць;
- проведення неруйнівного аналізу ЯМ;
- відбір проб та їх аналіз.

Види фізичних інвентаризацій ЯМ

Фізична інвентаризація може бути початковою, періодичною (з певною частотою їх проведення) та спеціальною. При початковій чи періодичній ФІ визначають фактичну кількість всіх видів ЯМ, що у ЗБМ (зокрема ЯМ, отриманих у тимчасове користування).

При спеціальній ФІ можуть визначати фактично готівку окремих видів ЯМ, або фактично готівка ЯМ у частині ЗБМ (за всіма або з деяких видів ЯМ).

Спеціальні ФІ проводять у ЗБМ при:

- зміні МВО;
- колективної (бригадної) матеріальної відповідальності, а саме за зміни керівника колективу (бригадира), при вибутті з колективу (бригади) понад 50% його членів, а також на вимогу хоча б одного члена колективу;
- за рішенням керівництва підприємства;
- виявлення аномалій в обліку та контролі ЯМ;
- виникнення нештатної ситуації (нестача одиниці зберігання, несанкціонований доступ до ЗБМ, аварія та інші надзвичайні обставини);
- реорганізації підприємства зі зміною МВО.

Частота інвентаризації

В основі підходу до визначення частоти ФІ лежать уявлення про привабливість та загальні кількості ядерних матеріалів, тобто категорії ЯМ.

Так, частота проведення фізичних інвентаризацій для різних ядерних матеріалів, скажімо, плутонію в металевій формі у значній кількості та низькозбагаченого урану у формі двоокису (або ядерного матеріалу в опромінену паливі) будуть різні. Зокрема щодо ядерних матеріалів вищої категорії на ділянках їх переробки фізична інвентаризація за рекомендацією Міністерства енергетики США повинна застосовуватися не рідше, ніж раз на

два місяці. Тобто кожні два місяці має здійснюватися 100%-ний контроль фактично наявних ядерних матеріалів.

Стосовно зон балансу матеріалів, які можуть бути визначені у сховищах відпрацьованого палива атомних станцій, вимоги, звичайно, набагато менш жорсткі. І пов'язано це з тим, що відпрацьоване паливо саме по собі має властивість самозахищеності внаслідок високої активності.

У нас в країні прийнято наступну частоту інвентаризацій залежно від категорії ядерних матеріалів, що знаходяться в ЗБМ:

- для ЗБМ із матеріалами категорії 1 – 1 календарний місяць;
- для ЗБМ із матеріалами категорії 2 – 3 календарні місяці;
- для ЗБМ із матеріалами категорії 3 – 6 календарних місяців;
- для ЗБМ із матеріалами категорії 4 – 12 календарних місяців;
- за всіма ядерними матеріалами підприємства – 12 календарних місяців.

Частота фізичних інвентаризацій для ЗБМ, що містять ядерні матеріали, інвентаризація яких потребує великих дозових навантажень для персоналу, може бути зменшена за погодженням з ДІЯРУ на підставі поданого обґрунтування. При цьому зазвичай застосовуються додаткові технічні заходи контролю доступу до ядерних матеріалів.

Організаційні заходи на підприємстві щодо проведення ФІ

Перед початком кожної ФІ видається наказ керівника підприємства про її проведення. Наказ містить основні організаційні заходи, необхідні проведення фізичної інвентаризації для підприємства. У тому числі визначаються:

- ЗБМ, у яких проводиться ФІ;
- персональний склад інвентаризаційної комісії;

- терміни підготовки обладнання та приладів, необхідних для проведення інвентаризації;
- терміни підготовки об'єктів, що інвентаризуються, для перевірки;
- терміни проведення інвентаризації та дата подання звітних документів за результатами ФІ.

Для підготовки, проведення та аналізу результатів ФІ ЯМ на підприємстві створюються інвентаризаційні комісії: центральна інвентаризаційна комісія (ЦІК) та робочі інвентаризаційні комісії (РІК) у підрозділах підприємства.

РІК планує ФІ, готує ЗБМ та проводить у встановлені терміни фізичну інвентаризацію. У ході інвентаризації члени РІК:

- виявляють та реєструють недоліки, допущені при обліку, зберіганні, використанні ЯМ, та вносять пропозиції щодо їх усунення;
- доводять до відповідальних керівників виявлені недоліки з обліку та зберігання ЯМ.

ЦІК здійснює методичне керівництво організацією та проведенням інвентаризацій у зонах балансу ЯМ підприємства (координація діяльності та консультації). При проведенні ФІ особливо важливими є заходи ядерної та радіаційної безпеки. Тому ці заходи мають бути визначені у відповідній інструкції щодо проведення інвентаризації та узгоджені зі службою ЯБ та РБ організації.

До складу РІК підрозділу включаються підготовлені співробітники, які мають допуск до робіт з ЯМ, а також до облікової та технічної документації. Як правило, до складу РІК входять:

- голова (керівник підрозділу);
- представники служб ядерної безпеки та дозиметричного контролю;

- представники служби комп'ютерного обліку системи ОКЯМ;
- фахівці з вимірювань та забезпечення їх якості;
- спеціалісти зі статистичного аналізу;
- представник ЦК;
- представники служби безпеки та інші.

Матеріально відповідальна особа присутня під час роботи комісії, проте до складу інвентаризаційної комісії не включається.

Планування ФІ

Процедура проведення фізичних інвентаризацій на підприємствах є надзвичайно серйозною і передбачає обов'язкову наявність плану проведення робіт. Щодо ФІ добре підходить фраза, яка англійською звучить так: *Failing to plan is planning to fail* (відсутність планування – це планування провалу).

Інвентаризаційна комісія оцінює обсяг робіт з ФІ та розробляє план її проведення. План ФІ являє собою повний опис послідовності всіх операцій з ЯМ, використовувані засоби та результати, що подаються. Таким чином, план є тимчасовим графіком виконання робіт із зазначенням відповідальних виконавців по кожному розділу плану.

Планування проведення ФІ включає такі важливі етапи:

- одержання зареєстрованих в обліковій документації інвентарних кількостей ЯМ у ЗБМ для вивірки з даними з інших джерел (супровідних листів, накладних, паспортів, сертифікатів);
- розподіл сукупності пасивних ЯМ на страти та розрахунок обсягу випадкової вибірки для кожної страти для підтверджуючих вимірів;
- визначення прогнозованих вимог щодо вимірювань;

- визначення відповідальних виконавців робіт та розподіл обов'язків серед них;
- визначення потреби у персоналі;
- відбір ЯМ для облікових вимірів;
- для підтверджуючих вимірювань у плані вказують розміри вибірок залежно від стратегії вимірювань та характеристик вимірювальних приладів;
- тимчасовий графік та послідовність проведення вимірювань;
- розрахунок контрольних меж значень інвентаризаційної різниці та ін.

План проведення ФІ – великий пакет документів. На жаль, досвід проведення ФІ призводить до висновку, що створення певного типового документа, який розписував би процедури, достатні для практичного застосування на установці, навряд чи можливе. Кожна установка вимагає створення своїх процедурних документів з урахуванням загальних регламентів. Таким чином, потрібна дуже велика робота, пов'язана із плануванням ФІ на установках.

Підготовка підприємства до проведення фізичної інвентаризації

Після отримання наказу проведення інвентаризації (до початку ФІ) в ЗБМ виконуються підготовчі роботи. Вони включають підготовку документації, ядерних матеріалів, технологічного обладнання та приладів до проведення ФІ.

Усі ЯМ, що у роботі, призводять до вигляду, зручному щодо інвентаризації. Наприклад, упаковки з ЯМ приводять у положення, яке не ускладнює огляд відбитків пломб, прочитання їх заводських номерів, номерів партій і т.д.

ЯМ, що вимагають проведення облікових вимірювань їх кількості та складу, формуються у вигляді окремих облікових одиниць.

Підготовляються бланки інвентаризаційної відомості (табл. 7.1), необхідних для проведення інвентаризації. Приклад бланка інвентаризаційної відомості наведено нижче. Готуються бирки для позначення матеріалів, що пройшли інвентаризацію.

Проводиться зачищення обладнання та комунікацій. Підготовляється облікова та супровідна документація на наявні ЯМ (паспорти, формуляри, сертифікати та ін.). Матеріально відповідальна особа звіряє дані щодо ЯМ у РІК з даними оперативних та облікових документів.

Метрологи здійснюють перевірку готовності всіх приладів, призначених для вимірювань під час проведення ФІ.

Вимірювання під час проведення фізичної інвентаризації

Інформація, що одержується в результаті проведення ФІ, повинна ґрунтуватися на результатах вимірювань. Для проведення облікових та підтверджуючих вимірювань складу та кількості ЯМ застосовують атестовані методики, що діють на підприємстві, з використанням повірених засобів вимірювань.

Таблиця 7.1 Приклад бланка інвентаризаційної відомості

№ бирки	Шифр облікової одиниці	Ідентифікатор	Пломба/печатка	Обліковий номер документа	Вага бруutto	Вага тари	Вага нетто

Виміри (перевірки), що підтверджують, виконуються щодо пасивних ядерних матеріалів, а також активних, які проходили облікові вимірювання до поточної інвентаризації і з тих пір перебувають під засобами контролю доступу.

Які підтверджують вимірювання наступних атрибутивних ознак:

- наявність облікових одиниць із відповідним ідентифікатором (заводським номером, штриховим кодом);

- місцезнаходження;
- цілісність упаковки (контейнера);
- цілісність пристрою ідентифікації втручання (ПВ) та його ідентифікація.

Останні дві атрибутивні ознаки свідчать про відсутність несанкціонованого доступу до ЯМ.

Виміри, що підтверджують, спрямовані на виявлення дефектних облікових одиниць (ОО). Під **дефектними ОО** розуміють облікові одиниці з характеристиками, які відповідають обліковим даним. Приймається, що вимірювання атрибутивних ознак підтверджують заявлені дані, якщо:

- ОО з ЯМ перебувають на місцях, зазначених в обліковій документації;
- відсутні зовнішні ушкодження ОО;
- відсутні порушення устрою ідентифікації втручання;
- інформація, що міститься в штрих-кодах, збігається з відповідною інформацією, що міститься в обліковій документації.

Як правило, вимірювання атрибутивних ознак ЯМ виконують для всіх облікових одиниць ЗБМ.

Перевірка наявності та відповідності обліковим даним у межах похибки вимірювань матеріалу облікових одиниць:

- маси бруто/нетто;
- обсягу продукту;
- концентрації елемента та ізотопу;
- маси ЯМ у продукті.

Перевірка параметрів двох останніх позицій зазвичай виконується із залученням методів неруйнівного аналізу.

Якщо під час перевірки різниця виміряного значення та облікової величини не виходить за межі 99 % довірчого інтервалу, то приймається, що облікове значення зазначеної характеристики підтверджено. В іншому випадку облікова одиниця, що містить даний ЯМ, сприймається як дефектна. У цьому випадку проводиться аналіз та розслідування отриманої аномальної розбіжності та виконуються облікові вимірювання ЯМ.

Якщо до ЯМ застосовувалися засоби контролю доступу, то вимірювання матеріалів, що підтверджують, проводяться вибірково з використанням статистичних методів розрахунку обсягу вибірки.

Обсяг та вид підтверджуючих вимірювань визначається у документах підприємства.

Облікові виміри.

Під час інвентаризації виконуються облікові вимірювання характеристик активних ЯМ, які були виконані до інвентаризації.

Порядок проведення фізичних інвентаризацій

Потрібно розуміти, що фізична інвентаризація – це процес:

- знаходження всіх облікових одиниць;
- підтвердження їхньої ідентифікації;
- підтвердження відсутності несанкціонованих дій із ЯМ;
- підтвердження/визначення облікових значень параметрів ЯМ.

При цьому відсутність підтвердження свідчить про наявність аномалії. В результаті фізична інвентаризація не тільки підтверджує, що всі матеріали, враховані в документації, є в наявності, а й засвідчує, що всі матеріали, що є в наявності, враховані в документації.

Процедури та способи проведення ФІ на підприємствах залежать від типу технологічного процесу, кількості та виду ядерних матеріалів у ЗБМ та

визначаються у плані проведення ФІ. Проте можна назвати деякі загальні умови. А саме:

- На час проведення ФІ роботи в ЗБМ, що перевіряється, пов'язані з відправкою, отриманням, списанням (зняттям з обліку) ЯМ, а також з формуванням нових ОО, припиняють.
- Вимірювання під час інвентаризації повинні проводитись відповідно до розробленого тимчасового графіка та послідовності проведення вимірювань.
- Роботи з інвентаризації ядерних матеріалів у ЗБМ проводяться щонайменше двома особами одночасно.
- Ядерні матеріали під час проведення інвентаризації повинні перебувати під контролем МВО цієї ЗБМ.

У порядку реєстрації облікових одиниць в описі (РІК) ЯМ, що знаходяться у ЗБМ, РІК перевіряє відповідність фактичної наявності ЯМ обліковим даним:

- перевіряють фактичну наявність ОО з ЯМ у ЗБМ;
- перевіряють відсутність зовнішніх пошкоджень ОО та відсутність порушення ПІВ;
- вивіряють ідентифікаційні номери (якщо баркодні мітки, то із застосуванням зчитувача) ПІВ та ОО;
- визначають фактичну кількість ЯМ у ЗБМ шляхом їх вимірів (облікові та підтверджуючі виміри);
- оцінюють величину безповоротних втрат та її похибку.

За результатами проведеної роботи РІК складає список фактично наявної кількості ядерних матеріалів. Про всі виявлені у процесі роботи розбіжності (нестача, надлишки, неправильне списання чи оформлення використаних у

технологічних процесах матеріалів тощо.) РІК повідомляє керівництву підприємства.

Інвентаризацію закінчують підбиттям матеріального балансу, оцінкою інвентаризаційна різниця (ІР) та похибки її визначення для кожного виду ЯМ. Якщо в результаті ФІ не встановлено аномалію в обліку та контролі ядерних матеріалів, то документально зареєстрована наявна кількість ядерного матеріалу в ЗБМ використовується як наявна кількість ядерного матеріалу в ЗБМ на початок наступного міжбалансового періоду.

Оформлення результатів фізичної інвентаризації

За результатами ФІ складаються СФНК ЯМ, акти інвентаризації, що містять висновок та рекомендації РІК, а також матеріально-балансовий звіт (МБЗ).

У СФНК для ЯМ у формі виробів, що враховуються за заводськими номерами, вказують:

- номер бирки ОО;
- позначення виробу;
- ідентифікаційний номер;
- обліковий номер документа (паспорт, формуляр).

У СФНК для ЯМ у балк-формі, що враховуються за масою, вказують:

- номер бирки контейнера;
- шифр матеріалу;
- ідентифікаційний номер контейнера;
- маса (лігатурна та чиста);
- джерело інформації про масу ЯМ (номер паспорта, формуляра, акта зважування та ін.).

До акту інвентаризації вносяться факти виявлення аномалій (якщо в ході інвентаризації вони були виявлені). При цьому інвентаризаційна комісія формулює рекомендації щодо їх усунення. Встановлена РІК аномалія докладно описується в записці пояснення, яка прикладається до комплекту документів з проведення ФІ. У акті інвентаризації робляться висновки про значимість ІР. Акт підписують голова та всі члени комісії, які проводили інвентаризацію. З актом знайомляться керівник підрозділу та МВО.

Після інвентаризації складається матеріально-балансовий звіт, який містить дані щодо балансу ЯМ за міжбалансовий період, включаючи значення інвентаризаційної різниці та її похибки.

Вартість проведення ФІ. Проблема початкових ФІ

Наведена вище процедура свідчить про те, що проведення фізичних інвентаризацій – надзвичайно дорогий захід. Наприклад, Міністерство енергетики США, у віданні якого перебуває шість національних лабораторій і ще приблизно три десятки ядерних виробництв, включаючи складально-розбірні виробництва Pantex, промислове ядерне виробництво Hanford та інші, витрачає на проведення фізичних інвентаризацій щорічно мільйони доларів. І це в умовах, коли значна кількість матеріалів в американській ядерній промисловості на сьогоднішній день знаходиться саме в контейнерах, опечатаних, які перевіряються на періодичній або постійній основі. Вони витрачають такі суми в умовах, коли не весь матеріал потрібно вимірювати і коли початкові інвентаризації було проведено багато років тому.

Проблема кадрів

У процесі проведення перших фізичних інвентаризацій з'ясувалося, що навіть фахівці, які створювали та створюють реально діючі економічні та безпечні ядерні установки, виявилися неспроможними без попереднього спеціального навчання розробити та застосувати процедури, пов'язані з проведенням фізичної інвентаризації. І це тому, що фізична інвентаризація є своєрідним глобальним фізичним експериментом. Тому організована система підготовки та підвищення кваліфікації кадрів у системі фізичного захисту (СФЗ) і ОКЯМ надзвичайно важлива для нашої країни.

Баланс ядерних матеріалів

Припустимо, що на об'єкті, що розглядається, здійснюються періодичні фізичні інвентаризації ЯМ (рис. 7.1). Нехай час T є міжбалансовий період.

Припустимо, що ми знаємо фактично готівку НК матеріалу в даній зоні балансу матеріалів на момент проведення попередньої фізичної інвентаризації. За міжбалансовий період T у цій ЗБМ отримано ЗБ матеріалів. Це кількість матеріалів, отримання яких зареєстровано в документах.

Аналогічно, ЗМ – це кількість матеріалу, яка відправлена з даної зони балансу матеріалів у період між фізичними інвентаризаціями.

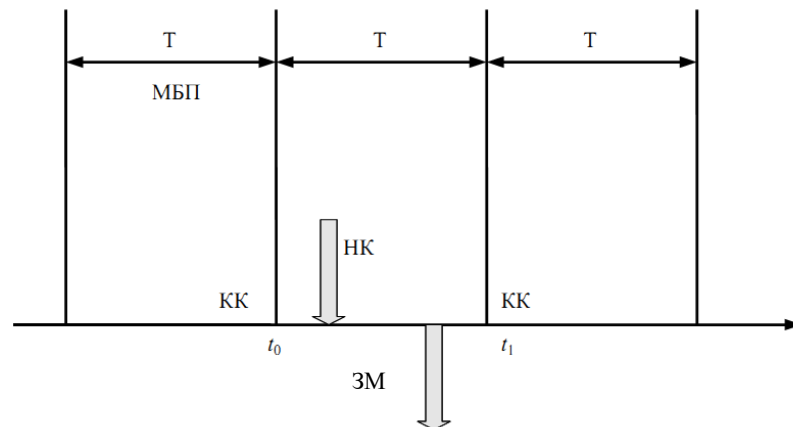


Рисунок 7.1. Цикл підведення балансу ЯМ у ЗБМ

Зареєстрована кількість ядерних матеріалів (ЗК) – це кількість ядерних матеріалів, яка має знаходитись у ЗБМ за документами на конкретну дату. Очевидно, що кінцева зареєстрована кількість ЗК матеріалів у цій зоні балансу матеріалів на момент проведення поточної фізичної інвентаризації є:

$$ЗК = НК + ЗБ - ЗМ, \quad (7.1)$$

де НК – наявна кількість ЯМ в ЗБМ, певне та документально зареєстроване на початок даного МБП, ЗБ – певне та документально зареєстроване збільшення кількості ЯМ за даний міжбалансовий період (МБП), ЗМ – певне та документально зареєстроване зменшення кількості ЯМ за даний МБП.

Фактично наявна кількість КК ядерних матеріалів – це кількість матеріалів, зафіксоване у процесі проведення поточної фізичної інвентаризації шляхом вимірювань та підрахунку.

Різниця між фактичною наявною кількістю КК і зареєстрованою кількістю матеріалу ЗК на момент поточної ФІ називається інвентаризаційною різницею. Підведення балансу ядерних матеріалів полягає у знаходженні ІР.

Наступне рівняння дає формальне визначення інвентаризаційної різниці ІР:

$$ІР = КК - ЗК = (КК + ЗМ) - (НК + ЗБ), \quad (7.2)$$

де КК – фактично наявна кількість ЯМ в ЗБМ, визначене в результаті цієї ФІ.

Рівняння (7.2) є основним балансним співвідношенням. Це рівняння має вирішуватись на періодичній основі для кожної зони балансу матеріалів.

Статистична інтерпретація балансу ядерних матеріалів

Інвентаризаційна різниця неминуха внаслідок неминучих похибок системи вимірів. Вона може бути як зі знаком плюс, так і зі знаком мінус.

У загальному випадку значення НК, КК, ЗБ, ЗМ у рівнянні визначаються експериментальним шляхом і містять систематичні та випадкові помилки

вимірювань. Вимірні значення *НК*, *КК*, *ЗБ*, *ЗМ* є невід'ємними випадковими величинами, що мають деякі розподіли щільності ймовірностей.

Підсумкове значення *ІР* також є випадковою величиною, яка може бути позитивною, негативною або рівною нулю, що володіє деяким розподілом густини ймовірності, породженим композицією розподілів густини ймовірностей величин *НК*, *КК*, *ЗБ*, *ЗМ*.

Для визначення величини середньоквадратичної похибки *ІР* слід використовувати метод «перенесення похибок вимірювань», що полягає в розрахунку похибки інвентаризаційної різниці, виходячи з похибок вимірювання величин, що входять до рівняння балансу ЯМ. При цьому беруться до уваги випадкові та систематичні складові похибок та можливі кореляції похибок вимірювань характеристик ЯМ.

Підведення балансу за пасивними ядерними матеріалами

Підведення балансу означає встановлення відповідності за кількістю продуктів, за атрибутивними ознаками та параметрами ЯМ.

Аномалією в обліку та контролі пасивних ЯМ є:

- недолік/надлишок облікової одиниці;
- порушення відповідності заявленої та реальної атрибутивної ознаки ЯМ;
- непідтвердження внаслідок виконання вимірювання параметра ЯМ.

Про відсутність аномалій у пасивних ядерних матеріалів свідчить збіг усіх позицій у списках СНК та СФНК на момент інвентаризації. Збіг позицій автоматично підтверджує баланс пасивних ЯМ як у штуках ОО, і у одиницях маси, і навіть рівність нулю *ІР* і похибки *ІР* для них.

Підведення балансу за активними ядерними матеріалами та визначення інвентаризаційної різниці

У загальному випадку для активних ЯМ висновок про виконання балансу на підставі збігу СНК та СФНК щодо кожної ОО зробити неможливо, тому що протягом МБП активні ЯМ зазнають змін. Тому у разі активних ЯМ розглядається інтегральний критерій відповідності облікового та фізичного залишку ЯМ у ЗБМ на момент поточної ФІ. Таким критерієм є величина інвентаризаційної різниці.

Підведення балансу активних ЯМ передбачає встановлення відповідності СНК та СФНК як за кількістю продуктів, так і за атрибутивними ознаками. Крім того, для активних ядерних матеріалів має бути визначена інвентаризаційна різниця та її граничні значення. Для коректної оцінки величини інвентаризаційної різниці слід враховувати відходи, втрати, безповоротні втрати, відкладення ЯМ у технологічному обладнанні.

Рівняння (7.2) дозволяє підводити баланс сукупності активних ЯМ в одиницях маси ядерного матеріалу. При цьому баланс треба підбивати за кожним видом ядерного матеріалу: уран, уран-235, уран-233, плутоній і т.д.

Висновок про відсутність аномалій в обліку та контролю ядерних матеріалів робиться на підставі перевірки числа та атрибутивних ознак усіх активних ЯМ та величини ІР, отриманої в даній інвентаризації.

Для активних ЯМ аномалією є розбіжності СНК та СФНК за кількістю ОО або їх атрибутивними ознаками. А інтегральним критерієм виявлення аномалії є перевищення модулем інвентаризаційної різниці або її потрібної середньоквадратичної похибки або значень будь-якої з наступних величин (при довірчій ймовірності 0,95):

- 2% від суми зареєстрованої кількості даного ядерного матеріалу та всіх збільшень його кількості за МБП – для промислових ядерних установок;
- 3% такої ж величини – для дослідних ядерних установок;

- 3 кг – по плутонію, урану-233 для ЗБМ, що містять ядерні матеріали категорій 1, 2;
- 8 кг - по урану-235 для ЗБМ, що містять ядерні матеріали категорій 1, 2 та 3;
- 70 кг по урану-235 - для урану зі збагаченням менше 20%.

Межі допустимих відхилень ІР на основі обліку похибок вимірювань ЯМ

Припустимо, ІР характеризується нормальним розподілом. Позначимо

$$S = \sigma_{IP} = (\text{Var}(IP))^{\frac{1}{2}} = (\sigma_{\text{НК}}^2 + \sigma_{\text{КК}}^2 + \sigma_{\text{ЗБ}}^2 + \sigma_{\text{ЗМ}}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7.3)$$

Для аналізу допустимих відхилень ІР розглядаються два інтервали. Інтервал $(-2 \sigma \text{ IP}, +2 \sigma \text{ IP})$ є 95%-ним довірчим інтервалом. А інтервал $(-3 \sigma \text{ IP}, +3 \sigma \text{ IP})$ є 99 %-ним довірчим інтервалом:

а) 95%-й довірчий інтервал. Вважають значення ІР, що виходять за діапазон $(\pm 2 \sigma \text{ IP})$, статистично значущими.

Межі цього інтервалу зазвичай використовуються як запобіжні межі (warning limit) розкиду ІР. Для такого інтервалу частота появи хибної тривоги – 5%;

б) 99%-й довірчий інтервал. Межі цього інтервалу зазвичай використовуються як граничний рівень для подачі сигналу тривоги (alarm limit). Для такого інтервалу частота появи хибних сигналів – 1%.

Графічна ілюстрація поняття межі допустимих відхилень ІР наведено на рис. 7.2, де наведено приклад карти контролю ІР за допустимими відхиленнями. Вихід за кордон "Alarm" розглядається як аномалія і говорить про необхідність докладного аналізу причин.

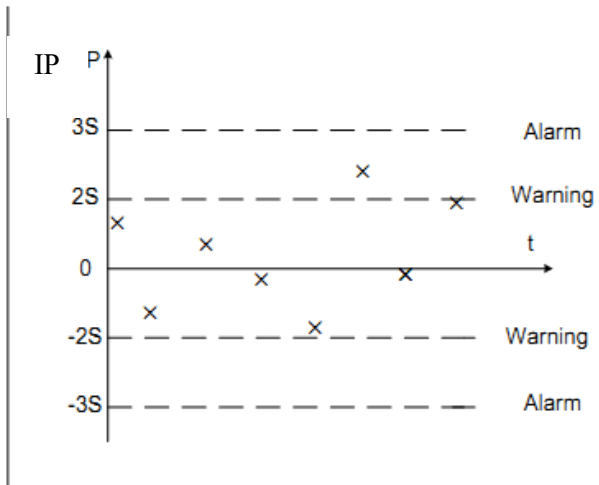


Рисунок 7.2. Карта контролю балансу ЯМ у ЗБМ (S – одна сигма IP)

Контрольні запитання

1. Чим відрізняється список зареєстрованій інвентаризаційній кількості від списку фактичної наявності інвентаризаційній кількості?
2. Що входить до змісту матеріально-балансового звіту?
3. Які критерії аномалії застосовуються відповідно до українських норм та правил?
4. Які документи потрібно вести у рамках системи обліку і контролю ЯМ на ядерній установці?

Тема 8. Необлікований (неврахований) матеріал

Важливим завданням, яке має бути вирішено в рамках ОКЯМ, є вирішення питання виникнення відмінностей між останнім зробленим під час інвентаризації записом про кількість якогось ядерного матеріалу в зоні балансу та фізичним виміром цього матеріалу, проведеного після закінчення періоду матеріального балансу.

Для початку, розглянемо два різні види обліку для об'єкта з ядерними та іншими радіоактивними матеріалами: фізичний запас (*physical inventory*) та обліковий (книжковий) запас (*book inventory*).

Фізичний запас є сумою всіх вимірних чи розрахованих обсягів партій наявних ядерних матеріалів на даний момент часу в даній зоні матеріального балансу. Фізичний запас визначається як результат фізичних вимірів (результати цих вимірів якраз і верифікуються МАГАТЕ під час проведення інспекцій). Інспекція фізичного запасу означає закінчення поточного періоду матеріального балансу та початок нового.

Обліковий запас зони матеріального балансу є сумою алгебри найбільш недавнього вимірювання фізичного запасу і всіх змін, які відбулися з моменту проведення цього вимірювання. Таким чином, обліковий запас можна розрахувати за допомогою простого рівняння алгебри:

$$BI = PB + X - Y, \quad (8.1)$$

де BI – обліковий запас, PB – фізичний запас початку періоду матеріального балансу, X – сума всіх збільшень запасу, а Y – зменшення запасу.

Існує кілька причин, що призводять до зміни запасу для підприємства. Наприклад, випадки збільшення ЯМ в зоні матеріального балансу:

- Імпорт;
- внутрішні поставки;
- ядерне виробництво;

- випадкове придбання;
- повернення з відходів, що збереглися;
- взяття ядерного матеріалу під гарантії МАГАТЕ.

Приклад випадків зменшення :

- експорт;
- внутрішні відправки;
- втрата;
- вимірний викид;
- передача зберігання відходів;
- звільнення ядерного матеріалу від гарантій МАГАТЕ;
- припинення гарантій МАГАТЕ щодо ядерного матеріалу, переданого у неядерне використання.

Повернемося тепер до відмінностей між фізичним та обліковим запасом, які прийнято називати неврахованим матеріалом (Material Unaccounted For (*MUF*)). Таким чином, неврахований матеріал являє собою різницю між обліковим записом у журналі та результатом фізичного вимірювання ядерного матеріалу, виконаним у зоні балансу після закінчення періоду балансу матеріалу (*PE*), що можна описати за допомогою наступної формули:

$$MUF = (PB + X - Y) - PE, \quad (8.2)$$

або :

$$MUF = BI - PE \quad (8.3)$$

Зрозуміло, що для штучних ЯМ величина матеріалу, що не враховується, завжди повинна дорівнювати «0». Ненульове значення вказує на проблему (наприклад, помилка рахунку). Для ЯМ у балк-формі ненульове значення може виникнути з однієї з трьох причин:

- 1) невизначеності вимірів;
- 2) специфіка технологій для підприємства;
- 3) невизначеності вимірювань оператором, пов'язані з PB , X , Y і PE .

Неврахований з цих причин матеріал об'єднується для визначення невизначеності всього матеріального балансу σ_{MUF} .

Кумулятивний неврахований матеріал дорівнює простій алгебраїчній сумі матеріалів, що не враховуються за кожен період матеріального балансу:

$$MUF_c = \sum_{t=1}^T MUF_t \quad (8.4)$$

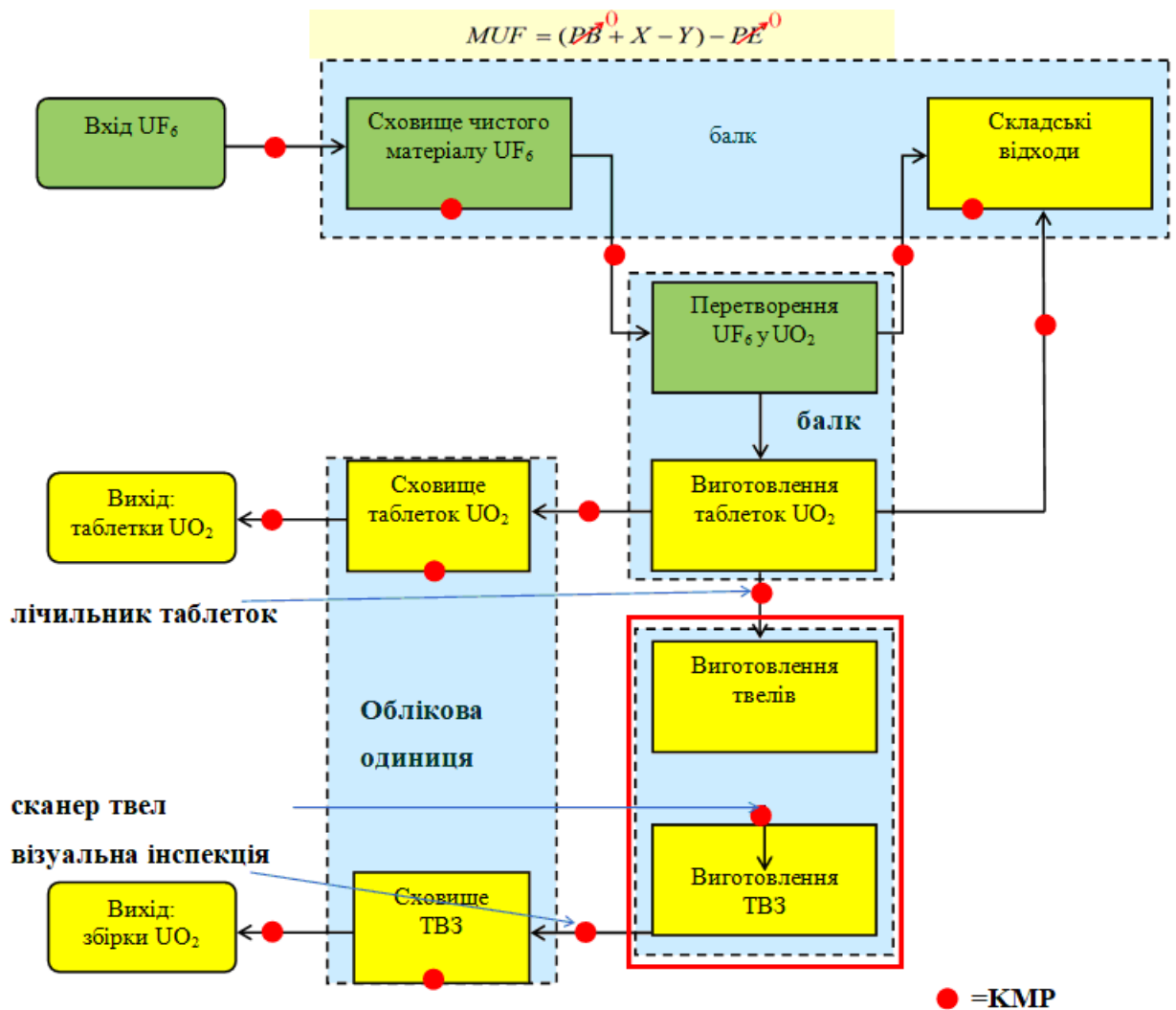
Очікується, що система обліку ЯМ повинна забезпечити неперевищення матеріалом, що не враховується, величини трьох стандартних відхилень при фізичному вимірі матеріалу, що не враховується:

$$|MUF| < 3\sigma_{MUF},$$

і що неврахований матеріал менше, ніж одиниця суттєвої кількості (Significant Quantity (SQ)) за період часу, зазначений МАГАТЕ на меті підприємства (зазвичай відповідає періоду матеріального балансу).

Приклад 1.

Як приклад підприємства візьмемо завод із виробництва слабозбагачених ТВЗ для водо-водяних реакторів. Розглянемо зону матеріального балансу, де здійснюється виробництво паливних таблеток та ТВЗ, тобто штучних ЯМ. Для штучних ЯМ матеріали, що не враховуються, повинні дорівнювати «0» наприкінці періоду матеріального балансу. Будь-яке інше число означатиме проблему.



Нехай зона матеріального балансу щоразу повністю звільняється від ЯМ наприкінці періоду матеріального балансу. Це означає, що фізична інвентаризація покаже повну відсутність таблеток, твелів та ТВЗ у зоні матеріального балансу. Тобто, PB та PE дорівнюють нулю. Таким чином, щоб розрахувати неврахований матеріал, потрібно виміряти скільки ЯМ надходить і залишає зону матеріального балансу. У формулі число X показує кількість паливних таблеток, що надійшли в зону матеріального балансу за період матеріального балансу. Це число можна виміряти за допомогою лічильника таблеток. Y являє собою кількість ТВЗ, що залишили зону матеріального балансу, помножене на кількість ТВЕЛ в одній ТВЗ і кількість таблеток в одному ТВЕЛ. Це число можна визначити на підставі візуального контролю

кількості ТВЗ та твелів та за допомогою сканера кількості таблеток в одному твелі.

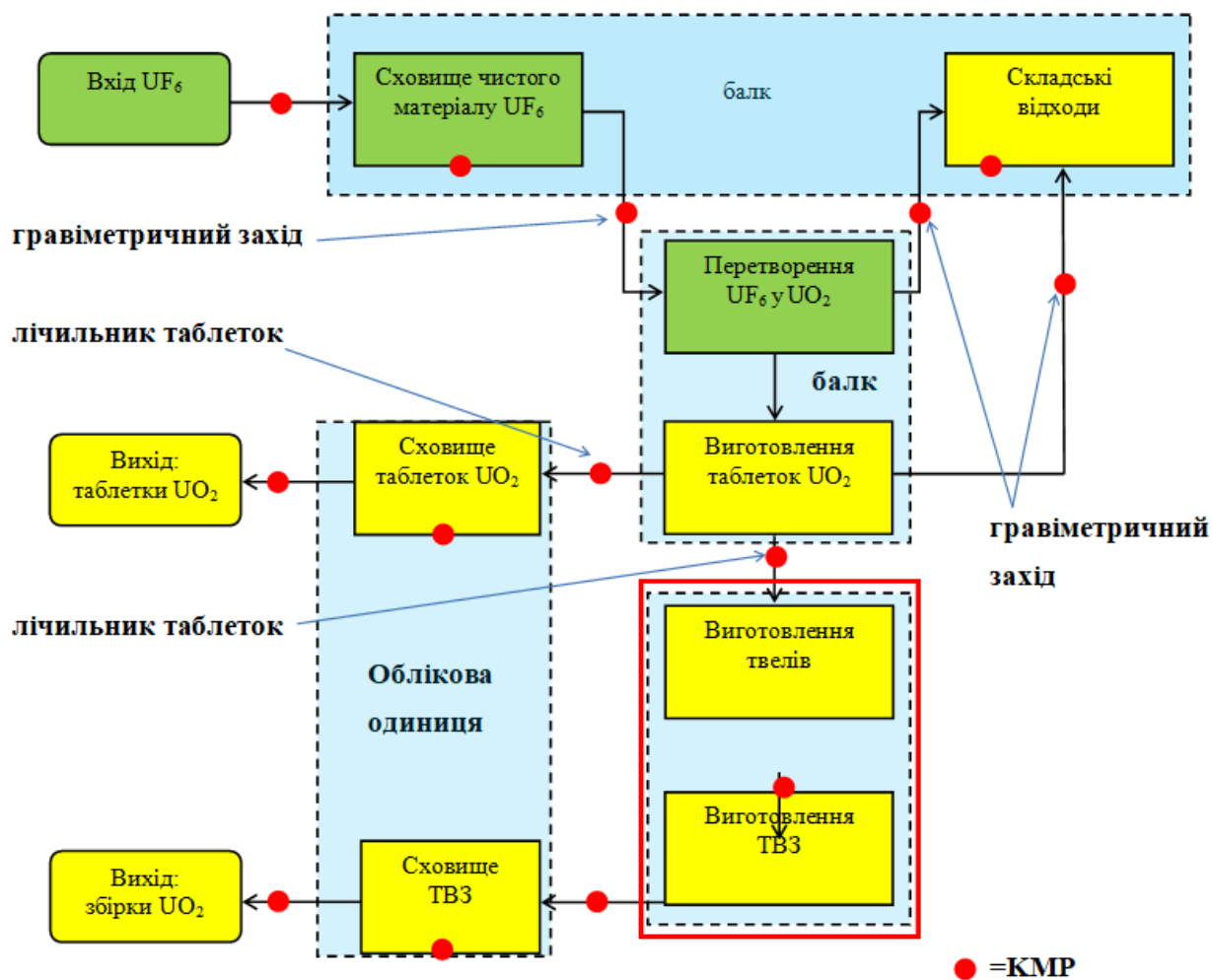
Якщо у наведений приклад додати чисельні значення, наприклад, підприємство виробляє 80 ТВЗ на рік і кожна ТВЗ складається з 205 ТВЕЛ. Період матеріального балансу становить 3 місяці, що менше, ніж наказує МАГАТЕ для підприємств із слабозбагаченим свіжим паливом (1 рік). Таким чином, за один період матеріального балансу підприємство виготовить 20 ТВЗ. Державна система ОКЯМ показує, що за період матеріального балансу пораховано 3280000 паливних таблеток, сканер твел – 800 таблеток у кожному твел і візуальний контроль показав 20 ТВЗ із 205 твелами у кожній ТВЗ.

Результат розрахунку показує, що неврахований матеріал дорівнює «0» за період матеріального балансу.

Приклад 2.

Розглянемо складніший приклад. Розглянемо етап конверсії фториду урану та виробництва паливних таблеток. На цьому етапі зона матеріального балансу отримує уран у вигляді порошку, відходи порошку переміщуються до сховища відходів та виробляє власне паливні таблетки. Ця зона матеріального балансу містить ЯМ у балк-формі. Порошок урану проходить зважування для вимірювання маси урану. Відходи порошку урану також зважуються перед відправкою до сховища відходів. Кількість паливних таблеток вимірює лічильник і середня маса паливної таблетки використовується з метою оцінки повної маси урану, вивезеної із зони матеріального балансу.⁴

Для цього періоду матеріального балансу Державна система ОКЯМ повідомляє про маси урану та його збагачення під час надходження та відправлення із зони матеріального балансу. Нехай зона матеріального балансу щоразу повністю звільняється від ЯМ в кінці періоду матеріального балансу, що означає, що РВ і РЕ дорівнюють нулю.



Для оцінки збільшення запасу X необхідно розрахувати масу урану 235, що надійшов в зону матеріального балансу. Це можна зробити помножуючи повну масу урану на величину збагачення. Якщо розрахунок виконаний правильно, то в матеріальну зону балансу надійшло 1496,2 кг 235 урану.

Зменшення запасу відбувається за рахунок відвантаження як таблеток так і відходів. Зменшення за рахунок таблеток можна порахувати помноживши кількість паливних таблеток на середню масу таблетки і збагачення урану 235. Цей розрахунок показує, що було відвантажено 1458,1 кг урану 235 як паливних таблеток із зони матеріального балансу.

Зниження запасу через відвантаження урану як відходів розраховується як маса відходів помножена на збагачення урану 235. Цей розрахунок показує відвантаження 16,5 кг відходів урану 235 у сховище відходів із зони матеріального балансу.

Цей матеріал, можливо, був використаний інакше, але щоб це знати точно, необхідно перевірити, чи включений цей недостатній матеріал до невизначеності вимірювань. Невизначеності вимірювань наведено нижче.

З курсу статистики отримуємо помилку оцінки неврахованого матеріалу рівну 26624 г урану 235. Отримане значення неврахованого матеріалу менше, ніж 3 помножене на стандартне відхилення неврахованого матеріалу. Тим не менш, помилка досить велика і це вимагає покращення системи ОКЯМ або технологічних процесів для отримання 3 сигми менше 1 суттєвої кількості.

Контрольні запитання

1. Що слід вказувати в облікових документах під час перевірки наявності ЯМ на підприємствах, де є лише мала кількість ЯМ (менше 1 гр)?
2. Які дії виконуються у разі виявлення необлікованого матеріалу?

Тема 9. Показники ефективності системи ОКЯМ

Для надійного та ефективного функціонування системи ОКЯМ на підприємстві має бути затверджена програма періодичної оцінки та контролю її ефективності [4]. При цьому повинні враховуватися наступні аспекти:

- Періодичність оцінки має вибиратися з урахуванням диференційованого підходу, залежно від привабливості ядерного матеріалу;
- Можуть знадобитися більш часті оцінки у разі виявлення проблем (таких як позаштатні ситуації, незадовільні результати оцінки);
- Результати всіх оцінок повинні оформлятися документально та надаватися керівництву для ухвалення рішень.

Програма періодичних оцінок (перевірок) системи ОКЯМ та її елементів повинна дозволити встановити, чи реалізовані та функціонують вони відповідно до проекту, і чи відповідають вони вимогам до робочих характеристик, встановлених державним регулюючим органом. Виходячи з цього, програма повинна:

- Включати оцінки системи загалом та кожного з її елементів;
- Вказувати осіб, уповноважених на проведення оцінок (наприклад, фахівці з ОКЯМ та інші профільні фахівці, компетентні та технічно кваліфіковані). Це можуть бути особи як з підрозділу, що перевіряється, так і з суміжних або ж з зовнішніх організацій. Важливо, щоб у своїй виникав конфлікт інтересів, тобто. не був зацікавлений у виключно позитивних результатах оцінки;
- Містити перелік систем або елементи, що підлягають оцінці;
- Наводити критерії оцінки;
- Утримувати процедуру коригувальних дій з очікуваними термінами їх виконання, яка повинна забезпечувати довгострокове забезпечення працездатності системи ОКЯМ;

- Детально описувати процедуру зворотного зв'язку в процесі оцінки;
- Утримувати графік проведення наступних оцінок та перевірки функціонування з метою оцінки ефективності коригуючих дій.

Результати оцінки та перевірки ефективності системи ОКЯМ повинні доводитися до персоналу. Коригувальні заходи, направлення на виключення повторення виявлених недоліків, не повинні карати персонал, а передусім повинні виявляти причини допущених помилок, відповідати ступеню серйозності та орієнтуватися на довгострокову перспективу, а не на негайне вирішення проблем. При цьому необхідно забезпечити захист документів про виявлені недоліки як чутливої інформації, щоб виключити її потрапляння злоумисникам.

Програма оцінки має обмежуватися врахуванням виключно проектних критеріїв, але й враховувати ефективність системи загалом і здатність системи забезпечувати задані робочі показники. Таким чином, програма оцінки має:

- Забезпечувати розуміння, впровадження, виконання та підтримання в актуальному стані процедур та інструкцій;
- Виявляти та попереджати керівництво про будь-які ознаки або тенденції, які можуть свідчити про неналежне функціонування системи ОКЯМ;
- Забезпечувати аналіз корінних причин та ефективності коригувальних дій, що застосовуються для запобігання повторенню проблем;
- Забезпечувати отримання керівництвом інформації про ефективність системи ОКЯМ.

Загалом, програма оцінки підтверджує відповідність системи ОКЯМ та її елементів основним проектним вимогам та вимогам регулюючого органу, тоді

як програма перевірки функціонування робить на крок далі, роблячи спробу реального подолання системи:

- Перевірка функціонування – це не просто підтвердження відповідності системи проектним вимогам;
- Перевірка функціонування створює або вносить позаштатні ситуації або позаштатні ситуації, що моделюються, в ретельно контрольованих обставинах з метою перевірки їх виявлення системою ОКЯМ;
- Перевірка функціонування є особливо важливою для досягнення цілей фізичної ядерної безпеки.

Таким чином, цілі перевірки функціонування системи ОКЯМ зводяться до наступного:

- Забезпечення того, щоб випробувана система, міра або елемент могли виконувати своє призначення в галузі фізичної ядерної безпеки, тобто були здатні виявити несанкціоноване вилучення ядерних матеріалів;
- Підтвердження чи надання інформації для процесу оцінки.

Під час розробки програми перевірки функціонування системи ОКЯМ рекомендується враховувати наступне:

- Під час підготовки та проведення перевірки не допускається порушення контролю ядерних матеріалів! І це є великою складністю при плануванні та координації перевірки, щоб з одного боку перевірка була реалістичною та з іншого – відсутня втрата контролю над ЯМ;
- Чинники, що беруться до уваги програмою перевірки функціонування:
 - Затвердження методів та обсягів перевірки функціонування;
 - Належне документування;

- Планові перевірки за встановленим графіком, включаючи тестування процедур спостереження за ядерними матеріалами або періодичні адміністративні перевірки;
- Тестування змін, внесених до системи ОКЯМ;
- Координація перевірки функціонування з усіма організаціями об'єкта, що беруть участь або торкаються тестування.

У якому обов'язі здійснюється перевірка функціонування системи ОКЯМ?

- Процедури
 - Чи дотримуються вони?
 - Чи відповідають їх формулювання за призначенням?
 - Чи дійсні вони при їх виконанні?
- Програми
- Системи
- Устаткування
- Координація з рештою підрозділів об'єкта

Кожен елемент системи ОКЯМ повинен перевірятися!

Фактори, що приймаються до уваги при оцінці та перевірці функціонування:

- Система ОКЯМ має бути частиною загальної системи ядерної безпеки об'єкта і, відповідно, частиною аналізу ефективності;
- Повинні розглядатися всі достовірні сценарії вилучення ядерних матеріалів з рукавичних боксів, зон сховищ або будівель, а також всі можливі способи здійснення несанкціонованого вилучення ядерних матеріалів;
- Сценарії повинні враховувати, наприклад, кількість, тип, фізичну форму, тривалість знаходження та можливість перенесення ядерного матеріалу;

- Слід приділяти особливу увагу таким областям, де система обліку може виявити втрату невеликих кількостей ядерних матеріалів.

Для обґрунтованості результатів оцінки та перевірки функціональності системи ОКЯМ необхідно в програму запровадити систему показників (критеріїв) ефективності. Показники мають бути сфокусовані на тих завданнях та процесах, які здаються найбільш критичними з погляду перешкодження несанкціонованому вилученню ядерних матеріалів.

Для вибору показників необхідно заздалегідь виявити ті елементи системи ОКЯМ, які необхідно оцінити. І тут важливо виявити елементи, які одночасно можуть вплинути на ефективність як системи ОКЯМ так і фіззахисту або при виникненні події в одній області потрібні дії у відповідь і в іншій. У таких випадках для зручності розробляються матриці вибору, як наведено у таб. 9.1.

Таблиця 3.1 – Матриця оцінки ефективності

		Показники ефективності		
		1	2	3
Вимога	1	середньо	сильно	сильно
	2	сильно	середньо	слабко
	3	середньо	слабко	сильно

Для побудови матриці насамперед необхідно ідентифікувати критичні вимоги щодо запобігання та виявлення несанкціонованого вилучення ядерних матеріалів. Потім класифікувати діючі на підприємстві показники відповідно до того, наскільки сильно, слабо або середньо пов'язані з цими вимогами.

Після цього розробити план для інтегрального аналізу показників з високим ступенем уніфікації, а також для розробки нових показників, які з якоїсь причини досі адекватно не враховувалися.

Показники ефективності повинні включати як позитивні індикатори досягнутого рівня (наприклад, встановлення елементів захисту та виявлення, контроль ризику, впровадження покращень тощо), так і негативні індикатори (наприклад, недоліки виявлення подій).

Кожен показник може бути сформульований у контексті часу та/або кількості, однак, при цьому необхідно переконатися, що «ширина» та «глибина» показників пропорційна ризику та ядерному матеріалу.

Ефективність у запобіганні та виявленні несанкціонованого вилучення ядерних матеріалів це не питання найможливішого інциденту, а скоріше свідчення про здатність діяти, а також тренди у поліпшенні або деградації цієї здатності або виникненні вразливостей. Найрізноманітніші показники тісно пов'язані з вимогами щодо запобігання та виявлення несанкціонованого вилучення ядерних матеріалів.

Загалом такі показники повинні включати:

- Тривале вилучення: включає показники, що стосуються балансу матеріалів, відхилень процесу, моніторингу потоку, проведення вимірювань і моніторингу відходів.
- Зняття/вилучення матеріалу з облікового запису: включає показники для відхилень при зважуванні, перевірки пристроїв індикації несанкціонованого розтину та відмінностей одержувача/відправника вантажу.
- Несанкціонована діяльність у сфері поводження з ядерними матеріалами: включає показники, пов'язані з правилом двох осіб, дозволами, бар'єрами і системами стримування і спостереження.

- Раптове вилучення: включає показники, що стосуються відстеження, обходу точок вимірювання і контролю процесів, контролю вхідного-вихідного балансу, що підтверджують вимірювань ключових параметрів, перевірок місця знаходження, контролю порожніх контейнерів і верифікації потоку і виходу.

Висновки.

- Періодичні оцінки та перевірки функціонування необхідні для забезпечення відповідності системи ОКЯМ та її елементів вимогам фізичної ядерної безпеки щодо виявлення несанкціонованого вилучення ядерних матеріалів.
- Здійснення програм оцінки та перевірки функціонування допомагає забезпечити ефективність, правильне документування та застосування процедур та навчання за системою ОКЯМ.

Оцінки та перевірки функціонування повинні проводитися періодично та за потребою у разі змін протягом усього життєвого циклу системи ОКЯМ.

Контрольні запитання

1. З якою метою виконуються оцінки стану ОКЯМ?
2. Які перевірки входять в об'єм оцінки стану ОКЯМ?
3. В чому різниця у підходах МАГАТЕ та України щодо оцінки ефективності ОКЯМ?

Тема 10. Вимірювання ЯМ. Основні поняття, що застосовуються під час вимірювання ядерних матеріалів

До початку 1990-х років на підприємствах ядерної галузі вимірювання ЯМ насамперед мали на меті управління технологічними процесами. Неруйнівні аналізи (НРА) (крім зважування) відігравали другорядну роль.

У 1990-ті роки почали вживати всебічних заходів щодо прискореного впровадження НРА в систему ОКЯМ, включаючи оснащення підприємств та організацій сучасною апаратурою, розробку та атестацію державних стандартних зразків (ДСЗ) для НРА, створення відповідних нормативних документів, підготовку кадрів з використанням різних форм навчання. Важливе значення у проведенні зазначених заходів мало і має міжнародне співробітництво.

Вимоги до державного обліку та контролю ядерних матеріалів при їх виробництві, використанні, переробці, зберіганні та транспортуванні встановлені у «Правилах ведення обліку та контролю ядерних матеріалів» (НП 306.7.122-2006).

Найпоширенішими збройовими ЯМ є уран та плутоній. Збройовий уран (Weapon Grade Uranium - WGU) містить 93% або більше ^{235}U .

Збройовий плутоній (Weapon Grade Plutonium – WGPu) є чистим металевим плутонієм, який містить не більше 7% ізотопу ^{240}Pu .

Реакторний плутоній (Reactor Grade Pu - RGPu) накопичується в паливі енергетичних реакторів і містить 19% або більше ізотопу ^{240}Pu , зразкові ізотопні композиції плутонію у відпрацьованому паливі різних реакторів представлені в табл. 10.1 [10].

Таблиця 10.1 – Ізотопний склад плутонію, що накопичується в паливі енергетичних реакторів

Тип реактору	Вигорання палива (ГВт·доба/т)	Ізотопна композиція, %			
		^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
AGR	18,0	53,7	30,8	9,9	5,0
RBMK	20,0	50,2	33,7	10,2	5,4
BWR	27,5	59,8	23,7	10,6	3,3
PWR	33,0	56,0	24,1	12,8	5,4

Як відомо, ізотопний склад ЯМ визначає його властивості. Від нього залежать:

- критична маса;
- генерація нейтронів спонтанного поділу, які впливають на конструкцію та потужність вибухового пристрою. Для плутонію їх число прямо залежить від концентрації ^{240}Pu та ^{242}Pu ;
- генерація тепла (для плутонію прямо залежить від концентрації ^{238}Pu);
- радіоактивне випромінювання.

Хімічна форма ЯМ може значно впливати на методи та результати їх вимірювань. Залежно від ступеня окислення змінюється масова частка ядерного матеріалу у зразку, що слід враховувати під час аналізу результату зважування.

Ядерні матеріали поділяються на категорії (див. Лекцію №2). Категорія ядерного матеріалу – кількісна характеристика значимості ядерного матеріалу з погляду обліку та контролю ядерних матеріалів. Від категорії розміщених на об'єкті ЯМ залежать вимоги до точності контрольних вимірів під час підведення балансу.

ЯМ – відносні стандартні відхилення у відсотках інвентарних кількостей (табл. 10.2).

Похибки результатів при контрольних вимірах ЯМ мають важливе значення. Наприклад, при визначенні маси десяти кілограмового плутонієвого зразка з похибкою 0,5% у довірчому інтервалі 68% (1,5% у довірчому інтервалі 99%) втрата або розкрадання менше 150 г плутонію не може бути виявлено.

Таблиця 10.2. – Вимоги до точності вимірювань ЯМ

№ п/п	Тип установки	Відносне стандартне відхилення, %
1	Збагачення урану	0,2
2	Хімічні перетворення: конверсія урану та виготовлення палива	0,3
3	Конверсія плутонію та виготовлення палива	0,5
4	Хімічна переробка урану	0,8
5	Хімічна переробка плутонію	1,0
6	Окреме сховище скрапа*	4,0
7	Окреме сховище відходів	25
* Скрап – відбракований ЯМ, видалений з технологічного процесу та призначений для переробки		

Баланс ядерних матеріалів – результат порівняння зареєстрованого та наявної кількості ядерних матеріалів у зоні балансу матеріалів.

Кількість ядерних матеріалів, що знаходяться в кожній ЗБМ, повинна визначатися шляхом вимірювання кількості та складу ядерних матеріалів, контролюватись шляхом обліку та контрольних перевірок ядерних матеріалів та

перевірятись шляхом проведення фізичної інвентаризації. Фізична інвентаризація повинна завершуватися підведенням балансу для кожного ядерного матеріалу за період між попередньою та даною фізичною інвентаризацією, визначенням інвентарної різниці та її похибки.

Фізичні інвентаризації кожної ЗБМ виконуються періодично, а міжбалансові періоди встановлюються залежно від категорії ядерних матеріалів ЗБМ, технологічних та інших особливостей підприємств.

Аномалією в обліку та контролі ядерних матеріалів називають нестачу (надлишок) ядерних матеріалів, помилки в облікових та звітних документах, ушкодження, відмови засобів контролю доступу до ядерних матеріалів, порушення порядку виробництва, використання, передачі ядерних матеріалів.

Для кожної ЗБМ повинна бути розроблена програма вимірювань, що включає в себе перелік методик виконання вимірювань, технічних засобів, процедур пробовідбору, відомості про періодичність проведення вимірювань, необхідну точність вимірювань, терміни та форму подання результатів вимірювань.

Методики виконання вимірювань мають бути метрологічно атестовані відповідно до вимог діючих державних чи галузевих стандартів.

Стандартні зразки (еталони) для градуювання приладів та перевірки правильності результатів вимірювань повинні бути метрологічно атестовані відповідно до вимог діючих державних або галузевих стандартів та мати свідоцтво про атестацію.

На кожному підприємстві має бути розроблено та впроваджено програму контролю якості вимірювань у рамках системи вимірювань ядерних матеріалів. Метою програми є забезпечення якості вимірів.

При виборі методу контролю виходять із властивостей матеріалу та умов вимірювань: фізичного стану, чистоти, необхідної точності визначення, витрати часу на окремий аналіз, числа аналізів (один на місяць, сто на тиждень), обсягу

аналізованого зразка, наявного обладнання та еталонів, кваліфікації персоналу, бюджету.

Зазначимо, що контрольні вимірювання ЯМ – непрямі: масу матеріалу або його ізотопний склад визначають за результатами вимірювань швидкості рахунку електричних імпульсів, зміни сили струму, деформації пружини і т.д. Вимірний ефект (N) та шукана величина (F) пов'язані за допомогою коефіцієнта k , який отримують за допомогою калібрування, проводячи вимірювання еталонів (зразків ЯМ з добре відомими характеристиками $F_{ет}$) на контрольній вимірювальній установці: $k = F_{em}/N_{em}$, де N_{em} – вимірний ефект для зразка.

Похибка визначення маси ЯМ залежить від похибки результату контрольного виміру та невизначеності калібрувального коефіцієнта k , причому у багатьох випадках друга складова домінує. У свою чергу, результат контрольного вимірювання зазвичай вимагає корекції для обліку ряду факторів, що впливають, обумовлених особливостями зразка ЯМ, спотвореннями інформації в електронному вимірювальному тракті та ін.

Рівняння балансу ЯМ має такий вигляд:

$$ID = BI + R - S - EI, \quad (10.1)$$

де ID – інвентарна різниця; BI – початкова інвентарна кількість; R - ЯМ, що надійшли на склад за період між інвентаризаціями; S – ЯМ, вивезені за період; EI – кінцева інвентарна кількість. $EI = k \cdot N$, де N – число відліків; k – калібрувальний коефіцієнт, що зв'язує визначальну величину з результатом вимірів.

Судження про результат інвентаризації виносяться з порівняння ID і $3\Delta ID$.

Різні фізичні та хімічні форми ЯМ потребують різних технологій вимірювання для обліку матеріалів. Результати вимірювань ЯМ, крім контролю їх наявності та безпеки, служать для управління технологічними процесами, а

також для забезпечення норм ядерної та радіаційної безпеки. При виборі методик та апаратури для вимірювань керуються метою комплексного розв'язання всіх перерахованих завдань.

Отже, вимірам підлягають ЯМ, що у різних станах і формах, у різних поєднаннях з іншими матеріалами, з різним рівнем радіоактивності. Відповідно, для виконання цих завдань застосовуються різні методи та апаратура.

При нагляді за обліком та контролем ЯМ виконують два види вимірювань:

- облікові виміри – вимірювання кількісних характеристик ЯМ та продуктів, результати яких вносяться до облікових документів;
- підтверджуючі виміри – виміри, результати яких використовуються для підтвердження кількісних характеристик або атрибутивних ознак ЯМ чи облікових одиниць.

Контрольні виміри зазвичай проводять з метою визначення чисельного значення кількості ЯМ. У цьому прагнуть забезпечити найвищу точність результату. Однак існує низка завдань контролю, що вимагають лише якісної інформації про зразки. До них належать:

- визначення характеристик немаркованих чи помилково маркованих зразків;
- встановлення присутності ЯМ у зразках за принципом «так/ні»;
- проведення швидкої інвентаризації;
- підтвердження одержувачем даних постачальника та ін.

Контрольні запитання

1. Які види вимірювань застосовують у системі ОКЯМ?
2. Навіщо для виконання вимірювань потрібні еталони?
3. Які категорії еталонів ви знаєте?

Тема 11. Методи руйнуючого аналізу

Зазвичай руйнуючий аналіз (РА) включає етапи відбору проби, хімічної підготовки зразка та вимірів [11]. Контрольовані матеріали можуть бути як в штучній (облікові одиниці), так і в балк-формі. Результати руйнівних аналізів відрізняються, як правило, вищою точністю, ніж при неруйнівних вимірах. Однак трудомісткість та вартість РА вища, ніж неруйнівних.

Руйнівні аналізи проводять у таких випадках:

- для перевірки результатів неруйнівних вимірів;
- щодо особливо важливих контрольних вимірів;
- для атестації стандартів.

11.1. Відбір проб

При руйнівних аналізах досліджується мала частина всього матеріалу, що підлягає контролю і потрібно відібрати для аналізу представницьку пробу (зразок). Її склад повинен суворо відповідати середньому складу всього матеріалу, а маса (обсяг) проби має бути точно визначена.

Якщо проба піддається розчиненню, здебільшого необхідно розчинити її. Іноді уран чи плутоній необхідно відокремити від інтерферуючих елементів.

При відборі проби необхідно враховувати можливу неоднорідність ЯМ, яка може бути трьох типів:

- неоднорідність матеріалу обсягом контейнера;
- різницю між контейнерами;
- різницю між групами контейнерів.

Деякі дисперсні та порошкові матеріали, такі як зола та прожарений скрап, важко піддаються перемішуванню. При цьому існує низка факторів, що вимагають гомогенізації сухих порошоків та дисперсних композицій. Наприклад:

- варіації складу залежно від розмірів частинок та їх густини;
- відмінності форми частинок;
- зчеплення чи злипання частинок між собою.

У ядерній промисловості часто зустрічаються недостатньо однорідні матеріали, що обмежує можливість пробовідбору шляхом зачерпування з кожної партії контейнерів матеріалу для його порівняння. Тому використовують випадковий пробовідбір, що вимагає збільшення числа проб у кожному випадку, щоб врахувати можливі відмінності.

Вибір способу та техніки пробовідбору залежить від природи контрольованого матеріалу, вимог до точності результатів, обсягу вимірювань, його доступності для взяття проб та безпеки робіт з пробовідбору.

На різних підприємствах ядерного паливного циклу використовуються різні методи відбору та підготовки проб для аналізу. Похибки, пов'язані з пробовідбором, належать до двох категорій. Похибка пробовідбору слід відокремлювати від аналітичної похибки:

$$\sigma_s = (\sigma_t^2 - \sigma_a^2)^{1/2}, \quad (11.1)$$

де σ_s – випадкова похибка пробовідбору; σ_t – загальне випадкове відхилення результатів всіх аналізів всіх зразків; σ_a – випадкове відхилення, оцінене з повторних аналізів кожного зразка.

Однак, на деяких підприємствах повторні аналізи з кожним зразком не виконують і не відокремлюють випадкову похибку пробовідбору від випадкової аналітичної похибки. У цьому випадку похибку відбору проби можна оцінити з

розкиду результатів аналізів стандартів, що приблизно дорівнює випадковій аналітичній похибці:

$$\sigma_s = (\sigma_1^2 - \sigma_{st}^2)^{1/2}, \quad (11.2)$$

де σ_s – випадкова похибка пробовідбору, що оцінюється; σ_1 – випадковий розкид, що ґрунтується на одиничних аналізах усіх зразків; σ_{st} – випадковий розкид, заснований на повторних аналізах стандарту.

Розгляд отриманих результатів призводить до двох висновків: розчини на збагачувальному та переробному підприємства досить однорідні, тому за допомогою відносно простих операцій пробовідбору можна отримувати представницькі проби. Скрап та відходи ЯМ неоднорідні, і слід очікувати більших похибок пробовідбору. У цьому випадку слід проводити попередню гомогенізацію та застосовувати випадковий метод відбору проб для отримання представницького результату.

11.2. Розчинення зразків ядерних матеріалів

Завжди слід прагнути повного розчинення досліджуваного матеріалу. Утворення навіть незначних опадів може спричинити значні втрати цільового елемента. Розчинення чистих препаратів урану є досить простим завданням.

У разі плутонію та його сполук (а також і торію) може виникати проблема, пов'язана з утворенням та руйнуванням надзвичайно хімічно стійкого діоксиду, що володіє ще й надзвичайно високою температурою плавлення.

Змішані діоксиди урану і плутонію показують високу стійкість до хімічного впливу, але все ж таки швидкість їх розчинення вища, ніж у чистих плутонієвих препаратів.

11.3. Екстракція ЯМ із розчину

Уран може бути досить селективно виділений з розчину методом екстракції його в органічний розчин, який не змішується з вихідним водним розчином.

Екстракція є допоміжним методом очищення для аналітичної хімії, зокрема визначення урану. Незважаючи на те, що ряд елементів, включаючи плутоній і торій, теж здатні екстрагуватися, вибір правильних умов виділення дозволяє виключити перешкоди, спричинені цими елементами на наступних стадіях визначення. Наприклад, змінюючи ступінь окислення плутонію, вдається досить легко керувати його екстракцією.

Найбільш широке застосування при переробці опроміненого ядерного пального отримав так званий пурекс-процес - екстракційний процес з використанням розчинів трибутилфосфату ($(n-C_4H_9O)_3PO$) (ТБФ) у граничних вуглеводнях (гідрований газ).

Коефіцієнти очищення урану від продуктів поділу (ПД) після трьох циклів становить приблизно 10^7 а коефіцієнт очищення урану від плутонію $3 \cdot 10^5$

11.4. Іонообмінний поділ

Іонообмінний поділ застосовують для селективного виділення аналізованого елемента з багатокомпонентної суміші. По суті всі роботи з іонообмінного виділення та поділу урану намагаються проводити з його розчинами у шестивалентній формі. У водних розчинах уран, плутоній та багато інших елементів можуть перебувати у складі катіонних та/або аніонних комплексів.

Іонообмінні властивості мають нерозчинні речовини, до складу яких входять міцно пов'язані з ним кислотні (катіоніт) або основні групи (аніоніт).

Прикладом катіоніту може служити Дауекс-50 (вітчизняний КУ-2), стиролдивінілбензойний полімер з щепленими - SO₃H групами. Прикладом сильно-основного аніоніту може служити Дауекс-1 (вітчизняний аналог АВ-17), стиролдивінілбензойний полімер з щепленими зарядженими CH₂N⁺(CH₃)₃ групами.

Іони урану можуть бути поглинені шляхом катіонного обміну відносно розведених розчинів сірчаної кислоти (<0,5 н).

При цьому відбувається очищення від несорбованих домішок. Однак більшість методів поділу та очищення урану за допомогою катіонообмінників засновані на стадії десорбції шляхом промивання колонки розчином реагенту, який з ураном утворює аніонний комплекс. Сорбція урану (VI) з розчину на катіоніті з кислих розчинів посилюється в наступному ряді кислот H₃PO₄ < H₂SO₄ < HCl < HNO₃ < HClO₄. В аналітичній практиці катіоніти зазвичай використовують для видалення аніонів, що заважають аналізу, типу фосфатів, арсенатів і т.п.

Використання аніонітів дозволяє сорбувати аніонні комплекси урану з такими аніонами як нітрат, хлорид, фторид, ацетат, сульфат чи карбонат.

11.5. Гравіметрія

Гравіметрія є найстарішим і одним із найточніших методів аналітичної хімії. Сутність гравіметричного методу аналізу полягає у вимірі мас (зважуванні) аналізованої речовини. У цьому методі зважена порція матеріалу при прожарюванні на повітрі переходить у чорно-зелений U₃O₈ з подальшим зважуванням отриманого чистого продукту. Виміряну вагу U₃O₈ можна відкоригувати з урахуванням присутності нелетких домішок, що визначаються за допомогою інших методів, наприклад спектрометричних.

U_3O_8 використовується як вагова форма, тобто стабільного з'єднання з постійним співвідношенням уран – кисень. Для отримання точного результату слід контролювати стехіометрію зразка після прожарювання (постійність співвідношення уран – кисень). Воно залежить від початкового хімічного складу, співвідношення поверхня/об'єм в аналізованому зразку, температури та часу спалювання. Встановлено, що для отримання однорідної U_3O_8 зі всього зразка потрібне повільне спалювання контрольованих умов.

Концентрацію урану в аналізованому зразку розраховують за такою формулою:

$$U_A = \frac{W \cdot (F - C) \cdot G}{S} \quad (11.3)$$

де U_A – концентрація урану у зразку, г(U)/г(зразка); W – вага прожареного оксиду (вага оксиду урану та домішок), г; F – фактор нестехіометрії (ставлення стехіометричного оксиду урану, що містить оксиди домішок, до нестехіометричного оксиду урану з домішками, отриманого при прожарюванні) г/г; C – кількість грамів оксидів домішок, що містяться у грамі прожареного оксиду г/г; G – гравіметричний (стехіометричний) фактор (U/U_3O_8), скоригований з урахуванням ізотопного складу урану, г(U)/г(U_3O_8); S – навішування зразка, відібраного для аналізу, г.

Гравіметрію застосовують і для аналізів плутонієвих зразків, хоча рідше, ніж для урану. Вагова форма у разі плутонію – PuO_2 .

Щоб реалізувати високу точність, яку може забезпечити гравіметрія, потрібно точно знати та враховувати вміст у зразку кисню та домішок.

11.6. Титрування за методом Девіса-Грея для кількісного аналізу вмісту урану

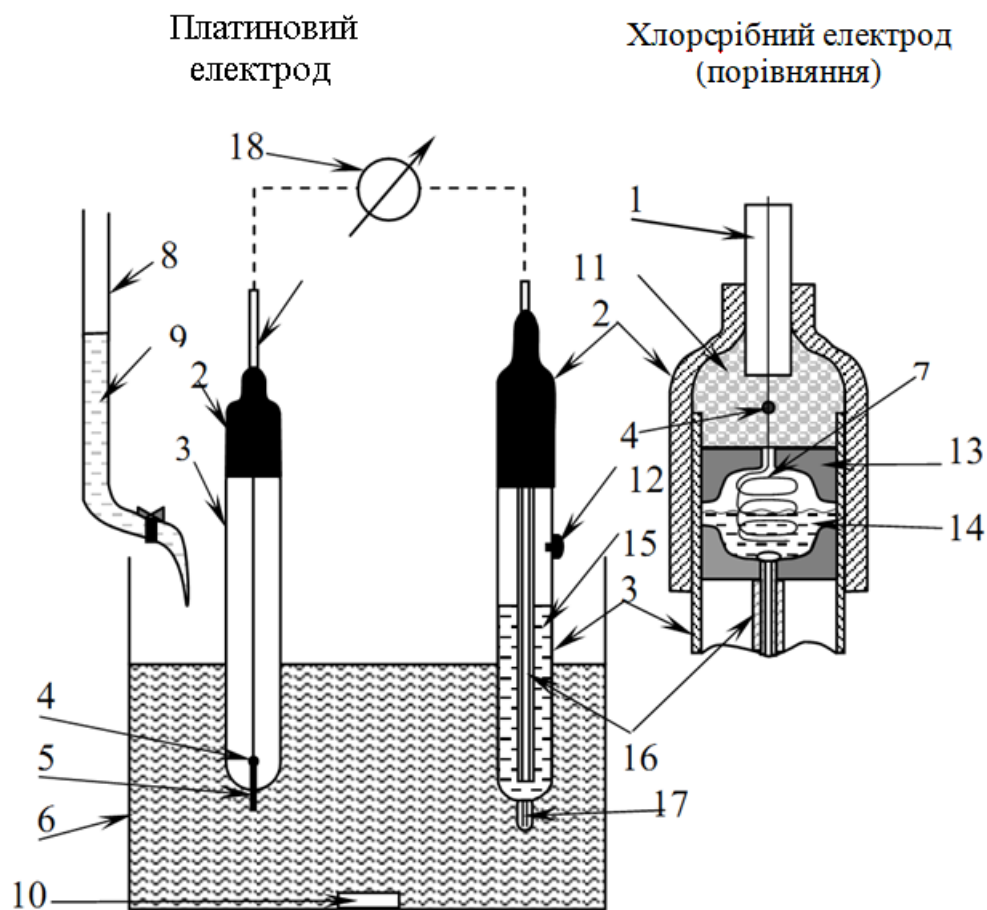
При потенціометричному окислювально-відновному титруванні до певного обсягу досліджуваного розчину невідомої концентрації додають з бюретки титруючий розчин відомої концентрації. У ході титрування вимірюють ЕРС і будують криву титрування $E=f(V_T)$, де V_T – обсяг титранта. Вимірвальна система складається з двох електродів, опущених у досліджуваний розчин, та приладу, що реєструє ЕРС (рис.11.01). У ланцюзі один електрод, так званий електрод порівняння, має постійне значення потенціалу, а потенціал другого, індикаторного електрода змінюється в процесі титрування, причому в еквівалентній точці відбувається різкий його стрибок.

При побудові кривої потенціометричного титрування осі абсцис відкладають доданий обсяг титруючого розчину V_T , а по осі ординат - значення ЕРС. Для точного визначення точки еквівалентності будують диференціальну криву титрування) $\frac{\Delta E}{\Delta V_T} = f(V_T)$.

Точка еквівалентності - це момент при титруванні, коли число грам-еквівалентів титруючої речовини дорівнює числу грам-еквівалентів компонента, що титрується.

Перерахуємо операції аналізу та використовувані хімічні реакції потенціометричного варіанта методу Девіса-Грея:

1. Відбір зразка.
2. Розчинення зразка.
3. Попередня обробка (очищення та ін.).
4. Переведення шестивалентного урану в чотиривалентний стан. Необхідно, щоб весь уран опинився у чотиривалентному стані, що піддається титруванню.



1 – сполучний провід; 2 – пластмасовий ковпачок; 3 – скляний корпус; 4 – припій; 5 – платина; 6 – склянка з досліджуванним розчином (рНх); 7 – срібний дріт, покритий AgCl; 8 – бюретка; 9 – Cr(VI); 10 - стрижень магнітної мішалки, що перемішує; 11 – герметик; 12 - отвір з гумовою пробкою; 13 – гумові ущільнювачі; 14 – суміш KCl та AgCl; 15 – насичений розчин KCl; 16 - трубка з азбестом; 17 – азбестова нитка; 18 – рН-метр (мілівольтметр)

Рисунок 11.1. Електродна система для потенціометричного титрування.

У точці еквівалентності весь уран, що знаходиться в розчині, переходить у шестивалентний стан, і його кількість характеризується обсягом використаного окислювача:

$$U = \frac{(NV + 6W/M \cdot A/100) \cdot [\text{атомна вага урану} / 2]}{\text{вага зразка, г}} \quad (11.3)$$

де U – концентрація урану в аналізованому зразку; N – нормальність* титранта (біхромату калію); V – обсяг використаного титранта (у літрах); W – вага доданого твердого біхромату калію (при високоточних вимірах або при титруванні великої кількості $U(IV)$); A – чистота біхромату калію, наведена в сертифікаті (%/100); M – молекулярна вага біхромату калію (294,19 г/моль).

* Нормальність – число грам-еквівалентів розчиненої речовини у 1 літрі розчину. Наприклад, 2N-розчин N_2SO_4 в кожному літрі якого міститься 98 г кислоти.

Метод Девіса-Грея (NBS) застосовується для аналізу різних розчинів урану: нітро-, сульфат-, перхлорат. Аналізовані розчини одержують при розчиненні зразків оксиду урану, металевого урану, солей та сплавів урану, фрагментів ядерного палива в оболонках з алюмінію, сталі, цирконію.

Інформація про точність титрометричних аналізів за методом Девіс-Грея представлена в табл. 11.1.

Таблиця 11.1 – Похибки результатів вимірювань вмісту урану методом Девіса-Грея

№ п/п	Матеріал	Випадкова похибка, %	Систематична похибка, %
1	Металевий уран	0,06	0,018
2	Металеві частинки – паливо реактора TRIGA	0,06	0,017
3	Сплав UAl	0,074	0,018
4	Порошок UO_2	0,11	0,035
5	Розчин урану	0,10	0,060

11.7. Мас-спектрометрія

Траєкторії руху заряджених частинок у магнітних полях залежать від їх мас та швидкостей. Рівняння, що описує рух іонів, має вигляд:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q_e \vec{E} + q_e [\vec{v} \cdot \vec{B}] \quad (11.4)$$

де m – маса іона, q_e – електричний заряд, v – швидкість іона, E – напруженість електричного поля, B – вектор індукції магнітного поля.

Якщо пучок моноенергетичних однаково заряджених іонів направити в поперечне магнітне поле, їх траєкторії будуть представляти собою кругові орбіти з радіусом, пропорційним масам іонів. Тому іони різних мас мають різні траєкторії, що дозволяє їх розділяти та ідентифікувати.

Не всі іонні джерела виробляють строго моноенергетичні іони. У статичному магнітному полі іони поділяються і по масам, і по енергіям, що ускладнює їх аналіз. Підібравши відповідне поєднання електричного та магнітного полів (у тому числі змінних), можна компенсувати поділ іонів по енергії. Прилади, побудовані за цим принципом, називають спектрометрами з подвійним фокусуванням.

Мас-спектрометр складається з джерела іонів (в ньому отримують і прискорюють іони, формують пучок або пакети іонів), мас-аналізатора (служить для поділу іонів по масах) і детектуючої системи. В результаті виміру одержують розподіл іонів за масами – мас-спектр.

Інтенсивність ліній у мас-спектрі пов'язана із вмістом окремих компонент у досліджуваному зразку:

$$H_i = k_i \cdot P_{i0}, \quad (11.5)$$

де H_i – висота (або площа) піку в мас-спектрі, P_{i0} – вагова або відносна кількість i -ї компоненти у зразку, k_i – коефіцієнт пропорційності.

Величина k_i залежить від того, яка частина аналізованої компоненти зразка потрапила в детектор і була зареєстрована. Коефіцієнт k_i є характеристикою чутливості приладу і кожного виду атомів має своє значення. Потрібно, щоб k_i залишався незмінним протягом виміру. Для проведення кількісних вимірювань прилад калібрують для визначення величини k_i .

Для отримання іонів із атомів твердих летких речовин використовують процес випаровування. Для тугоплавких речовин застосовують іскровий розряд, лазерне опромінення, іонне або електронне бомбардування.

Кількість матеріалу у зразку обмежена, оскільки:

- експериментальна установка зазвичай обслуговується вручну, її радіоактивне забруднення не має перевищувати норми безпечної роботи персоналу;
- результат досвіду може бути спотворений через попадання в зразок речовин з навколишнього середовища, у тому числі після попередніх аналізів.

Зниження маси речовини у зразку зменшує забруднення приладу, що дозволяє підтримувати його високу чутливість*.

* Ізотопічна чутливість – відношення фонового струму іонів в інтервалі спектру мас $M \pm 1$ до струму іонів з масою M .

У тонкому джерелі атоми зразка перетворюються на іони, які за допомогою електричного поля направляють на аналізатор. Для дослідження зразків важких елементів широко використовують термоемісійні джерела стрічкового типу. У такому джерелі аналізовану речовину наносять на стрічку-випарник, іонізація відбувається поблизу стрічки-іонізатора.

В даний час використовуються джерела магазинного типу, які одночасно поміщають кілька зразків для їх послідовних аналізів. При цьому досягається економія часу на заміну та відкачування.

На початку аналізу, при розігріванні зразка, в результаті переважного випаровування легких ізотопів склад елемента в парі відрізняється від його складу у зразку (так звана дискримінація за масою, ефект посилюється для малих зразків). Лише згодом у парі встановлюються справжні ізотопні відносини. Через вигорання зразка струм іонів зменшується з часом. Ці фактори можуть вносити систематичні помилки до результатів аналізів.

Для контролю за дискримінацією по масі до аналізованої речовини можна підмішати індикатор, що містить два розрізняються по масі і відсутні у зразку ізотопу: $^{233}\text{U}+^{236}\text{U}$ при аналізі уранового зразка і $^{242}\text{Pu}+^{244}\text{Pu}$ при аналізі плутонієвого. Вимірявши мас-спектр суміші, можна щодо відносної інтенсивності ліній зазначених ізотопів оцінити ефект дискримінації та відкоригувати результат аналізу.

Іони з джерела потрапляють до аналізатора, де сканування мас-спектру можна проводити магнітним полем. Залежно від змін поля змінюються траєкторії руху іонів, так що у нерухомий детектор поперемінно потрапляють іони різних мас.

Замість повільного сканування магнітним полем можна застосувати швидке сканування за допомогою змін електричного поля, що прискорює іони, в джерелі. Сканування електричним полем найчастіше застосовують, коли діапазон відмінностей мас іонів малий, магнітним полем – коли широкий.

Для реєстрації іонів застосовують різні детектори та режими вимірювань: струмовий – при аналізах великих зразків, імпульсний – малих. Як детектори часто використовують електронні помножувачі з коефіцієнтом посилення сигналу $\sim 10^6$, а також циліндри Фарадея.

В даний час набули поширення багатоколекторні детектуючі системи. Кожен детектор у них налаштований на певну масу іонів, система одночасно вимірює у зразку вміст кількох ізотопів (до 9). Наприклад, при аналізах Pu відразу визначають вміст у ньому ізотопів із масами 238–244. Аналіз

проводиться без сканування. Застосування багатоколекторної системи дозволяє у кілька разів прискорити виміри.

Мас-спектрометричний аналіз ізотопного складу урану Чиста фракція урану наноситься на стрічку. Стрічки поміщають усередині іонного джерела мас-спектрометра, з об'єму джерела відкачують повітря. При розігріванні стрічки зразок випаровується, отримані шляхом термоіонізації однозарядні іони прискорюють і фокусують за допомогою електростатичних іонних лінз в мас-аналізаторі. Задаючи відповідні зміни магнітного поля (полів) та/або прискорювального потенціалу, пучки іонів різної маси фокусують послідовно на детектор.

Використовуючи автоматичний режим сканування, один шлюз для введення зразків, високошвидкісну систему відкачування та цифрову обробку даних, два оператори можуть проаналізувати 12–16 зразків за день, проте реальніше 7–9 зразків за день.

Для контролю якості вимірювань необхідно принаймні один раз протягом серії аналізів проводити аналіз еталонного зразка зі збагаченням, близьким до збагачення вимірюваного матеріалу.

Мас-спектрометрія – найбільш переважний метод що широко використовується для контролю ізотопної композиції урану. Для аналізу потрібно від 10^{-8} до 10^{-5} г U залежно від чутливості інструменту.

Поверхнево-іонізаційна мас-спектрометрія є найпоширенішим методом і для руйнівних аналізів ізотопного складу Pu. Кількість плутонію, необхідне для аналізів, становить від 10^{-9} до 10^{-6} г. Випадкові похибки аналізу ізотопного складу зразка Pu представлені у табл. 11.2.

Таблиця 11.2. – Випадкові похибки аналізу ізотопного складу зразка Pu методом мас-спектрометрії

Відносна концентрація, %	Відносна похибка, %
0,01 ²³⁸ Pu	20
93,8 ²³⁹ Pu	0,10
5,8 ²⁴⁰ Pu	0,26
0,3 ²⁴¹ Pu	0,81
0,03 ²⁴² Pu	7,1

11.8. Метод ізотопного розведення

Для визначення кількості m_x елемента Z у зразку досліджуваної речовини використовують метод ізотопного розведення. Ізотопний склад цього елемента x_i має бути відомий (раніше виміряний).

Метод заснований на застосуванні індикатора-навішування того ж елемента, але з ізотопним складом, що відрізняється від складу елемента в досліджуваному зразку. У розчин зразка досліджуваного матеріалу додають певну кількість індикатора m_0 з ізотопним складом x_i^0 . Після їхнього змішування беруть пробу. Ізотопний склад елемента в пробі x відрізняється від складу у зразку x_i та індикаторі x_i^0 :

$$\sum_i x_i = \sum_i x_i^0 = 1 \quad (11.6)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{A_i} \cdot [m_x x_i + m_0 x_i^0] / \sum_i \frac{1}{A_i} \cdot [m_x x_i + m_0 x_i^0] \quad (11.7)$$

де A_i – атомна маса i -го ізотопу елемента Z . Відношення вмісту ізотопів i та j в суміші дорівнює:

$$\bar{x}_i / \bar{x}_j = \frac{1}{A_i} \cdot [m_x x_i + m_0 x_i^0] / \frac{1}{A_j} \cdot [m_x x_j + m_0 x_j^0] \quad (11.8)$$

звідки одержують формулу для визначення m_x :

$$m_x = m_0 x_i^0 \left(1 - \frac{\bar{x}_i x_j^0 A_i}{\bar{x}_j x_i^0 A_j} \right) / x_i \left(\frac{\bar{x}_i x_j A_i}{\bar{x}_j x_i A_j} - 1 \right) \quad (11.9)$$

Для змішування зразка та індикатора застосовують операції, які необхідні, щоб U (Pu) зі зразка та індикатора набули однакових властивостей і в подальших перетвореннях поведилися ідентично. Для цього застосовують багаторазові окисно-відновлювальні цикли.

Мас-спектрометрія ізотопного розведення (IDMS) найчастіше використовується для визначення U і Pu (та його ізотопних композицій) під час переробки палива.

11.9. Метод Resin-bead

Цей метод спеціально пристосований для визначення U та Pu у високоактивних розчинах відпрацьованого реакторного палива. Процедуру проведення аналізу представлено на рис. 11.2.

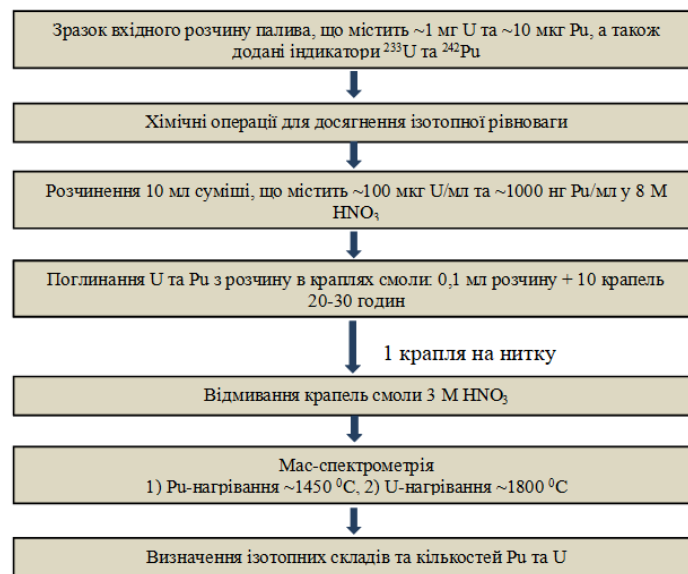


Рисунок 11.2. Схема аналізу методом Resin-bead. Точність результатів може досягати 0,6% для U, 0,9% для Pu

Його застосовують для випадків, коли зразок має бути переміщений на велику відстань із лабораторії до лабораторії. При цьому не потрібний захист від випромінювання зразка.

11.10. Комплексне застосування методів вимірів ЯМ

Раніше були розглянуті методи вимірювань ЯМ, що найчастіше застосовуються. Область застосування кожного методу обмежена. Для вирішення кожного завдання існує кілька різних способів.

Усі методи можна умовно поділити на взаємозамінні та взаємодоповнюючі. Так визначення вмісту урану у зразку ЯМ можна використовувати титруванням методом Девиса–Грея, масс-спектрометрію з ізотопним розведенням, денситометрію, рентгено-флюорисцентний аналіз (РФА).

Взаємодоповнюючими є методи гамма-спектрометрії та рахунки нейтронних збігів, які спільно дозволяють визначити вміст плутонію в зразках ЯМ. Ще один приклад - за допомогою методу титрометрії виготовляють зразки для калібрування систем неруйнівних вимірів методом денситометрії та РФА.

Застосування декількох різних методів для вимірювання будь-якого параметра ЯМ дозволяє підвищити достовірність загального результату за рахунок взаємної компенсації можливих методичних похибок (див. схему комплексного аналізу плутонію на заводі Селлафілд на рис. 11.3).

Одночасне застосування кількох методів веде до об'єднання їх у одній установці, до створення вимірювальних комплексів–станцій.

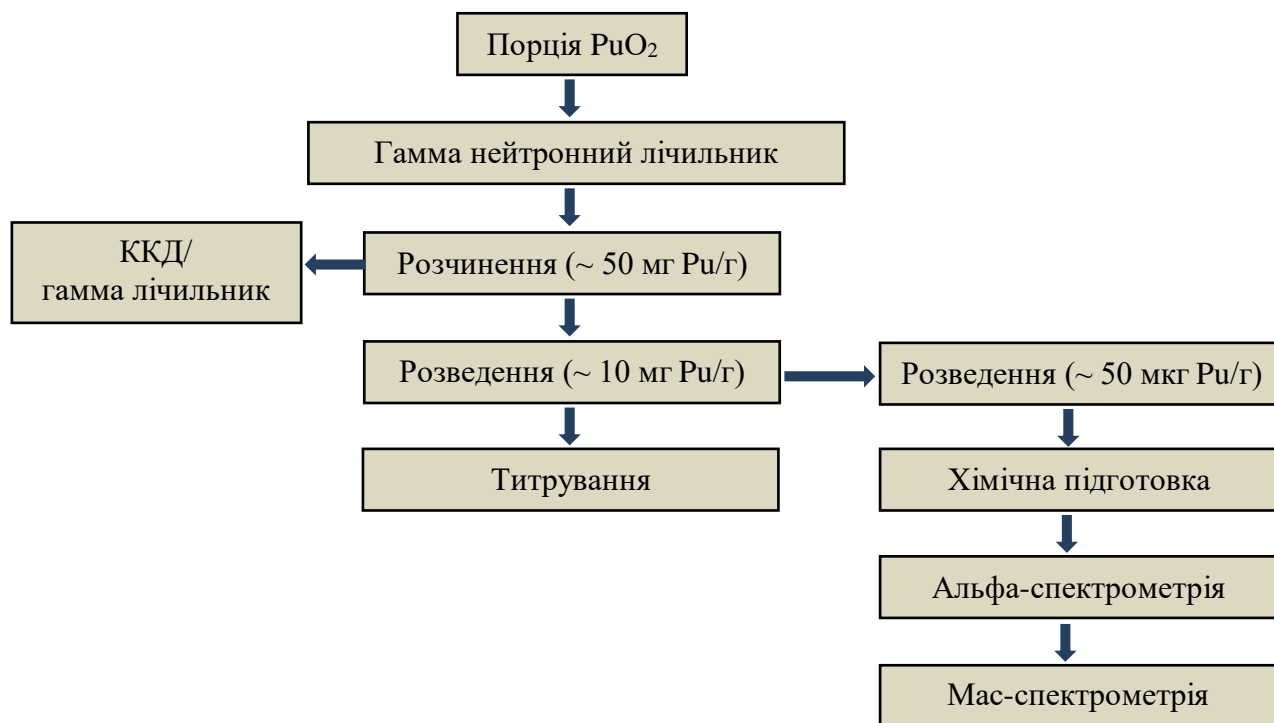


Рисунок 11.3. – Схема комплексного аналізу плутонію

На закінчення наводиться перелік методів вимірювання ядерних матеріалів, що застосовуються в даний час (табл. 11.3).

Таблиця 11.3. – Основні методи аналізу ЯМ, що використовуються в аналітичних лабораторіях

Метод аналізу	Елемент, що аналізується або ізотоп	Тип матеріалу	Похибка	
			випадкова	систематична
Елементарний аналіз				
Титрування за методом Девіса-Грея	U	U, U-Pu, U-Th	0,05	0,05
Титрування за методом Макдональда-Саваджа	Pu	Pu матеріали	0,1	0,1
Кулонометрія	Pu	Матеріали з чистого Pu	0,05	0,05
Гравіметрія зі спалюванням	U, Pu	Оксиди U, оксиди Pu	0,05	0,05
Денситометрія на К-краї поглинання	U, Th, Pu	U, Pu, U-Pu, U-Th	0,2	0,2
РФА	Pu	Pu матеріали	0,2	0,2
РФА з розділенням фотонів по довжині хвилі	U, Pu	Оксиди чистого U та Pu, МОХ-паливо	0,3	0,3
Ізотопний аналіз				
Мас-спектрометрія з ізотопним розчиненням	U, Pu	Розчини відпрацьованого палива, Pu та U-Pu матеріали	0,1	0,1
Термоішрідзаційна мас-спектрометрія	Ізотопи U та Pu	Усі Pu та U матеріали, розчини відпрацьованого палива	0,05	0,05
Гамма-спектрометрія з детекторами високої роздільної здатності (Ge-детектори)	Am, Np, ізотопи Pu	Чисті Pu та U матеріали	0,5-2,0	0,5-2,0
Гамма-спектрометрія (NaI-детектори)	^{235}U	Низькозбагаченні U матеріали	0,2-0,5	0,2-0,5
Альфа-спектрометрія	^{238}Pu	Pu матеріали	0,2	0,3
Лазерна флюориметрія	<u>Np</u>	Pu матеріали	2,0	2,0
Спектрофотометрія Pu	Pu	Pu, U-Pu	0,2	0,2

Контрольні запитання

1. Назвіть переваги та недоліки руйнівного аналізу ЯМ?
2. Чим вони викликані?

Тема 12. Методи неруйнуючого аналізу

12.1. Загальні положення методів неруйнуючого аналізу

Перевірка ядерних матеріалів проводиться шляхом підрахунку облікових одиниць, ідентифікації облікових одиниць (баркоди), зважування, вимірювання обсягу, відбору зразків для хімічних аналізів та за допомогою неруйнівних аналізів [11].

Неруйнівний аналіз – визначення виду та/або кількості ЯМ у зразку без зміни характеристик зразка чи проникнення до нього.

Методи неруйнівного аналізу найчастіше застосовуються у випадках:

- коли потрібно провести швидкі контрольні дослідження;
- контролю за протіканням технологічних процесів;
- коли неможливо зробити представницьку вибірку (наприклад, під час контролю відходів виробництва, брухту та інших.);
- коли руйнівні дослідження нездійсненні.

Руйнівні аналізи непридатні у випадках:

- коли потрібна велика кількість вимірювань (наприклад, при інвентаризації);
- коли інформація потрібна негайно (наприклад, при позаплановій інспекції);
- коли заборонено відбір зразка контрольованого предмета (наприклад, твел);
- коли матеріал недоступний для відбору зразка (наприклад, відкладення у трубопроводах);
- коли вартість аналізу надто велика.

Методи НРА поділяються на активні та пасивні.

Активний аналіз включає опромінення предметів, що підлягають контролю, зовнішнім джерелом радіації (нейтронами, рентгенівським випромінюванням, гамма-випромінюванням) з метою викликати вторинне випромінювання ЯМ. Випромінені випромінювання (нейтрони, рентгенівські кванти) інтерпретуються як «підписи» для визначення кількості та складу присутнього матеріалу, що ділиться.

Пасивний аналіз заснований на вимірі мимовільного випромінювання (гамма, рентгенівського, нейтронного) матеріалу, що є його «підписом».

В даний час створено широкий набір приладів та методів для виявлення, ідентифікації, аналізу та перевірки ЯМ, що знаходяться у різних фізичних та хімічних формах. Устаткування для НРА відрізняється як за розмірами, так і за складністю: від портативних приладів, які використовуються інспекторами для перевірок ЯМ, до великих заводських систем, які застосовують оператори в їх повсякденній роботі.

НРА найчастіше проводять шляхом вимірювань гамма- та нейтронного випромінювання ЯМ. Для калібрування апаратури НРА та підтвердження результатів аналізів застосовують стандартні руйнівні методи (радіохімія, мас-спектрометрія). Матеріали, що у технологічних процесах, аналізують у лабораторіях НРА з допомогою автоматизованої вимірювальної апаратури.

Відкладення у технологічному устаткуванні оцінюють за допомогою переносних приладів.

Застосування НРА дає важливі переваги:

- аналізи, зазвичай, не вимагають багато часу;
- їхня вартість невелика (без урахування вартості приладів);
- немає відходів, не потрібні реактиви.

Недоліками НРА є:

- відносно великі похибки результатів (зазвичай 3–10% і навіть більше) – вищі, ніж за руйнівних аналізів;

- Проблеми отримання відповідних стандартів (великі зразки з ЯМ або дороги, або їх немає).

Для забезпечення якості вимірювання при використанні НРА застосовуються такі процедури контролю вимірювань:

- калібрування апаратури – для того, щоб гарантувати точність (уникнути зсуву результатів) та оцінити стандартні відхилення результатів калібрування. Калібрування пов'язують результати вимірювань із національною (міжнародною) системою одиниць;
- часті перевірки з використанням робочих стандартів;
- незалежні повторні виміри зразків для оцінки випадкових похибок аналізу;
- періодичний порівняльний аналіз зразків за допомогою прийнятих стандартних методів руйнування;
- міжлабораторний обмін зразками, який гарантує, що дані вимірювання узгоджуються з даними інших лабораторій.

Для калібрування приладів та методів, що застосовуються для НРА, потрібні зразки. Підготовка еталонів залежить від методу, вибраного для вимірювання. Якість будь-якого результату аналізу залежить від якості калібрування, що визначається якістю стандартів.

За допомогою калібрувальних вимірювань з еталонами встановлюють залежність між показанням контрольного приладу та масою ЯМ у зразку. Еталони використовують також для проведення випробувань, перевірки або нормування показань вимірювальних приладів та систем.

"Істинні" значення параметрів еталонів зазвичай визначають за допомогою руйнівних аналізів (РА). Підготовка еталонів є дорогим та тривалим

процесом. Правильно розуміючи принципи, на яких засновані методи НРА, можна мінімізувати кількість необхідних еталонів.

Деякі зразки важко виготовити та зберігати. Згодом якості зразка можуть змінитися отже він не буде ставитися до категорії контрольованого ЯМ. З цієї причини потрібно виготовити новий стандарт замість старого.

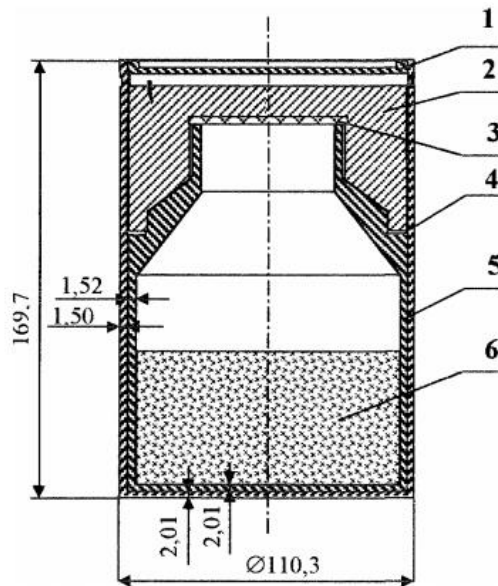
Існує дві категорії еталонів:

- атестовані довідкові матеріали (CRM – Certified Reference Materials) – їх виготовляють із високочистих ЯМ. Еталони CRM атестують з використанням найбільш точних вимірювальних методів у кількох лабораторіях. Такі зразки постачають сертифікатами;
- робочі довідкові матеріали (WRM) – їхні характеристики менш точні як CRM. Зразки WRM зазвичай виготовляють для калібрування конкретних приладів НРА у тому підприємстві, де вони потрібні.

Еталони CRM для конкретного застосування на підприємстві далеко не завжди є, тому в лабораторії чи заводі існує необхідність виготовлення робочих еталонів.

Державні стандартні зразки ізотопного складу та маси плутонію випущені у 2000 р. (рис. 12.1). Кількість ДСЗ у комплекті 10 штук. Ізотопні склади в різних комплектах ^{238}Pu : ^{239}Pu : ^{240}Pu : ^{241}Pu : ^{242}Pu дорівнюють 1,82:60,47:22,20:10,59:4,84 та 0,12:97,20:2,27:0,061:0,10. Відносна похибка визначення масової частки плутонію ДСЗ становить $\pm 0,30\%$ при довірчій ймовірності 95%. Маса плутонію в різних ДСЗ від 1 г до 2,5 кг.

Математичне моделювання шляхом Монте-Карло дає можливість значно скоротити потребу в стандартах. Визначивши у такий спосіб форму калібрувальної кривої, можна її віднормувати за допомогою фізичних еталонів.



1 – кришка склянки; 2 – кришка ампули; 3 – прокладка; 4 – корпус склянки; 5 – корпус ампули; 6 – PuO_2 щільністю $3,1 \text{ г/см}^3$.

Рисунок 12.1. Схема упаковки російського плутонієвого ДСЗ з масою плутонію $502,26 \text{ г}$

Ще одна можливість зменшити необхідну кількість зразків – перехресне калібрування. Основна ідея перехресного калібрування полягає у проведенні ретельного калібрування одного приладу з ряду аналогічних приладів з перекриттям широкого діапазону змін контрольованого параметра (наприклад, маси ЯМ у зразках). Отримані калібруваннями характеристики цього «довідкового» приладу фіксують і використовують для інтерпретації результатів вимірювань з іншими аналогічними приладами. При цьому припускають, що форма кривої калібрування $K = f(m)$ відображає властивості всього ряду аналогічних приладів.

Обладнання, що використовується МАГАТЕ для НРА, головним чином засноване на вимірюваннях γ -випромінювань і нейтронів, що випускаються різними ЯМ (табл. 12.1).

Таблиця 12.1 – Дані про найінтенсивніші γ -випромінювання ЯМ, що використовуються для неруйнівних аналізів

Ізотоп	Енергія, кеВ	Активність, $\gamma/\Gamma \cdot c$	Середній вільний пробіг, мм	
			Високі Z, ρ	Низькі Z, ρ
^{234}U	120,9	$9,35 \cdot 10^4$	0,23	69
^{235}U	143,8	$8,40 \cdot 10^3$	0,36	73
	185,7	$4,32 \cdot 10^4$	0,69	80
^{238}U	766,4	$2,57 \cdot 10^1$	10,0	139
	1001,1	$7,34 \cdot 10^1$	13,3	159
^{238}Pu	152,7	$5,90 \cdot 10^6$	0,40	75
	766,4	$1,387 \cdot 10^5$	9,5	139
^{239}Pu	129,3	$1,436 \cdot 10^5$	0,27	71
	413,7	$3,416 \cdot 10^4$	3,7	106
^{240}Pu	45,2	$3,80 \cdot 10^6$	0,07	25
	160,3	$3,37 \cdot 10^4$	0,45	76
	642,5	$1,044 \cdot 10^3$	7,4	127
^{241}Pu	148,6	$7,15 \cdot 10^6$	0,37	74
	208,0	$2,041 \cdot 10^7$	0,86	83
^{241}Am	59,5	$4,54 \cdot 10^{10}$	0,14	38
	125,3	$5,16 \cdot 10^6$	0,26	70

Гамма-вимірювання мають ряд переваг:

- вони здійснюються нечисленним персоналом;
- у багатьох випадках для розшифровки результату аналізу не потрібне калібрування;
- результат одержують відразу після закінчення вимірювання;
- похибки результатів відносно малі.

Гамма-спектрометрія служить для визначення збагачення урану, ізотопного складу плутонію, а також для денситометрії розкравів нітрату плутонію на К-краю поглинання, перевірки глибини вигоряння легководних реакторів, що відпрацювали ТВЗ, та ін.

Неруйнівний γ -аналіз складається з наступних етапів:

- вимірювання швидкості рахунку імпульсів у піках повного поглинання γ -квантів у детекторі;
- внесення поправок на викривлення в електронному тракті;
- внесення поправки на поглинання γ -квантів у зразку та по дорозі в детектор;
- розрахунок скоригованої швидкості рахунку.

Якщо потрібно, за допомогою калібрування визначається коефіцієнт пропорційності між результатом вимірів та визначається величиною ЯМ.

12.2. Визначення вмісту ЯМ шляхом вимірювання їх власних гамма-випромінювань

Зазвичай розчини ЯМ однорідні, і, використовуючи відповідну посудину, можна отримати зразок для вимірювань. Вміст ЯМ у зразку визначають інтенсивністю його випромінювання зі зразка. Однак частина гамма-випромінювання поглинається всередині зразка по дорозі в детектор. Поправочний коефіцієнт $CF(AT)$, що враховує самопоглинання випромінювання ЯМ всередині зразка, можна визначити за допомогою зовнішнього джерела, що випромінює гамма-промені з енергією, близькою до енергії випромінювання ЯМ. Для цього вимірюють пропускання T пучка гамма-променів зовнішнього джерела через зразок:

$$T = \frac{N}{N_0} = \exp(-\mu_l \cdot x), \quad (12.1)$$

де N_0 – число гамма-квантів, що випускаються зовнішнім джерелом, що потрапили на зразок; N – число гамма-квантів, що випускаються зовнішнім джерелом, що пройшли через зразок; μ_l – лінійний коефіцієнт ослаблення гамма-променів; x – товщина зразка.

За умови плоскої геометрії виправляють поправку за формулою:

$$CF(AT) = \frac{\mu_l \cdot x}{[1 - \exp(-\mu_l \cdot x)]} = \frac{-\ln(T)}{(1-T)}. \quad (12.2.)$$

Для корекції прорахунків, зумовлених мертвим часом вимірювальної системи, використовують додаткове джерело, яке прикріплено поблизу детектора. Застосування радіоактивного джерела спрощує схему корекції та підвищує її надійність порівняно з апаратурним способом корекції, що базується на використанні генератора імпульсів. Спостереження за швидкістю рахунку імпульсів у піку, що створюється цим джерелом, дають інформацію про втрати рахунку при вимірах із зразками. Вибирають таке джерело, щоб пік не заважав вимірюванням випромінювання ЯМ зі зразків.

Для контролю розчинів урану застосовують метод пасивних вимірювань гамма-променів з енергією 185,7 кеВ ^{235}U з корекцією результатів за результатами вимірювань пропускання випромінювання з енергією 136,0 кеВ джерела ^{75}Se і корекцією прорахунків з використанням джерела ^{109}Cd (енергія випромінювання 88 кеВ)

Діапазон вимірюваних концентрацій охоплює сім порядків величин. Розміри зразків менші, ніж при використанні інших методів.

12.3. Контроль відходів. Сегментоване гамма-сканування

Цей метод застосовують для контролю контейнерів та резервуарів з твердими та рідкими відходами, що містять ЯМ. Умови вимірювань при цьому досить складні: ЯМ присутні в малих концентраціях і нерівномірно розподілені за висотою та радіусом контейнера. Об'єми контрольованих зразків сильно відрізняються: від маленьких ампул до 200-літрових металевих бочок. Щільність матриці відносно низька.

Відходи з ЯМ на підприємствах розташовуються у контейнерах шарами, та його неоднорідність по горизонталі менше, ніж неоднорідність по вертикалі. Вплив горизонтальної неоднорідності може бути ослаблений шляхом обертання зразка під час аналізу, вплив вертикальної неоднорідності шляхом аналізу матеріалу по сегментах. Кожен сегмент вимірюють індивідуально, і отримані значення підсумовують. Основне припущення полягає в тому, що ЯМ рівномірно розподілені всередині кожного сегмента і що ослаблення гамма-випромінювань всередині сегмента може бути визначено вимірювань пропускання.

Сегментований сканувальний пристрій (ССП) поєднує пересування контейнера з вимірюванням випромінювання. Можливо, ССП є найпоширенішим приладом для неруйнівних вимірювань, заснованим на вимірюванні γ -випромінювання.

12.4. Аналізовані випромінювання

При контролі вмісту урану проводиться вимірювання γ -випромінювання з енергією 185,7 кеВ. При контролі ^{239}Pu зазвичай вимірюють γ -випромінювання з енергією 413,7 кеВ.

Отримані результати, спотворені через поглинання γ -променів у контейнері, коригуються за допомогою поправочних коефіцієнтів, одержуваних з вимірювань пропускання через контейнер γ -випромінювань джерела ^{75}Se з енергіями 136,0 кеВ, 264,6 кеВ, 279,5 кеВ 400,6 кеВ. Для отримання поправки до результату вимірювань випромінювання 185,7 кеВ ^{235}U виробляють інтерполяцію між значеннями пропускання для гамма-ліній з енергіями 136,0 кеВ і 264,6 кеВ, а поправку до вимірювань випромінювання 413,7 кеВ ^{239}Pu .

Ще одне джерело ^{109}Cd ($E_\gamma = 88,0$ кеВ) служить для корекції прорахунків імпульсів.

12.5. Проведення вимірювань та обробка результатів

Щоб отримати результат, що характеризує середній вміст ЯМ у контейнері, роблять його обертання та вертикальне переміщення (рис. 12.2). При скануванні вертикальних сегментів контейнер поступово піднімається, що дозволяє усереднити різницю в ослабленнях випромінювань окремих горизонтальних сегментів.

Швидкість рахунку імпульсів у піку повного поглинання n_p одержують із вимірювань, використовуючи формулу:

$$n_p = (n'_p - R_B) \cdot \frac{R_{ref}}{R_{RL}}, \quad (12.3)$$

де n'_p – виміряна швидкість рахунку в інтервалі, що містить потрібний пік; (R_{ref}/R_{RL}) – поправка на прорахунки, отримана з вимірювань із ^{109}Cd без зразка та із зразком; R_B – швидкість рахунку фону під піком.

Виміряна та відкоригована швидкість рахунку імпульсів у гамма-піку n_p пов'язана з масою обчислюваного ізотопу калібрувальним коефіцієнтом, який визначають за допомогою еталона.

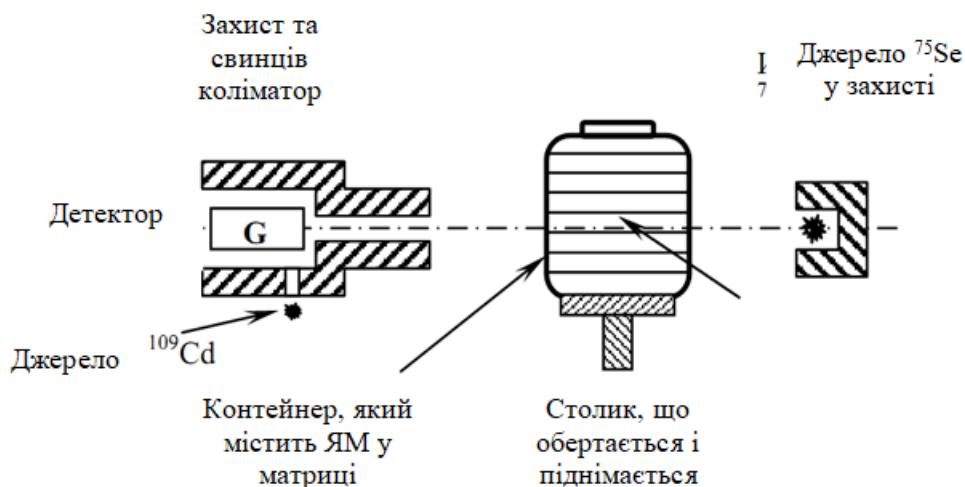


Рисунок 12.2. Схема установки для сегментованого сканування

Внесок калібрувального коефіцієнта в систематичну та випадкову похибки вимірювання має бути відносно малий.

Декілька факторів можуть впливати на результати вимірювань з еталонам: однорідність його матеріалу, величина пропускання (має бути більше 10%), розмір часток ЯМ та ін.

Метод сегментованого сканування застосовується для багатьох матеріалів низької щільності, що містять ЯМ: папір, пісок, пластик, зола, рідина.

12.6. Контроль відкладень

Відкладенням називають ЯМ, що залишається всередині технологічного обладнання, який не можна витягти шляхом звичайного промивання. Він осідає

в резервуарах, накопичується в технологічних трубах, у вентиляційних системах. Величина відкладень може становити від 0,1% до 0,2% повної продуктивності установки навіть після ретельного зачищення обладнання. На першому етапі експлуатації нової установки частка відкладень може становити від 1 до 10% виробленого продукту.

Більшість вимірювань відкладень урану та плутонію засновано на реєстрації піку 185,7 кеВ ^{235}U та сукупності піків ^{239}Pu з енергіями 375 кеВ та 414 кеВ. Для вимірювання цих гамма-квантів найчастіше застосовують портативні сцинтиляційні NaI-детектори. При вимірах їх оточують свинцевим екраном з отвором колімації, що пропускає випромінювання тільки з певного напрямку.

План робіт із виміру маси відкладень складається з наступних етапів.

1. Аналіз можливих місць відкладень у обладнанні.
2. Швидке обстеження з використанням колімованих приладів для визначення зон, у яких відкладено найбільшу кількість ЯМ.

3. Градування детекторів із використанням стандартних зразків. Кожен детектор градує для зони відкладень у вигляді точки, лінії або площини.

4. Вибір моделі для відкладення у кожному вузлі устаткування.

Відкладення характеризуються як точка, лінія чи площина, і з ним проводяться кількісні виміри.

5. Кількісні виміри. Більшість часу відводиться на зони, де перебуває основна маса ЯМ.

6. Для оцінки невизначеності результату вимірювання проводять вимірювання відкладень з різних напрямків та з різної відстані, використовуючи різні моделі для опису геометрії. Оцінюють та вводять поправки на ослаблення

випромінювання через самопоглинання у відкладенні та поглинання на шляху до детектора.

Процедура градуювання.

Градуювання для точки, лінії або площини можна провести за допомогою одного точкового джерела, що переміщується, з 1–5 г ^{235}U або ^{239}Pu . Слід пам'ятати, що самопоглинання гамма-квантів в урані чи плутонії може бути дуже великим.

Якщо стандартне точкове джерело містить m_0 грамів ЯМ, то маса точкового відкладення $m(\text{г})$ визначається за формулою:

$$m = m_0 \cdot \frac{C}{C_0} \cdot \frac{r^2}{r_0^2}, \quad (12.4)$$

де C – швидкість рахунку при вимірі відкладення, r – відстань між детектором та відкладенням.

У разі лінійного розподілу відкладення маса ЯМ на одиницю довжини відкладення m_L (г/м) визначається з виразу:

$$m_L = \frac{m_0}{L_{\text{Э}}} \cdot \frac{C}{C_0} \cdot \frac{r}{r_0}. \quad (12.5)$$

Якщо вибрано плоску модель розподілу відкладення, масу ЯМ на одиницю площі зони відкладення m_A (г/м²) знаходять за такою формулою:

$$m_A = \frac{m_0}{A_{\text{Э}}} \cdot \frac{C}{C_0}. \quad (12.6)$$

12.7. Гамма-спектрометричні виміри збагачення урану

Існують два визначення збагачення урану ізотопом ^{235}U :

- збагачення (масові відсотки) $E_1 = (\text{маса } ^{235}\text{U} / \text{загальна маса U}) * 100\%$;
- збагачення (атомні відсотки) $E_2 = (\text{число атомів } ^{235}\text{U} / \text{загальна кількість атомів U}) * 100\%$.

Аналізи збагачення урану, засновані на припущенні, що інтенсивність гамма-випромінювання ^{235}U із зразків урану достатньої товщини пропорційна їх збагаченню ^{235}U , набули широкого поширення. Гамма-кванти з енергією 185,7 кеВ при розпадах ^{235}U випускається з ймовірністю $(57,5 \pm 0,9)\%$ (квантовий вихід випромінювання або коефіцієнт розгалуження, кількість квантів зазначеного випромінювання досягає $4,6 \cdot 10^4$ квант/(с·р).

Довжини вільного пробігу та «нескінченні» товщини для квантів 185,7 кеВ у сполуках урану наведені в табл. 12.2.

Таблиця 12.2 – Довжини вільного пробігу та «нескінченні» товщини для гамма-випромінювання з енергією 185,7 кеВ у з'єднаннях урану

№ п/п	З'єднання	Щільність, г/см ³	Довжина вільного пробігу, см	Нескінченна товщина, см
1	Метал	18,7	0,04	0,26
2	UF ₆ (тверд.)	4,7	0,20	1,43
3	UO ₂ (спечен.)	10,9	0,07	0,49
4	UO ₂ (порошок.)	2,0	0,39	2,75
5	Нітрат ураніла	2,8	0,43	3,04

Опис методу

Детектор (рис. 12.3) реєструє випромінювання, що пройшло через фільтр та коліматор. За допомогою коліматора встановлюється площа видимої поверхні детектором. Фільтр поглинає випромінювання в ділянці енергій нижче 185,7 кеВ, що дозволяє розвантажити вимірювальний тракт, підвищити частку сигналів 185,7 кеВ у повному потоці сигналів через тракт. Фільтри виготовляються із матеріалів середньої ваги (Cd, Ni та ін.).

Швидкість рахунку імпульсів у фотопиці $n_p = S_\phi / t$, де S_ϕ – рахунок імпульсів у фотопіці, t - час вимірювання, визначається наступним виразом:

$$n_p = (\Omega_d / 4\pi) \varepsilon \lambda_{235} (N_A / A_U) \rho_U E I \theta \exp(-\mu_\phi \rho_\phi d_\phi) \times \exp(-\mu_k \rho_k d_k) \int_0^D \exp(-\mu_\ell x) dx, \quad (12.7)$$

де Ω_d – тілесний кут, обмежений отвором коліматора; ε – ефективність детектора при $E_\gamma = 185,7$ кеВ; N_A – число Авогадро; A_U – атомна маса урану у зразку; ρ_U – щільність урану у зразку; E – збагачення; I – квантовий вихід (коефіцієнт розгалуження) випромінювання 185,7 кеВ; θ – площа отвору коліматора; μ_ϕ , ρ_ϕ , d_ϕ – масовий коефіцієнт ослаблення, щільність та товщина фільтра; $\mu_{до}$, $\rho_{до}$, $d_{до}$ – масовий коефіцієнт ослаблення, щільність та товщина стінки контейнера; μ_1 – коефіцієнт ослаблення гамма-випромінювання у зразку урану; λ_{235} – постійна розпаду ^{235}U .

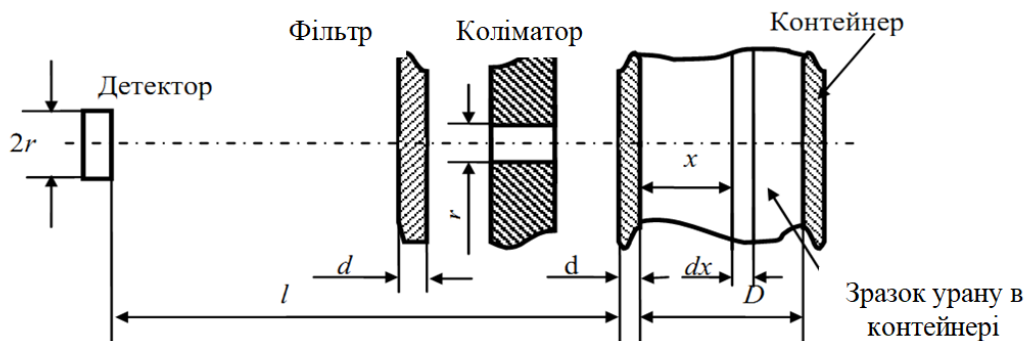


Рисунок 12.3. Схема геометрії вимірювання збагачення урану за гамма-випромінювання зразка

Після обчислення інтеграла та перетворень (і більш докладного подання складу зразка) формула для розрахунку швидкості рахунку імпульсів n_p наводиться до наступного виду:

$$n_p = K \cdot \frac{E \cdot T_K \cdot T_\phi \cdot (1 - T_{обр})}{[1 + (\mu_M / \mu_U) \cdot (\rho_M / \rho_U)]}, \quad (12.8)$$

де $K = [(\Omega_d / 4\pi) \cdot \varepsilon \cdot \lambda_{235} \cdot I \cdot A_U \cdot T_\phi]$; $T_{обр}$ – коефіцієнт пропускання для досліджуваного зразка; T_K – коефіцієнт пропускання для стінки контейнера; T_ϕ – коефіцієнт пропускання фільтра; μ_U , ρ_U – масовий коефіцієнт ослаблення та щільність урану; μ_M , ρ_M – масовий коефіцієнт ослаблення та щільність матриці.

Член $[1 + (\mu_M / \mu_U) \cdot (\rho_M / \rho_U)]$ враховує розведення урану у зразку іншими матеріалами (кисень, фтор, плутоній та ін.). Він залежить від складу матеріалу, що вимірюється.

K визначають за допомогою фізичного еталона, і його значення стає калібрувальним коефіцієнтом. Таким чином, шукане значення збагачення одержують за формулою:

$$E = \frac{n_p \cdot [1 + (\mu_M / \mu_U) \cdot (\rho_M / \rho_U)]}{K \cdot T_K \cdot T_\phi \cdot (1 - T_{обр})}. \quad (12.9)$$

Тепер порівняємо вимірювання з NaI та Ge-спектрометрами. Частина спектру, отриманого на NaI-спектрометрі, в області піку 185,7 кеВ ^{235}U показана на рис. 12.4.

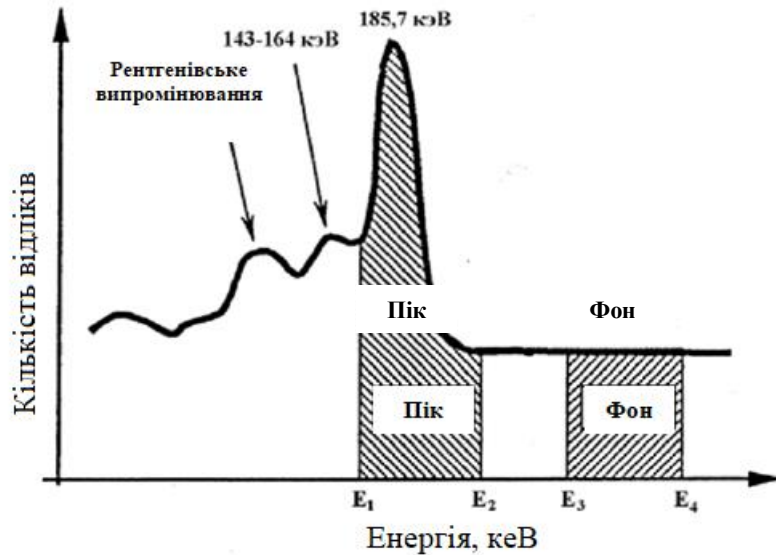


Рисунок 12.4. Спектр гамма-випромінювання, виміряний на NaI-детекторі

Рахунок імпульсів у фотопці $S_\phi = p - f \cdot b$, де p – сумарний рахунок імпульсів у заданому діапазоні енергій $E_1 - E_2$, що включає фотопік 185,7 кеВ; b – сумарний рахунок імпульсів фону в діапазоні вище за пік (див. рис. 11.4); f – коефіцієнт перерахунку між виміряним фоном та фоном в області піку. Фон оцінюється шляхом екстраполяції за числами відліків у каналах вище за пік.

При аналізах нескінченно товстих зразків $E = n_p / K = A \cdot p + B \cdot b$, де A та B ($B = -f \cdot A$) – калібрувальні коефіцієнти, визначені з вимірів з еталоном.

При вимірюваннях на напівпровідникових Ge-детекторах немає проблем із відніманням фону. Піки приблизно в 20 разів вужче, ніж при вимірах на NaI-детекторах, відповідно вище відношення пік/фон.

12.8. Вимірювання відносної інтенсивності гамма-випромінювань ^{235}U та ^{238}U

Головний недолік методу вимірювання збагачення урану, що ґрунтується на реєстрації випромінювання 185,7 кеВ, – необхідність калібрування вимірювальної системи для кожного нового контейнера із зразком урану. Цього недоліку позбавлений метод вимірювання збагачення по відносній інтенсивності гамма-випромінювань ^{235}U і ^{238}U .

Існує три діапазони енергії в спектрі гамма-випромінювання, які можна використовувати для подібних вимірювань: 53-68 кеВ, 84-130 кеВ та 185-1001 кеВ.

Область 84–130 кеВ включає ряд γ - та ХК-ліній ізотопів урану. Випромінювання ^{235}U та ^{238}U у цій галузі дуже близькі за енергією, і тому реєструються з майже однаковою ефективністю.

Співвідношення між концентраціями ізотопів у зразку одержують за формулою:

$$N_i/N_k = n_p^i/n_p^k \cdot T_{1/2}^i/T_{1/2}^k \cdot I_\gamma^k/I_\gamma^i \cdot \varepsilon_\gamma^k/\varepsilon_\gamma^i, \quad (12.10)$$

де N_i, N_k – Число атомів i -го і k -го ізотопів у зразку відповідно; $T_{1/2}^i, T_{1/2}^k$ – період напіврозпаду i -го та k -го ізотопів відповідно; $\varepsilon_\gamma^i, \varepsilon_\gamma^k$ – ефективності реєстрації випромінювань в аналізованих піках i -го та k -го ізотопів відповідно, які в даному випадку включають ефективність детектора, геометрію вимірювань, самопоглинання випромінювань у зразку та їх ослаблення у матеріалах між зразком та детектором; I_γ^i, I_γ^k – квантові виходи випромінювань, що реєструються в аналізованих піках i -го та k -го ізотопів відповідно.

Швидкість рахунку n_p^i та концентрація i -го ізотопу співвідносяться наступним чином:

$$\frac{n_p^i}{I_\gamma^i} = \left(\frac{N^i \cdot \ln 2}{T_{1/2}^i} \right) \cdot \varepsilon_\gamma^i \quad (12.11)$$

Член у дужках має однакове значення для всіх гамма-випромінювань, що випускаються одним ізотопом. Тому відношення (n_p^i / I_γ^i) пропорційно ефективності ε_γ^i .

Процедура вимірювання відносної ефективності включає:

- визначення швидкостей рахунку n_p^i у ряді піків, що належать одному ізотопу, та обчислення значень n_p^i / I_γ^i , що характеризують ефективність ε_γ^i . Величини I_γ^i відомі для кожної групи квантів, що утворюють ці піки S_i ;
- отримані значення $i \cdot \varepsilon$ для ряду піків використовують для побудови залежності ε_γ від E_γ .

Основна складність роботи в діапазоні 84–130 кеВ – близькість вимірюваних випромінювань за енергіями – долається шляхом застосування Ge-детекторів з високою роздільною здатністю та спеціальної програми розкладання спектру MGAU (рис. 12.5).

Для визначення відносного вмісту ^{235}U використовують рентгенівські піки 89,95 кеВ (Th XK α 2) та 93,35 кеВ (Th XK α 1), а для ^{238}U - дуплет гамма-піків, що перекриваються, 92,37 кеВ і 92,79 кеВ (^{234}Th).

Вміст ^{234}U визначається гамма-лінії 121 кеВ. Похибка визначення збагачення становить трохи більше кількох відсотків для зразків урану від збідненого до високозбагаченого (від 0,3% до 93% ^{235}U).

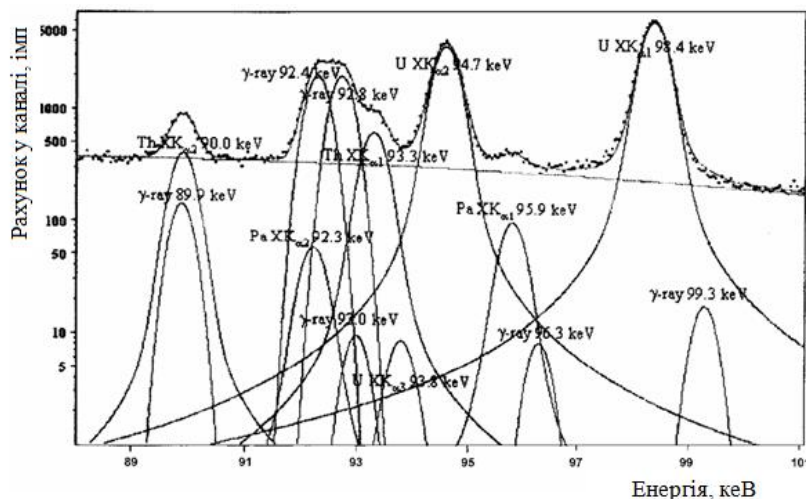


Рисунок 12.5. Спектр випромінювання урану в енергетичному діапазоні 88–100 кеВ та результат його математичного розкладання на окремі компоненти

Обмеження: гамма-дуплет 92,37 кеВ та 92,79 кеВ, що використовується для визначення відносного вмісту ^{238}U , належить ^{234}Th – продукту α -розпаду ^{238}U . Тому дочірній ^{234}Th у зразку повинен бути в рівновазі з материнським ^{238}U , яке настає приблизно через 5 місяців після хімічного виділення урану. Товщина стін контейнера впливає на точність аналізу: 16 мм стінка сталевго контейнера з UF_6 послаблює випромінювання 90-100 кеВ приблизно в 250 разів.

12.9. Неруйнівні вимірювання ізотопного складу плутонію за допомогою гамма-спектрометрії

Більшість зразків Pu містять ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu та ^{242}Pu . Крім того, у них завжди присутні ^{241}Am та ^{237}U – продукти розпаду ^{241}Pu . Дані про розпади перерахованих ізотопів наведено в табл. 12.3.

Таблиця 12.3 – Дані про розпад деяких ізотопів

Ізотоп	$T_{1/2}$, р	Активність, розп/с·р
^{238}Pu	$87,74 \pm 0,04$	$6,33 \cdot 10^{11}$
^{239}Pu	24119 ± 26	$2,2942 \cdot 10^9$
^{240}Pu	6564 ± 11	$8,3971 \cdot 10^9$
^{241}Pu	$14,348 \pm 0,022$	$3,8244 \cdot 10^{12}$
^{242}Pu	376300 ± 900	$1,4522 \cdot 10^8$
^{241}Am	$433,6 \pm 1,4$	$1,2655 \cdot 10^{11}$
^{237}U	6,75 діб	$9,4080 \cdot 10^{7*}$
* за умови рівноваги з ^{241}Pu		

При гамма-вимірюваннях визначають ізотопні відносини: f_{238}/f_{239} , f_{240}/f_{239} , f_{241}/f_{239} , f_{242}/f_{239} , причому сума $f_{238}+f_{239}+f_{240}+f_{241}+f_{242}=1$, де f_i - частка i -го ізотопу плутонію. Можливі композиції ізотопів Pu представлені у табл. 12.4.

Таблиця 12.4 – Можливі ізотопні склади плутонію

Ізотоп	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
Низьке вигорання, %	0,01	94	5,5	0,5	0,03
Високе вигорання, %	2	57	25	11	5

Якщо виміряти інтенсивності гамма-випромінювань присутніх у зразку ізотопів, за допомогою самокалібрування можна визначити відносні ефективності їх реєстрації. Метод самокалібрування заснований на використанні ряду піків одного ізотопу, присутнього в аналізованому зразку, та інформації про квантові виходи.

Маса зразка може становити від менше 100 мг – мінімальна підзвітна кількість, до меж ядерної безпеки. Матриця – будь-яка (тверда, рідка, порошок, неоднорідна). Геометрія – без обмежень.

Вік із моменту хімічного виділення Pu – будь-який. Для вимірювань застосовні як планарний, і коаксіальний Ge-детектори.

Існують різні діапазони енергій гамма-променів, що містять випромінювання ізоотопів плутонію. У всіх діапазонах корисна інформація міститься в близьких по енергії піках різних ізоотопів.

При вимірах високоенергетичних діапазонах можна вимірювати Pu, що знаходиться всередині товстостінних контейнерів, без вилучення зразка назовні. В результаті підвищується безпека роботи операторів та з'являється можливість інспекцій опломбованих контейнерів, які використовуються для тривалого зберігання ЯМ.

При вимірюваннях зразків з великою масою можна використовувати випромінювання з енергіями 642,5 кєВ ^{240}Pu , 646,0 кєВ ^{239}Pu і 766,4 кєВ ^{238}Pu , які мають велику проникаючу здатність і приходять в детектор з усієї товщини зразка.

Вимірювання зразків у тонкостінних контейнерах проводять у низькоенергетичних діапазонах за допомогою планарних Ge-детекторів. Коаксіальні детектори використовують як у разі тонкостінних, так і товстостінних контейнерів.

Часто застосовують планарні детектори площею 200-500 мм² та товщиною 10-13 мм. Такі розміри є компромісом, що дозволяє отримувати добрий дозвіл та прийнятну ефективність.

Застосування планарних детекторів обмежено областю ≤ 400 кєВ. Для вимірювань в області більш високих енергій потрібен коаксіальний детектор з роздільною здатністю $\leq 1,7$ кєВ для піка калібрувального джерела ^{60}Co з енергією 1332 кєВ.

Контрольні вимірювання плутонієвих зразків проводять за допомогою програм MGA та FRAM.

MGA (багатогруповий аналіз) – програма для визначення ізотопного складу Pu за результатами гамма-спектрометричних вимірів у діапазоні енергій 99–104 кеВ. Використовуються всі інтенсивні гамма-піки та рентгенівські піки у цьому діапазоні. Не потрібно введення даних (вони надходять з аналого-цифрового перетворювача - АЦП) та калібрування ефективності.

Основні обмеження програми:

- існує проблема визначення ^{242}Pu , який не піддається прямому виміру через дуже малу інтенсивність його гамма-випромінювання. Повний аналіз складу плутонію вимагає або застосування руйнівного аналізу (мас-спектрометричного методу), або оцінки вмісту ^{242}Pu методом ізотопних кореляцій;
- вона не застосовується при сильному фоні уламків поділу та для вимірювань зразків у товстостінних контейнерах.

Для застосування програми FRAM потрібен спектр гамма-випромінювання зразка, виміряний на апаратурі з високою енергетичною роздільною здатністю, та набір параметрів, які будуть використовуватись при аналізі. Параметри керують пошуком піків, задають діапазони аналізу та ізотопи, що підлягають визначенню.

Застосування програми FRAM характеризується такими рисами:

- легкою пристосовністю до умов різних вимірів без необхідності перепрограмування;
- можливістю для користувача редагувати параметри аналізу;
- можливістю проводити аналізи різних зразків при вмістах 2–38 % ^{240}Pu , 0,01–50% ^{241}Am , зразків у товстостінних контейнерах.

У табл. 12.5 наведено відомості про точність неруйнівних вимірів ізотопного складу плутонію.

Таблиця 12.5 – Точність неруйнівних вимірювань ізотопного складу плутонію %

Діапазон E_{γ} , кеВ	$T_{изм}$	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
40-60	10-300 хв	0,3-5,0	0,05-0,5	0,2-1,0	0,2-1,0
90-105	30-60 хв	0,3-5,0	0,05-0,5	0,2-1,0	0,2-0,8
>120	1-4 г	1-10	0,1-0,5	1-5	0,3-0,8

FRAM також можна використовувати для досліджень уранових зразків, зокрема для контролю збагачення виробів з урану, що знаходяться всередині контейнера. Справа в тому, що поширені аналізи за допомогою програми MGAU засновані на вимірюваннях м'якого випромінювання і не підходять для контролю захищених зразків. Застосування FRAM дає можливість використовувати для аналізів більш жорсткі випромінювання, вимірюючи їх спектр за допомогою коаксіального HPGe-детектора. На рис. 12.6 представлені спектри випромінювання зразків урану з різним збагаченням, одержані за допомогою коаксіального HPGe-детектора.

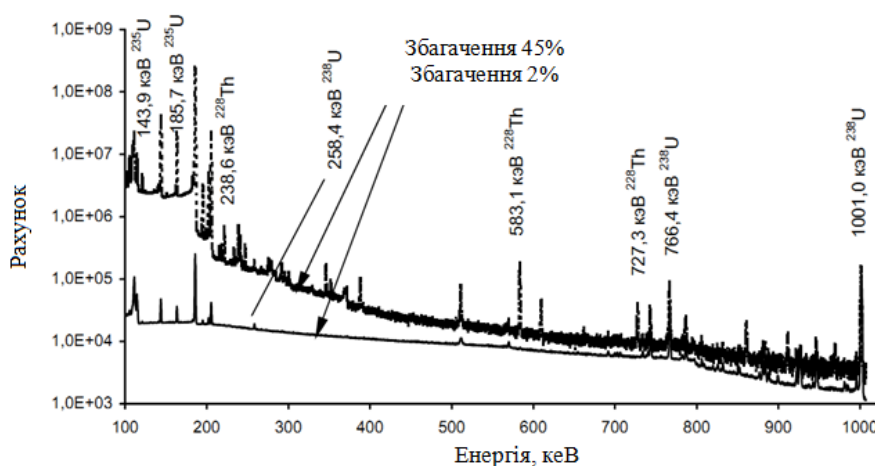


Рисунок 12.6. Спектри випромінювання зразків урану

Роль еталонів при гамма-спектрометричних вимірах ізотопного складу Рu (та U) істотно відрізняється від їхньої ролі в інших методах неруйнівного контролю. При гамма-спектрометрії шукані значення набувають, використовуючи відомі фізичні константи та результати самокалібрування. Еталони використовують лише для контролю якості вимірів.

12.10. Аналізи розчинів ЯМ. Денситометрія

Денситометрія на К-краї або L-краї поглинання заснована на вимірі пропускання через зразок розчину ЯМ сильно колімованого пучка фотонів або гамма-квантів від зовнішнього джерела. Метод практично нечутливий до випромінювання, що випускається самим зразком (наприклад, допустимо високий вміст розчину продуктів поділу). Коліматор обмежує спостереження лише малою частиною зразка. Тому склад зразка повинен бути суворо однорідний у всьому його обсязі.

Денситометр на К- або L-краї поглинання – прилад для неруйнівного аналізу концентрацій ЯМ у розчинах (рис. 12.7).

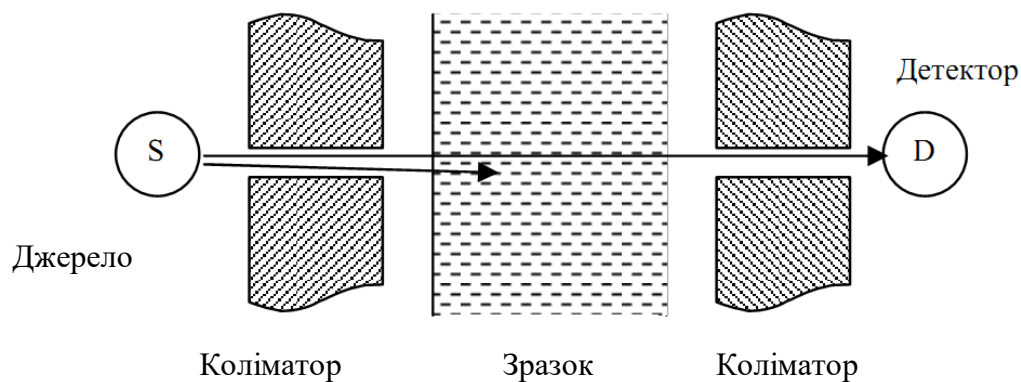


Рисунок 12.7. Схема денситометричних вимірів

Коефіцієнт поглинання кожного елемента змінюється стрибками при енергіях, рівних енергіям зв'язку електронів на К-і L-оболонках атомів (табл. 21.6).

Вимірювання пропускання випромінювання однієї енергії через зразок можуть дати інформацію про вміст одного матеріалу або компоненти суміші. Використання випромінювання двох різних енергій дозволяє контролювати склад двокомпонентної суміші.

Таблиця 12.6 – Енергії зв'язку електронів на К-і L-оболонках у різних ЯМ, кеВ

Елемент	Th	U	Np	Pu	Am
К-край	109,56	115,61	118,68	121,82	125,03
L-край	16,3	17,2	17,6	18,0	18,5

Вимірювання пропускання при двох енергіях E_1 та E_2 дає систему рівнянь для двох невідомих концентрацій:

$$\left. \begin{aligned} (-\ln T_1) / x = M_1 = \mu_1^1 \cdot \rho_1 + \mu_2^1 \cdot \rho_2 \\ (-\ln T_2) / x = M_2 = \mu_1^2 \cdot \rho_1 + \mu_2^2 \cdot \rho_2 \end{aligned} \right\} \quad (12.12)$$

Розв'язання рівнянь виглядає так:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 = (M_1 \cdot \mu_2^2 - M_2 \cdot \mu_2^1) / D \\ \rho_2 = (M_2 \cdot \mu_1^1 - M_1 \cdot \mu_1^2) / D \end{aligned} \right\} \quad (12.13)$$

де $D = \mu_1^1 \cdot \mu_2^2 - \mu_2^1 \cdot \mu_1^2$.

Рішення тим точніше, чим сильніша величина D відрізняється від нуля. Ця умова виконується, якщо використовувати два випромінювання поблизу та по різні боки від K -краю (або L -краю) поглинання важкої компоненти суміші. Якщо навіть коефіцієнти поглинання легкої компоненти на цих енергіях розрізняються слабо, різниця D буде досить велика.

Докладно розглянемо зміни $\mu(E)$ поблизу K -краю поглинання (рис. 12.8).

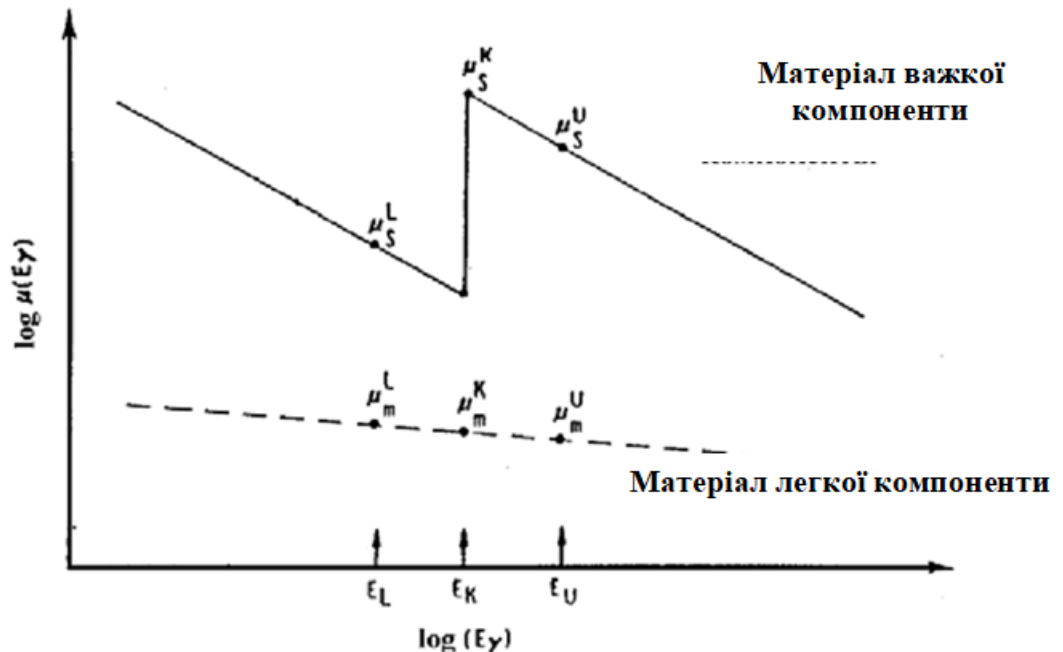


Рисунок 12.8 Зміни коефіцієнтів поглинання легкої та важкої компонентів ЯМ поблизу K -краю

Вимірявши пропускання γ -випромінювань з енергіями E_L і E_U знаходимо шукану концентрацію ЯМ в розчині ρ_s :

$$\rho_s = \frac{1}{\Delta\mu_s \cdot x} \ln\left(\frac{T_L}{T_U}\right) + \rho_m \left(\frac{\Delta\mu_m}{\Delta\mu_s}\right) \quad (12.14)$$

де $\Delta\mu_s = \mu_s^U - \mu_s^L > 0$, $\Delta\mu_m = \mu_m^U - \mu_m^L < 0$.

Якщо E_L і E_U дуже близькі до E_K , то $\Delta\mu_m$ прагне нуля, і результат виміру нечутливий до поглинання в матриці.

Додаткові вимірювання (калібрування) виконують з еталонними розчинами, поміщеними у стандартні контейнери.

При малих концентраціях ЯМ (десятки г/л) застосовують денситометрію на L -краї поглинання, при більш високих (сотні г/л) – на K -краї поглинання.

Застосовують джерела випромінювань двох типів: перший – генератори рентгенівського випромінювання, що виробляють фотони безперервним широким спектром. Їх застосовують у вимірах і на K -краї, і на L -краї поглинання. Приклади спектрів представлені на рис. 12.9. Відношення спектра зразка до спектра порівняння дає пропускання.

Другий тип використовуваних джерел – радіоактивні γ -джерела моноенергетичних випромінювань. Наприклад, для вимірювання розчинів плутонію ($E_K=121,82$ кеВ) використовують два джерела: ^{75}Se ($T_{1/2}=120$ діб, $E_\gamma=121,1$ кеВ) та ^{57}Co ($T_{1/2}=270$ діб, $E_\gamma=122$ кеВ). При вимірюваннях з цими джерелами вплив на результат поглинання в легкій матриці дуже мало, проте потрібно враховувати різні швидкості їх розпадів.

Для вимірювання розчинів урану ($E_K = 115,61$ кеВ) застосовують γ -джерело ітербій-196 (^{169}Yb) з періодом напіврозпаду $T_{1/2} = 32$ дні. І тут вводити поправки на розпад не потрібно: одне джерело випускає обидві групи квантів. Однак значна різниця в їх енергіях ($E_L=109,8$ кеВ, $E_U = 130,5$ кеВ) викликає велику чутливість до поглинання в матриці (велике $\Delta\mu_m$).

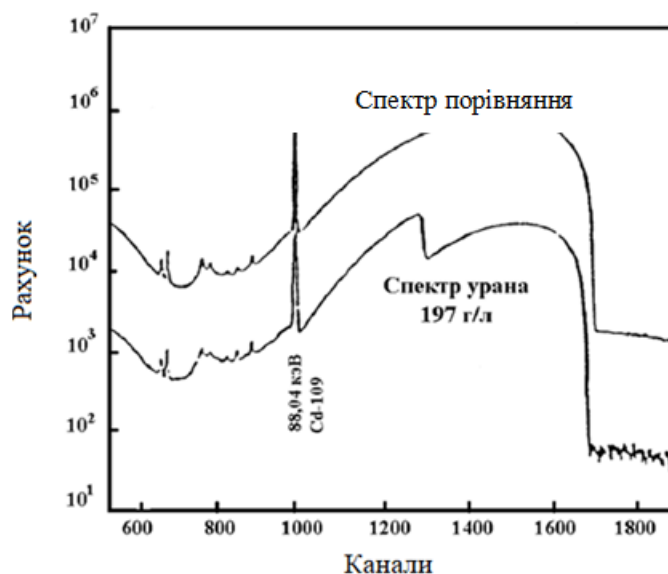


Рисунок 12.9. Спектр розчинів, отриманих за допомогою рентгенівського генератора: верхня крива – спектр порівняння, вимірний за допомогою денситометричного детектора К-краю поглинання в розчині без ЯМ (3-мольний розчин HNO_3); нижня крива – спектр зразка розчину урану з концентрацією 197 г/л; джерело Cd використовується для корекції прорахунків, зумовлених мертвим часом

Аналізи на L-краї застосовують для зразків меншої товщини, що обумовлено меншою проникаючою здатністю вимірюваних випромінювань. Зазвичай денситометрію на L-краї застосовують для контролю розчинів з нижчими концентраціями ЯМ, а на K-краї – для вищих концентрацій (табл. 12.7). При нижчих концентраціях ЯМ у розчинах їх контролю використовують рентгено-флюоресцентний аналіз.

Таблиця 12.7 – Характерні концентрації ЯМ у розчинах при денситометричних аналізах

Характерні концентрації, г/л	Уран	Плутоній
$\rho_s(\text{K-краї})$	270	294
$\rho_s(\text{L-краї})$	18	19

12.11. Аналізи розчинів ЯМ. Рентгено-флюоресцентний аналіз (РФА)

Всі атоми мають упорядковані системи електронних оболонок, що характеризуються певними значеннями енергії зв'язку. З появою вакансії на електронній оболонці її заповнює інший електрон, що переходить із вищої оболонки (рис. 12.10). Різниця потенційних енергій виділяється у вигляді рентгенівського кванта з енергією, що дорівнює різниці енергій зв'язку на нижній та верхній оболонках. Спектри характеристичного випромінювання досить прості, що полегшує їхній аналіз.

Щоб звільнити електрон з оболонки, потрібно передати йому енергію, що перевищує $E_{зв'язку}$. Для цього використовують зовнішні джерела збудження.

Імовірність порушення рентгенівського випромінювання K (або L) серії залежить від різниці між енергією квантів джерела збудження E_0 і енергією зв'язку електронів на K - (або L)-оболонці $E_{зв'язку}$. Можливість збудження максимальна, коли енергія гамма-кванта лише трохи перевищує енергію зв'язку електрона.

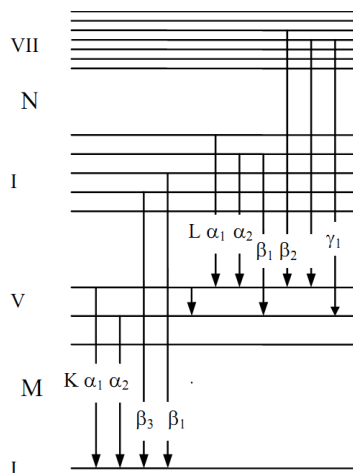


Рисунок 12.10 Схема електронних переходів в атомі

Для збудження характеристичного випромінювання використовують радіоактивні джерела чи рентгенівські трубки. Перевага радіоактивних джерел полягає у простоті їхнього пристрою та стабільності енергії збуджуючого випромінювання. Спектр збуджуючого випромінювання має бути як можна простіше. У разі складного спектра присутні «непрацюючі» високоенергетичні лінії, що створюють фон в області піків рентгенівського випромінювання, що вимірюється, або навіть інтерферують з ними.

У табл. 12.8 надані значення енергії та виходи X-променів Pu та U.

Для спостереження характерних піків важливо правильно вибрати геометрію вимірів. Спостереженням може заважати фон, створюваний квантами, що виникають при комптоновском розсіянні випромінювання джерела.

Таблиця 12.8 – Значення енергій переходів та виходи рентгенівських випромінювань Pu та U

Лінія	Перехід	Уран, %	Плутоній, %
$K_{\alpha 1}$	K-L ₃	98,44 (100)	103,76 (100)
$K_{\alpha 2}$	K-L ₂	94,66 (61,9)	99,55 (62,5)
$K_{\beta 1}$	K-M ₃	111,31(22,0)	117,26 (22,2)
$K_{\beta 3}$	K-M ₂	110,43 (11,6)	116,27 (11,7)
$L_{\alpha 1}$	L ₃ -M ₅	13,62 (100)	14,28 (100)
$L_{\alpha 2}$	L ₃ -M ₄	13,44 (10)	14,08 (10)
$L_{\beta 2}$	L ₃ -N ₅	16,43 (20)	17,26 (20)
$L_{\beta 1}$	L ₂ -M ₄	17,22 (50)	18,29 (50)

Швидкість реєстрації квантів рентгенівського випромінювання i -го елемента $n_{\phi i}$ пов'язана із вмістом цього елемента N_i у зразку i з квантовим виходом його випромінювання I^X_i наступним співвідношенням:

$$n_{\Phi i} = N_i \cdot I_i^X \cdot W_i^X \cdot \varepsilon_i^X \quad (12.15)$$

де W_i^X – функція збудження рентгенівського випромінювання, яка є твір перерізу фотоефекту $\sigma_{\Phi}(E)$ і потоку квантів джерела на зразок $\Phi_{\gamma}(E)$; ε_i^X – ефективність реєстрації рентгенівського випромінювання детектором:

$$W_i^X = \int_{E_i}^{\infty} \sigma_{\Phi}^i(E) \cdot \Phi_{\gamma}(E) \cdot dE = (Z_i)^5 \cdot \int_{E_i}^{\infty} [\Phi_{\gamma}(E)/(E - E_i)^3] \cdot dE \quad (12.16)$$

де E_i – порогова енергія фотоефекту на відповідній електронній оболонці (K або L) i -го елемента; Z_i – атомний номер i -го елемента.

Очевидно, функція збудження залежить від Z елемента і тим більше, чим ближче енергія випромінювання джерела до порогової енергії фотоефекту (енергії зв'язку електрона на оболонці).

Радіоактивні гамма-джерела мають малі розміри, прості в експлуатації та придатні для багатьох РФА. Головний їхній недолік – розпад з часом та необхідність періодичної заміни.

Існує проблема їхнього транспортування. Оскільки потужність таких джерел більша за 1 мКі, під час роботи з ними необхідний захист як персоналу, так і детектора. Схема установки для РФА представлена на рис. 12.11.

Як і при пасивних гамма-вимірюваннях, точність результатів РФА може бути обмежена поглинанням усередині зразка. Цей ефект слід враховувати як вимірюваного характеристичного випромінювання, так і для збудливого випромінювання зовнішнього джерела. Поглинання у великих та твердих зразках настільки велике, що РФА не придатний для їх аналізу. Тому його використовують для контролю рідких однорідних зразків.

Випромінювання джерела поглинається сильніше, оскільки його енергія вища за поріг поглинання аналізованого ЯМ. Ослаблення залежить також від матеріалу та товщини стінок контейнера. РФА з L -випромінювання потребує застосування не металевих, а пластмасових контейнерів.

Вимірювальну систему РФА калібрують, використовуючи набір еталонних розчинів з різною концентрацією ЯМ в контейнерах аналогічних тим, що застосовуються досліджуваних розчинів.

Генератор рентгенівського випромінювання – потужніший випромінювач, ніж радіоактивні джерела. Він виробляє 1012 фотонів/с та більше. Основні проблеми, пов'язані із застосуванням генераторів, – необхідність підтримки високої стабільності їх параметрів та відносно великі габарити, що ускладнюють їхнє переміщення.

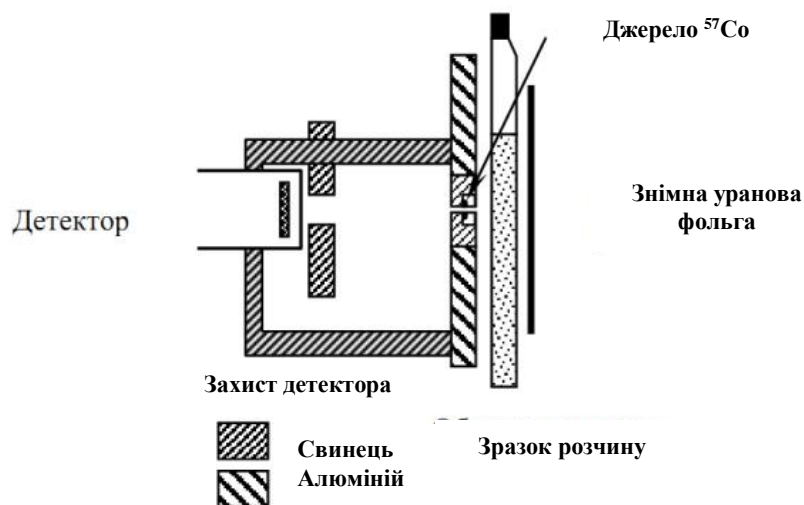


Рисунок 12.11. Схема установки для РФА

Вимірювання рентгенівської флуоресценції дозволяє визначити відношення концентрацій ЯМ у розчині. На рис. 12.12 представлений спектр розчину, що містить уран та плутоній.

Вагове відношення U/Pu можна визначити за площею піків $XK_{\alpha 1}$ урану (S_U) та $XK_{\alpha 1}$ плутонію (S_{Pu}):

$$U/Pu = \frac{A_U}{A_{Pu}} \cdot \frac{S_U}{S_{Pu}} \cdot \frac{\varepsilon_{Pu}}{\varepsilon_U} \cdot \frac{1}{R_U/R_{Pu}}, \quad (12.17)$$

де A_U та A_{Pu} – атомні маси урану та плутонію, $(\epsilon_{Pu} / \epsilon_U)$ – відносна ефективність детектування урану та плутонію;

(R_U / R_{Pu}) – коефіцієнт, що враховує відмінність ймовірностей порушення випромінювань урану і плутонію із застосуванням даного джерела.

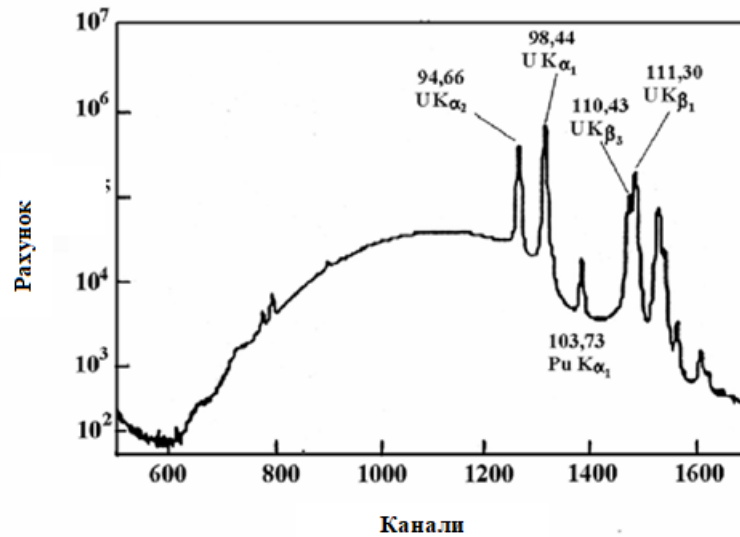


Рисунок 12.12. Спектр флюоресценції розчинів урану та плутонію

12.12. Нейтронні виміри ЯМ

Існує три процеси, що викликають нейтронне випромінювання зразків ЯМ:

- спонтанний поділ ЯМ;
- вимушений поділ ЯМ;
- (α, n) – реакція під впливом α -випромінювання ЯМ.

Нейтрони - частинки, що сильно проникають. Вони виходять назовні з усього обсягу зразка і легко проходять через стінки контейнера, що містить зразок.

Спонтанний поділ найбільш ймовірний для ізотопів з парним масовим числом (^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu та ін). Відносна ймовірність поділу ^{240}Pu з випромінюванням різного числа нейтронів показано на рис. 12.13. Середня кількість нейтр/поділ становить близько 2. Всього в 1 г ^{240}Pu відбувається 473 спонтанних поділів за секунду.

Кількість нейтронів, що утворилися в результаті одного поділу, називають множинністю.

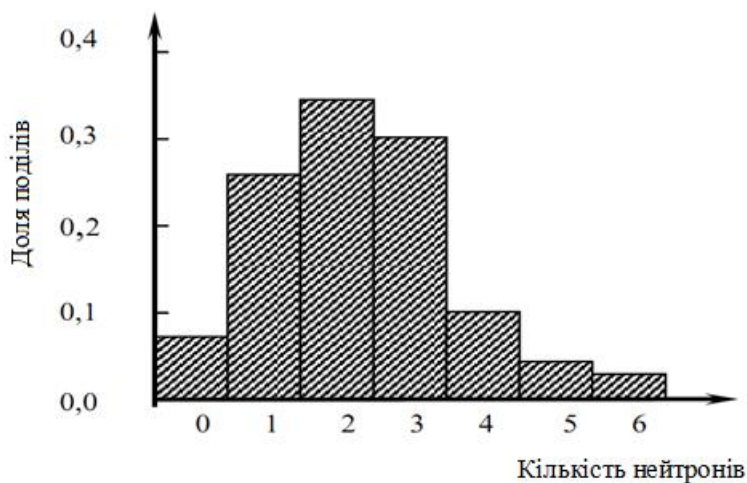


Рисунок 12.13. Відносна ймовірність поділів із випромінюванням різного числа нейтронів

Метод, заснований на реєстрації нейтронів, що випускаються самовільно, називають пасивним.

При обробці результатів пасивних нейтронних вимірів часто використовують поняття «ефективного» ^{240}Pu , якому приписують усе нейтронне випромінювання зразка плутонію:

$$^{240}\text{Pu}_{\text{эфф}} = 2,52 \cdot f_{238} + f_{240} + 1,68 \cdot f_{242}, \quad (12.18)$$

де f_i – частка i -го ізотопу плутонію в зразку.

Викликаний (або вимушений) поділ найбільш ймовірний для ізотопів, що діляться (^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu). При викликаному поділі випускається 0-8 нейтр/поділ. Їхнє середнє число у випадку ^{239}Pu близько 3.

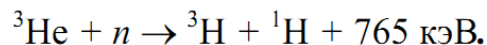
Метод нейтронних вимірів із використанням зовнішнього джерела називається активним.

Число нейтронів, народжених при спонтанному або вимушеному поділі, може збільшуватися внаслідок їх розмноження у зразку. (α, n) -реакція є додатковим джерелом нейтронів, що ускладнює нейтронні вимірювання ЯМ. Радіоактивні розпади ізотопів урану та плутонію найчастіше супроводжуються випромінюванням α -часток. Енергії α -частинок, що випускаються, складають від 4 до 6 МеВ. Крім того, сильним джерелом α -часток є ^{241}Am .

Альфа-частинки, що випускаються ураном і плутонієм, вступають у реакцію з 11 елементами з малим порядковим номером Z , включаючи кисень, фтор, вуглець, алюміній.

В результаті (α, n) -реакції народжується один нейтрон. Випадки поодиноких ((α, n) -реакції) та множинних (спонтанний та вимушений поділ) народжень нейтронів можна розділити шляхом реєстрації збігів нейтронів за часом.

Для детектування нейтронів при контрольних вимірах ЯМ найчастіше використовують гелієві лічильники. У таких лічильниках йде (n, p) -реакція:



Перетин реакції ${}^3\text{He}(n, p)$ для теплових нейтронів досягає 5330 барн та широкому діапазоні енергії (від 10^{-2} до 105 эВ) змінюється за законом $1/\sqrt{E}$.

Для підвищення ефективності рахунку швидких нейтронів лічильник оточують сповільнювачем. Зазвичай ${}^3\text{He}$ -лічильник поміщають у блок поліетилену завтовшки 10 см.

^3He -лічильники придатні для нейтронних вимірювань у сильних γ -полях. Їхні показники щодо надійності, стабільності, ресурсу роботи дуже високі.

Для активних аналізів вмісту у зразках ізотопів, що діляться (^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) необхідне джерело нейтронів з енергією нижче порогів поділу парно-парних ізотопів (^{238}U , ^{240}Pu). Такі нейтрони випускає $^{241}\text{AmLi}$ -джерело. На рис. 12.14 показаний спектр нейтронів $^{241}\text{AmLi}$ -джерела. Потужність $^{241}\text{AmLi}$ -джерел, що використовуються для неруйнівного контролю, становить 104–105 н/с.

У більшості реальних випадків число фонових нейтронів від (α, n) -реакцій, що випускаються зразком, занадто велике, що унеможлиблює визначення вмісту ЯМ шляхом рахунку одиночних нейтронів. При активних аналізах так само сильне фон створюють нейтрони від (α, n) -реакцій у джерелі.

Як зазначалося, нейтрони, що виникли при розподілі ізотопів у зразку ЯМ можна відокремити від нейтронів (α, n) -реакцій шляхом реєстрації імпульсів, що збігаються за часом.

Якщо число нейтронів, випущених при одному розподілі, дорівнює n , то можливість реєстрації k нейтронів визначається рівнянням:

$$P(n, k) = \frac{n!}{(n - k)!k!} \cdot \varepsilon^k \cdot (1 - \varepsilon)^{n-k} \quad (12.19)$$

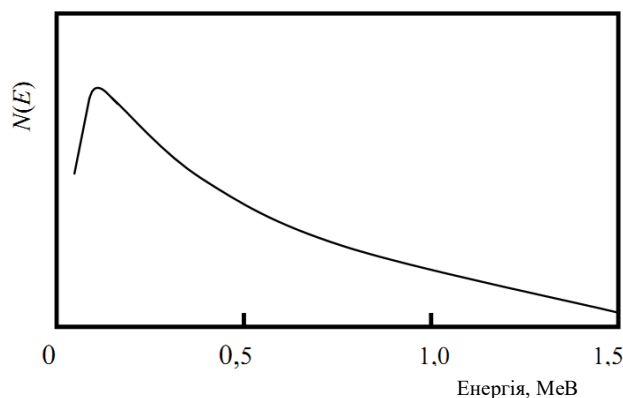


Рисунок 12.14. Спектр нейтронів $^{241}\text{AmLi}$ -джерела

Якщо випущено два нейтрони, то ймовірність $P(2,0)$ не зареєструвати жодного нейтрону дорівнює 0,64; ймовірність зареєструвати один нейтрон $P(2,1) = 0,32$; два нейтрони $P(2,2) = 0,04$. Таким чином, ймовірність реєстрації дійсного збігу двох нейтронів одного розподілу відносно мала. Багато збігів, що спостерігаються в послідовності імпульсів, будуть випадковими, викликаними збігами між нейтронами (α, n) -реакцій, нейтронами (α, n) -реакцій та нейтронами поділу або нейтронами різних поділів.

Для того щоб виділити та визначити число справжніх та випадкових збігів використовують розподіл Россі-альфа. Такий розподіл виходить при запуску таймера в момент приходу будь-якого імпульсу. Таймер відраховує час, а кожен наступний імпульс запам'ятовується в комірці, що відповідає часу його приходу. Коли заданий час відліків закінчується, таймер зупиняється і знову вмикається, коли новий імпульс запустить процес рахунку. На рис. 12.15 подано розподіл Россі-альфа. Імовірність рахунку збігів після акту поділу зменшується з часом експонентно. Якщо збігаються нейтрони (α, n) -реакцій чи фонові нейтрони, то ймовірність таких випадкових збігів у будь-якому часовому інтервалі однакова

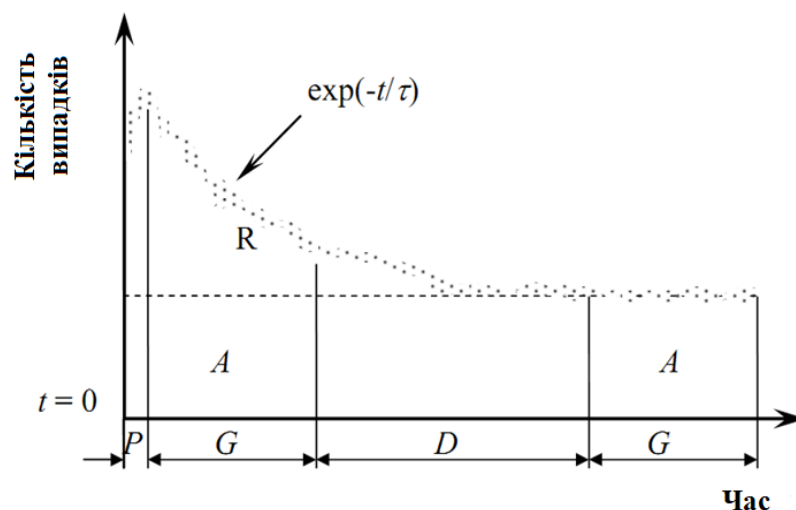


Рисунок 12.15. Розподіл Россі-альфа представляє число випадків детектування нейтронів як функцію часу, що минув після реєстрації першого нейтрону поділу

Число справжніх подвійних збігів визначається за формулою:

$$R = \frac{(R + A)_{\text{счет}} - A_{\text{счет}}}{\exp(-P/\tau) \cdot [1 - \exp(-G/\tau)] \cdot [1 - \exp(-(D + G)/\tau)]} \exp(G \cdot T) \quad (12.20)$$

де R – число справжніх збігів; A – кількість випадкових збігів; P – час попередньої затримки рахунки імпульсів, G – час рахунки збігів; D – тривала затримка; τ – час життя нейтрону у детекторі, $D \gg \tau$; T – загальна швидкість рахунку нейтронів.

Принцип побудови схеми рахунку нейтронних збігів показано на рис. 12.16.

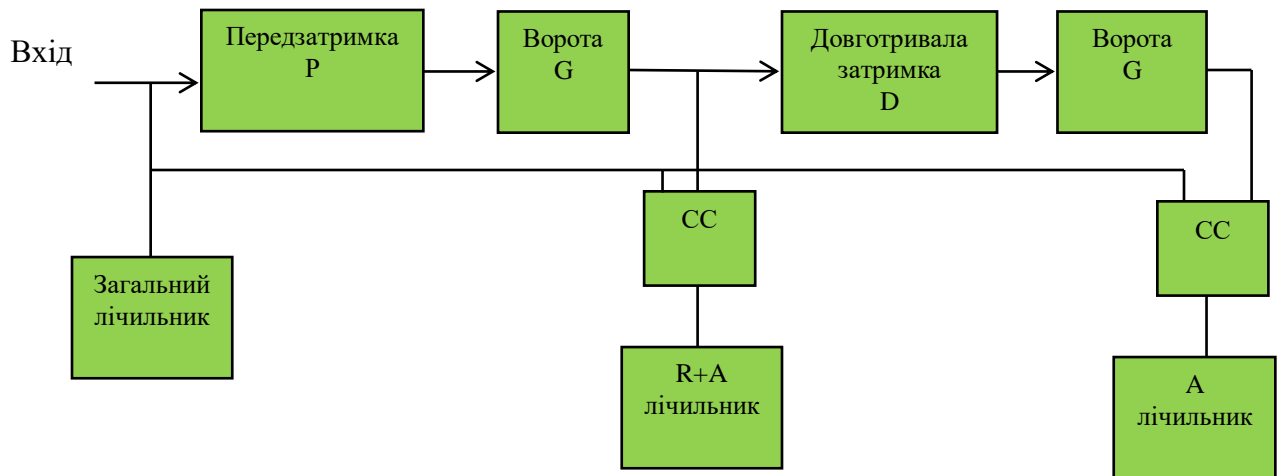


Рисунок 12.16. Схема виділення збігів нейтронів поділу

Практичне застосування таких схем обмежене швидкостями рахунку менше 20–30 кГц через необхідність великих корекцій, що враховують мертвий час електроніки. Подальший розвиток вимірювальної техніки було засноване на застосуванні регістру зсуву.

Зсувний регістр складається з набору тригерів, що керуються таймером. Послідовність імпульсів, що надходять за час G , запам'ятовується. Кожен наступний імпульс відкриває власні ворота так, що немає необхідності чекати поки закриються одні ворота, щоб відкрити інші. Це дозволяє працювати при

швидкостях рахунку кілька сотень кілогерц і вище. Реєстрація збігів не починається відразу, лише через короткий інтервал після приходу імпульсу Р (попередня затримка). Протягом цього часу (3–6 мкс) через накладення імпульсів та мертвого часу електроніки спотворюється швидкість рахунку джерела збігів. Після попередньої затримки зсувний регістр відкриває R+A ворота, ширина яких зазвичай становить 32-64 мкс. У цей час реєструються справжні та випадкові збіги. Потім після тривалої затримки D відкриваються ворота А. Оскільки величина D зазвичай дорівнює 1000 мкс, що багато більше часу життя нейтронів у детекторі (30-100 мкс), перерахунковий пристрій А реєструє лише випадкові збіги.

Спрощена схема зсувного регістру дана на рис. 12.17.

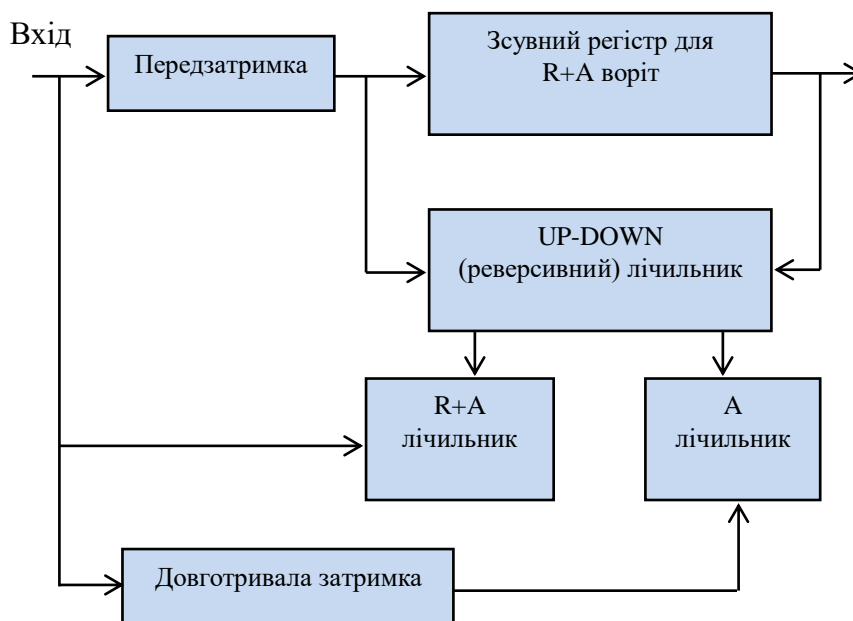


Рисунок 12.17. – Схема зсувного регістру

При вимірах за допомогою представленого вище зсувного регістра можна отримати тільки дві величини: випадкові та подвійні здійснені збіги. Для деяких забруднених чи неоднорідних зразків необхідні виміри третьої величини – швидкості рахунку потрійних збігів (триплетів).

За результатами вимірювань одиночних нейтронів, дуплетів та триплетів можна визначити величину ефективної маси ^{240}Pu , коефіцієнт розмноження нейтронів у зразку та виходи (α, n) -нейтронів без калібрування вимірювальної системи.

12.13. Прилади для нейтронних вимірювань ЯМ

Для різних застосувань були розроблені різні вимірювальні системи, придатні для аналізів різноманітних типів зразків: контейнерів з порошком PuO_2 , таблеток і стрижнів, заповнених змішаним уран-плутонієвим паливом, металевих блочків, цілих паливних збірок, бочок зі скрапом та відходами. На противагу хімічним аналізам, де пробу пристосовують до засобу вимірювання, в неруйнівному аналізі апаратуру пристосовують до зразка.

Нейтронний аналіз використовують для контролю ЯМ з високою густиною, при цьому результат аналізу може суттєво залежати від матеріалу матриці.

Результати рахунку збігів використовують для визначення кількості ЯМ у зразках при пасивних і активних нейтронних вимірах.

Пасивні нейтронні методи широко застосовують для контролю плутонієвих зразків, які випускають власні нейтрони в результаті спонтанного поділу та при (α, n) -реакціях (табл. 11.9), у різних формах: у паливних блочках, стрижнях, порошках, гранулах, у скрапі та відходах, у сумішах $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$. Для інтерпретації результату таких вимірювань треба знати склад ізотопної композиції плутонію (спонтанний поділ, переважно, в парних ізотопах Pu: ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu).

Активний нейтронний метод служить для контролю уранових зразків на вміст ^{235}U , оскільки швидкості спонтанного поділу ізотопів урану малі. За допомогою AmLi-джерела у зразку викликають вимушений поділ, число поділів визначають шляхом рахунку нейтронних збігів. Висока проникаюча здатність нейтронів дає можливість визначити повний вміст ^{235}U у всьому обсязі.

Таблиця 12.9 – Вихід нейтронів, що випускаються ЯМ

Ізотоп	Період спонтанного поділу, р	Вихід нейтронів спонтанного поділу, н/с·р	Період α -розпаду, р	Вихід α -частин, α /с·р	α, n вихід в оксиді, н/с·р
^{238}U	$8,2 \cdot 10^{15}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$4,47 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^4$	$8,3 \cdot 10^{-5}$
^{238}Pu	$4,77 \cdot 10^{10}$	$2,59 \cdot 10^3$	87,74	$6,33 \cdot 10^{11}$	$1,34 \cdot 10^4$
^{239}Pu	$5,48 \cdot 10^{15}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$2,41 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^9$	$3,81 \cdot 10^1$
^{240}Pu	$1,16 \cdot 10^{11}$	$1,02 \cdot 10^3$	$6,56 \cdot 10^3$	$8,4 \cdot 10^9$	$1,41 \cdot 10^2$
^{242}Pu	$6,84 \cdot 10^{10}$	$1,72 \cdot 10^3$	$3,76 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^8$	2,0

Основні принципи пасивного рахунку збігів полягають у наступному:

- зразок ЯМ поміщають у порожнину, оточену нейтронними лічильниками;
- реєструють збіги імпульсів, створюваних нейтронами спонтанного поділу;
- швидкість рахунку збігів прямо пропорційна масі речовини, що ділиться:

$$R = {}^{240}\text{Pu}_{\text{еф}} (473 \text{діл/с} \cdot \text{г}) \varepsilon^2 \exp(-P/\tau) \times [1 - \exp(-G/\tau)] \sum_v P(v) \frac{v(v-1)}{2}, \quad (12.21)$$

де P – час попередньої затримки рахунку імпульсів, G – час рахунку збігів; τ – час життя нейтрону в детекторі, ε – ефективність реєстрації нейтронів, v – кількість нейтронів, що випускаються при розподілі, $P(v)$ – ймовірність того, що при діленні буде випущено v нейтронів.

Схема пасивного лічильника нейтронних збігів вимірювань малих зразків показано на рис. 12.18.

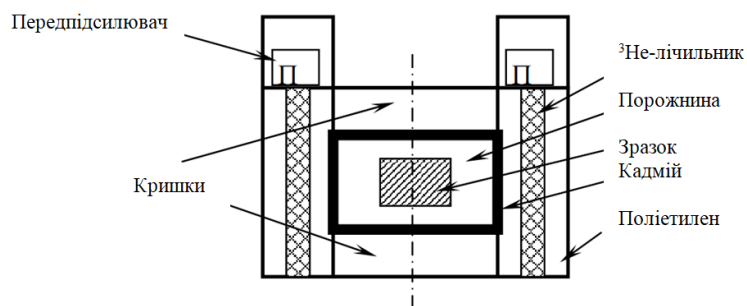


Рисунок 12.18. Схема пасивного лічильника нейтронних збігів для вимірювань малих зразків

Нейтрони, що випускаються зразком, уповільнюються в поліетилені і реєструються ^3He -лічильниками. Порожнина для зразків захищена кадмієм від повільних нейтронів, що повертаються з поліетилену з метою зниження самоекранування зразка.

Лічильник може працювати у двох режимах: на теплових та на швидких нейтронах. При режимі швидких нейтронів стінки порожнини для зразка покривають кадмієм. Вимірювання в режимі на швидких нейтронах краще підходять для зразків з великою масою, на теплових - для зразків з малою масою. Вимірювання в режимі на теплових нейтронах дозволяють зменшити статистичну похибку контролю малих зразків. Для великих зразків велика величина перерізу веде до екранування внутрішнього об'єму та спотворення результату.

Для розшифрування результатів аналізів роблять калібрування лічильника. Калібрувальні криві для швидкого та теплового режимів сильно різняться. Калібрувальна крива для режиму на швидких нейтронах має дві різні ділянки: ділянка, де впливає самоекранування (зразки масою до $500\text{ г }^{235}\text{U}$), і розташована далі ділянка з розмноженням, де маса ^{235}U досить велика, щоб за рахунок вторинних поділів компенсувати самоекранування. Для калібрування

інтервалу 150-900 г ^{235}U потрібно кілька стандартів. Для кожного типу матеріалів потрібна спеціальна крива (рис. 12.19).

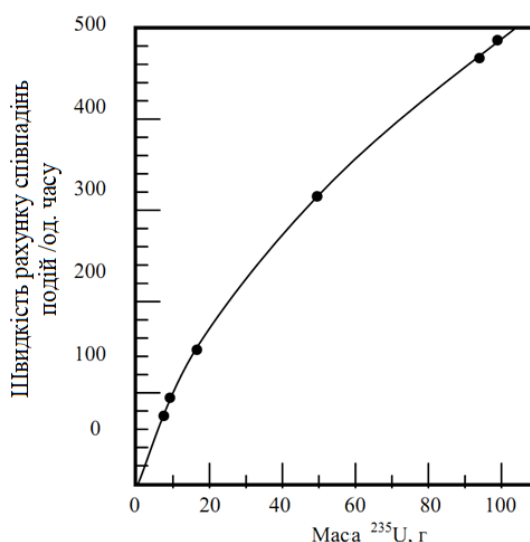


Рисунок 12.19. Швидкість рахунку збігів залежно від маси ^{235}U для зразків U_3O_8 низького збагачення в режимі реєстрації теплових нейтронів

Таблиця 12.10 – Характеристики активного лічильника збігів типу «колодязь» (AWCC)

Характеристики	Тепловий режим	Швидкий режим
Маса зразків, що вимірюються	до 100 г ^{235}U	100-20000 г ^{235}U
Швидкість рахунку збігів від слабозбагаченого зразка U_3O_8	11 відлік/(с·г ^{235}U)	0,18 відлік/(с·г ^{235}U)
Абсолютна похибка вимірів великих зразків за 1000 с	0,3 г ^{235}U	18 г ^{235}U

Прилади контролю, засновані на рахунку нейтронних збігів, відрізняються великою різноманітністю, але вони засновані на стандартній електроніці.

Як при нейтронних, так і при гамма-вимірюваннях існує проблема вимірювань протяжних зразків ЯМ. При пасивних вимірах протяжних зразків виникає завдання забезпечення умови однакової ймовірності реєстрації нейтронів, випущених із усіх елементів поверхні зразка, а при активних – ще й

однакове опромінення всіх цих елементів нейтронами джерела. Тому при конструюванні нейтронних вимірювальних систем докладають усіх зусиль, щоб забезпечити рівномірну чутливість та рівномірне поле нейтронів зовнішнього джерела у порожнині для зразків.

12.14. Метод калориметрії

Калориметрія – пасивний неруйнівний метод контролю ЯМ (плутонія та тритію), заснований на точних вимірюваннях температури. У цілому нині цей метод точніший, але вимагає хорошої температурної стабільності та її контролю, менш швидкий і портативний в порівнянні з іншими методами неруйнівних вимірів ЯМ.

Калориметр – прилад для вимірювання кількості тепла, що виділяється предметом.

Переваги калориметрії у тому, що результати вимірів залежать від геометрії зразків, від матеріалу матриці, від розподілу ЯМ всередині зразка. Для калібрування не потрібні ідентичні зразкам еталони. Результати калориметричних аналізів можна порівняти за точністю до результатів хімічних аналізів*.

* При вимірюваннях гомогенних зразків Pu, що вигорів, точність 0,1%, як при хімічних аналізах і зважуванні. При вимірюваннях відходів, що містять Pu однорідного ізотопного складу, точність 1%.

Опис методу

Вся енергія α -розпадів перетворюється на тепло. Кожен α -розпад супроводжується виходом енергії

$$Q = (M_{240\text{Pu}} - M_{236\text{Pu}} - M_{\alpha})c^2 = 5,25578 \text{ MeV.}$$

При β -розпаді ^{241}Pu виділяється $Q_{\beta} = 20,81$ кеВ, при β -розпаді ^3H $Q_{\beta} = 18,59$ кеВ.

При радіоактивних розпадах ^{240}Pu виділяється потужність, що дорівнює $P = \lambda \cdot N \cdot Q$, де N – число атомів ^{240}Pu , λ – постійна розпаду ^{240}Pu . При α -розпаді ^{240}Pu потужність, що виділяється, дорівнює $0,00707 \pm 0,00002$ Вт/р. Повна потужність, вироблена всіма ізотопами плутонію: $P_{\text{ефф}}$ (Вт/р) = $\sum f_i \cdot P_i$, де f_i – масова частка окремого ізотопу.

Таблиця 12.11. – Вклад окремих ізотопів у $P_{\text{ефф}}$

Ізотоп	Вміст, масова частка	Внесок у тепловиділення, %
^{238}Pu	0,0006	11,0
^{239}Pu	0,8567	53,3
^{240}Pu	0,1211	27,7
^{241}Pu	0,0194	2,1
^{242}Pu	0,0022	0,0
^{241}Am	0,0016	5,9

При збільшенні вигоряння Pu, $P_{\text{ефф}}$ збільшується. Характеристикою глибини вигоряння є вміст ^{240}Pu .

Вимірявши тепловиділення із зразка плутонію, і знаючи його ізотопний склад, можна знайти вміст Pu.

Тепло, що виробляється зразком, реєструють тепловим датчиком з чутливим дротом, розташованим кільцями навколо порожнини зі зразком. Подвійний калориметричний міст із двома ідентичними термостатами показаний на рис. 12.20.

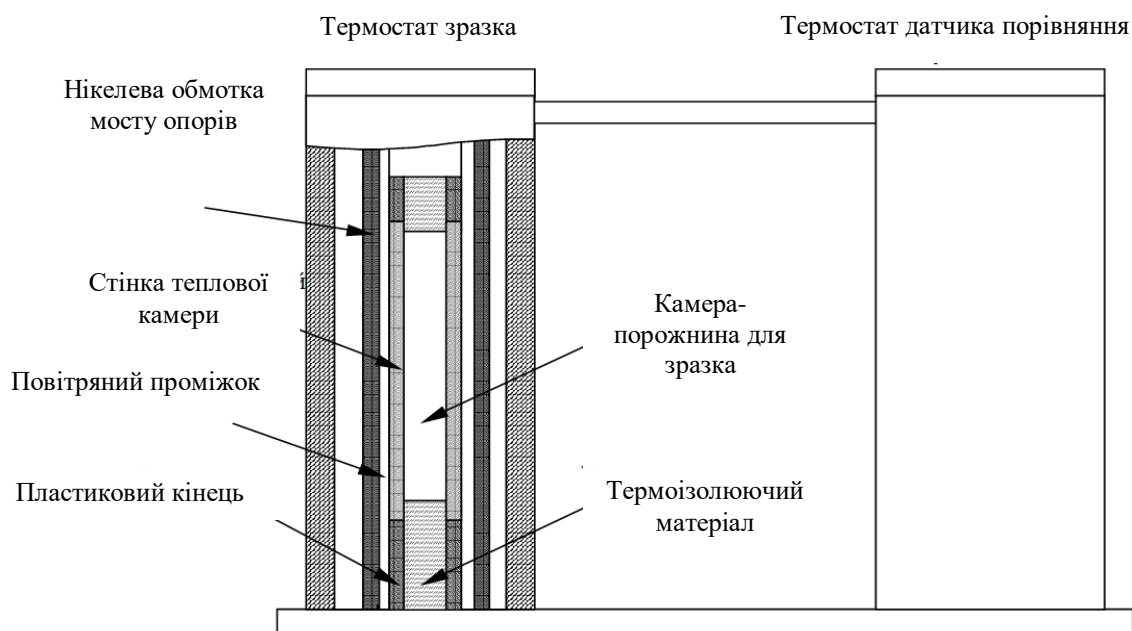


Рисунок 12.20. Схема подвійного калориметричного мосту із двома ідентичними термостатами

Вимірювання проводяться за допомогою потенціометра або цифрового вольтметра, який включений в електричну схему, яка називається мостом Уїтстона (рис. 12.21). Виміряна напруга пропорційна різниці між температурою в порожнині зразка і температурою датчика порівняння, що знаходиться в повітряній або водяній бані з постійною температурою (її підтримують з точністю $\pm 0,001$ °C).

Якщо температура в обох термостатах однакова, тобто зразок відсутній, міст Уїтстона знаходиться в збалансованому стані. При поміщенні зразка в термостат температура змінюється, і міст стає незбалансованим.

Показання вольтметра встановлюються через деякий час після поміщення зразка в термостат. Час встановлення рівноваги залежить від розмірів зразка та становить кілька годин (рис. 12.22). За допомогою попереднього підігріву камери термостата для зразка час досягнення рівноваги може бути зменшено у кілька разів.

Щоб по вимірній різниці потенціалів визначити потужність, виділену зразком в термостаті, зазвичай використовують графік чутливості.

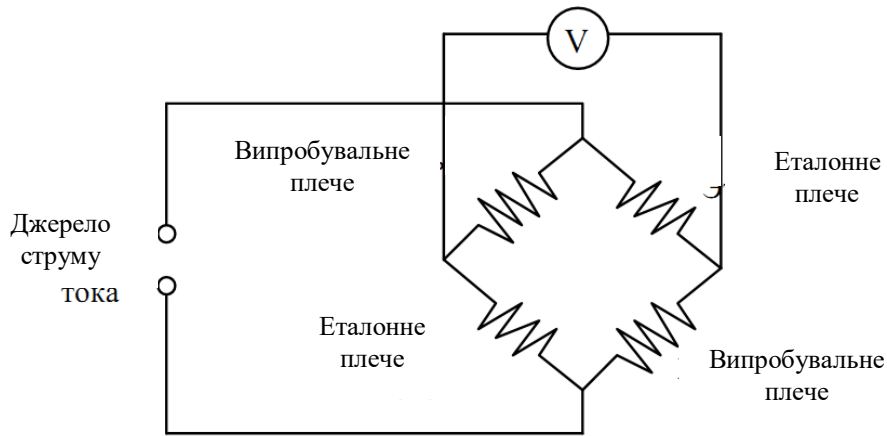


Рисунок 12.21. Міст Уїтстона, що служить для вимірювання потоку теплоти

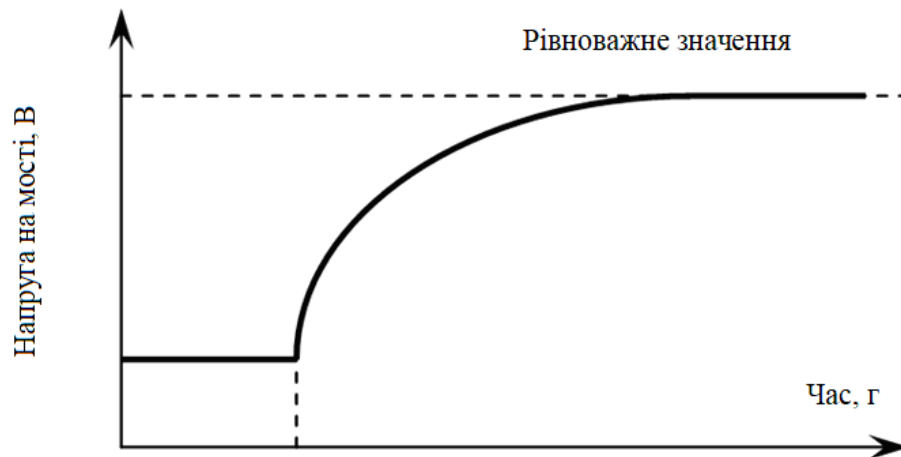


Рисунок 12.22. Показання вольтметра в залежності від часу

Для цього будують криву чутливості термостата до потужності, що виділяється зразком. На рис.12.23 показано одну з можливих форм графіка чутливості калориметра.

У процесі калібрування включають калориметр і вимірюють різницю потенціалів на кінцях моста ($ВР_0$) без зразка або іншого джерела тепла. Потім встановлюють в камері зразка плутонієвий стандарт, вимірюють рівноважне

значення різниці потенціалів BP_i розраховують чутливість калориметра за формулою:

$$S = (BP_S - BP_0) / W_S, \quad (12.22),$$

де W_S – потужність, що виділяється стандартом (відома).

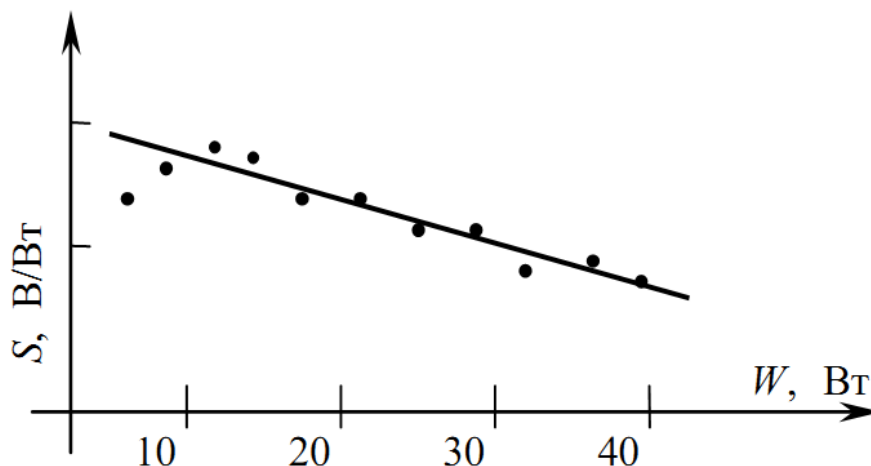


Рисунок 12.23. Графік чутливості калориметра

Зазвичай, існує слабка залежність величини S від потужності джерела тепла. Наприклад, при вимірюваннях зразків із потужністю від 0,1 до 10 Вт спостерігалось зменшення чутливості на 1,6%.

Як показує графік на рис. 12.23, у даному випадку чутливість не є константою і залежить від потужності, що виділяється зразком.

Загалом похибки кращих калориметричних аналізів такі: похибка вимірювання потужності $<0,1\%$, похибка визначення ефективного питомого енерговиділення $<0,2\%$.

Типові параметри калориметра: діаметр – 120 мм, висота – 275 мм, діапазон – 0–6 Вт.

Для калібрування калориметрів застосовують еталоновані зразки або електричні стандарти (зонди):

1) зразки тепловиділення – зразки ^{238}Pu . Особливості:

- малі розміри дозволяють визначити помилки, зумовлені розподілом тепла за об'ємом камери;
- точність атестації 0,02%;
- розпад можна точно враховувати.

2) електричні стандарти тепловиділення. Особливості:

- немає радіоактивного випромінювання;
- не треба враховувати розпад;
- електроніка може бути незалежною від калориметричної системи;
- електроніку потрібно прокалібрувати.

При конструюванні калориметра враховують такі обставини.

- Розмір зразка, який визначає розміри камери для зразка. Щільний тепловий контакт зразка з калориметром дозволяє мінімізувати час аналізу. Діаметр камери у існуючих калориметрів знаходиться в діапазоні від 1 до 30 см.
- Теплова потужність зразка. Для зразків високої потужності потрібні низькочутливі калориметри з низьким тепловим опором, а для зразків малої потужності – високочутливі, з високим тепловим опором.
- Методи градування. Конструкція калориметра залежить від того, які джерела теплоти використовуються для градування: радіоізотопне або електричне.
- Продуктивність. Вибір типу калориметра залежить від часу, необхідного для аналізу.
- Точність. При виборі типу калориметра і його роботи точність аналізу планується з урахуванням витрати часу та інших умов роботи.
- Умови використання. На вибір конструкції калориметра впливає навколишнє середовище та площа робочого приміщення для його розміщення.

Контрольні запитання

1. У яких випадках використовуються методи неруйнівного аналізу ЯМ?
2. Викласти переваги та недоліки неруйнівного аналізу?
3. Які категорії еталонів ви можете назвати?
4. За якими характерними енергіями гамма-квантів проводиться контроль вмісту урану 235 та плутонію 239?
5. На чому заснований метод вимірювання відносної інтенсивності гамма-випромінювання?
6. Які нейтрони (за їх джерелами) беруть участь у нейтронних вимірах ЯМ?

Тема 13. Законодавча база обліку та контролю ядерних матеріалів

Для того, щоб діяльність, пов'язана з врахуванням та контролем ядерних та інших радіоактивних матеріалів, була легальною, вона повинна вестись у так званому «правовому полі», тобто вестись відповідно до законів (нормативно-правових актів), норм і правил у галузі фізичної ядерної безпеки. Все правове поле можна зобразити у вигляді піраміди, де відповідно до пріоритету та юридичної «ваги», зверху знаходяться міжнародні зобов'язання України, на рівні нижче конституція, закони, укази президента та постанови кабінету міністрів України, а фундамент піраміди стоїть на нормах, правилах та стандартах у галузі ядерної енергії та радіаційної безпеки. Розглянемо цю піраміду в частині ОКЯМ зверху донизу.

Основним законом, який охоплює питання, пов'язані з врахуванням та контролем ядерних матеріалів, є Закон про використання ядерної енергії та радіаційної безпеки [12]. У цьому законі йдеться про відповідальність держави в галузі гарантій та встановлення державного режиму нерозповсюдження, а також функціонування системи обліку та контролю, формулюються відповідальності органів державної влади та організацій, що експлуатують.

Розглянемо деякі, найбільш важливі положення закону про використання ядерної енергії.

Стаття 28 Компетенція Кабінету Міністрів України у сфері використання ядерної енергії та радіаційної безпеки:

- розробка заходів щодо обліку та контролю ядерних матеріалів та джерел іонізуючого випромінювання, щодо фізичної захисту ядерних установок, джерел іонізуючого випромінювання, ядерних матеріалів, об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами.

Стаття 21. Державне управління у сфері використання ядерної енергії та радіаційної безпеки (Мінтопенерго):

- створення та функціонування єдиної державної системи з урахуванням радіоактивних відходів , а також їх сховищ.

Стаття 22. Державне регулювання безпеки використання ядерної енергії (ДІЯРУ – Державна інспекція ядерного регулювання України):

- **здійснення державного нагляду за дотриманням законодавства, умов документів дозвільного характеру, норм та правил з ядерної та радіаційної безпеки, вимог фізичної захисту ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання, обліку та контролю ядерних матеріалів та інших джерел іонізуючого випромінювання , включаючи примусові заходи (державний нагляд).**

Стаття 24. Компетенція органів державного регулювання ядерної та радіаційної безпеки (ДІЯРУ):

- **визначає критерії та вимоги безпеки, дотримання яких обов'язкове під час використання ядерної енергії, відповідно до яких розробляються та затверджуються норми, правила, стандарти ядерної та радіаційної безпеки, норми, правила фізичного захисту ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання, нормативно-правових актів з обліку та контролю ядерних матеріалів, застосування гарантій нерозповсюдження ядерної зброї, вимог щодо управління якістю діяльності з використання ядерної енергії в частині ядерної та радіаційної безпеки;**
- здійснює державний нагляд за дотриманням законодавства, умов, передбачених документами дозвільного характеру, норм, правил та стандартів ядерної та радіаційної безпеки, вимог фізичної захисту ядерних установок,

ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання, обліку та контролю ядерних матеріалів та інших джерел іонізуючого випромінювання, в тому числі за аварійною готовністю суб'єктів діяльності у сфері використання ядерної енергії; у разі виявлення порушень застосовує в межах своїх повноважень примусові заходи до юридичних та фізичних осіб згідно із законодавством.

Стаття 67. Державна система гарантій

Державна система гарантій включає комплекс технічних та організаційних заходів і застосовується щодо всього ядерного матеріалу, який використовують у мирних цілях в межах території України, під її юрисдикцією або знаходиться під її контролем.

Метою державної системи гарантій є забезпечення того, що ядерні матеріали, обладнання та технології, які використовують у мирних цілях, не будуть використані у воєнних цілях.

Державна система гарантій базується на цьому Законі, положеннях міжнародних та двосторонніх договорів, учасником яких є Україна, та включає:

- державну систему обліку та контролю ядерних матеріалів;
- державну систему експортно-імпортного контролю ядерних матеріалів, обладнання та технологій.

Стаття 68. Державна система обліку та контролю ядерних матеріалів

Організацію та ведення державного обліку та контролю ядерних матеріалів в Україні здійснює орган державного регулювання ядерної та радіаційної безпеки.

Відповідальність за здійснення обліку та контролю ядерних матеріалів на ядерних установках несе експлуатуюча організація

У Законі України «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання» [13] встановлюється взаємодія між ОКЯМ та фіззахистом.

Так, державна політика з фізичної захисту провадиться на засадах:

- створення та використання єдиної системи надійного захищеного зв'язку між органами державної влади та юридичними особами, до компетенції яких належать облік, контроль, фізичний захист ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання та протидії нападу на ядерні установки, об'єкти, призначені для поводження з радіоактивними відходами, транспортні засоби з ядерними матеріалами та іншими джерелами іонізуючого випромінювання.

Щодо системи обліку та контролю конкретизовано у Постанові Кабінету міністрів України N 1525 [14].

Метою функціонування державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів є створення умов для виконання міжнародних угод та забезпечення мирного використання ядерних та неядерних матеріалів, обладнання та технологій, що підпадають під вимоги міжнародних угод та використовуються на території України під її юрисдикцією або перебувають під її контролем.

Основою функціонування державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів є дозвільний принцип у сфері використання ядерної енергії.

Суб'єктами державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів є:

- 1) компетентний орган державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів;
- 2) міністерства, інші центральні органи виконавчої влади, Національна академія наук, повноваження яких відповідно до законодавства пов'язані з забезпеченням реалізації державної політики щодо обліку та контролю ядерних матеріалів;

- 3) юридичні та фізичні особи, що провадять згідно з ліцензією діяльність, пов'язану з використанням, виробництвом, зберіганням, придбанням та збутом ядерних матеріалів (ліцензіати);
- 4) інші юридичні та фізичні особи, що виробляють, експортують, імпортують товари, які підпадають під вимоги міжнародних угод, або провадити діяльність на об'єкті, щодо надання доступу до якого МАГАТЕ надіслало до Держатомрегулювання запит згідно з вимогами міжнародних угод.

Завданнями державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів є:

- 1) ведення обліку ядерних матеріалів та їх постійний контроль у зоні балансу ядерних матеріалів;
- 2) впровадження ефективного механізму взаємодії з системою фізичної захисту під час контролю ядерних матеріалів;
- 3) підтримання у належному стані та удосконалення інфраструктури забезпечення неперервності обліку та контролю ядерних матеріалів у зоні їх балансу;
- 4) забезпечення професійної підготовки, підтримання та планового підвищення кваліфікації фахівців з обліку та контролю ядерних матеріалів;
- 5) застосування єдиної процедури обліку ядерних матеріалів, єдиної системи обліково-звітної документації;
- 6) збір, узагальнення та подання до МАГАТЕ інформації згідно з вимогами міжнародних угод;
- 7) забезпечення взаємодії суб'єктів державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів у разі виявлення випадків їх незаконного обігу або несанкціонованого використання.

Компетенція суб'єктів державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів:

Компетентним органом державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів є Держатомрегулювання.

Держатомрегулювання веде державний облік та контроль ядерних матеріалів, видає ліцензії на провадження діяльності у сфері використання ядерної енергії відповідно до законодавства та здійснює нагляд за дотриманням його вимог щодо обліку та контролю ядерних матеріалів, міжнародних зобов'язань України з нерозповсюдження ядерної зброї шляхом:

- здійснення контролю за достовірністю та своєчасним поданням до зазначеного Комітету інформації відповідно до пункту 10 цього Положення;
- проведення інспекційної перевірки ліцензіатів та застосування передбачених законодавством заходів щодо примусу до них у разі порушення законодавства.

З метою ведення державного обліку ядерних матеріалів та створення умов для виконання міжнародних угод Держатомрегулювання виконує функції із:

- здійснення збору, узагальнення, аналізу та подання до МАГАТЕ інформації, що надходить від суб'єктів державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів відповідно до вимог міжнародних угод;
- визначення та узгодження з МАГАТЕ зони балансу ядерних матеріалів, взяття їх на державний облік або зняття з обліку, ведення державного інформаційного банку даних про ядерні матеріали;
- забезпечення взаємодії з МАГАТЕ з питань виконання міжнародних угод, включаючи вирішення спірних питань;
- інформування суб'єктів державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів про надходження від МАГАТЕ повідомлення з питань організації інспекційної перевірки об'єкта або додаткового доступу відповідно до вимог міжнародних угод.

Для виконання завдань, покладених на державну систему обліку та контролю ядерних матеріалів, Держатомрегулювання визначає:

- 1) переліки ядерних та неядерних матеріалів, обладнання та технологій, інформація про які подається до зазначеного Комітету;
- 2) вимоги до системи вимірювання ядерних матеріалів, збору, обробки та зберігання інформації щодо ядерних матеріалів, строків її подання до зазначеного Комітету;
- 3) єдину систему класифікації та кодифікації облікових даних, обліково-звітної документації;
- 4) процедуру взяття та зняття з державного обліку ядерних матеріалів;
- 5) порядок та періодичність проведення фізичної інвентаризації;
- 6) порядок дій при аномаліях - незвичних обставинах, що можуть бути результатом несанкціонованого використання ядерних матеріалів, зареєстрованого в державній системі обліку та контролю ядерних матеріалів;
- 7) вимоги до документа, яким ліцензіат (заявник) підтверджує свою спроможність дотримуватися вимог законодавства щодо обліку та контролю ядерних матеріалів.

Міністерства, інші центральні органи виконавчої влади, Національна академія наук забезпечують дотримання міжнародних угод суб'єктами державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів, що належать до сфери їх управління чи перебувають у віданні, і з цією метою видають нормативні акти, у яких враховуються вимоги цього Положення щодо:

- 1) підготовки та своєчасного подання до Держатомрегулювання інформації відповідно до міжнародних угод з урахуванням законодавства у сфері захисту інформації;

2) доступу інспекторів МАГАТЕ з обладнанням та пристроями, що використовуються під час інспекційної перевірки, до об'єкта та у строки, визначені у міжнародних угодах;

3) порядок ведення обліку та контролю ядерних матеріалів.

Інші юридичні та фізичні особи, що виробляють, експортують, імпортують товари, які підпадають під вимоги міжнародних угод, подають Держатомрегулювання на його запит інформацію, що має відношення до ядерного паливного циклу на поточну годину або в минулому, а також надають додатковий доступ відповідно до вимог міжнародних угод.

Ведення обліку та контролю ядерних матеріалів

Облік та контроль ядерних матеріалів ведеться ліцензіатом у зоні їх балансу, з цією метою ліцензіат:

1) створює та забезпечує функціонування системи обліку та контролю ядерних матеріалів відповідно до вимог цього Положення, призначає особу або в разі потреби визначає службу, що веде облік та контроль ядерних матеріалів, з наданням відповідних повноважень;

2) забезпечує дотримання вимог законодавства щодо обліку та контролю ядерних матеріалів протягом усього періоду їх перебування у зоні балансу ядерних матеріалів, підготовку та підвищення кваліфікації фахівців;

3) забезпечує доступ інспекторів МАГАТЕ до об'єкта інспекційної перевірки або додаткового доступу відповідно до вимог міжнародних угод.

Облік та контроль ядерних матеріалів є елементом системи управління якістю, що впроваджена ліцензіатом, і ведеться відповідно до відповідної процедури шляхом неперервного документального обліку всіх господарських та технологічних операцій з ядерними матеріалами на підставі даних технічних паспортів, вимірювання ядерних матеріалів або розрахунків.

Державний облік та контроль ядерних матеріалів починається з моменту, коли:

- ядерні матеріали надійшли з іншої держави;
- вироблені ядерні матеріали за їх складом та чистотою придатні для виготовлення палива або ізотопного збагачення.

Зняття з державного обліку ядерних матеріалів здійснюється після їх відправлення до іншої держави або в разі, коли такі матеріали витрачено чи розбавлено таким чином, що робить їх практично непридатними для регенерації та будь-якої ядерної діяльності.

Наступний важливий документ, що містить вимоги до системи обліку та контролю ЯМ, називається «Правила ведення обліку та контролю ядерних матеріалів» [9]. Нижче наведено деякі з них.

Облік здійснюється за вагою ЯМ: для урану, плутонію – у грамах, для торію – у кілограмах.

Державному обліку підлягають ЯМ в будь-якому фізичному стані або хімічних сполуках, крім:

- ЯМ, що містяться в руді під час її видобутку або обробки;
- плутонію з концентрацією ізотопу плутонію-238, яка перевищує 80%;
- джерела іонізуючого випромінювання, що містять плутоній-239 і звільнені від регулюючого контролю за активністю;
- виробів, на які в початкових документах відсутні дані про кількість ЯМ, а вагові значення, отримані за довідковими даними чи за результатами розрахунків, є значно меншими за 1 г і округлюються до нуля за правилами математичного округлення;
- виробів, вага ЯМ у яких за даними початкових документів менша за 1 грам і округлюється до нуля за правилами математичного округлення.

Взяття на облік ЯМ здійснюється за даними початкових документів за його фактичним місцезнаходженням та за фактом його надходження на територію ліцензіату незалежно від бухгалтерського обліку; у разі, якщо початкові документи відсутні - відразу після визначення складу та кількості ЯМ за результатами його аналізу та складання відповідних документів.

Вимоги до процедур обліку ЯМ встановлюються залежно від їх категорій.

Облік ЯМ ведеться шляхом неперервного документування всіх операцій з ЯМ з використанням єдиної системи класифікації та кодифікації облікових даних відповідно до Додаткових положень до Угоди між Україною та МАГАТІ щодо застосування гарантій у зв'язку з Договором про нерозповсюдження ядерного зброю.

Облік ЯМ здійснюється за масою їх ізотопів у кожній партії, що знаходиться у даній ЗБМ.

Усі записи в облікових документах щодо конкретної партії ЯМ містять її ідентифікатор, нанесений безпосередньо на поверхню предмета (або ємності, в якій міститься ЯМ), або на прикріплений ярлик. Ідентифікатор визначається візуально або за допомогою технічних засобів.

При взятті на державний облік дані про кількість ЯМ базуються на: даних технічних паспортів партій; результати вимірювань ЯМ у даній ЗБМ або результати попередніх вимірювань кількості ЯМ в іншій ЗБМ, якщо збереженість ЯМ підтверджується засобами збереження та спостереження; застосування розрахункових методів у разі неможливості проведення вимірювань; довідкових даних для ЯМ IV категорії, за узгодженням з Держатомрегулюванням України.

Облік ведеться відповідно до розробленої ліцензіатом інструкції з обліку та контролю ЯМ, яка визначає:

- персонал, який здійснює ведення системи обліку та контролю ЯМ;

- порядок надання інформації до Держатомрегулювання України;
- опис та порядок заповнення облікових та звітних документів;
- процедуру отримання та відправлення ЯМ;
- процедуру визначення фактично наявної кількості ЯМ під час проведення фізичної інвентаризації;
- систему ведення та обробки інформації з обліку ЯМ;
- порядок розслідування аномалій.

Передача ЯМ від одного ліцензіата до іншого в межах України дозволяється за умови наявності у одержувача відповідної ліцензії та системи обліку та контролю ЯМ, що відповідає вимогам Правил.

Заходи щодо створення та ведення системи обліку та контролю ядерних матеріалів

Заявник, який має намір проваджувати діяльність, пов'язану з використанням, виробництвом, зберіганням, купівлею та збутом ЯМ, згідно із законодавством отримує відповідну ліцензію, що видається Держатомрегулюванням України за умови підтвердження заявником спроможності дотримуватися вимог законодавства щодо обліку та контролю ЯМ.

Ліцензіат для створення системи обліку та контролю ЯМ:

- наказом назначає особу, відповідальну за ведення системи обліку та контролю ЯМ та надання інформації до Держатомрегулювання України відповідно до вимог Правил, за необхідності визначає структурний підрозділ, який буде здійснювати облік та контроль ЯМ (персонал);

- визначає вимоги до кваліфікації персоналу, який здійснює ведення обліку та контролю ЯМ, забезпечує навчання персоналу, перевірку знань та умінь персоналу, допуск до виконання своїх обов'язків відповідно до вимог законодавства;
- забезпечує персонал приміщеннями, обладнанням, засобами зв'язку, іншими матеріально-технічними засобами в обсязі, необхідному для ефективного виконання персоналом своїх обов'язків;
- розробляє та веде експлуатаційну та облікову документацію ;
- створює та веде систему вимірювань ЯМ відповідно до вимог Положення про систему вимірювань ядерних матеріалів, затвердженого наказом Держатомрегулювання України від 13.02.2006 N 24. У разі наявності ЯМ тільки IV категорії з Держатомрегулюванням України.

Ліцензіат забезпечує ведення системи обліку та контролю ЯМ шляхом:

- підтримання та підвищення кваліфікації персоналу;
- забезпечення умов для виконання своїх обов'язків особою, відповідальною за облік та контроль ЯМ;
- дотримання вимог законодавства при здійсненні процедур обліку та контролю ЯМ;
- забезпечення працездатності системи вимірювань ЯМ та виконання програм вимірювань ЯМ;
- здійснення оцінки вразливості системи обліку та контролю ЯМ;
- забезпечення функціонування системи ведення та обробки інформації з обліку ЯМ відповідно до Правил;
- організації взаємодії системи обліку та контролю ЯМ із системою фізичної захисту;
- забезпечення працездатності засобів збереження та спостереження, іншого обладнання системи обліку та контролю ЯМ;

- аналізу причин порушень вимог Правил при здійсненні персоналом діяльності з обліку та контролю ЯМ та вжиття заходів за результатами аналізу.

Процедури контролю ядерних матеріалів

Ліцензіат здійснює постійний контроль за наявністю та переміщенням ЯМ з метою своєчасного виявлення та запобігання їх втраті або несанкціонованому використанню за допомогою таких процедур:

- застосування засобів збереження та спостереження;
- за принципом, що ґрунтується на спостереженні однієї особи за діями іншої під час доступу до ЯМ (правила двох осіб);
- контролю доступу до місцезнаходження ЯМ та даних про ЯМ;
- проведення фізичної інвентаризації;
- контролю вимірювань ЯМ, втрат, розбіжностей у даних відправника та одержувача ЯМ, виявлення аномалій.

Для ЯМ I , II категорій застосування засобів індикації втручання є обов'язковим. Засоби індикації втручання для ЯМ III , IV категорій застосовуються у разі, якщо це є доцільним для своєчасного виявлення та запобігання їх втраті або несанкціонованому використанню.

Фізична інвентаризація є найважливішою процедурою контролю ЯМ. Залежно від категорії ЯМ фізична інвентаризація у ЗБМ включає:

- перевірку наявності всіх партій ЯМ та їх ідентифікаторів;
- перевірку стану засобів індикації втручання (для ЯМ, що містяться у закритих об'ємах);
- проведення вимірювань кількості та визначення складу ЯМ відповідно до програми вимірювань;

- визначення фактично наявної кількості ЯМ;
- зведення балансу ЯМ та закриття звітного періоду.

Ліцензіат проводить фізичну інвентаризацію за планом з періодичністю відповідно до Правил або за написом Держатомрегулювання України у разі виникнення аномалії згідно з процедурою, що затверджується ліцензіатом. На період проведення фізичної інвентаризації переміщення ЯМ не допускається.

Фізична інвентаризація ЯМ I , II категорій проводиться раз на півроку, ЯМ III категорії - раз на рік, в разі тривалості паливної кампанії реакторної установки більше року її періодичність визначається зупинками для перевантаження реактора. Термін проведення щорічної фізичної інвентаризації у ЗБМ, в яких знаходиться ЯМ тільки IV категорії, встановлюється Держатомрегулюванням України у відповідній ліцензії.

Ведення системи обліку ядерних матеріалів

Ліцензіат забезпечує функціонування системи обліку ЯМ. При веденні системи обліку ЯМ для ЗБМ використовуються експлуатаційні та облікові документи, що містять інформацію про кількість, категорію, форму та склад ЯМ, їх місцезнаходження та дані про зміну їх інвентарної кількості.

До експлуатаційних документів залежно від діяльності ліцензіата належать такі документи:

- експлуатаційні дані, які дозволяють визначити зміни кількості та складу ядерних матеріалів;
- перелік ЯМ та їх місцезнаходження;
- дані вимірювань ЯМ, включаючи процедури забезпечення якості проведення вимірювань ЯМ, оцінену випадкову та систематичну помилку;
- опис процедури ведення обліку та контролю ЯМ.

У облікових документах зазначаються:

- усі зміни інвентарної кількості ЯМ, які дозволять визначити наявну інвентарну кількість ЯМ у будь-яку годину;
- результати проведення фізичної інвентаризації ЯМ.

Облікові документи, що стосуються змін інвентарної кількості та фізичної інвентаризації, містять ідентифікатори, вихідні та поточні дані для кожної партії ЯМ. Записи щодо урану, плутонію та торію ведуться окремо. Для кожної зміни інвентарної кількості зазначаються її дата, у разі отримання або відправлення ЯМ - ЗБМ відправника або одержувача (країна - у разі міжнародних передач).

Ліцензіат подає до Держатомрегулювання України на паперовому та електронному носіях інформацію, яка подається до Держатомрегулювання України для обробки та подальшого подання до МАГАТЕ відповідно до вимог міжнародних угод, включаючи звітні документи про кількість ЯМ:

1. Звіт про зміни інвентарної кількості ЯМ, що складається згідно з додатками 3, 4 до Правил у разі:

- отримання або відправлення ЯМ між окремими ЗБМ у межах країни;
- імпорту чи експорту ЯМ;
- збільшення/зменшення кількості ЯМ у партії;
- незворотної втрати ЯМ;
- випадкового виявлення ЯМ;
- виявлення розбіжності між даними відправника та одержувача ЯМ;
- коригування даних у попередніх звітах;
- інших випадків, що стосуються змін інвентарної кількості ЯМ.

У звітах про зміни інвентарної кількості відображаються зміни інвентарної кількості ЯМ окремо для урану, плутонію, торію. У разі

відправлення ЯМ іншому ліцензіату один екземпляр звіту про інвентарні зміни надсилається одержувачу разом із супровідними документами, для ЯМ I категорії у балк-формі та II категорії - додатково надається інформація щодо точності та невизначеності вимірювань, що здійснювалися відправником;

2. Список фактично наявної кількості ЯМ, що складається згідно з додатками 5, 6 до Правил за результатами фізичної інвентаризації та містить інформацію про кожну партію ЯМ;

3. Матеріально-балансовий звіт за результатами фізичної інвентаризації містить підсумкові дані про зміни інвентарної кількості ЯМ за звітний період, який починається наступного дня після проведення попередньої інвентаризації ЯМ і закінчується датою поточної інвентаризації. Матеріально-балансовий звіт для кожної ЗБМ складається окремо для урану, плутонію, торію та містить:

- сумарну кількість ЯМ на дату закінчення попередньої інвентаризації;
- сумарну кількість збільшень (окремо за кожним типом інвентарних змін);
- сумарну кількість зменшень (окремо за кожним типом інвентарних змін);
- сумарну зареєстровану кількість ЯМ;
- фактично наявну кількість ЯМ на дату закінчення поточної інвентаризації;
- різницю між фактично наявною та зареєстрованою кількістю ЯМ;
- величину помилки, з якою визначено фактично наявну кількість ЯМ.

Система ведення та обробки інформації з обліку ядерних матеріалів

Система ведення та обробки інформації з обліку ЯМ повинна відповідати таким загальним вимогам:

- внесення нової інформації не призводить до втрати попередніх записів;
- зберігається інформація про дату внесення зміни та прізвище особи, яка вносила зміну;

- інформація про кожну партію ЯМ зберігається не менше 5 років після припинення її обліку і має бути доступна в будь-яку годину.

Ліцензіат впроваджує комп'ютерну інформаційну систему ведення та обробки інформації з обліку ЯМ, яка виконує такі функції:

- ведення бази даних з ЯМ;
- формування звітів про зміни інвентарної кількості та про фактично наявну кількість ЯМ в електронному форматі відповідно до вимог Держатомрегулювання України;
- зведення матеріального балансу ЯМ і формування матеріально-балансового звіту;
- надання інформації, необхідної під час проведення фізичної інвентаризації та інспекційних перевірок.

За узгодженням з Держатомрегулюванням України в разі наявності у ліцензіата ЯМ тільки IV категорії в невеликій кількості та з незначним потоком ЯМ протягом року можливе ведення обліку ЯМ на папері без використання комп'ютера.

Програмне забезпечення інформаційної системи забезпечує:

- формування звітів про ЯМ, сумісних із державним інформаційним банком даних;
- перевірку цілісності та контроль інформації, що вводиться;
- коригування даних з реєстрацією дати та прізвища особи, яка виконує коригування;
- захист доступу до інформації.

Ліцензіат забезпечує захист даних в інформаційній системі від несанкціонованого втручання під час обробки, зберігання та передавання інформації, а також захист інформації від втрати внаслідок несправності технічних засобів відповідно до законодавства.

База даних з обліку ЯМ містить дані щодо проведення фізичної інвентаризації, отримання та відправлення ЯМ, включаючи відомості про відправника або одержувача, та пов'язані з передаванням документи (супровідні документи, попередні повідомлення, транспортні документи, номери контейнерів тощо), а також інформацію про кожну партію, а саме:

- первинні дані;
- дані про кількість та ізотопний склад урану, плутонію та торію;
- опис ЯМ, включаючи хімічну формулу та фізичну форму.

Оцінка стану системи обліку та контролю ядерних матеріалів

Ліцензіат у межах системи управління якістю проводить оцінку стану системи обліку та контролю ЯМ.

Періодичність проведення оцінки стану системи обліку та контролю ЯМ встановлюється ліцензіатом, але не може бути більшою за один рік для систем обліку та контролю ЯМ I категорії, двох років - для систем обліку та контролю ЯМ II та III категорій, трьох років - для систем обліку та контролю ЯМ IV категорії. Інформація про результати оцінки включається в щорічний звіт, який подається до Держатомрегулювання України відповідно до ліцензійних вимог.

Оцінка стану систем обліку та контролю ЯМ включає перевірку відповідності таким вимогам законодавства:

- навчання, підтримання та підвищення кваліфікації персоналу;
- забезпечення умов виконання персоналом своїх обов'язків;

- інструкції з обліку та контролю ЯМ;
- ведення облікової та звітної документації;
- функціонування системи вимірювань ЯМ;
- функціонування системи ведення та обробки інформації з обліку ЯМ;
- поводження з інформацією з обліку та контролю ЯМ;
- використання засобів індикації втручання та забезпечення їх працездатності;
- процедур обліку та контролю ЯМ, розслідування порушень вимог обліку та контролю ЯМ, дій за підозри, що відбулася втрата ЯМ або несанкціонований доступ до них, дій при виявленні втрати або несанкціонованого доступу до ЯМ;
- взаємодії системи обліку та контролю ЯМ із системою фізичної захисту;
- здійснення оцінки вразливості системи обліку та контролю ЯМ I, II, III категорій та вжиття заходів за результатами оцінки;
- організації роботи з інспекторами МАГАТЕ;
- вживання коригувальних заходів за результатами інспекційної перевірки.

Порядок дій ліцензіата при виявленні аномалій у ЗБМ

Критеріями виявлення аномалії при проведенні фізичної інвентаризації або під час виконання будь-яких заходів з обліку та контролю ЯМ є:

- нестача або надлишок партії;
- неперекривання довірчих інтервалів при довірчій імовірності* 0,95 результатів вимірювань ЯМ при реєстрації кількості ЯМ та вимірювань кількості ЯМ при проведенні фізичної інвентаризації або будь-яких інших вимірювань;
- неперекривання довірчих інтервалів при довірчій імовірності 0,95 результатів вимірювань кількості ЯМ відправником та одержувачем;

- пошкодження цілісності партії;
- пошкодження, відмови, втрата засобів індикації втручання або ознаки втручання у їх функціонування сторонніми особами;

* Довірча імовірність - імовірність того, що значення параметра ЯМ, отримане в результаті вимірювань, відповідає його істинному значенню в межах довірчого інтервалу. Довірчий інтервал при довірчій імовірності 0,95 складає ± 2 (сигма), де (сигма) - середнє квадратичне відхилення.

- відхилення у облікових та звітних документах;
- перевищення строку отримання ЯМ, передбаченого графіком перевезення, більше двох діб за невизначених причин.

У разі виявлення ознак аномалії ліцензіат негайно назначає спеціальне розслідування.

Спеціальне розслідування проводитиметься комісією, яка створюється наказом ліцензіату. До складу комісії входять фахівці з обліку та контролю ЯМ, фізичної захисту та представники підрозділів ліцензіату, посадові обов'язки яких пов'язані з поводженням з ЯМ. Завданням комісії є встановлення причин появи ознак аномалії.

У разі якщо комісія встановлює, що причина появи аномалії не пов'язана з нестачею або надлишком ЯМ, ліцензіат розробляє та забезпечує виконання плану усунення корінних причин аномалії.

У разі якщо комісія встановлює факт нестачі або надлишку ЯМ, ліцензіат негайно повідомляє про це Держатомрегулювання України та відповідні правоохоронні органи.

Про результати розслідування ліцензіат складає спеціальний звіт та надсилає його до Держатомрегулювання України.

Перелік нормативних документів для самостійного вивчення, що
рекомендується:

1. [Положення про державну систему обліку та контролю ядерних матеріалів](#), затверджене постановою Кабінету Міністрів України від 18.12.96 № 1525 (із змінами, внесеними згідно з постановами Кабінету Міністрів України № 1006 від 09.08.2001, № 257 від 25.03.2009).
2. [Порядок застосування гарантій нерозповсюдження ядерного зброї](#) (НП 306.7.154-2009), ухвалених наказом Держатомрегулювання від 02.07.2009 № 102, зареєстрований у Міністерстві юстиції України 23.07.2009 за № 683/16699. (Зі змінами, внесеними згідно з наказом Держатомрегулювання України N 183 від 12.12.2011, зареєстрованим у Міністерстві юстиції України 28 грудня 2011 р. за N 1551/20289).
3. [Правила ведення обліку та контролю ядерних матеріалів](#) (НП 306.7.122-2006), затверджені наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 26 червня 2006 року № 97, зареєстровано у Міністерстві юстиції України 17 липня 2006 р. за № 849/12723 (у редакції наказу Держатомрегулювання від 08.02.2010 № 14), зареєстровані в Міністерстві юстиції України 03.03.2010 за №202/17497.
4. [Вимоги до змісту та структури плану забезпечення фізичної захисту ядерної установки та ядерних матеріалів та плану забезпечення обліку та контролю ядерних матеріалів](#), затверджені наказом Держатомрегулювання від 04.12.2008 № 196, 23.12.2008 за №1223/15914.
5. [Положення про систему вимірювань ядерних матеріалів](#) (НП 306.7.120-2006), ухвалене наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 13 лютого 2006 року № 24, зареєстроване в Міністерстві юстиції України 1 березня 2006 р. за № 213/12087.

6. [Вимоги до оцінки стану системи обліку та контролю ядерних матеріалів»](#) (НП 306.7.184-2012), затверджені наказом Держатомрегулювання України від 09.04.2012 № 84, зареєстровані в Мін'юсті 27.04.2012 № 647/20960.
7. Інструкція про порядок ведення державного обліку та контролю ядерних матеріалів, затверджена наказом Держатомрегулювання від 23.03.2010 № 37 (у редакції наказу Держатомрегулювання України від 12.12.2011 № 182).
8. [Положення про взаємодію державних інспекторів на АЕС з інспекторами МАГАТІ](#) , затверджене наказом Держатомрегулювання від 08.07.2004р. №123 (зі змінами).
9. [Інструкція щодо поводження з обладнанням МАГАТІ](#) (НП 306.7.134-2007), затверджено наказом Держатомрегулювання від 16.06.2007 № 88.
10. Інструкція про порядок надання інформації до МАГАТІ, затверджена наказом Держатомрегулювання від 19.09.2008 №162.
11. Методичні рекомендації щодо здійснення державного нагляду за функціонуванням системи обліку та контролю ядерних матеріалів, затверджених наказом Держатомрегулювання України від 02.08.2011 № 114.
12. [Інструкція з ведення єдиної системи документації з обліку та контролю ядерних матеріалів](#) , затверджена наказом Держатомрегулювання України від 08.12.2010 № 176.
13. [Рекомендації щодо обліку малих кількостей ядерних матеріалів](#) (РД 306.7.111 -2005), затверджені наказом Держатомрегулювання від 26.09.2005 нар. № 110.
14. [Методичні вказівки щодо проведення фізичної інвентаризації та зведення балансу ядерних матеріалів](#) (РД 306.7.112 -2005), затверджені наказом Держатомрегулювання від 06.10.2005 нар. № 113.
15. [Облік та контроль ядерного матеріалу. Фізичний захист ядерного матеріалу та ядерних установок](#) . Толковий словник український термінів. Словники термінів: українсько-англо-російський, англо-російсько-український та

російсько-англо-український, затверджений наказом Держатомрегулювання від 08.06.04 р. №101.

Контрольні запитання

1. Надати коротку характеристику «Договір про нерозповсюдження ядерної зброї від 1 липня 1968 року».
2. Надати коротку характеристику «Додатковий протокол до Угоди між Україною та МАГАТІ щодо застосування гарантій у зв'язку з Договором про нерозповсюдження ядерного зброю (Додатковий протокол ратифіковано Законом №3092-IV від 16.11.2005)».
3. Надати коротку характеристику Угоди про гарантію.
4. Надати коротку характеристику Закону про використання ядерної енергії (Розділ XI, XII).
5. Надати коротку характеристику Постанови 1525 КМУ "Системи ОКЯМ".
6. Надати коротку характеристику Постанови 625 від 26.04.2003.doc.
7. Надати коротку характеристику наказу ДІЯРУ № 177 від 05.12.2011.
8. Надати коротку характеристику наказу ДІЯРУ № 84 від 2012 року.
9. Надати коротку характеристику Постанови 813 КМУ про незаконний обіг.

Тема 14. Виявлення злочинних чи несанкціонованих дій з використанням ядерних та інших радіоактивних матеріалів поза межами регулятивного контролю

Обов'язком усіх держав є забезпечення повної готовності до боротьби з незаконним обігом ядерних та радіоактивних матеріалів, а також дотримання режиму гарантій щодо цих матеріалів. У цьому відношенні ядерна криміналістика є ключовим елементом ефективного державного плану взаємодії в кризовій ситуації [15].

Досвід останніх років свідчить про існування неослабної загрози незаконного обігу ядерних матеріалів та технологій. При цьому не всім державам необхідно мати у своєму розпорядженні докладні та складні методики ядерної криміналістики, однак:

1. Держави повинні мати можливість категоризувати підозрілий ядерний матеріал.
2. Вони повинні мати правові інструменти, що забезпечують проведення кримінального розслідування.
3. У визначенні джерела та історії матеріалів, які перебувають у незаконному обігу, держави можуть розраховувати на досвід у сфері криміналістики, напрацьований міжнародним співтовариством.

Можливість придбання ядерних матеріалів, які застосовуються для виробництва ядерної зброї, є постійною загрозою. Саме відсутність у достатній кількості ЯМ поки що не допускає створення «нелегальних» ядерних зарядів, при тому, що принцип дії, технологія створення та фізичний розрахунок для створення таких зарядів можна знайти в Інтернеті.

Таким чином, для створення кустарного ядерного пристрою потрібна достатня кількість ядерного матеріалу:

- ймовірність збагачення урану чи отримання плутонію недержавними суб'єктами дорівнює нулю (режим гарантій);
- ядерний матеріал, що розщеплюється, може бути викрадений на АЕС або іншому об'єкті ядерного паливного циклу;
- або придбано у державного суб'єкта;
- або здобутий нелегально/ придбаний на чорному ринку.

Незаконний обіг ядерних та радіоактивних матеріалів є транскордонною проблемою та потребує неупинних зусиль міжнародної спільноти.

Цілком ймовірним ланцюжком подій може бути наступна (подібні випадки були у світовій практиці):

- ядерний матеріал може бути на законних підставах здобутий та подрібнений на одному об'єкті;
- концентрований, збагачений та перероблений у паливо на іншому об'єкті;
- викрадено на третьому об'єкті;
- і пізніше виявлено при спробі перетнути міжнародний кордон.

Отже, що таке ядерна криміналістика?

Кінцева мета ядерної криміналістики полягає у отриманні відповіді на питання: «Хто це зробив?».

Ядерна криміналістика – основа реагування викрадення чи втрату контролю над ЯМ.

Але щоб відповісти на це питання потрібно відповісти на інші можливі питання (6 Whats):

- Що за матеріал?

- Місце походження матеріалу?
- Хто винен?
- Чи весь цей матеріал?
- Де сталося викрадення матеріалу?
- Яким маршрутом транспортували матеріал?

Ядерна криміналістика допомагає встановити походження та історію ядерних та радіологічних матеріалів, що опинилися поза контролем з боку регулюючого органу. Для цього:

- Ядерна криміналістика вивчає ізотопні, хімічні та фізичні ознаки;
- Атрибуція вимагає комплексної та системної інтерпретації всіх значних технічних даних.

Ядерна криміналістика – ключ до здатності держав розслідувати походження ядерних та інших радіоактивних матеріалів поза контролем з боку регулюючого органу.

Нова наука – ядерна криміналістика – дозволяє здійснити атрибуцію матеріалу та забезпечує інформоване реагування.

Таким чином, ядерна криміналістика спрямована на:

- аналіз незаконних ядерних або радіоактивних матеріалів та будь-яких пов'язаних з ними речовин;
- визначення ізотопних, хімічних, морфологічних та фізичних ознак;
- пошук криміналістичних ознак на зразку або в навколишньому середовищі (контейнері або упаковці) з метою пов'язати людей з місцями, матеріалами та подіями.

Що мається на увазі під ядерною атрибуцією:

- встановлення відповідальних за плановане чи фактичне використання ядерних чи радіологічних матеріалів (пристроїв) під час здійснення незаконних дій;
- атрибуція спирається на :
 - ядерний та класичний криміналістичний аналіз;
 - знання процесів виробництва ядерних матеріалів;
 - інформацію, отриману від правоохоронних органів та служб розвідки.

Ядерна криміналістика та атрибуція – основа інформованого реагування!

Необхідно рішуче переслідувати кожен випадок незаконного обігу ядерних та інших радіоактивних матеріалів (принцип невідворотності покарання).

Ядерна криміналістика є також складовою програми боротьби з ядерним тероризмом та поширенням ядерної зброї. У цій якості технічна ядерна криміналістика може допомогти запобігти терористичному акту, визначивши концепцію реагування до здійснення нападу з катастрофічними наслідками:

- Переваги інформованого реагування;
- Орієнтація на аналіз матеріалів забезпечує «раннє попередження» та дозволяє розглядати кілька варіантів реагування.

У цьому питанні не повинно бути атмосфери благодушності та розслабленості (культура ФЯБ):

- будь-які радіологічні загрози заслуговують на увагу;
- необхідно оцінювати схожі характеристики та шукати зв'язок між інцидентами;
- широкий спектр ядерних матеріалів – завжди привід для занепокоєння.

Категорії ядерних та інших радіоактивних матеріалів за класифікацією МАГАТЕ [3] представлено у табл. 14.1.

Таблиця 14.1 – Класифікація МАГАТЕ ядерних та інших радіоактивних матеріалів

Категорія (МАГАТЕ)	Вид матеріалу	Радіоактивні компоненти
Неопромінений ядерний матеріал прямого застосування	<ul style="list-style-type: none"> Високозбагачений уран Плутоній та змішані оксиди U-233 	<ul style="list-style-type: none"> >20% U-235 <80% Pu-238 Виділений ізотоп
Опромінений ядерний матеріал прямого застосування	Опромінена сировина для ядерного палива	Елементи опроміненого палива або розчини регенерації відпрацьованого палива
Альтернативний ядерний матеріал	<ul style="list-style-type: none"> Америцій (Am-241) Нептуній (Np-237) 	Виділений елемент або елемент у складі опроміненого ядерного матеріалу
Ядерні матеріали непрямого застосування	<ul style="list-style-type: none"> Збіднений уран Природний уран Низькозбагачений уран (НЗУ) 	<ul style="list-style-type: none"> <0,7% U-235 0,7% U-235 >0,7% U-235, <20% U-235
Радіоактивні джерела	<ul style="list-style-type: none"> Радіоізотопні термоелектричні генератори Опромінювачі (стерилізатори) Радіографічні джерела Промислові вимірювальні пристрої Засоби медичної діагностики 	<ul style="list-style-type: none"> Pu-238, Cm-244, Sr-90 Co-60 и Cs-137 Co-60 Co-60, Cs-137, Am-241 Mo-99, I-131 (з малим періодом напіврозпаду)

Достовірні технічні висновки ядерної криміналістики є результатом непростого високотехнологічного процесу відбору, аналізу та оцінки.

Визначення характерних параметрів, що зберігаються протягом ядерного паливного циклу – важлива передумова встановлення походження ядерного матеріалу.

Ядерні криміналістичні ознаки як утворюються, так і зникають протягом ядерного паливного циклу, який включає:

- Хімічні операції;
- Технічні операції;
- Фізичні операції:
 - Нейтронні реакції;
 - Радіоактивний розпад;
- Успадкований матеріал;
- Успадкований процес:
 - Випадково;
 - Навмисне.

При цьому поодинокі відповіді не є вичерпною: достовірність висновків ядерної криміналістики забезпечується за допомогою аналізу численних ознак!

Кінцева мета досліджень у рамках ядерної криміналістики: *підтверджені* ознаки, що повторюються протягом усього життєвого циклу ядерного чи радіоактивного матеріалу.

Реальний приклад із практики та аналіз ситуації: 1999 р., перехоплення регенерованого на кордоні. Де було втрачено законний контроль?

- Пильний офіцер прикордонної митної служби затримав підозрюваного, який відповідав ознакам контрабандиста;
- У процесі допиту та обшуку було виявлено несанкціонований ядерний матеріал;
- Було проведено ядерну та класичну криміналістичну експертизу;
- Були виявлені 4 грами 73% ^{235}U у складі U_3O_8 та UO_2 ;
- Мікроскопічні елементи та морфологія матеріалу вказували на хімічну регенерацію партії матеріалу;
- Фази окислу урану, як правило, присутні на регенераційних установках та заводах з виробництва палива;
- Визначення віку урану та плутонію вказували на те, що процес регенерації був завершений 30 жовтня 1993 р.;

- Декілька зразків з партії, як правило, передаються в архів.

На додаток до класичних доказів ядерна криміналістика використовує масив ізотопних, хімічних та фізичних доказів. Перехоплена накладна дозволяє будувати висновки про походження:

Визначення віку на основі дослідження пар материнських та дочірніх ізотопів дозволяє судити про походження:

- Наприклад, три виявлені продукти поділу – ^{125}Sb , ^{134}Cs та ^{137}Cs – однозначно свідчать про регенерацію.
- Регенерацію було завершено 30 жовтня 1993 р. (± 25 днів).
- Дещо більший вік, показаний хронометром Am і Ac, характерний для пурекс-процесу.
- Подібний вік по годинниках Pu/Am свідчить про те, що Pu не є наслідком пізнішого зараження.
- Вихідний рівень збагачення: 90%.

Порівняльний аналіз різних ознак засобами ядерної криміналістики потребує відповідної бібліотеки, на кшталт бази даних з відбитками пальців злочинців.

Аналіз ядерних криміналістичних ознак нічого не вартий, якщо докази зібрані неправильно.

Приклад:

- На перший погляд – три ідентичні зразки
- Узгоджуються щодо ізотопного складу U
- Узгоджуються щодо мікроструктури
- Не узгоджуються щодо складу домішок

Таким чином, держава має розробити національну стратегію в частині виявлення злочинної діяльності чи несанкціонованої діяльності, яка має наслідки для фізичної ядерної безпеки, пов'язані з ядерними та іншими радіоактивними матеріалами, що знаходяться поза регулюючим контролем. Національну стратегію виявлення необхідно координувати в межах дії компетентних органів та забезпечувати її виконання цими органами відповідно до виду відповідальності, в ідеальному випадку із забезпеченням контролю координаційного органу.

Виявлення ядерних та інших радіоактивних матеріалів, що знаходяться поза регулюючим контролем, може забезпечуватися за допомогою отримання тривожного сигналу приладу чи інформаційного попередження. Державі слід розробляти та застосовувати системи фізичної ядерної безпеки, засновані на використанні таких сигналів.

Також, державі слід передбачати максимально можливе обмеження на законне переміщення товарів та людей, ефективно здійснюючи при цьому заходи щодо забезпечення фізичної ядерної безпеки. Пункти виїзду та в'їзду на кордонах мають особливо важливе значення для здійснення таких заходів.

З метою запобігання незаконній передачі ядерного чи іншого радіоактивного матеріалу та виявлення фальсифікації відповідних документів державі слід забезпечувати, щоб компетентні органи мали повноваження вживати заходів щодо визначення справжності документації та маркування упаковок у разі санкціонованих перевезень та щодо перевірки відповідними засобами заявленого вмісту упаковок або вантажів при санкціонованому перевезенні ядерних чи інших радіоактивних матеріалів, якщо цього вимагають обставини.

Для забезпечення ефективного виявлення держава повинна забезпечити як приборне, так і інформаційне виявлення ядерного чи іншого радіоактивного матеріалу поза регулюючим контролем [16].

Приборне виявлення

Використовуючи національну оцінку загроз, компетентним органам слідє встановлювати системи фізичної ядерної безпеки для виявлення приладами ядерних та інших радіоактивних матеріалів, що знаходяться поза регулюючим контролем. Системи виявлення слід створювати на основі багаторівневого принципу глибокоешелонованого захисту з урахуванням того, що місце походження такого матеріалу може бути як у даному державі, так і за її межами, і вони повинні забезпечувати необхідний потенціал та можливості в області виявлення.

Виходячи з пріоритетів у використанні наявних ресурсів, слід розробляти належний план розгортання парку приладів, враховуючи при цьому:

- маршрути перевезення (транспортування) територією держави в місцях, де ймовірність виявлення максимальна, або поблизу місць виробництва, використання, зберігання, збору чи поховання (утилізації) ядерних чи інших радіоактивних матеріалів;
- наявність стратегічного об'єкта;
- специфікації та технічні характеристики приладів в режимі виявлення, які повинні відповідати національним та міжнародним стандартам та технічним рекомендаціям;
- можливості, межі та обмеження приладів, що використовуються для виявлення як в офіційно означених, так і неозначених пунктах виїзду та в'їзду;
- застосування мобільних і пересувних систем виявлення для забезпечення гнучкості та адаптації до можливих змін;
- вимоги до виявлення, що застосовуються на підтримку дій правоохоронних органів у зв'язку з інформаційними попередженнями;

- забезпечення виявлення випромінювання під час заходу національного значення, такого як великий громадський захід, або на стратегічному об'єкті, який вважається вразливим для злочинних дій або несанкціонованих дій з наслідками для фізичної ядерної безпеки, в яких використовуються ядерні чи інші радіоактивні матеріали.

Слід забезпечувати, щоб план розгортання парку приладів передбачав наступне:

- початковий монтаж, калібрування та приймальні випробування обладнання, розроблення процедур технічного обслуговування, а також належну підготовку та атестацію користувачів та допоміжного технічний персонал;
- системи та процедури для проведення радіаційного обстеження або пошуку радіації стосовно ядерних та інших радіоактивних матеріалам, що знаходяться поза регулюючим контролем;
- визначення порогових рівнів тривожного сигналу приладів;
- створення систем та процедур для початкової оцінки тривожного сигналу та здійснення інших вторинних інспекційних дій, таких як локалізація, ідентифікація, встановлення категорії та визначення характеристик ядерних та інших радіоактивних матеріалів, включаючи отримання технічної підтримки від експертів з метою допомоги в оцінці тривожного сигналу, рішення яким не може бути прийнято на місці;
- створення та забезпечення стійкості допоміжної інфраструктури для здійснення ефективного виявлення, включаючи навчання персоналу, технічне обслуговування обладнання, безпечне та надійне розміщення виявлених матеріалів та документально оформлені процедури реагування.

З метою попередження злочинних дій або несанкціонованих дій з наслідками для фізичної ядерної безпеки на стратегічному об'єкті, особливо у період проведення великого громадського заходу, компетентним органам необхідно передбачати проведення радіаційних обстежень території на предмет виявлення ядерних та інших радіоактивних матеріалів, організацію охорони території до проведення такого заходу та застосування заходів щодо виявлення та заходів реагування у пунктах входу (в'їзду) та на інших стратегічних об'єктах під час таких заходів.

Слід розвивати культуру фізичної ядерної безпеки та забезпечувати, щоб всі особи, відповідальні за експлуатацію використовуваних для виявлення приладів, атестовані як благонадійні, які мають належну підготовку та мають відповідною кваліфікацією та компетентністю, які необхідні для використання обладнання, розуміли значимість проведених ними вимірювань, а також знали, як необхідно діяти в певних обставинах.

Інформаційне виявлення

Інформаційне виявлення складається з наступних елементів:

- оперативно-розшукова інформація;
- медичне спостереження;
- повідомлення про недотримання регулюючих вимог;
- повідомлення про втрату регулюючого контролю.

Оперативно-розшукова інформація. У рамках заходів щодо виявлення державі слід безперервно забезпечувати збирання, зберігання та аналіз оперативної інформації з метою виявлення будь-якої загрози, підозрілої діяльності чи відхилень від норми, пов'язані з ядерними чи іншими радіоактивними матеріалами, які можуть вказувати на намір вчинити злочинну

дію або несанкціоновану дію з наслідками для фізичної ядерної безпеки, які пов'язані з ядерними або іншими радіоактивними матеріалами. Державі слід також співпрацювати з іншими державами з метою передачі та отримання інформації, необхідної для кращого розуміння загрози.

Державі слід розвивати політику заохочення отримання компетентними органами повідомлень від громадян про будь-яку підозрілу або незвичайну активність, яка може бути пов'язана з ядерними чи іншими радіоактивними матеріалами, що знаходяться поза регулюючим контролем.

Також, слід передбачати розробку політики поширення інформації в засобах масової інформації для інформування населення про загублених, про зниклих чи викрадених ядерних або інших радіоактивних матеріалах та для попередження про ризики, пов'язані з цими матеріалами, а також для отримання від населення зворотної інформації про такі матеріали, виявляючи при цьому обережність у уникненні провокування зайвого занепокоєння серед населення.

Медичне спостереження

У рамках заходів щодо виявлення державі слід забезпечувати здійснення процедур та протоколів, що зобов'язують медичних працівників, медичні установи та органи охорони здоров'я негайно повідомляти відповідні компетентні органи о будь-яких випадках підозрілих променевих уражень чи захворювань.

Державі слід забезпечувати включення збору та аналізу інформації, отриманої в рамках медичного спостереження, в міру виявлення, і будь-яке повідомлення слід належним чином піддавати перевірці із залученням для цього відповідних компетентних органів для визначення причини та наслідків ураження чи захворювання.

Також, слід передбачати включення виявлення ознак променевих уражень чи захворювань у програми навчання відповідних медичних працівників у ВНЗ.

Повідомлення про недотримання регулюючих вимог

Слід забезпечувати, щоб компетентний орган, на який покладено відповідальність за регулювання, зобов'язував уповноважених осіб негайно повідомляти (надавати відомості) про будь-яке недотримання регулюючих вимог, яке, на їхню думку, може мати наслідки для фізичної ядерної безпеки. Таке повідомлення дозволяє компетентному органу оцінити подію та попередити про небезпеку інші компетентні органи з метою запобігання подальшим злочинним або несанкціонованим діям з наслідками для фізичної ядерної безпеки.

Компетентному органу, на який покладено відповідальність за регулювання, слід розробляти процедури та протоколи, що полегшують процес сповіщення уповноваженими особами про випадки недотримання регулюючих вимог, що мають наслідки для фізичної ядерної безпеки.

Повідомлення про втрату регулюючого контролю

Державі слід забезпечувати, щоб компетентні органи були в законному порядку уповноважені зобов'язувати уповноважених осіб негайно сповіщати (надавати відомості) про загублених, про зниклих або викрадених ядерних або інших радіоактивних матеріалах щодо яких вони мають офіційний дозвіл. Таке повідомлення слідує розглядати як виявлення в результаті інформаційного попередження про потенційну злочинну дію або несанкціонованій дії з наслідками для фізичної ядерної безпеки.

Державі слід забезпечувати, щоб будь-який компетентний орган, який видає офіційні дозволи щодо ядерних чи інших радіоактивних матеріалів і отримує повідомлення про те, що про такий матеріал повідомлено як про загублене, зникле або викрадене, негайно інформував про це інші відповідні компетентні органи.

Компетентним органам, відповідальним за здійснення заходів щодо забезпечення фізичної ядерної безпеки, пов'язаних з митним та прикордонним контролем, слід повідомляти про виявлення будь-яких ядерних або інших радіоактивних матеріалів, що знаходяться поза регулюючим контролем, інші відповідні компетентні органи, включаючи регулюючий орган.

Першопочаткова оцінка тривожних сигналів приладів і/або інформаційних попереджень

Слід забезпечувати, щоб отримання тривожного сигналу приладу чи інформаційного попередження, призвело до проведення початкової оцінки. Відповідним компетентним органам слід забезпечувати створення процедур та протоколів проведення первісної оцінки як тривожного сигналу приладу, так і інформаційного попередження призначеним для цього персоналом та у відповідних випадках іншими призначеними організаціями.

Після виявлення в результаті отримання тривожного сигналу приладу або інформаційного попередження відповідним компетентним органам слід здійснювати процедури та протоколи з метою недопущення та припинення потенційної злочинної дії або несанкціонованої дії із наслідками для фізичної ядерної безпеки.

Якщо після отримання переконливих результатів початкової оцінки підтверджується, що подія, пов'язана з фізичною ядерною безпекою, сталася, відповідним компетентним органам слід приступати до провадження

діяльності з реагування. Якщо початкова оцінка дає непереконливі результати, слід проводити додаткову оцінку.

Забезпечення сталості заходів з виявлення

Компетентним органам слід передбачати політику, методи та процедури управління, що стосуються забезпечення стійкості заходів виявлення. Необхідно застосовувати системи та методи раціонального управління та керувати поетапно здійснюваною програмою, що враховує зміни загроз та обмеження у ресурсах. У ці міркування необхідно включати формування бюджету та штатного розкладу, які потрібні для здійснення та забезпечення сталості заходів з виявлення.

Контрольні запитання

1. Що мають бути здатні зробити держави для боротьби з незаконним обігом ядерних та радіоактивних матеріалів та дотримання режиму гарантій щодо цих матеріалів?
2. Що таке ядерна криміналістика?
3. За якими категоріями класифікуються і розглядаються дії згідно Типового плану заходів, розробленого МТРГ? (IAEA NSS_2) За рахунок чого досягаються цілі режиму ФЯБ, що діє щодо ядерних та інших радіоактивних матеріалів, що знаходяться поза регулюючим контролем?
4. Які заходи пропонуються МАГАТЕ для реагування щодо ядерних та інших радіоактивних матеріалів, що знаходяться поза регулюючим контролем?

Тема 15. Реагування на злочинні чи несанкціоновані дії з використанням ядерних та інших радіоактивних матеріалів поза межами регулятивного контролю

Використовуючи законодавчі акти, державі необхідно розробити національну систему реагування для забезпечення реагування на злочинні дії або несанкціоновані дії з наслідками для фізичної ядерної безпеки, пов'язані з ядерними або іншими радіоактивними матеріалами, що знаходяться поза регулюючим контролем.

Під системою реагування слід розуміти комплекс заходів реагування. Реагування включає два етапи: перший - це етап оцінки, яка є продовженням початкової оцінки тривожного сигналу приладу або інформаційного попередження, якщо ця початкова оцінка дала непереконливі результати. Результатом процесу оцінки буде висновок, який підтверджує, що подія, пов'язана з фізичною ядерною безпекою, сталося, якщо тривожний сигнал чи попередження не визнається хибним чи не мають значення. Другий етап реагування – це управління подією, пов'язаною з фізичною ядерною безпекою, за допомогою здійснення національного плану реагування.

Слід застосовувати диференційований підхід для реагування на різні можливі події, пов'язані з фізичною ядерною безпекою, і наслідки різного ступеня. Для визначення належного реагування та подальших дій необхідно прагнути до розвитку власного національного потенціалу в оперативній оцінці подій, пов'язаних з фізичною ядерною безпекою, з урахуванням аспектів охорони здоров'я та забезпечення безпеки та непрямих факторів, а також пов'язаних з цими подіями ядерних або інших радіоактивних матеріалів.

У разі подій, пов'язаних із фізичною ядерною безпекою, відповідальним компетентним органам слід доповнювати та підтримувати пов'язану із забезпеченням безпеки діяльність з аварійного реагування на міжнародному,

національному та місцевому рівні, з тим щоб пом'якшити та звести до мінімуму радіологічні наслідки для здоров'я людини та навколишнього середовища. При цьому, координація діяльності компетентних органів має особливо важливе значення для ефективного реагування місці подій.

Найголовніший пріоритет – це захистити населення, персоналу служб аварійного реагування та стабілізація ситуації на місці інциденту, що включає наступні кроки:

1. Тактичний
 - Усунути ворожу загрозу
2. Оперативний
 - Встановити контроль за місцем інциденту
 - Захистити населення
 - Сортувати постраждалих
 - Розгорнути аварійні служби
 - Створити кордон безпеки навколо місця інциденту та організувати буферні зони радіологічної безпеки
3. Проведення заходів на місці інциденту
 - Збір ядерних судових доказів

Ряд заходів на місці радіологічного злочину схожі з заходами на місці звичайного злочину, зокрема:

- Захист здоров'я та безпеки населення;
- Контроль доступу до місця злочину та переміщення у його межах;
- Виконання оцінки небезпеки та розробка плану безпеки для цього місця злочину;
- Розробка плану відбору проб;
- Документування стану місця злочину;

- Відбір контрольних проб середовища;
- Створення та підтримка системи забезпечення безпеки кожної із зібраних доказів.

При цьому, звичайно, є істотна різниця в методах ведення слідства на місці класичного і радіологічного злочинів:

Класичний злочин

- Час – персонал, як правило, має необмежений час для виконання заходів на місці злочину – Поспішати нема куди!
- Дистанція – персонал, як правило, може збирати докази і здійснювати заходи на місці злочину з будь-якої короткої відстані
- Екранування – персонал, зазвичай, вимагає мінімуму екранування від предметів, що він збирає чи досліджує

Радіологічний злочин

- Час – персонал повинен стежити за часом перебування в межах місця злочину для обмеження одержаної дози радіації – Час обмежений!
- Дистанція – персонал, як правило, повинен знаходитися якнайдалі від заражених або потенційно заражених предметів
- Екранування – персонал повинен застосовувати фізичні засоби екранування для захисту себе та інших від радіації

Завдання Державного плану взаємодії визначають необхідні вимоги до правоохоронних та інших органів під час проведення таких заходів:

- Координація заходів щодо реагування на інцидент;
- Визначення ролей та обов'язків;
- Запобігання втраті цінних класичних судових доказів;
- Мінімізація ступеня радіоактивного опромінення (як населення, і персоналу служб оперативного реагування);
- Безпека перевезення та зберігання матеріалу;

- Ретельне проведення розслідування засобами ядерної криміналістики;
- Підтримка звинувачення;
- Звітність та поширення достовірної інформації.

Прийнято виділяти такі елементи ядерної криміналістики у складі Державного плану взаємодії:

- Місцеві кваліфіковані кадри здатні перевірити сигнал тривоги;
- Оповіщення на національному рівні;
- Служба швидкої медичної допомоги у кризовій ситуації;
- Розслідування злочину та криміналістичні заходи на місці злочину;
- Служба зв'язку;
- Санітарно-епідеміологічна служба (боротьба із зараженням довкілля);
- Служба інформування громадськості;
- Транспортування, зберігання;
- Засоби ядерної криміналістики.

Як правило, деякі класичні судові (рис. 15.1) [15] докази можуть бути присутніми на місці радіологічного злочину, тому розслідування має включати як ядерну, так і класичну криміналістику.

Наприклад, на місці злочину на заражених територіях можуть бути виявлені:

- Пилок (геопозиціонування);
- Грунт/пил/сміття;
- Сліди від інструментів;
- Клей;
- Папір, чорнило, барвники;
- Сплави металів;

- Конструкція, технологія виробництва.

А також залишені невстановленими особами:

- Біологічні рідини (ДНК);
- Волосся, тканини;
- Відбитки пальців;
- Відбитки взуття, шин.



Рисунок 15.1. Класичні судові докази на заражених предметах

Окремий бокс для зняття відбитків пальців (ціаноакриловий метод) показано на рисунку 15.2.



Рисунок 15.2. Бокс для зняття відбитків пальців (ціаноакриловий метод)

«Сучасний план заходів» з ядерної криміналістики, нещодавно опублікований Міжнародним агентством з атомної енергії, – додаткова допомога міжнародному співтовариству з дій у надзвичайних ситуаціях [17].

У цьому документі викладено принципові вимоги ядерної криміналістики:

1. Правоохоронні органи блокують місце перехоплення матеріалу.
2. Сили оперативного реагування підтверджують характер матеріалу та присутність потенційної ядерної чи радіологічної небезпеки.
3. Повідомляється орган, відповідальний за введення в дію відповідного плану заходів.
4. На місці злочину: забезпечується збереження доказів.

У ядерній криміналістичній лабораторії проводиться докладний ядерний та класичний криміналістичний аналіз за поетапним принципом:

1. Результати аналізу звіряються з відповідними базами даних з метою атрибуції.
2. Для відповідального органу розробляється «експертний висновок», в якому враховуються висновки експерта з ядерної криміналістики.
3. Усі докази перевіряються національним юридичним органом.

Якщо доказів достатньо, щоб звинуватити, національний юридичний орган може порушувати справу.

Також, у типовому плані заходів запропоновано алгоритм проведення ядерної судової експертизи, як показано на рис. 15.3.



Рисунок 15.3. Алгоритм проведення ядерної судової експертизи

Таким чином, Державний план взаємодії забезпечує загальне керівництво над проведенням розслідування та іншою діяльністю, яка має виконуватись та пов'язана з розслідуванням радіологічного злочину. План охоплює всю діяльність влади щодо обстеження місця злочину та проведення лабораторних аналізів, включаючи інтерпретацію отриманих результатів. Ілюстративно елементи Державного план взаємодії показані на рис. 15.4 та рис. 15.5.

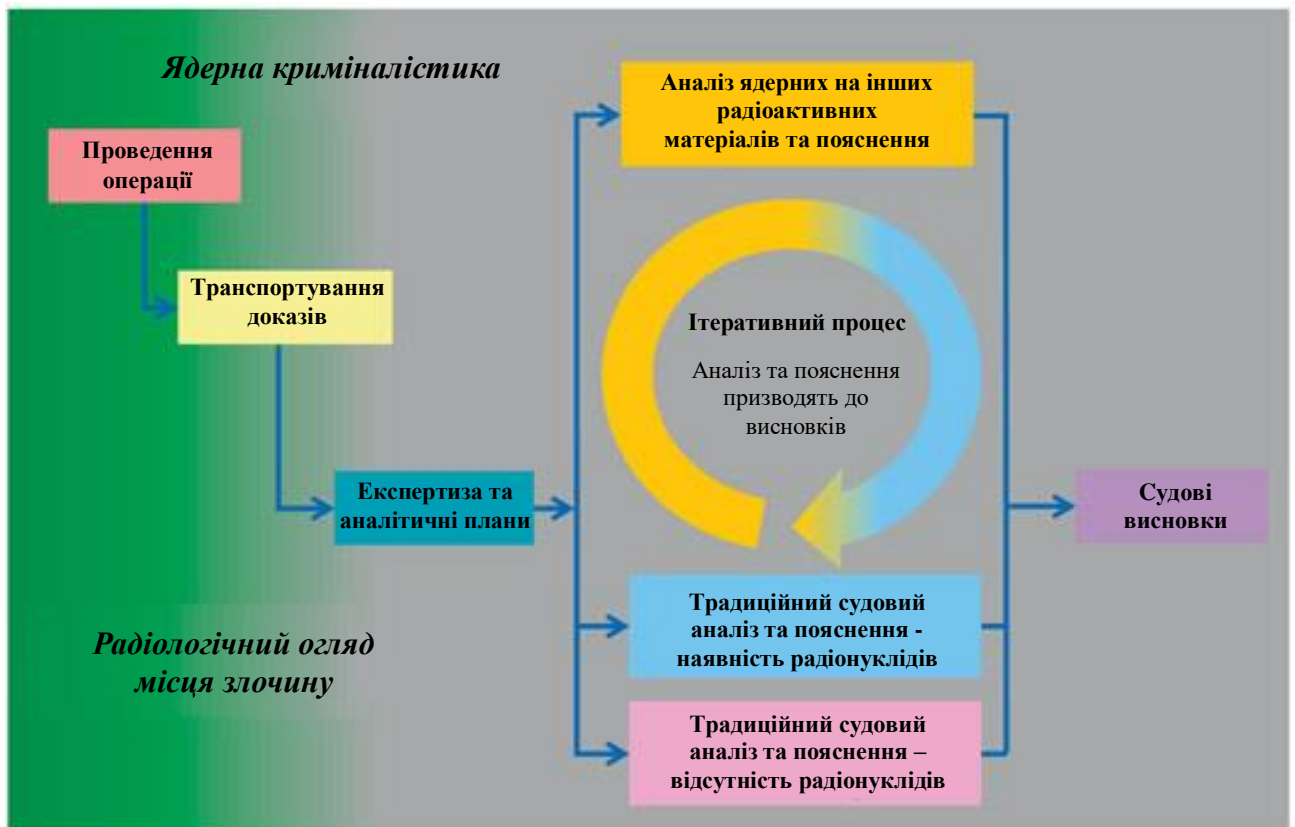


Рисунок 15.4. Процес надання підтримки у розслідуванні події, пов'язаної з радіоактивними матеріалами

Зміна кольору фону на рис. 15.4 показує перехід від фази керування місцем скоєння радіологічного злочину до ядерної криміналістики.

Таким чином, можливо зробити висновок, що ядерна криміналістика – один із важливих елементів державної допомоги у сфері ядерної фізичної безпеки.

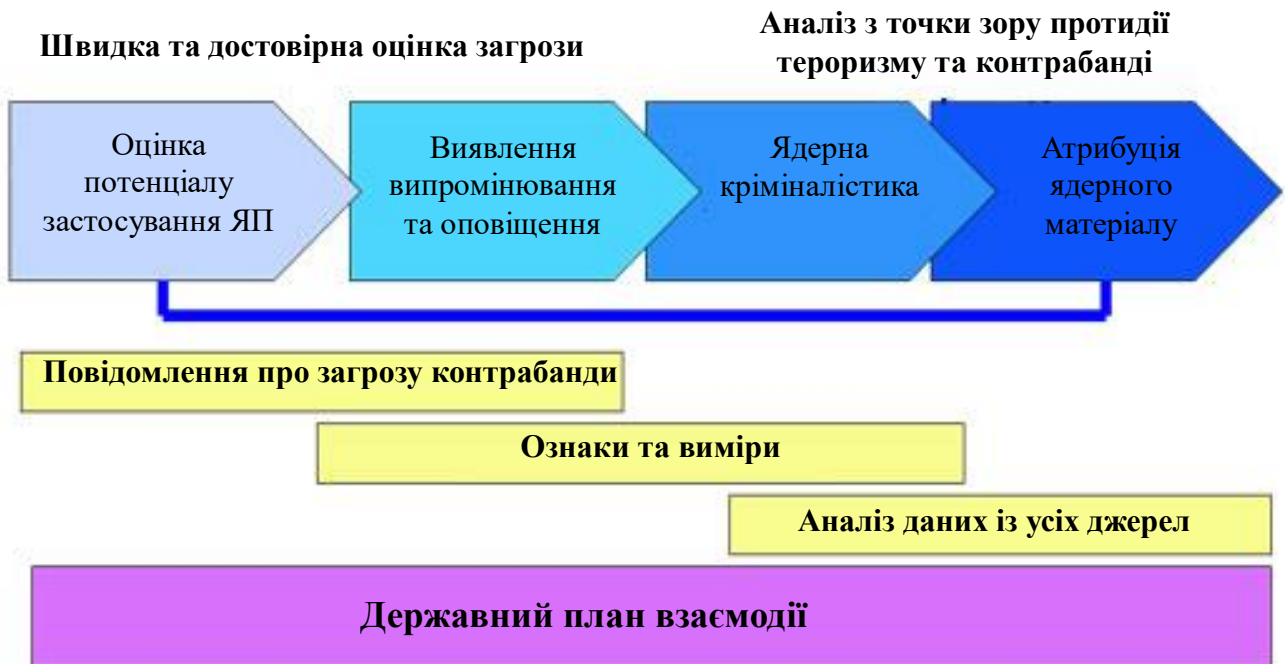


Рисунок 15.5. Етапи застосування Державного плану взаємодії

Ядерний криміналістичний аналіз дозволяє отримати інформацію про виробництво та походження перехопленого ядерного матеріалу за умови:

- Належного виконання необхідних дій (зокрема щодо збору доказів) на місці радіологічного злочину;
- Наявності бази даних (або бібліотеки) характеристик відомих ядерних матеріалів у комплексі з предметним досвідом.

Важливу роль популяризації передової практики та обміну інформацією грає міжнародне співробітництво.

Так, під егідою МАГАТЕ створена та підтримується так звана БД за інцидентами та обігом (The IAEA Incident and Trafficking Database (ITDB), що містить інформацію, що добровільно надається країнами учасниками МАГАТЕ, про несанкціоноване заволодіння, крадіжку чи втрату, або про іншу несанкціоновану діяльність щодо ядерних та інших радіоактивних матеріалів. З січня 1993 р. по грудень 2013 року зібрано 2477 підтверджених інцидентів. 424 з

них пов'язані з незаконним оволодінням та пов'язаною з цим кримінальною діяльністю (16 інцидентів з високозбагаченим ураном або плутонієм). 664 випадки пов'язані з крадіжкою або втратою ядерних та інших радіоактивних матеріалів. Виявлено всього 1337 випадків з іншими несанкціонованими діями чи подіями. (Та сама подія може входити до кількох зазначених груп інцидентів, тому, сума інцидентів всіх груп буде більше усій кількості інцидентів). Також, у БД є 69 випадків, коли надана інформація була недостатньою, щоб віднести інцидент до будь-якої групи.

Така кількість подій показує, що незважаючи на існування інфраструктури та режиму фізичної ядерної безпеки, як і раніше, мають місце навмисні та ненавмисні випадки втрати контролю над ядерними та іншими радіоактивними матеріалами.

Інформованість про можливості ядерної криміналістики щодо виявлення ядерного чи радіоактивного матеріалу поза контролем з боку регулюючого органу та реагування на такий матеріал є обов'язковою для персоналу правоохоронних органів, митниці та прикордонної служби.

Існує ще один важливий аспект, пов'язаний з ядерною криміналістикою – профілактика та запобігання.

Уроки, отримані за результатами ядерного криміналістичного розслідування, повинні інкорпороватися в заходи щодо ФЯБ з метою її підвищення, і бути спрямовані на недопущення повторення аналогічних небажаних подій у майбутньому. Наприклад, за результатами розслідування встановлено, що матеріали були переміщені з об'єкта, який раніше здавався захищеним. Виявлені недоліки вказують на недосконалість системи обліку та контролю ЯМ чи інженерних систем фіззахисту.

Знання злочинними групами чи окремого зловмисника щодо наявності Державного плану взаємодії у разі інциденту з ЯМ та іншими радіоактивними

матеріалами може стримувати їх від реалізації намірів, пов'язаних із розкраданням та незаконним обігом.

Контрольні запитання

1. Які правила застосовуються під час збирання радіоактивних доказів на місці інциденту?
2. Які існують вимоги до лабораторії ядерної криміналістики?
3. Які існують підходи до виявлення криміналістичних ознак?

Перелік посилань

1. Договір про нерозповсюдження ядерної зброї від 1 липня 1968 року (Про приєднання до Договору та застереження до нього див. Закон №248/94-ВР від 16.11.1994)
2. Облік і контроль ядерного матеріалу. Фізичний захист ядерного матеріалу і ядерних установок. Тлумачний словник український термінів. Словники термінів: українсько-англо-російський, англо-російсько-український і російсько-англо-український, затверджений наказом Держатомрегулювання від 08.06.04 р. № 101.
3. Конвенція про фізичний захист ядерного матеріалу та ядерних установок (участь України у Конвенції Постанова ВР N 3182-XII від 05.05.93). Набуття чинності для України: 05.08.1993.
4. Establishing a System for Control of Nuclear Material for Nuclear Security Purposes at a Facility During Use, Storage and Movement No. 32-T. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2019.
5. Рекомендації фізичної ядерної безпеки щодо фізичного захисту ядерного матеріалу та ядерних установок (INFCIRC/225/Видання 5). Рекомендації. Серія видань МАГАТЕ з фізичної ядерної безпеки №13 – NSS-13. МАГАТЕ, Відень 2011.
6. Structure and Content of Agreements between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, INFCIRC/153, IAEA, April 1975.
7. IAEA Safeguards Glossary, 2001 Edition, Int. Nuclear Verification Series No.3, Vienna, 2008
8. IAEA Safeguards: Guidelines for States' Systems of Accounting for and Control of Nuclear Materials. – IAEA/SG/INF/2, IAEA, Vienna (1980).

9. Правила ведення обліку та контролю ядерних матеріалів (НП 306.7.122-2006), затверджені наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 26 червня 2006 року № 97, зареєстровано в Міністерстві юстиції України 17 липня 2006 р. за № 849/12723 (у редакції наказу Держатомрегулювання від 08.02.2010 № 14), зареєстровані у Міністерстві юстиції України 03.03.2010 за № 202/17497.

10. Treatment and recycling of spent nuclear fuel Actinide partitioning – Application to waste management Commissariat à l'énergie atomique A Nuclear Energy Division Monograph A Nuclear Energy Division Monograph Commissariat à l'énergie atomique, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex (France); © CEA Saclay and Groupe Moniteur (Éditions du Moniteur), Paris, 2008 ISBN 978-2-281-11377-8.

11. Fundamentals of Material Accounting for Nuclear Safeguards. Compiled by K.K.S. Pillay. LA-11569-M. Manual. UC-15, Los Alamos National Laboratory, April 1989

12. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку». Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995, N 12, ст.81. Вводиться в дію Постановою ВР N 40/95-ВР від 08.02.95, ВВР, 1995, N 12, ст.82.

13. Закон України «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання». від 19.10.2000 N 2064-III. Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2001, № 1, ст.1.

14. Постанова Кабінету міністрів України від 18.12.96 N 1525. «Положення про державну систему обліку та контролю ядерних матеріалів» (із змінами, внесеними згідно з постановами Кабінету Міністрів України № 1006 від 09.08.2001, № 257 від 25.03.2009).

15. Nuclear forensics in support of investigations: implementing guide No. 2-G. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015.

16. Nuclear security recommendations on nuclear and other radioactive material outside regulatory control. IAEA Nuclear Security Series, No. 15.
17. Radiological Crime Scene Management. IAEA Nuclear Security Series No. 22–G. STI/PUB/1672. ISBN 978–92–0–108714–0. IAEA, Vienna, 2014.