

Міністерство освіти і науки України  
Львівський національний університет імені Івана Франка

## **СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ**

**Лабораторний практикум**  
(для студентів факультету електроніки)

Львів  
ЛНУ імені Івана Франка  
2013

## ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ І МЕТОДИ СПЕКТРОМЕТРІЇ ЙОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ .....	4
1. СПЕКТРОМЕТРИ ЙОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ. БЛОК-СХЕМА СПЕКТРОМЕТРА ЙВ.....	5
2. ДЕТЕКТОРИ ЙОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ .....	8
2.1. СЦИНТИЛЯЦІЙНІ ДЕТЕКТОРИ .....	9
2.2. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДЕТЕКТОРИ .....	11
2.2.1. ДЕТЕКТОРИ З P-N-ПЕРЕХОДОМ .....	12
2.2.2. КЛАСИФІКАЦІЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДЕТЕКТОРІВ.....	13
2.2.3. ГЕРМАНІЙ-ЛІТІЄВІ ДЕТЕКТОРИ .....	15
2.2.4. ДЕТЕКТОРИ З НАДЧИСТОГО ГЕРМАНІЮ .....	19
3. ПАРАМЕТРИ СПЕКТРОМЕТРІВ.....	20
3.1. ПАРАМЕТРИ ПІКА ПОВНОГО ПОГЛИНАННЯ.....	20
3.2. ЕНЕРГЕТИЧНЕ РОЗДІЛЕННЯ.....	22
3.3. ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЄСТРАЦІЇ .....	23
4. ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРОМЕТРА .....	24
4.1. ЧУТЛИВІСТЬ РЕЄСТРАЦІЇ ДЕТЕКТОРА .....	24
4.2. МАКСИМАЛЬНЕ ВХІДНЕ СТАТИСТИЧНЕ ЗАВАНТАЖЕННЯ .....	25
ЗАВДАННЯ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ .....	27
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1 .....	27
ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ РОБОЧОЇ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДЕТЕТОРА .....	27
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2 .....	28
ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ПАКЕТУ АК1 ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ ГАММА- СПЕКТРОМЕТРА .....	28
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3 .....	32
ГРАДУЮВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ГАММА- СПЕКТРОМЕТРА ЗА ЕНЕРГІЄЮ. ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ, ЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗДІЛЕННЯ СПЕКТРОМЕТРА...	32
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4 .....	36
ВИЗНАЧЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ РЕЄСТРАЦІЇ ДЕТЕКТОРА .....	36
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5 .....	37
ГРАДУЮВАННЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА ЗА ЕФЕКТИВНІСТЮ РЕЄСТРАЦІЇ .....	37
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6 .....	39
ВИЗНАЧЕННЯ НИЖНЬОЇ МЕЖІ ВИМІРЮВАНОЇ АКТИВНОСТІ І ОПТИМАЛЬНОГО ЧАСУ НАБОРУ СПЕКТРУ .....	39
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7 .....	42

ОЗНАЙОМЛЕННЯ З ОСНОВАМИ ВІДБОРУ ПРОБ ҐРУНТІВ ТА ПІДГОТОВКИ ЇХ ДО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ .....	42
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8 .....	44
ЯКІСНИЙ ТА КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ПРОБ ҐРУНТІВ. ВИЗНАЧЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ РАДІОЦЕЗІЄМ. ....	44
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9 .....	45
ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОСТІ ПРИРОДНИХ РАДІО-НУКЛІДІВ У БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛАХ ЗА ДОПОМОГОЮ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРІВ .....	45
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10 .....	48
ТЕМА РОБОТИ: ОСНОВНІ РАДІОМЕТРИЧНІ ТА ДОЗИМЕТРИЧНІ ПРИЛАДИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ. ....	48
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 11 .....	52
ТЕМА РОБОТИ: ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ БЕТА-АКТИВНОСТІ ПРОБ З ДОПОМОГОЮ БЕТА-РАДІОМЕТРА РКБ4-1ЕМ. ....	52
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 12 .....	56
ТЕМА РОБОТИ: ВИЗНАЧЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДИ І ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ БЕТА-АКТИВНИМИ РАДІО-НУКЛІДАМИ. КОНТРОЛЬ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХНІ З ДОПОМОГОЮ РАДІОМЕТРА “БЕТА” .....	56
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 13 .....	60
ТЕМА РОБОТИ: КОНТРОЛЬ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ АЛЬФА-ВИПРОМІНЮЮЧИМИ РАДІОНУКЛІДАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ РАДІОМЕТРА ПОТОКУ АЛЬФА-ЧАСТИНОК .....	60
ЛІТЕРАТУРА: .....	63
ДОДАТКИ .....	64
ДОДАТОК 1 .....	64
ДОДАТОК 2 .....	65
ДОДАТОК 3 .....	66

## ЗАВДАННЯ І МЕТОДИ СПЕКТРОМЕТРІЇ ЙОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Спектриметрія йонізуючого випромінювання є розділом експериментальної ядерної фізики, що займається аналізом енергетичних спектрів йонізуючих випромінювань (ЙВ).

Методи спектриметрії дають змогу вирішувати фундаментальні завдання ядерної фізики, а також завдання, які носять прикладний характер. Перша група задач має на меті визначення і уточнення ядерно-фізичних характеристик радіонуклідів. Друга група завдань має на меті вирішувати практичні завдання, які виникають при проведенні аналізу складу речовини, при контролі об'єктів навколишнього середовища і продуктів харчування на радіоактивне забруднення.

Головне завдання прикладної гамма-спектриметрії – за зареєстрованим (апаратним) спектром визначити істинний (первинний) спектр гамма-випромінювання.

Прикладні задачі гамма-спектриметрії включають в себе проведення якісного і кількісного аналізу складу речовини. Якісний аналіз базується на можливості ідентифікації радіонуклідів по енергії гамма-випромінювання, яке супроводжує радіоактивний розпад. При проведенні кількісного аналізу визначають активність відповідних радіонуклідів в речовині.

Є декілька методів вимірювання енергетичного розподілу заряджених частинок і гамма-квантів. Розрізняють абсолютні і відносні методи спектриметрії.

*Абсолютні методи* забезпечують найвищу точність вимірювання і використовуються в наукових дослідженнях пов'язаних з визначенням ядерно-фізичних характеристик радіонуклідів. Недоліком цих методів є велика складність апаратури і можливість вимірювання енергій в дуже вузькому енергетичному діапазоні. До абсолютних методів відносяться *метод магнітного аналізу і кристало-дифракційний метод*. Перший метод ґрунтується на зміні відхилення траєкторій заряджених частинок у магнітному полі. Його використовують в альфа- та бета-спектриметрії. Кристало-дифракційний метод застосовують в спектриметрії рентгенівського і низькоенергетичного гамма-випромінювання. В основу цього методу покладено явище дифракції фотонів на кристалічній ґратці.

*Відносні методи* спектриметрії (до них належать і сцинтиляційний та йонізаційний методи) забезпечують дещо нижчу роздільну здатність, ніж абсолютні методи, але дозволяють отримувати весь енергетичний спектр йонізуючих випромінювань. Такі методи знайшли широке застосування у прикладній гамма-спектриметрії.

*Сцинтиляційний метод* ґрунтується на аналізі світлових спалахів (сцинтиляцій), що виникають в певних речовинах (сцинтиляторах) при взаємодії з ними йонізуючих випромінювань.

*Йонізаційний метод* базується на вимірюванні йонізаційного ефекту, що виникає в чутливому об'ємі детектора при взаємодії з ним гамма-квантів. Як детектор тут використовують йонізаційну камеру, пропорційний лічильник або напівпровідниковий детектор (НПД). Використання НПД в гамма-спектрометрії дає можливість отримати високе енергетичне розділення (в найкращих НПД – менше 1,8 кеВ на лінії 1,332 МеВ ізотопу  $^{60}\text{Co}$ ); вище розділення можна отримати, використовуючи складні і дорогі магнітні спектрометри.

## 1. СПЕКТРОМЕТРИ ЙОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ. БЛОК-СХЕМА СПЕКТРОМЕТРА ЙВ

У спектрометрії йонізуючих випромінювань мають справу з т. з. амплітудними (або апаратурними) спектрами.

*Апаратурним (амплітудним) спектром* називається одержаний на спектрометрії при реєстрації заряджених частинок або фотонів розподіл імпульсів за їхніми амплітудами. Загалом вигляд амплітудного спектра визначається типом випромінювання, типом спектрометра та його характеристиками, умовами вимірювання тощо.

Апаратурний спектр, одержаний при реєстрації моноенергетичних частинок або фотонного випромінювання, називається *апаратурною лінією* цього спектрометра. Апаратурна лінія будь-якого спектрометра складається з двох основних компонент: чітко вираженого максимуму та неперервного розподілу з боку менших енергій, зліва від максимуму (вигляд апаратурної лінії сцинтиляційного гамма-спектрометра зображено на рис. 1).

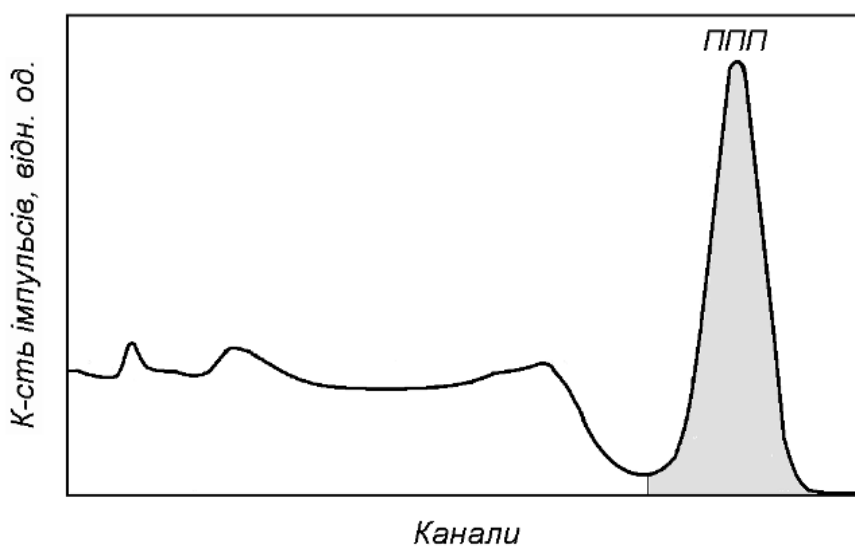


Рис. 1. Апаратурна лінія у сцинтиляційному гамма-спектрометрі:  
ППП – пік повного поглинання

Перша компонента апаратурної лінії одержала назву *піка повного поглинання* (ППП), під яким розуміють ділянку спектра, в яку потрапляють імпульси, що відповідають повній втраті енергії моноенергетичними частинками чи гамма-квантами в детекторі.

Друга компонента є наслідком процесів, які призводять до часткової втрати частинкою (квантом) енергії поза чутливою областю детектора, неповної втраті енергії в його чутливій області або ж, через деякі причини, неповним збором носіїв заряду в ньому. Цю компоненту часто називають “хвостом” апаратурної лінії, або ж *комptonівським розподілом*.

Спектри йонізуючих випромінювань вивчають за допомогою спектрометрів. Основними складовими частинами спектрометра є детектор, спектральний тракт і багатоканальний амплітудний аналізатор імпульсів. Блок-схему спектрометра зображено на рис. 2.

За допомогою детектора енергія йонізуючого випромінювання перетворюється в електричний сигнал, амплітуда якого залежить від енергії поглинутих гамма-квантів. Параметри і якість детектора визначають параметри спектрометра, і тому до детектора в спектрометрії йонізуючого випромінювання ставляться певні вимоги. Основна з них – в режимі спектрометрії електричний сигнал на виході детектора повинен бути строго пропорційний до енергії, яку втрачає гамма-квант (або йонізуюче випромінювання іншого роду) в його чутливій області. Крім того, шуми детектора мають бути мінімальними.

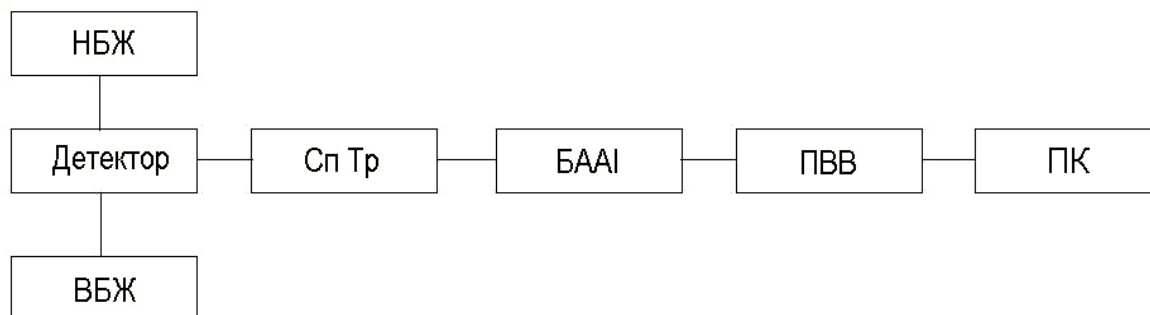


Рис. 2. Блок-схема спектрометра ЙВ:

НБЖ, ВБЖ – низько- та високовольтний блоки живлення детектора; Сп Тр – спектральний тракт; БААІ – багатоканальний аналізатор імпульсів; ПВВ – пристрій вводу-виводу; ПК – персональний комп'ютер для керівництва роботою спектрометра та обробки даних.

*Спектральний тракт* служить для перетворення й підсилення сигналу, знятого з детектора, а також формування цього сигналу – перетворення до

вигляду, який забезпечує нормальну роботу багатоканального амплітудного аналізатора імпульсів і складається з *попереднього та спектрометричного підсилювачів*. У напівпровідниковій спектрометрії функцією попереднього підсилювача є перетворення зарядової форми сигналу в імпульс струму та попереднє його підсилення. В спектрометричному підсилювачі імпульс формується за формою та підсилюється за амплітудою. Основні вимоги до спектрометричного тракту – зведений до можливого мінімуму рівень шумів та сталість коефіцієнту підсилення в усьому робочому діапазоні.

*Багатоканальний амплітудний аналізатор імпульсів (БААІ)* розподіляє імпульси відповідної амплітуди по каналах, забезпечує візуальне спостереження за формуванням амплітудного спектру в процесі реєстрації йонізуючого випромінювання та його обробки. Основна вимога до БААІ: для забезпечення адекватності отриманого апаратного спектру істинному спектру випромінювання досліджуваного джерела потрібно забезпечити постійність ширини каналу (під каналом розуміють інтервал амплітуд, при попаданні в який амплітуді присвоюється певне середнє значення) для всього робочого діапазону амплітуд та її високу температурну та часову стабільність.

*Пристрій вводу і виводу (ПВВ)* призначений для забезпечення діалогу між оператором і аналізуючою системою. Він дозволяє в зручному для оператора вигляді знімати інформацію з аналізатора і передавати її в комп'ютер для подальшої обробки. Керування процесом за допомогою комп'ютера дає можливість вести процеси набору і обробки енергетичних спектрів йонізуючих випромінювань в автоматичному режимі.

Для проведення аналізу проби необхідно підготувати її до спектрометричних вимірювань. Наприклад, підготовка до аналізу проби ґрунту полягає в її висушуванні до повітряно-сухого стану, видаленні сторонніх домішок, старанному подрібненні та перемішуванні з метою гомогенізації. Підготовлену до вимірювань пробу поміщають у вимірювальний контейнер (найчастіше – у посудину Марінеллі об'ємом 1 л) та поміщають у вимірювальну камеру спектрометра на детектор, розміщений усередині захисного блоку. Такий захист зазвичай являє собою шар свинцю завтовшки 10 см.

Набравши спектр в аналізаторі, потрібно провести його обробку. *Алгоритм обробки спектру* передбачає:

- проведення пошуку піків повного поглинання (ППП);
- визначення положення центрів ППП та присвоєння їм відповідних значень енергій;
- визначення площі під ППП, тобто кількості імпульсів з даними амплітудами, зареєстрованих у спектрометрі;
- проведення ідентифікації знайдених ППП – за визначеними енергіями гамма-квантів визначається ізотоп, який ці кванти випромінює (тобто визначається якісний склад досліджуваної проби);
- визначення з допомогою таблиці радіонуклідів, заведеної в оперативну пам'ять комп'ютера (ОП ПК), значення квантового виходу

для кожної групи зареєстрованих гамма-квантів;

- розрахунок з використанням введених в ОП ПК даних (ваги наважки та повної ваги проби, площі поверхні ґрунту, з якої відібрано пробу) питомої активності кожного ізотопу, який міститься в пробі, та щільності поверхневої забрудненості ним ґрунту, з якого була відібрана досліджувана проба.

Питома активність проби  $A$  визначається за формулою:

$$A = S/tqm\varepsilon_i, \quad (1)$$

де  $S$  – площа ППП,  $t$  – час набору спектру в режимі “живого” часу,  $q$  – квантовий вихід гамма-квантів з даною енергією,  $m$  – маса досліджуваної проби,  $\varepsilon_i$  – ефективність реєстрації гамма-квантів даної енергії спектрометром при заданій геометрії експерименту.

Щільність поверхневої забрудненості ґрунту  $A_s$  (під щільністю забрудненості ґрунту радіонуклідом тут розуміють його сумарну активність у поверхневому шарі ґрунту товщиною 20 см одиничної площі і в системі СІ визначається в кБк/м<sup>2</sup>) розраховується як

$$A_r = AkM/m, \quad (2)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який враховує співвідношення площ поверхні, з якої відібрано пробу ґрунту, та 1 м<sup>2</sup>,  $M$  – повна маса відібраної проби.

## 2. ДЕТЕКТОРИ ЙОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

У прикладній спектрометрії йонізуючого випромінювання в як детектори основному використовуються сцинтиляційні та напівпровідникові блоки детектування. Відповідно, за назвою детектора випромінювання, говорять про *сцинтиляційні* та *напівпровідникові спектрометри* ЙВ.

Чутливою областю сцинтиляційного детектора є сцинтилятор, у якому при взаємодії з йонізуючим випромінюванням (гамма-квантами, альфа-, бета-частинками, нейтронами, осколками ділення ядер, тощо) виникають світлові спалахи, аналіз яскравості яких і дозволяє визначити енергетичні та радіометричні характеристики останніх. Малий час висвічування (від одиниць до сотень наносекунд), пропорційність між інтенсивністю спалаху та енергією, яку втратила частинка або квант у сцинтиляторі, а також можливість виготовляти сцинтилятори великих розмірів та заданої форми, дозволяють створювати детектори на їх основі для спектрометрів широкого функціонального призначення.

У напівпровідникових спектрометрах як детектори використовують пристрої, чутливою областю яких є високоомний шар напівпровідника, і які



за свою суттю є твердотільними аналогами йонізаційних камер. Малі енергії, які необхідно затратити на створення пари електрон-дірка (біля 3 еВ), порівняно висока в порівнянні з газовими йонізаційними детекторами ефективність реєстрації йонізуючого випромінювання, майже однакова висока рухливість обох видів утворюваних при взаємодії напівпровідникового матеріалу детектора з йонізуючими частинками зарядів (електронів та дірок) обумовили значні переваги спектрометрів з н/п детекторами у порівнянні з сцинтиляційними.

Однією з основних вимог, які ставлять перед детекторами в спектрометрії ЙВ, є відповідність (пропорційність) амплітуди електричного сигналу на виході детектора енергії, яку втрачає в ньому йонізуюча частинка або гамма-квант. Якщо ця вимога не виконується, то такі детектори в спектрометрії використовуватися не можуть, хоча можуть знайти застосування у дозиметричних приладах. За цим параметром детектори можна розділити на два класи – *спектрометричні* та *дозиметричні*. Детектори, які використовують у спектрометрії ЙВ, забезпечують пропорційність амплітуди електричного сигналу на виході детектора втраченій у його робочій області енергії у досить широкому діапазоні енергій – від десятків кеВ до 10 МеВ.

Окрім того, високі вимоги ставляться до рівня власних шумів детектора. Щоб знизити їх до мінімуму, використовують спеціальні технологічні прийоми і у виготовленні детекторів, і в їх експлуатації. Дуже ефективним методом зменшення шумів детектора є зниження його робочої температури аж до температури рідкого азоту. Цей метод широко застосовують у гамма-спектрометрії з напівпровідниковими детекторами.

## **2.1. СЦИНТИЛЯЦІЙНІ ДЕТЕКТОРИ**

Блок-схема сцинтиляційного детектора зображено на рис. 3. Його робота полягає у наступному.

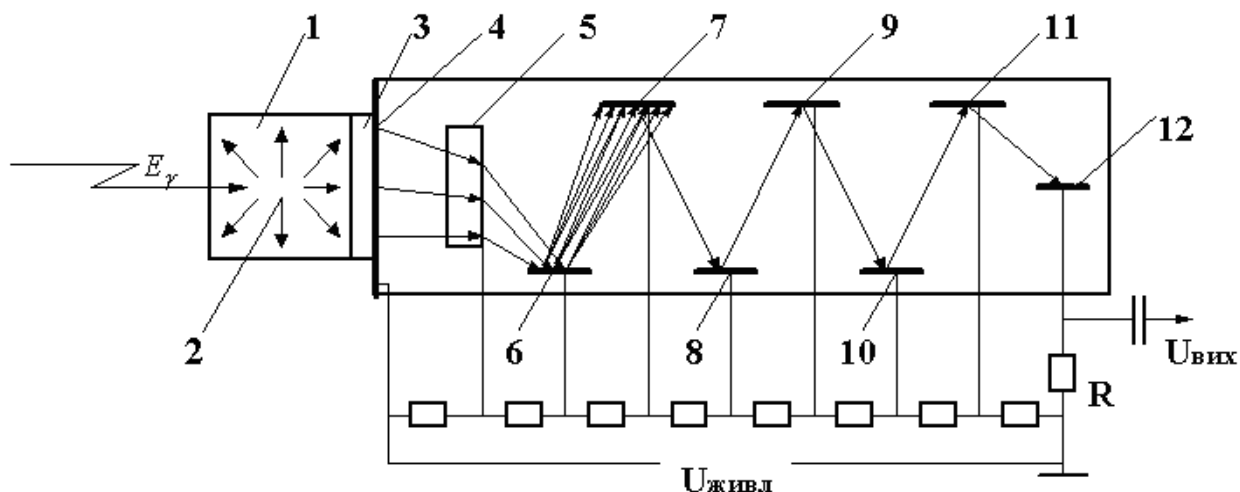


Рис. 3. Будова сцинтиляційного детектора

1 – сцинтилятор; 2 – сцинтиляції; 3 – світлопровід; 4 – фотокатод ФЕП; 5 – фокусувальна електростатична лінза; 6 – 11 – диноди; 12 – анод

У сцинтиляторі при проходженні йонізуючої частинки виникає слабкий світловий спалах, який у фотоелектронному помножувачі перетвориться на електричний імпульс. Для забезпечення оптичного контакту з метою зменшення втрат на відбивання на межі середовищ між сцинтилятором і ФЕП використовують вазелін марки КВ-3 або гліцерин. Фотони світлового спалаху, що виникає в сцинтиляторі, потрапляють на фотокатод (часто сурм'яно-цезієвий (Sb-Cs)) і вибивають з нього фотоелектрони, які проходять через фокусувальну діафрагму і розганяються електричним полем, прикладеним між помножуючими електродами (т. з. *динодами*). Кількісною характеристикою процесу множення є *коефіцієнт вторинної емісії*, який дорівнює відношенню кількості вибитих з динода електронів до кількості електронів, що падають на його поверхню. Максимальне значення цього коефіцієнта (7–10) досягається для сплавних динодів при зростанні енергії електронів до 500–550 еВ. Коефіцієнт помноження ФЕП у сцинтиляційному детекторі, зазвичай, перевищує  $10^5$ – $10^6$ , досягаючи в деяких фотопомножувачах спеціального призначення величин понад  $10^9$ – $10^{10}$ . Для живлення ФЕП використовують джерело високої стабілізованої напруги з дільником.

Останнім часом як реєстратори слабких світлових потоків використовують лавинні фотодіоди, що дало змогу суттєво зменшити розміри детекторів.

Як сцинтилятори в сцинтиляційних детекторах застосовуються неорганічні й органічні кристали, органічні рідкі сцинтилятори і сцинтилюючі пластмаси, а також газові сцинтилятори – гелій, аргон, криптон, ксенон і суміш 10 % Me + 90 % He. Із неорганічних кристалів найбільше застосовують NaI,

KI, CsI, активовані талієм, і LiI, активований талієм і європієм або самарієм. Для реєстрації  $\beta$ -частинок застосовують ZnS, активований Ag або Cu. Іноді використовують також вольфрамати лужноземельних елементів, наприклад  $\text{CaWO}_4$ , і солі  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ . Вибір матеріалу сцинтиляційного детектора визначається умовами конкретного завдання і залежить, зокрема, від виду реєстрованого випромінювання – альфа-, бета-частинок чи гамма-квантів.

У спектрометрії альфа-частинок (а також інших важких заряджених частинок) зазвичай застосовують детектори на основі кристалів CsI(Tl), у яких чутлива область виготовлена у вигляді тонкої пластини для зменшення вкладу від реєстрації гамма- та бета-випромінювання.

У бета-спектрометрії, для зменшення відбивання електронів від поверхні, яке досить велике для неорганічних сцинтиляторів, використовуються органічні кристали антрацену та стільбену, а в деяких випадках – рідкі сцинтилятори (наприклад, сполуки  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{35}\text{S}$  – для вимірювання спектрів низькоенергетичних бета-частинок).

У сцинтиляційній гамма-спектрометрії найширше застосування одержали кристали NaI(Tl); значно рідше використовують CsI(Tl) (цей кристал досить часто використовують у спектрометрії рентгенівського та низькоенергетичного гамма-випромінювання), – та KI(Tl). У деяких специфічних випадках використовують спеціально виготовлені детектори на основі інших сцинтиляційних неорганічних кристалів.

Основними перевагами сцинтиляційних детекторів є високе часове розділення, лінійна залежність між величиною сигналу і поглиненою енергією випромінювання з низьким значенням лінійного передавання енергії, можливість застосування рідких детекторів будь-якої форми і об'єму. Ефективність реєстрації досягає 100 %. Недоліком методу є складність і нестабільність ФЕП, уживаного для посилення первинного ефекту.

## **2.2. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДЕТЕКТОРИ**

Напівпровідникові детектори (НПД) за своєю суттю є твердотільними аналогами газових йонізаційних камер, в яких газ замінений конденсованим середовищем – твердим тілом (напівпровідником). Інформацію про енергію частинки в даному випадку несе електричний заряд, що утворюється в результаті взаємодії йонізуючого випромінювання з напівпровідниковим матеріалом.

Для забезпечення режиму спектрометрії необхідно, щоб НПД задовольняв наступним вимогам:

- вирваний гамма-квантом електрон повинен повністю втрачати енергію в чутливій області детектора, що забезпечує пропорційність електричного сигналу енергії, втраченій гамма-квантом;
- нерівноважні заряди, генеровані гамма-квантом, повинні бути міні-

мальними, щоб забезпечити високу роздільну здатність за енергією.

Особливості роботи НПД визначаються електричними властивостями матеріалів, які використовуються при їх виготовленні.

Принцип дії НПД може бути пояснений, виходячи з зонної теорії напівпровідників. Схематично зонна структура ідеального напівпровідника представлена на рис. 4.

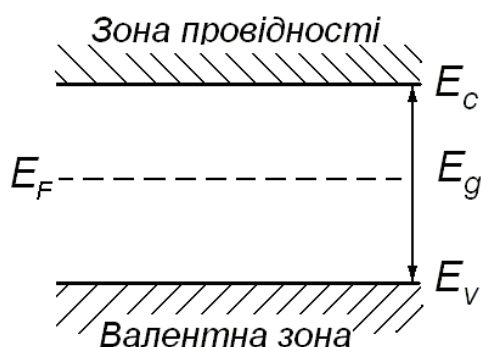


Рис. 4. Зонна структура ідеального напівпровідника.

Гамма-квант, поглинаючись в чутливій області детектора, надає електрону валентної зони (або нижче розміщених зон) енергію  $E > E_g$  ( $E_g$  – ширина забороненої зони), достатню для їхнього переходу в зону провідності або у розміщені вище зони. Отже, в результаті взаємодії гамма-кванта з напівпровідником утворюються електрони в початково незаповнених зонах і дірки в зонах, які до приходу гамма-кванта були заповнені. Процес утворення електронно-діркової пари називається *процесом генерації носіїв заряду*.

Після вторинних взаємодій і дисипації енергії, шляхом емісії фотонів за дуже короткий час ( $\sim 10^{-12}$  с) всі електрони опиняються на дні зони провідності  $E_c$ , а дірки – на верхній межі валентної зони  $E_v$ . У результаті збільшується провідність матеріалу. Під дією прикладеного електричного поля генеровані носії заряду рухаються до відповідних електродів і створюють на них імпульс електричного заряду, величина якого у випадку повного збору генерованих носіїв на електродах пропорційна енергії поглинутого гамма-кванта.

Оскільки деяка частина енергії гамма-кванта йде на збудження кристалічної ґратки, середня енергія, яка необхідна для утворення електронно-діркової пари, є дещо більшою від ширини забороненої зони напівпровідника  $E_g$  і для Ge становить 3 еВ. Порівнявши це значення з енергіями утворення пари електрон-йон в газах (біля 30 еВ) та енергією, яка витрачається на вибивання фотоелектрона з фотокатода ФЕП (біля 300 еВ) видно, що енергетичне розділення НПД має бути набагато кращим, ніж в газонаповнених та сцинтиляційних детекторах.

### 2.2.1. Детектори з *p-n*-переходом

Необхідні умови для реєстрації йонізуючого випромінювання можна створити в напівпровіднику з  $p$ - $n$ -переходом. На рис. 5 показано енергетичну діаграму напівпровідників  $p$ - і  $n$ -типу. Відразу ж після створення контакту цих областей починається дифузія основних носіїв заряду в області, де вони не є основними. Положення рівнів Фермі в обох зразках зрівнюється, що приводить до створення потенціального бар'єру висотою  $\varphi$ . На межі контакту матеріалів з різними типами провідності створюються два шари зарядів, протилежних за знаком і рівних за величиною. Вони створюють електричне поле, яке перешкоджає дифузії основних носіїв заряду. Ця область стає електрично нейтральною, тобто вільні носії в ній відсутні. Така область називається *збідненою*.

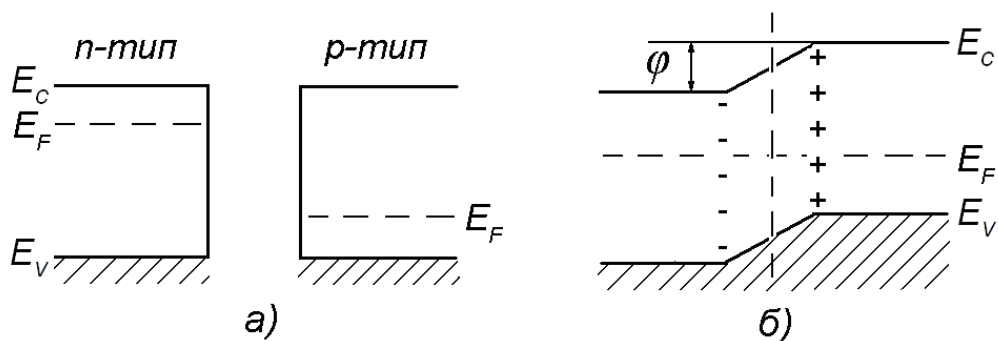


Рис. 5. Енергетична діаграма зразків з  $p$ - і  $n$ - провідністю (а) та  $p$ - $n$ -переходу (б)

Збіднена область є робочою областю НПД, створеного таким чином. У ній проходить перетворення енергії частинки в електричний заряд. Цю область ще називають *чутливою областю НПД*.

Зворотна напруга збільшує величину запірного електричного поля, а, отже, й збільшує величину чутливої області НПД. У цьому випадку ширина збідненої області  $W$  визначається як

$$W = k\sqrt{\rho U}, \quad (3)$$

де  $\rho$  – питома провідність;  $U$  – зворотна напруга;  $k$  – коефіцієнт пропорційності (для Si  $p$ -типу  $k = 0,53$  і  $n$ -типу  $k = 0,32$ )

### 2.2.2. Класифікація напівпровідникових детекторів

Класифікацію НПД, в залежності від параметра, покладеного в основу класифікації, можна проводити різними способами.

Якщо за параметр вибрати матеріал, з якого виготовлено детектор, то маємо:

- германієві детектори;
- кремнієві детектори;
- детектори з GaAs;
- детектори з CdI;
- детектори з HgI.

Якщо за основу взяти технологію створення  $p$ – $n$ -переходу, то в такому випадку, за методом виготовлення, НПД діляться на:

- поверхнево-бар'єрні;
- дифузійно-дрейфові;
- дифузійні;
- радіаційні.

У поверхнево-бар'єрних детекторах  $p$ – $n$ -перехід створюється в результаті виникнення потенціального бар'єру на контакті метал-напівпровідник. Приконтактний шар напівпровідника збіднюється на основні носії заряду і в результаті створюється чутлива зона. Недоліком таких детекторів мала товщина чутливої області.

Дифузійні детектори, зазвичай, виготовляють дифузією донорної домішки в Si або Ge  $p$ -типу, або акцепторної домішки в напівпровідники  $n$ -типу. Ці детектори мають товщину чутливої області таку, як і поверхнево-бар'єрні (від декількох десятків до декількох сотень мікрометрів). Процес дифузії відбувається при високих температурах, що різко погіршує параметри напівпровідників. Тому дифузійні детектори не знайшли широкого застосування на практиці.

У радіаційних детекторах Ge  $n$ -типу компенсують глибокими акцепторними рівнями радіаційних дефектів, що створюються в процесі опромінення жорсткими гамма-квантами. В результаті отримують матеріал з провідністю, близькою до власної. Ці детектори мають переваги над дифузійно-дрейфовими детекторами в тому, що їх не потрібно охолоджувати до температури рідкого азоту при зберіганні. Недоліком є те, що глибокі рівні відіграють роль центрів захоплення нерівноважних носіїв, що знижує спектрометричні параметри таких детекторів і цим самим обмежує їх використання в прецизійній гамма-спектрометрії.

Останнім часом широко застосовують детектори на основі особливо чистого германію. Цей тип детекторів за методом виготовлення відноситься до детекторів з  $p$ – $n$ -переходом, або поверхнево-бар'єрних. В особливо чистому Ge різницева концентрація домішок, що визначає тип провідності, становить  $10^9$ - $10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Це дозволяє без додаткової компенсації отримувати великі чутливі області детектора. Енергетичне розділення таких детекторів не менше 1,8 кеВ для лінії 1,33 МеВ. Вони зручні в експлуатації, оскільки не потребують охолодження при зберіганні.

### 2.2.3. Германій-літієві детектори

Найширше застосування в спектрометрії гамма-випромінювання одержали германій-літієві детектори (Ge(Li)-детектори), в яких чутлива область створюється за допомогою дифузійно-дрейфової технології. Така технологія дозволяє отримувати чутливі області великого об'єму (так звані  $p-i-n$ -переходи), що значно збільшує ефективність реєстрації гамма-випромінювання, порівняно з детекторами  $p-n$ -типу. Тому Ge(Li)-детектори, поряд з детекторами з надчистих матеріалів, використовують у прецизійних дослідженнях гамма-спектрометрії для вирішення завдань прикладного характеру, а також для розв'язування деяких задач ядерної фізики.

Для виготовлення Ge(Li)-детекторів використовують метод дрейфу йонів літію в електричному полі, який вперше запропонував Пелл. В основу цього методу покладено те, що йони Li є донорною домішкою в Ge  $p$ -типу і можуть відносно швидко переміщатись в кристалі напівпровідника при незначному підвищенні температури. У результаті вдається компенсувати великий об'єм германію  $p$ -типу і збільшити питомий опір до величини питомого опору при власній провідності, тобто створити так звану  $i$ -область великого об'єму.

Основними технологічними операціями при виготовленні Ge(Li)-детекторів є дифузія літію і дрейф йонів літію. В результаті дифузії в кристалі створюється  $p-n$ -перехід, глибина залягання якого ( $x - x_0$ ) визначається з умови рівноваги концентрацій йонів літію  $N_{Li}$  і акцепторів  $N_a$  у вихідному матеріалі германію  $p$ -типу:

$$N_{Li}(x_0) = N_a \quad (4)$$

Дифузія відбувається з шару Li, який нанесено на поверхню зразка шляхом напилення йонів літію у вакуумі або в інертному газі – аргоні. Розподіл літію по глибині зразка описується виразом:

$$N(x) = N_0 \operatorname{erfc}(x/(2\sqrt{Dt})), \quad (5)$$

де  $N_0$  – поверхнева концентрація Li, що дорівнює його розчинності при температурі дифузії;  $D$  – коефіцієнт дифузії Li при цій температурі;  $t$  – тривалість процесу дифузії.

Температура дифузії Li в Ge  $p$ -типу становить 350-400 °C. Процес дрейфу йонів літію в кристалі забезпечує переміщення йонів Li в  $p$ -область Ge  $p$ -типу під дією електричного поля, компенсуючи при цьому вихідну акцепторну домішку. У процесі дрейфу в скомпенсованій області автоматично підтримується рівновага концентрацій додатних і від'ємних зарядів, оскільки надлишок заряду будь-якого знаку викликає появу електричного поля, яке усуває цей надлишок. Це приводить до того, що в кристалі Ge створюється  $i$ -область, в якій  $N_{Li} \approx N_a$ . Розподіл домішок у скомпенсованій області Ge показано на рис. 6.

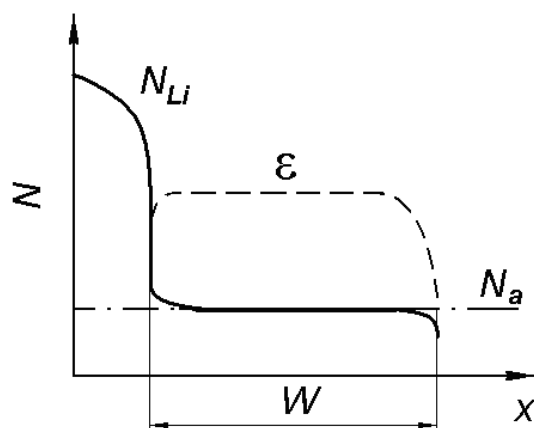


Рис. 6. Розподіл літію і напруженості електричного поля  $\varepsilon$  у випадку ідеальної компенсації.

Залежно від геометричної конфігурації, Ge(Li) детектори поділяють на такі типи (див. рис. 7):

- планарні;
- коаксіальні з одним відкритим кінцем;
- коаксіальні з двома відкритими кінцями;
- коаксіальні з колодязем (детектори геометрії  $4\pi$ );
- *U*-подібні детектори;
- півсферичні детектори.

*Планарні* НПД (рис. 7, а) характеризуються високою однорідністю електричного поля. З використанням таких детекторів одержані найкращі значення енергетичного та часового розділення, які наближаються до теоретичної межі.

Вони отримали поширення через відносну простоту виготовлення і можливість в широких межах змінювати розміри чутливої області детектора. Площа чутливої області може досягати  $12-16 \text{ см}^2$ , а товщина чутливої області –  $15-20 \text{ мм}$ . У такому детекторі мертві шари з боку *n*-контакту мають товщину порядку  $0,5-1,0 \text{ мм}$ , а з боку *p*-контакту – до декількох міліметрів. Щоб зменшити товщину мертвих шарів, їх зішліфовують зі сторони *p*-області, а потім наносять металічний електричний контакт вакуумним напиленням безпосередньо на *i*-область, або застосовують методи йонної імплантації йонів Li в заготовку НПД. Електрична ємність планарного детектора:

$$C_{\text{пл}} = \varepsilon S / 4\pi W, \quad (6)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність напівпровідника (для Ge  $\varepsilon=16$ ; для Si  $\varepsilon=12$ ).



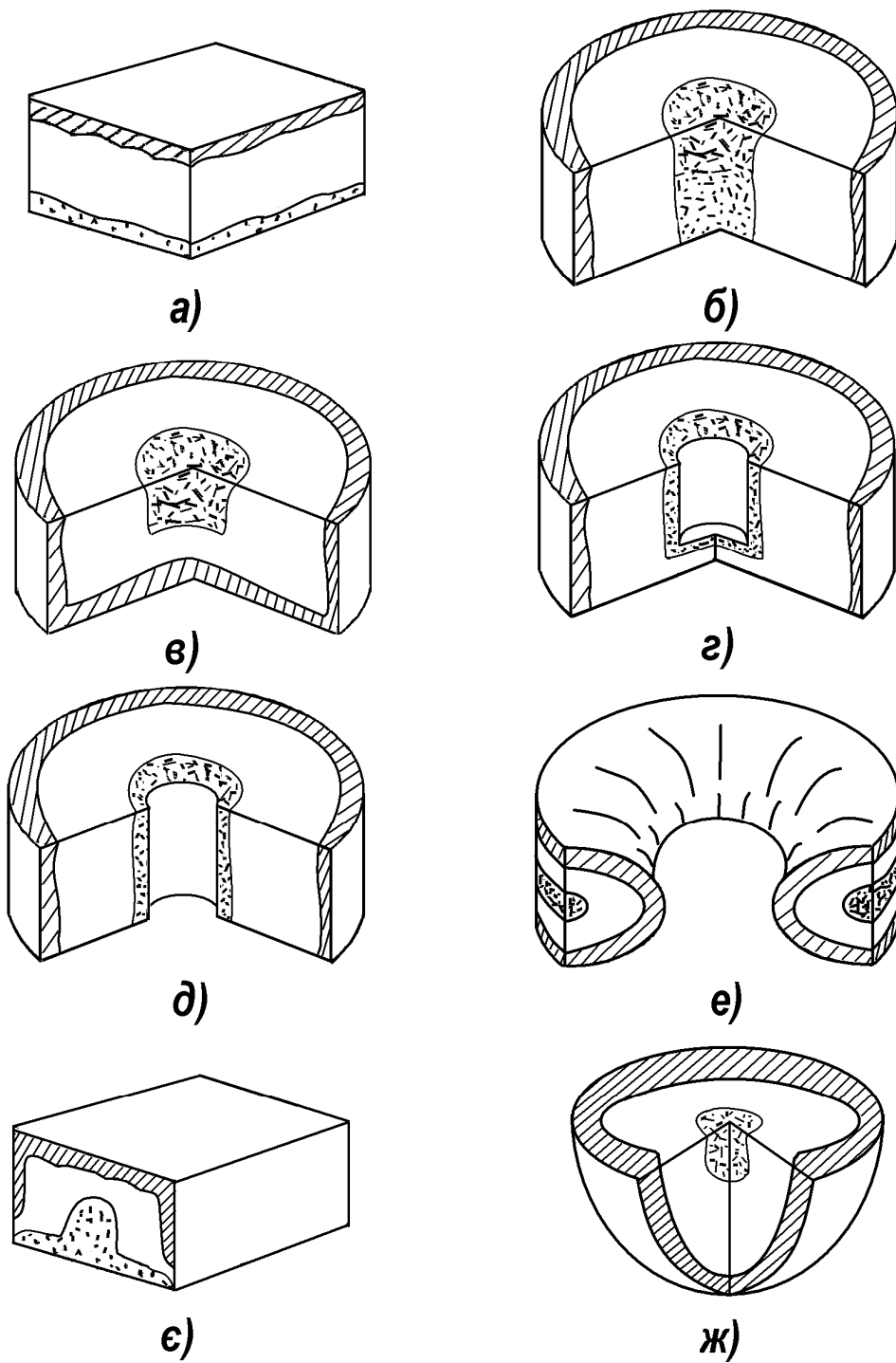


Рис. 7. Схематичне зображення структури германієвих НПД:

а) планарний; б) коаксіальний з двома відкритими кінцями; в) коаксіальний з одним відкритим кінцем; г) детектор з "колязетом"; д) детектор з суцільним каналом; е) напівторовидний; є) U- подібний на проміжній стадії виготовлення; ж) напівсферичний.

Коаксіальні НПД (рис. 7, б, в), порівняно з планарними, мають значну неоднорідність електричного поля, напруженість якого в межах чутливої області може відрізнятись в декілька разів. Часові властивості коаксіального детектора також у декілька разів гірші, ніж властивості планарного. Товщина чутливої області залежить від глибини дрейфу йонів Li і дорівнює 15-20 мм. Товщина мертвих шарів коаксіального детектора (як і планарного) становить сотні мікрометрів.

Виготовляючи такі детектори, намагаються зберегти некомпенсовану  $p$ -область вихідного матеріалу; діаметр цієї області роблять не менше 6-8 мм, оскільки при низькотемпературній дифузії і дрейфі йонів Li в сильних електричних полях можлива перетяжка на  $p$ -області і остання може “схлопнутися”. Це призводить до того, що різко зменшується напруженість електричного поля в деякій частині чутливої області і носії, що утворюються в цій частині, практично не приймають участі в формуванні електричного сигналу НПД.

Електричну ємність  $C$  коаксіального детектора з двома відкритими кінцями (рис. 7, б) визначають за формулою:

$$C = \epsilon h / 2 \ln(R/r), \quad (7)$$

де  $h$  – висота заготовки НПД;  $R$  – радіус зовнішньої поверхні, що обмежує  $i$ -область;  $r$  – радіус внутрішньої поверхні, що обмежує  $i$ -область.

Електрична ємність  $C$  коаксіального детектора з одним відкритим кінцем визначається за формулою:

$$C = C_{\Pi} + C_k \quad (8)$$

Детектори з колодязем використовуються в спектрометрії каскадних гамма-квантів. Джерело гамма-квантів розміщують у середині колодязя і вимірювання виконують в геометрії, близькій до геометрії  $4\pi$ . Ще однією перевагою є відсутність  $p$ -області. Якщо в заготовці НПД з центральним отвором проводити дифузії і дрейф йонів Li зі сторони внутрішнього циліндру (рис. 7, д), то можна отримати обернений НПД. Такий детектор має малу товщину мертвого шару з боку колодязя.

Напівторовидний НПД (рис. 7, е) має конфігурацію, подібну до конфігурації детектора з колодязем. Проте в цьому випадку значно легше досягти необхідного значення об'єму чутливої області. Така конфігурація дає змогу використовувати нижчі робочі напруги, а також забезпечує непогану однорідність електричного поля в чутливій області.

Значно збільшується коефіцієнт використання напівпровідникового матеріалу при великому об'ємі чутливої області, коли використовують детектори, які виготовляють за  $U$ -подібною технологією (рис. 7, є). За конфігурацією такі детектори подібні до планарних. Товщина чутливої області становить

20-30 мм. При досить великому об'ємі чутлива область має достатньо однорідне електричне поле.

НПД з конфігурацією, близькою до півсфери (рис. 7, ж), можна використовувати в спектрометрії гамма-випромінювання в діапазоні енергій 100 еВ – 100 кеВ.

В області енергій гамма-квантів 500-1000 кеВ можна застосовувати планарні детектори. Для енергій до 2 МеВ непоганий ефект дає використання детекторів коаксіальної геометрії з об'ємом чутливої області 15-40 см<sup>3</sup>. Застосування цих детекторів для вимірювання енергій гамма-квантів в районі 1 МеВ, якщо наявні більш короткохвильові гамма-кванти з енергією понад 2 МеВ, є оптимальним. У цьому випадку вклад у комптонівський розподіл від гамма-квантів з вищою енергією буде значно менший, ніж тоді, коли використовують детектори з великим об'ємом чутливої області. Для реєстрації гамма-квантів з енергіями до 5 МеВ використовують Ge(Li)-детектори з об'ємом чутливої області 50-100 см<sup>3</sup>. Ge(Li)-детектори з об'ємом чутливої області 80-100 см<sup>3</sup> можна використовувати для спектрометрії гамма-квантів з енергією 8-12 МеВ.

#### 2.2.4. Детектори з надчистого германію

Досягнення у технології виготовлення надчистих матеріалів дали змогу, починаючи від 70-х років минулого століття, використовувати для реєстрації гамма-квантів детекторів з надчистого германію (найуживаніша аббревіатура латинікою – *HPGe*-детектори). Як і Ge(Li)-детектори, детектори з надчистого германію – це напівпровідникові діоди з *p-i-n*-областю, яка є чутливою до фотонного випромінювання гамма- та рентгенівського діапазону спектра.

Детектори з надчистого германію, внаслідок невеликої ширини забороненої зони використаного напівпровідникового матеріалу, потребують охолодження для зменшення теплової генерації носіїв заряду. Однак, на відміну від Ge(Li)-детекторів, вони можуть зберігатися при кімнатній температурі без загрози втратити спектрометричні властивості, оскільки не мають імплантованих домішок. Це робить набагато зручнішими умови експлуатації таких детекторів, а надвисока чистота матеріалу дає змогу досягти енергетичного розділення, неможливого для германієвих детекторів, компенсованих Li. Сучасні технології отримання надчистих напівпровідників дали змогу отримувати заготовки із надчистого германію значних розмірів, виготовляти з них детектори з досить великими об'ємами чутливої області (і, відповідно, високими ефективностями реєстрації високоенергетичного гамма-випромінювання) та зробити прийнятною їхню вартість. Фірмами *EG&G ORTEC* (США), *CANBERRA* (США), *SILENA* (Австрія, Італія) та іншими серійно виготовляються детектори з надчистого Ge з відносною ефективністю

гамма-випромінювання понад 100 %, а окремі зразки детекторів мають відносну ефективність реєстрації понад 200%.

Сьогодні детектори з надчистого германію широко використовують у гамма-спектрометрії у фундаментальних і прикладних дослідженнях. А провідні фірми, які працюють у галузі апаратурного забезпечення радіологічного контролю, перейшли до комплектування серійної спектрометричної апаратури для проведення якісного й кількісного аналізу джерел гамма-випромінювання саме детекторами з надчистого германію і практично перестали використовувати з цією метою германій-літієві детектори.

Спільним для усіх типів *HPGe*-детекторів, які використовуються у спектрометрії високоенергетичного фотонного випромінювання, є те, що під час роботи (для зменшення теплових шумів і, відповідно, забезпечення високого енергетичного розділення) вони повинні бути охолоджені до температури рідкого азоту. Це вимагає, як і у разі *Ge(Li)*-детекторів, поміщення їх у вакуумну камеру кріостата, теплопровід якої опущений у посудину Дюара зі зрідженим азотом.

### **3. ПАРАМЕТРИ СПЕКТРОМЕТРІВ**

У спектрометрії гамма-випромінювання апаратурна лінія має досить складну форму і значно відрізняється від істинного енергетичного спектру гамма-квантів. Слід зауважити, що у випадку одночасної реєстрації декількох груп гамма-квантів різної енергії апаратурний спектр являє собою суперпозицію апаратурних ліній кожної моноенергетичної групи гамма-квантів.

Внаслідок накладання піків повного поглинання і комптонівських розподілів від кожної моноенергетичної групи гамма-квантів можлива поява хибних піків повного поглинання, що призводить до певного спотворення інформації про ізотопний склад досліджуваного зразка. Тому необхідно добитися найбільшого спрощення апаратурної лінії – виділення піку повного поглинання і пригнічення комптонівського розподілу.

#### **3.1. ПАРАМЕТРИ ПІКА ПОВНОГО ПОГЛИНАННЯ**

Як уже згадувалося, найбільш інформативною частиною апаратурних спектрів є піки повного поглинання – ділянки спектру, у які потрапляють імпульси, утворені при повній втраті енергії моноенергетичними гамма-квантами у чутливій області детектора.

Аналіз форми ППП показує, що в більшості спектрометрів вона має несиметричний характер. Тому знати енергетичне розділення недостатньо, щоб описати форму лінії ППП. Для повного її опису введено додаткові параметри (рис. 8).

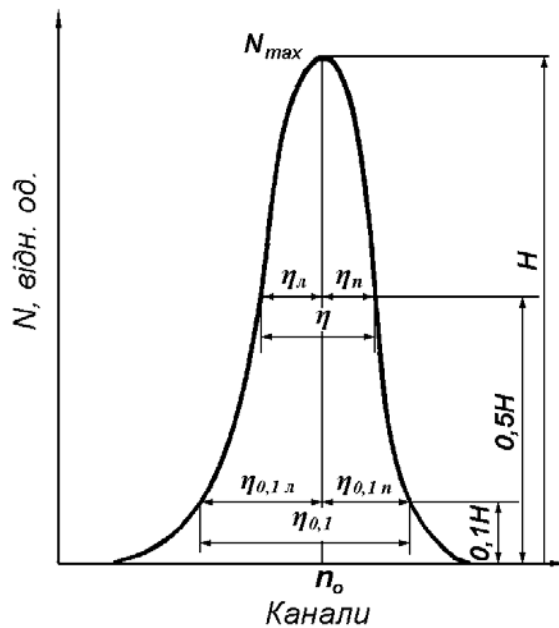


Рис.8. Параметри піка повного поглинання.

$n_0$  – центр ППП;  $H$  – висота ППП;  $n_{0,1}$ ,  $n_{0,1 л}$ ,  $n_{0,1 n}$  – ширина та півширини ППП на 0,1 його висоти, відповідно;  $\eta$ ,  $\eta_л$ ,  $\eta_n$  – ширина та півширини ППП на 0,5 його висоти, відповідно.

Форму лінії ППП оцінюють за коефіцієнтом якості апаратурної лінії  $\mu$ , що є відношенням ширини піка на 0,1 його висоти  $H$  ( $\eta_{0,1}$ ) в енергетичних одиницях до енергетичного розділення  $\eta$ :

$$\mu = 0,55 \eta_{0,1} / \eta, \quad (9)$$

де коефіцієнт 0,55 нормує  $\mu$  на одиницю у випадку нормального розподілу, тобто відношення  $\eta_{0,1}/\eta$  повинно дорівнювати 1,82.

Крім коефіцієнта  $\mu$ , для характеристики форми піка повного поглинання вводять коефіцієнти асиметрії  $\alpha_{0,5}$  і  $\alpha_{0,1}$ , які є відношенням півширин піка, що розміщені ліворуч і праворуч від його осі, на висоті 0,5 і 0,1 (див. рис. 8) і визначаються за такими формулами:

$$\alpha_{0,5} = \eta_л / \eta_n ; \quad (10)$$

$$\alpha_{0,1} = \eta_{0,1 л} / \eta_{0,1 n} . \quad (11)$$

При нормальному (гаусовому) розподілі коефіцієнти  $\alpha_{0,5}$  і  $\alpha_{0,1}$  дорівнюють одиниці в обох випадках.

### 3.2. ЕНЕРГЕТИЧНЕ РОЗДІЛЕННЯ

Найважливішим параметром, що характеризує технічний рівень спектрометра, є роздільна здатність, тобто здатність розділяти дві близько лежачі (на шкалі енергій) групи моноенергетичного випромінювання одного виду. Роздільну здатність кількісно оцінюють за енергетичним розділенням – величиною, обернено пропорційною до роздільної здатності.

Енергетичне розділення  $\eta$  – ширина ППП на половині його висоти (рис. 7). Цей параметр зазвичай визначається в енергетичних одиницях (еВ або кеВ) і визначає ту мінімальну різницю в енергіях  $\Delta E$ , яку повинні мати дві моноенергетичні групи гамма-квантів однакової інтенсивності, щоб спектрометр міг їх розрізнити. Часто користуються поняттям відносного енергетичного розділення  $\eta_{\text{відн.}}$ , яке визначається за формулою:

$$\eta_{\text{відн.}} = (\eta/E_j) 100\% , \quad (12)$$

де  $E_j$  – енергія випромінювання, яке реєструють.

Енергетичне розділення, яке визначають з ППП, є сумарним енергетичним розділенням напівпровідникового детектора і електронної частини спектрометра. Якщо відомі паспортні дані власного енергетичного розділення НПД, його ємності й енергетичного еквіваленту шуму попереднього підсилювача, то можна обчислити сумарне енергетичне розділення спектрометра  $\eta_{\Sigma}$  в цілому за формулою:

$$\eta_{\Sigma} = \sqrt{\eta_{\text{дет}}^2 + \eta_{\text{ан}}^2} , \quad (13)$$

де  $\eta_{\text{дет}}$  – власне енергетичне розділення детектора, записане у паспорті;  $\eta_{\text{ан}}$  – енергетичний еквівалент рівня шуму підсилювального тракту:

$$\eta_{\text{ан}} = \eta_{\text{с=0}} + KC_{\text{дет}}, \text{ кеВ}, \quad (14)$$

де  $\eta_{\text{с=0}}$  – енергетичний еквівалент шуму підсилювального тракту, якщо вхідна ємність  $C_{\text{дет}}$  дорівнює нулю;  $K$  – нахил шумової характеристики підсилювального тракту, яка виражається залежністю шуму від ємності детектора  $C_{\text{дет}}$  на вході попереднього підсилювача.

Теоретично енергетичне розділення детектора може досягти межового значення:

$$\eta_{\text{дет}} = 2,36 \sqrt{FwE_j} , \quad (15)$$

де  $F$  – фактор Фано (для Ge і Si значення фактора Фано дорівнює 0,05);  $w$  –

енергія утворення електронно-діркової пари (при температурі 80 К  $w_{Si}=3,72$  eВ,  $w_{Ge}=2,95$  eВ);  $E_j$  – енергія зареєстрованого гамма-кванта.

Однак на практиці неможливо досягти теоретичної межі енергетичного розділення детектора. Це пояснюється недосконалістю напівпровідникових матеріалів і електронної апаратури спектрометра. Зазвичай, роздільна здатність НПД  $\eta_{дет}$  у півтора – два рази гірша від теоретичного значення.

### 3.3. ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЄСТРАЦІЇ

*Ефективність реєстрації*, як і енергетичне розділення, належать до основних параметрів спектрометрів будь-якого типу. У спектрометрії ЙВ розрізняють повну та абсолютну ефективності реєстрації.

*Повна ефективність реєстрації  $\varepsilon$*  – це визначене у відносних одиницях (або у відсотках) відношення числа зареєстрованих гамма-квантів до загального числа гамма-квантів, що попадають на вхідне вікно детектора, яке обмежує чутливу область детектора. У випадку точкового джерела повна ефективність реєстрації  $\varepsilon$  – відношення числа гамма-квантів  $N_{ППП}$ , зареєстрованих у ППП за деякий інтервал часу, до кількості гамма-квантів  $N_s$ , які випромінюються за той же час джерелом випромінювання в тілесний кут, під яким “видно” чутливу поверхню детектора  $S_{дет}$  з місця розташування джерела випромінювання:

$$\varepsilon = \frac{N_{ППП}}{N_s S_{дет}} 4\pi R^2, \quad (18)$$

де  $R$  – віддаль від центра чутливої поверхні детектора до джерела випромінювання. Віддаль  $R$  вибирають такою, щоб джерело випромінювання можна було рахувати точковим.

У прикладній спектрометрії переважно використовують поняття *абсолютної ефективності реєстрації* в ППП  $\varepsilon_{абс}$ , під яким розуміють відношення числа гамма-квантів, зареєстрованих в ППП за деякий інтервал часу, до кількості всіх гамма-квантів даної енергії, що їх випускає джерело випромінювання за той же інтервал часу (джерело при цьому встановлене на заданій фіксованій відстані від детектора, тобто при певній т. з. геометрії вимірювань):

$$\varepsilon_{абс} = N_{ППП}/N_i, \quad (16)$$

де  $N_{ППП}$  – кількість відліків у піці повного поглинання;  $N_i$  – кількість гамма-квантів заданої енергії, випущених джерелом за “живий” час вимірювання  $t_{ж}$ . “Живий” час вимірювання пов’язаний з часом набору спектра  $t_0$  співвідношенням

$$T_{\text{ж}} = t_0 (1 - t_{\text{м}} n), \quad (17)$$

де  $t_{\text{м}}$  – т. з. “мертвий” час аналізатора (час, протягом якого аналізатор не може фіксувати імпульси);  $n$  – число імпульсів, які поступають на аналізатор за 1 с.

#### 4. ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРОМЕТРА

До найважливіших експлуатаційних характеристик спектрометра відносяться:

- градувальна характеристика спектрометра за енергіями;
- градувальна характеристика спектрометра за ефективністю реєстрації;
- чутливість реєстрації;
- максимальне вхідне статистичне завантаження.

Перші дві характеристики визначають точність проведення якісного і кількісного аналізу джерел випромінювання, і про них докладніше буде йти мова у відповідних лабораторних роботах.

##### 4.1. ЧУТЛИВІСТЬ РЕЄСТРАЦІЇ ДЕТЕКТОРА

Фундаментальною вимірювальною характеристикою НПД є *чутливість реєстрації*  $S$ , яка зазвичай визначається для другої лінії випромінювання  $^{60}\text{Co}$  як

$$S = N_{\text{ППП},i} / n t_{\text{ж}}, \quad (19)$$

де  $n$  – густина потоку гамма-квантів,  $t_{\text{ж}}$  – “живий” час набору спектру, – і *чисельно дорівнює площі (у мм<sup>2</sup>) вхідного вікна ідеального детектора зі 100 % ефективністю реєстрації гамма-квантів, абсолютна ефективність реєстрації якого рівна абсолютній ефективності реального детектора*. (Під 100 % ефективністю реєстрації тут розуміють гіпотетичну ситуацію, коли всі реєстровані гамма-кванти повністю втрачають свою енергію в чутливій області детектора і, відповідно, реєструються у ППП). Для точкової геометрії вимірювання (у якій точкове джерело розміщене на віддалі  $R = 250$  мм від центра поверхні детектора по його осі) значення чутливості реєстрації визначається як



$$S = \frac{N_{\text{ппп},i}}{N_{\gamma,i}} 4\pi R^2, \quad (20)$$

де  $N_{\gamma,i}$  – повне випромінювання джерела на даній енергії, тобто кількість гамма-квантів з енергією  $E_{\gamma,i}$ , випромінених джерелом за час набору спектра.

З порівняння (16) і (20) видно, що чутливість детектора зв'язана з абсолютною ефективністю реєстрації ним гамма-квантів співвідношенням:

$$S = \varepsilon_{\text{абс}} 4\pi R^2. \quad (21)$$

Значення чутливості, визначене таким чином для випромінювання другої лінії  $^{60}\text{Co}$ , входить в умовне позначення дифузійно-дрейфових детекторів. Наприклад, абревіатура ДГДК-100В розшифровується як Детектор Германієвий Дифузійно-дрейфовий Коаксіальний з чутливістю реєстрації 100 мм<sup>2</sup>; В – індекс групи детекторів за енергетичним розділенням (згідно енергетичного розділення та об'єму чутливої області, напівпровідникові Ge(Li)-детектори відносяться до груп А, Б і В; найкращою роздільною здатністю володіють детектори групи В).

#### **4.2. МАКСИМАЛЬНЕ ВХІДНЕ СТАТИСТИЧНЕ ЗАВАНТАЖЕННЯ**

Експлуатаційні характеристики спектрометра (насамперед – його енергетичне розділення) суттєво залежать від густини (інтенсивності) потоку частинок (гамма-квантів), які потрапляють у робочу область його детектора. Ця залежність зумовлена і наявністю деякого граничного часу реєстрації частинки в детекторі й залежить від його будови і геометричних розмірів, і часом, потрібним для формування, підсилення сигналу в спектральному тракті та оброблення його в аналізаторі імпульсів. Тому збільшення інтенсивності реєстрованого потоку частинок або гамма-квантів понад певну характерну для кожного конкретного спектрометра величину призводить до спотворення зареєстрованого в ньому апаратного спектра – максимума піків повного поглинання зсуваються і одночасно спостерігається їхнє розширення, тобто зменшується енергетичне розділення спектрометра. Тому в технічних даних на спектрометри вказано, наскільки зсувається положення центра піка повного поглинання та відсоток збільшення енергетичного розділення при зміні вхідного статистичного завантаження від одного нормованого значення до іншого та т. з. *максимальне вхідне статистичне завантаження спектрометра*. Значення максимально допустимого статистичного завантаження більшості спектрометрів не перевищує  $10^5 \text{ с}^{-1}$ .

Оскільки величина статистичного завантаження суттєво впливає на

експлуатаційні характеристики спектрометра, їхні значення потрібно визначати за таких статистичних завантажень, величини яких не зумовлюють помітних спотворень піків повного поглинання, тобто при значеннях, набагато менших від гранично допустимих.

Такий параметр як *радіаційний ресурс*  $R$  визначає інтегральний потік гамма-квантів певної енергії, який при попаданні в чутливу область детектора погіршує початкове енергетичне розділення удвічі.

## ЗАВДАННЯ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ РОБОЧОЇ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДЕТЕТОРА

#### ПРИЛАДИ ТА МАТЕРІАЛИ:

- напівпровідниковий спектрометр у складі:
  - детектор ДГДК-100В;
  - блок живлення детектора БНВ-31;
  - блоки попереднього (ПУГ-1К2) та спектрометричного (БУИ-3К) підсилювачів;
  - аналізатор АМА-03Ф;
- радіоактивний ізотоп  $^{60}\text{Co}$  з набору ОСГІ-3;
- інструкції з експлуатації приладів.

Для визначення оптимальної робочої напруги спектрометра потрібно знайти залежність енергетичного розділення детектора від його робочої напруги в діапазоні 1600-2600 В, побудувати графік цієї залежності і, апроксимувавши її параболою, визначити за допомогою цієї кривої напругу, при якій енергетичне розділення детектора стає мінімальним. Визначена таким чином напруга (рис. 10) і вважається оптимальною робочою напругою  $U_{\text{опт}}$  детектора.

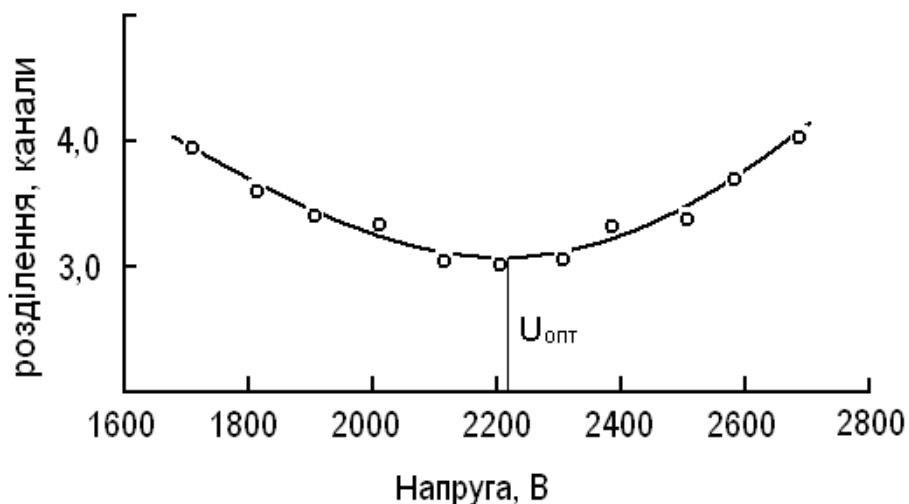


Рис. 10. Залежність енергетичного розділення спектрометра від робочої напруги детектора.

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Ввімкнути напругу живлення блоків спектрометра.

2. Очистити буфер пам'яті аналізатора.
3. Встановити час набору спектру 600 с (в режимі «живого часу»).
4. За допомогою дистансерного пристрою встановити випромінювач (ізо-топ  $^{60}\text{Co}$ ) на віддалі 250 мм від поверхні детектора по його осі.
5. Згідно з інструкцією з експлуатації блока БНВ-31 виставити напругу живлення детектора 1600 В і ввімкнути тумблер "Високе". Після виходу апаратури на робочий режим (не менше ніж за 10 хв після ввімкнення сигналу на панелі блока про встановлення рівня напруги):
  - набрати амплітудний спектр випромінювання ізоотопу  $^{60}\text{Co}$  та обробити його;
  - визначити напівширину ППП гамма-квантів з енергією 1332 кеВ.
6. Змінюючи напругу живлення детектора до величини 2600 В з кроком у 100 В і витримуючи кожного разу час входження детектора в робочий режим, здійснити аналогічні операції – визначити півширину ППП для гамма-квантів з енергією 1332 кеВ для кожної напруги живлення.
7. Згідно з інструкцією з експлуатації вимкнути напругу блоку живлення детектора та спектрометра.
8. Побудувати графік залежності півширини ППП від напруги живлення детектора та визначити з нього величину оптимальної напруги  $U_{\text{опт}}$ . (Отримані експериментальні значення півширин ППП апроксимувати параболічною залежністю, використовуючи метод найменших квадратів).

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2**  
**ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ПАКЕТУ АК1**  
**ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ**  
**ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА**

**ПРИЛАДИ ТА МАТЕРІАЛИ:**

- напівпровідниковий гамма-спектрометр на базі спектрометричного комплексу СУ-01Ф з детектором ДГДК-100В;
- програмне забезпечення керування роботою аналізатора та обробки спектрів АК1.

Програмне забезпечення (ПЗ) АК1 дозволяє виконувати рутинні вимірювання операторам з мінімальною підготовкою і в той же час є універсальним засобом для професіоналів, які проводять ядерно-фізичні дослідження. Пакет програмного забезпечення дозволяє оперативно вирішувати прикладні задачі в галузі спектрометрії ядерних випромінювань, у т. ч. і задачі контролю радіологічної якості об'єктів довкілля.

Призначення програмного забезпечення АК1:

- управління вимірюваннями (керування роботою аналізатора, у т. ч.: за-  
давання необхідного терміну та режиму набору спектра; запуск і зупи-  
нка набору спектра; перевід набраного спектру з буфера аналізатора в  
оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) комп'ютера тощо);
- обробка отриманих спектрів для визначення в зразку, що досліджуєть-  
ся, виду радіонуклідів (тобто проведення якісного аналізу джерела ви-  
промінювання) та їх питомої активності (проведення кількісного аналі-  
зу);
- документування результатів обробки (вивід на друк протоколів вимі-  
рювань або їх запис на носій);
- забезпечення проведення калібрувань спектрометра за енергією та ефе-  
ктивністю реєстрації гамма-квантів;
- збереження спектрів на носіях інформації.

Наявність коротких “інструкцій оператору” для різних задач контролю і вимірювань (на додаток до повної документації) дозволяє швидко освоїти процес вимірювання новим операторам.

Для управління вимірюваннями використовуються:

- режими “Старт”, “Стоп”, “Очищення”, “Зчитування”, “Спостере-  
ження”;
- контроль експозиції за “живим” або “реальним” часом, без обмеження  
часу набору;
- настройка супутніх режимів. Наприклад: “Очищення буфера і включен-  
ня спостереження при запуску вимірювання”, “Автоматична обробка  
спектру при зчитуванні спектру” тощо;
- настройка параметрів аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП);
- програмування вимірювань, забезпечення можливості проведення цик-  
лічних вимірювань.

Програма обробки спектрів забезпечує:

- автоматизований пошук піків;
- наявність різних алгоритмів пошуку піків (первинної обробки спектра);
- автоматичне віднімання фону;
- пошук піків і обробка спектру в інтерактивному режимі;
- різні види обробки спектру;
- ідентифікацію радіонуклідів і розрахунок їхньої активності;
- розрахунок питомої активності зразка з урахуванням умов відбору  
проб і їх підготовки до аналізу;
- розрахунок активності на будь-який момент часу (режим “Витримка  
проби”);
- облік розпаду короткоживучих радіонуклідів за час вимірювання;
- облік залежності ефективності реєстрації від густини проби;
- автоматичний розрахунок активності “однією кнопкою”;
- режим експрес-контролю неперевищення активності радіонуклідів ко-

нтрольних (допустимих) рівнів;

Документування результатів обробки:

- велика кількість стандартних протоколів (у АК1 – можливість виведення повного і скороченого протоколу результатів вимірювання);
- можливість створювати будь-яку форму протоколу видачі даних (за допомогою “*Майстра протоколів*”);
- видання результатів обробки на принтер;
- запис результатів обробки на диск;
- можливість передачі результатів обробки в бази даних;
- можливість (у ПЗ АКWin) передачі протоколу в Word, Exel для включення у звіти.

Калібрування спектрометра забезпечується:

- режимами калібрування за енергіями;
- можливістю автоматичного підкалібрування за відомим джерелом випромінювання;
- режимом калібрування за енергетичним розділенням;
- чотирма способами калібрувань за ефективністю реєстрації;
- створення будь-якої кількості “геометрій” вимірювань (з різними калібруваннями і настройками);
- вибір необхідної геометрії вимірювань.

Робота з бібліотекою радіонуклідів забезпечує можливість:

- створювати на диску будь-яку кількість призначених для користувача бібліотек радіонуклідів;
- вносити, редагувати, додавати і видаляти записи з бібліотеки; переносити їх з бібліотеки в бібліотеку;
- друкувати зміст бібліотеки.

Якість вимірювань забезпечується за рахунок:

- коректного розрахунку і обліку похибок;
- автоматичного і інтерактивного контролю фону;
- перевірки працездатності за контрольним зразком;
- перевірки якості розкладання спектру за функціями відгуку;
- автопідкалібруванням спектрометра за енергіями;
- автокалібруванням за ефективністю реєстрації;
- видачею текстових інформаційних повідомлень оператору.

Програма передбачає можливість реалізації безперервної інформаційної технології “*вимірювання – обробка спектру – передача результатів в базу даних*»

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Ввімкнути спектрометр та подати оптимальну робочу напругу живлення на детектор.

2. Прогріти апаратуру на протязі 30 хв.
3. Запустити програму обробки спектрів АК1.
4. Використовуючи “Меню” Інструкції до АК1 (викликається натисканням клавіші F1 клавіатури ПК), ознайомитися з її можливостями.
5. Зчитати з диска спектр “*KalEn*”, обробити його і, використовуючи опцію “*Калібр. за енергіями*” з підпрограми “*Активність*”, здійснити калібрування спектрометра за енергією, вводючи відповідні табличні значення енергій ліній випромінювання.
6. Зчитати з диска спектр “*KalEff*”, обробити його, використавши геометрію 13.
7. Провести калібрування спектрометра за ефективністю реєстрації. Для цього увійти в підпрограму “*Налаштування*” – “*Ефективність*” – “*Розрахунок за активностями*” і здійснити необхідні процедури, вводючи номер геометрії, за якою проводилася обробка спектра, енергії ліній, обраховані та істинні активності ізотопів.
8. Знайти значення ефективностей реєстрації гамма-квантів для заданих енергій та геометрій експерименту. Для цього увійти в підпрограму “*Налаштування*” – “*Ефективність*” – “*Розрахунок за енергіями*” і ввести необхідні дані згідно з процедурою, запропонованою програмою.
9. Увійти в підпрограму “*Налаштування*” – “*Бібліотека*” – “*Перегляд*” та переглянути бібліотеку радіонуклідів.
10. Здійснити редагування бібліотеки радіонуклідів, для чого увійти в підпрограму “*Налаштування*” – “*Бібліотека*” – “*Редагування*”.
11. Здійснити практичне виконання процедур, передбачених можливостями ПЗ АК1, для чого перейти в підпрограму “*Зчитування спектра з диска*” підпрограми “*Файли*” і зчитати один із записаних на диску спектрів, обробити його, вивести отримані результати на друк у вигляді повного та скороченого протоколу.
12. Увійшовши в підпрограму “*Управління АМА*”, провести процедури підготовки аналізатора до набору спектру, запустити набір спектру, здійснити зчитування набраного спектру у пам’ять ПК, його обробку та записати на диск.
13. Вимкнути апаратуру.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3  
**ГРАДУЮВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ГАММА-  
СПЕКТРОМЕТРА ЗА ЕНЕРГІЄЮ. ВИЗНАЧЕННЯ  
ІНТЕГРАЛЬНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ, ЕНЕРГЕТИЧНОГО  
РОЗДІЛЕННЯ СПЕКТРОМЕТРА**

ПРИЛАДИ ТА МАТЕРІАЛИ:

- напівпровідниковий гамма-спектрометр на базі спектрометричного комплексу СУ-01Ф з детектором ДГДК-100В;
- джерела  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  та  $^{152}\text{Eu}$  з набору ОСГИ-3;
- інструкції з експлуатації приладів.

Градувальна характеристика спектрометра за енергією (ЕГХ) описує залежність між значеннями енергії моноенергетичного випромінювання, яке реєструється, і номерами каналів аналізатора, у яких зафіксовані відповідні ППП, і є однією з найважливіших його експлуатаційних характеристик. Саме точність і стабільність ЕГХ спектрометра визначає можливості і точність проведення якісного аналізу досліджуваних джерел випромінювання.

У випадку, коли вимірювання енергії поглинутих гамма-квантів не потребує високої точності, градувальну енергетичну характеристику спектрометра описують лінійною функцією. Побудована таким чином ЕГХ забезпечує вимірювання енергій гамма-випромінювання з похибкою близько 1 кеВ і її можна використовувати під час непрецизійних вимірювань.

В експериментах, де точність вимірювання енергії відіграє основну роль, ЕГХ для спектрометрів з НПД будують таким чином, щоб її похибка була значно меншою від інтегральної нелінійності (*інтегральна нелінійність* (ІНЛ) – це похибка градувальної характеристики, заданої у вигляді прямої лінії; її оцінюють за відхиленням ординат експериментальних точок від градувальної лінії).

При побудові енергетичної градувальної характеристики зазвичай використовують наступний підхід. Спочатку припускають, що два довільні (опорні) піки різних енергій лежать на прямій

$$E_j = B_1 + B_2 P, \quad (22)$$

коефіцієнти якої знаходять з таких рівнянь:

$$\begin{aligned} B_1 &= (E_1 P_2 - E_2 P_1) / (P_2 - P_1), \\ B_2 &= (E_2 - E_1) / (P_2 - P_1), \end{aligned} \quad (23)$$

де  $E_1$  і  $E_2$  – енергії опорних “реперних” піків;  $P_1$  і  $P_2$  – положення максимумів



цих піків на шкалі аналізатора. Зазвичай, значення енергій реперних піків вибирають на межах енергетичного діапазону, в якому виконують вимірювання ( $(P_1 - P_2) > 3500$  каналів), що значно збільшує точність побудови градувальної характеристики.

Потім за допомогою отриманого таким чином лінійного градування (22) розраховують положення максимумів піків  $P_{j, \text{розр}}$  з відомою енергією і будують залежність  $\sigma_j = (P_{j, \text{експ}} - P_{j, \text{розр}})$  як функцію номера каналу ( $P_{j, \text{експ}}$  – експериментально виміряні положення максимумів цих піків). Отриману сукупність значень  $\sigma_j$  апроксимують за методом найменших квадратів поліномом

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^m A_i P_j^{i-1}, \quad (24)$$

де  $m=2-5$ . Вибір  $m \leq 5$  пов'язаний з припущенням про плавну залежність градувальної характеристики від номера каналу (при  $m \geq 5$  можливі осциляції кривої між експериментальними точками). Отриману таким чином добавку додають до лінійної частини ЕГХ, що дозволяє точніше визначати енергії випромінювання.

Отже, ЕГХ спектрометра складається з двох частин: лінійної частини, яка визначається рівнянням (22), і нелінійної, яка описується поліномом (24):

$$E_j = B_1 + B_2 P + \sum_{i=1}^m A_i P_j^{i-1}, \quad (25)$$

або ж якою-небудь іншою залежністю.

Інтегральну нелінійність визначають за такою методикою. Використовуючи формулу (22), обчислюють значення енергій  $E_1, E_2, \dots, E_m$ , що лежать на лінійній характеристиці і відповідають номерам каналів  $P_1, P_2, \dots, P_m$ , у яких зафіксовано максимуми ППП. Далі обчислюють різниці  $\Delta E_1 = E_1 - E_{01}$ ,  $\Delta E_2 = E_2 - E_{02}$ ,  $\dots$ ,  $\Delta E_m = E_m - E_{0m}$ , де  $E_1, E_2, \dots, E_m$  – паспортні значення енергій відповідних ППП. Значення ІНЛ в кеВ визначають за формулою:

$$\text{ІНЛ} = \mp (\Delta E_{\max} + B_2 S_p), \quad (26)$$

де  $\Delta E_{\max}$  – максимальне значення з отриманих відхилень  $\Delta E_i$ ,  $S_p$  – похибка визначення максимуму ППП в каналах.

Відносна інтегральна нелінійність (ІНЛ') визначається за формулою у відсотках:

$$\text{ІНЛ}' = (\text{ІНЛ}/E) * 100\%, \quad (27)$$

де  $E$  – верхня границя енергетичного діапазону, для якого визначається градувальна характеристика.

Для визначення одного з основних параметрів спектрометра – *енергетичного розділення*, як і *чутливості реєстрації* – використовується стандар-

тний підхід, тобто експеримент проводять у певній геометрії, яка забезпечує єдність отриманих параметрів, що дає змогу створити класифікаційну сітку спектрометрів за цими параметрами.

Зазвичай, для зручності порівняння параметрів спектрометрів, енергетичне розділення гамма-спектрометрів прийнято визначати за другою реперною лінією ізотопу  $^{60}\text{Co}$  з енергією 1332,483 кеВ. Тому, коли говорять про енергетичне розділення спектрометра і не вказана енергія, для якої його визначали, то потрібно мати на увазі, що воно визначалося для випромінювання другої лінії  $^{60}\text{Co}$ .

Для дослідження параметрів спектрометра необхідно забезпечити таку геометрію експерименту, якій джерело гамма-квантів було б точковим. Для цього ізотоп  $^{60}\text{Co}$  з комплекту зразкових джерел для градування гамма-спектрометрів (наприклад, ОСГІ-3) встановлюють на відстані 250 мм від центра поверхні детектора по його осі (у цьому випадку джерело випромінювання вважають точковим.) Час набору апаратного спектра вибирають таким, щоб кількість імпульсів, зареєстрованих в ППП для гамма-квантів з енергією 1332,48 кеВ, була не меншою від 10000. Цим забезпечується необхідна точність обробки статистичних даних. У той же час, з метою уникнення впливу часової нестабільності спектрометра, тривалість набору спектру не повинна бути дуже великою.

Знявши енергетичний спектр, його обробляють, використовуючи пакет ПЗ АК1 або програму обробки аналізатора.

Для коректного визначення енергетичного розділення необхідно пам'ятати, що під час обробки ППП потрібно віднімати фоновий п'єдестал. Процедура визначення за отриманими таким чином значеннями вмісту каналів ППП полягає у наступному.

Використовуючи лінійну інтерполяцію, визначають номери каналів  $K_{\text{пв1}}$  і  $K_{\text{пв2}}$ , які відповідають напіввисоті огинаючої амплітудного розподілу ППП з енергією 1332,48 кеВ. Ширину ППП в каналах на  $0,5H$  (див. рис. 8) визначають за формулою

$$\Delta = K_{\text{пв2}} - K_{\text{пв1}}.$$

Використовуючи значення енергетичної ширини каналу  $B_2$ , обчислене за (23), обчислюють енергетичне розділення  $\eta$ , у кеВ:

$$\eta = B_2 \Delta.$$

У пакеті програмного забезпечення АК1 передбачене автоматичне визначення енергетичного розділення для кожного піка повного поглинання.

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Увімкнути напругу живлення блоків спектрометра та подати оптимальну

- робочу напругу живлення на детектор; прогріти апаратуру протягом 30 хв.
2. Проградувати спектрометр за енергією, для чого:
    - a) встановити на віддалі 0,25 м від поверхні детектора по його осі ізомери  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{60}\text{Co}$ ;
    - b) набрати апаратний спектр протягом 1000 с в режимі “живого” часу;
    - c) запустити програму обробки спектрів АК1;
    - d) перейти в підпрограму “Управління АМА-03Ф”, перевести набраний спектр з БПЗ аналізатора в ОЗП ПК та за допомогою підпрограми “Активність” обробити його;
    - e) зафіксувати напівширину ППП (енергетичне розділення) у каналах для кожної групи гамма-квантів;
    - f) увійти у підпрограму “Калібрування за енергією” (підпрограма “Активність”) і виконати градування спектрометра за енергією, використовуючи дві реперні лінії – з енергіями 661,662 кеВ (ізомер  $^{137}\text{Cs}$ ), та 1332,48 кеВ (ізомер  $^{60}\text{Co}$ ).
  3. Роздрукувати отримані результати.
  4. Розрахувати за (23) значення коефіцієнтів  $B_1$  і  $B_2$ , взявши для розрахунків відповідні значення центрів ППП (в каналах) з роздруку, і записати вираз (22) для лінійного градування спектрометра за енергією.
  5. Повторити процедури з п.2, а-е, використовуючи як джерело випромінювання ізомер  $^{152}\text{Eu}$ .
  6. Роздрукувати результати визначення енергій ліній випромінювання  $^{152}\text{Eu}$  за визначеним згідно п.4 лінійним градуванням.
  7. Провести аналогічно п.2,f градування спектрометра за багатьма реперними лініями. Дані щодо енергій ліній випромінювання  $^{152}\text{Eu}$  взяти з Додатку 1.
  8. Роздрукувати результати визначення енергій ліній випромінювання  $^{152}\text{Eu}$ , отриманими за градуванням за багатьма точками.
  9. Згідно інструкції з експлуатації приладів, які входять у склад спектрометра, вимкнути апаратуру.
  10. Порівняти результати визначення енергій ліній випромінювання  $^{152}\text{Eu}$  з використанням градування за двома (лінійна ГХЕ) та багатьма (ГХЕ з нелінійним членом) реперними лініями. Зробити висновки щодо точності градування в обох випадках.
  11. Розрахувати значення  $\sigma_j = (P_{j,\text{експ}} - P_{j,\text{розр}})$ , представити їх як функцію номера каналу і апроксимувати отримані дані поліномом (24) та визначити його коефіцієнти. Записати отриману ГХЕ у вигляді (25).
  12. Використовуючи формули (26) і (27), розрахувати інтегральну (ІНЛ) та відносну інтегральну (ІНЛ') нелінійності спектрометра.
  13. Використовуючи отримані значення енергетичного розділення спектрометра для кожної енергії, побудувати графік залежності енергетичного розділення від енергії.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4 ВИЗНАЧЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ РЕЄСТРАЦІЇ ДЕТЕКТОРА

### ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- гамма-спектрометр у складі спектрометричного комплексу СУ-01Ф та Ge(Li)-детектора типу ДГДК;
- джерело  $^{60}\text{Co}$  з набору ОСГІ-3.

Як відомо (див. відповідний розділ вище), чутливість реєстрації детектора є однією з його основних експлуатаційних характеристик і чисельно дорівнює площі (у  $\text{мм}^2$ ) вхідного вікна т. з. “ідеального” детектора зі 100% ефективністю реєстрації гамма-квантів, абсолютна ефективність реєстрації якого рівна абсолютній ефективності реального детектора. Значення чутливості  $S$  визначається за (20).

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Ввімкнути спектрометр, увімкнути напругу живлення детектора і прогріти їх протягом 30 хв.
2. На відстані 250 мм від поверхні детектора по його осі за допомогою диспансерного пристрою помістити джерело  $^{60}\text{Co}$  з комплекту ОСГІ-3.
3. Виставити час набору 1000 с в режимі “живого” часу.
4. Очистити вміст буфера БЗП аналізатора.
5. Зняти спектр випромінювання  $^{60}\text{Co}$ .
6. Знайти площу ППП  $N_{\text{ППП}}$  з енергією 1332,478 кеВ (на аналізаторі АМА-03Ф).
7. Повторити виміри п.3 три рази при аналогічних умовах вимірювань і знайти середнє значення площі ППП  $N_{\text{ППП}}$ .
8. За формулою (20) розрахувати чутливість реєстрації детектора.
9. Вимкнути напругу живлення детектора і аналізатора.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5 ГРАДУЮВАННЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА ЗА ЕФЕКТИВНІСТЮ РЕЄСТРАЦІЇ

### ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- гамма-спектрометр на базі спектрометричного комплексу СУ-01Ф з детектором ДГДК-100В;
- гамма-випромінювачі  $^{44}\text{Ti}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  та  $^{152}\text{Eu}$  з набору ОСГІ-3.

Побудова градуювальної характеристики спектрометрів за ефективністю реєстрації полягає в обчисленні значень абсолютної ефективності реєстрації  $\varepsilon_{j,\text{абс}}$  для всього енергетичного діапазону вимірювань й описуванні сукупності цих значень певною функціональною залежністю. Для цього необхідно набрати апаратурний спектр випромінювання джерела, яке містить реперні лінії у всіх ділянках робочого діапазону спектрометра, і визначити кількості імпульсів, зареєстровані у відповідних піках повного поглинання.

Згідно з визначенням, абсолютну ефективність реєстрації можна розрахувати за формулою:

$$\varepsilon_{j,\text{абс}} = \frac{N_{\text{ППП},j}}{A_{j0} \tau q \exp(-t \ln 2 / T_{1/2})}, \quad (32)$$

де  $N_{\text{ППП},j}$  – кількість зареєстрованих у відповідному  $j$ -му ППП імпульсів (без урахування фонових імпульсів) за час набору спектра;  $A_{j0}$  – активність випромінювання радіонукліда (паспортне значення) на момент атестації джерела;  $q_j$  – значення квантового виходу для гамма-квантів даної енергії (паспортне значення), що випромінюються при розпаді радіонукліда;  $t$  – час, що минув з моменту атестації зразкового джерела випромінювання до моменту вимірювання;  $T_{1/2}$  – період напіврозпаду радіонукліда-випромінювача.

Далі обчислені за допомогою методу найменших квадратів значення  $\varepsilon_{j,\text{абс}}$  апроксимуються поліномом

$$\ln \varepsilon_{j,\text{абс}} = \sum_{i=1}^m C_i (\ln E_i)^{i-1}, \quad (33)$$

де  $C_i$  – коефіцієнти полінома;  $m = 2-5$  – з умови припущення про плавну залежність ефективності реєстрації спектрометра від енергії.

У зв'язку зі складним характером залежності  $\varepsilon_{j,\text{абс}}$  від енергії, для точнішого градуювання увесь енергетичний діапазон іноді розбивають на декілька ділянок. Зазвичай, для апроксимації беруть не більше п'яти ділянок. По-

тім застосовують “зшивання” отриманих апроксимаційних залежностей для окремих ділянок.

Потрібно пам’ятати, що абсолютна ефективність реєстрації є функцією геометрії вимірювань. Тому визначену подібним чином градууювальну характеристику можна використовувати лише для вимірювань у цій же геометрії.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

Метою цієї роботи є градуювання гамма-спектрометра за ефективністю реєстрації для вимірювань у точковій геометрії. Для цього потрібно:

1. Ввімкнути напругу живлення спектрометра, високу напругу живлення детектора і прогріти прилад протягом 30 хв.
2. Виставити час набору спектра 2000 с в режимі “живого” часу.
3. Проградувати спектрометр за ефективністю реєстрації, для чого:
  - встановити за допомогою диспансерного пристрою джерело  $^{137}\text{Cs}$  на віддалі 250 мм від поверхні детектора по його осі та виконати набір спектру за 2000 с “живого” часу;
  - запустити програму обробки спектрів АК1;
  - перевести набраний апаратурний спектр в пам’ять ПК та обробити його, використавши підпрограму “Активність”;
  - видрукувати результати обробки за допомогою підпрограми “Друк”;
  - повторити вищевказані операції, використовуючи як джерела ізотопи  $^{60}\text{Co}$  і  $^{152}\text{Eu}$ ;
  - обчислити за формулою (32) значення абсолютної ефективності реєстрації  $\varepsilon_{j,\text{абс}}$  гамма-випромінювання в спектрометрі для всіх груп zareєстрованих гамма-квантів (значення відповідних квантових виходів  $q_j$  взяти з таблиці Додатку 1);
  - увійти в підпрограму “Налаштування” – “Ефективність” – “Ввід енергія-ефективність” та виконати градуювання спектрометра за ефективністю реєстрації, вводячи енергії гамма-квантів та відповідні обчислені ефективності;
  - записати отримане градуювання у файл, виконавши відповідні процедури, передбачені програмою.
4. Вимкнути високу напругу живлення детектора.
5. Вимкнути напругу живлення спектрометра.
6. Дослідити точність опису експериментально визначених значень ефективності реєстрації поліномом типу (33) в залежності від його порядку. Для цього:
  - запустити програму обробки спектрів “ACS”;
  - увійти в опцію “Налаштування” підпрограми “Спектр”;
  - ввести отримані нами дані розрахунків абсолютної ефективності реєстрації для кожної енергії у вигляді:

$$“Енергія” = “Ефективність” * “Вага”,$$

де “Вага” – статистична вага значення ефективності і рівна 1;

- проградувати спектрометр, використовуючи для опису введених даних поліном типу (33) другого порядку;
  - вивести на друк отриманий графік градувальної характеристики.
7. Здійснити аналогічні до описаних в п.6 операції, використовуючи для градування послідовно поліноми третього-п’ятого порядків.
  8. Проградувати спектрометр, використовуючи опис отриманих значень ефективності поліномами інших типів.
  9. Порівняти отримані результати градування ефективності реєстрації спектрометра з використанням поліномів типу (33) різних порядків. Зробити висновок про порядок полінома, за допомогою якого досягається найкраща апроксимація розрахованих значень  $\varepsilon_{j,abc}$ .

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

### ВИЗНАЧЕННЯ НИЖНЬОЇ МЕЖІ ВИМІРЮВАНОЇ АКТИВНОСТІ І ОПТИМАЛЬНОГО ЧАСУ НАБОРУ СПЕКТРУ

#### ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- гамма-спектрометр на базі спектрометричного комплексу СУ-01Ф з детектором ДГДК-100В;
- джерело  $^{60}\text{Co}$  з набору ОСГІ-3.

На точність проведення кількісного аналізу джерел ЙВ суттєво впливають умови вимірювань, насамперед – захист від зовнішнього фонового випромінювання та час набору спектра.

Відомо, що збільшення часу вимірювання (часу набору спектра) за решти рівних умов приводить до збільшення точності кількісного аналізу та до мінімізації впливу фонового випромінювання, і, відповідно, до зменшення нижньої межі вимірюваної активності. Взагалі кажучи, оцінка нижньої межі вимірюваної активності вимагає дуже акуратного підходу, особливо при вимірюваннях т. з. низькоактивних проб, де необхідно коректно враховувати технічні можливості спектрометра, умови вимірювань тощо. Тому, особливо в умовах радіаційної обстановки, що швидко змінюється, для усунення можливих похибок у кінцевих результатах необхідно регулярно контролювати рівень фону та перераховувати нижню межу діапазону вимірювань активності  $A_{\min}$ .

Визначення  $A_{\min}$  проводиться для найбільш інтенсивної або спеціально вибраної лінії досліджуваного спектру. Процедура визначення полягає у наступному.

Набирається спектр випромінювання джерела з потрібною  $j$ -лінією гамма-випромінювання та проводиться його обробка – визначаються положення центра ваги ППП  $E_{\text{макс}}$ , ширину на напіввисоті  $\Delta E$  та положення лівої  $n_{\text{л}}$  і  $n_{\text{п}}$  правої меж (канали  $n_{\text{л}}$  та  $n_{\text{п}}$ , які визначаються як положення каналів з енергіями  $E_{\text{макс}} \pm 2\Delta E$ ) піка, що відповідає гамма-випромінюванню з потрібною енергією. Потім набирається спектр фонового випромінювання, для визначеного інтервалу визначається кількість зареєстрованих імпульсів для кожної геометрії вимірювань та розраховується значення  $A_{\text{мін}}$  для гамма-випромінювання з енергією  $E_{\gamma,j}$ .

Загалом, для визначення  $A_{\text{мін}}$  використовують формулу:

$$A_{\text{мін}} = K \sqrt{N_{\phi}(t)/(p \times t)}, \quad (34)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який є критерієм знаходження активності;  $N_{\phi}$  – кількість зареєстрованих фонових імпульсів у межах визначеної ділянки спектру;  $p$  – чутливість детектора до випромінювання з даною енергією. Значення чутливості детектора  $p$  визначається як

$$p = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4, \quad (35)$$

де множники  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  враховують ймовірність поглинання кванта в детекторі, геометрію експерименту, поглинання та самопоглинання відповідно.

Однак на практиці для цих розрахунків часто користуються виразом, рекомендованим методикою повірки МИ 1916-88, розробленою НВО ВНИИФТРИ (Росія):

$$A_{\text{мін},j} = 200 \sqrt{\sum_{n_{\text{л}}}^{n_{\text{п}}} y_j / \varepsilon(E_j) t q_j}, \quad (36)$$

де  $y_j$  – кількість зареєстрованих імпульсів у  $j$ -каналі,  $\varepsilon(E_j)$  – ефективність реєстрації  $\gamma$ -квантів з енергією  $E_j$ ;  $q_j$  – квантовий вихід відповідної лінії випромінювання у відсотках.

Знаючи розраховану таким чином мінімальну активність за час вимірювань  $t_0$ , можна оцінити  $A_{\text{мін}}$  при іншому часі набору спектру  $t_1$ :

$$A_{\text{мін},1} = \sqrt{t_0/t_1} A_{\text{мін},0}. \quad (37)$$

Тобто зміна мінімального значення вимірюваної активності пропорційна кореню квадратному відношення між відповідними часами набору спектрів.

Дана методика визначення мінімального значення активності при фіксованому часі набору спектру справедлива лише при коректному врахуванні



фону та не залежить від того, чи є пік відповідної лінії в апаратурному спектрі фонового випромінювання, чи нема.

Визначивши  $A_{\text{мін},0}$  для  $\gamma$ -випромінювання з енергією  $E_{\gamma j}$  для часу вимірювань  $t_0$ , можна також оцінити необхідний час вимірювань  $t_{\text{необх}}$ , необхідний для визначення активності з точністю, не більшою від заданої величини, тобто з  $A_{\text{необх}}$ :

$$t_{\text{необх}} = t_0 (A_{\text{мін},0}/A_{\text{необх}})^2, \quad (38)$$

де  $t_0$  – час вимірювання для визначення  $A_{\text{мін}}$ .

Якщо ж необхідно визначити активність з певною похибкою, не більшою від заданої  $\delta A$ , то необхідно визначити похибку у визначенні площі ППП. Тоді час  $t_{\text{необх}}$ , необхідний для набору спектру, визначається як

$$t_{\text{необх}} = (\delta S/\delta A)\tau, \quad (39)$$

де  $\tau$  – час набору спектру з заданою похибкою визначення активності  $\delta A$ ;  $\delta S$  – похибка визначення площі піка повного поглинання  $S_{\text{ППП}}$ :

$$\delta S = \sqrt{S_{\phi} + S_{\text{ППП}}}.$$

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Ввімкнути напругу живлення спектрометра та детектора і прогріти протягом 30 хв.
2. За допомогою диспансерного пристрою на відстані 250 мм від поверхні детектора по його осі помістити джерело  $^{60}\text{Co}$ .
3. Встановити живий час набору 1000 с.
4. Зняти апаратурний спектр випромінювання  $^{60}\text{Co}$ .
5. Знайти центр ППП ( $n_{\text{ППП}}$ ) з енергією 1332,47 кеВ та енергетичне розділення  $\Delta E$  спектрометра для цієї енергії (на аналізаторі АМА-03Ф).
6. Виставити ліву і праву межі ділянки  $n_{\text{л}}$  і  $n_{\text{п}}$  згідно умови:

$$n_{\text{л}} = n_{\text{ППП}} - \Delta E \text{ і } n_{\text{п}} = n_{\text{ППП}} + \Delta E.$$

7. Очистити вміст буфера спектрометра.
8. Зняти джерело випромінювання  $^{60}\text{Co}$  і виміряти апаратурний спектр фонового випромінювання без захисту детектора від фону на протязі 1000 с. Визначити сумарну кількість імпульсів, зафіксованих спектрометром у виділеній області спектра.
9. За формулою (36) розрахувати нижню межу вимірюваної активності для різних геометрій вимірювань. Значення ефективностей реєстрації гамма-квантів для різних геометрій вимірювань отримати, увійшовши у під-

програму “Налаштування” – “Ефективність” – “Розрахунок за енергіями” програми АК1.

10. Закрити свинцевий захист вимірювальної камери спектрометра.
11. Набрати спектр фонового випромінювання за 1000 с і визначити вміст вибраної ділянки спектра.
12. Здійснити набір спектра за 2000 с, 3000 с, 4000 с, 6000 с, 10000 с.
13. Розрахувати нижню межу вимірюваної активності для кожного часу та для різних геометрій вимірювань.
14. Вимкнути напругу живлення детектора і аналізатор.
15. Розрахувати нижню межу вимірюваної активності для кожного терміну. Перевірити відповідність отриманих для кожного часу результатів з результатами, розрахованими за (37) при вихідній нижній межі  $A_{\min,0}$  для 10000 с.
16. Порівняти отримані результати для однакового часу вимірювань з захистом детектора від фонового випромінювання та без.
17. Виходячи з отриманих значень меж вимірюваної активності для вимірювань з захистом детектора від фонового випромінювання і без для часу набору спектра 1000 с, за формулою (38) розрахувати для різних геометрій вимірювань час, необхідний для отримання нижньої межі вимірюваної активності 1 Бк .

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7

### ОЗНАЙОМЛЕННЯ З ОСНОВАМИ ВІДБОРУ ПРОБ ҐРУНТІВ ТА ПІДГОТОВКИ ЇХ ДО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ

#### ПРИЛАДИ ТА МАТЕРІАЛИ:

- дозиметри ДРГ-01Т, СРП-68;
- пробовідбірник;
- муфельна піч;
- лабораторна вага;
- посудина Марінеллі 1 л;
- методичні рекомендації щодо оцінки радіаційної обстановки в населених пунктах.

Основними даними для оцінки радіаційної обстановки в населених пунктах є дані гамма-спектрометричного визначення вмісту  $^{137}\text{Cs}$  та радіоімічного –  $^{90}\text{Sr}$ , а також інших радіонуклідів в пробах ґрунтів.

Проби ґрунтів відбирають з урахуванням даних, отриманих під час визначення потужності дози гамма-випромінювання, за сіткою 100×100 м на всій території населеного пункту, а також даних поподвірних обстежень. У

цьому випадку в сільських населених пунктах з кількістю до 350 дворів відбирається 10 проб для гамма-спектрометричного аналізу та по одній пробі на кожні 35 дворів.

Згідно з “Методичними вказівками по оцінці радіаційної обстановки ...”, затвердженими Українською міжвідомчою комісією радіаційного контролю (УМКРК) 12.10.1991 р., та “Методики комплексного радіаційного обстеження забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи територій”, вибираючи точки відбору проб, необхідно домагатися рівномірного їх розміщення у межах населеного пункту. У цьому випадку для відбору проб бажано вибирати ділянки зі значеннями потужностей доз гамма-випромінювання, які найчастіше зустрічаються під час фонових гамма-обстеження території цього населеного пункту – на присадибних ділянках, рілнихих та цілинних землях, у садах, скверах, парках та інших місцях, де неможливе переміщення поверхневого шару ґрунту.

Пробу рекомендовано відбирати методом “конверта” зі стороною 5 м на ділянках, віддалених від найближчої будови на відстань не менше двох її висот. Точки відбору проб наносять на карту-схему населеного пункту. У місці відбору проб попередньо вимірюють потужність дози гамма-випромінювання на висотах 0,03-0,04 м та 1 м над поверхнею ґрунту. Пробу відбирають на ділянці, де результати таких вимірів на висоті 1 м і на поверхні ґрунту відрізняються не більше ніж у 1,3 рази.

Відбір проби виконують пробовідбірником з відомою площею відбору на глибину 0,2 м. Об’єм відібраної проби повинен становити не менше 2000-2500 см<sup>3</sup> і складатися з п’яти або більше окремих відборів (уколів), які висипаються в одну місткість (поліетиленовий мішок). До кожної проби вкладається паспорт, у якому записують дані, які характеризують пробу (див. ДОДАТОК 2). Аналогічні дані заносяться в журнал обліку проб.

Для підготовки проби до гамма-спектрометричного аналізу її необхідно висушити до повітряно-сухого стану, видалити з неї кам’янисті та тверді органічні домішки, старанно подрібнити (за допомогою спеціальних лабораторних млиноків) та перемішати з метою гомогенізації. Усю пробу зважують; з неї відбирають наважку потрібного об’єму для вимірювань, яку також зважують з заданою точністю. Масу досліджуваної проби і точність її визначення визначає об’єм вимірювального контейнера. Зазвичай, при дослідженнях об’єктів довкілля як вимірювальний контейнер використовують посудину Маріселлі об’ємом 1л або відкалібровану посудину DENTA потрібного об’єму.

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Визначити місце відбору проби (ділянку, на якій буде відбиратися ґрунт для досліджень).
2. Провести заміри величини дози на висотах – 4 см та 1 м за допомогою

дозиметрів ДРГ-01Т та СРП-68-01.

3. Відмітити місця відбору індивідуальних проб (уколів).
4. Здійснити відбір проб та зсипати відібраний ґрунт до пакета.
5. Заповнити паспорт на пробу ґрунту.
6. Очистити пробу від мінеральних та органічних домішок, висушити її в печі до повітряно-сухого стану. В ступці подрібнити ґрунт проби до стану, коли діаметр частинок не перевищує 1мм.
7. Старанно перемішати пробу, зважити її з точністю до 1 г.
8. Відібрати наважку для аналізу в посудину Марінеллі; зважити її з точністю до 1 г ( у випадку використання посудини DENTA точність зважування – 0,1 г)

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8**  
**ЯКІСНИЙ ТА КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ПРОБ ҐРУНТІВ.**  
**ВИЗНАЧЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ**  
**РАДІОЦЕЗІЄМ.**

**ПРИЛАДИ ТА МАТЕРІАЛИ:**

- гамма-спектрометр на базі спектрометричного комплексу СУ-01Ф з детектором ДГДК-100В;
- проба ґрунту;
- інструкції з експлуатації приладів.

Питома активність ізотопів джерела гамма-випромінювання та щільність забрудненості території визначаються згідно формул (1) і (2) відповідно.

**ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:**

1. Ввімкнути живлення блоків спектрометра, виставити оптимальну робочу напругу живлення детектора; прогріти апаратуру протягом 30 хв.
2. Запустити програму керування експериментом АК1 на ПК Іскра-1030-М. Ввійти в підпрограму управління аналізатором та здійснити на ступні операції:
  - провести очистку буфера пам'яті (БПЗ) АМА-03Ф;
  - виставити нижню (200 мВ) та верхню (10250 мВ) межі дискримінації сигналів (увійти в режим “Діалог” на клавіатурі АМА-03Ф);
  - ввести дату вимірювань;
  - виставити час набору спектру 10800 с в режимі “живого” часу;
  - запустити набір спектру фонового випромінювання при закритому захисті.
3. Після закінчення набору спектру ввести його в оперативну пам'ять ПК

- та провести обробку за допомогою підпрограми “Активність”.
4. Провести запис результатів обробки спектру фону на диск. Для цього увійти в підпрограму “Файли” – “Друге меню” – “Налаштування” – “Запис фону на диск” і виконати необхідні процедури.
  5. Зважити підготовлену до гамма-аналізу пробу ґрунту з точністю до 1 г, відібрати з неї наважку об’ємом 1 л, визначити її вагу.
  6. Завантажити досліджувану наважку ґрунту в посудину Марінеллі.
  7. Встановити пробу в детекторний блок спектрометра.
  8. Очистити БПЗ аналізатора та запустити набір спектру проби.
  9. Ввійти у підпрограму “Параметри для активності”, ввести вагу досліджуваної проби, сумарну вагу і площу відбору (площу поверхні ґрунту, з якої була відібрана проба) та номер геометрії вимірювань.
  10. Ввести режим вирахування фону в підпрограмі “Налаштування розр. акт.”.
  11. Використовуючи відповідні підоболонки пакету АК1, після закінчення набору перевести спектр з буфера аналізатора АМА-03Ф4 в оперативну пам’ять комп’ютера та провести його обробку. При необхідності підкоригувати градування спектрометра за енергією, використавши підпрограму “Градування за енергією” оболонки “Активність”.
  12. Роздрукувати результати вимірювань.
  13. Вимкнути живлення апаратури.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9 ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОСТІ ПРИРОДНИХ РАДІО-НУКЛІДІВ У БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛАХ ЗА ДОПОМОГОЮ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРІВ

### ПРИЛАДИ ТА МАТЕРІАЛИ:

- гамма-спектрометр на базі спектрометричного комплексу СУ-01Ф з детектором ДГДК-100В;
- проба будівельного матеріалу;
- інструкції з експлуатації приладів.

Згідно з діючими в Україні нормами і правилами зниження рівня йонізуючих випромінювань природних радіонуклідів (ПРН) у будівництві (ДБН В.1.4-0.01-97 – ДБН В.1.4-2.01-97), одним з основних регламентованих радіаційних параметрів у будівництві є *ефективна сумарна питома активність*  $A_{\text{еф}}$  природних радіонуклідів  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  в сировині та будівельних матеріалах. Значення цього параметра визначається як

$$A_{ef} = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085 A_K, \text{ Бк/кг}, \quad (40)$$

де  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$ ,  $A_K$  – питомі активності  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , відповідно; 1,31 і 0,085 – вагові коефіцієнти.

Основні труднощі у визначенні кількісних радіологічних характеристик об'єктів довкілля зумовлені достовірністю визначення активності  $^{226}\text{Ra}$  і  $^{232}\text{Th}$ , тоді як з визначенням вмісту в них  $^{40}\text{K}$  ніяких проблем не виникає. Ці труднощі пов'язані як з порушенням радіоактивної рівноваги у ланцюгах розпаду  $^{232}\text{Th}$  і  $^{238}\text{U}$  внаслідок наявності в них газоподібних ізотопів (насамперед радону) та інтерференцією гамма-ліній, які використовуються для ідентифікації цих радіонуклідів та розрахунку їхньої активності, так і з необхідністю вимірювання слабких піків на незначному фоні.

Остання проблема вирішується зниженням рівня фонового опромінення детектора шляхом використання спеціального (свинцевого або чавунного) захисту детектора та вибором часу набору спектру, який забезпечує отримання статистично забезпечених ППП. Рекомендована товщина стінок захисту має бути не меншою за 10 см для свинцю та 20 см для чавуну. Для зменшення вкладу характеристичного випромінювання матеріалу захисного кожуха його внутрішню поверхню облицьовують матеріалом з меншим атомним номером – зазвичай шарами кадмію товщиною 1 мм і міді товщиною 0,2 мм. Оскільки фонові характеристики детектора при такому захисному оточенні за відсутності радіоактивного забруднення його поверхні з часом змінюються дуже слабо, вимірювання фонового спектра можна проводити один раз в місяць. При цьому необхідно здійснювати щоденний оперативний контроль постійності фону.

При вимірюваннях низькоактивних проб часто виникає необхідність проводити довготривалі неперервні дослідження, що накладає додаткові вимоги щодо забезпечення стабільності спектрометра. Оскільки часто причиною “розширення” піків є зміна температури, бажано підтримувати у приміщенні стабільний температурний режим з коливаннями не більше  $\pm 2^\circ \text{C}$ .

Інтерпретація результатів набраних спектрів ускладнюється тим, що в них присутні гамма-лінії багатьох ізотопів ПРН у досить низьких концентраціях, причому досить часто з порушеннями радіоактивної рівноваги між членами відповідних рядів. У такому випадку необхідно проводити додатковий аналіз отриманих результатів автоматизованих розрахунків для радіонуклідів обох рядів.

#### Визначення активності $^{232}\text{Th}$

Питому активність  $^{232}\text{Th}$  доволі надійно можна визначити за лініями гамма-випромінювання  $^{228}\text{Ac}$  з енергіями 911,1 і 969,1 та 338,4 кеВ. У перші дві лінії практично не вносить вклад випромінювання інших ізотопів, тоді як третя інтерферує з зазвичай дуже мало інтенсивною лінією випромінюванням

$^{223}\text{Ra}$  – члена уран-актинієвого ряду, елементи якого можуть бути присутніми у вимірюваній пробі. Визначені за цими лініями значення активності у межах похибки вимірювань повинні співпадати. Для розрахунків можна використувати також лінії випромінювання  $^{212}\text{Bi}$  ( $E=727,2$  кеВ) та  $^{208}\text{Tl}$  (лінії з енергіями 583,1, 860,4 і 2614,5 кеВ).

У випадку радіоактивної рівноваги присутніх у пробі ізотопів торієвого ряду для питомих активностей вищевказаних нуклідів повинне виконуватися співвідношення:

$$A_{^{232}\text{Th}} = A_{^{228}\text{Ac}} = A_{^{212}\text{Bi}} = 2,78 A_{^{208}\text{Tl}}.$$

Якщо ця рівність порушується, тобто

$$A_{^{228}\text{Ac}} > A_{^{212}\text{Bi}} = 2,78 A_{^{208}\text{Tl}},$$

то це свідчить про порушення радіоактивної рівноваги.

#### Визначення активності $^{226}\text{Ra}$

Питому активність наявного у досліджуваному матеріалі  $^{226}\text{Ra}$  можна визначати за гамма-лінією з енергією 186,22 кеВ, однак у її інтенсивність у більшості випадків дає внесок випромінювання  $^{235}\text{U}$ . Неврахування цього вкладу зазвичай приводить до завищення отриманих результатів, оскільки, як показали дослідження рівноважних сумішей природних радіонуклідів, вклад радію у сумарну інтенсивність піка з енергією 186 кеВ складає  $0,592 \pm 0,005$ . При збереженні у досліджуваному матеріалі радіоактивної рівноваги доцільно для визначення вмісту у ньому  $^{226}\text{Ra}$  використовувати лінії випромінювання  $^{214}\text{Bi}$  (з енергіями 1120,4; 1764,5 і 609,3 кеВ), а також  $^{214}\text{Pb}$  (з енергіями 295,2 і 351,9 кеВ). У цьому випадку повинна виконуватися рівність:

$$0,592 A_{^{226}\text{Ra}}^{186} = A_{^{214}\text{Pb}} = A_{^{214}\text{Bi}},$$

Треба також мати на увазі, що на інтенсивність ліній випромінювання  $^{214}\text{Pb}$  можуть впливати вклади від  $^{212}\text{Pb}$  (член торієвого ряду) та  $^{211}\text{Bi}$  (член уран-актинієвого ряду). Якщо має місце нерівність

$$0,592 A_{^{226}\text{Ra}}^{186} < A_{^{214}\text{Pb}} = A_{^{214}\text{Bi}},$$

то це свідчить про збіднення матеріалу на вміст ізотопів урану. Якщо ж

$$0,592 A_{226Ra}^{186} > A_{214Pb} = A_{214Bi},$$

то це є свідченням про збагачення досліджуваної проби щодо  $^{235}\text{U}$  або ж про еманування (виділення) з неї радону. У останньому випадку, щоб застрахуватися від найгіршого варіанту співпадіння сильного еманування радону і збіднення проби щодо  $^{235}\text{U}$ , рекомендується брати результат визначення вмісту  $^{226}\text{Ra}$  за лінією 186 кеВ без понижувального коефіцієнта 0,592.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Провести процедури, аналогічні до п.1– п.12 лабораторної роботи 11.
2. Розрахувати ефективну питому активність ПРН у будматеріалі за формулою (40).
3. Визначити клас будівельного матеріалу (див. Додаток 3).

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

#### **ТЕМА РОБОТИ: ОСНОВНІ РАДІОМЕТРИЧНІ ТА ДОЗИМЕТРИЧНІ ПРИБАДИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ.**

#### ПРИБАДИ ТА МАТЕРІАЛИ:

- дозиметри та дозиметри-радіометри: ДРГ-01Т1, СРП-68-01, СРП-88Н, ДРГЗ-02, комплект ДК-0,2 з зарядним пристроєм ЗД-6;
- свинцевий послаблювач;
- закриті джерела ізотопів  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  в контейнерах;
- паспорти, технічні описи і інструкції з експлуатації приладів.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Інформацію про радіоактивні джерела іонізуючих випромінювань отримують за допомогою приладів детектування іонізуючих випромінювань (ІВ), до яких відносяться:

1. дозиметричні прилади, які призначені для отримання інформації про експозиційну дозу, потужність експозиційної дози  $P$  і про енергію, що переноситься іонізуючим випромінюванням;
2. радіометричні прилади, призначені для вимірювання активності нуклідів  $A$ , числа  $N$  та густини потоку  $\Phi$  частинок або квантів;



3. спектрометри іонізуючого випромінювання для отримання інформації про якісні та кількісні характеристики джерел ІВ.

В завдання радіаційної безпеки входить встановлення шкідливого впливу іонізуючого випромінювання на людину і їх обмеження. При цьому беруть до уваги той факт, що різні види випромінювання, завдяки різниці в їх проникаючій здатності, по різному впливають на тканини організмів.

Ступінь, глибина і форма променевих уражень біологічних об'єктів в першу чергу залежить від величини поглинутої енергії випромінювання. Для характеристики цього показника використовують поняття *поглинутої дози*, під якою розуміють кількість енергії, поглинутої одиницею маси опромінюваної речовини, і яка є основною дозиметричною величиною. Для гамма-випромінювання поглинута доза  $D$  рівна енергії  $dE_D$ , поглинутої елементом маси  $dm$ :

$$D = \frac{dE_D}{dm} = \frac{dE_D}{\rho dV}. \quad (1)$$

Одиницею поглинутої дози в системі СІ є грей (Гр.). 1Гр дорівнює 1Дж енергії, поглинутого 1кг речовини. Позасистемною одиницею поглинутої дози є рад:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр} = 0,01 \text{ Дж/кг}; 1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}.$$

Однак в понятті поглинутої дози не враховується різна здатність окремих видів іонізуючого випромінювання пошкоджувати живі тканини. Для врахування цих властивостей різних видів ІВ вводиться спеціальний коефіцієнт  $k$  (т. з. коефіцієнт якості ІВ), на який потрібно помножити отриману величину поглинутої дози. Прийнято використовувати значення  $k = 1$  для гамма- та бета-випромінювання та  $k = 20$  для альфа-випромінювання. Отримана таким чином величина отримала назву *еквівалентної дози*  $H$ , яка основною дозиметричною величиною в області радіаційної безпеки:

$$H = Dk. \quad (2)$$

У системі СІ одиницею *еквівалентної дози* є зіверт (Зв), а позасистемною – бер:

$$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ бер}.$$

Для оцінки дозиметричних характеристик гамма-випромінювання в повітрі користуються поняттям *експозиційної дози*  $X$ :

$$X = \frac{dQ_x}{dm} = \frac{dQ_x}{\rho dV}, \quad (3)$$

де  $dQ_x$  – сума електричних зарядів одного знаку всіх іонів в елементі об'єму повітря  $dV$  масою  $dm$ , утворених електронами емісії, викликаних гамма-квантами, при умові повного гальмування. В міжнародній системі СІ одиниця експозиційної дози - кулон на кілограм (Кл/кг). Іншими словами, експозиційна доза гамма- (чи рентгенівського) випромінювання величиною 1 Кл/кг – це доза опромінення, при дії якої на сухе атмосферне повітря масою один кілограм при нормальних умовах в ньому утворюються заряджені частинки з сумарним зарядом в 1 кулон електрики для кожного знаку.

Позасистемною одиницею експозиційної дози рентгенівського і гамма випромінювання є рентген (Р), який рівний  $2,58 \times 10^{-4}$  Кл/кг.

Потужність експозиційної дози  $P$  визначається як

$$P = \frac{dX}{d\tau} \quad (4)$$

і в системі Сі вимірюється в кулонах на кілограм за секунду. Позасистемною одиницею потужності експозиційної дози є рентген на годину, Р/год та її похідні (мкР/год, мР/год. та інші).

Якщо експозиційна і поглинута дози вимірюються в позасистемних одиницях (рентген і рад відповідно), то співвідношення між ними описується формулою (емпіричною)

$$D_{експ} = 0.877 D_{погл} \quad (5)$$

Для вимірювання потужності дози гамма-випромінювання використовують прилади СРП-68-01, СРП-88Н, ДРГЗ-02(03), ДРГ-01Т1, „Прип'ять”, „СТОРА” та їм подібні. Принцип роботи перших трьох побудованих на основі сцинтиляційного методу реєстрації, а ДРГ-01Т1, „Прип'яті” та „СТОРИ” – іонізаційного. Сцинтиляційний метод дозиметрії ґрунтується на здатності іонізуючого випромінювання збуджувати атоми і молекули сцинтилятора, перехід яких в основний стан супроводжується випромінюванням світла, а іонізаційний – на безпосередній іонізації молекул газу-наповнювача газорозрядного детектора. Зараз є дозиметри, робочою речовиною іонізаційного детектора яких є напівпровідник (дозиметри СЕРВІС, КАДМІЙ).

Перераховані прилади частково відрізняються призначенням, діапазоном використання, технічними параметрами та конструкцією.

СРП-68-01 призначений для пошуків радіоактивних руд по їх гамма-випромінюванню, для радіометричної зйомки місцевості, радіометричного

контролю кар'єрів і гірничих виробіток. Може також використовуватись для експресної оцінки величин об'ємної і питомої активності гамма-випромінюючих нуклідів в харчових продуктах. Дозволяє проводити виміри потоку гамма-випромінювання в межах від 0 до 10000 с і потужності експозиційної дози в межах від 0 до 3000 мкР/год.

СРП-88Н призначений для опосередкованих вимірювань радіоактивності гірських порід і руд по їх гамма-випромінюванню при радіометричній зйомці місцевості. Дозволяє вимірювати потік гамма-випромінювання в межах від 10 до  $3 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ .

ДРГЗ-02 призначений для вимірювань потужності експозиційної дози рентгенівського і гамма-випромінювання в межах від 0 до  $2,58 \times 10^{-8} \text{ А/кг}$  (від 0 до 100 мкР/с)

ДРГЗ-01Т1 призначений для вимірювань потужності експозиційної дози, для контролю ефективності біологічного захисту і т.п. в широкому діапазоні. Забезпечує вимірювання потужності експозиційної дози в межах від 0,010 мкР/год до 9,999 Р/год. В режимі "пошук" дозволяє вимірювати потужність дози до 99,99 Р/год. Цей дозиметр є професійним і вважається основним при проведенні дозиметричних вимірювань.

Актуальним питанням є також визначення індивідуальних експозиційних доз, одержаних персоналом чи населенням за певний період часу. На сьогоднішній день існує багато варіантів індивідуальних дозиметрів. Переважають тут дозиметри з фотографічним методом детектування (напр., касети ИФКУ та НД-11), хімічні дозиметри (напр., ДП-70 та ДП-70Н) і дозиметри ДП-22В, ДП-24, ДК-0,2 та інші. Останні дозиметри працюють на принципі реєстрації гамма-випромінювання з допомогою іонізаційної камери.

Так комплект дозиметрів ДК-0,2 призначений для визначення індивідуальних експозиційних доз в межах від 0 до 200 нР.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Вивчити паспорти та технічні описи по експлуатації приладів, що використовуються в роботі;
2. При підключенні приладів ДРГ-01Т1, ДРГЗ, СРП-68-01, СРП-88Н вважати на полярність під'єднання до блоку низьких напруг, величину робочої напруги;
3. Включити прилади, провести перевірку їх працездатності згідно технічних описів;
4. Проводячи виміри фону, виміри експозиційних доз від джерел випромінювання (з використанням свинцевого послаблювача і без), вважати на правила переходу від мкР/сек до мкР/год та від кількості зареєстрованих імпульсів в с до доз в мкР/год; Порівняти отримані результати при вимірюваннях в однаковій геометрії з однаковим джерелом випромінювання на різних приладах;

5. Здати джерела випромінювання, вимкнути прилади;
6. Використовуючи зарядний пристрій ЗД-6, провести зарядку дозиметрів з комплекту ДК-0,2. Використовуючи джерела ІВ та свинцеві послаблювачі, визначити дозу опромінення за 1 хв в гамма-полях різної потужності.

#### Результати вимірювань та розрахунків подати у таблиці

Об'єкт	Прилад				
Фон					
$^{60}\text{Co}$ (до свинцевого послаблювача)					
$^{60}\text{Co}$ (після свинцевого послаблювача)					
$^{137}\text{Cs}$ (до свинцевого послаблювача)					
$^{137}\text{Cs}$ (після свинцевого послаблювача)					

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11

#### ТЕМА РОБОТИ: ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ БЕТА-АКТИВНОСТІ ПРОБ З ДОПОМОГОЮ БЕТА-РАДІОМЕТРА РКБ4-1ЕМ.

##### ПРИЛАДИ ТА МАТЕРІАЛИ:

- бета радіометр РКБ4-1ЕМ;
- досліджувані проби;
- вага;
- інструкція з експлуатації приладу.

##### Теоретичні відомості

Бета-радіометр РКБ4-1ЕМ призначений для проведення експресних вимірювань методом безпосередньої оцінки питомих та об'ємних активностей бета-випромінюючих нуклідів проб.

Як детектор в радіометрі використовується блок детектування БДЖБ-02 на основі об'ємно-активованих пластмасових пластин-світловодів. При попаданні бета-частинки в товщу пластини нею втрачається енергія, яка викликає спалах сцинтиляції. Світлові імпульси, які виникають при цьому, реєструються електронною схемою реєстрації, формуючи відповідні імпульси електричного струму. Частота слідування цих імпульсів пропорційна інтенсивності опромінення детектора бета-випромінювання проби.

Робота радіометра полягає в наступному. При натисканні кнопки "Сброс" запускається таймер; через 3 с на лічильник поступає команда, яка запускає режим набору інформації. Час набору імпульсів може бути заданий як 10 с або 100 с. Після закінчення набору відбувається перехід в режим виводу накопиченої інформації, який триває 10 с. В результаті цього на табло індикації виводиться чотиризначне число - кількість імпульсів, зареєстрованим блоком детектування приладу за час експозиції. Через 10 с таймер видає сигнал скидання інформації, яка записана в лічильнику; цей сигнал переводить схему реєстрації в режим набору інформації.

Описаний цикл вимірювань повторюється автоматично. Крім автоматичного режиму, бета-радіометр дає можливість ручного керування режимом набору та виводу інформації. Передбачена також можливість підключення до пульту самописця або цифро-друкуючого пристрою БЗ-15.

Живлення всіх вузлів радіометра здійснюється або від мережевого блоку живлення, або ж від акумуляторної батареї, яка заряджається автоматично від зарядного пристрою сіткового блоку живлення.

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ:

Визначення мінімального значення швидкості рахунку.

Мінімальна швидкість рахунку, яку можна зареєструвати на установках з постійним фоном (УПФ), при вимірюванні "товстих" проб визначається як

$$N_{ef}^{\min} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4N_{\phi} \cdot t \cdot \delta^2}}{2t \cdot \delta^2}, \quad (1)$$

де  $N_{\phi}$  - швидкість рахунку фону;  $t$  - час вимірювань (не більше 1000 сек.); - задана відносна середньоквадратична похибка вимірювань.

Фон можна рахувати стабільним (постійним) в тому випадку, коли фонові відліки установки розподілені за законом Пуассона. Тоді середня швидкість рахунку ФОНУ  $\bar{N}_{\phi}$ , яка є параметром такого розподілу, є величиною постійною і не залежить від часу. Тому установки зі стабільним у вказаному розумінні Фоном і отримали назву установок з постійним фоном.

Фон установки можна вважати постійним, якщо виконується наступна умова:

$$S^2 \leq \frac{\overline{N}_\phi}{t}, \quad (2)$$

де  $S^2$ ,  $\frac{\overline{N}_\phi}{t}$  - емпірична та теоретична дисперсії швидкості рахунку. Емпірична дисперсія  $S^2$  та середнє значення швидкості рахунку Фону розраховують з ряду значень швидкостей рахунку фону, отриманого в результаті  $l$  вимірів, згідно з формулою

$$S^2 = \frac{1}{l-1} \sum_{i=1}^l (N_i^\phi - \overline{N}_\phi)^2, \quad (3)$$

де

$$\overline{N}_\phi = \frac{\sum_{i=1}^l N_i^\phi}{l}. \quad (4)$$

Якщо ж значення емпіричної дисперсії помітно перевищує теоретичну дисперсію, то це свідчить про непостійність фону.

Для оцінки величини відхилення вимірюваного значення від найбільш ймовірного використовуються наступні поняття:

- середня квадратична похибка результату окремого виміру

$$\Delta N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (N_i - \overline{N})^2}{l-1}}; \quad (5)$$

- середньоквадратичне відхилення середнього арифметичного (стандартна похибка)

$$\Delta \overline{N} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (N_i - \overline{N})^2}{l(l-1)}}; \quad (6)$$

- відносна середньоквадратична похибка вимірювання

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (N_i - \overline{N})^2}{l-1}} \cdot \frac{1}{\overline{N}} \quad (7)$$

де  $N_i$  - швидкість рахунку в кожному вимірі. Справджується також співвідношення

$$\Delta N_i \cong \sqrt{N}, \Delta \bar{N} \cong \sqrt{\frac{\bar{N}}{l}}, \quad (8)$$

причому ці співвідношення тим точніші, чим більша кількість вимірів.

Якщо відомо, що випадкова величина підкоряється розподілу Пуассона, то можна оцінити похибку результату одиничного виміру. Поклавши  $N = \bar{N}$ , а  $\Delta N = \sqrt{N}$ , та врахувавши, що  $N_{ef} = N_{ef+\phi} - N_{\phi}$ , отримаємо

$$\Delta N_{ef} = \sqrt{(\Delta N_{ef+\phi})^2 + (\Delta N_{\phi})^2}. \quad (9)$$

Враховуючи, що обидві величини підкоряються розподілу Пуассона, на основі(8) отримуємо:

$$\Delta N_{ef} = \sqrt{\bar{N}_{ef+\phi} + N_{\phi}}. \quad (10)$$

Загальна відносна похибка визначення питомої активності "товстих" препаратів при однаковому часі експозиції  $t$  при замірі Фону та препарату розраховується за формулою:

$$\delta = \sqrt{\frac{N_{ef} + 2N_{\phi}}{N_{\phi} \cdot t}}. \quad (11)$$

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Ввімкнути радіометр та провести перевірку його робочої здатності згідно інструкції з експлуатації.
2. Помістити контрольне джерело  $^{137}\text{Cs}$  з комплекту поставки в гніздо на кришці, виміряти швидкість рахунку та порівняти отримані дані з занесеними в формуляр з врахуванням розпаду (активність КД на липень 1988 р. - 1223Бк). В випадку розбіжності - добитися співпадіння, не перевищуючого розбіжності в 3% з допомогою ручок "корекція грубо, плавно".
3. Вимкнути радіометр, помістити в робочий об'єм блоку детектування "фонову" пробу, включити радіометр та виміряти "фонову" швидкість рахунку.

ку  $N_{\phi}$  (Фонова проба - проба того ж типу, що й досліджувана, але не бета-активна).

4. Виключити радіометр, вийняти “фонову” пробу, помістити в робочий об’єм досліджувану пробу, ввімкнути радіометр та визначити сумарну швидкість рахунку фону і проби  $N_{ef+\phi}$ .
5. Розрахувати швидкість рахунку від контрольованої проби  $N_{ef}$ :

$$\overline{N}_{ef} = \overline{N}_{ef+\phi} + \overline{N}_{\phi}.$$

Визначити об’ємну (питому) активність проби  $A$  за формулою:

$$A = \overline{N}_{ef} / (P \cdot m),$$

де  $P$  - коефіцієнт чутливості для даного виду проб (дається в паспорті на прилад, ст. 5);  $m$  - маса проби.

При проведенні досліджень не можна допускати включення радіометра з відкритою кришкою, горловиною або відкритими штуцерами блока детектування.

При необхідності робоча камера блоку детектування промивається з метою усунення її забруднення. Необхідно пам’ятати, що температура промивних розчинів та води, а також вимірюваних проб, не повинна відрізнятися від температури навколишнього середовища більше, ніж на  $5^{\circ}\text{C}$ .

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

### **ТЕМА РОБОТИ: ВИЗНАЧЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДИ І ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ БЕТА-АКТИВНИМИ РАДІОНУКЛІДАМИ. КОНТРОЛЬ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХНІ З ДОПОМОГОЮ РАДІОМЕТРА “БЕТА”**

#### ПРИЛАДИ ТА МАТЕРІАЛИ:

- радіометр “Бета”;
- проба харчових продуктів;
- інструкція та паспорт по експлуатації приладу.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Радіометр бета-випромінювання "БЕТА" призначений для контролю забрудненості води, продуктів харчування бета-активними радіонуклідами, а також для контролю бета-радіоактивного забруднення різних поверхонь.



Радіометр "Бета" використовується для експресного визначення об'ємної і питомої активності бета-випромінюючих нуклідів рідких, сипучих речовин методом "прямого" вимірювання "товстих" проб.

Як детектор іонізуючого випромінювання бета-активних радіонуклідів у радіометрі використовується газорозрядний лічильник СБТ-10. При появі в робочому об'ємі лічильника іонізуючих частинок в ньому розвивається електричний розряд, внаслідок чого на виході лічильника з'являються імпульси, кількість яких пропорційна величині радіаційного ефекту. Кількість імпульсів відображається на цифровому рідкокристалічному індикаторі. Для зменшення впливу на результати вимірювань зовнішнього гамма-випромінювання блок детектора і досліджувані проби розміщуються в свинцевому будиночку.

Основні технічні характеристики, призначення органів керування і режими роботи радіометра вказані в паспорті до приладу.

Радіометр "БЕТА" може застосовуватись в двох варіантах:

- 1- без свинцевого будиночка для контролю забрудненості різних поверхонь;
- 2- з свинцевим будиночком для контролю радіаційної чистоти харчових (чи інших) продуктів.

## І. КОНТРОЛЬ ЗАБРУДНЕНОСТІ ПОВЕРХОНЬ

До блоку індикатора під'єднуємо блок живлення і блок детектування. Встановивши на блок детектора захисну сітку, включаємо блок індикатора, встановлюємо час експозиції  $t=1\text{с}$  (перший режим роботи). Розмістивши блок детектора на віддалі не більше 10 мм від досліджуваної поверхні, знімаємо кількість відліків  $N$ , яка в даному випадку рівна швидкості відліку  $n$  ( $t=1\text{с}$ ). Плавню переміщуючи блок детектора над контрольованою поверхнею, визначаємо її ділянки, які відрізняються підвищеним значенням швидкості відліку. При цьому слід не допускати, щоб блок детектора захисною сіткою торкався контрольованої поверхні.

Визначивши ділянки поверхні, які підлягають точнішому контролю, знімаємо захисну сітку з робочого вікна блока детектора, встановлюємо на нього захисну кришку зі сталюю пластинкою і виставляємо час експозиції  $t=100\text{с}$  (третій режим роботи радіометра). Розмістивши блок детектора поруч контрольованої ділянки, натискаємо кнопку "Пуск". Після закінчення експозиції зчитуємо кількість фонових імпульсів  $N_{\phi}$ , вираховуємо швидкість відліку фону  $n_{\phi}$  ( $n_{\phi} = N_{\phi} / t$ ).

Замінюємо захисну кришку на захисну сітку і розміщуємо блок детектора на віддалі не більше 10 мм від контрольованої ділянки. Проводимо виміри кількості імпульсів  $N$  і визначаємо швидкість відліку  $n$  для даної ділянки поверхні. При контролі різних ділянок час експозиції може бути збільшений чи зменшений залежно від рівня випромінювання.

Знаючи значення  $n$  і  $n_{\phi}$  для ділянки поверхні, визначаємо величину густини потоку бета-частинок за формулою

$$\varphi = k_3(n - n_\phi), \text{ см}^{-2}\text{Чхв}^{-1}, \quad (1)$$

де  $k_3$  – градувальний коефіцієнт, що зв’язує швидкість відліку  $n$  з густиною потоку і вказується в паспорті кожного радіометра. Одиниця виміру  $k_3$  –  $\text{сЧсм}^{-2}\text{Чхв}^{-1}$ . Густина потоку  $\varphi$  – це кількість частинок, що попадають на площу, рівну  $1 \text{ см}^2$  за час, рівний 1 хв. Одиниця виміру  $\text{см}^{-2}\text{Чхв}^{-1}$ .

## II. КОНТРОЛЬ РАДІАЦІЙНОЇ ЧИСТОТИ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ З ДОПОМОГОЮ СВИНЦЕВОГО БУДИНОЧКА.

При роботі з свинцевим будинком захисні сітка і кришка не використовуються. В одну з кювет наливаємо дистильовану або чисту водопровідну воду, встановлюємо кювету в нижній паз будиночка. Задавши час експозиції 1000 с (п'ятий режим), визначаємо значення  $N$  і  $n$ . (Вимірювання фону слід проводити через кожні 2 год. роботи радіометра. При збільшенні фону більш ніж на 50% в порівнянні з попередніми значеннями, слід провести дезактивацію зовнішньої і внутрішньої поверхонь будиночка, кювет мильним розчином, а зовнішньої поверхні блоку детектування – спиртом).

Підготовка проб харчових продуктів ідентична обробці харчових продуктів на першому етапі приготування їжі. Підготовлені проби подрібнюємо будь-яким чином. Наповнюємо кювету шпателем, ложкою ущільнюємо пробу. Надлишок проби, що виступає над краєм кювети, забираємо.

Кювету з пробкою встановлюємо в нижній паз будиночка. При експозиції  $t = 1000 \text{ с}$  вимірюємо значення  $N$ . Вирахувавши значення різниці кількості відліків  $N - N_\phi$ , за таблицею 1 визначаємо час експозиції.

Таблиця 1.

Значення різниці $N - N_\phi$ при $t = 1000 \text{ с}$	Рекомендований час вимірювань $t$ , с
$500 \leq N - N_\phi$ $250 \leq N - N_\phi \leq 500$ $100 \leq N - N_\phi \leq 250$ $0 \leq N - N_\phi \leq 100$	$t = 1000 \text{ с}$ $t = 2000 \text{ с}$ двократні виміри при $t = 2000 \text{ с}$ кратність виміру довільна, визначається необхідною точністю вимірів

Відносна статистична похибка вимірювань  $\eta$  різниці величини  $N - N_\phi$  оцінюється за формулою

$$\eta = \frac{2\sqrt{N + N_\phi}}{N - N_\phi}. \quad (2)$$

Якщо відома загальна швидкість відліку  $n$  і швидкість відліку фону  $n_\phi$ , то

$$\eta = \frac{2\sqrt{\frac{n}{t} + \frac{n_\phi}{t_\phi}}}{n - n_\phi}, \quad (3)$$

де  $t$  і  $t_\phi$  - час експозиції при вимірі проби і фону відповідно. Якщо  $t = t_\phi$ , то можна час експозиції при заданій відносній статистичній похибці  $\eta$  виразити формулою

$$t = \frac{4(n + n_\phi)}{(n + n_\phi)^2 \eta^2}. \quad (4)$$

Вибравши, згідно табл.1, час експозиції, натиснути кнопку "Пуск". Отримавши значення  $N$  і  $n$ , використовуючи формулу (5), розрахувати питому активність бета-активних нуклідів (у  $\text{КіЧкг}^{-1}$ )

$$A_m = k_a (n - n_\phi - n_K), \quad (5)$$

де  $k_a$  – коефіцієнт, значення якого приведені в таб. 3 інструкції з експлуатації приладу;

$n$  – загальна швидкість відліку (проба і фон);

$n_\phi$  – швидкість відліку фону;

$n_K$  – швидкість відліку від природного радіонукліду  $^{40}\text{K}$  (значення  $n_K$  різні для різних харчових продуктів, приведені в таб. 4 інструкції з експлуатації радіометра).

Вклад природного радіонукліду  $^{40}\text{K}$  необхідно враховувати в тих випадках, коли вимірювана питома (об'ємна) активність знаходиться в межах  $10^{-9}$  –  $10^{-7}$   $\text{Кі/кг}$ . Якщо вона перевищує  $10^{-7}$   $\text{Кі/кг}$ , то вкладом  $^{40}\text{K}$  в активність можна знехтувати.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Вивчити інструкцію до радіометра "Бета".
2. Ввімкнути прилад та перевірити його працездатність (згідно інструкції з експлуатації).
3. Провести контроль довільних поверхонь на забрудненість бета-активними радіонуклідами.
4. Провести визначення питомої активності проби харчових продуктів (грибів та ягід чорниці) згідно інструкції з експлуатації радіометра.
5. Вимкнути прилад.

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13**  
**ТЕМА РОБОТИ: КОНТРОЛЬ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ**  
**АЛЬФА-ВИПРОМІНЮЮЧИМИ РАДІОНУКЛІДАМИ ЗА**  
**ДОПОМОГОЮ РАДІОМЕТРА ПОТОКУ АЛЬФА-ЧАСТИНОК**

**ПРИЛАДИ ТА МАТЕРІАЛИ:**

- блок детектування БДЗА2-01;
- вимірювач швидкості лічби УИМ2-1еМ;
- інструкція, технічні описи та інструкції з експлуатації БДЗА2-01 та УИМ-1еМ;
- альфа активне джерело.

**ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

Радіометр потоку альфа-частинок призначений для контролю забрудненості поверхонь, у т. ч. поверхні рук, одягу і т.п. альфа-активними речовинами. Він складається з блоку детектування альфа-частинок БДЗА2-01, вимірювача швидкості лічби УИМ2-1еМ і забезпечує реєстрацію альфа-випромінювання в діапазоні енергій 661-824 фДж (4,13- 5,15МеВ).

Реєстрація випромінювання здійснюється детектором на основі тонкого шару люмінофора ZnS (Ag), нанесеного на органічне скло, і має ефективність реєстрації альфа-випромінювання не менше 30% при двох шарах захисної плівки (алюмінізованої фольги) і захисній решітці. Товщина шару люмінофора вибирається з умови забезпечення достатньої ефективності реєстрації альфа-частинок детектором і має бути співмірною з їх пробігом у матеріалі люмінофора. Завдяки набагато більшій проникній здатності ефективність реєстрації бета-частинок та гамма-квантів у такому тонкому шарі сцинтилятора практично наближається до нуля.

Захисна плівка призначена для захисту блоку від фонові засвітки, захисна решітка - для захисту від механічних пошкоджень плівки та люмінофору. Конструктивно передбачена можливість вимірювань і при одній захисній плівці без решітки. У цьому випадку ефективність реєстрації складає не менше 50%. Відповідно, чутливість блоку детектування складає не менше 0,3 част.<sup>-1</sup> при двох шарах захисної плівки та 0,5 част.<sup>-1</sup> при одному шарі.

Альфа-частинка, пройшовши шар захисної плівки, втрачає свою енергію в шарі люмінофору і викликає у ньому світовий спалах, який, в свою чергу, реєструється фотопомножувачем. Сигнал з фотопомножувача, після підсилення в електричній частині блоку детектування, поступає на вхід відлікового пристрою з автоматичним переключенням піддіапазонів УИМ2-1еМ (або аналогічний пристрій). Основним призначенням цього пристрою є перетво-

рення послідовності імпульси у напругу постійного струму, величини якого пропорційна середній швидкості лічби імпульсів.

Прилад УИМ-1еМ дає можливість здійснювати вимірювання кількості імпульсів від двох блоків детектування почергово (канал I чи канал II) або в режимі вимірювання різниці швидкостей лічби, які поступають від двох блоків детектування.

Блок детектування забезпечує визначення питомої густини потоків альфа-частинок з контрольованої поверхні в межах від  $1,5 \times 10^{-2}$  до  $1,5 \times 10^2$  част. $\times$ с $^{-1}$  $\times$ см $^{-2}$ , що відповідає швидкості лічби від 1 до  $10^4$ с $^{-1}$  при використанні однієї захисної плівки і може використовуватись стаціонарно або в переносному варіанті.

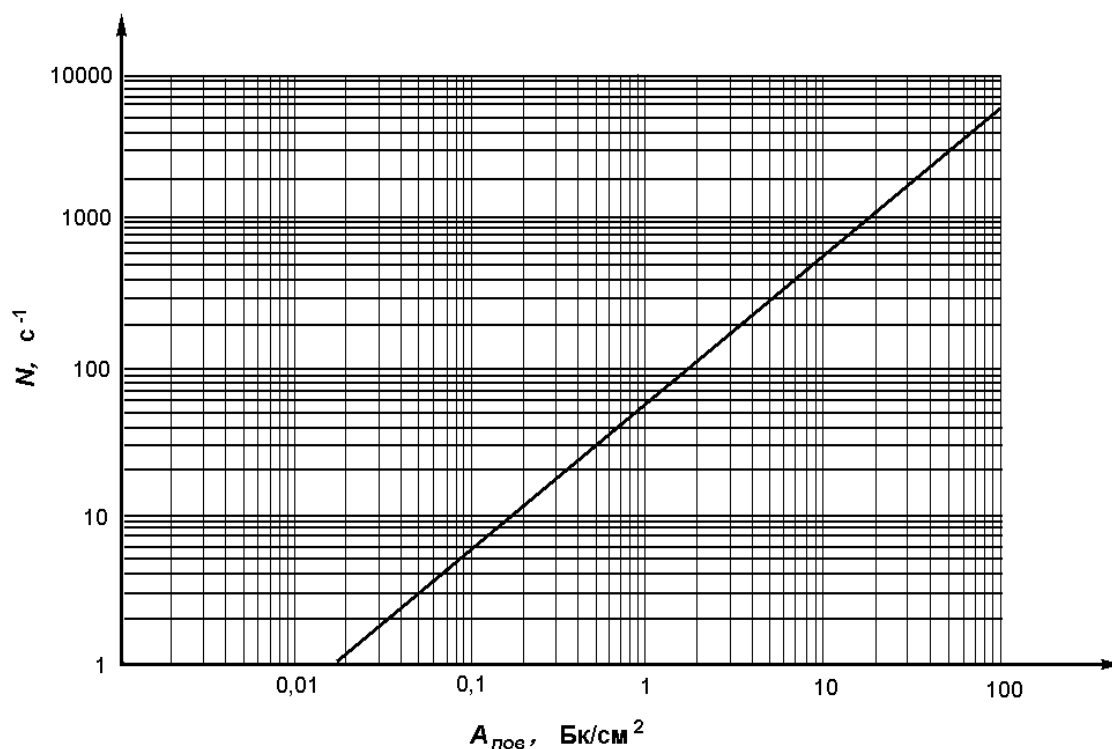


Рис. 1. Залежність швидкості лічби блоку детектування від питомої поверхневої активності альфа-забрудненої поверхні

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Вивчити технічний опис до пристроїв БДЗА2-01 та УИМ2-1еМ;
2. Зовнішнім оглядом перевірити правильність під'єднання пристроїв, забезпечити відсутність поруч з блоком детектування джерел бета та гамма-випромінювання, не допускати попадання на нього прямих сонячних променів;

3. Включити УИМ-1eM, з якого подається напруга на блок детектування, вичекати 15хв. для встановлення робочих режимів;
4. Визначити фонові значення швидкості лічби імпульсів\*; переконатися у відсутності показав приладу при відсутності джерела альфа-частинок;
5. Використовуючи отримане від викладача джерело альфа-випромінювання (препарат  $^{238}\text{U}$
6. ), провести контроль "забрудненої" поверхні. Визначити швидкість лічби  $n$  від джерела\*;
7. Отримавши значення  $N = n - n_{\text{ф}}$ , згідно з діаграмою (рис.1) визначити питому поверхневу активність "забрудненої" поверхні;
8. Виключити прилад, здати викладачу джерело альфа-випромінювання.

\* **Примітка:** Зняття відліку швидкості лічби проводити у наступному порядку:

- проведіть відлік показів по шкалі – зеленій (діапазон від 0 до 3) чи червоній (діапазон від 0 до 10) –, колір якої вказано світловим індикатором на панелі приладу;
- визначити швидкість лічби імпульсів, помноживши отриманий відлік на множник, вказаний на світловому табло.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Грабовський В. А. Прикладна спектроскопія йонізуючих випромінювань : навч. пос. / Грабовський В. А. – Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. – 296 с.
2. Брегадзе Ю.И. Прикладная метрология ионизирующих излучений / Брегадзе Ю.И., Степанов Э.К., Ярына В.П. – М. : Энерготомиздат, 1990. – 264 с.
3. Вартанов Н.А. Прикладная сцинтилляционная спектроскопия / Вартанов Н.А., Самойлов П. С. – М. : Атомиздат, 1975. – 406 с.
4. Балдин С.А. Прикладная спектроскопия с полупроводниковыми детекторами / Балдин С. А., Вартанов Н. А., Ерыхайлов Ю. В. – М. : Атомиздат, 1974. – 320 с.
5. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / [Акимов Ю.К., Игнатьев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф.] – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 344 с.
6. Максимов М.Т. Радиоактивные загрязнения и их измерение / Максимов М.Т. Оджагов Г.О. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
7. Практикум по ядерной физике : учебное пособие / [Жуковский Ю.Г., Сергеев В.О., Антоньев Н.М. и др.] ; под ред. В.О. Сергеева. – М. : Высшая школа, 1975. – 197 с.
8. Рудык А.Ф. Определение активности естественных радионуклидов в объектах окружающей среды : метод. пос./ Рудык А.Ф., Казимиров А.С. – К., 1993. – 39 с.
9. Специальный практикум по современным методам физических исследований. Часть 1 : под ред. Б.И.Горячева. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 204 с.
10. Методика комплексного радіаційного обстеження забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи територій (за винятком зони відчуження). – К. : Атіка-Н, 2007. – 60 с.
11. Детекторы германиевые диффузионно-дрейфовые ДГДК. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
12. Анализаторы многоканальные амплитудные АМА-03Ф. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

ДОДАТКИ  
ДОДАТОК 1

Характеристики джерел гамма-випромінювання з ОСГІ-3  
(станом на 01.08.2008 р)

Ізотоп	Активність, кБк	Період напіврозпаду	Енергія гамма-квантів	Квантовий вихід
$^{44}\text{Ti}$	93	60 р.	68,9 78,3 1157	0,944 0,962 0,999
$^{54}\text{Mn}$	92	312,11 дня	834,827	0,9997
$^{60}\text{Co}$	93	5,271 р.	1173,237 1332,501	0,9990 0,9998
$^{137}\text{Cs}$	103	30,018 р.	661,66	0,8521
$^{152}\text{Eu}$	47,8	13,516 р.	121,782 244,699 344,281 411,115 443,983 778,91 964,131 1112,116 1408,01	0,2832 0,07506 0,26667 0,02273 0,03121 0,1296 0,1462 0,1356 0,2035



## ДОДАТОК 2

### ПАСПОРТ

на пробу ґрунту та радіаційного об'єкту місцевості.

1. Проба \_\_\_\_\_  
2. Дата відбору проби \_\_\_\_\_  
(число місяць рік)

3. Область \_\_\_\_\_

4. Район \_\_\_\_\_

5. Сільрада \_\_\_\_\_

6. Господарство \_\_\_\_\_

7. Населений пункт \_\_\_\_\_

8. Географічні координати місця відбору \_\_\_\_\_

9. Поверхня ґрунту (трав'яне покриття, оголена поверхня – підкресл.)

10. Стан зволоження ґрунту (сирий, помірно вологий, сухий – підкресл.)

11. Можливість затоплення під час паводку \_\_\_\_\_

12. Потужність дози, мкР/год

Прилад	На висоті 3-4 см	На висоті 1 м
СРП-68-01	_____	_____
ДРГ-01Т	_____	_____

13. Підрозділ, який проводив відбір \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

(посада, П. І. Б. особи, яка проводила відбір проби) (підпис)

14. Марка пробовідбірника \_\_\_\_\_

Діаметр пробовідбірника \_\_\_\_\_ мм.

Глибина пробовідбору \_\_\_\_\_ см.

Кількість уколів \_\_\_\_\_

Площа відбору точкової проби \_\_\_\_\_ см<sup>2</sup>.

### ДОДАТОК 3

За величиною  $A_{ef}$  обмежується застосування відповідної сировини та будівельних матеріалів з підвищеним вмістом ПРН:

1. будівельні матеріали з  $A_{ef} \leq 370$  Бк/кг належать до 1 класу і можуть використовуватися для всіх видів будівництва без обмежень;
2. будівельні матеріали з  $370 \leq A_{ef} \leq 740$  Бк/кг належать до 2 класу і можуть використовуватися для дорожнього та промислового будівництва;
3. будівельні матеріали з  $740 \leq A_{ef} \leq 1350$  Бк/кг належать до 3 класу і можуть використовуватися для будівництва об'єктів промислового призначення, де виключається перебування людей, доріг поза населеними пунктами, а також об'єктів дорожнього призначення в межах населених пунктів за умови їхнього покриття шаром ґрунту або іншого матеріалу товщиною не менше 0,5 м.

Для використання будівельних матеріалів з  $A_{ef} > 1350$  Бк/кг у всіх випадках необхідний дозвіл Мінохоронздоров'я України.