

**Волинський національний університет імені Лесі Українки**

**Кафедра експериментальної фізики,  
інформаційних та освітніх технологій**

**В.В. Галян, Г.Л. Мирончук, А.Г. Кевшин, Т.Ф. Зіміч**

**РАДІАЦІЙНА БЕЗПЕКА ТА ЕКОЛОГІЯ:  
ТЕЗИ ЛЕКЦІЙ**

**Луцьк – 2024**

УДК 623.454.832-049.5 : 502(507(07))

Р 15

Рекомендовано до друку науково–методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки

(протокол № 6 від 21 лютого 2024 р.)

**Рецензенти:** *Шигорін П. П.* – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедра теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, ВНУ імені Лесі Українки.

**Галян В.В., Мирончук Г.Л., Кевшин А.Г., Зіміч Т.Ф.**

**Радіаційна безпека та екологія:** тези лекцій / В.В. Галян, Г.Л. Мирончук, А.Г. Кевшин, Т.Ф. Зіміч – Луцьк : Вежа-Друк, 2024. – 36 с.

Тези лекцій «Радіаційна безпека та екологія» рекомендовано здобувачам освіти спеціальностей 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», 104 «Фізика та астрономія», 014.08 «Середня освіта (Фізика)».

Методичні рекомендації складено відповідно до силабусу освітнього компонента «Радіаційна безпека та екологія» Навчально-наукового фізико-технологічного інституту.

УДК 623.4

© Галян В.В. та ін., 2024

© Луцьк, 2024

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	4
<b>РОЗДІЛ 1. ПОНЯТТЯ РАДІАЦІЙНА БЕЗПЕКА ТА ЕКОЛОГІЯ. ЗАКОНОМІРНОСТІ РАДІОАКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ.</b>	5
1.1. Джерела радіації та радіоактивність речовин.	5
1.2. Закон радіоактивного розпаду.	6
1.3. Умова радіоактивної рівноваги. Активність радіонуклідів.	8
1.4. Вплив іонізуючого випромінювання на тканини живих організмів.	10
1.5. Біологічна дія іонізуючого випромінювання. Види і засоби захисту від радіації.	13
<b>Список використаних джерел до розділу 1</b>	16
<b>РОЗДІЛ 2. ВЛАСТИВОСТІ ІОНІЗУЮЧОГО ОПРОМІНЕННЯ. МЕТОДИ РЕЄСТРАЦІЇ ТА ВЗАЄМОДІЯ ІОНІЗУЮЧОГО ОПРОМІНЕННЯ З РЕЧОВИНОЮ.</b>	17
2.1. Основні дозиметричні величини. Поглинута, експозиційна та еквівалентна дози опромінення.	17
2.2. Методи реєстрації іонізуючих випромінювань. Дозиметричні прилади.	20
2.3. Взаємодія альфа- та бета-частинок з речовиною.	23
2.4. Взаємодія $\gamma$ -випромінювання та нейтронів з речовиною.	25
<b>Список використаних джерел до розділу 2</b>	28
<b>РОЗДІЛ 3. ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА І ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА.</b>	29
3.1. Особливості будівництва і експлуатації атомних електростанцій.	29
3.2. Вплив атомних електростанцій і ядерного паливного циклу на радіаційне забруднення оточуючого середовища.	31
<b>Список використаних джерел до розділу 3</b>	35

## Вступ

За сто років, які пройшли після відкриття явища радіоактивності практично не залишилось галузей господарської діяльності людини, в яких би не застосовувались або не зустрічались джерела іонізуючих випромінювань, а саме в промисловості, медицині, транспорті, науці, сільському господарстві і інше. Однією з областей в якій людина стикається з джерелами іонізуючого випромінювання є атомна енергетика.

Розвиток ядерної енергетики на основі сучасних досягнень науки і техніки, які дозволяють створювати безпечні ядерні установки людство покладає значні надії, про що свідчить зростання темпів будівництва атомних електростанцій в економічно розвинутих країнах.

Розвиток ядерної енергетики, використання джерел іонізуючих випромінювань в медицині і інших галузях народного господарства України нерозривно пов'язано з проблемою радіаційного захисту населення і оточуючого середовища. Важливого значення при цьому набувають кількісні характеристики поля іонізуючого випромінювання, які визначають вплив випромінювання на організм людини, оточуюче середовище.

Навчально-методичне видання «Радіаційна безпека та екологія: тези лекцій» складається із трьох розділів, в яких зібрані теоретичні відомості та список використаних джерел, скерованих допомогти освоїти освітній компонент «Радіаційна безпека та екологія» здобувачами освіти спеціальностей «Прикладна фізика та наноматеріали», «Фізика та астрономія», «Середня освіта (Фізика)».

# РОЗДІЛ 1. ПОНЯТТЯ РАДІАЦІЙНА БЕЗПЕКА ТА ЕКОЛОГІЯ. ЗАКОНОМІРНОСТІ РАДІОАКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ.

## 1.1. Джерела радіації та радіоактивність речовин

До середини ХХ ст., основним джерелом іонізуючого випромінювання були природні джерела – Космос, гірські породи, деякі мінерали (граніт – один із найбільш поширених в будівельній галузі матеріал) та вулканічна діяльність. Сьогодні основними джерелами радіоактивного забруднення біосфери є джерела антропогенного (штучного) походження: випробовування ядерної зброї, аварії на атомних електростанціях, підводних човнах, добування радіоактивних матеріалів та виробництво будівельних матеріалів тощо.

### *Джерела радіації*

#### **1) Природні джерела радіоактивного випромінювання:**

- *галактичне випромінювання* – складається в основному з протонів (75-78%), альфа частинок (12-24%) і інших елементів (1-2%);

- *інтенсивне сонячне випромінювання*, яке виникає при хромосферних спалахах на Сонці. До складу синячного випромінювання входять протони (85-97%), альфа-частинки (3-15%) та інші ядра .

Густина потоку випромінювання з космосу поблизу Землі менша , ніж у міжгалактичному просторі. Це зумовлено екрануючою дією атмосфери Землі та відхиленням частинок у її магнітному полі. Із цим явищем пов'язують виникнення Радіаційних поясів Землі (РПЗ).

***Радіаційні пояси Землі*** (РПЗ) – область магнітосфер планети, у якій накопичуються та утримуються заряджені частинки (в основному протони та електрони), що проникли в магнітосферу Землі із космосу.

Залежно від розміщення, енергетичного розподілу протонів і електронів, РПЗ поділяють на: внутрішній, зовнішній пояс, стабільний пояс високоенергетичних електронів, квазістаціонарний пояс електронів і протонів.

#### **2) Штучні джерела радіації**

Штучні джерела радіації можна поділити на дві групи: до першої відносяться джерела, в яких заряджені частинки розганяються до високих енергій електромагнітними методами, і, взаємодіючи, з атомами різних речовин утворюють ультрафіолетові і рентгенівські промені, до другої – джерела, в яких відбуваються ядерні перетворення (атомні реактори, штучні радіоактивні ізотопи).

Для отримання рентгенівського випромінювання використовуються рентгенівські трубки, які складаються з відкачаного балона, в якому поміщені анод і катод. Потужними джерелами радіоактивного випромінювання і радіоактивних відходів є атомні реактори.

**Радіоактивністю** називають явище спонтанного перетворення деяких нестійких ядер одних елементів в ядра інших елементів з випромінюванням різних типів елементарних частинок і електромагнітних хвиль надзвичайно малої довжини.

Радіоактивні ядра часто називають материнськими, а ядра, які утворюються при радіоактивному розпаді або перетворенні – дочірніми.

Радіоактивність поділяють на природню і штучну. Штучні радіонукліди виникають як результат опромінення ізотопів стабільних хімічних елементів частинками ядерного випромінювання.

### ***Радіоактивні речовини***

Рівень земної радіації різний у різних регіонах Земної кулі – залежно від концентрації радіонуклідів в окремих ділянках земної кори.

### ***Штучні джерела радіації:***

- Ядерні вибухи,
- Радіоактивні ізотопи,
- Радіоактивна промисловість,
- Радіоактивні відходи.

### **1.2. Закон радіоактивного розпаду**

Процеси радіоактивного розпаду мають стохастичний (випадковий, ймовірнісний) характер. Вони описуються законами теорії ймовірностей.

Проте, якщо процес розпаду розглядати за час, який набагато більший періодів характерних внутрішніх перетворень, і для об'єкта, що містить велику кількість ядер (макрооб'єкта), то це явище цілком можна описати як детермінований процес (закономірний процес, який можна визначити розрахувати, передбачити).

Якщо у зразку в момент часу  $t$  є  $N$  радіоактивних ядер, то кількість ядер  $dN$ , що розпалися за час  $dt$ , буде пропорційно  $N$ :

$$\begin{aligned} dN &= -\lambda N dt \\ N &= N_0 e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (1)$$

Рівність (1) визначає **закон радіоактивного розпаду**

Кількість радіоактивних атомів, що залишились після проходження часу  $t$

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 - N_0 e^{-\lambda t} = N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

Час, за який кількість радіоактивних атомів зменшується вдвічі називається **періодом напіврозпаду або часом піврозпаду**.

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (3)$$

Період напіврозпаду  $T$  – час, протягом якого розпадеться половина радіоактивних ядер, що первісно були у зразку. Після одного періоду напіврозпаду зі 100% атомів радіонукліду залишається тільки 50%, а за наступний такий же часовий цикл із цих 50% атомів залишиться лише 25% і так далі.

Для кожного радіонукліда характерний свій період напіврозпаду. Періоди напіврозпаду різних радіонуклідів варіюють в діапазоні від мільярдних часток секунди до десятків мільярдів років. Зокрема, деякі з продуктів поділу мають періоди напіврозпаду в десятки – сотні років, що являє собою одну з головних проблем сучасної атомної енергетики.

Середній час життя радіоактивного ядра.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\lambda \frac{1}{\lambda}} = \frac{N_0}{e}$$

Отже, *середній час життя* радіоактивного ядра це час за який кількість радіоактивних ядер зменшується в  $e$  разів.

Якщо одночасно відбувається два процеси, так, що ядра  $N$  можуть одночасно випромінювати частинки  $N_1$  і  $N_2$ :

$$dN = dN_1 + dN_2 = -\lambda_1 N dt - \lambda_2 N dt = -(\lambda_1 + \lambda_2) N dt \quad (5)$$

Формула (5) визначає кількість ядер  $dN$ , що розпалися за час  $dt$ .

Середній час життя радіоактивних ядер рівний:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \quad (6)$$

### 1.3. Умова радіоактивної рівноваги. Активність радіонуклідів

При радіоактивному розпаді ядер вихідної речовини можуть виникати нові радіоактивні ядра. В такому випадку перші ядра називаються материнськими, а інші дочірніми. Позначимо кількість цих ядер  $N_1$  і  $N_2$  відповідно, а постійні розпаду  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  тоді:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1; & (1) \\ \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 & (2) \end{cases}$$

Розв'язок рівняння (1) має вигляд:

$$N_1 = N_{01} e^{-\lambda_1 t} \quad (3)$$

У випадку рухомої рівноваги, між материнською і дочірньою речовиною, розпад дочірньої речовини компенсується її утворенням з материнської. Тоді при  $dN_2/dt=0$ , одержимо:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad (4)$$



Рівність (4) визначає умову радіоактивної рівноваги речовини при радіоактивному розпаді.

Наявність радіоактивних речовин у середовищі часто буває дуже малою. Тому мірою радіоактивних речовин є не їх маса, а активність радіоізоотопів.

**Активністю радіоактивної речовини** називають число атомних розпадів в ній за одиницю часу, тобто визначається швидкістю радіоактивного розпаду. Активність радіоактивної речовини ( $A$ ) пропорційна її кількості:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{0,693}{T} N \quad (5)$$

Одиницею активності в системі СІ є беккерель.

**Беккерель (Бк, Вq)** – одиниця активності, яка визначається кількістю радіоактивної речовини, в якій проходить 1 акт розпаду за 1 с. Несистемною одиницею є **кюрі (Кі)**. 1 Кі – це така кількість радіоактивної речовини в якій проходить 37 млрд актів розпаду за 1с.

**Співвідношення між одиницями активності:**

$$1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Кі}; \quad 1 \text{ Бк} = 1 \text{ розп/с};$$

$$1 \text{ Кі} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ розп/с}.$$

За питому вагову активність прийнята одиниця **беккерель на кілограм** (Бк/кг), а несистемна – **кюрі на кілограм** (Кі/кг).

Активністю рідкого і газоподібного середовища є питома об'ємна активність – **беккерель на літр** (Бк/л), або **кюрі на літр** (Кі/л).

Активністю площі, що визначає питому забрудненість площі є **беккерель на квадратний кілометр** (Бк/км<sup>2</sup>), користуються також одиницею – **кюрі на квадратний кілометр** (Кі/км<sup>2</sup>), або Бк/м<sup>2</sup>, Кі/м<sup>2</sup>.

Зв'язок між активністю радіонукліда  $A$  та його масою  $m$  визначають формулою:

$$A = m \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,693 / (A_m T), \text{ Бк} \quad (6)$$

$$A = m \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,693 / (A_m \cdot T \cdot 3,7 \cdot 10^{10}), \text{ Кі} \quad (7)$$

де  $T$  – період напіврозпаду;  $6,023 \cdot 10^{23} / (A_m)$  – число атомів в одиниці маси радіонукліда.

Найбільшу забрудненість навколишнього середовища зумовлюють короткоживучі ізотопи, які з'являються відразу після атомних вибухів або аварій на атомних електростанціях. Після розпаду таких ізотопів активність радіоактивного забруднення значно зменшується.

#### **1.4. Біологічна дія іонізуючого випромінювання.**

У результаті впливу іонізуючого випромінювання на організм людини в тканинах можуть відбуватися складні фізико-хімічні і біологічні процеси.

Первинним фізичним актом взаємодії іонізуючого випромінювання з біологічним об'єктом є іонізація. Саме через іонізацію відбувається передача енергії. Відомо, що в біологічній тканині 60-70% від всієї маси є вода, тому взаємодія іонізуючого випромінювання з водою визначає ефект впливу радіації на тканини живих організмів. При такій взаємодії відбувається вибивання електронів з молекул води з утворенням так званих молекулярних іонів, що несуть позитивний і негативний заряд. Утворені іони води у свою чергу розпадаються з виникненням цілого ряду так званих радикалів, які можуть взаємодіяти між собою і клітинами живого організму. Дуже активні іони  $H_2^+$ ,  $O^-$ ,  $HO_2^-$  і інші вільні радикали, що швидко дифундують в тканинах організму.

Чим більша енергія випромінювання передається тканинам, тим більше ушкоджень виникає у живому організмі: кількість переданої організму енергії характеризується дозою опромінення.

Перша дозиметрична характеристика радіаційного опромінення зв'язана з іонізаційним ефектом рентгенівських і  $\gamma$ -променів. На початку розвитку радіаційної дозиметрії вчені, в основному, стикалися з проникаючою рентгенівською радіацією. Кількісна міра поля рентгенівського випромінювання, яке діє на різні об'єкти встановлювалась по іонізуючій здатності молекул повітря (експозиційна доза  $D_e$ ), а саме кількістю пар іонів утворених в  $1 \text{ см}^3$  сухого повітря.

Іонізуюча властивість рентгенівських променів визначається ефективним атомним номером ( $Z_{\text{ef}}$ ) речовини.  $Z_{\text{ef}}$  для повітря становить 7,64 і практично співпадає з ефективним атомним номером м'яких тканин людини  $Z_{\text{ef}} \approx 7,42$ . Це означає, що вклад фото- і комптон-ефектів, які в основному відповідають за іонізацію атомів речовини однаковий для повітря та м'яких тканин людського тіла. Тому руйнівну дію рентгенівських променів на м'які частини людського тіла (шкіру, прилеглі до шкіри тканини) можна вимірювати в рентгенах, тобто в одиницях, які використовуються для визначення поля рентгенівських променів в повітрі.

Допускається також вимірювання поля радіації в рентгенах при оцінці ступеня радіаційного забруднення радіонуклідами з сумарною енергією  $\gamma$ -квантів, яка не перевищує 3 МеВ. Наприклад, після аварії на Чорнобильській атомній електростанції місцевість була забруднена сумішшю продуктів поділу атомів урану з ефективною енергією випромінювання  $\gamma$ -квантів в межах  $\approx 0,8$ -1,0 МеВ.

Як приклад, можна розглядати біологічну дію локального рентгенівського опромінення на шкіру людини. При дозі локального опромінення 500-600 Р в місці опромінення на шкірі з'являється променева еритема, яка подібна до сонячного опіку (почервоніння шкіри і відповідні больові відчуття). Після дози 1500-1600 Р з'являється більш важка еритема з утворенням пухирів, подібно до опіку II ступеня. При ще більших локальних дозах (3000-4000 Р) виникає некроз (омертвіння) тканини, який дуже важко лікується і має високу здатність перероджуватись в злоякісне захворювання.

В таблиці 10 наведена залежність еритемної дози (дози в рентгенах, при якій виникає променева еритема) від потужності експозиційної дози рентгенівських променів.

**Таблиця 10**

**Залежність еритемної дози для шкіри людини від потужності експозиційної дози вузького пучка рентгенівських променів.**

Потужність дози, Р/хв.	Еритемна доза, Р	Час опромінення
------------------------	------------------	-----------------

(активність джерела)		
500	500	1 хв.
50	780	15,5 хв.
5	1300	4 год. 20 хв.
0,5	2250	75 год.

Як слідує із таблиці, чим менша потужність дози (активність джерела), тим більша еритемна доза (тобто, необхідно набрати більше рентген, щоб появилася на шкірі еритема і, відповідно, необхідно довше опромінювати шкіру людини). Це означає, що людські тканини мають властивість заліковувати пошкодження, викликані радіацією.

Одна і та ж сама експозиційна доза рентгенівських і  $\gamma$ -променів створює в різних тканинах різний руйнівний ефект в залежності від поглинутої енергії. Це привело до необхідності ввести нову дозиметричну величину – поглинута доза ( $D_p$ ), яка визначається кількістю енергії, поглинутої одиницею маси речовини, що опромінюється. Одиницями поглинутої дози є ради (Рад) і греї (Гр).

Практична робота з джерелами радіації показала, що взаємодія іонізуючого випромінювання з живими тканинами визначається значно складнішими законами, ніж це має місце для об'єктів неживої природи. Наприклад, у значної частини фізиків, які працювали протягом декількох років на циклотронах (прискорювачах елементарних частинок) виникало помутніння кришталіків очей, так звана променева катаракта, хоча при цьому поглинута доза була не великою і не впливала суттєво на інші органи людського тіла. Виявилось, що радіобіологічний ефект різних органів визначається не тільки поглинутою дозою, а також переданою на одиниці довжини шляху іонізуючої частинки енергією.

Високоенергетичні електрони взаємодіють з електронними оболонками окремих атомів, що розміщені на траєкторії переміщення електрона і іонізують їх. Швидкі протони, мають більшу масу, відривають від атомів вздовж

напрямку свого руху більше електронів, утворюючи тверdotільну плазму в деякому об'ємі циліндричної форми в напрямку переміщення. Це означає, що лінійна густина виділення енергії для протона значно більша, ніж для електрона. Тому навіть при однаковій поглинутій дозі біохімічні процеси в речовині, які залежать від лінійної густини іонізації, при електронному і протонному опроміненні будуть протікати по-різному, спричинюючи різний радіобіологічний ефект (більший при протонному опроміненні). Для кількісної оцінки цього явища було введено поняття коефіцієнта відносної біологічної ефективності, або коефіцієнта якості опромінювання (K).

Щоб отримати такий самий радіобіологічний ефект, як при опроміненні швидкими нейтронами, необхідно той самий об'єкт опромінити  $\gamma$ -квантами поглинутою дозою в 10 раз більшою. Доза радіації, яка враховує особливості радіобіологічного ефекту в живих організмах дістала назву еквівалентної дози ( $D_{ек}$ ).

Дозу опромінення організм може одержати від будь-якого джерела випромінювання незалежно від того, знаходяться радіонукліди поза організмом або всередині його. У цьому зв'язку розрізняють зовнішнє і внутрішнє опромінення. Якщо радіоактивні речовини знаходяться поза організмом і опромінюють його ззовні, то говорять про *зовнішнє* опромінення. А якщо ж вони знаходяться у повітрі, яким дихає людина, або у їжі чи воді і потрапляють всередину організму через органи дихання та кишково-шлунковий тракт, то таке опромінення називають *внутрішнім*.

### **1.5. Вплив іонізуючого випромінювання на тканини живих організмів. Джерела утворення вільних радикалів. Види і засоби захисту від радіації**

Радіоактивне випромінювання, взаємодіючи з речовиною передає їй деяку енергію, що витрачається на збудження і іонізацію атомів речовини. При цьому активізуються біохімічні реакції зв'язані з руйнуванням клітин і

виникненням хімічно-активних сполук (вільних радикалів), відбувається мутація генетичної складової клітини-молекул ДНК.

При невеликому вмісті в організмі нестабільних молекул, вони надають «терапевтичну» корисну дію. А при надмірному вмісті подібних молекул може виникнути зворотний ефект.



Рис. 1. Модель клітини до і після впливу вільних радикалів

Велике число радикалів призводить до:

- пошкодження здорових клітин, і утворення ракових клітин-мутантів;
- розвитку інфаркту міокарда, ішемічного пошкодження мозку;
- вільні радикали руйнують речовину-колаген, яка відповідає за еластичність і пружність шкіри;
- порушення і пригнічення імунної системи, при цьому імунітет не буде реагувати навіть на серйозні пошкодження організму, оскільки знаходиться в пригніченому стані

Утворенню радикалів і затримці їх в організмі сприяють такі чинники:

- забруднення навколишнього середовища;
- стресові стани;
- шкідливі звички (куріння, алкоголізм, наркоманія тощо.);
- необмежений прийом лікарських препаратів;
- нераціональне харчування;
- шкідливі умови праці;
- відсутність активного способу життя;
- неадекватні навантаження, перевтома.

Головним джерелом утворення нестабільних молекул є окислювальні реакції в організмі. Це означає, що у цих реакціях бере участь життєво необхідний нам кисень.

Окислювальні реакції відбуваються в організмі у кожен мить, вони відбуваються в кожній клітині організму, переробляючи корисні речовини в енергію і сприяючи утворенню білків для побудови клітин. Саме ця реакція призводить до утворення вільних радикалів, як побічного елементу життєдіяльності клітин.

### ***Як захиститися від впливу вільних радикалів?***

Захисною дією володіють речовини-антиоксиданти. Антиоксиданти мають в складі своєї молекули «додатковий» електрон. Таким чином, потрапляючи в організм людини і взаємодіючи з вільним радикалом, антиоксиданти віддають свій «зайвий» електрон радикалу. В результаті такої взаємодії, стабільними стають обидві молекули і вільний радикал втрачає свої руйнівні здібності.



Рис. 2. Речовини-антиоксиданти.

До ***речовин-антиоксидантів*** належать:

- Фрукти і ягоди: сливи, журавлина, ожина, чорниця, малина, суниця, вишня, родзинки, апельсини, виноград, чорнослив;
- Спеції: гвоздика, петрушка, мелена кориця;
- Овочі: квасоля, капуста, броколі, чорні боби, цибуля, буряк, червоний перець, баклажан;
- Горіхи: мигдаль, волоський горіх, фундук, фісташки.

### Список використаних джерел до розділу 1

1. Іванов Є. Радіаційна екологія: Навчально-методичний посібник. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2011. 217 с.
2. Лапта С. І. Оптика Атомна та ядерна фізика з навчальної дисципліни «Фізика» навчальний посібник. Харків: ХНЕУ, 2010. 168 с.
3. Каденко І. М., Плюйко В.А. Фізика атомного ядра та частинок : підручник. 2-ге вид., переробл. і доповн. Електронна версія. К. 2019, 467 с.
4. Клименко М. О., Клименко О. М., Клименко Л. В. Радіоекологія : підручник. Рівне : НУВГП, 2020. 304 с.
5. Мирончук Г.Л., Кевшин А. Г., Галян В.В. Фізика ядра і елементарних частинок / Nuclear Physics And Elementary Particles : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт. 77 с. Рекомендовано НМР ВНУ ім. Лесі Українки (протокол № 2 від 25.10.2023 р.)



## РОЗДІЛ 2. ВЛАСТИВОСТІ ІОНІЗУЮЧОГО ОПРОМІНЕННЯ. МЕТОДИ РЕЄСТРАЦІЇ ТА ВЗАЄМОДІЯ ІОНІЗУЮЧОГО ОПРОМІНЕННЯ З РЕЧОВИНОЮ

**2.1. Основні дозиметричні величини. Поглинута, експозиційна та еквівалентна дози опромінення.**

*Доза опромінення визначається* енергією яка поглинається одиницею об'єму або маси середовища, яке опромінюється ядерними частинками або іонізуючими променями.

Розрізняють поглинуту, експозиційну і еквівалентну дози.

*Поглинута доза* опромінення визначається енергією, яка поглинається одиницею маси опроміненої речовини.

$$D_{\text{погл}} = \Delta E / \Delta m \quad (1)$$

За одиницю поглинутої дози опромінення в системі СІ приймається **джоуль на кілограм (Дж/кг, J/kg)**. Джоуль на кілограм – поглинута доза опромінення, яка відповідає енергії в один джоуль будь-якого іонізуючого випромінювання, що поглинається речовиною масою в один кілограм. Одиниця поглинутої дози носить назву **грей (Гр, Gy)**. Ще застосовують несистемну одиницю – **Рад (rad)**.

Співвідношення між одиницями поглинутої дози:

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

Величина поглиненої дози опромінення залежить від властивостей випромінювання і поглинаючого середовища.

Одиницею потужності поглинутої дози в системі СІ є **грей за секунду (Гр/с, Gy/s)** або **джоуль на кілограм за секунду (Дж/кг·с, J/kg·s)**, а несистемною – **рад за секунду (Рад/с, rad/s)**.

Співвідношення між ними:

$$1 \text{ Гр/с} = 1 \text{ Дж/(кг·с)}; \quad 1 \text{ Гр/с} = 100 \text{ Рад/с}, \quad 1 \text{ Рад/с} = 0,01 \text{ Гр/с};$$

**Експозиційною** називають дозу опромінення, що характеризує іонізаційний ефект рентгенівського і гамма-випромінювань у повітрі.

У системі СІ експозиційна доза вимірюється в **кулонах на кілограм** (Кл/кг, C/kg) – це одиниця експозиційної дози випромінювання, при якому в кожному кілограмі повітря утворюються іони (позитивні або негативні) із загальним зарядом, що дорівнює 1 кулону.

Один рентген – це доза рентгенівського або гамма-випромінювання, яка в 1 см<sup>3</sup> сухого повітря при температурі 0°C і тиску 760 мм.рт.ст. створює 2 млрд пар іонів (а точніше  $n=2,08 \cdot 10^9$ ).

Експозиційна доза характеризує дію іонізуючих випромінювань при умові рівномірного опромінення всього організму людини (тварини).

**Потужність експозиційної дози** (рівень радіації) – це інтенсивність випромінювання, тобто доза рентгенівського або  $\gamma$ -випромінювання за одиницю часу. Одиницею потужності експозиційної дози в системі СІ є Кл/(кг·с). Використовують позасистемні одиниці **рентген за годину (Р/год, R/h)**, рентген за секунду (Р/с, R/s) або міллірентген за годину (мР/год), мікrorентген за годину (мкР/год).

Співвідношення між одиницями в системі СІ і несистемною одиницею:

$$1 \text{ А/кг} = 1 \text{ Кл/кг} \cdot \text{с} = 3876 \text{ Р/с}, \quad 1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг} \cdot \text{с}.$$

Рентген є кількісною характеристикою гамма- чи рентгенівського випромінювання, але не вказує про кількість енергії, поглинутої об'ємом речовини, що опромінюється іншими частинками.

**Еквівалентна доза** не розкриває той факт, що різні види іонізуючого випромінювання під час опромінювання організму однаковими дозами приводять до різного ефекту. Це пов'язано з неоднаковою щільністю іонізації (кількості утворених іонів на одиницю шляху пробігу) різних видів випромінювань. Кількість іонів, які утворюються під дією опромінення альфа-частинками, у сотні разів вища від іонізації гамма-променями. Для кількісної оцінки впливу однакової дози різних видів радіації на організм людини було запропоновано спеціальний коефіцієнт відносної біологічної ефективності (ВБЕ) – який визначається відношенням поглинутої дози зразкового випромінювання до поглинутої дози даного виду випромінювання, що

викликають однаковий біологічний ефект. За зразкове фотонне випромінювання прийнято випромінювання рентгенівських апаратів з граничною енергією 20 кеВ. Коефіцієнт ВБЕ такого випромінювання прийнято за одиницю.

Еквівалентна доза опромінення використовується для оцінювання дії випромінювання на людей і тварин.

Одиницею еквівалентної дози в системі СІ є **зіверт (Зв, Zv)**. Один зіверт дорівнює поглинутій дозі в 1 Дж/кг (для рентгенівського, гамма- та бета-випромінювань).

Для оцінки біологічної ефективності випромінювань введена несистемна одиниця поглинутої дози – **біологічний еквівалент рентгена (Бер)**. Співвідношення одиниць: 1 Зв = 100 Бер, 1 Бер = 0,01 Зв.

Одиницею потужності еквівалентної дози в системі СІ є **зіверт за секунду (Зв/с, Zv/s)**, а несистемною одиницею є **бер за секунду (Бер/с)**. Співвідношення між ними: 1 Зв/с = 100 Бер/с, 1 Бер/с = 0,01 Зв/с.

При повторному опроміненні людей необхідно враховувати зміни в організмі створені попереднім опроміненням через залишкову дозу опромінення. Тобто частину дози опромінення отриману раніше, до відновлення стану організму на початок нового опромінення.

Для оцінки негативного впливу на організм людини різних видів радіації використовують так званий коефіцієнт якості. Наприклад, при однаковій дозі опромінення руйнівний вплив нейтронного опромінювання в 3 рази вищий, ніж рентгенівського, або -опромінення (фотонного).

При опроміненні частинками різного виду еквівалентна доза визначається як сума добутків поглинутої дози на середній коефіцієнт якості випромінювання для даної біологічної тканини:

$$D_{\text{екв}} = D_1 Q_1 + D_2 Q_2 + \dots + D_n Q_n \quad (2)$$

Необхідно відмітити, що еквівалентну дозу не можна використовувати для характеристики гострих променевиx пошкоджень організму, оскільки вона відноситься до хронічного опромінення малими дозами випромінювання

тривалий час. Організм людини здатен відновлювати до 90% радіаційних пошкоджень. Відновлення починається через 4 доби після опромінення.

**Радіотоксичність** – це властивість радіоактивних ізотопів спричинювати патологічні зміни у випадку потрапляння їх в організм людини.

Радіотоксичність залежить від низки умов, основними з яких є:

1) вид радіоактивного перетворення тканини під впливом внутрішнього опромінення;

2) середня енергія одного акту розпаду ізотопу, що викликає токсичність;

3) схема радіоактивного розпаду);

4) шляхи надходження радіоактивних речовин до організму;

5) розподіл в органах та системах; 6) час перебування радіонукліда в організмі;

7) тривалість надходження радіоактивних речовин в організм людини.

Внаслідок відкладання радіоактивних ізотопів і гарячих частинок в мулі водойм, які є природними очисними резервуарами радіоактивного забруднення, не бажано використовувати мул озер, річок для удобрення ґрунтів сільськогосподарського використання, розповсюджуючи таким чином небезпечні радіонукліди по території Землі і їх попадання через рослинну їжу в організм тварин і людей.

## **2.2. Методи реєстрації іонізуючих випромінювань. Дозиметричні прилади.**

Найважливішим елементом більшості приладів для виявлення і реєстрації кількісних характеристик іонізуючих випромінювань є **детектор**. Принцип роботи детектора визначається характером взаємодії випромінювання з речовиною. Детектування іонізуючого випромінювання ґрунтується на реєстрації ефектів, які викликає випромінювання при проходженні через речовину.

До основних характеристик детекторів всіх типів відносяться ефективність реєстрації, часова роздільна здатність і час відновлення.

**Ефективність реєстрації** – це відношення числа зареєстрованих частинок (гамма-квантів) до повного числа частинок, що пройшли за цей же час через детектор.

**Часова роздільна здатність** визначається мінімальним проміжком часу між двома послідовними актами реєстрації, протягом якого детектор залишається нечутливим до радіоактивного випромінювання.

**Тимчасове відновлення** – це інтервал часу, протягом якого детектор, зареєструвавши одну частинку, встигає повернутися в вихідне положення для реєстрації наступної частинки.

За методом реєстрації детектори поділяють на іонізаційні, сцинтиляційні, фотографічні, хімічні.

До приладів, що працюють на основі іонізаційного ефекту, відносять іонізаційні камери та лічильники. Принципові схеми іонізаційної камери і лічильника однакові.

Іонізаційна камера являє собою заповнений повітрям замкнутий об'єм, всередині якого знаходяться два ізольованих один від одного електроди. До електродів докладено напруга від джерела постійного струму (до 1000 В). При відсутності іонізуючого випромінювання в колі іонізаційної камери струму не буде, оскільки повітря є ізолятором. Завдяки впливу випромінювання в іонізаційній камері атоми повітря іонізуються. В електричному полі позитивні іони переміщуються до катода, а негативні – до анода. У колі камери виникає іонізаційний струм, який реєструється приладом.

Недоліки іонізаційних камер в значній мірі подолані в газорозрядних лічильниках. До теперішнього часу в дозиметрії і радіометрії найбільш широке застосування отримали лічильники Гейгера-Мюллера. Промисловістю випускаються два види лічильників Гейгера – циліндричні та торцеві.

Лічильники, що працюють навіть в області Гейгера, реєструють не всі частинки, що поступають на нього, тобто ефективність реєстрації менше 100%. Крім того, в лічильниках Гейгера великий час відновлення їх чутливості ( $10^{-4}$  –  $10^{-3}$  с).

В даний час завдяки ряду переваг у порівнянні з іншими методами реєстрації широке застосування знайшли сцинтиляційні лічильники. Речовини, що випускають світло під дією іонізуючого випромінювання, називаються сцинтиляторами. Сцинтиляційний метод реєстрації радіоактивних випромінювань заснований на зміні інтенсивності світлових спалахів, що виникають в люмінесцентних речовинах при проходженні через них іонізуючого випромінювання. Кількість спалахів пропорційно потужності дози опромінення.

Основними перевагами сцинтиляційних датчиків є їх висока ефективність реєстрації радіоактивних випромінювань, малий час висвічування сцинтиляторів ( $10^{-7} - 10^{-9}$  с), висока часова роздільна здатність. Такі параметри лічильника дозволяють проводити вимірювання з короткоживучими радіонуклідами.

Суть фотографічного методу побудована на ступені почорніння фотоемульсії. Під дією іонізуючого випромінювання атоми бромистого срібла, що містяться в фотоемульсії, розпадаються на срібло і бром. При цьому утворюються дрібні кристалики срібла, які й викликають по-чорніння фотоплівки. Щільність почорніння пропорційна поглиненій енергії випромінювання. Порівнюючи щільність почорніння з еталоном, визначають дозу опромінення, отриману плівкою. На цьому принципі побудовані індивідуальні фотодозиметри.

Сутність хімічного методу заснована на тому, що деякі хімічні речовини під впливом іонізуючого випромінювання змінюють свою структуру. Наприклад, хлороформ у воді при опроміненні розкладається з утворенням соляної кислоти, яка дає кольорову реакцію з доданим до хлороформу барвником. За щільністю забарвлення судять про дозу опромінення. На цьому принципі працюють хімічні дозиметри.

В сучасних дозиметричних і радіометричних приладах широкого поширення набули іонізаційний і сцинтиляційний методи.

Спектрометрами називають прилади, які, як і радіометри, дозволяють виміряти активність джерела, потік частинок або фотонів. Однак, на відміну від радіометрів, за допомогою спектрометрів можна також визначити енергію реєстрованого випромінювання і навіть розподіл частинок і фотонів за значеннями їх енергії, тобто отримати і досліджувати енергетичний спектр випромінювання.

### **2.3. Взаємодія альфа- та бета-частинок з речовиною**

Всі види ядерного випромінювання можуть бути виявлені тільки при їх взаємодії з речовиною. Процеси, які виникають при проходженні ядерного випромінювання через речовину, мають важливе практичне значення. Знання таких процесів необхідно, по-перше, для розуміння принципу роботи дозиметричної і радіометричної апаратури, а по-друге, для способів захисту населення від іонізуючих випромінювань.

При проходженні через речовину частинки взаємодіють з атомами, з яких воно складається, тобто з електронами і атомними ядрами.

#### ***1) взаємодія альфа-частинок з речовиною.***

Альфа-частинки, проходячи через шар речовини, взаємодіють з атомними ядрами і електронами. Пружне розсіяння альфа-частинок на ядрах атомів речовини малоімовірно, тому що, по-перше, маса ядра значно більша за масу частинки, по-друге, ядро і альфа-частинки мають однаковий (позитивний) електричний заряд. В процесі пружного зіткнення альфа-частинки з ядром вона відхиляється на малий кут. Таким чином, шлях альфа-частинки в речовині (середовищі) практично прямолінійний.

При непружному розсіянні енергія альфа-частинки передається атомним електронам. Отримавши цю енергію, атоми речовини збуджуються або іонізуються. І в тому, і в іншому випадку втрати енергії частинки називаються ***іонізаційними***. Якщо концентрація електронів в речовині дорівнює  $n_e$ , то втрати енергії частинки (іонізаційні втрати) в результаті її взаємодії з усіма зустрічними на її шляху електронами будуть визначатися величиною –

$(dE/dx)_{\text{IОН}}$  – зменшенням енергії частинки на одиницю шляху. Іонізаційні втрати характеризуються величиною середньої втрати енергії на одиницю шляху.

Ці втрати пропорційні енергії частки  $E_{\alpha}$ , концентрації електронів в речовині  $n_e$  і обернено пропорційні швидкості руху частинки  $v$ , тобто:

(1)

Втрати енергії сильно залежать від швидкості частинки – вони тим більші, чим менша швидкість частинки. При дуже малих швидкостях частинки формула (1) дає завищення значення для втрат енергії частинки і крива втрат спрямована в нескінченність. Таким чином, при кожному акті іонізації альфа-частинка вибиває з атома один або кілька електронів. Найбільш швидкі з цих електронів здатні створювати вторинну іонізацію, в результаті якої вторинні електрони можна зареєструвати за допомогою приладів.

### ***1) взаємодія бета-частинок з речовиною.***

У порівнянні з альфа-частинками проходження бета-частинок через речовину має свої особливості. Основна особливість обумовлена малою масою електрона і позитрона в порівнянні з масою альфа-частинки. При взаємодії бета-частинки з речовиною має місце як іонізаційні, так і радіаційні втрати. Механізм іонізаційних втрат для бета-частинок такий же, як і для альфа-частинок. Тому втрати енергії на іонізацію і в цьому випадку розраховуються за тією ж формулою (1). Однак іонізаційні втрати для бета-частинок у багато разів менші, ніж для альфа-частинок, так як маса альфа-частинки значно більша за масу електрона. Саме тому у альфа-частинок і бета-частинок різна проникаюча здатність.

При русі крізь речовину бета-частинок в результаті взаємодії однієї з них з електроном речовини відбувається зміна напрямку руху бета-частинки. Тому траєкторія руху бета-частинки в речовині є ламаною лінією. При взаємодії бета-частинок з ядром має місце перерозподіл кінетичної енергії між ядром і частинкою. Тому така взаємодія є пружним зіткненням.



За рахунок заряду протонів ядра навколо нього створюється кулонівське поле. Кулонівські сили пропорційні заряду ядра. Під дією кулонівських сил заряджена бета-частинка, маючи малу масу, отримує прискорення. Відповідно до класичної електродинаміки будь-яка заряджена частинка, що рухається з прискоренням, випромінює електромагнітні хвилі, інтенсивність яких пропорційна квадрату прискорення частинки. Це випромінювання називається *гальмівним*, а довжина його хвилі відповідає довжині хвилі рентгенівського випромінювання.

Втрати на гальмівне випромінювання істотні для легких частинок-електронів.

Ці причини призводять до того, що втрати енергії частинки на взаємодії з ядрами, тобто радіаційні втрати –  $(dE/dx)_{\text{рад}}$ , значно менші втрат енергії частинки на іонізацію і оцінюються виразом:

(2)

де  $E_\beta$  – енергія бета-частинки;  $m_\beta$  – маса бета-частинки.

Втрати на гальмівне випромінювання пропорційні заряду ядра.

## **2.4. Взаємодія $\gamma$ -випромінювання та нейтронів з речовиною.**

### ***1. Вплив $\gamma$ -випромінювання на речовину.***

Гамма та рентгенівське випромінювання – це електромагнітні хвилі. Рентгенівське випромінювання виникає при взаємодії заряджених частинок з атомами речовини, а  $\gamma$ -випромінювання виникає при переході атомних ядер зі збуджених станів в стан з меншою енергією. Довжина хвилі  $\gamma$ -випромінювання менше 0,2 нанометри. Для цих видів випромінювань не існує понять величини пробігу, втрат енергії на одиницю шляху.

$\gamma$ -промені, проходячи через речовину, взаємодіють як з електронами, так і з ядрами атомів середовища (речовини). В результаті взаємодії інтенсивність променів зменшується. Для однорідної речовини зменшення інтенсивності випромінювання відбувається за експоненціальним законом:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

де  $I$  – інтенсивність променів після проходження речовини товщиною  $x$ ;  $I_0$  – початкова інтенсивність променів;  $\mu$  - лінійний коефіцієнт зменшення інтенсивності.

**Лінійний коефіцієнт зменшення інтенсивності випромінювання** – це відносне зменшення інтенсивності напрямленого випромінювання на одиницю товщини речовини (середовища). Якщо розглядається не товщина середовища (речовини), а її маса, то користуються терміном масового коефіцієнта зменшення інтенсивності випромінювання, який оцінюється виразом:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина середовища, яке поглинає випромінювання.

Поглинання  $\gamma$ -квантів речовиною супроводжується, в основному, трьома процесами: фотоефектом, комптонівським розсіюванням і народженням у кулонівському полі електрон-позитронних пар.

Фотоефект має місце в тому випадку, коли енергія  $\gamma$ -кванта приблизно дорівнює енергії зв'язку електронів з ядром речовини (енергія зв'язку атома  $E_{зв.ат.}$ ), тобто  $E_{\gamma-кв.} \cong E_{зв.ат.}$ .

Процес поглинання  $\gamma$ -кванта атомним електроном, при якому електрон залишає межі атома, називають фотоефектом. Найменшу енергію зв'язку мають електрони К-оболонки атома. Тому К-оболонка дає максимальний фотоефект.

Зі збільшенням енергії  $\gamma$ -кванта, коли вона стає значно більше енергії зв'язку електрона в атомі, основним механізмом поглинання енергії випромінювання речовиною є **ефект Комптона або комптонівське розсіювання**. Весь процес можна уявити як абсолютно пружний удар  $\gamma$ -кванта і вільного електрона, який до удару можна вважати нерухомим. При енергії  $\gamma$ -кванта 1,02 і більше МеВ поряд з фотоефектом і комптонівським розсіюванням відбувається знищення  $\gamma$ -квантів за рахунок утворення електронно-позитронних пар ( $e^+e^-$ ).

## 2. Взаємодія нейтронів з речовиною.

Проходячи через речовину, нейтрони практично не взаємодіють з атомними електронами, так як нейтрони не мають електричного заряду. В основному нейтрони взаємодіють з атомними ядрами речовини. Оскільки ядра займають малу частину об'єму атома, то проникаюча здатність нейтронів набагато більша, ніж заряджених частинок. Залежно від того, попаде нейтрон в ядро чи ні, його взаємодію з ядром поділяють на два класи: а) пружне розсіяння під дією ядерних сил без попадання в ядро (пружне зіткнення); б) різні ядерні реакції, викликані потраплянням нейтрона в ядро.

Вид взаємодії або реакції істотно залежить від кінетичної енергії нейтрона. За величиною енергії нейтрони діляться на три основних види: теплові з енергією в межах  $10^{-3} \dots 0,5$  еВ, резонансні –  $0,5 \dots 10^4$  еВ і швидкі –  $10^4 \dots 10^8$  еВ.

Пружне розсіяння можна розглядати як пружне зіткнення двох куль: нейтрона і ядра. При цьому електрон передає частину кінетичної енергії ядру. При проходженні нейтрона через речовину, під його впливом відбуваються різні ядерні реакції. **Ядерними реакціями** називаються перетворення атомних ядер, що відбуваються в результаті їх взаємодії з елементарними частинками або один з одним. В результаті зіткнення появляються нові частинки, перерозподіляється енергія між частинкою і ядром (або між ядрами, зіткнулись).

Перебудова ядер в процесі реакції супроводжується зміною їх внутрішньої енергії і, отже, енергії спокою ядер. Різниця енергій спокою  $E_2$  і після реакції  $E_1$  називають **енергією реакції**  $Q$ , тобто

$$Q = E_2 - E_1 \quad (3)$$

При  $Q > 0$  в результаті реакції виділяється кінетична енергія за рахунок зменшення енергії спокою ядра. Така реакція може відбуватись за будь-якої кінетичної енергії частинки, достатньою для подолання сил кулонівського відштовхування. При  $Q < 0$  реакція проходить зі зменшенням кінетичної енергії, за рахунок якої зростає енергія спокою. Така реакція може проходити тільки при високих енергіях частинки, що перевищує деяке мінімальне,

порогове значення. При  $Q = 0$  відбувається пружне розсіяння, при якому зберігається як повна, так і сумарна кінетична енергія, а значить, і сумарна енергія спокою.

Проходження радіоактивних випромінювань через речовину призводить до іонізації її атомів. У зв'язку з цим радіоактивні випромінювання називають *іонізуючими*. У загальному випадку під іонізуючим випромінюванням розуміють будь-яке випромінювання, взаємодія якого із середовищем призводить до утворення іонів різних знаків.

Розрізняють безпосередньо іонізуюче і побічно іонізуюче випромінювання. **Безпосередньо іонізуюче** – це випромінювання, що складається з заряджених частинок, що мають кінетичну енергію, достатню для іонізації при зіткненні. **Побічно іонізуюче** – це випромінювання, що складається з незаряджених частинок, які в результаті взаємодії із середовищем може створювати іонізуюче випромінювання.

### Список використаних джерел до розділу 2

1. Шапорев В.П., Масікевич Ю.Г., Моїсєєв В.Ф., та ін. Радіоекологія: підручник. Чернівці: «Місто» АНТ, 2018. 440 с.
2. Носовський А., Бондар Б. Дозиметрія та захист від іонізуючого випромінювання : підручник. Київ : Фенікс, 2020. 408 с.
3. Батлук В. А. Радіаційна екологія :навч. посібник. В.А. Батлук. К.: Знання, 2009. 309 с.
4. Радіаційна гігієна: Підручник / за редакцією проф. В.Я. Уманського та проф. С.Т. Омельчука. Донецьк: Норд-Прес, 2009. 143 с.
5. Ключников О. О. Основи дозиметрії іонізуючих випромінювань: Навчальний посібник. Київ: Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, 2007. 256 с.

## **РОЗДІЛ 3. ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА І ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА**

### **3.1. Особливості будівництва і експлуатації атомних електростанцій**

Джерелом опромінення оточуючого середовища, людей, тваринного і рослинного світу є атомні електростанції і продукти технологічних циклів ядерної енергетики, розвиток якої охоплює все більшу кількість країн і територій нашої планети. При нормальній роботі ядерних установок викид радіонуклідів через вентиляційні труби незначний і навіть менший (в 5-10раз), ніж на теплових електростанціях такої ж потужності, які спалюють велику масу вугілля, викидаючи з димом радіоактивні ізотопи присутні у вугіллі.

#### ***Основні негативні сторони ядерної енергетики:***

1. Висока ціна будівництва атомних реакторів разом із захисними спорудами (на один сучасний блок потужністю 1000МВт витрачаються кошти біля 1 мільярда доларів США);
2. Більш тривалий термін окупності в порівнянні з тепловими електростанціями;
3. Менший коефіцієнт корисної дії, ніж в теплових електростанціях. Це зв'язано з нижчою температурою пари виробленої атомним реактором. Тому атомні електростанції споживають більше прісної води для охолодження атомних блоків і відпрацьованої пари (в порівнянні з тепловими електростанціями);
4. Невеликий термін слугування атомних блоків (до 30 років). Існує методика продовження цього терміну на 10 і більше років. Після вироблення свого технічного ресурсу економічно вигідним є закриття АЕС, ніж проведення ремонту;
5. Проблеми переробки використаних ТВЕЛів і зберігання дуже радіоактивних відходів (протягом тривалого періоду);

#### ***До позитивних особливостей ядерної енергетики відноситься:***

1. Наявність в природі значних запасів урану і його використання на АЕС в невеликій кількості в порівнянні із спалюванням великої кількості

- мінерального палива (вугілля, газу, нафти, тощо) на теплових електростанціях такої ж потужності;
2. Значно менше забруднення атмосфери шкідливими викидами і газами (особливо парникового характеру), що має місце в тепловій енергетиці;
  3. Вивільнення транспорту і заощадження коштів для підвезення невеликої кількості ядерного палива до АЕС, на відміну від теплової енергетики, яка споживає велику кількість палива;
  4. Значно менша територія атомних електростанцій в порівнянні з тепловими такої ж потужності де зберігаються гори відходів (шлаку, пилу з якого вимиваються дощовими водами важкі метали і інші шкідливі речовини, що забруднюють ґрунтові води);
  5. На даний час в Росії виробляється до 18 % електроенергії на АЕС. В 60-70 роках минулого століття Україна добувала ~14млн.т.нафти на рік (на даний час ~5 млн.т.на рік) і ~50 мільярдів м<sup>3</sup> природнього газу (відомі родовища - Шебелинка, Дашова і інші). Станом на сьогодні в Україні добувається ~20 мільярд. м<sup>3</sup> газу на рік.

Для забезпечення своєї енергетичної програми Україна збільшила виробництво електроенергії на атомних електростанціях до 58% від всієї електроенергії завдяки великим запасам високоякісної уранової руди, якої хватить для задоволення потреб ядерної енергетики на 200 років.

Найбільшого поширення в ядерній енергетиці набули водо-водяні ядерні реактори. В таких реакторах сповільнювачем нейтронів і теплоносієм є звичайна, добре очищена від сторонніх домішок вода. Оскільки звичайна вода крім сповільнення нейтронів поглинає деяку їх частину, то ядерним паливом для реакторів даного типу є збагачений ізотопом урану <sup>235</sup>U до 3,6-4% природний уран (в якому <sup>235</sup>U є ~0,75%). При цьому, суттєвою перевагою є те, що наведена поглинутими нейтронами активність води зумовлена короткоживучими радіонуклідами швидко спадає. Це спрощує вимоги до біологічного захисту реактора.

Крім водо-водяних енергетичних реакторів (ВВЕР) в енергетиці знайшли використання каналні реактори (РБМК) в яких немає корпусу, що витримує високий тиск (як в реакторах ВВЕР). В каналних реакторах тепловиділяючі елементи (ТВЕЛ) розміщені в каналах графітового сповільнювача. Вважається, що відсутність корпусу високого тиску в реакторах РБМК є перевагою над реакторами ВВЕР, оскільки виготовлення корпусу під високий тиск є дорогою і складною в технічному відношенні задачею. На жаль реактори РБМК більш складніші в управлінні, вимагають швидкої реакції на нестандартні випадки але порівняно з ВВЕР мають більше вироблення плутонію (який використовується у військових цілях, як ядерна вибухівка). На Чорнобильській атомній електростанції відбулося руйнування саме реактора РБМК. Ці реактори вважаються більш небезпечними і після аварії на ЧАЕС зазнали значних удосконалень і були оснащені додатковими системами регулювання і захисту.

В Україні є значні запаси урану. Переробка і первинна стадія збагачення уранової руди здійснюється на заводах Дніпропетровської, Миколаївської та Кіровоградської областей, які входять до складу виробничого об'єднання «Східний гірничо-збагачувальний комбінат» (ВО Схід ГЗК).

Тому будівництво АЕС на території України вимагає створення дорогих, надійних і міцних фундаментів, спеціальних робіт по укріпленню карстових порід. Згідно перспективних планів розвитку атомної енергетики, в Україні передбачається до 2030 року довести кількість ядерних реакторів на АЕС до 30.

### **3.2. Вплив атомних електростанцій і ядерного паливного циклу на радіаційне забруднення оточуючого середовища.**

При нормальній роботі ядерних реакторів викиди радіоактивних матеріалів в оточуюче середовище невелике. Дані дозиметричної служби показали, що фактичні викиди на АЕС значно менші гранично допустимих. Для інертних газів вони становлять 400-600 Кі/добу, для йоду – 131, для довго

живучих радіонуклідів в 60-100 разів, а для коротко живучих радіонуклідів – в 1000 раз менші допустимих норм.

Опромінення персоналу АЕС під час роботи ядерного реактора невелике, воно помітно зростає у випадку проведення ремонтних і профілактичних робіт, в основному, за рахунок гама-випромінювання активної зони реактора і деяких конструктивних матеріалів. Середня доза опромінення персоналу АЕС за рік лежить в межах 1,25-5 Бер.

Складність фізичних процесів, які протікають в атомних реакторах і систем регулювання потужністю реакторів, вимагають неухильного дотримання правил безпеки при обслуговуванні ядерних енергетичних установок. Причини, які приводять до виходу з ладу атомних реакторів поділяються на дві великі групи:

1. Конструктивні недоліки і недосконалості окремих вузлів реактора, допущення браку у їх виготовленні;
2. Порушення правил експлуатації реактора, слабка підготовка обслуговуючого персоналу.

Найбільш небезпечні аварії на ядерних реакторах зумовлені самовільним їх розгоном – неконтрольоване зростання потужності, обумовлене зростанням інтенсивності протікання ланцюгових реакцій і збільшенням коефіцієнта розмноження нейтронів в активній зоні реактора. Єдиним методом боротьби з такими аваріями є безпомилкова робота системи управління та захисту (СУЗ) атомного реактора. Основними елементами такої системи є сильно поглинаючі нейтрони стержні керування, виготовлені із сполук кадмію, бору, гафнію та рідкоземельних елементів.

Розрізняють три основних типи аварій на АЕС, що супроводжуються радіоактивним забрудненням оточуючого середовища: локальні, місцеві та загальні. При локальних аваріях радіаційні наслідки локалізуються в невеликій області (приміщенні, будівлі, цеху) де знаходиться аварійне джерело радіації. Місцеві аварії включають більшу забруднену радіонуклідами територію, а саме, територію, де розміщена АЕС і найближчі прилеглі до станції місця. Якщо в



результаті аварії радіоактивні речовини були викинуті за межі АЕС і забруднили велику територію, де проживають люди, що привело до додаткового опромінення населення, то така аварія набуває статусу загальної.

Для оцінки масштабів ядерних аварій Міжнародною агенцією з атомної енергетики (МАГАТЕ) спільно з Агентством з ядерної енергії Організації економічного співробітництва та розвитку була розроблена єдина шкала ідентифікації нестандартних ситуацій на АЕС (шкала INES). Ця шкала містить 7 градацій (таблиця 23). Градація рівнів проводиться за трьома критеріями: втрати в системі безпеки, негативні наслідки на місці події і поза її межами. Кожен наступний рівень приблизно в 10 разів небезпечніший по своїм наслідкам від попереднього. Події, які відносяться до першого рівня, кваліфікуються як «аномалія», до рівнів 2, 3 – класифікуються як «інцидент», а до 4-7 рівнів – «аварії», або нещасні випадки. Отже, аварія, яка відноситься до 7 рівня, за своїми наслідками найсерйозніша. Окрім того, вводиться нульовий рівень подій, який не вносить ніяких змін у стан безпеки ядерного об'єкта і довкілля.

Атомні електростанції є лише частиною всієї ядерної енергетики, яка включає добування і збагачення уранової руди, переробки відпрацьованих ТВЕЛів, транспортування, захоронення радіоактивних відходів. На кожній стадії ядерного циклу в оточуюче середовище попадають радіоактивні речовини.

Кожен реактор, особливо при аваріях, які кваліфікуються випадком і нещасним випадком, викидає в оточуюче середовище цілий ряд радіонуклідів з різними періодами напіврозпаду, які опромінюють населення в залежності від розміщення АЕС. Більшість радіонуклідів швидко розпадається і забруднює невелику територію. Разом з тим деякі із них мають тривалий період життя і можуть розповсюджуватись по всій Земній кулі. Найбільш довгоживучі залишаються в оточуючому середовищі на тисячі і більше років.

В світовому масштабі 10-20% використаного на АЕС ядерного палива направляється на переробку з метою вивільнення урану – 235, який не повністю

прореагував в ядерному реакторі і утвореного під час ланцюгової реакції плутонію. Ці речовини можуть повторно використовуватися в ядерному енергетичному циклі, або поповнити військові арсенали в якості вибухівки.

В реакторах на теплових нейтронах типу ВВЕР-1000 коефіцієнт відновлення ядерного палива рівний 0,55, тобто на кожний кілограм «згорівшого» в ядерній реакції урану – 235 утворюється 0,55 кг плутонію.

До останньої стадії ядерного паливного циклу відноситься захоронення високоактивних відходів АЕС, включаючи відходи після переробки відпрацьованого ядерного палива. Проблема захоронення ядерних відходів до кінця не розроблена. Вважається найбільш надійно могильник ядерних відходів створювати на великій глибині в складках породи в геологічних пластах стабільних районів суші, або глибоко в океані між геологічними пластами дна.

Підвищену дозу опромінення одержують також шахтарі глибоких вугільних шахт і копалень, де добувають залізну руду. Часто ця доза буває більшою, ніж для шахтарів уранових копалень. Високі дози – більші 300 мЗв в рік, що перевищує фонове опромінення в 6 раз одержує персонал курортів, де використовують радонові ванни.

За останній період (протягом 15-20 років) відбувається зменшення частоти виникнення різних нештатних ситуацій в ядерній енергетиці. Це свідчить про удосконалення технічних систем ядерної енергетики, накопичення досвіду роботи з радіоактивними матеріалами і ядерними установками, покращення методики підготовки обслуговуючого персоналу.

### Список використаних джерел до розділу 3

1. Давидюк Г.Є., Мирончук Г.Л. Радіація і людина : навч. посіб. Луцьк : «Вежа» Волин. націон. ун-ту ім. Лесі Українки, 2019. 292с.
2. Іванов Є. Радіаційна екологія: Навчально-методичний посібник. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2011. 217 с.
3. Шапорєв В.П., Масікевич Ю.Г., Моїсєєв В.Ф., та ін. Радіоекологія: підручник. Чернівці: «Місто» АНТ, 2018. 440 с.
4. Тарнавський А.Б., Сукач Р.Ю., Сукач Ю.Г. Техногенна безпека АЕС: навчальний посібник. Л.: Вид-во «Растр-7». 2014. 372 с.
5. Кузьменко М.І., Романенко В.Д., Деревець В.В., та ін. Вплив радіонуклідного забруднення на гідробіоти зони відчуження. / Радіонукліди у водних екосистемах України. Київ: Чорнобильінтерінформ. 2001. 318 с.

Навчально-методичне видання

**Галян Володимир Володимирович**

**Мирончук Галина Леонідівна**

**Кевшин Андрій Григорович**

**Зімич Тетяна Федорівна**

**Радіаційна безпека та екологія**

**Тези лекцій**

Друкується в авторській редакції