

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО  
ПРОЕКТУ З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**Фізичні основи радіометрії та дозиметрії**

Напрямок підготовки - 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього  
середовища та збалансоване природокористування»

Одеса – 2017

Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Фізичні основи радіометрії та дозиметрії». Напрямок підготовки - 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування», Одеса, ОДЕКУ, 2017 р. - 42 с.

Розробники: Курятников В.В., Співак А.Я., Кільян А.М.

## ЗМІСТ

	с.
ВСТУП .....	4
1. СТРУКТУРА ТА ЗМІСТ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ .....	5
2. ОРГАНІЗАЦІЯ ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ .....	9
2.1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ .....	9
2.2. МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ В РАДІОМЕТРІЇ ТА ДОЗИМЕТРІЇ .....	23
3. ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВИКОНАННЯ 2-ГО РОЗДІЛУ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ .....	28
3.1 ВИЗНАЧЕННЯ ПРОБІГУ БЕТА -ЧАСТИНОК .....	28
3.2 РОЗРАХУНКИ ВЗАЄМОДІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З РЕЧОВИНОЮ .....	32
4. ПОРЯДОК ЗАХИСТУ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ .....	38
5. ВИМОГИ СТАНДАРТІВ ДО КУРСОВОГО ПРОЕКТУ .....	39
ПЕРЕЛІК НАВЧАЛЬНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	42

## ВСТУП

Метою виконання типового курсового проекту з дисципліни “Фізичні основи радіометрії та дозиметрії” є поглиблене вивчення фізичних основ різних методів дозиметрії та радіометрії, вивчення таких понять, як дози випромінювання, коефіцієнт послаблення та коефіцієнт передачі енергії, визначення доз і потужності дози від різних видів іонізуючих випромінювань, питання активності радіоактивних речовин, визначення співвідношення між активністю радіоактивної речовини і дозою.

Задача курсового проекту - засвоєння механізмів фізичних процесів, які відбуваються при взаємодії радіоактивних випромінювань з речовиною, методів вимірювання дози випромінювання та активності радіоактивних препаратів, методів захисту від іонізуючих випромінювань, придбання вмінь та навиків, що застосовуються у радіоекологічній практиці.

В результаті виконання курсового проекту з дисципліни “Фізичні основи радіометрії та дозиметрії” студент повинен розбиратися в особливостях дозиметрії різноманітних видів випромінювань, питаннях визначення дози і потужності дози від різних видів іонізуючих випромінювань, володіти методами контролю радіаційного стану природних та технологічних об’єктів, здійснювати контроль радіаційного стану за допомогою радіометричних та дозиметричних приладів, вміти визначати дозові навантаження на основні компоненти екосистем, розрахувати величину отриманої дози, оцінювати розмір ризику та запропоновувати способи його зменшення.

На основі запропонованого студенту алгоритму, він, використовуючи прилади радіоекологічної лабораторії та запропоновані йому вихідні дані має визначити кількісні характеристики вмісту та розсіювання радіонуклідів у природних об’єктах, провести аналіз радіаційної безпеки досліджуваних об’єктів та оцінити безпечність і відповідність їх державним і міжнародним нормативам та стандартам радіаційної безпеки.

# 1. СТРУКТУРА ТА ЗМІСТ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.

Курсовий проект складається з: 1) вступу; 2) трьох розділів; 3) висновків; 4) переліку літератури.

Рекомендації щодо виконання курсового проекту наведені нижче.

1. Вступ містить назву теми курсового проекту, мету роботи, актуальність обраної теми та постановку задачі, яку студент узгоджує з викладачем кафедри.

2. У курсовому проекті розділ 1 є теоретичним (літературний огляд), 2-ий розділ – це оригінальна частина (експериментальна та розрахункова), 3-ий розділ – це аналітичний розділ.

3. Студент повинен перш за все обрати собі тему курсового проекту та узгодити її з викладачем, який читає лекції з даної дисципліни. Варіанти тем курсового проекту наведені нижче.

## ВАРІАНТИ ТЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

1. Фізичні принципи радіометрії та дозиметрії гамма-випромінювання та захист від нього
2. Фізичні принципи радіометрії та дозиметрії  $\beta$  - випромінювання та захист від нього.
3. Фізичні процеси проходження  $\gamma$ -квантів крізь речовину. Коефіцієнт послаблення випромінювання в цих процесах.
4. Основні принципи та методи реєстрації іонізуючого випромінювання.
5. Детектування іонізуючого випромінювання. Прилади для реєстрації іонізуючого випромінювання.
6. Рентгенівське випромінювання. Рентгенівські апарати.
7.  $\gamma$ -випромінювання. Лінійна передача енергії  $\gamma$ -випромінювання.
8. Ефекти дії іонізуючого випромінювання на речовину. Наведена активність.
9. Проведення радіаційно-дозиметричного контролю в об'єктах навколишнього середовища
10. Спектри гамма-випромінювання. Гамма-спектрометрія.

Варіанти тем, що запропоновані студентам для виконання курсового проекту, обмежені джерелами бета-випромінювання та гамма-випромінювання. Це дозволяє запропонувати єдину форму виконання курсового проекту, результатом якого може бути оцінювання радіаційної безпеки при поводженні з різними джерелами іонізуючого випромінювання, які суттєво відрізняються між собою за фізичними явищами та фізичними принципами. Дані з радіаційно-дозиметричного контролю можуть бути використані у курсовому проекті для експертної

оцінки радіаційної обстановки за допомогою нормативних та законодавчих актів (Норми радіаційної безпеки України НРБУ-97, Основні санітарні правила протирадіаційного захисту населення України ОСПУ, санітарні правила поведження з радіоактивними відходами).

### **Рекомендації до виконання першого розділу ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД**

У теоретичній частині (літературному огляді) курсового проекту обов'язково потрібно визначити величини, за допомогою яких оцінюється вплив іонізуючого випромінювання на людину та системні і позасистемні одиниці їх вимірювання, висвітлити прийняті в Україні норми радіаційної безпеки для різних категорій населення, розглянути можливі наслідки радіаційного опромінення та освітити питання захисту від іонізуючого випромінювання.

У першому розділі курсового проекту за будь-якою обраною темою потрібно зробити літературний огляд за темою проекту, у якому обов'язково також освітити питання:

*іонізуюче випромінювання, радіаційний фон, активність, експозиційна, поглинута, еквівалентна дози, їх потужності, системні та позасистемні одиниці вимірювання активності, експозиційної, поглинутої, еквівалентної доз іонізуючого випромінювання; норми радіаційної безпеки України, гранично допустима доза випромінювання за нормами НРБУ, методи та прилади для вимірювань іонізуючого випромінювання..*

### **Рекомендації до виконання другого розділу Експериментальні дослідження**

У другому розділі потрібно провести експериментальні дослідження, в яких експериментально визначити потрібні для виконання проекту певні дані фізичних величин.

Для цього студент послідовно проводить:

1) вимірювання на лабораторному устаткуванні та дозиметром «Стора» щільності потоку бета-випромінювання для даного джерела іонізуючого випромінювання;

2) вимірювання потоку частинок  $\beta$  - випромінювання обраними для захисту від нього матеріалами на лабораторному устаткуванні та за допомогою радіометра РУБ-01;

3) вимірювання потоку гамма-випромінювання обраними для захисту від нього матеріалами на лабораторному устаткуванні та за допомогою дозиметра «Стора»;

4) виконати відповідні розрахунки коефіцієнтів поглинання  $\beta$  - випромінювання обраними для захисту від нього матеріалами;

5) для двох пластинок однієї речовини товщиною  $x_1$  і  $x_2$  визначити коефіцієнт поглинання електронів:

$$\mu = \frac{\ln N_1 - \ln N_2}{x_2 - x_1}, \quad (1)$$

де  $N_1$  і  $N_2$  - відповідно кількість частинок, що проходять через шар речовини товщиною  $x_1$  і  $x_2$ ; так саме знайти коефіцієнт поглинання бета-частинок для іншої речовини.

б) визначити коефіцієнт поглинання гамма-випромінювання здійснити також за формулою (1).

Отримані у другому розділі значення коефіцієнтів поглинання використати у третьому розділі курсового проекту.

4) коефіцієнт поглинання гамма-випромінювання

**Рекомендації до виконання третього розділу  
ОЦІНЮВАННЯ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА З ВРАХУВАННЯМ ЗАХИСТУ  
ВІД ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.**

Розділ 3-й – аналітичний, містить завдання для виконання розрахункової частини проекту. Варіант завдання відповідає номеру варіанта тем курсового проекту.

Для всіх варіантів тем, що запропоновані студентам для виконання курсового проекту, пропонується провести спочатку визначення характеристик  $\beta$  - випромінювання, яке здійснювалося у другому розділі проекту.

Завдання для виконання третього розділу курсового проекту наведені у таблиці 1.

Варіант завдання, яке виконує студент повинен відповідати номеру варіанта теми курсового проекту. Номер завдання міститься у колонці 5 таблиці 1. Самі завдання містяться у третьому розділі методичних вказівок.

Наприклад, якщо тема курсового проекту має номер 6, то студенту потрібно зробити розрахунки другого завдання за трьома задачами - 2.6, 2.16 та 2.26. № завдання міститься у колонці 5 таблиці 1

**Таблиця 1. Завдання для виконання другого розділу КП**

Завдання №	Завдання курсового проекту	Вид і.в.	Варіант КП	№ задачі
1	2	3	4	5
1	Визначення пробігу та енергії заряджених частинок у речовині. Лінійна передача енергії.	бета-випромінювання	0	Завдання 1
			1	Завдання 1
			2	Завдання 1
			3	Завдання 1

			4	Завдання 1		
			5	Завдання 1		
			6	Завдання 1		
			7	Завдання 1		
			8	Завдання 1		
			9	Завдання 1		
2	Розрахунки взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною. Основні механізми взаємодії.	Гамма-випромінювання	0	2.10,2.20,2.30		
			1	2.1, 2.11, 2.21		
			2	2.2, 2.12, 2.22		
				бетта-випромінювання	3	2.3, 2.13, 2.23
					4	2.4, 2.14, 2.24
					5	2.5, 2.15, 2.25
					6	2.6, 2.16, 2.26
					7	2.7, 2.17, 2.27
					8	2.8, 2.18, 2.28
		9	2.9, 2.19, 2.29			
3	Фотонне випромінювання. Коефіцієнт передачі енергії.	γ-випромінювання	всі	Завдання 3,4		
4	Основні принципи та методи індикації іонізуючого випромінювання (іонізаційний, напівпровідниковий, сцинтиляційний, люмінесцентний)	Згідно варіанту	всі	Згідно варіанту		
5	Прилади та обладнання для вимірів параметрів іонізуючого випромінювання.	Згідно варіанту	всі	Згідно варіанту		
6	Поглинута, експозиційна та еквівалентна доза випромінювання. Потужність дози випромінювання. Колективна доза.	рентгенівське випромінювання	всі	Завдання 7		
		γ-випромінювання	всі	Завдання 7		
7	Визначення еквівалентної дози методом дозових коефіцієнтів.	бетта-випромінювання	всі	Завдання 8 - 12		
		гамма-випромінювання				
8	Радіаційно-дозиметричний контроль джерел іонізуючого випромінювання в об'єктах навколишнього середовища.		всі	Завдання 14		

Під оцінкою радіаційної безпеки розуміють аналіз отриманих результатів та вибір найбільш доцільного варіанту дій, при якому люди отримають найменшу дозу опромінення. Аналіз результатів та вибір найбільш доцільного варіанту дій студенти роблять за даними розрахунків в завданнях 8-12 та 14-15 п'ятої колонки таблиці 1.

Для того, щоб спрогнозувати ступінь радіаційної небезпеки і вжити певних мір захисту населення (виробничого персоналу об'єкту), необхідно



виявити та оцінити радіаційну обстановку (РО). Третій розділ курсового проекту стосується проведення експертної оцінки по радіаційній обстановці за допомогою нормативних та законодавчих актів 1) Норми радіаційної безпеки України НРБУ-97, 2) Основні санітарні правила протирадіаційного захисту населення України ОСПУ, 3) Санітарні правила поводження з радіоактивними відходами). Висновки стосовно стану навколишнього середовища стосуються визначень розмірів прогнозованих зон зараження в залежності від категорії стійкості атмосфери (інверсія, ізотермія, конвекція), а також швидкості переносу радіоактивної хмари у напрямку вітру, або швидкості міграції радіонуклідів, наприклад, з потоком води у річці. далі визначається, чи потрапляє об'єкт (населений пункт) в зону зараження. Якщо потрапляє, то визначається в яку саме зону.

## 2. ОРГАНІЗАЦІЯ ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

У наступному розділі студентам запропоновані основні теоретичні відомості, що потрібні для виконання курсового проекту (проведення вимірювань та здійснення відповідних розрахунків).

Основним допоміжним матеріалом для роботи студентів при виконанні курсового проекту є конспект лекцій, що читається для студентів за спеціальністю навчання.

### 2.1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Приставаючи до вивчення курсу “Фізичні основи радіометрії і дозиметрії”, студенти повинні мати чіткі уявлення про склад атомного ядра, теоретичні основи фізики іонізуючого випромінювання, фізичні принципи взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною. Студенти повинні бути ознайомлені з таким поняттям, як *лінійна передача енергії*.

#### 2.1.1 ВЗАЄМОДІЯ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З РЕЧОВИНОЮ

Основними загальними наслідками проходження іонізуючих частинок крізь речовину є: іонізація та збудження атомів та молекул речовини. Треба окрема розглядати 1) заряджені частинки (важкі та легкі), 2)  $\gamma$  – випромінювання та 3) нейтрони.

У нерелятивістському наближенні іонізаційні втрати енергії:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іон}}^T = \frac{4\pi e^2}{m_0} \left(\frac{ze}{v}\right)^2 n_e \ln \frac{2m_0 v^2}{I(Z)}, \quad (1)$$

де  $m_0$  - маса електрона,  $z$  - зарядове число іонізуючої частинки,  $v$  - її швидкість,  $Z$  – зарядове число атомів (чи порядковий номер) речовини,  $n_e$  - число електронів в 1 см<sup>3</sup> речовини,  $I$  – середній іонізаційний потенціал атомів поглинач, усі величини виражені в одиницях СГС<sub>Е</sub>.

Лінійну втрату енергії ще називають лінійною передачею енергії і часто позначають літерою  $L_{\Delta}$ , її можна виразити через енергію частинки  $E$

$$L_{\Delta} = \frac{2\pi \cdot e^4 z^2}{E \cdot m_0} \frac{M \cdot n_e}{I(Z)M} \ln \frac{4E \cdot m_0}{I(Z)M}, \quad (2)$$

де  $M$  – маса іонізуючої частинки.

Число електронів в одиниці об'єму можна виразити через густину  $\rho$

$$n_e = \frac{ZmN_A}{V\mu} = Z\rho N_A/\mu. \quad (3)$$

Середній потенціал іонізації атомів речовини визначається через порядковий номер  $Z$

$$I(Z) = 13.5 \cdot Z \text{ eV}. \quad (4)$$

Якщо речовина складається з молекул, то ефективний середній потенціал іонізації розраховується за формулою

$$\ln I = \frac{\sum_i N_i Z_i \ln I_i}{\sum N_i Z_i}, \quad (5)$$

і сума по всіх атомах у молекулі,  $N_i$  – число атомів  $i$ -го сорту у молекулі.

Формулу (2.2) можна записати у вигляді, що дуже скорочує розрахунки:

$$L = \frac{B n}{E} \ln \frac{4Em_0}{MI} \quad (6)$$

$$\text{де } B = \frac{2\pi z^2 e^4 M}{m_0 1.6 \cdot 10^{-6}}, \quad (7)$$

заряд та густину треба брати в одиницях СГСЕ, а енергію у знаменнику в МеВ, тоді лінійна втрата енергії буде у ерг/см. Під знаком логарифма краще за все енергію та іонізаційний потенціал брати в еВ. У радіоекології для лінійних втрат часто користуються позасистемними одиницями МеВ/мкм, їх зв'язок з системними:

$$1 \text{ ерг/см} = 6.25 \text{ МеВ/мкм}.$$

Таким чином, якщо відомо, про які іонізуючі частинки іде мова, можна легко розрахувати  $B$ , так, наприклад, для протонів ( $z = 1$ ;  $M_p/m = 1.84 \cdot 10^3$ ),  $B_p = 3.84 \cdot 10^{-28}$ .

Для дейтронів ( $z = 1$ ;  $M_d/m = 2 \cdot 1.84 \cdot 10^3$ )  $B_d = 2B_p = 7.68 \cdot 10^{-28}$ .

Для  $\alpha$ -частинок ( $z = 2$ ;  $M_{\alpha}/m = 4 \cdot 1.84 \cdot 10^3$ )  $B_{\alpha} = 16B_p = 6.13 \cdot 10^{-27}$ .

**Проходження  $\beta$ -частинок крізь речовину.**

Точний розрахунок лінійних іонізаційних втрат енергії електронами ( $\beta^-$ -частинками) при зіткненнях з електронами атомів речовини був проведений Бете, він дає

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іон.}} = \frac{\pi e^4 n}{v^2 m} \left( \ln \frac{v^2 m E}{2 I^2 (1-\beta^2)} - \ln 2(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) + 1 - \beta^2 \right), \quad (8)$$

де  $E$  – релятивістська кінетична енергія електрона. Іонізаційні лінійні втрати енергії для легких частинок, наприклад електронів чи позитронів, у нерелятивістському випадку

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іон.}} = \frac{4\pi \cdot e^4 \cdot n}{mv^2} \ln \frac{mv^2}{2 \cdot I} . \quad (9)$$

Їх можна виразити через енергію електрона  $E$

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іон.}} = \frac{2\pi \cdot e^4 \cdot n}{E} \ln \frac{E}{I} . \quad (10)$$

Усі заряджені частинки, що гальмуються, стають джерелами електромагнітного випромінювання, енергія цього випромінювання пропорційна прискоренню у четвертому степені, тобто обернено-пропорційна такому ж степені маси частинки. Тому таке випромінювання треба враховувати для легких заряджених частинок; але ним можна знехтувати для важких.. Втрати на це випромінювання у речовині прийнято називати радіаційними.

Гальмове випромінювання обумовлює радіаційні втрати енергії легких частинок.

Для  $\beta^-$  - частинок з енергією декілька МеВ відношення радіаційних втрат енергії до іонізаційних втрат  $\eta$  дорівнює

$$\eta = \frac{E_m \cdot Z}{800} , \quad (11)$$

де  $E_m$  - максимальна енергія (МеВ)  $\beta^-$  - частинок,  $Z$  - атомний номер елемента речовини, у якій рухається  $\beta^-$  - частинка. При певній енергії радіаційні втрати дорівнюють іонізаційним. Ця енергія називається *критичною*  $E_{\text{кр}}$

$$E_{\text{кр}} = \frac{800}{Z} . \quad (12)$$

Питомі радіаційні втрати на одиницю пройденого частинкою шляху пропорційні енергії. Коефіцієнт пропорційності має розмірність 1/см. Обернену величину цього коефіцієнта (визначимо його літерою  $l_o$ .) називають радіаційною довжиною.

**Радіаційні лінійні втрати енергії можна записати у вигляді**

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}} = \frac{E}{l_0}, \quad (13)$$

де  $l_0$  – радіаційна довжина. Розв’язавши це рівняння відносно енергії, можна отримати

$$E = E_0 \exp(-x/l_0). \quad (14)$$

З цього виразу зрозуміло, який зміст має радіаційна довжина - це відстань, на якій енергія іонізуючої частинки в речовині зменшується в  $e$  раз, тобто майже втричі. Ця довжина залежить тільки від порядкового номера атомів речовини та густини електронів в ньому, вона визначається формулою

$$l_0 = \frac{4.31 \cdot 10^{26}}{n_e \cdot Z \cdot \ln(183/Z^{1/3})} \text{ (см)}. \quad (15)$$

Послаблення потоку  $\beta$ -частинок з суцільним спектром відбувається приблизно за експоненціальним законом

$$J = J_0 e^{-\mu x}, \quad (16)$$

де  $\mu$  – масовий коефіцієнт послаблення в одиницях  $\text{см}^2/\text{г}$ ;  $x$  – товщина мішені в  $\text{г}/\text{см}^2$ . Масовий коефіцієнт в алюмінії визначається емпіричною формулою

$$\mu = 22/E_{\text{макс}}^{1.33}, \text{ см}^2/\text{г} \quad (0.5 \leq E_{\beta} \leq 6 \text{ MeV}).$$

Шар половинного послаблення  $\beta$ -частинок в алюмінії

$$\Delta_{1/2} = 0.032 E_{\beta}^{1.33} \text{ (г/см}^2\text{)} \quad (17)$$

Можна оцінити іонізаційні здатності чи питому іонізацію (кількість іонних пар, що утворюються на одиницю довжини пробігу частинки). Оскільки енергія, що затрачується в середньому на утворення однієї пари іонів  $w$ , мало залежить і від енергії пролітаючої частинки, і від сорту поглинаючої речовини (вона дорівнює приблизно  $33\text{eV}$ ), то лінійна густина іонізації (питома іонізація) – кількість пар іонів, що були утворенні випромінюванням на одиниці шляху

$$i = \frac{dE/dx}{w}. \quad (18)$$

Повна іонізація  $J$  – кількість пар іонів, які були утворені на всьому шляху випромінювання у речовині, визначається виразом

$$J = E/w. \quad (19)$$

Поглинаючу дію речовини характеризують **лінійним** та **масовим пробігами**, а також величиною шару половинного послаблення. Лінійний пробіг  $R$  – шлях, що проходить частинка до повної зупинки, чи мінімальна товщина поглинача, яка потрібна для повного поглинання іонізуючого випромінювання. Вона залежить від природи поглинача та його стану, а також від типу та енергії випромінювання. Пробіг збільшується з ростом енергії іонізуючих частинок, він пропорційний її масі та обернено пропорційний квадрату її заряду.

Масовий пробіг  $R_m$  - це добуток лінійного пробігу  $R$  на густину речовини, що поглинає частинки. Масовий пробіг – пробіг частинки в одиниці маси, він вимірюється в грамах на квадратний сантиметр і пов'язаний з лінійним пробігом співвідношенням:

$$R_m = \rho \cdot R$$

На практиці часто користуються емпіричними формулами для пробігу іонізуючих частинок у речовині.

Наприклад, пробіг  $\alpha$ -частинки в повітрі можна розрахувати за емпіричною наближеною формулою

$$R_{\alpha}^{\text{пов}} = 0.31 \cdot E^{3/2} (\text{см}) \quad (20)$$

Для пробігу у речовині з масовим числом  $A$  інша відома емпірична формула дає

$$R_m = 0.56 R_{\alpha}^{\text{пов}} A^{1/3} \text{ (в одиницях мг/см}^2\text{)}. \quad (21)$$

*Для протонів*

$$R_p = (R_{\alpha} (4E) - 0.2) \text{ см } (E > 0.5 \text{ Мев}).$$

Для легких заряджених частинок не можливо ввести поняття пробігу у розумінні пробігу важких заряджених частинок. Тому, наприклад, для електронів (тобто  $\beta$ -частинок) введені три величини: максимальний пробіг, середній пробіг та радіаційна довжина.

Максимальним (чи екстрапольованим) пробігом зветься мінімальна товщина шару речовини, в якій поглинаються всі електрони. Він співпадає з повним, зазвичай криволінійним шляхом, який електрон проходить у речовині. Для моноенергетичних електронів максимальний пробіг можна розраховувати за допомогою простої емпіричної формули

$$R_m = 0,526 E - 0,24,$$

Де енергія  $E$  береться в  $\text{MeV}$ , а  $R_m$  - в  $\text{г/см}^2$ .

Максимальний масовий пробіг  $\beta$ -частинок в алюмінії можна розрахувати за формулами

$$R_m = \begin{cases} 0.407 E_{\beta}^{1.38}, & (0.15 \text{ MeV} < E < 0.8 \text{ MeV}) \\ 0.542 E_{\beta} - 0.133, & (0.8 \text{ MeV} < E < 3 \text{ MeV}) \end{cases}$$

де  $E_{\beta}$  - максимальна енергія  $\beta$ -спектра виражена в  $\text{MeV}$ .

Ці формули з непоганою точністю описують пробіг і в інших речовинах, якщо втрати енергії електрона в основному іонізаційні

$$R_x = R_{Al}(Z/A)_{Al}/(Z/A)_x \text{ (г/см}^2\text{)}.$$

Пробіг моноенергетичних  $\beta$ -частинок у будь-якій речовині пов'язаний з пробігом у повітрі через густину повітря та речовини наближеним виразом

$$R_x/R_{пов.} = \rho_x/\rho_{пов.} \cdot R_{пов.} = 400E_\beta, \text{ см} \quad )$$

Питомі радіаційні втрати на одиницю пройденого частинкою шляху пропорційні енергії. Коефіцієнт пропорційності має розмірність 1/см. Обернену величину цього коефіцієнта (визначимо його літерою  $I_o$ .) називають радіаційною довжиною. Можна оцінити іонізаційні здатності чи питому іонізацію (кількість іонних пар, що утворюються на одиницю довжини пробігу частинки). Оскільки енергія, що затрачується в середньому на утворення однієї пари іонів  $w$ , мало залежить і від енергії пролітаючої частинки, і від сорту поглинаючої речовини (вона дорівнює приблизно 33eВ), то лінійна густина іонізації (питома іонізація) – кількість пар іонів, що були утворенні випромінюванням на одиниці шляху

### Проходження $\gamma$ - випромінювання крізь речовину

При проходженні  $\gamma$ - квантів крізь речовину їх енергія не змінюється, але в результаті зіткнень поступово зменшується інтенсивність пучка  $I$ . Закон ослаблення інтенсивності пучка зумовлений характерними для  $\gamma$  - випромінювання механізмами взаємодії з речовиною. До цих механізмів належать: 1) фотоефект, 2) ефект Комптона, 3) народження електрон-позитронних пар. Для першого і третього механізмів взаємодії характерним є експоненціальний закон ослаблення інтенсивності пучка

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (22)$$

де  $I$  - початкова інтенсивність,  $x$  - товщина шару речовини,  $\mu$  - коефіцієнт поглинання.

Масовий коефіцієнт поглинання дорівнює

$$\mu_m = \mu / \rho, \quad (23)$$

де  $\rho$  - густина речовини.

Кожному механізму поглинання  $\gamma$  - квантів відповідає свій  $\mu_i$  коефіцієнт поглинання

$$\mu_i = n_i \cdot \sigma_i \quad (24)$$

де  $n_i$  - кількість центрів поглинання в одиниці об'єму;  $\sigma_i$  - повний переріз даного процесу.

Товщина шару половинного ослаблення  $X_{1/2}$  інтенсивності випромінювання дорівнює

$$X_{1/2} = \ln 2 / \mu = 0,693 / \mu \quad (25)$$

Товщина шару десятикратного ослаблення  $I_{10}$

$$I_{10} = \ln 10 / \mu = 2,3 / \mu \quad (26)$$

## Проходження нейтронів крізь речовину

Для нейтронів немає кулонівської взаємодії. Один тільки вид витрат енергії при проходженні їх крізь речовину пов'язаний з ядерними зіткненнями. При таких зіткненнях швидкі нейтрони можуть так сильно штовхнути ядро, що воно відірветься від своїх власних електронів і полетить уперед, утворюючи іонізацію атомів речовини.

Повільні (теплові) нейтрони з енергією  $E$  менше  $0,1$  MeV не можуть надати ядру таку велику швидкість, але вони дуже легко проникають усередину ядра і спричиняють різні ядерні реакції. Уламки ядра, що утворюються в реакції, розлітаються, утворюючи іонізацію і збудження атомів середовища.

Ефективний переріз взаємодії  $\sigma$  в цілому зменшується при збільшенні енергії нейтронів, проте ця залежність не є монотонною. Вона має резонансний характер.

Ослаблення інтенсивності пучка нейтронів речовиною приблизно описується експоненціальним законом

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (27)$$

Коефіцієнт поглинання

$$\mu = \sigma \cdot N, \quad (28)$$

де  $N$ —кількість атомів в одиниці об'єму речовини

$$N = N_A \cdot \rho / M. \quad (29)$$

Товщина шару десятикратного ослаблення

$$l_{10} = \ln 10 / \mu = 2,3 \cdot M / \sigma \cdot N_A \cdot \rho. \quad (30)$$

Лінійні втрати енергії часто вимірюють в MeV/мкм.

Приведемо зв'язок між різноманітними одиницями енергії:

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1.602 \cdot 10^{-12} \text{ ерг.}$$

$$1 \text{ Дж} = 6.25 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$

$$1 \text{ ерг} = 6.25 \cdot 10^{11} \text{ eV} = 6.25 \cdot 10^5 \text{ MeV.}$$

$$1 \text{ MeV} = 1.60 \cdot 10^{-6} \text{ ерг}$$

$$\text{Заряд електрона } e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = 4,80 \cdot 10^{-10} \text{ одиниць СГС}$$

**Лінійна передача енергії** (ЛПЕ) заряджених частинок у середовищі  $L_\Delta$  визначається формулою

$$L_\Delta = (dE/dl)_\Delta, \quad (31)$$

де  $dE$  — середні енергетичні втрати, що обумовлені такими зіткненнями на шляху  $dl$ , при яких передана енергія менше заданого значення  $\Delta$ . При проходженні зарядженої частинки через речовину вона утрачає свою енергію в актах пружних і непружних взаємодій. У результаті частина енергії частинки витрачається на іонізацію і збудження атомів середовища, а частина — на гальмове випромінювання. В актах іонізації передається енергія, достатня для того, щоб один або кілька орбітальних електронів в атомі залишили його, здобувши деяку кінетичну енергію. Корисно

виділити дві різні ситуації: а) звільнені в результаті іонізації електрони мають настільки малу кінетичну енергію, що нездатні самі зробити іонізацію; б) звільнені електрони мають енергію, достатню для подальшої іонізації середовища; деякі з цих електронів можуть отримати настільки велику початкову кінетичну енергію, що здатні утворити самостійні треки; такі електрони називаються  $\delta$ -частинками. Електрони групи б) можуть, однак, мати таку енергію, що достатня лише для створення лише декількох пар іонів; у цьому випадку важко говорити про самостійний трек і вірніше говорити про згустки невеликого числа іонів, так званих кластерах. Граничну енергію  $\Delta$ , що входить у формулу (1), відносять до енергії  $\delta$ -електронів. Якщо в акті зіткнення первинна заряджена частинка утворить  $\delta$ -електрон з енергією більше  $\Delta$ , то цю енергію не включають у значення  $dE$ , а  $\delta$ -електрони з енергією більше  $\Delta$  розглядають як самостійні первинні частинки. Значення  $\Delta$  як вільного параметра залежить від конкретних умов. Максимальна енергія  $\delta$ -частинок складає частину енергії первинної частинки, що приблизно дорівнює  $4m_0M_0/(m_0 + M_0)^2$ , де  $M_0$ — маса первинної зарядженої частинки,  $m_0$  - маса електрона. Така оцінка справедлива для важких заряджених частинок. Якщо первинною частинкою виступає електрон, максимальна енергія  $\delta$ -частинок може складати лише половину його кінетичної енергії в момент зіткнення.

Поняття ЛПЕ відрізняється від поняття гальмової здатності речовини. Пояснимо цю різницю при більш детальному розгляді формування середнього значення енергетичних втрат  $dE$ . Нехай паралельний пучок моноенергетичних заряджених частинок одного виду з енергією  $E$  падає перпендикулярно на плоский поглинач (Рис. 1). Виділимо в цьому поглиначі шар  $\Delta l$ , досить тонкий, щоб можна було зневажити багаторазовим розсіюванням. Довільно обрана частинка, взаємодіючи з речовиною поглинача в деякій точці  $A$ , втрачає енергію  $\Delta E$  і, відхилившись на кут  $\theta$ , виходить із шару з енергією  $E'=E - \Delta E$ . Втрачена енергія  $\Delta E$  у залежності від виду процесу взаємодії може бути перетворена різними шляхами. Класифікуємо можливі компоненти загубленої енергії:  $\Delta E_A$  — енергія, що локалізована безпосередньо в місці взаємодії біля точки  $A$ ;



$\Delta E_q$  - енергія, що перетворена в кінетичну енергію вторинних заряджених частинок, причому  $\Delta E_q \leq \Delta$ , де  $\Delta$  - задана гранична енергія;

$\Delta E_Q$  - енергія, що перетворена в кінетичну енергію вторинних заряджених частинок, причому

$$\Delta E_Q > \Delta$$

$\Delta E_\gamma$  — енергія, що перетворена в енергію фотонів.

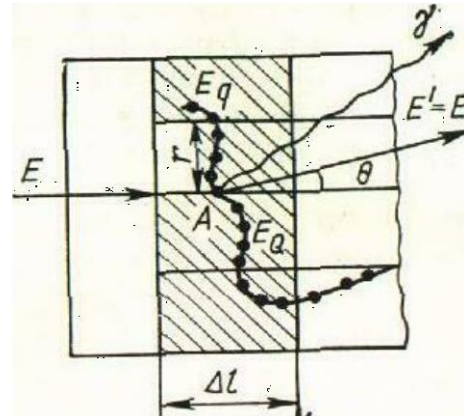


Рис.1

У силу випадкового характеру процесів взаємодії випромінювання з речовиною втрачена енергія  $\Delta E$  і її розподіл по цим складовим виявляються різними для кожної первинної частинки, що входить до складу розглянутого моноенергетичного пучка.

ЛПЕ не включає енергію, що перетворена в енергію фотонів (радіаційні втрати), і при заданому значенні граничної енергії  $\Delta$  не включає кінетичну енергію таких вторинних частинок, для яких ця енергія більше  $\Delta$ .

Якщо гранична енергія не обмежена, то ЛПЕ включає енергію всіх  $\delta$ -електронів. В окремому випадку, коли радіаційними втратами можна зневажити, ЛПЕ збігається з гальмовою здатністю.

Лінійна передача енергії залежить від кінетичної енергії зарядженої частинки. Енергія частинки змінюється в міру проникнення її в глиб речовини; змінюється і значення ЛПЕ. Довжина треку частинки однозначно зв'язана з її енергією, тому ЛПЕ можна зіставити як з кінетичною енергією, так і з довжиною треку іонізуючих частинок. Якщо виділити деякий об'єм середовища, що знаходиться в поле іонізуючого випромінювання, то в цей об'єм будуть входити частинки з різними значеннями ЛПЕ в залежності від того, яка частина треку частинки укладається в цьому об'ємі. Отже, можна говорити про розподіл довжини треків по ЛПЕ.

### 2.1.2 ДОЗИ ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Поглинена доза випромінювання.** Основною фізичною величиною в дозиметрії для дії іонізуючого випромінювання, є поглинена доза, чи просто доза випромінювання. *Поглинена доза випромінювання— це поглинена енергія випромінювання, що розрахована на одиницю маси опроміненої речовини.* Якщо в елементі об'єму, що містить масу речовини

$dm$ , середня поглинена дорівнює  $dE$ , доза випромінювання  $D$  визначається формулою

$$D = dE / dm.$$

Одиниця виміру в системі СІ - Грей, Гр.

Доза  $D$  характеризує фактично поглинену енергію в деякому об'ємі речовини як за рахунок тих заряджених частинок, що утворилися в межах цього об'єму в результаті взаємодії первинного побічно іонізуючого випромінювання з речовиною, так і за рахунок заряджених частинок, що прийшли ззовні.

Доза випромінювання залежить від часу опромінення; з часом доза накопичується, зміна дози в одиницю часу називається потужністю дози. Потужність дози дорівнює

$$P = dD / dt$$

де  $dD$  – зміна дози за час  $dt$ .

Доза заряджених моноенергетичних частинок, ЛПЕ яких дорівнює  $L$ , визначається формулою

$$D = \Phi L_m$$

де  $\Phi$  - флюенс частинок, а  $L_m$  виражене в масових одиницях.

Встановлена в системі СІ одиниця дози іонізуючого випромінювання (поглинена доза) — грей, її позначення Гр— по імені англійського вченого С. Грея, що зробив великий внесок у становлення радіаційної дозиметрії. Один грей дорівнює поглиненій дозі випромінювання, при якій речовині масою 1 кг передається енергія іонізуючого випромінювання 1 Дж. У практиці і науковій літературі поширена позасистемна одиниця дози випромінювання рад:  $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$ .

**Експозиційна доза.** Студентам слід усвідомлювати різницю між поняттями поглиненої і експозиційної дози.

Експозиційна доза  $X$  - специфічна величина в дозиметрії, що уведена для фотонного випромінювання. Вона дорівнює абсолютному значенню повного заряду іонів одного знака, що утворюються в повітрі при повному гальмуванні електронів і позитронів в одиниці маси повітря.

$$X = dQ / dm,$$

де  $dQ$  — сумарний заряд всіх іонів одного знака, створених у повітрі при повному гальмуванні електронів і позитронів, звільнених фотонним випромінюванням у масі повітря  $dm$ . Важливо зрозуміти, що заряд  $dQ$  включає заряд всіх іонів одного знака, створених у результаті повного використання кінетичної енергії електронів і позитронів у повітрі незалежно від місця утворення цих іонів; мається на увазі, що ці іони створені тільки тими електронами і позитронами, що виникли в масі

повітря  $dm$ .

$e$  – заряд одного іона;  $W$  – середня втрата енергії електронів на утворення однієї пари іонів у повітрі.

Встановлена в системі СІ одиниця експозиційної дози - кулон на кілограм, Кл/кг. Кулон на кілограм дорівнює експозиційній дозі, при якій всі електрони і позитрони, звільнені фотонами в повітрі масою 1 кг, утворюють іони, що несуть електричний заряд 1 Кл кожного знака. У практиці і науковій літературі поширена позасистемна одиниця експозиційної дози - рентген, позначення Р.

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг (точно);}$$

$$1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р (приблизно).}$$

**Еквівалентна доза.** Слід уявляти, що результат впливу випромінювання на об'єкт визначається не тільки поглиненою енергією, але і характером розподілу цієї енергії в об'єкті, що опромінюється, розподілом опромінення за часом, видом випромінювання й іншими факторами. Зокрема, біологічний ефект опромінення за інших рівних умов є різним для різних видів випромінювання. Більш того, навіть частинки однієї природи, але різних енергій можуть викликати неоднаковий ефект при одній і тій же поглиненій дозі. Згідно сучасних уявлень про біологічну дію іонізуючих випромінювань визначальну роль грає іонізація живої тканини. Головне розходження для різних видів випромінювань полягає в тому, що різні види випромінювань створюють іони з неоднаковим просторовим розподілом. Наприклад, важкі заряджені частинки створюють більш щільну доріжку іонів, ніж легкі; різними виявляються діапазони енергій, переданих  $\delta$  - частинкам, що по-своєму впливають на просторовий розподіл іонів. Таким чином, представляється доцільним визначити деяку фізичну величину, що враховувала б просторовий розподіл переданої енергії. Такою величиною при деякому наближенні може служити лінійна передача енергії – ЛПЕ. Якщо для двох різних видів частинок ЛПЕ однакова, то просторовий розподіл переданої ними енергії буде більш ідентичним, ніж якби ЛПЕ була різною. ЛПЕ, таким чином, виступає як характеристика якості випромінювання. *Під якістю в даному випадку ми розуміємо таку характеристику випромінювання, що має те саме значення в різних видах випромінювання, якщо при однакових умовах опромінення даного об'єкта й однакою дозі спостерігається той самий радіаційний ефект.* Іншими словами, радіаційна дія випромінювань однакової якості, у тому числі випромінювань різних видів, повинна бути однаковою при рівних дозах. В багатьох випадках ЛПЕ є зручною характеристикою якості випромінювання.

Для порівняння біологічних ефектів, що викликають різні види випромінювання, введено поняття відносної біологічної ефективності (ВБЕ).

*Відносна біологічна ефективність випромінювання — це відношення*

поглиненої дози зразкового випромінювання, що викликає певний біологічний ефект, до поглиненої дози даного випромінювання, що викликає той же біологічний ефект:

$$\eta = D_0/D_x$$

де  $\eta$  - ВБЕ;  $D_0$  і  $D_x$  - дози відповідно зразкового і даного випромінювань, при яких спостерігається той самий біологічний ефект.

У якості зразкового випромінювання приймають рентгенівське випромінювання з граничною енергією фотонів 200 кеВ; для зразкового випромінювання  $\eta = 1$ ; коефіцієнт  $\eta$  беруть рівним одиниці ( $\eta = 1$ ) для фотонів будь-яких енергій. ВБЕ залежить від виду випромінювання, його енергії, біологічної реакції, що спостерігається, розподілу випромінювання за часом, індивідуальних особливостей біологічного об'єкта й інших факторів, частина яких ще недостатньо добре вивчена. Особливу значимість має залежність ВБЕ від ЛПЕ. На рис.2 показана залежність ВБЕ від ЛПЕ, що отримана в радіобіологічних експериментах. Крива 1 відповідає складним біологічним системам, для яких спостерігається максимум ВБЕ при значенні ЛПЕ близько 100 кеВ/мкм. Крива 2 типова для інактивації деяких бактерій і вірусів. Починаючи з деяких значень ЛПЕ крива падає, не виявляючи максимумів чи мінімумів.

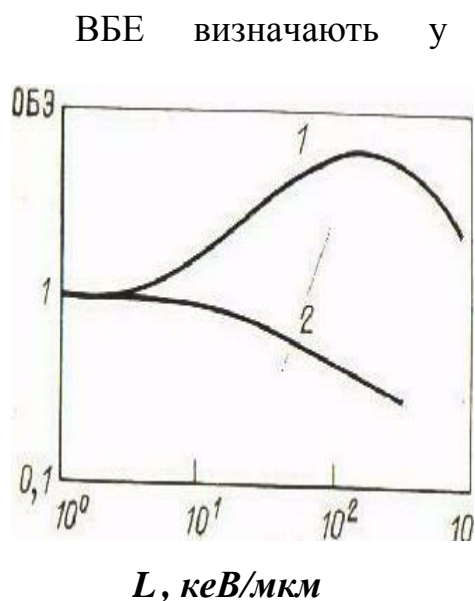


Рис.2 Залежність ВБЕ від ЛПЕ

З метою протирадіаційного захисту використовують, однак, не конкретне значення отриманої в експерименті ВБЕ, а так званий **коефіцієнт якості випромінювання**. Крім чисельних значень коефіцієнта якості для різних видів випромінювань встановлюється залежність коефіцієнта якості від ЛПЕ випромінювання. За основу приймається крива виду 1 на рис.2. Коефіцієнт якості - це залежний від ЛПЕ коефіцієнт, на який треба помножити поглинену дозу, щоб для цілей протирадіаційного захисту біологічний ефект опромінення людей виражався однією мірою незалежно від виду випромінювання. Добуток поглиненої дози  $D$  на середній коефіцієнт якості іонізуючого випромінювання  $K$  у даному елементі об'єму біологічної тканини утворює **еквівалентну дозу** іонізуючого випромінювань  $H$ :

$$H=kD.$$

Для змішаного випромінювання еквівалентна доза може визначатися як сума добутків значень  $D_i$ , поглиненої дози окремих видів випромінювань на відповідні значення коефіцієнта якості для цих доз випромінювань:

$$H = \sum k_i D_i.$$

Коефіцієнт якості - це регламентована величина ВБЕ, що встановлюється спеціальними науковими комісіями на підставі медичних і радіобіологічних даних. Звідси випливає, що в міру накопичування й уточнення даних по біологічній дії випромінювань коефіцієнти якості для різних видів випромінювань можуть бути переглянуті. Коефіцієнти якості в Радянському Союзі були узаконені нормами радіаційної безпеки (НРБ - 86). В даний час на Україні діють інші норми. Це норми НРБУ-97. У порівнянні з попередніми НРБ-76/87 у НРБУ-97 уведені сучасна концепція еквівалентної і ефективної дози. В НРБУ-97 коефіцієнт якості називається радіаційним зважуючим фактором.

**Радіаційний зважуючий фактор** - коефіцієнт, аналогічний коефіцієнту якості  $k$ , що враховує відносну біологічну ефективність різних видів іонізуючого випромінювання.

Таблиця 1 - Значення радіаційних факторів, ( $w_R$ )

Вид випромінювання	$w_R$
Фотоні, всі енергії	1
Електрони і мюони, всі енергії	1
Протони з енергією > 2 МэВ	5
Нейтрони з енергією < 10 кеВ	5
з енергією 10-100 кеВ	10
з енергією від 100 кеВ до 2 МеВ	20
з енергією 2-20 МеВ	10
з енергією > 20 МеВ	5
Альфа – випромінювання, важкі ядра віддачі	20

**Доза еквівалентна** в органі чи тканині  $H_T$  — величина, що визначається як добуток поглиненої дози в окремому органі чи тканині на радіаційний зважуючий фактор  $w_R$ :

$$H_T = D w_R$$

Одиниця еквівалентної дози в системі СІ - Зіверт (Зв). 1 Зв = 100 бер.

**Доза ефективна (E).** Міжнародна комісія з радіологічного захисту (МКРЗ) як міру радіаційного впливу на живий організм ввела ефективну

дозу  $E$ , яка є сумою добутків еквівалентних доз  $H_T$  в окремих органах і тканинах на відповідні тканеві фактори,  $w_T$ . Ця доза визначається формулою

$$E = \sum w_T H_T,$$

де  $H_T$  - середня еквівалентна доза в  $T$ -м органі чи тканині організму;  $w_T$  - зважуючий коефіцієнт;  $w_T$  визначає внесок даного чи органа чи тканини в ризик несприятливих стохастичних ефектів для організму в цілому при рівномірному його опроміненні.

Числові значення зважуючих коефіцієнтів встановлюються на основі коефіцієнтів ризику, що у свою чергу виводяться з даних радіобіологічних і медичних досліджень. Використання поняття ефективної дози допускається при значеннях еквівалентних доз в області значень нижче порога виникнення детерміністичних ефектів.

**Тканевий фактор  $w_T$**  - коефіцієнт, що характеризує відносний стохастичний ризик опромінення окремої тканини. Використовується винятково при розрахунку ефективної доз.

**Таблиця 2- Значення тканинних факторів, ( $w_T$ )**

Тканина чи орган	$w_T$	Тканина чи орган	$w_T$
Гонади	0.20	Молочна залоза	0.05
Кістний мозок (червоний)	0.12	Печінка	0.05
Толста кишка	0.12	Стравохід	0.05
Легені	0.12	Щитовидна залоза	0.05
Шлунок	0.12	Шкіра	0.01
Сечовий міхур	0.05	Поверхня кісти	0.01
		Інші органи	0.05

**Коллективна доза.** Еквівалентна доза встановлює відповідність між поглиненою дозою випромінювання й очікуваним біологічним ефектом для даної людини; іншими словами, вона є мірою біологічної дії індивідуальної дози, отриманої конкретними особами. Однак у випадку опромінення великих груп людей корисно давати оцінку сумарного ефекту, що очікується. На практиці потрібно враховувати опромінення великих груп людей і усього населення як від природних джерел, так і від джерел, створених людиною. Прикладом може служити медичне опромінення. Додаток до природного радіаційного фону, що обумовлена діяльністю людей, невелика, і практично важливо враховувати вплив малого рівня опромінення на великі групи населення. При опроміненні малими дозами, що незначно перевищують природний радіаційний фон,

можна чекати лише віддалених наслідків генетичної чи соматичної природи; соматичні ефекти виявляються безпосередньо у опромінених осіб, генетичні - в наступних поколіннях. Особливість віддалених наслідків опромінення полягає в тім, що вони носять стохастичний характер і можуть бути виявлені лише статистичними методами на популяційному рівні. Розмір наслідку опромінення в цьому випадку визначається не тільки індивідуальною дозою, але і числом опромінених осіб. Нехай серед деякої групи опромінених осіб  $N(D)$   $dD$  є число осіб, що одержали дозу в інтервалі від  $D$  до  $D+dD$ . Тоді величина  $D_S$  являє

собою колективну дозу

$$D_S = \int_0^{\infty} DN(D)dD$$

## 2.2. МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ В РАДІОМЕТРІЇ ТА ДОЗИМЕТРІЇ

**Напівпровідникові дозиметричні детектори.** Застосування напівпровідників як дозиметричних детекторів засновано на їх здатності реєструвати іонізуючі частинки. Напівпровідник як лічильник елементарних частинок виступає як аналог імпульсної іонізаційної камери, але в основі роботи лічильника лежить іонізація атомів твердого тіла. У порівнянні з газовими іонізаційними детекторами напівпровідникові лічильники мають особливості, що визначають їхні переваги і недоліки і можливість використання для дозиметрії.

Результатом іонізації в напівпровіднику є поява вільних електронів у зоні провідності і дірок у валентній зоні. Ширина забороненої зони не перевершує декількох електрон-вольтів, тому й енергія, що необхідна для утворення пари “електрон-дірка”, є величиною того ж порядку. Це одна з особливостей, що відрізняють їх від газових іонізаційних камер, де середня енергія утворення однієї пари іонів складає десятки електрон-вольтів (для повітря 34 еВ). Таким чином, у розрахунку на однакову поглинену енергію в напівпровідниковому детекторі утвориться приблизно на порядок більше носіїв електричних зарядів, чим у чуттєвому об’ємі іонізаційної камери. Густина речовини напівпровідникового детектора на кілька порядків (приблизно  $10^3$ ) вище густини газу в звичайній іонізаційній камері, тому і поглинена енергія (у розрахунку на однакову густину потоку випромінювання) у напівпровідниковому детекторі на кілька порядків більше, ніж у газовому. Таким чином, іонізаційний ефект у напівпровідниковому детекторі буде на кілька порядків вище, ніж в іонізаційній камері. Це визначає їхню головну перевагу; висока чутливість при малих розмірах. Інша важлива особливість напівпровідникових детекторів у порівнянні з газовими - висока рухливість носіїв. Наприклад, у кремнії при кімнатній температурі рухливість негативних носіїв (електронів) дорівнює  $1300 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , а позитивних (дірок)— $500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Висока рухливість носіїв зарядів визначає малий час збирання електричних зарядів на електроди і як

наслідок велику розрізнявальну здатність детектора при лічильно-імпульсному режимі роботи (мертвий час),

Малий час збирання істотно знижує імовірність рекомбінації позитивних і негативних зарядів. Крім того, велика рухливість носіїв зарядів за інших рівних умов забезпечує більший іонізаційний струм. У розрахунку на однаковий іонізаційний ефект напівпровідниковий детектор вимагає на кілька порядків меншої електричної напруги, ніж газовий. Це ще одна перевага напівпровідників.

*Дозиметричні характеристики напівпровідникових детекторів.* Переваги напівпровідників повною мірою очевидні, коли вони служать лічильниками і спектрометричними детекторами. Використання напівпровідникових детекторів власне в дозиметрії для виміру експозиційної і поглиненої доз обмежено помітною залежністю дозової чутливості від енергії випромінювання.

Щоб бути зареєстрованою, іонізуюча частинка не обов'язково повинна створювати заряди безпосередньо в чуттєвому об'ємі. Додаткові носії зарядів, створені в межах дифузійної довжини від чуттєвого шару, можуть у результаті дифузії потрапити в збіднену зону і створити іонізаційний імпульс. Фактична можливість реєстрації частинок, що не потрапили в чуттєву область, визначається постійною часу системи. Постійну часу вибирають з оптимальних умов стосовно ефекту фону. При опроміненні напівпровідника фотонами вторинні електрони будуть створюватися у всьому об'ємі детектора. При перетинанні ними чуттєвої області виникають електричні імпульси, що можуть бути зареєстровані або з обліком, або без обліку їхньої амплітуди. Амплітуда імпульсу пропорційна числу зарядів у чуттєвому шарі.

Наявність фонових носіїв заряду не дозволяє реєструвати частинки, що роблять малу іонізацію. Для поліпшення співвідношення ефект-шум необхідно відітнути імпульси нижче певної величини. Тоді реєструватися будуть всі імпульси вище деякого рівня дискримінації.

Радіаційні ушкодження викликають зміни електричних властивостей напівпровідника, приводячи до росту питомого опору. Необоротні радіаційно-індуційовані зміни електричної провідності напівпровідникових детекторів самі по собі можуть бути використані для виміру дози іонізуючого випромінювання.

### ***Сцинтиляційний метод дозиметрії фотонного випромінювання.***

Випромінювання, взаємодіючи з речовиною сцинтилятора, утворює у ньому електрони, що, поглинаючи в сцинтиляторі, створюють спалахи. Світло від спалахів падає на фотокатод фотоелектронного помножувача (ФЕП). З фотокатода вибиваються фотоелектрони, і посилені



електронний струм попадає на анод. Кожному електрону, поглиненому в сцинтиляторі, відповідає імпульс струму в анодному ланцюзі ФЕП, отже, виміру може підлягати як середнє значення анодного струму, так і число імпульсів струму в одиницю часу. Відповідно до цього розрізняють *струмовий і лічильний режими сцинтиляційного дозиметра*.

Для цілей дозиметрії необхідно установити зв'язок між анодним струмом (*струмовий режим*) чи швидкістю рахунка (*лічильний режим*) і потужністю дози в зразковій речовині. Як і в іонізаційному дозиметрі, струм у сцинтиляційному дозиметрі відповідає поглиненій енергії випромінювання, а швидкість рахунку — щільності потоку фотонів.

Різний механізм висвітлювання органічних і неорганічних сцинтиляторів визначає розходження їхніх основних характеристик: конверсійної ефективності, залежності конверсійної ефективності від енергії заряджених частинок, спектрального складу і тривалості сцинтиляцій; для дозиметрії також важливий ефективний атомний номер речовини сцинтилятора.

У кожній сцинтиляції виникають фотони, що мають різну енергію. Оптичний спектр сцинтиляцій практично не залежить від енергії зарядженої частинки і визначається складом речовини сцинтилятора.

Не усі фотони, що виникають у сцинтиляційному процесі, досягають фотокатода помножувача. Взаємодія світлових фотонів з речовиною сцинтилятора приводить до зменшення їхнього числа і зміни їхньої середньої енергії. Вихід фотоелектронів з фотокатода істотно залежить від спектрального складу світла, тому завжди бажано, щоб спектр сцинтиляційних фотонів відповідав максимуму спектральної чутливості фотокатода. Експериментально отримані значення виходу фотоелектронів на один випущений сцинтилятором світловий фотон 0,025—0,05. Ці значення, що включають утрати світла в сцинтиляторі, отримані при відповідності спектра сцинтиляцій чутливості фотокатода.

***Радіофотолюмінесцентні дозиметри.*** Два види люмінесценції одержали визнання в дозиметрії: радіофотолюмінесценція і радіотермолюмінесценція. У якості радіофотолюмінесцентних детекторів практичне значення для дозиметрії мають тільки неорганічні матеріали, активовані сріблом. Однак застосування неорганічних кристалів зв'язано зі труднощами, що виникають при їхньому виготовленні. У СРСР був запропонований радіофотолюмінесцентний дозиметр на основі хлористого натрію NaCl(Ag), активованого сріблом. Найбільше поширення одержали, однак, метафосфатні скла. Їх склад визначає основні дозиметричні якості: ефективний атомний номер, фонову люмінесценцію, відносну чутливість, енергетичну залежність.

***Дозиметрія нейтронів, перетворення енергії нейтронів у речовині.***

Процеси взаємодії нейтронів з речовиною визначаються як енергією

нейтронів, так і атомним складом поглинаючої речовини. Прийнято розрізняти наступні групи нейтронів у залежності від їхньої енергії:

- *ультрахолодні* нейтрони - нейтрони з енергією менш  $10^{-7}$  eВ;
- *холодні* нейтрони - нейтрони з енергією менш  $5 \cdot 10^{-3}$  eВ;
- *теплові* нейтрони - нейтрони, що знаходяться в термічній термодинамічній рівновазі з атомами навколишнього середовища, з найбільш ймовірною енергією таких нейтронів при кімнатній температурі 0,025 eВ;
- *надтеплові* нейтрони - нейтрони, найменше значення енергії яких при нормальній температурі знаходиться в інтервалі 0,1—0,2 eВ .
- *проміжні* нейтрони — нейтрони від енергетичної границі надтеплових нейтронів до 200 кеВ;
- *швидкі* нейтрони — нейтрони з енергіями від 200 кеВ до 20 МеВ;
- *надшвидкі* нейтрони - нейтрони з енергією більш 20 МеВ;
- *підкадмієві* нейтрони — нейтрони з енергією менш ефективної граничної енергії для кадмію, що використовується для екранування від теплових нейтронів;
- *надкадмієві* нейтрони — нейтрони з енергією більш ефективної енергії для кадмію;
- *нейтрони перехідної області* — в енергетичному інтервалі від нижньої енергетичної границі надтеплових нейтронів до границі, вище якої починається енергетичний розподіл щільності потоку нейтронів за законом Фермі.

Зручно об'єднати нейтрони перехідної області і теплові нейтрони в одну групу; ці нейтрони називаються *повільними*. Перетворення енергії нейтронів відбувається в елементарних актах взаємодії з ядрами атомів поглинаючої речовини. При взаємодії нейтронів з ядрами можуть спостерігатися: пружне розсіювання, непружне розсіювання, радіаційне захоплення, розщеплення з вильотом заряджених частинок, поділ ядер. Імовірність того чи іншого процесу залежить як від енергії нейтронів, так і від виду ядер, з якими вони взаємодіють,

У процесі пружного розсіювання нейтрон змінює свій напрямок, а частина його кінетичної енергії передається ядру віддачі. При непружному розсіюванні ядро віддачі виявляється в збудженому стані, з якого воно переходить у нормальний стан, випускаючи  $\gamma$ -квант. Цей процес має практичне значення тільки для швидких нейтронів. . В елементарному акті пружного розсіювання ядро віддачі одержує енергію

$$E_{\text{яд}} = 4MmE_0 \cos^2 \theta / (M+m)^2 \quad (32)$$

де  $M$ — маса ядра;  $m$  — маса нейтрона;  $\theta$ -кут між первісним напрямком нейтрона і напрямком руху ядра віддачі в лабораторній системі координат;  $E_0$ —початкова енергія нейтрона.

Радіаційне захоплення - характерний вид взаємодії теплових нейтронів - полягає в захопленні ядром нейтрона з випусканням  $\gamma$ -кванта.

$\gamma$ -випромінювання при радіаційному захопленні має енергію порядку мільйона електрон-вольт. Радіаційне захоплення може відбуватися на ядрах майже усіх елементів.

Радіаційне захоплення і ядерні перетворення з вильотом заряджених частинок приводять до того, що енергія взаємодіючого нейтрона цілком перетворюється в енергію вторинного випромінювання. У процесі розсіювання (пружного і непружного) тільки частина енергії первинного нейтрона перетворюється в енергію вторинного випромінювання.

Заряджені частинки і ядра віддачі, що утворюються при взаємодії нейтронів, легко поглинаються середовищем.  $\gamma$ -кванти, що утворюються при радіаційному захопленні, навпаки, легко проникають через речовину і можуть вийти з поглинаючого середовища без істотного ослаблення. Розсіяні нейтрони в залежності від умов опромінення також можуть вийти з обмеженої області поглинача, не цілком розтративши свою енергію. Тканинна доза нейтронів обумовлена поглиненою енергією вторинного випромінювання, що виникає при взаємодії нейтронів із тканиною організму. Значимість тих чи інших процесів взаємодії нейтронів визначається складом тканини. Приблизно хімічний склад м'якої живої тканини можна визначити формулою уявлюваної тканинної молекули  $(C_5H_{40}O_{18}N)_x$ . Для живої тканини характерно, що вона складається в основному з легких елементів. Перевага того чи іншого з перерахованих раніше процесів взаємодії нейтронів з речовиною визначеного хімічного складу цілком визначається енергією нейтронів.

Розглянемо поглинену в тканині дозу нейтронів різних енергетичних груп. **Повільні нейтрони** з енергіями від теплових до 1 кеВ. Для легких ядер основним видом взаємодії цієї групи нейтронів є пружне розсіювання. Перетворення енергії повільних нейтронів у живій тканині відбувається в результаті пружного розсіювання. Ядра віддачі, що виникають у тканині при пружному розсіюванні повільних нейтронів, здебільшого мають енергію, недостатню для іонізації, і їхній внесок у біологічний ефект передбачається незначним.

**Теплові нейтрони**, що утворилися в результаті уповільнення більш енергетичних нейтронів, потрапляють в тканину ззовні, захоплюються ядрами елементів тканини з утворенням нових ізотопів. Виникаючі при радіаційному захопленні  $\gamma$ -кванти з енергією 2,23 МеВ, взаємодіючи з тканиною, дають істотний внесок у дозу. Розподіл дози, обумовленої  $\gamma$ -квантами, по глибині тканини визначається просторовим розподілом теплових нейтронів і характером взаємодії  $\gamma$ -випромінювання з тканиною організму. У реакції на азоті утворюються протони з енергією 0,62 МеВ і радіоактивний вуглець. Протони мають у тканині малий пробіг і практично поглинаються в місці свого виникнення. Крім зазначених основних реакцій, характерних для взаємодії теплових нейтронів з ядрами азоту і водню, йдуть реакції і на інших елементах, що входять до складу тканини. Серед них можна назвати радіаційне захоплення, що супроводжується

випускненням  $\gamma$ -квантів з енергією близько 0,73 MeV. Так, реакція на фосфорі збільшує дозу в кістковій тканині. У цілому додаткові реакції ненабагато збільшують дозу. Як уже відзначалося, основний процес взаємодії повільних нейтронів із тканиною - пружне розсіювання, однак вирішальне значення в біологічній дії нейтронів цієї групи приписується вторинному випромінюванню, що виникає в реакціях захоплення теплових нейтронів.

**Нейтрони** проміжних енергій. Типова взаємодія нейтронів цього діапазону енергії - пружне розсіювання. Виникаючі при цьому ядра віддачі, особливо протони, здатні робити іонізацію середовища. Істотне значення мають також реакції захоплення нейтронів, що сповільнилися. Характерною рисою взаємодії нейтронів проміжних енергій є наявність резонансних піків перерізу розсіювання па ядрах деяких елементів тканини.

### **3. ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВИКОНАННЯ 3-ГО РОЗДІЛУ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ**

#### **3.1 ЗАВДАННЯ 1 - ВИЗНАЧЕННЯ ПРОБІГУ БЕТА-ЧАСТИНОК**

Проходження бета-частинок через речовину супроводжується пружними і непружними співударяннями бета-частинок з ядрами і електронами середовища.

Пружне розсіяння на ядрах здійснюється при відносно низьких енергіях ( $E < 0,5$  MeV) бета-частинок. При енергії бета-частинок більше енергії зв'язку електронів і до 1 MeV основним механізмом втрат енергії є непружне розсіяння на зв'язаних електронах, що веде до іонізації і збудження атомів речовини.

При великих енергіях бета-частинок головним механізмом втрат енергії є гальмове випромінювання у полі ядер речовини. Цей внесок зростає з збільшенням енергії бета-випромінювання. Внаслідок відносно малої маси бета-частинки при кожному її зіткненні з електронами речовини відбувається суттєве змінення її імпульсу, а це в свою чергу веде до того, що бета-частинка, по-перше, може суттєво змінювати напрямок свого руху, а по-друге, може породжувати кванти електромагнітного випромінювання. Перший ефект виявляється в тому, що бета-частинка в речовині рухається не по прямій; а за рахунок другого ефекту відбуваються чималі радіаційні втрати, тобто втрати енергії на електромагнітне випромінювання.

Внаслідок цих механізмів інтенсивність бета-випромінювання зменшується з зростанням товщини шару речовини.

Проходячи через речовину, пучок бета-частинок поступово ослаблюється і повністю поглинається шаром речовини певної товщини.

При проходженні заряджених частинок іонізуючого випромінювання (наприклад,  $\alpha$ -частинок або  $\beta$ -частинок), основні механізми цього процесу полягають в іонізації та збудженні атомів речовини. Іонізаційні втрати таких частинок визначають за формулою Бора

### Метод виміру

Величина коефіцієнта поглинання  $\mu$  зменшується зі збільшенням енергії бета-випромінювання і приблизно пропорційна густині поглинаючої речовини. Відношення коефіцієнта поглинання до густини  $\mu/\rho$  (масовий коефіцієнт поглинання) повільно росте зі збільшенням відношення зарядового числа до масового  $Z/A$ .

Для речовин, що несильно відрізняються за своїм складом,  $\mu/\rho$  практично постійна для даного бета-випромінювання. Тому, виражаючи товщину поглинаючого шару через масу, яка припадає на одиницю площі, отримуємо єдину криву поглинання бета-випромінювання, що випускається радіоактивним ізотопом, для різних речовин.

Між енергією випромінювання і коефіцієнтом поглинання існує певна залежність, маючи яку можна знайти енергію випромінювання. **З** цією метою користуються емпіричними формулами і графіками, що виражають максимальну енергію бета-випромінювання як функцію масового коефіцієнта поглинання  $\mu/\rho$  чи товщини  $X_{1/2}$  шару напівпоглинання.

Для визначення  $\mu/\rho$  чи  $X_{1/2}$  спостерігають зменшення інтенсивності випромінювання в міру збільшення шару речовини, що поміщається між джерелом випромінювання і детектором вимірювального приладу.

Результати вимірів наносять на напівлогарифмічний графік (рис.2). По осі абсцис відкладають товщину шару, а по осі ординат – логарифм інтенсивності випромінювання. Для інтервалу зміни активності, рівним 2-3 порядкам, виходить близька до прямої лінія, тангенс кута нахилу якої відповідає коефіцієнту поглинання випромінювання. З графіка можна знайти значення величин  $\mu/\rho$  і  $X_{1/2}$ .

Якщо потік бета-частинок  $I_0$ , падає на плоску пластинку завтовшки  $x$ , то потік частинок  $I$ , що пройшли через пластинку (поглинач), буде залежати від енергії частинок, товщини поглинача  $x$  і від атомного номера  $Z$  речовини – матеріалу плакстинки :

$$I=I_0f(E_{\max},x,Z).$$

При значній товщині поглинача всі бета-частинки цілком затримуються. Мінімальна товщина поглинача, цілком затримуючого бета-частинки даного ізотопу, являє собою пробіг  $R$  бета-частинки. Пробіг є функцією максимальної енергії бета-спектра:  $R=f(E_{\max})$ . Зазвичай за пробіг

R приймають товщину поглинача, що послабляє початковий потік на 3-4 порядку. Визначений таким способом пробіг R зветься практичним пробігом. Величину пробігу можна визначити по залежності (25), для якої існує ряд емпіричних формул. Емпірична залежність

$$\frac{I}{I_0} = \lg \left[ \frac{\pi}{4} \left( 1 - \frac{x}{R} \right)^4 \right]$$

з найбільшою точністю відповідає експериментам при товщинах поглиначів, не перевищуючих  $(0,6-0,7)R$ , і справедлива для широкого інтервалу енергій частинок.

Для визначення пробігів по поглинанню бета-частинок зручно користатися функцією:

$$\Phi \left( \frac{I}{I_0} \right) = \left( \frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{I}{I_0} \right)^{\frac{1}{4}} = 1 - \frac{1}{R} x.$$

В області значень  $x$ , при яких ця функція справедлива, графік залежності  $1 - \Phi(I/I_0)$  від  $x$  являє собою пряму лінію, котангенс кута нахилу якої дорівнює

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\Delta x}{\Delta \left[ 1 - \Phi \left( \frac{I}{I_0} \right) \right]} = R$$

Енергетичний розподіл частинок, що пройшли через поглинач, буде значно відрізнятись від спектра енергій бета-частинок, що випускаються даним ізотопом.

Для знаходження максимальної енергії бета-випромінювання по його поглинанню можна користуватися графіками, що наведені на рис.3.

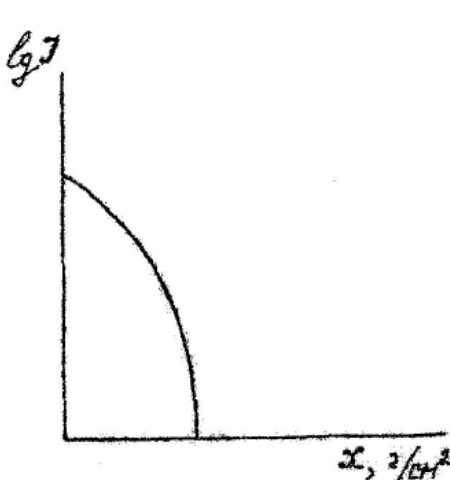


Рис.2

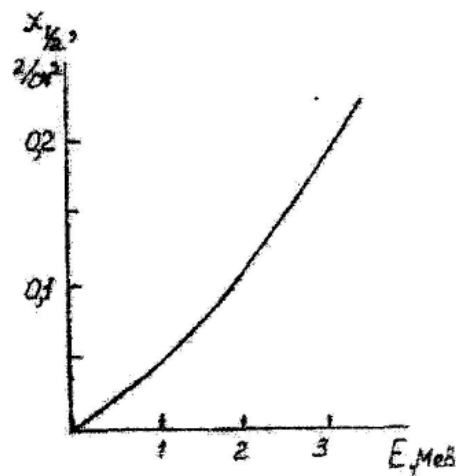


Рис.3

## **Експериментальна частина**

### **Принцип роботи бета-радіометра РУБ-01**

Бета-радіометр РУБ-01П призначений для виміру питомої і об'ємної активності бета-випромінюючих нуклідів у пробах природного середовища. Бета-радіометр може застосовуватися для комплексного санітарного контролю в лабораторних і польових умовах.

Принцип дії бета-радіометра заснований на перетворенні світлових спалахів у чуттєвому об'ємі детектора в імпульси струму.

Прилад дозволяє проводити експресні виміри об'ємної активності проб рідин і газів, питомої активності сипучих харчових продуктів і ґрунту, а також питомої активності проб, виготовлених з використанням методів концентрування і радіохімічного виділення. З цією метою бета-радіометр постачається відповідними блоками детектування.

До складу приладу РУБ-01П входять:

блок детектування: БДЖБ-05П1 - призначений для виміру об'ємної активності проб рідин і газів;

блоки БДЖБ-06П і БДЖБ-06П1 - призначені для виміру питомої активності проб;

пристрій вимірювальний УИ-38П1;

блок автономного живлення БНН-268П2,.

Під дією енергії заряджених частинок у чуттєвому шарі детектора відбувається спалахи (сцинтиляції).

Фотоелектронний помножувач (ФЕП) перетворює спалахи в імпульси електричного струму, а також підсилює цей струм до рівня, що піддається виміру. Далі ці імпульси надходять на підсилювачі і дискримінатори.

Для живлення ФЕП в кожному блоці детектування використовуються високовольтні вузли живлення.

Пристрій вимірювальний УИ-38П1 може працювати з одним із блоків детектування. Він здійснює накопичення імпульсів від блоків детектування і виведення інформації про їхню кількість на індикатор, або ЕОМ.

### **Порядок роботи**

1. Приєднати до вимірювального пристрою мережний шнур і кабель від блоку детектування:

2. Підключити вимірювальний пристрій до мережі змінного струму 220 В. Натисканням кнопки "ВКЛ" уключити живлення приладу, при цьому повинні засвітитися світлодіоди "1" і цифри індикатора.

3. Витримати прилад включеним на протязі 15 хвилин.

4. Натисніть і відпустите кнопку "ЭКСПОЗ" при цьому повинні по черзі загорятися і гаснути світлодіоди "1,10,100,1000,1800, ∞" і "К". Зупинитися на світлодіоді "К", при цьому на цифровому табло з періодичністю 10 с. повинне висвічуватися число 7680 з одночасною видачею короткого звукового сигналу.

5. Для визначення коефіцієнту поглинання потрібно вимірити товщину  $x$  пластинки, що поглинає випромінювання,

6. Для двох пластинок речовини товщиною  $x_1$  і  $x_2$  визначити коефіцієнт поглинання бета-частинок:

$$K = \frac{\ln N_1 - \ln N_2}{x_2 - x_1},$$

де  $N_1$  і  $N_2$  - відповідно кількість частинок, що проходять через шар речовини товщиною  $x_1$  і  $x_2$ .

7. За формулами визначити пробіг  $R$  бета-частинок в даному матеріалі.

8. За допомогою графіку (рис.3) та формул оцінити енергію  $E$  бета-частинок.

9. Відповісти на питання:

1. Дати оцінку кінетичної енергії електронів, при якій у свинці йонізаційні та радіаційні втрати однакові..
2. Знайти товщину шару половинного поглинення  $\beta$ -частинок з енергією 0.3 Мев у свинці.
3. Знайти радіаційну довжину для електрона з енергією 0.5МеВ у воді.
4. Визначити радіаційну довжину електрона з енергією 0,8 МеВ у повітрі при нормальних умовах.
5. При проходженні шару деякої речовини товщиною 0.40 см енергія швидких електронів зменшилась у середньому на 25%. Знайти радіаційну довжину електрона, якщо відомо, що втрати енергії електрона при цьому в основному радіаційні.
6. Оцінити початкову енергію електронів, якщо після проходження свинцевої пластинки завтовшки 5.0 мм енергія електронів у середньому дорівнює 42 МеВ.

## **3.2 РОЗРАХУНКИ ВЗАЄМОДІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З РЕЧОВИНОЮ**

### **Завдання 3.2**

#### **Взаємодія іонізуючого випромінювання з речовиною**

**2.1.** Визначити іонізаційні втрати енергії електрона з кінетичною енергією 8.5 МеВ у повітрі при нормальних умовах.

**2.2.** Визначити відношення іонізаційних втрат енергії:

а) електрона з кінетичними енергіями 1.0 МеВ у повітрі;

б) електрона з кінетичною енергією 0.5 МеВ у міді та алюмінії.

**2.3** Знайти за допомогою емпіричних формул кількість пар іонів, які утворює електрон з початковою кінетичною енергією 0.5 МеВ на першому сантиметрі свого шляху в повітрі.

**2.4.** Визначити відношення іонізаційних втрат енергії електрона та протона, що рухаються зі швидкістю  $5 \cdot 10^7$  м/с у повітрі.



- 2.5.** У скільки разів радіаційні втрати енергії у свинці більші, ніж в алюмінії: а) при однакових енергіях;  
б) при однакових швидкостях.
- 2.6.** Визначити лінійні втрати енергії електрона з кінетичною енергією 0,8 MeV у алюмінії.
- 2.7.** Оцінити кінетичну енергію електронів, при якій радіаційні витрати в алюмінії дорівнюють іонізаційним.
- 2.8.** Визначити число пар йонів, що утворює електрон з початковою кінетичною енергією 2,5 MeV на 1 см шляху.
- 2.9.** Визначити іонізаційні втрати енергії електрона з кінетичною енергією 4,0 MeV на одиницю шляху в азоті при нормальних умовах.
- 2.10.** Визначити радіаційні втрати енергії електрона з кінетичною енергією 5 MeV на одиницю шляху в алюмінії.
- 2.11.** Визначити довжину пробігу електронів у свинці, якщо їх енергія дорівнює 1 MeV.
- 2.12.** Визначити середній пробіг електрона у свинці, якщо її енергія відповідає пробігу 1 мкм в алюмінії.
- 2.13.** Знайти кінетичну енергію електрона, середній пробіг якої у залізі дорівнює 11.0 мкм.
- 2.14.** Визначити довжину пробігу електрона з енергією 1,2 MeV у воді.
- 2.15.** Визначити пробіг протону у свинці, якщо його початкова кінетична енергія 1 MeV.
- 2.16.** Визначити радіаційну довжину електрона з енергією 0,8 MeV у повітрі при нормальних умовах.
- 2.17.** Скільки іонізаційних пар утворює електрон з енергією 3 MeV у повітрі на 1 см пробігу
- 2.18.** Знайдіть довжину пробігу електрона з енергією 40,0 KeV для води.
- 2.19.** Визначити пробіг електрона з енергією 21,0 KeV у повітрі.
- 2.20.** Визначити кінетичну енергію електронів, якщо у свинці їх пробіг дорівнює 10 мкм.
- 2.21.** Визначити іонізаційні втрати енергії електронів на 1 см шляху у алюмінії, якщо , якщо їх енергія дорівнює 0,5 MeV.
- 2.22.** Визначити лінійну втрату енергії у повітрі для електронів з енергією 0.1 MeV .
- 2.23.** Дати оцінку кінетичної енергії електронів, при якій у свинці іонізаційні та радіаційні втрати однакові..
- 2.24.** Знайти товщину шару половинного поглинення  $\beta$ -частинок з енергією 0.3 MeV у свинці.
- 2.25.** Знайти товщину шару половинного поглинення  $\beta$ -частинок з енергією 0.1 MeV у воді.
- 2.26.** Знайти радіаційну довжину для електрона з енергією 0.5 MeV у воді.

**2.27.** Визначити радіаційну довжину електрона з енергією 0,8 MeV у повітрі при нормальних умовах.

**2.28.** При проходженні шару деякої речовини товщиною 0.40 см енергія швидких електронів зменшилась у середньому на 25%. Знайти радіаційну довжину електрона, якщо відомо, що втрати енергії електрона при цьому в основному радіаційні.

**2.29.** Оцінити початкову енергію електронів, якщо після проходження свинцевої пластинки завтовшки 5.0 мм енергія електронів у середньому дорівнює 42 MeV.

**2.30.** Визначити товщину шару половинного ослаблення пучка рентгенівського випромінювання з довжиною хвилі 6,2 нм у свинці.

### Завдання 3.3

Знайти лінійний  $\mu$  та масовий  $\mu_m$  - коефіцієнти поглинання речовиною рентгенівського випромінювання з енергією  $E$ . Знайти для якої довжини хвилі рентгенівських променів отримані значення енергії  $E$ , що наведені в таблиці 3. У таблиці 3 наведені також густина речовини  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> і товщина шару  $\chi_{1/2}$  половинного ослаблення променів.

Таблиця 3

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Речовина	Fe	Al	Pb	H <sub>2</sub> O	Al	Pb	Повітря	Sn	Cu	C (графіт)
Густина $\rho, 10^3 \text{кг/м}^3$	7,9	2,6	11,3	1	2,6	11,3	1,29 · 10 <sup>-3</sup>	7,3	8,9	2,3
$\chi_{1/2}, 10^{-2} \text{м}$	1,56	4,4	0,87	10,2	6,93	1,46	8700	1,8	1,4	4,9
$E$ , MeV	1	1	1	1	2,5	2,5	1	1	1	1

### Завдання 3.4

Визначити товщину шару половинного ослаблення  $\chi_{1/2}$  і товщину шару десятикратного ослаблення  $\gamma$  - випромінювання з енергією  $E$  (таблиця 4) при заданих значеннях лінійного коефіцієнта поглинання  $\mu$ .

Таблиця 4.

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Речовина	Al	C	Cu	Fe	Pb	Al	Pb	H <sub>2</sub> O	Fe	Бетон

		(графіт)								$\rho=2,3\text{т/м}^3$
$\mu, \text{м}^{-1}$	16	14,2	49,5	44	80	10	47	4,0	28	8,3
$E, \text{МеВ}$	1	1	1	1	1	2,5	2,5	3	3	3

### Завдання 3.5

Знайти лінійний  $\mu$  і масовий  $\mu_m$  коефіцієнти поглинання речовиною пучка теплових нейтронів за даними значеннями товщини шару десятикратного послаблення  $I_{10}$  (таблиця 5).

Таблиця 5.

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Речовина	Cd	B	Li	Fe	H <sub>2</sub> O	Pb	Cu	Sn	Al	C (графіт)
$l, 10^{-2}\text{м}$	0,02	0,023	0,8	3,4	6,7	3,0	2,26	15,4	24	5,0

### Завдання 3.6

Розрахувати коефіцієнт поглинання і товщину шару половинного ослаблення пучка теплових і швидких нейтронів за даними значеннями повного перерізу процесу поглинання нейтронів  $\sigma$  (таблиця 6).

Таблиця 6.

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Речовина	C (графіт)	Fe	Cd	B	Al	Cu	Si	Pb	Sn	Ag
Густина $\rho, 10^3\text{кг/м}^3$	2,3	7,9	8,6	2,3	2,7	9,0	2,4	11,3	7,3	10,5
Теплові нейтрони $\sigma, \text{барн}$	3,83	8,5	4500	600	1,6	11,9	2,5	12,5	4,0	3560
Швидкі нейтрони $\sigma', \text{барн}$	1,9	3,2	4,1	2,2	2,1	2,9	2,0	6,7	3,6	430

## **Дози і потужності доз випромінювання.**

### Завдання 3.7

Визначити ефективну еквівалентну дозу і потужність дози  $\gamma$  - випромінювання з енергією квантів  $\sim 200$  кеВ, якщо вимірена в повітрі експозиційна доза досягає величини  $D_T$ , а час перебування в зоні випромінювання дорівнює  $t$ . Значення  $D_T$  і  $t$  наведені в таблиці 7.

Таблиця 7

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D <sub>T</sub> , Рентген	50	50	50	100	100	100	150	150	150	200
t, годин	20	15	10	20	15	10	30	20	10	20

**Завдання 3.8**

Визначити еквівалентну дозу та потужність дози для дорослих та дітей, якщо в атмосферному повітрі зареєстрована об'ємна активність  $A_v$ . Час перебування в зоні випромінювання -  $t$ , годин (таблиця 8).

Таблиця 8.

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$A_v$ , Бк/м <sup>3</sup>	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
t, годин	10	10	5	5	5	5	5	5	10	10

**Завдання 3.9**

В результаті аварійного викиду цезія  $Cs^{137}$  молоко стало забрудненим до значень об'ємної активності  $A_v$ . Розрахувати річну еквівалентну дозу  $H_T$  на організм людини, якщо добовий об'єм споживання молока  $V = 0,5$ л на добу і об'ємна активність молока зберігається на протязі року. Границю річного приходу радіонуклідів вважати рівною  $7,1 \cdot 10^4$  Бк/год. В парних варіантах вважати, що  $A_v = 300$ Бк/л, в непарних варіантах -  $A_v = 400$ Бк/л.

**Міграція радіонуклідів в біосфері.****Завдання 3.10**

Річний викид ізотопу  $I^{131}$  в атмосферу складає  $Q$ , Бк. Розрахувати річну еквівалентну дозу  $H_T$  на щитовидну залозу дорослих та дітей при заданому коефіцієнті метеорологічного розбавлення  $G$ . Дозовий коефіцієнт для дорослих вважати рівним  $B_{th} = 2,9 \cdot 10^{-7}$  Зв/Бк, для дітей -  $B_{th} = 1,0 \cdot 10^{-6}$  Зв/Бк.

Таблиця 9

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q, 10 <sup>11</sup> Бк	5	6	8	10	10	15	15	17	20	20
G, 10 <sup>-8</sup> с/м <sup>3</sup>	2	5	5	5	8	2	5	8	2	5

Завдання 3.11

Розрахувати об'ємну активність води в річці уздовж течії на відстані X км від джерела неперервного радіаційного забруднення. Знайти річну еквівалентну дозу Н<sub>T</sub> на організм дорослої людини, якщо добовий об'єм споживання води складає 4 л/добу і активність води не змінюється на протязі року. Початкова об'ємна активність води  $A_{V0} = 5 \cdot 10^5$  Бк/м<sup>3</sup>, швидкість річки u, константа осадження нуклідів b та константа розпаду  $\lambda$  приведені в таблиці 10.

Таблиця 10

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
u, м/с	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,8	0,8	0,8	0,5
b, 10 <sup>-5</sup> 1/с	1,5	0,5	0,1	0,2	0,5	0,1	0,2	0,5	1	0,1
$\lambda$ , 10 <sup>-5</sup> 1/с	2	1	0,5	0,6	0,5	0,1	0,2	1	1	0,2
X, км	5	2	2	5	5	10	10	2	2	1

Побудувати графік залежності об'ємної активності  $A_V$  від відстані X км.

Завдання 3.12

Під час аварії на АЕС річний викид ізотопу йоду <sup>131</sup>I в атмосферу складає  $Q = 8,1 \cdot 10^{11}$  Бк. Розрахувати еквівалентну дозу на щитовидну залозу, що потрапляє в організм дорослої людини через органи дихання, якщо відомо, що коефіцієнт метеорологічного розбавлення дорівнює  $G = 5 \cdot 10^{-8}$  с/м<sup>3</sup>.

Завдання 3.13

Розрахувати еквівалентну дозу на поверхні тіла, яку утворює фотонне випромінювання від хмарини радіоактивних газів суміші ізотопів Kr і Xe. Хмарина утворилася внаслідок аварії на реакторі ВВЕР-440, коли  $\delta = 10\%$  загальної кількості радіоактивного пального, що знаходилося в активній зоні реактора, потрапило в атмосферу. Висота викиду – 60м, швидкість вітру  $u = 1,6$  м/с, відстань від місця викиду – 3 км у напрямку вітру,

коефіцієнт шорсткості  $z_0 = 10$  см (сільська місцевість); коефіцієнт екранування будівлями  $k_e = 0,4$ .

#### Завдання 3.14

Оцінити вміст радіонукліда ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) у ґрунті в межах вибраного квадрату з Атласу забруднення території України радіонуклідами. Результат надати в Бк, Кі та кг.

## **4. ПОРЯДОК ЗАХИСТУ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ**

Після оформлення курсового проекту студент віддає його викладачеві на перевірку.

Студент допускається до захисту курсового проекту після перевірки його викладачем.

Курсовий проект (робота) з навчальної дисципліни оцінюється в інтегральній відомості окремим змістовим модулем у практичній частині навчальної дисципліни у балах і відсотках і зараховується до загальної оцінки з дисципліни.

Підсумкова оцінка виконання модулю з курсового проекту (роботи) складається з двох частин:

- оцінки виконання етапів курсового проекту протягом семестру згідно завдання, виданого викладачем, та дотриманням чинних вимог до оформлення;
- оцінки захисту курсового проекту (роботи).

На кожну частину надається відповідна частка балів модулю з таким розрахунком, щоб перша частина становила 60%, а друга –40%.

Курсовий проект оцінюється як самостійний вид навчання і виставляється підсумкова оцінка у кількісній та якісній формі в окремій відомості встановленого зразка.

Робота оформляється згідно методичних вказівок до оформлення курсових робіт. Готовий курсовий проект надається викладачеві для перевірки за 3 тижні до закінчення семестру. Після отримання роботи студент повинен виправити помилки або внести корективи у текст (якщо в цьому існує потреба) та захистити роботу.

У разі виконання завдання студент може отримати бали, але:

60% він отримує, якщо відвідував практичні заняття і вчасно показував розрахунки викладачеві на всіх етапах роботи, правильно оформив роботу та не мав помилок у розрахунках, але відмовився від захисту роботи;

75%-89% він отримує, якщо відвідував практичні заняття і вчасно показував розрахунки викладачеві на всіх етапах роботи, правильно оформив роботу та не мав помилок у розрахунках, але припустився

помилки при захисті роботи (зробив помилки у викладанні теоретичних основ розрахунків чи у написанні розрахункових формул);

90-100% він отримує, якщо відвідував практичні заняття і вчасно показував розрахунки викладачеві на всіх етапах роботи, правильно оформив роботу та не мав помилок у розрахунках, але припустився незначних помилок при захисті роботи.

Бали, які отримав студент, враховуються в практичній частині модульного контролю по дисципліні.

### **Захист курсового проекту**

При захисті курсового проекту необхідно відобразити:

1. Назву проекту та тему проекту.
2. Актуальність обраної теми.
3. Мету роботи та елементи новизни.
4. Постановку задачі, яка зроблена на основі літературного аналізу.
5. Зміст зробленої роботи.
6. Обґрунтованість положень та результатів.
7. Висновки з роботи, які витікають з поставленої задачі.

## **5. ВИМОГИ СТАНДАРТІВ ДО КУРСОВОГО ПРОЕКТУ**

### **5.1. Структура курсового проекту**

5.1.1. Курсовий проект (КП) умовно поділяється на вступну частину, основну частину та додатки.

5.1.2. Вступна частина містить титульний аркуш. Сторінки вступної частини враховуються у загальній кількості сторінок КП.

5.1.3. Основна частина виконується на стандартних формах за ГОСТ 2.104-68.

5.1.4. Основна частина містить такі структурні елементи:

- зміст;
- вступ;
- розділи;
- висновки;
- список використаних джерел.

5.1.5. Додатки розташовують після основної частини КП, кожний з них починається з нового аркуша.

5.1.6. Нумерація аркушів проставляється по центру унизу сторінки без крапки.

### **5.2. ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ**

#### **Загальні положення**

5.2.1. КП виконують зазвичай на одній стороні аркуша білого паперу формату А4 із застосуванням друкуючих пристроїв.

5.2.2 Якщо КП друкується за допомогою ПЕОМ, параметри сторінки меню „Друк” повинні бути : 1) поля: ліве –25мм, праве, верхнє, нижче –25 мм; 2) формат абзаца – 1 інтервали; 3) шрифт-14; 4) інтервал – одинарний.

5.2.3. Помилки, описки та графічні неточності, які виявлені в процесі виконання КП, допускається виправляти підчищенням або зафарбуванням білою фарбою та нанесенням на тому ж місці виправленого тексту (графіки) чорною пастою.

### **5.3 Викладання тексту КП**

5.3.1 Текст документа повинен бути стислим, чітким і не допускати різних тлумачень.

5.3.2 Умовні літерні позначення, зображення чи знаки повинні відповідати прийнятим у чинному законодавстві і державних стандартах. У тексті перед позначенням параметра дають його пояснення.

5.3.3 У КП треба застосовувати стандартизовані одиниці фізичних величин, їхні найменування і позначення відповідно до ГОСТ 8.417.

Поряд з одиницями СІ (System International), при необхідності, в дужках вказують одиниці систем, які раніше застосовувалися і дозволені до застосування.

5.3.4 Якщо в тексті документа наводять діапазон числових значень фізичної величини, виражених в одній і тій же одиниці фізичної величини, то позначення одиниці фізичної величини вказується після останнього числового значення діапазону. Наприклад:

1. Від 1 до 5 мм.
2. Від плюс 10 до мінус 40 °С.

5.3.5 Округлення числових значень величин до першого, другого, третього тощо десяткового знака для різних типорозмірів, марок і до того подібних виробів одного найменування повинно бути однаковим

5.3.6 Для складання складних формул слід використовувати опцію меню „Вставка – Об’єкт – Microsoft Equation”. Для влаштування індексів можна також використовувати опцію меню „Формат – Шрифт – Видозміна – Над(під)стрічковий”.

5.3.7 Формули, за винятком формул, що поміщаються в додатку, повинні нумеруватися в межах розділу арабськими цифрами, що записують на рівні формули праворуч у круглих дужках. Номер формули складається з номера розділу і порядкового номера формули, розділених крапкою, наприклад (3.1). Одну формулу також позначають, наприклад (2.1).

Посилання в тексті на порядкові номери формул дають у дужках, наприклад: „... у формулі (4.1).

### **5.4 Оформлення ілюстрацій і додатків**

5.4.1. Кількість ілюстрацій повинна бути достатньою для пояснення тексту, що викладається. Ілюстрації можуть бути розташовані як по тексту (можливо ближче до відповідних частин тексту), так і наприкінці його. Рекомендованим є розташування ілюстрацій безпосередньо в тексті.



5.4.2. Позначення ілюстрації розташовується під нею. При посиланнях на ілюстрації треба писати, наприклад: „відповідно до рисунка 2.2.” або „відповідно до Рис.2.2.”

5.4.3 Ілюстрації, при необхідності, можуть мати найменування і пояснювальні дані (під рисунковий текст), які розміщують під ілюстрацією.

## 5.5 Побудова таблиць

5.5.1. Таблиці застосовують для кращої наочності і зручності порівняння показників. Назву слід поміщати над таблицею.

При переносі частини таблиці на ту чи іншу сторінку назву поміщають тільки над першою частиною таблиці

Цифровий матеріал, як правило, оформляють у вигляді таблиць відповідно до наступного рисунка.

Таблиця 2.1. Назва таблиці.

	Заголовки граф		Заголовки граф	
	Підзаголовки граф	Підзаголовки граф	Підзаголовки граф	Підзаголовки граф
Боковик (графа для заголовків)	Рядки	Рядки	Рядки	Рядки
	Рядки	Рядки	Рядки	Рядки
	Рядки	Рядки	Рядки	Рядки

5.5.2. Таблиці, за винятком таблиць додатків, треба нумерувати арабськими цифрами в межах розділу. У цьому випадку номер таблиці складається з номера розділу і порядкового номера таблиці, які розділені крапкою.

5.5.3 Якщо в графі таблиці поміщені значення однієї і тієї ж величини, то позначення одиниці фізичної величини вказують у заголовку (підзаголовку) цієї графи. Числові або текстові значення величин, однакові для декількох рядків, допускається вказувати один раз шляхом об'єднання клітинок. Наприклад:

Таблиця 5.1. Типи реакторів АЕС України

Тип реактору	Назва АЕС	Вид захисту
ВВЕР-440	Рівненська	ковпак
ВВЕР-1000	Південноукраїнська	
	Запорізька	
РБМК-1000	Хмельницька	без ковпака
	Чорнобильська	

## ПЕРЕЛІК НАВЧАЛЬНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Герасимов О.І., Кільян А.М. Елементи фізики довкілля: Радіоекологія (конспект лекцій). ОДЕКУ, Одеса, 2003 – 135с.
2. Збірник задач з радіоекології. ОДЕКУ, Одеса, 2003 – 135с.
3. Герасимов О.І. Основи радіаційної безпеки. Конспект лекцій. – Одеса, ОДЕКУ, 2014. – 65с.
4. Герасимов О.І. Радіоекологія за галузями. Підручник. ОДЕКУ. – Одеса: ТЕС, 2016.- 100 с.
5. Ю.О.Кухлахмедов, В.І.Корогодін, В.К.Кольтовер. Основи радіоекології: навч. посіб. – К.: Вища шк., 2003. – 319с. (бібл. ОДЕКУ).
6. Герасимов О.І. та ін.. Методичні вказівки до розв'язання задач з дисципліни “Радіоекологія”. Одеса: ОДЕКУ, 2012, 60с.
7. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – М.: Энергоатомиздат, 1988, - 400 с.
8. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. М, 1972.
9. Радиогеоэкология водных объектов зоны влияния аварии на ЧАЭС. Под ред. О.В. Войцеховича, - Киев: Чернобыльинтеринформ, 1997.
10. Радиация, дозы, эффекты, риск. Пер.с англ. - М.: Мир, 1990.
11. Норми радіаційної безпеки України – НРБУ – Київ, 1997.
12. Закон України “Про захист людини від впливу іонізуючих випромінювань”. – Київ, 1998
13. Герасимов О.І. Елементи фізики довкілля. Навч. посіб. ОДЕКУ, Одеса, 2004 – 144с
12. Курятников В.В. Методичні вказівки до СРС з дисципліни ” Фізичні основи радіометрії та дозиметрії “, Одеса, ОДЕКУ, 2004
13. Збірник методичних вказівок до лабораторних робіт з дисципліни “Фізичні основи радіометрії та дозиметрії”. Курятников В.В., Співак А.Я., Кільян А.М., Одеса, ОДЕКУ, 2008, 34 с.
15. Курятников В.В. Електронний конспект лекцій з дисц. “Фізичні основи радіометрії та дозиметрії”. - Одеса, ОДЕКУ, 2009, 66 с.
14. [www.library-odeku.16mb.com](http://www.library-odeku.16mb.com)

Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Фізичні основи радіометрії та дозиметрії». Напрямок підготовки - 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування», Одеса, ОДЕКУ, 2017 р. - 42 с.

Розробники: Курятников В.В., Співак А.Я., Кільян А.М.

Підп. до друку  
Умовн. друк. арк.

Формат  
Тираж

Папір друк.  
Зам №

---

Одеський державний екологічний університет  
65016, м.Одеса, вул. Львівська, 15  
Надруковано з готового оригінал-макета