

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ З ДИСЦИПЛІНИ
«РАДІОЕКОЛОГІЯ»**

Напрямок підготовки — екологія, охорона навколишнього
середовища та збалансоване природокористування

**Одеса
2012**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ З ДИСЦИПЛІНИ
«РАДІОЕКОЛОГІЯ»

Напрямок підготовки — екологія, охорона навколишнього
середовища та збалансоване природокористування

"Затверджено"

на засіданні методичної комісії
природоохоронного факультету

Протокол № 8 від 15.04.2011

Одеса
2012

Методичні вказівки до розв'язання задач з дисципліни «Радіоекологія» для студентів які навчаються за напрямом «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування».

Герасимов О.І., Андріанова І.С., Затовська А.О., Співак А.Я. — Одеса, ОДЕКУ, 2012, с. 60.

Відповідальний редактор: Герасимов О.І., доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедру загальної і теоретичної фізики ОДЕКУ.

Методичні вказівки

до розв'язання задач з дисципліни

«Радіоекологія»

Укладачі:

Герасимов Олег Іванович
Андріанова Ірина Сергіївна
Затовська Алевтина Олексіївна
Співак Андрій Ярославович

Підписано до друку 04.09.2012. Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 3,49.
Тираж 100 прим. Зам. 245.

Одеський державний екологічний університет
65016, Одеса, вул. Львівська, 15

Надруковано з готового оригінал макета

Друкарня видавництва «Екологія»
65045, м Одеса, вул. Базарна, 106, к. 313
Тел.: (0482) 33-07-18, 37-07-95, 37-15-27

www.fotoalbom-odessa.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1873 від 20.072004 р.

ЗМІСТ

Передмова	4
Вступ	5
1. Елементна база радіоекології.	8
2. Будова та властивості ядер. Радіоактивність.	15
3. Взаємодія іонізуючого випромінювання з речовиною	24
4. Дози іонізуючих випромінювань	37
5. Міграція радіонуклідів у біосфері	48
Додаток	57
Література	60

ПЕРЕДМОВА

Представлені “Методичні вказівки до розв’язання задач з дисципліни «Радіоекологія»” спрямовані насамперед на формування у студентів навичок розв’язування задач, пов’язаних з вивченням властивостей іонізуючого випромінювання, взаємодії його з різноманітними об’єктами екології, оцінкою доз випромінювання, міграції радіонуклідів у біосфері та сприяють формуванню природознавчої концепції екологічної освіти.

Цей збірник логічно доповнює матеріал, який викладено у конспектах лекцій з радіоекології та різноманітних спеціальних дисциплін, що видані або знаходяться в електронному вигляді на кафедрі.

“Методичні вказівки до розв’язання задач з дисципліни «Радіоекологія»” потрібні для проведення семінарських та практичних занять, іспитів та інших контрольних заходів. Методично вони побудовані так: кожний розділ супроводжується невеликим вступом, який вміщує необхідну для розв’язування задач інформацію та сприяє оволодінню понятійною базою радіоекології; далі надається достатня кількість прикладів розв’язання типових задач з поясненнями та вказівками, аналізом одиниць вимірювання; потім наведені задач для самостійної роботи студентів. Збірник вміщує більше 200 задач та завдань.

Більша частина збірника пройшла апробацію при проведенні практичних занять, комплексних контрольних робіт та державних іспитів.

Структурно матеріал розбито на 5 розділів: елементна база радіоекології, в якій наведені поняття та формули квантової теорії, без чого важко зрозуміти закономірності радіоактивності та її наслідків. Далі розглянуто властивості ядер та радіоактивність, взаємодія іонізуючого випромінювання з речовиною, дози іонізуючого випромінювання та міграція радіонуклідів у біосфері.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціалізації “Радіоекологія” і є додатковим матеріалом при вивченні спецкурсів та проведенні практик, а також виступають як посібник по курсу “Радіоекологія” для студентів напряму підготовки — екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування.

ВСТУП

Радіоекологія вивчає дію іонізуючого випромінювання довкілля (космічної радіації і техногенних радіонуклідів) на живі організми, їх співтовариства і зв'язок цієї дії з розподілом радіонуклідів по поверхні Землі (в атмосфері, Світовому океані, земній корі). У зв'язку з історією зародження радіоекології слід згадати роботи В. І. Вернадського, який в 1910-20р.р. одним з перших звернув увагу на можливу дію радіоактивності довкілля на біосферу. Сьогодні нам така точка зору вже здається цілком очевидною. Адже усі живі організми на Землі, у тому числі людина, знаходяться під постійною дією космічного випромінювання і випромінювання радіонуклідів, що містяться в атмосфері, воді, ґрунтах, гірських породах, будівельних та ін. матеріалах. Найбільшу дію на живі організми чинять природні радіонукліди ^{40}K , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th і продукти їх розпаду, а також космогенні радіонукліди, що утворюються головним чином у верхніх шарах атмосфери під дією космічного випромінювання (^{14}C , ^3H та ін.). Розвиток атомної промисловості і проведення випробувань ядерної зброї (починаючи з 40-50-х рр. ХХ століття) призвів до того, що в довкілля в усе зростаючих кількостях стали потрапляти штучні (техногенні) радіонукліди ^{85}Kr , ізотопи ксенону, ^{131}I , ^{90}Sr , ^{144}Ce , ^{137}Cs та ін., велика кількість з яких має порівняно великі періоди напіврозпаду (до декількох десятків років). Особливо багато техногенних радіонуклідів потрапило в довкілля до підписання Московського договору про заборону випробувань ядерної зброї в атмосфері і на поверхні Землі і океану (1972). В результаті великих аварій на ядерних реакторах (Уиндскейл, 1957; Чорнобиль, 1986) в атмосферу викинуті великі кількості продуктів ядерного поділу урану, плутонію і непунію, які у вигляді аерозолів і газів поширилися на великі відстані. Шляхи поширення радіонуклідів від місць викиду, зберігання і схову радіоактивних відходів, а також за рахунок вилуговування з радіоактивних порід залежать від хімічних форм, в яких знаходяться радіонукліди, здатності цих форм до комплексоутворення, гідролізу, окислення і відновлення. Нарешті розсіяні в середовищі радіонукліди засвоюються живими організмами (рослинами і тваринами), причому в організм людини вони можуть потрапляти не лише безпосередньо (при диханні, з питною водою і т. п.), але і по складних харчових ланцюгах (наприклад, ^{90}Sr значною мірою потрапляє по ланцюжку рослина - травоядні тварини - молоко). Важливе завдання радіоекології – викриття шляхів потрапляння радіонуклідів в організм людини і захист його від такого потрапляння.

Сучасна радіоекологія розвивається на стику багатьох наук і по суті є міждисциплінарним напрямом. Так, ядерна фізика дозволяє вивчати радіаційні поля, тобто розподіл джерел іонізуючого випромінювання в атмосфері, водоймищах, ґрунтах, гірських породах. Радіохімія - досліджує

стан радіонуклідів у водних розчинах, аерозолях (вивчає хімічні форми, міри окислення елементів і так далі). Фізична кінетика вивчає закони, по яких відбувається міграція радіонуклідів в середовищі, її особливості при проходженні геохімічних бар'єрів типу річка-море або океан-атмосфера, або при зміні температури, кислотності, вологості, інших чинників. Відомості про концентрування радіонукліду різними організмами і їх окремими органами (наприклад, ^{90}Sr накопичується в кістках людини, а ^{131}I -в щитовидній залозі), дані про генетичні і інші наслідки дії іонізуючого випромінювання вивчає радіобіологія. Методи розрахунку дози і потужності дози іонізуючого випромінювання розробляються в розділі, що дістав назву дозиметрія.

Безперечним здається і той факт, що само існування предмета радіоекології зумовлене, в першу чергу, наявністю іонізуючого випромінювання, ядерне походження якого є переважним джерелом.

Для радіоекології представляє інтерес передусім вивчення дії на організми малих доз іонізуючого випромінювання. Таку дію мають, наприклад, радон і продукти його розпаду (сам радон утворюється при розпаді наявного повсюдно у виключно низьких концентраціях радію), в помітних кількостях присутні в повітрі у сучасних будівлях, побудованих з використанням нових будівельних матеріалів (шлаків, зольних залишків від згорання викопних палив). Систематичні дослідження радіоекології спрямовані, зокрема, на те, щоб правильним вибором матеріалів і доцільним плануванням приміщень виключити небезпечне підвищення концентрації радону.

В умовах реального світу, дія іонізуючого випромінювання підсилена наявністю в середовищі шкідливих домішок (наприклад, в атмосфері – оксидів азоту, сірки; у ґрунтах і у водах – іонів важких металів, пестицидів і так далі). Існує навіть спеціальний термін для обліку подібних ефектів - радіоекологічний синергізм.

Важлива проблема радіоекології – вивчення просторово-часової мінливості природного фону іонізуючого випромінювання (наприклад, на поверхні Землі в 50-100 разів). Підвищеним фоном характеризуються, зокрема, так звані радіоактивні провінції-райони з високим природним вмістом урану і торію в ґрунті і гірських породах, розташованих на поверхні. В багатьох країнах світу ведуться роботи по безперервному контролю (моніторингу) радіоактивного забруднення повітря, ґрунтів, рослинних і тваринних організмів, що дозволяють виявляти зони підвищеного забруднення, їх джерела, а також радіологічно чисті зони. Моніторинг дозволяє надійно встановлювати навіть незначні зміни в радіаційній обстановці на місцевості, пов'язані із змінами в режимах роботи ядерних реакторів, підприємств атомної промисловості і так далі, не кажучи вже про аварійні ситуації.

Відомості, що отримуються в радіоекології, відіграють важливу роль при виробленні міжнародних угод, спрямованих на повне припинення випробувань ядерної зброї, скорочення його виробництва; на них засновані нормативні документи, в т.ч. ті що визначають порядок схову радіоактивних відходів, безпечну роботу ядерних реакторів, умови роботи персоналу; можливість використання сільськогосподарської та іншої продукції населенням і інші.

1. ЕЛЕМЕНТНА БАЗА РАДІОЕКОЛОГІЇ

Іонізуюче випромінювання складається з α -, β - частинок, γ - квантів, протонів та нейтронів, атомних ядер і т. ін., для яких потрібен квантовий опис. Ці частинки можуть мати дуже високу енергію та рухатися з релятивістськими швидкостями. Нагадаємо деякі формули, які потрібні для розв'язування задач.

Енергія фотона з частотою ν та довжиною хвилі λ визначається за формулою:

$$\varepsilon = ch/\lambda = h\nu, \quad (1.1)$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – стала Планка.

Вектор імпульсу фотона

$$\vec{p} = \hbar \vec{k} \quad (1.2)$$

де \vec{k} – хвильовий вектор; $k = 2\pi/\lambda$; $\hbar = h/2\pi$.

Довжина хвилі де Бройля частинки з імпульсом p дорівнює:

$$\lambda = h/p. \quad (1.3)$$

Релятивістський імпульс пов'язаний з повною енергією частинки E співвідношенням

$$E = c\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}. \quad (1.4)$$

де m_0 – маса спокою частинки.

Кінетична енергія $E_{\text{кін}}$ частинки дорівнює

$$E_{\text{кін}} = E - E_0, \quad (1.5)$$

де E_0 - енергію спокою частинки. У нерелятивістському випадку ($E_{\text{кін}} < E_0$)

$$E_{\text{кін}} = p^2/2m. \quad (1.6)$$

Енергія частинки пов'язана з її масою:

$$E = mc^2. \quad (1.7)$$

Маса частинок залежить від їх швидкості v :

$$m = m_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (1.8)$$

Основною властивістю квантових систем є те, що вони мають дискретну структуру енергетичного спектра. У спектрі найменший рівень зветься основним, а всі інші збудженими. Якщо система переходить з вищого енергетичного рівня E_i на нижчий E_k , то вона випромінює фотон, циклічна частота якого $\omega = 2\pi\nu$ визначається за формулою:

$$\omega = (E_i - E_k)/\hbar. \quad (1.9)$$

Співвідношення невизначеностей Гейзенберга: невизначеність координати пов'язана з невизначеністю імпульсу співвідношенням

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar. \quad (1.10a)$$

Аналогічне співвідношення для невизначеностей енергії та часу:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar. \quad (1.10b)$$

Приклади розв'язування типових задач

Приклад 1.1. Визначити імпульс p та кінетичну енергію E_k електрона, що рухається зі швидкістю $0.9c$.

$$v = 0.9c$$

$$p = ? \quad E_k = ?$$

Розв'язання

Імпульс – це добуток маси на швидкість: $p = mv$, де m – залежна від швидкості маса, бо електрон рухається зі швидкістю, близькою до швидкості світла у вакуумі:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}, \text{ де } \beta = v/c = 0.9 \text{ (за умовою задачі).}$$

$$\text{Таким чином, } p = \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{9.11 \cdot 10^{-31} \cdot 0.9 \cdot 3 \cdot 10^8}{\sqrt{1-0.81}} \text{ кг} \cdot \text{м/с} = 5,6 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

У релятивістському випадку кінетична енергія частинки визначається як різниця між повною енергією E та енергією спокою E_0 , тому

$$E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \text{ Дж} = 1.06 \cdot 10^{-13} = 0,66 \text{ МеВ}.$$

Приклад 1.2. Визначити імпульс p та кінетичну енергію E_k електрона, що рухається зі швидкістю $v = 0,09c$ (c – швидкість світла у вакуумі), за класичними та релятивістськими формулами. Порівняти результати.

Розв'язання

Згідно означенню імпульс $p = mv$. За релятивістською формулою:

$$p = \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{9.11 \cdot 10^{-31} \cdot 0.09 \cdot 3 \cdot 10^8}{\sqrt{1-0.0081}} \text{ кг} \cdot \text{м/с} = 2.47 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

За класичною формулою

$$p = m_0 v = 9.11 \cdot 10^{-31} \cdot 0.09 \cdot 3.00 \cdot 10^8 = 2.46 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Кінетична енергія визначається як різниця між повною енергією E та енергією спокою E_0 , тобто:

$$E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) = 9,1 \cdot 10^{-31} (3 \cdot 10^8)^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-0,0081}} - 1 \right) \text{ Дж} = \\ = 0,329 \cdot 10^{13} \text{ Дж} = 2,06 \text{ кеВ}.$$

За класичною формулою

$$E = m_0 v^2 / 2 = 9,11 \cdot 10^{-31} (0,09 \cdot 10^8)^2 / 2 = 0,332 \cdot 10^{15} \text{ Дж} = 2,07 \text{ кеВ}.$$

Таким чином, різниця між релятивістськими та класичними результатами не перевищує 1%.

Приклад 1.3. Знайти імпульс та енергію рентгенівського фотона та електрона, якщо довжина хвилі обох дорівнює 10^{-10} м.

$$\lambda = 10^{-10} \text{ м.}$$

$$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

$$p_\gamma, \varepsilon_\gamma = ?$$

$$p_e, E_e = ?$$

Розв'язання

Імпульс та енергію фотона можна визначити за формулами:

$$p_\gamma = h/\lambda, \varepsilon_\gamma = hc/\lambda.$$

Таким чином

$$p_\gamma = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} / 10^{-10} \text{ м} = 6,63 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с};$$

$$\varepsilon_\gamma = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} / 10^{-10} \text{ м} = 1,99 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} = 12,4 \text{ кеВ.}$$

За формулою де Бройля імпульс електрона

$$p_e = h/\lambda = p_\gamma = 6,63 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с},$$

а його енергія

$$E_e = p_e^2 / 2m = 6,63^2 \cdot 10^{-48} / 2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 151 \text{ еВ.}$$

Приклад 1.4. Знайти довжину хвилі де Бройля електрона, який має кінетичну енергію $E_k = 5 \text{ МеВ}$.

Розв'язання

Довжина хвилі де Бройля частинки з імпульсом p дорівнює $\lambda = h/p$.

Таким чином, для вирішення задачі треба знайти зв'язок між релятивістським імпульсом (бо кінетична енергія електрона за умовою задачі більше, ніж енергія спокою, яка дорівнює $0,51 \text{ МеВ}$) електрона та його кінетичною енергією.

Релятивістський імпульс пов'язаний з повною енергією частинки E формулою:

$$E = c\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}, \text{ звідси } p = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - E_0^2} = \frac{1}{c} \sqrt{E_k(E_k + 2E_0)},$$

де було враховано, що $E - E_0 = E_k$ та $E + E_0 = E_k + 2E_0$.

Для чисельних розрахунків енергію треба виразити у джоулях:

$$E_k = 5 \text{ МеВ} = 5 \cdot 10^6 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 8,00 \cdot 10^{-13} \text{ Дж};$$

$$E_0 = 0,51 \text{ МеВ} = 0,8 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

Тоді отримуємо для імпульсу $p = 2,93 \cdot 10^{-21} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}$, а для довжини хвилі де Бройля :

$$\lambda = 2,26 \cdot 10^{-13} \text{ м} = 22,6 \text{ пм.}$$

Приклад 1.5. Чому дорівнює розмір ядра, оцінений за співвідношенням невизначеностей, якщо прийняти, що енергія нуклона у ядрі порядку 8MeV?

$$E = 8\text{MeV}$$

$$R = ?$$

Розв'язання

Співвідношення невизначеностей для координати та імпульсу має вигляд: $\Delta x \Delta p \geq \hbar$. Припустимо, що нуклон у ядрі знаходиться в області з невизначеністю $\Delta x = R/2$, тоді $R \geq 2\hbar/\Delta p$.

Фізично розумна невизначеність імпульсу не повинна перевищувати значення самого імпульсу. Імпульс пов'язаний з кінетичною енергією співвідношенням: $p = \sqrt{2mE_{\text{кін}}}$. Таким чином

$$R_{\text{min}} = 2\hbar/\sqrt{2mE_{\text{кін}}} = 2 \cdot 1.05 \cdot 10^{-34} / \sqrt{2 \cdot 1.67 \cdot 10^{-27} \cdot 8 \cdot 10^{-13} \cdot 1.60} \text{ (м)}$$

$$\text{Звідси } R_{\text{min}} = 3 \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

Приклад 1.6. Знайдіть відношення невизначеностей швидкості електрона та протона, коли їх координати визначені з точністю до 10^{-10} м.

$$\Delta x = 10^{-10} \text{ м.}$$

$$\Delta v_e / \Delta v_p = ?$$

Розв'язання

За співвідношенням невизначеностей $\Delta p \Delta x \geq \hbar$, а через швидкість $m \Delta v \Delta x \geq \hbar$. Таким чином, необхідне відношення

$$\Delta v_e / \Delta v_p = m_p / m_e = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} / 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 1.83 \cdot 10^3 = 1830.$$

Приклад 1.7. Ширина сліду електрона (з кінетичною енергією $E_{\text{кін.}} = 1.5 \text{ кеВ}$), отриманого на фотопластинці за допомогою камери Вільсона, становить $\Delta x = 1 \text{ мкм}$. Знайти відношення невизначеності імпульсу до його значення.

$$E_{\text{кін.}} = 1.5 \text{ кеВ} = 2.4 \cdot 10^{-16} \text{ Дж.}$$

$$\Delta x = 1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м.}$$

$$\Delta p / p = ?$$

Розв'язання

Імпульс електрона можна знайти за його кінетичною енергією, але спочатку треба встановити, чи є електрон в цьому випадку нерелятивістським. Енергія спокою електрона $E_0 = 0.511 \text{ МеВ}$, що набагато більше кінетичної енергії у даному випадку, тобто можна скористатися формулою $E_{\text{кін.}} = p^2/2m$. Звідси $p = \sqrt{2mE_{\text{кін.}}}$.

$$\text{За співвідношенням невизначеностей } \Delta p \Delta x \geq \hbar, \text{ тобто } \Delta p = \hbar/\Delta x, \\ \Delta p / p = \hbar/\Delta x \sqrt{2mE_{\text{кін.}}} = 1.05 \cdot 10^{-34} / 10^{-6} \cdot \sqrt{2.4 \cdot 10^{-16} \cdot 2 \cdot 0.91 \cdot 10^{-30}} = 5 \cdot 10^{-5}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

- 1.1. Порівняти довжини хвиль фотона та електрона з однаковими імпульсами $p = 5 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.
- 1.2. Знайти та порівняти енергії спокою електрона, протона та нейтрона, Виразити енергію в Дж, ерг та еВ.
- 1.3. Знайти кінетичну енергію та імпульс а) протона, б) електрона, в) дейтрона, якщо їх швидкість дорівнює $3 \cdot 10^7 \text{ см/с}$. Яку з цих частинок можна вважати нерелятивістською?
- 1.4. Знайти довжини хвиль де Бройля для частинок попередньої задачі.
- 1.5. Чи можна протон з енергією а) 5 кеВ; б) 5 МеВ; г) 5 ГеВ назвати нерелятивістським?
- 1.6. Яка енергія є релятивістською для електрона?
- 1.7. Порівняти попарно між собою маси електрона, протона та нейтрона.
- 1.8. Електронний пучок прискорюється різницею потенціалів $U = 1 \text{ кеВ}$. Відомо, що невизначеність швидкості дорівнює 0.1% від її значення. Знайти невизначеність координати електрона.
- 1.9. Розв'язати попередню задачу для протона.
- 1.10. Знайти кінетичну енергію та швидкість а) протона, б) електрона, в) дейтрона, якщо їх імпульс $p = 3 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. Яку з цих частинок у даному випадку можна вважати нерелятивістською?
- 1.11. Знайти довжину хвилі де Бройля для частинок попередньої задачі.
- 1.12. Знайти та порівняти енергію γ -кванта з довжиною хвилі $\lambda = 10^{-12} \text{ м}$ з енергією червоного фотона.
- 1.13. Чому дорівнюють імпульси фотонів з попередньої задачі?
- 1.14. Чому дорівнює час життя збудженого стану атома, якщо в спектрі випромінювання ширина спектральної лінії, що відповідає переходу з цього стану в основний, дорівнює 0,10 пм?
- 1.15. Кінетична енергія електрона дорівнює 0,6 МеВ. Знайти довжину хвиль де Бройля для нього.
- 1.16. Знайти енергію та довжину хвилі фотона, ефективна маса якого співпадає з масою електрона.
- 1.17. З якою швидкістю повинен рухатися електрон, щоб його імпульс дорівнював імпульсу фотона з довжиною хвилі 0,55 мкм.
- 1.18. До якого діапазону належать фотони з довжинами хвиль 0,435 мкм та 0,628 нм?
- 1.19. Знайти енергію та імпульс фотона з довжиною хвилі 0,55 нм?
- 1.20. Знайти довжину хвилі де Бройля електрона, що рухається зі швидкістю $v = 10^8 \text{ см/с}$.
- 1.21. Заряджена частинка прискорена потенціалом 200В і має довжину хвилі 2,02 нм. Знайти масу цієї частинки, якщо відомо, що її заряд дорівнює заряду електрона.

- 1.22. Яким буде відношення довжин хвиль де Бройля протона та електрона при 1) однакових імпульсах; 2) однакових енергіях; 3) однакових швидкостях?
- 1.23. Знайти масу електрона, який
 1) знаходиться у спокої;
 2) рухається зі швидкістю 10^{10} см/с.
- 1.24. Визначити енергію та імпульс фотона з довжиною хвилі $2 \cdot 10^{-10}$ м.
- 1.25. Визначити довжину хвилі де Бройля електрона, протона та нейтрона з енергіями 0,5 MeV; 10 MeV .
- 1.26. Визначити імпульси та швидкості протона та нейтрона з енергіями:
 1) 0,5 MeV;
 2) 10 MeV.
- 1.27. Визначити швидкість протона, довжина хвилі де Бройля для якого дорівнює 2 пм.
- 1.28. Визначити швидкість електрона з довжиною хвилі де Бройля 0,2 нм.
- 1.29. Знайти довжину хвилі де Бройля протона, який рухається зі швидкістю $v = 10^8$ см/с.
- 1.30. Знайдіть енергію фотона (в eV), якщо довжина його хвилі 10^{-11} м.
- 1.31. Чи можна вважати нерелятивістськими протон та електрон з енергією 1 MeV?
- 1.32. Визначити імпульс p та кінетичну енергію E_k електрона, що рухається зі швидкістю $v = 0,9c$.
- 1.33. Знайдіть відношення невизначеностей швидкості електрона та α -частинки, якщо їх координати визначені з точністю до 10^{-10} м.
- 1.34. Використовуючи співвідношення невизначеностей, показати, що в ядрі не можуть знаходитися електрони. Лінійні розміри ядра прийняти рівними $5 \cdot 10^{-5}$ А.
- 1.35. Використовуючи співвідношення невизначеностей, доведіть, що для рухомої частинки, невизначеність координати якої дорівнює довжині хвилі де Бройля, невизначеність швидкості за порядком величини дорівнює величині самої швидкості частинки.
- 1.36. Знайти довжину хвилі фотона, ефективна маса якого дорівнює масі електрона.
- 1.37. Знайти питомий заряд електрона.
- 1.38. Паралельно пластинам зарядженого конденсатора пропускають спочатку пучок β -частинок, потім пучок α -частинок. Як відхиляються ці пучки? Який пучок відхиляється більше? Чому?
- 1.39. Визначити довжину хвилі де Бройля для електрона, прискореного різницею потенціалів 100 В.
- 1.40. Оцінити за допомогою співвідношення невизначеностей мінімальну кінетичну енергію електрона, що рухається в області, розмір якої 10^{-8} см.

1.41. У скільки разів релятивістська маса частинки, швидкість якої відрізняється від швидкості світла на 0,001 відсотка, перевищує її масу спокою?

1.42. Чому дорівнює довжина хвилі та частота фотону з енергією 1MeV?

1.43. Швидкість протона $(8,880 \pm 0,012)10^5$ м/с. З якою мінімальною точністю можна визначити його координату?

1.44. При якій швидкості релятивістська маса частинки у три рази більше за її масу спокою?

1.45. Визначити відносну невизначеність імпульсу рухомої частинки $\Delta p/p$, якщо припустити, що невизначеність її координати дорівнює довжині хвилі де Бройля.

2. БУДОВА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЯДЕР. РАДІОАКТИВНІСТЬ

Джерелами іонізуючого випромінювання є процеси, що відбуваються в атомних ядрах. Ядро складається з протонів та нейтронів, їх загальна кількість визначається масовим числом A . Зарядове число Z – це кількість протонів.

Традиційна форма запису ядра A_ZX . По неї можна визначити:

- 1) склад ядра - Z протонів та $N = A - Z$ нейтронів;
 - 2) масу - $m_{\text{я}} = A \cdot m_{\text{n}}$, оскільки $m_{\text{p}} \approx m_{\text{n}}$;
 - 3) заряд - $q_{\text{я}} = Z \cdot e$;
 - 4) розмір ядра. Якщо уявляти ядро приблизно у вигляді кульки, то її радіус $R_{\text{я}} = R_0 \cdot A^{1/3}$, де $R_0 = 1.23 \cdot 10^{-15}$ м;
 - 5) енергію зв'язку;
 - 6) питому активність
- та деякі інші властивості ядра.

Маса ядра менша, ніж маса нуклонів, що входять до його складу. Різниця цих мас відповідає енергія зв'язку ядра:

$$E_{\text{зв}} = (Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{я}})c^2. \quad (2.1)$$

У таблицях задані маси атомів, а не ядер, тому при розрахунку дефекту маси із табличних даних треба відняти масу електронів: $m_{\text{я}} = m_{\text{a}} - Zm_{\text{e}}$.

Таким чином дефект маси

$$\Delta m = Z(m_{\text{p}} + m_{\text{e}}) + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{a}} = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{a}}; \quad (2.2)$$

$m_{\text{H}} = 1.00728$ а.о.м.; $m_{\text{n}} = 1.00867$ а.о.м.

$$\Delta m = (Z \cdot 1.00783 + (A - Z) \cdot 1.00867 - m_{\text{a}}) \text{ а.о.м.}; \quad (2.3)$$

$$E_{\text{зв}} = 931 \Delta m \text{ МеВ.} \quad 1 \text{ а.о.м.} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Відомо десь біля 1700 різних ядер, з них стабільними є приблизно 300, інші є радіоактивними. Під радіоактивністю розуміють спонтанне (самочинне) перетворення ізотопів хімічних елементів, зумовлене розпадом їх атомних ядер.

Якщо N_0 – кількість радіоактивних ядер в момент $t = 0$, то к будь-якому моменту часу t внаслідок радіоактивного розпаду їх кількість зменшиться до N :

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2.4)$$

де λ – стала розпаду.

Період напіврозпаду (тобто час, за який розпадається половина початкової кількості ядер) пов'язаний з середньою тривалістю життя та сталою розпаду:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}. \quad (2.5)$$

Важливою характеристикою радіоактивного розпаду є активність – кількість ядер, що розпадаються за одиницю часу:

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (2.6)$$

Число радіоактивних ядер N , яке міститься у масі m , можна визначити за формулою

$$N = mN_A/\mu,$$

де N_A - число Авогадро; μ - молярна маса, яку легко оцінити для кожного ядра через масове число A : $\mu = A \times 10^{-3}$ кг/моль.

Тоді
$$A = \frac{m \cdot \ln 2 \cdot N_A}{\mu \cdot T_{1/2}}. \quad (2.7)$$

У Міжнародній системі одиниць (СІ) активність вимірюється у бекерелях. Позасистемною одиницею активності є кюрі: $1 \text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Бк}$.

Питома активність радіоактивного препарату визначається кількістю актів розпаду за одну секунду на одиницю маси чи об'єму радіоактивної речовини:

$a = A/m$, вимірюється у Бк/кг;

$q = A/V$, вимірюється у Бк/м³.

Активність одиниці маси є характеристикою нестабільних ядер:

$$a = \frac{\ln 2 \cdot N_A}{\mu \cdot T_{1/2}}. \quad (2.8)$$

В основному відбуваються такі види радіоактивного розпаду: α -розпад, 3 види β -розпаду. Розпад може супроводжуватися γ -випромінюванням.

Схема (закон зміщення) α -розпаду:



При α -розпаді A змінюється на 4, а z – на дві одиниці, тобто кількість послідовних α -перетворень ядра у будь-якому ланцюжку дорівнює

$$n_\alpha = \frac{A_X - A_Y}{4}. \quad (2.10)$$

У такому разі зміна зарядового числа $\Delta z = 2 \cdot n_\alpha$.

α -частинки є моно енергетичними, їх енергії пов'язані з періодом напіврозпаду формулою Гейгера – Неттола:

$$\lg T_{1/2} = C + \frac{D}{\sqrt{E}}, \quad (2.11)$$

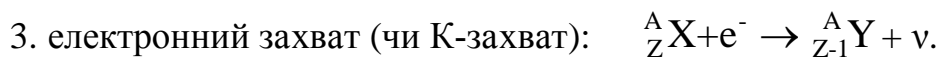
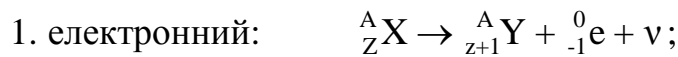
де E – енергія в МеВ, $T_{1/2}$ – в секундах.

Таблиця сталих C и D для різних Z приведена у таблиці.

Енергію α -частинки можна визначити через період напіврозпаду:

$$E = \left(\frac{D}{\lg T_{1/2} - C} \right)^2. \quad (2.12)$$

Схеми β -розпаду.



Джерелами іонізуючих частинок є ядерні реакції, при яких дуже суттєву роль вирають законі збереження. З закону збереження енергії можна визначити енергетичний вихід реакції Q .

Якщо ядерна реакція відбувається за схемою $a + {}^A_Z X \rightarrow b + {}^A_{Z+1} Y$, її енергетичний вихід дорівнює:

$$Q = (m_b + m_x - m_a - m_y)c^2 \quad (2.13)$$

Величина Q – це енергія, яка виділяється чи поглинається у реакції. При пружному розсіянні $Q = 0$.

Нерідко трапляється так, що радіоактивне ядро зі сталою розпаду λ_1 (будемо звати його материнським) після розпаду теж стає радіоактивним ядром (дочірнім) зі сталою розпаду λ_2 .

Якщо індекс 1 призначити материнським, а 2 – дочірнім ядрам, то кількості ядер сорту 1 та 2 після часу t :

$$N_1 = N_{01} e^{-\lambda_1 t}; \quad (2.14)$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}).$$

Якщо материнська речовина розпадається значно швидше дочірньої ($\lambda_1 \gg \lambda_2$), то N_2 спочатку зростає, а потім починає зменшуватися. У такому випадку

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1 (1 - e^{-\lambda_2 t}). \quad (2.15)$$

Приклади розв'язування типових задач

Приклад 2.1. Визначити, яка енергія в МеВ відповідає дефекту маси $\Delta m = 1 \text{ а.о.м.}$

Розв'язання

Енергія зв'язку пов'язана з дефектом маси формулою $E_{зв} = \Delta m \cdot c^2$.

По-перше виразимо усі величини у системі одиниць СІ: $1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, тоді $E_{\text{зв}} = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (2,998 \cdot 10^8)^2 \text{ м}^2/\text{с}^2 = 1,67 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$.
 $1 \text{ Дж} = (14,92 \cdot 10^{-11} / 1,602 \cdot 10^{-19}) \text{ еВ} = 9,31 \cdot 10^8 \text{ еВ} = 931 \text{ МеВ}$.

Таким чином, якщо дефект маси виражати в а.о.м., то енергію зв'язку легко отримати в МеВ, якщо помножити Δm (а.о.м.) на 931!

Приклад 2.2. Записати дефект маси та енергію зв'язку ядра у зручному для розрахунків вигляді.

Розв'язання

За означенням дефект маси дорівнює різниці між масою нуклонів, що входять до складу ядра, та масою ядра:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}$$

У таблицях приводяться маси атомів (m_a), часто виражених в атомних одиницях маси. Щоб знайти масу ядра, від неї треба відняти масу електронів, тобто $m_{\text{я}} = m_a - Zm_e$. Тоді дефект маси можна виразити у вигляді: $\Delta m = Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - m_a$.

Якщо всі маси виразити в а.о.м., то, користуючись тим, що 1 а.о.м. відповідає 931 МеВ (дивись попередню задачу), а також тим, що $m_p = 1,00728 \text{ а.о.м.}$;

$$m_n = 1,00867 \text{ а.о.м.};$$

$$m_e = 0,00055 \text{ а.о.м.};$$

$$m_p + m_e = 1,00783 \text{ а.о.м.},$$

для дефекту маси та енергії зв'язку можна записати зручні для розрахунків формули:

$$\Delta m = (Z \cdot 1,00783 + (A - Z) \cdot 1,00867 - m_a) \text{ а.о.м.};$$

$$E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot 931 \text{ МеВ}.$$

Тоді для розрахунку в останні формули треба підставити тільки зарядове та масове числа ядра і масу атома в а.о.м.

Приклад 2.3. Визначити дефект маси та через нього енергію зв'язку ядра ${}^7_3\text{Li}$.

Розв'язання

Дефект маси ядра – це різниця між сумою мас нуклонів та масою ядра, тобто $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}$.

У таблицях задані маси атомів, а не ядер, тому із табличних даних треба відняти масу електронів: $m_{\text{я}} = m_a - Zm_e$. Таким чином,

$$\begin{aligned} \Delta m &= Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - m_a = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_a = \\ &= (3 \cdot 1,00783 + 4 \cdot 1,00867 - 7,01601) \text{ а.о.м.} = 0,04216 \text{ а.о.м.} \end{aligned}$$

При цьому було враховано, що $m_p = 1,00728 \text{ а.о.м.}$ та $m_e = 0,00055 \text{ а.о.м.}$

Відповідно з законом пропорційності маси та енергії, якщо прийняти до уваги, що для них можна вводити однакові позасистемні одиниці ($1 \text{ а.о.м.} = 931 \text{ МеВ}$), енергія зв'язку дорівнює:

$$E = c^2 \Delta m = 0,0421 \cdot 931 \text{ МеВ} = 39,2 \text{ МеВ}.$$

Приклад 2.4. Визначити енергію зв'язку ізотопу $^{17}_8\text{O}$ через дефект маси та за формулою Вейцекера і порівняти результати між собою.

Розв'язання

Через дефект мас енергія зв'язку визначається за формулою: $E = \Delta m \cdot c^2$.
 $\Delta m = Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - m_a = Zm_H + (A - Z)m_n - m_a =$
 $= (8 \cdot 1,00783 + 9 \cdot 1,00867 - 16,99913) \text{ а.о.м.} = 0,1415 \text{ а.о.м.}$

Тут вже ураховано, що в таблицях задані маси атомів, а не ядер (див. задачу 2). Тоді енергія зв'язку:

$$E = 0,1415 \cdot 931 \text{ МеВ} = 132 \text{ МеВ.}$$

За формулою Вейцекера

$$E_{\text{св}} = C_{\text{об}}A - C_{\text{пов}}A^{2/3} - C_{\text{кул}}Z^2A^{-1/3} - C_{\text{сим}}(A - 2Z)^2A^{-1} + C_{\text{спар}}A^{-\varepsilon\delta}.$$

Коефіцієнти: $C_{\text{об}} = 15,75 \text{ МеВ}; C_{\text{пов.}} = 17,8 \text{ МеВ}; C_{\text{кул}} = 0,719 \text{ МеВ};$
 $C_{\text{сим}} = 23,7 \text{ МеВ}; C_{\text{спар}} = 34 \text{ МеВ}; \varepsilon = 3/4;$

$$\delta = \begin{cases} +1 & \text{для парно-парних ядер} \\ 0 & \text{для ядер з непарним } A \\ -1 & \text{для непарно-непарних ядер} \end{cases};$$

Для ядра $^{17}_8\text{O}$ $A = 17, Z = 8$, так що $\delta = 0$.

$$E_{\text{зв}} = (15,75 \cdot 17 - 17,8 \cdot 17^{0,667} - 0,719 \cdot 64/17^{0,333} - 23,7(17-16)^2/17) \text{ МеВ} = 132 \text{ МеВ.}$$

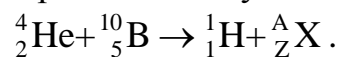
Таким чином, розрахунки обома способами дають однакові значення енергії зв'язку.

$$\text{Питома енергія зв'язку } \varepsilon = E_{\text{зв}}/A = 132 \text{ МеВ}/17 = 7,76 \text{ МеВ.}$$

Приклад 2.5. α -частинка зіткнулась з ядром бора $^{10}_5\text{B}$. Внаслідок такої ядерної реакції утворились два нових ядра. Одним з них є ядро гідрогену. Визначити друге ядро та енергетичний ефект реакції.

Розв'язання

Невідоме ядро позначимо символом ^A_ZX . Тоді ядерна реакція може бути представлена у вигляді



За законом збереження електричного та баріонного зарядів можна визначити невідоме ядро: $Z = 6, A = 13$.

Енергетичний вихід Q реакції

$$Q = 931(m_{\text{He}} + m_{\text{B}} - m_{\text{H}} - m_{\text{X}}).$$

$$Q = 931(4,00260 + 10,01294 - 1,00783 - 13,00335) \text{ МеВ} = 4,06 \text{ МеВ.}$$

Приклад 2.6. Визначити начальну активність A_0 радіоактивного препарату магнію $^{27}_{12}\text{Mg}$ масою $m = 0,2 \text{ мкг}$, а також його активність A через 6 годин.

$$m = 0,2 \text{ мкг} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ кг}$$

$$T_{1/2} = 10 \text{ хв.} = 600 \text{ с}$$

$$T = 6 \text{ год.} = 2.16 \cdot 10^4 \text{ с}$$

$$A_0 = ? \quad A = ?$$

Розв'язання

Активність A ізотопу характеризує швидкість розпаду: $A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$.

Для початкової активності $t = 0$, тобто $A_0 = \lambda N_0$.

$$\lambda = (\ln 2) / T_{1/2}.$$

Число радіоактивних ядер: $N = m N_A / \mu$, N_A - число Авогадро,

μ - молярна маса. В таблицях знаходимо період напіврозпаду та молярну масу. Таким чином отримуємо:

$$\text{начальна активність препарату } A_0 = \frac{m \cdot \ln 2 \cdot N_A}{\mu T_{1/2}};$$

$$\text{його активність через час } t: A = \frac{m \cdot \ln 2 \cdot N_A}{\mu T_{1/2}} \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right).$$

$$\mu = 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}; \quad N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

$$A_0 = \frac{2 \cdot 10^{-10} \cdot 0,693 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{27 \cdot 10^{-3} \cdot 600} = 5,13 \cdot 10^{12} \text{ Бк.}$$

$$A_0 = \frac{2 \cdot 10^{-10} \cdot 0,693 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{27 \cdot 10^{-3} \cdot 600} \exp(-0,693 \cdot 2,16 \cdot 10^4 / 600) = 81,3 \text{ Бк.}$$

Задачі для самостійного розв'язування

2.1. Знайти, яку частку нейтрального атома $^{12}_6\text{C}$ ($m_a = 1,9927 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$) складає маса його електронної оболонки?

2.2. Знайти число протонів та нейтронів, що складають ядра трьох ізотопів бора з масовими числами 9, 10, 11. Записати ці ядра.

2.3. Знайти число протонів та нейтронів, що складають ядра чотирьох ізотопів кисню з масовими числами 16, 17, 18 та 20. Записати ці ядра.

2.4. Знайти число протонів та нейтронів в атомах платини та урану.

2.5. Визначити енергії зв'язку ядер дейтерію та тритію через дефект маси та за формулою Вейцекера.

2.6. Визначити густину ядерної речовини.

2.7. Скільки атомів з 1 млн. атомів полонію ($^{210}_{84}\text{Po}$) розпадаються за добу?

2.8. Знайти масу радону ($^{222}_{86}\text{Rn}$), активність якого дорівнює 1 кюрі.

2.9. Знайти сталу розпаду радону, якщо відомо, що число атомів радону зменшується за добу на 18,2%.

2.10. Деякий радіоактивний препарат має сталу розпаду $\lambda = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ год.}^{-1}$, через який час відбудеться розпад 75% початкової кількості ядер?

2.11. Розрахуйте сталу розпаду, середній час життя та період напіврозпаду радіоактивного нукліда, активність якого зменшується в 1,07 разів за 100 діб.

- 2.12. Активність деякого радіоактивного ізотопу дорівнює 100Бк. Знайти його активність через час, який дорівнює половині від його періоду напіврозпаду.
- 2.13. Знайти питому активність ізотопу $^{238}_{92}\text{U}$.
- 2.14. Визначити, яка енергія зв'язку відповідає дефекту маси $\Delta m=3$ мг.
- 2.15. Визначити час, за який розпадається 1/3 початкової кількості ядер $^{225}_{29}\text{Ac}$.
- 2.16. Проаналізувати, які радіонукліди утворюються при β^- -, β^+ - та γ -розпаді радіонукліду $^{64}_{29}\text{Cu}$.
- 2.17. Активність 1г $^{226}_{88}\text{Ra}$ дорівнює 1Ки. Знайти період напіврозпаду цього ізотопу, порівняти з табличним значенням.
- 2.18. Природний уран є сумішшю трьох ізотопів $^{234}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$, $^{238}_{92}\text{U}$, з відповідними частками 0.006%, 0.71% та 99.28% . Визначити відсоткову долю радіоактивності, яку вносить кожний радіоізотоп у сумарну активність природного урану.
- 2.19. Активність 5г $^{226}_{88}\text{Ra}$ дорівнює 10Ки. Знайти період напіврозпаду цього ізотопу, порівняти з табличним значенням.
- 2.20. Визначити початкову активність препарату ^{210}Po , якщо за період напіврозпаду цей препарат виділив 2,2 кДж тепла (препарат випромінює α -частинки з кінетичною енергією 5,30МеВ).
- 2.21. Для деякого радіоактивного ізотопу стала розпаду $\lambda=1.44 \cdot 10^{-3}$ 1/год. Через який час розпадеться 75 % від початкової маси атомів?
- 2.22. Визначити енергію α -частинок, які виникають у процесі радіоактивного розпаду ядер $^{148}_{84}\text{Po}$.
- 2.23. Проаналізувати виконання закону збереження електронного та баріонного зарядів у розпаді:
 $n \rightarrow p+e+\tilde{\nu}_e$;
 $\mu^- \rightarrow e^-+v_e+v_\mu$.
- 2.24. Визначити через періоди напіврозпаду радія та урану, яке число атомів $^{238}_{92}\text{U}$ буде приходиться на один атом радія $^{226}_{88}\text{Ra}$ у природній урановій руді.
- 2.25. Свинець, що існує в урановій руді, є кінцевим продуктом розпаду уранового ряду, тому з відношення кількості урану в руді до кількості свинцю можна визначити вік руди. Визначити вік руди, якщо відомо, що на 1кг $^{238}_{92}\text{U}$ в цій руді приходиться 320г свинцю.
- 2.26. Для деякого радіоактивного ізотопу стала розпаду $\lambda=4 \cdot 10^{-12}$ 1/с. Через який час розпадеться 25 % від початкової маси атомів?

- 2.27. α -частинка зіткнулась з ядром бора $^{10}_5\text{B}$. Внаслідок такої ядерної реакції утворились два нових ядра. Одним з них є ядро гідрогену. Визначити друге ядро та енергетичний ефект реакції.
- 2.28. Визначити початкову активність A_0 радіоактивного препарату магнію масою $m = 0.2\text{мкг}$, а також його активність A через 6 годин.
- 2.29. Визначити активність радіоактивного ^{24}Na через добу, якщо маса препарату дорівнює 1мг.
- 2.30. Яке ядро утвориться після послідовних двох α -, β - та γ - розпадів?
- 2.31. Знайти енергію зв'язку ядер ^4_2He , ^3_2He .
- 2.32. У закритому сосуді знаходиться 1.5г радію. Яка кількість радону накопичиться у ньому за час, що дорівнює періоду напіврозпаду радону?
- 2.33. Деяка кількість радію знаходиться у закритому сосуді. Через який час кількість атомів радону в ньому буде відрізнятись на 10% від початкового?
- 2.34. Кінетична енергія α -частинки, що вилітає з ядра атома радію дорівнює 4.78MeV. Знайти: 1) швидкість α -частинки, 2) повну енергію, яка виділяється при вилітанні α -частинки.
- 2.35. Яку кількість тепла виділяє 1кг радону 1) за годину, 2) за середній час життя, якщо кінетична енергія α -частинки, що вилітає при α -розпаді ядра дорівнює 5.5MeV.
- 2.36. 1г урану $^{238}_{92}\text{U}$ у рівновазі з продуктами розпаду виділяє потужність 0.107мкВт. Знайти повну кількість тепла, що виділяє 1г урану за середній час свого життя.
- 2.37. Перевірте можливість β - розпаду для ядер $^{202}_{86}\text{Rn}$, $^{223}_{86}\text{Rn}$.
- 2.38. Чи можливий β - розпад для $^{208}_{82}\text{Pb}$?
- 2.39. Яке ядро утворюється після двох α - та двох β^- - розпадів $^{238}_{92}\text{U}$?
- 2.40. Яке ядро утворюється після двох α -розпадів та одного β^- -розпаду $^{233}_{92}\text{U}$?
- 2.41. Чи можливий α - розпад ядра $^{208}_{82}\text{Pb}$?
- 2.43. Знайдіть поріг ядерної реакції $^7_3\text{Li}(p,n)$.
- 2.44. Якщо бомбардувати бор тепловими нейтронами, іде реакція $^{10}_5\text{B}(n,\alpha)$. Знайти енергію, що виділяється при реакції.
- 2.45. Для попередньої задачі знайти швидкість та кінетичну енергію α - частинки, приймаючи ядро бора нерухомим, а також нехтуючи швидкостями нейтронів.
- 2.46. При бомбардуванні ^7_3Li протонами утворюються дві α - частинки. Енергія кожної з них у момент їх утворення дорівнює 9.15MeV. Чому дорівнює енергія протонів, якими відбувається бомбардування?

- 2.47. Знайти найменше значення енергії γ -кванта, якої вистачить для здійснення реакції ${}^2_1\text{H} + h\nu \rightarrow {}^1_1\text{H} + n$. Записати реакцію у скороченому вигляді.
- 2.48. Знайти найменше значення енергії γ -кванта, якої вистачить для здійснення реакції ${}^{24}_{12}\text{Mg}(\gamma, n)$. Знайти також довжину його хвилі.
- 2.49. Яку кількість енергії можна отримати від ділення 1г урану ${}^{235}_{92}\text{U}$, якщо при кожному акті ділення виділяється енергія 200MeV?
- 2.50. Яка кількість урану ${}^{235}_{92}\text{U}$ витрачається за добу на атомній станції потужністю 5000кВт, якщо при кожному акті ділення виділяється енергія 200MeV? Прийняти К.К.Д. рівним 17%.
- 2.51. Підчас вибуху водневої бомби відбувається ядерна реакція утворення гелію із дейтерію та тритію. 1) Написати ядерну реакцію; 2) знайти енергію, що виділяється.
- 2.52. Для попередньої задачі знайти, яка кількість енергії може бути отримана при утворенні 1г гелію?
- 2.53. Штучний ізотоп азоту ${}^{13}_7\text{N}$ утворюється при бомбардуванні вуглецю ${}^{12}_6\text{C}$ дейтронами. Написати рівняння ядерної реакції та знайти, яка кількість тепла поглинається у ній.
- 2.54. Для попередньої задачі знайти поріг реакції та сумарну кінетичну енергію продуктів реакції при пороговому значенні кінетичної енергії дейтрона. Ядра вуглецю прийняти нерухомими.
- 2.55. Визначити період напіврозпаду ядер, якщо із 100000 атомів радіоактивної речовини за 10с розпадаються 5 атомів.
- 2.56. За сталою розпаду ядра λ , визначити 1) ймовірність його розпаду за час від 0 до t ; 2) середній час його життя τ .
- 2.57. Скільки відсотків радіоактивних ядер кобальту з періодом напіврозпаду 71.3 діб розпадеться за місяць?
- 2.58. Скільки β -частинок випромінює за одну годину 1.0мкг Na-24, період напіврозпаду якого $T = 15$ год.?
- 2.59. При β -розпаді магнію в момент $t = 0$ було включено лічильник. До моменту часу $t_1 = 2,0$ с він зареєстрував N β -частинок, а до моменту $t_2 = 3t_1$ – у 2.66 разів більше. Знайти сталу розпаду.
- 2.60. Активність деякого радіоізоотопу зменшується у 2.5 разів за 7діб. Знайти період його напіврозпаду.
- 2.61. У початковий момент активність деякого радіонукліда дорівнювала 10,5Бк. Якою буде його активність після часу, що дорівнює половині його періоду напіврозпаду?
- 2.62. Знайти сталу розпаду радіоактивного кобальту, якщо його активність зменшилась на 4,0% за годину.

3. ВЗАЄМОДІЯ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З РЕЧОВИНОЮ

Основними загальними наслідками проходження іонізуючих частинок крізь речовину є іонізація та збудження атомів та молекул речовини. Але процеси іонізації по різному відбуваються і до різних наслідків приводять в залежності від того, з яким випромінюванням ми маємо справу. Тому треба окрема розглядати:

1. заряджені частинки: а) важкі, б) легкі;
2. γ –випромінювання;
3. нейтрони.

Процеси та наслідки проходження іонізуючого випромінювання крізь речовину пов'язані:

- 1) з властивостями частинок (заряд, маса, швидкість, енергія),
- 2) з властивостями речовини (густина чи кількість електронів в одиниці об'єму, атомний номер, молярна маса, середній потенціал іонізації);
- 3) сам процес характеризують величинами: лінійна втрата енергії dE/dx , питома втрата енергії $(dE/dx)/\rho$; пробіги та характерні довжини, іонізаційні здатності та т. ін.

Іонізаційна здатність чи питома іонізація (кількість іонних пар, що утворюються на одиницю довжини пробігу частинки) дорівнює:

$$i = \frac{dE/dx}{w}, \quad (3.1)$$

де w - енергія, що витрачається в середньому на утворення однієї пари іонів. Вона дорівнює приблизно $33eV$.

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

$$J = E/w \quad (3.2)$$

1а) Середня лінійна втрата енергії на іонізацію для важких заряджених частинок

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іон.}} = \frac{4\pi z^2 e^4 n}{v^2 m} \left(\ln \frac{2v^2 m}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right). \quad (3.3)$$

У нерелятивістському наближенні

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іон.}} = \frac{4\pi e^2}{m_0} \left(\frac{ze}{v}\right) \cdot n_e \cdot \ln \frac{2m_0 v^2}{I(Z)}, \quad (3.4)$$

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^3 речовини, I – середній іонізаційний потенціал атомів поглинач. Усі величини виражені в одиницях СГС_Е.

Лінійну втрату енергії також називають лінійною передачею енергії і часто позначають літерою L_{Δ} . Її можна виразити через енергію частинки E :

$$L_{\Delta} = \frac{2\pi \cdot e^4 z^2 M \cdot n_e}{E \cdot m_0} \ln \frac{4E \cdot m_0}{I(Z)M}, \quad (3.5)$$

де M – маса іонізуючої частинки.

Число електронів в одиниці об'єму можна виразити через густину ρ :

$$n_e = \frac{ZmN_A}{V\mu} = Z\rho N_A / \mu, \quad (3.6)$$

Середній потенціал іонізації атомів речовини визначається через порядковий номер Z

$$I(Z) = 13.5 \cdot Z \text{ eV}. \quad (3.7)$$

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

$$\ln I = \frac{\sum_i N_i Z_i \ln I_i}{\sum N_i Z_i}, \quad (3.8)$$

сума береться по всім атомам у молекулі, N_i – число атомів i -го сорту у молекулі.

Формулу (3.3) можна записати у вигляді, що дуже скорочує розрахунки:

$$L = \frac{Bn}{E} \ln \frac{4Em_0}{MI}, \quad (3.9)$$

де $B = \frac{2\pi z^2 e^4 M}{m_0 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}}$.

Заряд та густину треба брати в одиницях СГСЕ, а енергію у знаменнику в МеВ, тоді лінійна втрата енергії буде вимірюватися 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 із системними:

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

Таким чином, можна легко розрахувати B , якщо відомо, про які іонізуючі частинки іде мова.

Наприклад:

$$\begin{aligned} \text{для протонів} (z = 1; M_p/m = 1,84 \cdot 10^3), \quad B_p &= 3,84 \cdot 10^{-28}; \\ \text{для дейтронів} (z = 1; M_d/m = 2 \cdot 1,84 \cdot 10^3), \quad B_d &= 2B_p = 7,68 \cdot 10^{-28}; \\ \text{для } \alpha\text{-частинок} (z = 2; M_\alpha/m = 4 \cdot 1,84 \cdot 10^3) \quad B_\alpha &= 16B_p = 6,13 \cdot 10^{-27}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Використання цих коефіцієнтів значно скоротить розрахунки втрат енергії.

16) Точний розрахунок лінійних іонізаційних втрат енергії електронами (β^- - частинками) при зіткненнях з електронами атомів речовини був проведений Бете:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іон.}} = \frac{\pi e^4 n}{v^2 m} \left(\ln \frac{v^2 m E}{2I^2 (1 - \beta^2)} - \ln 2(2\sqrt{(1 - \beta^2)} - 1 + \beta^2) + 1 - \beta^2 \right), \quad (3.11)$$

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

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іон.}} = \frac{4\pi \cdot e^4 \cdot n}{mv^2} \ln \frac{mv^2}{2 \cdot I}. \quad (3.12)$$

Їх можна виразити через енергію електрона E

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іон.}} = \frac{2\pi e^4 n}{E} \ln \frac{E}{I}. \quad (3.13)$$

Всі заряджені частинки, що гальмуються, стають джерелами електромагнітного випромінювання. Втрати на це випромінювання у речовині прийнято називати радіаційними.

Радіаційні лінійні втрати енергії можна записати у вигляді

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад.}} = \frac{E}{l_0}. \quad (3.14)$$

де l_0 – радіаційна довжина.

Розв'язавши це рівняння відносно енергії, можна отримати

$$E = E_0 \exp(-x/l_0). \quad (3.15)$$

З цього виразу зрозуміло, який зміст має радіаційна довжина – це відстань, на якій енергія іонізуючої частинки в речовині зменшується в « e » разів, тобто, майже втричі.

$$l_0 = \frac{4,31 \cdot 10^{26}}{n_e \cdot Z^2 \cdot \ln(183/Z^{1/3})} \text{ (см)}. \quad (3.16)$$

Енергія, при якій радіаційні та іонізаційні втрати енергії є однаковими, зветься критичною и визначається за формулою

$$E_c = \frac{800}{Z} \text{ (MeV)}, \quad (3.17)$$

де Z – порядковий номер атомів речовини.

Ослаблення потоку β^- частинок з суцільним спектром відбувається за експоненціальним законом

$$J = J_0 e^{-\mu x}, \quad (3.18)$$

де μ – масовий коефіцієнт послаблення в одиницях $\text{см}^2/\text{г}$; x – товщина захисту в $\text{г}/\text{см}^2$.

Масовий коефіцієнт в алюмінії визначається емпіричною формулою

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

2) Закон ослаблення вузького пучка моноенергетичних γ - квантів має вигляд

$$J = J_0 e^{-\mu x}, \quad \mu = \tau + \sigma, \quad (3.19)$$

де μ , τ , σ – лінійні коефіцієнти послаблення, поглинання та розсіювання, J_0 – інтенсивність випромінювання.

Лінійні втрати енергії часто вимірюють в MeV/мкм.

Приведемо зв'язок між різноманітними одиницями енергії:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ ерг};$$

$$1 \text{ Дж} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV};$$

$$1 \text{ ерг} = 6,25 \cdot 10^{11} \text{ eV} = 6,25 \cdot 10^5 \text{ MeV};$$

$$1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-6} \text{ ерг}.$$

3) Ослаблення потоку нейтронів при проходженні крізь речовину відбувається за законом

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\sigma \cdot n \cdot x}, \quad (3.20)$$

де σ - переріз поглинання, який залежить від енергії нейтронів та від речовини; n – кількість атомів речовини в одиниці об'єму.

$$n = \frac{N_A \cdot \rho}{A}, \quad (3.21)$$

де N_A – число Авогадро, ρ - густина речовини, A – молярна маса.

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 – пробіг частинки в одиниці маси. Він вимірюється в грамах на квадратний сантиметр і пов'язаний з лінійним співвідношенням:

$$R_m = \rho R.$$

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

Наприклад, пробіг α - частинки в повітрі можна розрахувати за емпіричною наближеною формулою

$$R_{\alpha}^{\text{повітр.}} = 0.31 \cdot E^{3/2} (\text{см}). \quad (3.22)$$

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

$$R_m = 0.56 R^{\text{возд.}} A^{1/3} \quad (\text{в одиницях мг/см}^2). \quad (3.23)$$

Для протонів:

$$R_p = (R_\alpha (4E) - 0.2) \text{ см} \quad (E > 0,5 \text{ Мев}). \quad (3.24)$$

Для електронів (тобто β -частинок) розглядають три величини: максимальний пробіг, середній пробіг та радіаційну довжину.

Максимальним (чи екстрапольованим) пробігом зветься мінімальна товщина шару речовини, в якому поглинаються всі електрони.

Максимальний масовий пробіг β -частинок в алюмінії можна розрахувати за формулами

$$R_m = \begin{cases} 0.407 E_\beta^{1.38}, & (0.15 \text{ Мев} < E < 0.8 \text{ Мев}) \\ 0.542 E_\beta - 0.133, & (0.8 \text{ Мев} < E < 3 \text{ Мев}) \end{cases}, \quad (3.25)$$

де E_β - максимальна енергія β -спектру виражена в МеВ.

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

$$R_x = R_{Al} (Z/A)_{Al} / (Z/A)_x \quad (\text{г/см}^2). \quad (3.26)$$

Пробіг моноенетичних β -частинок у будь-якій речовині пов'язаний з пробігом у повітрі через густину повітря та речовини наближеним виразом

$$R_x / R_{\text{пов.}} = \rho_x / \rho_{\text{пов.}} \cdot R_{\text{пов.}} = 400 E_\beta, \text{ см.} \quad (3.27)$$

Якщо потік чи інтенсивність іонізуючих частинок зменшується по експоненціальному закону, то у якості характеристики можна ввести довжину k -кратного послаблення, тобто довжину l_k , на якій потік частинок зменшується в k разів. Ця величина пов'язана з коефіцієнтом поглинання співвідношенням:

$$l_k = \frac{\ln k}{\mu} \quad (3.28)$$

Шар половинного послаблення β -частинок в алюмінії

$$\Delta_{1/2} = 0.032 E_\beta^{1.33}, \text{ г/см}^2. \quad (3.29)$$

Лінійні втрати енергії часто вимірюють в МеВ/мкм.

Приведемо зв'язок між різноманітними одиницями енергії:

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

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

$$1 \text{ ерг} = 10^{-7} \text{ Дж} = 6.25 \cdot 10^{11} \text{ еВ} = 6.25 \cdot 10^5 \text{ МеВ.}$$

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

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

Приклади розв'язування типових задач

Приклад 3.1. Визначити довжину пробігу α -частинок, які випромінюються ${}^{236}_{94}\text{Pu}$, у повітрі при нормальних умовах.

α - частинка

$$Z = 94$$

$$P = 10^5 \text{ Па}$$

$$T = 273^\circ\text{К}$$

$$R = ?$$

Розв'язання

Для розв'язування задачі можна скористуватися емпіричною формулою для середньої довжини пробігу α - частинки з кінетичною енергією E (в МеВ) у повітрі при нормальних умовах $R_\alpha = 0.31 E^{3/2}$ см ($4\text{МеВ} < E < 7\text{МеВ}$).

Для визначення енергії альфа-частинки, що випромінюється ${}^{236}_{94}\text{Pu}$, скористуємось формулою Гейгера - Неттола, яка пов'язує енергію частинки з періодом напіврозпаду $T_{1/2}$:

$$E = \left(\frac{D}{\lg T_{1/2} - C} \right)^2.$$

$$T_{1/2} = 2,7 \text{ років} = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} = 0.851 \cdot 10^9 \text{ с}, \lg(0.853 \cdot 10^9) = 8.26, C = -53,35, D = 147,4.$$

Після розрахунку маємо $E = (147 / (8,26 + 53,5))^2 = 5,62 \text{ МеВ}$.

Середня довжина пробігу частинки з такою енергією:

$$R = 0.31 \cdot 5,62^{3/2} \text{ см} = 4,13 \text{ см}.$$

Таким чином, довжина пробігу α -частинки, що випромінюється ${}^{236}_{94}\text{Pu}$ у повітрі при нормальних умовах, дорівнює 4,13 см.

Приклад 3.2. Знайти іонізаційні втрати енергії протона з кінетичною енергією 4.0 МеВ на одиницю шляху в азоті при нормальних умовах.

$$Z = 7,$$

$$z = 1$$

$$E = 4 \text{ МеВ}$$

$$\mu = 28 \text{ г/моль}$$

$$T = 273^\circ\text{К}$$

$$P = 10^5 \text{ Па}$$

$$(dE/dx)_{\text{іон.}} = ?$$

Розв'язання

Оскільки кінетична енергія набагато менша, ніж енергія спокою протона, для визначення лінійної втрати енергії можна скористатися формулою для нерелятивістського випадку, тобто

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іон}}^{\alpha} = \frac{2\pi e^4 M n_e}{m_0 E} \ln \frac{4m_0 E}{MI(Z)}, \quad (1)$$

де M – маса протона.

Число молекул в одиниці об'єму знайдемо з рівняння стану ідеального газу: $P = nkT$.

Звідси $n = P/kT = 10^5 / (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 273) \text{ м}^{-3} = 2,65 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а число електронів в 1 см^3 дорівнює $n_e = 14 \cdot 2,65 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} = 3,72 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Зверніть увагу, що в останньому виразі використаний множник дорівнює $2Z=14$ (а не Z), бо знайдене значення n – це число молекул, а кількість атомів азоту удвічі більша.

Середній потенціал іонізації атомів речовини визначається виразом

$$I(Z) = 13,5 \cdot Z \text{ eV} = 13,5 \cdot 7 \text{ eV} = 94,5 \text{ eV}.$$

Щоб скористатися формулою (1), зауважимо, що відношення мас протона та електрона $M/m_0 = 1860$; втрати енергії вимірюються в $\text{MeV}/\text{см}$, а заряд електрона $e = 4,80 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЕ}_q$. Таким чином:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{іон}} &= \frac{6,28 \cdot 4,80^4 \cdot 10^{-40} \cdot 1,83 \cdot 10^3 \cdot 3,72 \cdot 10^{20} \cdot 6,25 \cdot 10^5}{4} \ln \frac{4 \cdot 4 \cdot 10^6}{1,86 \cdot 10^3 \cdot 13,5 \cdot 7} = \\ &= \frac{3,83 \cdot 10^{-28} \cdot 3,72 \cdot 10^{20}}{4} \cdot 4,52 = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ ерг}/\text{см} = 0,1 \text{ MeV}/\text{см}. \end{aligned}$$

Приклад 3.3. Яка доля γ -випромінювання з енергією $6,0 \text{ MeV}$ пройде через екран зі свинцю товщиною 1 см , якщо $\mu = 0,50 \text{ см}^{-1}$. Пучок γ -випромінювання вузький.

$$E = 6,0 \text{ MeV}$$

$$d = 1 \text{ см}$$

$$\mu = 0,50 \text{ см}^{-1}$$

$$I/I_0 = ?$$

Розв'язання

За формулою (3.18) $I = I_0 \exp(-\mu d)$ отримаємо необхідну долю:

$$I/I_0 = \exp(-\mu d) = \exp(-0,5 \cdot 1) = 0,6.$$

Тобто через екран пройде 60% γ -випромінювання.

Приклад 3.4. У скільки разів пробіг у повітрі α -частинок, які випромінюються ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, більше пробігу α -частинок від ${}_{92}^{238}\text{U}$.

Розв'язання

У таблиці знайдемо періоди напіврозпадів ядер:

$$T_{1/2}(\text{Pu}) = 2 \cdot 10^4 \text{ років} = 2 \cdot 10^4 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ сек.} = 6,31 \cdot 10^{10} \text{ сек.}$$

$$T_{1/2}(\text{U}) = 4,5 \cdot 10^9 \text{ років} = 1,42 \cdot 10^{16} \text{ сек.}$$

За формулою Гейгера - Неттола:

$$E = \left(\frac{D}{\lg T_{1/2} - C} \right)^2$$

визначаємо енергії випромінюваних α -частинок:

$$E_{\alpha}(\text{Pu}) = 5,15 \text{ MeV};$$

$$E_{\alpha}(\text{U}) = 4,18 \text{ MeV.}$$

За формулою для пробігів α -частинок у повітрі:

$$R_{\alpha}(\text{Pu}) = 0,31 \sqrt{E_{\alpha}^3} = 0,31 \sqrt{5,15^3} \approx 3,6 \text{ см.}$$

$$R_{\alpha}(\text{U}) = 0,31 \sqrt{4,18^3} = 0,31 \cdot 8,55 = 2,6 \text{ см.}$$

Звідси

$$R(\text{Pu})/R(\text{U}) = 3,6/2,6 = 1,4 \text{ разів.}$$

Приклад 3.5. Знайти відношення лінійних іонізаційних втрат енергії α -частинки та протона з однаковими кінетичними енергіями 5 MeV в азоті.

$$M_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$M_{\alpha} = 4 M_p$$

$$Z = 7$$

$$E = 5 \text{ MeV} = 5 \cdot 10^6 \text{ eV.}$$

$$L_{\alpha}/L_p = ?$$

Розв'язання

Відношення лінійних втрат можна знайти за формулою (3.9). Ураховуючи що енергії у частинок однакові, отримаємо:

$$\frac{L_{\alpha}}{L_p} = \frac{B_{\alpha} \ln \frac{2Em}{4M_p I}}{B_p \ln \frac{2Em}{4M_{\alpha} I}} = \frac{16 \ln \frac{5 \cdot 10^6}{2 \cdot 1840 \cdot 94,5}}{\ln \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^6}{1840 \cdot 94,5}} = 10,5.$$

Таким чином, при такій енергії перевищують іонізаційні втрати α -частинки.

Зверніть увагу, що при розрахунку було використане відношення маси протона до маси електрона $M_p/m_e = 1840$.

Потенціал іонізації азоту знайдений за формулою (3.7):

$$I(Z) = 13,5 \cdot Z \text{ eV} = 13,5 \cdot 7 \text{ eV.} = 94,5 \text{ eV.}$$

Під знаком логарифму стоїть відношення енергетичних величин E та I , обидві були визначені в eV.

Приклад 3.6. Знайти іонізаційні втрати для дейтрона з енергією 1MeV у повітрі при нормальних умовах.

$$E = 1\text{MeV.}$$

$$Z = 1$$

$$T = 273^0\text{K}$$

$$P = 10^5 \text{ Па}$$

$$dE/dx = ?$$

Розв'язання

Іонізаційні втрати енергії для дейтрона визначаються за формулою: $dE/dx = (7.68 \cdot 10^{-28} n/E) \cdot \ln(E/1.84 \cdot 10^3 I)$. Кількість електронів в одному сантиметрі $n = P \cdot 2Z/kT$, де беремо $Z = 7$, оскільки у повітрі найбільше молекул азоту N_2 . Після розрахунку $n = 3.75 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3} = 3.75 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Тоді для іонізаційних втрат $dE/dx = 1.32 \cdot 10^{-7} \text{ ерг/см} = 0.824 \text{ MeV/см}$.

Приклад 3.7. Знайти густину потоку нейтронів, що був послаблений залізом завтовшки 0,05м, якщо початкова густина потоку $\Phi_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ нейтр./(см}^2 \cdot \text{с)}$. Ефективний переріз процесу $\sigma = 2.3 \text{ барн}$.

$$d = 0,05\text{м} = 5\text{см}$$

$$\Phi_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ нейтр./(см}^2 \cdot \text{с)}$$

$$\sigma = 2.3 \text{ барн}$$

$$\Phi = ?$$

Розв'язання

Густина потоку нейтронів зменшується за законом

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu x}.$$

Коефіцієнт поглинання μ дорівнює:

$$\mu = \sigma \cdot n = \frac{\sigma \cdot N_A \cdot \rho}{A} = \frac{2,3 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 7,8\text{г} / \text{см}^3}{59\text{г} / \text{моль}} = 0,2 \text{ см}^{-1}.$$

Густина послабленого потоку

$$\Phi = 5 \cdot 10^4 \cdot \exp(-0,2 \text{ см}^{-1} \cdot 5\text{см}) \text{ (нейтр./(см}^2 \cdot \text{с))};$$

$$\Phi = 1,8 \cdot 10^4 \text{ нейтр./(см}^2 \cdot \text{с)}$$

Задачі для самостійного розв'язування

3.1. Визначити іонізаційні втрати енергії дейтрона з кінетичною енергією 8.5MeV у повітрі при нормальних умовах.

3.2. Визначити відношення іонізаційних втрат енергії:

а) α - частинки та протона з кінетичними енергіями 5.0MeV у повітрі;

б) α - частинки з кінетичною енергією 10.0MeV у міді та алюмінії.

3.3. Знайти за допомогою емпіричних формул число пар іонів, які утворює α - частинка з початковою кінетичною енергією 5.5MeV на першому сантиметрі свого шляху у повітрі.

- 3.4. Визначити відношення іонізаційних втрат енергії α - частинки та протона, що рухаються зі швидкістю $5 \cdot 10^7$ м/с повітрі.
- 3.5. У скільки разів радіаційні втрати енергії у свинці більші, ніж в алюмінії: а) при однакових енергіях;
б) при однакових швидкостях.
- 3.6. Визначити лінійні втрати енергії протона з кінетичною енергією 0,8MeV у алюмінії.
- 3.7. Оцінити кінетичну енергію електронів, при якій радіаційні витрати в алюмінії дорівнюють іонізаційним.
- 3.8. Визначити число пар іонів, яку утворює протон з початковою кінетичною енергією 2,5MeV на 1см шляху.
- 3.9. Визначити іонізаційні втрати енергії дейтрона з кінетичною енергією 4,0MeV на одиницю шляху в азоті при нормальних умовах.
- 3.10. Визначити радіаційні втрати енергії електрона з кінетичною енергією 5MeV на одиницю шляху в алюмінії.
- 3.11. Визначити довжину пробігу α - частинок у свинцю, якщо їх енергія дорівнює 1MeV.
- 3.12. Визначити середній пробіг α - частинки у свинці, якщо її енергія відповідає пробігу 1мкм в алюмінії.
- 3.13. Знайти кінетичну енергію α - частинки, середній пробіг якої у залізі дорівнює 11,0мкм.
- 3.14. Визначити довжину пробігу α - частинки з енергією 1,2MeV у воді.
- 3.15. Визначити пробіг протону у свинцю, якщо його початкова кінетична енергія 1MeV.
- 3.16. Визначити радіаційну довжину електрона з енергією 0,8MeV у повітрі при нормальних умовах.
- 3.17. Знайти довжину пробігу α - частинки з енергією 5MeV у воді.
- 3.18. Скільки іонізацій викликає α - частинка з енергією 3MeV у повітрі на 1см пробігу?
- 3.19. Визначити довжину пробігу α - частинки з енергією 1,0MeV у повітрі та свинці.
- 3.20. Визначити кінетичну енергію α -частинок, якщо у свинцю їх пробіг дорівнює 10мкм.
- 3.21. Оцінити кінетичну енергію електронів, при якій радіаційні та іонізаційні втрати енергії однакові:
а) в повітрі при нормальних умовах;
б) у воді;
в) в алюмінії;
г) у свинці.
- 3.22. Визначити потенціал іонізації для алюмінію.
- 3.23. Визначити іонізаційні втрати енергії електронів на 1см шляху у алюмінії, якщо їх енергія дорівнює 0,5MeV.

- 3.24. Визначити лінійну втрату енергії для електронів з енергією 1) 0,1 MeV; 2) 10 MeV, що поглинаються у повітрі.
- 3.25. Визначити енергію α -частинок, що випромінюються ядрами ${}^{236}_{94}\text{Pu}$.
- 3.26. Визначити кількість електронів у 1 см^3 води.
- 3.27. Дати оцінку кінетичної енергії електронів, при якій у свинцю іонізаційні та радіаційні втрати є однаковими.
- 3.28. Визначити іонізаційну лінійну втрату енергії α -частинки у повітрі при нормальних умовах, якщо її енергія дорівнює 10 MeV.
- 3.29. Знайти товщину шару половинного поглинення β -частинок у
- повітрі;
 - алюмінії;
 - свинці;
 - воді.
- 3.30. Визначити радіаційну довжину електрона з енергією 0,8 MeV в алюмінії.
- 3.31. Електрони з енергією 1 MeV та γ -кванти з такою ж енергією падають на поверхню алюмінію. Знайти та порівняти їх пробіги.
- 3.32. Знайти кінетичну енергію електронів, при якій у свинцю іонізаційні та радіаційні втрати є однаковими.
- 3.33. Визначити довжину пробігу α -частинки з енергією 1,2 MeV у сріблі.
- 3.34. Визначити іонізаційну лінійну втрату енергії α -частинки у повітрі при нормальних умовах, якщо їх енергія дорівнює 10 MeV.
- 3.35. Визначити іонізаційний потенціал та число електронів у 1 см^3 міді.
- 3.36. Визначити кінетичну енергію електронів, при якій радіаційні втрати енергії складають $1/4$ усіх втрат
- у свинці;
 - у воді;
 - у повітрі.
- 3.37. Визначити енергію α -частинок, що виникають у процесі радіоактивного розпаду ядер ${}^{148}_{84}\text{Po}$.
- 3.38. Визначити довжину пробігу α -частинок, якщо їх енергія дорівнює 1 MeV
- у воді;
 - в алюмінії;
 - у свинці;
 - у повітрі при нормальних умовах.
- 3.39. Знайти радіаційну довжину для електрона з енергією 0,5 MeV
- в алюмінії;
 - у воді.
- 3.40. Визначити радіаційну довжину електрона з енергією 0,8 MeV у повітрі.

- 3.41. Визначити пробіг протону, якщо його початкова кінетична енергія 1MeV:
- у воді;
 - в алюмінії.
- 3.42. Визначити пробіг дейтрона, якщо його початкова кінетична енергія 5MeV:
- у свинці;
 - у повітрі при нормальних умовах
- 3.43. Визначити кінетичну енергію α -частинок, якщо у свинцю їх пробіг дорівнює 10мкм.
- 3.44. Визначити потенціал іонізації для алюмінію.
- 3.45. Знайти довжину пробігу α -частинки з енергією 0,8MeV в алюмінії.
- 3.46. Визначити довжину пробігу α -частинки з енергією 21,0keV у повітрі
- 3.47. Визначити іонізаційні втрати енергії дейтрона з кінетичною енергією 4,0MeV на одиницю шляху в азоті при нормальних умовах.
- 3.48. При проходженні шару деякої речовини завтовшки 0.40см енергія швидких електронів зменшилась у середньому на 25%. Знайти радіаційну довжину електрона, якщо відомо, що втрати енергії електрона при цьому в основному радіаційні.
- 3.49. Визначити товщину шару половинного ослаблення пучка рентгенівських променів з довжиною хвилі 6,2нм у свинцю.
- 3.50. Оцінити початкову енергію електронів, якщо після проходження свинцевої пластинки товщиною 5.0мм енергія електронів у середньому дорівнює 42MeV.
- 3.51. Якої товщини повинна бути пластинка, яка послаблює узький пучок рентгенівського випромінювання з енергією 200keV так саме, як свинцева пластинка товщиною 1.0мм?
- 3.52. Моноенергетичний пучок γ -квантів при проходженні алюмінієвої пластинки товщиною 2.9см ослаблюється у 2,6раза. Знайти коефіцієнт поглинання.
- 3.53. Вузький пучок γ -квантів, що має в однаковій кількості кванти з енергіями 0,40MeV та 0,60MeV, падає нормально на свинцеву пластинку товщиною 1.0см. Знайти відношення інтенсивності обох компонентів після проходження цієї пластинки.
- 3.54. Визначити середню довжину вільного пробігу γ -квантів у середовищі, шар половинного послаблення якого дорівнює 4.50см.
- 3.55. Пучок електронів з $E = 0,50\text{MeV}$ падає нормально на алюмінієву фольгу товщиною 50 мг/см². Знайти за допомогою емпіричних формул середній пробіг електронів, що вийшли з фольги, у повітрі.
- 3.56. Визначити радіаційні довжини та критичні енергії для:
- повітря при нормальних умовах;
 - алюмінію.

- 3.57. Якою товщини повинна бути кадмієва пластинка, яка потік теплових нейтронів послаблює у 100 разів.
- 3.58. У скільки разів послабиться потік теплових нейтронів при проходженні шару важкої води товщиною 1.0см.
- 3.59. Визначити радіаційні довжини та критичні енергії для:
- в) міді;
 - г) свинцю;
 - д) води.
- 3.60. Визначити іонізаційну лінійну втрату енергії протона у свинці, якщо
- а) його швидкість дорівнює $5.0 \cdot 10^5$ м/с;
 - б) він має енергію 8.0MeV.
- 3.61. Знайти товщину шару половинного послаблення для заліза в умовах попередньої задачі.
- 3.62. Скільки іонізацій викликає α - частинка з енергією 3MeV у повітрі на 1см пробігу?
- 3.63. Скільки шарів половинного послаблення необхідно для зменшення інтенсивності γ -випромінювання у 80 разів?
- 3.64. Прискорювач дає пучок протонів з кінетичною енергією 100 MeV. Знайти товщину поглинача 1) з вуглецю, 2) зі свинцю, який у двічі зменшить цю енергію.
- 3.65. Знайдіть та порівняйте лінійні втрати енергії протонів та α -частинок з енергією 20MeV.
- 3.66. Радіоактивне джерело випромінює γ -промені з енергією 100MeV. Інтенсивність цього променя повинна бути знижена у 10^4 разів. Якою повинна бути товщина мідного контейнера?
- 3.67. Визначити довжину пробігу протона з енергією 3MeV у воді.
- 3.68. Визначити пробіг та лінійні втрати α - частинки з енергією 9MeV у повітрі та воді.
- 3.69. Порівняти пробіги α - частинок та протонів з енергією 10MeV в алюмінію.
- 3.70. Для речовин попередньої задачі знайти масові коефіцієнт послаблення.
- 3.71. Знайти для алюмінію товщину шару половинного послаблення для рентгенівського променя з деякою довжиною хвилі, якщо відомо, що масовий коефіцієнт поглинання алюмінію для цієї довжини хвилі дорівнює $5,3 \text{ м}^2/\text{кг}$.
- 3.72. У скільки разів зменшиться інтенсивність рентгенівського променя з довжиною хвилі 20пм після проходження шару заліза товщиною 0.15мм? масовий коефіцієнт поглинання алюмінію для цієї довжини хвилі дорівнює $5.3 \text{ м}^2/\text{кг}$. Масовий коефіцієнт поглинання заліза для цієї довжини хвилі дорівнює $1,1 \text{ м}^2/\text{кг}$.

4. ДОЗИ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Одним з основних понять в радіаційних дослідженнях, включаючи радіаційний контроль, радіаційну біологію, радіаційну екологію, радіаційну гігієну, радіаційну медицину, є поняття **доз випромінювання**. Взагалі в широкому понятті цього слова доза – це певна точно відміряна кількість чого-небудь (походить від грец. *dosis* – порція, прийом).

У радіаційних дослідженнях розрізняють 4 основні види доз іонізуючого випромінювання. Це:

- 1) експозиційна доза;
- 2) поглинена доза;
- 3) еквівалентна доза;
- 4) ефективна доза.

Розглянемо кожен з цих доз.

1) Доза експозиційна (X) іонізуючого випромінювання (Д.е.і.в.) – кількісна характеристика поля γ - і рентгенівського випромінювань, заснована на їх іонізуючій дії в повітрі. Є відношенням сумарного заряду іонів одного знаку dQ , що утворюються під дією електромагнітного іонізуючого випромінювання в елементарному об'ємі повітря, до маси повітря dm в цьому об'ємі:

$$X = \frac{dQ}{dm}.$$

Позасистемна одиниця Д.е. - рентген (Р).

За 1 Р приймають таку кількість електромагнітного випромінювання, яка створює в 1 см³ атмосферного повітря (тобто в 0,001293г повітря при 0°C і тиску 760мм рт. ст.) $2,08 \cdot 10^9$ пар іонів.

Одиницею Д.е.і.в. в системі СІ є кулон на кілограм (Кл/кг).

Співвідношення між цими одиницями наступне: $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

Одиниця експозиційної дози в системі СІ кулон на кілограм виявилася дуже незручною для практичного застосування, і тому на практиці широко використовувалася і продовжує використовуватися позасистемна одиниця – рентген.

Використання експозиційної дози планувалося припинити з 1 січня 1990р. Проте досі експозиційна доза продовжує широко використовуватися, хоча і відбувається поступовий перехід до використання інших видів доз – в першу чергу в різних нормативних документах. У науковій і науково-популярній літературі експозиційна доза і її одиниця рентген продовжують використовуватися досить часто.

Нині основною (фундаментальною, оскільки з неї шляхом введення різних коефіцієнтів виводяться поняття двох інших доз іонізуючого випромінювання) дозиметричною величиною, що визначає міру радіаційної дії на речовину, являється поглинена доза іонізуючого випромінювання.

2) Доза поглинена (**D**) іонізуючого випромінювання (Д.п.і.в.) – відношення середньої енергії \overline{de} , переданої іонізуючим випромінюванням (будь-якого виду) речовині, що знаходиться в елементарному об'ємі, до маси dm речовини в цьому об'ємі:

$$D = \frac{\overline{de}}{dm}.$$

Є основною дозиметричною величиною, що визначає міру радіаційної дії.

Позасистемна одиниця Д.п.і.в. – рад (від англ. rad – radiation absorbed dose): 1 рад = 100 ерг/г.

Одиниця Д.п.і.в. в системі СІ – джоуль, що ділиться на кілограм (Дж/кг), і має спеціальну назву – грей (Гр) : 1 Гр = 1 Дж/кг

Співвідношення між цими одиницями наступне: 1 Гр = 100 рад.

Існує ще також таке поняття як:

Поглинена доза іонізуючого випромінювання в органі або тканині (D_T) - середня поглинена доза в певному органі або тканині людського тіла (т.з. доза в органі або тканині) :

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D \cdot dm,$$

де m_T - маса органу або тканини, D - поглинена доза в елементарній масі dm органу або тканини.

Чи існує яке-небудь співвідношення між поглиненою дозою і експозиційною дозою? Так, таке співвідношення існує, його можна розрахувати, виходячи з того, що на утворення однієї пари іонів в повітрі витрачається енергія, яка дорівнює в середньому 34 еВ (1 еВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

Отже, при експозиційній дозі 1 Р, при якій утворюється $2,08 \cdot 10^9$ пар іонів в 1 см³ повітря, витрачається енергія, яка дорівнює $2,08 \cdot 10^9 \times 34 \text{ еВ} = 70,7 \cdot 10^9 \text{ еВ} = 70,7 \cdot 10^9 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,13 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$.

На 1 грам повітря витрата енергії складе: $1,13 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} / 0,001293 \text{ г} = 0,87 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/г} = 0,87 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг}$. Ця величина – так званий енергетичний еквівалент рентгена в повітрі.

За визначенням 1 Гр = 1 Дж/кг

Звідси випливає, що експозиційній дозі в 1 Р відповідає поглинена доза в повітрі 0,87 сГр (чи рад).

Тому перехід від експозиційної дози, вираженої в рентгенах, до поглиненої дози в повітрі, вираженою в радах (чи сГр), відносно простий: $D = fX$, де f - перевідний коефіцієнт, який дорівнює 0,87 сГр/Р (чи рад/Р) для повітря.

Перехід від експозиційної дози (в повітрі, оскільки за визначенням поняття експозиційної дози відноситься до повітря) до поглиненої дози у воді або біологічній тканині здійснюється по тій самій формулі, тільки

перевідний коефіцієнт f в цьому випадку береться рівним в середньому 0,93.

3) Еквівалентна доза.

Поняття еквівалентної дози введено у зв'язку з тим, що різні види іонізуючих випромінювань навіть при однакових поглинених дозах викликають різний біологічний ефект.

Ефективність біологічної дії випромінювання залежить від величини втрати енергії частинок на одиницю довжини шляху dE/dx , яка дістала назву «лінійна передача енергії» (ЛПЕ). У математичних виразах ЛПЕ позначається символом L :

$$L = \frac{\text{енергія, яку передала частинка речовині, кеВ}}{\text{відстань, що пройшла частинка, мкм}}$$

Величина ЛПЕ в кеВ/мкм залежить від щільності речовини. При діленні ЛПЕ на щільність речовини ρ отримуємо значення L/ρ , яке не залежить від щільності. Цю величину теж називають ЛПЕ або гальмівною здатністю речовини, і вимірюється вона в $\text{МеВ}/\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$. Як видно з визначення, величина ЛПЕ характеризує розподіл енергії, переданої речовині, уздовж треку частинки.

Знаючи ЛПЕ, можна визначити середнє число іонів, утворених на одиницю шляху частинки. Для цього необхідно розділити значення ЛПЕ на величину енергії, необхідної для утворення однієї пари іонів (W). Відношення L/W називають лінійною щільністю іонізації (ЛЩІ). Точне значення W тканин невідомо. Для газів значення W складає близько 34 еВ. Тому для газів:

$$\text{ЛЩІ} = \text{ЛПЕ}/34 \text{ (пар іонів на мкм шляху)}.$$

Чим вище значення ЛПЕ, тим більше енергії залишає частинка на одиницю шляху, тим щільніше розподілені створювані нею іони уздовж треку.

Орієнтовні значення ЛЩІ для різних видів випромінювань:

- Для рентгенівського і гамма-випромінювання ЛЩІ складає приблизно десятки і сотні пар іонів на 1 мкм шляху у воді.
- Для α -випромінювання - ЛЩІ складає тисячі пар іонів.

При опроміненні клітин іонізуючими випромінюваннями величина поглиненої дози показує лише середню кількість енергії, переданої опромінюваній системі. Про щільність же іонізації в мікрооб'ємах речовини, наприклад в клітині, клітинній органелі або макромолекулі, можна судити за величиною ЛПЕ. Якщо рухома частинка створює іонізації, значно віддалені одна від одної, то імовірність виникнення

декількох іонів в межах макромолекули, субклітинної органели або клітини в цілому порівняно невелика. Навпаки, коли акти іонізації слідує безперервно уздовж треку частинки, можна чекати виникнення багатьох іонів в межах однієї субклітинної структури, наприклад двох іонізації в ділянках комплементу двониткової молекули ДНК. Біологічні наслідки ушкодження (в результаті іонізації) обох ниток ДНК більш значні для клітини, ніж руйнування деякої ділянки однієї спіралі ДНК при збереженні цілості ланцюга комплементу. Оскільки із зростанням лінійної щільності іонізації зростає імовірність саме такого "двониткового розриву", ясно, що іонізуючі частинки з високою ЛПЕ повинні значно ефективніше вражати ДНК і пов'язані з нею клітинні функції, ніж слабо іонізуюче випромінювання.

На різних біологічних об'єктах і на різних радіобіологічних ефектах (летальна дія випромінювань, різні віддалені ефекти, такі, як поява променевого катаракту і злоякісних пухлин, зниження тривалості життя) було проведено порівняння ефективності різних типів іонізуючих частинок. Біологічну ефективність різних видів випромінювань при цьому зазвичай порівнюють по відношенню до стандартного випромінювання, в якості якого використовують рентгенівське випромінювання з граничною енергією квантів 200кеВ.

Коефіцієнт відносної біологічної ефективності (ВБЕ) визначається із співвідношення:

$$\text{ВБЕ} = \frac{\text{поглинена доза, яка необхідна для отримання цього біологічного ефекту при дії рентгенівським випромінюванням 200 кеВ (у греях)}}{\text{поглинена доза досліджуваного випромінювання, яка необхідна для отримання того ж біологічного ефекту (у греях)}}$$

Важливо розуміти, що значення ВБЕ конкретного виду випромінювання можуть розрізнятися для різних радіобіологічних ефектів (наприклад за критерієм виживання клітин - одні значення ВБЕ, за критерієм злоякісного переродження клітин - інші значення ВБЕ, за критерієм утворення катаракти - треті значення ВБЕ і т. ін.).

Тепер, після такого довгого вступу дамо, нарешті, визначення поняття еквівалентної дози.

Доза еквівалентна ($H_{T,R}$) для певного виду іонізуючого випромінювання R визначається як добуток середньої поглиненої дози $D_{T,R}$ цього виду випромінювання в органі або тканині T на відповідний цьому виду випромінювання ваговий коефіцієнт W_R :

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R} \cdot$$

Ваговими коефіцієнтами для різних видів випромінювань W_R (чи, як раніше них називали, "коефіцієнти якості" різних видів випромінювань) є регламентовані значення ВБЕ різних видів іонізуючих випромінювань, встановлені з метою оцінки радіаційної небезпеки цих видів випромінювань для людини відносно виникнення віддалених несприятливих ефектів (тобто ефектів, що виникають в результаті дії відносно низьких доз хронічного або короткочасного опромінення).

Вагові коефіцієнти для різних видів випромінювання наступні:

для фотонів будь-яких енергій (тобто для рентгенівського і гамма- випромінювання) прийнятий рівним 1,

для електронів будь-яких енергій - 1,

для нейтронів з енергією менше 10кеВ - 5,

від 10кеВ до 100кеВ - 10,

від 100кеВ до 2МеВ - 20,

від 2МеВ до 20МеВ - 10,

більше 20МеВ - 5,

для протонів з енергією більше 2МеВ (окрім протонів віддачі) - 5,

для альфа- частинок, уламків поділу і важких ядер - 20.

При дії змішаного випромінювання Д.е.і.в. H_T визначається як сума еквівалентних доз впливаючих видів випромінювання :

$$H_T = \sum_R H_{T,R} = \sum_R (W_R \cdot D_{T,R}).$$

Одиниця Д.е.і.в. в системі СІ - зиверт (Зв).

Позасистемна одиниця Д.е. – бер (біологічний еквівалент рада).

Співвідношення цих одиниць наступне: 1Зв = 100 бер.

1Зв - це еквівалентна доза будь-якого виду іонізуючого випромінювання, яка створює такий ж самий біологічний ефект, що і поглинена доза в 1Гр рентгенівського або гамма-випромінювання.

Еквівалентна доза, яка дорівнює 1Зв, створюється при середній поглиненій дозі в органі або тканині, рівній $1/W_R$ Гр).

Так, наприклад, для (α -випромінювання еквівалентна доза, яка дорівнює 1Зв, створюється при поглиненій дозі $1/20$ Гр = 0,05Гр.

Важливо пам'ятати що поняття еквівалентної дози має відношення, по-перше, тільки до людини (не можна говорити про еквівалентну дозу відносно інших біологічних об'єктів).

По-друге, тільки відносно виникнення віддалених несприятливих ефектів (тобто ефектів, що виникають внаслідок дії відносно низьких доз хронічного або короткочасного опромінення), оскільки приведені вагові коефіцієнти для різних видів випромінювань відносяться тільки до таких ефектів.

4) Доза ефективна (E) іонізуючого випромінювання - величина, яка використовується як міра ризику виникнення віддалених наслідків опромінення усього тіла людини і окремих його тканин і органів з

урахуванням схильності різних тканин і органів до виникнення в них стохастичних ефектів випромінювання. Визначається як сума добутків еквівалентної дози H_T в тканинах і органах T на відповідні вагові коефіцієнти для тканин і органів W_T :

$$E = \sum_T (W_T \cdot H_T)$$

W_T призначені для обліку різної схильності різних органів і тканин людини до виникнення в них стохастичних ефектів випромінювання. Є відносним вкладом різних органів або тканин в загальний ризик (імовірність) виникнення стохастичних ефектів в усьому організмі при рівномірному опроміненні тіла. Для різних органів і тканин знайдено наступні значення W_T : гонади - 0,20; червоний кістковий мозок - 0,12; товстий кишечник - 0,12; легені - 0,12; шлунок - 0,12; сечовий міхур - 0,05; грудна залоза - 0,05; печінка - 0,05; стравохід - 0,05; щитовидна залоза - 0,05; шкіра - 0,01; клітини кісткових поверхонь - 0,01; решта (надниркові залози, головний мозок, екстраторокальний відділ органів дихання, тонкий кишечник, нирки, м'язова тканина, підшлункова залоза, селезінка, вилочкова залоза, матка) - 0,05.

Одиниці Д.е.і.в. співпадають з одиницями еквівалентної дози (у системі СІ - зиверт, позасистемна одиниця - бер). Введення поняття Д.е.і.в. обумовлене необхідністю проведення оцінки і порівняння ризику виникнення віддалених несприятливих наслідків при рівномірному і різних випадках нерівномірного опромінення організму людини. При рівномірному опроміненні організму людини Д.е.і.в. дорівнює еквівалентній дозі, оскільки в цьому випадку еквівалентна доза H_T в кожній тканині і органі однакова, а $\sum_T W_T = 1$.

Потужність дози.

Потужність поглиненої дози \dot{D} дорівнює

$$P = dD / dt ,$$

де dD – зміна дози за час dt . Вимірюється в системі СІ у Гр/с (грей за секунду). Позасистемні одиниці виміру сГр/год (сантігрей за годину), мрад/год, рад/рік та ін.

Аналогічно потужності поглиненої дози \dot{D} (крапка вказує на взяття першої похідної за часом), можна визначити потужність інших доз. Одиниця виміру потужності експозиційної дози \dot{X} у системі СІ є А/кг (ампер поділити на кілограм), покажемо чому:

$$\frac{1 \text{ Кл}}{\text{с кг}} = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} \frac{1}{\text{кг}} = \text{А} \frac{1}{\text{кг}} .$$

Позасистемні одиниці \dot{X} : Р/с, Р/год, мР/год, мкР/год, та ін.

Відповідно, потужність еквівалентної/ефективної дози у системі СІ вимірюється у Зв/с (зіверт за секунду). На практиці набули поширення наступні похідні цієї одиниці виміру: мкЗв/год, мЗв/год, Зв/рік. До

позасистемних одиниць виміру \dot{H}/\dot{E} відноситься наприклад - бер/рік, мбер/рік.

Більшість безпосередньо показуючих дозиметричних приладів (дозиметрів) вимірюють не дозу, а саме її потужність. Це дозволяє оперативно попереджати переопромінення людей шляхом прогностичних розрахунків доз. При цьому часто приймається, що у даній точці простору радіаційна обстановка не зміниться суттєво протягом часу, на який розраховується доза.

Потужність будь-якої дози в загальному випадку є функцією часу - $P\{t\}$. Якщо ця функція відома, дозу за деякий інтервал часу від t_1 до t_2 можна визначити за формулою

$$D = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt.$$

Коллективна доза. Еквівалентна доза установлює 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 тому, 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

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

Якщо у цій формулі замість $N(D)$ використовувати густину розподілу дози серед розглянутої групи осіб $\rho(D)$, то інтеграл дасть середнє значення дози D , що одержує одна людина

$$\bar{D} = \int_0^{\infty} \rho(D) D dD .$$

У процесі опромінення може змінюватися як потужність дози випромінювання, так і число осіб, що опромінюються. Якщо $N(P)$ є розподіл по потужності дози в деякий момент часу осіб, що опромінюються, то потужність колективної дози в цей же момент часу визначається інтегралом:

$$P_S = \int_0^{\infty} P N(P) dP .$$

Колективна доза і її потужність особливо зручні для оцінки дії конкретного джерела при опроміненні великих груп людей. Як міру загального опромінення популяції від даного джерела може бути прийнята парціальна колективна (чи популяційна) доза. Така колективна доза D_S^k , що сформована під дією певного джерела «к», є інтеграл за нескінченно великий проміжок часу від колективної потужності дози P_S^k , що обумовлена тим же джерелом:

$$D_S^k = \int_0^{\infty} P_S^k(t) dt .$$

Слово «парціальна» відбиває той факт, що доза зв'язана з конкретним джерелом; при наявності декількох джерел загальна доза дорівнює сумі парціальних. Парціальна доза накопичується за увесь час дії джерела й у цьому сенсі виступає як очікувана доза.

Еквівалентну дозу H можна розрахувати за формулою

$$H_T = A_v \cdot V_i \cdot v \cdot t , \quad (4.1)$$

де A_v – об'ємна активність, V_i – дозовий коефіцієнт, v – швидкість споживання, t – тривалість споживання.

Дозовий коефіцієнт може бути розрахований за формулою

$$V_i = \text{ЛД/ДН} \quad (4.2)$$

За нормами НРБУ-97 ліміт дози для населення (категорія В) $\text{ЛД}_B = 1 \text{ мЗв/рік}$. Як приклад, для ^{137}Cs , допустимі рівні надходження ДН через органи дихання (з повітрям) дорівнює $2 \cdot 10^3 \text{ Бк/рік}$, а через органи травлення (з водою, молоком) дорівнює $5 \cdot 10^4 \text{ Бк/рік}$.

Таким чином, дозовий коефіцієнт, що визначається за формулою (4.2) для повітря

$$V_{ih} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Зв/ Бк} ,$$

а для води

$$V_{ig} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Зв/Бк} .$$

Приклади розв'язування типових задач

Приклад 4.1. Визначити еквівалентну дозу для дорослих і дітей, якщо в атмосферному повітрі була зареєстрована об'ємна активність 100 Бк/м^3 (^{137}Cs). Час перебування в зоні дорівнює 1 добу.

Розв'язання

Дозовий коефіцієнт розраховується за формулою (4.2), і для повітря він дорівнює

$$B_{ih} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Зв/Бк.}$$

Швидкість споживання повітря V - це середня швидкість дихання. Для дорослих її вважають рівною $23 \text{ м}^3/\text{добу}$; для дітей - $14 \text{ м}^3/\text{добу}$, або $8,4 \cdot 10^3$ і $5,5 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{рік}$ відповідно.

Еквівалентна доза розраховується за формулою (4.1). Для дорослих вона дорівнює

$$H_T = 100 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \cdot 23 \cdot 1 = 1,15 \text{ мЗв,}$$

для дітей

$$H_T = 100 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \cdot 14 \cdot 1 = 0,70 \text{ мЗв.}$$

Приклад 4.2. Радіаційне забруднення питної води відповідає об'ємній активності $A_v = 370 \text{ Бк/л}$ (^{137}Cs). Розрахувати річну еквівалентну дозу H_T на організм дорослої людини, якщо об'єм споживання води складає 2 л на добу і об'ємна активність води зберігається на протязі року.

Розв'язання

Дозовий коефіцієнт розраховується за формулою (4.2), і для води він дорівнює

$$B_{ig} = \text{ЛД/ДН} = 10^{-3} / (5 \cdot 10^4) = 2 \cdot 10^{-8} \text{ (Зв/Бк).}$$

Використовуючи значення дозового коефіцієнта та об'єм річного споживання води $V = 2 \cdot 365 = 730 \text{ л/рік} = 0,73 \text{ м}^3/\text{рік}$, за формулою (4.1) отримаємо еквівалентну дозу

$$H_T = 370 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 0,73 \approx 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ Зв/рік.}$$

Задачі для самостійного розв'язування

4.1. Яка доля ω усіх молекул повітря при нормальних умовах іонізується рентгенівським випромінюванням, якщо експозиційна доза $X = 258 \text{ мкКл/кг}$?

4.2. Повітря при нормальних умовах опромінюється γ -променями. Визначити енергію W , яка поглинається повітрям масою $m=5$ г при експозиційній дозі випромінювання $X=258$ мкКл/кг.

4.3. Під дією космічних променів у повітрі об'ємом $V=1$ см³ на рівні моря утворюється в середньому $N=120$ пар іонів за проміжок часу $\Delta t = 1$ хв. Визначити експозиційну дозу X випромінювання, дія якої впливає на людину протягом часу $t = 1$ доба.

4.4. Об'єм V іонізаційної камери кишенькового дозиметра дорівнює 1 см³, електроємність $C=2$ пФ. Камера містить повітря при нормальних умовах. Дозиметр був заряджений до потенціалу $\phi_1=150$ В. Під дією випромінювання потенціал упав до $\phi_2=110$ В. Визначити експозиційну дозу X випромінювання.

4.5. Потужність \dot{X} експозиційної дози, яка створюється джерелом γ -випромінювання з енергією фотонів $E=2$ МеВ, дорівнює $0,86$ мкА/кг. Визначити товщину x свинцевого екрану, що знижує потужність експозиційної дози до рівня $\dot{X}=0,86$ нА/кг.

4.6. На відстані $l=10$ см від точкового джерела γ -випромінювання потужність експозиційної дози $\dot{X}=0,86$ мкА/кг. На якій найменшій відстані l_{\min} від джерела експозиційна доза випромінювання X за робочу зміну $t=6$ год не перебільшить $5,16$ мкКл/кг? Поглинанням γ -випромінювання у повітрі знехтувати.

4.7. Потужність експозиційної дози \dot{X} γ -випромінювання на відстані $r_1=40$ см від точкового джерела дорівнює $4,30$ мкА/кг. Визначити час t , протягом якого можна знаходитись на відстані $r_2=6$ м від джерела, якщо за гранично допустиму експозиційну дозу X прийняти $5,16$ мкКл/кг. Поглинанням γ -випромінювання у повітрі знехтувати.

4.8. Визначити потужність еквівалентної дози \dot{H} від зовнішнього γ -випромінювання, якщо зареєстрована потужність експозиційної дози $\dot{X}=10$ мР/год.

4.9. Визначити еквівалентну дозу H , яку отримує працівник протягом робочого тижня від зовнішнього γ -випромінювання, якщо потужність експозиційної дози на робочому місці становить $\dot{X}=200$ мкР/год. Врахувати, що тривалість зміни 8 годин, тиждень має 2 вихідних дня.

4.10. Визначити потужність експозиційної дози \dot{X} в Р від зовнішнього γ -випромінювання, якщо протягом доби поглинена доза в тілі людини склала $D=0,3$ сГр.

4.11-20. Визначити ефективну еквівалентну дозу і потужність дози γ -випромінювання з енергією квантів ~ 200 кеВ, якщо виміряна в повітрі експозиційна доза досягає величини D_T , а час перебування в зоні випромінювання дорівнює t . Значення D_T і t наведені в таблиці **4.11-20**.

Таблиця 4.11-20.

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_T , Рентген	50	50	50	100	100	100	150	150	150	200
t, годин	20	15	10	20	15	10	30	20	10	20

4.21-30. 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 4.21-30).

Таблиця 4.21-30.

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

4.31. В результаті аварійного викиду цезію ^{137}Cs 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 $V = 0,5\text{л}$ на добу, і об'ємна активність молока зберігається на протязі року. За допустимий рівень надходження радіонукліду прийняти $5 \cdot 10^4\text{Бк/рік}$. Вважати, що $A_V = 300\text{Бк/л}$.

4.32. Визначити поглинену дозу при споживанні протягом 1 року забрудненого ^{90}Sr м'яса при питомій активності 100Бк/кг . Добове споживання м'яса – 50г/добу .

4.33. Визначити поглинену дозу при споживанні людиною 400л питної води, забрудненої ^{60}Co до об'ємної активності 100Бк/м^3 . Добове споживання питної води – 2л/добу .

4.34. Визначити річну еквівалентну дозу від внутрішнього опромінення при споживанні людиною молока, забрудненого ^{137}Cs до об'ємної активності 400Бк/л . Добове споживання питної води – 1л/добу .

4.35. Визначити ефективну дозу від внутрішнього опромінення ^{131}I , якщо його приземна об'ємна активність сягає 500Бк/м^3 . При середньо добовій швидкості подиху $1\text{м}^3/\text{год}$.

5. МІГРАЦІЯ РАДІОНУКЛІДІВ У БІОСФЕРІ

Моделювання процесів міграції радіонуклідів розвивається за декількома напрямками.

1) Один з них стосується статистичної теорії, кінцевим результатом якої є гаусові моделі розподілу (гаусів розподіл) суміші в потоці викиду, другий пов'язаний з розв'язком диференціальних рівнянь переносу типу

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u_i C)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_i \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + \lambda C + \sum_j R_j, \quad (5.1)$$

де C – концентрація радіонуклідів, x_i – координата, λ – константа розпаду, u_i – швидкість течії вздовж x_i , D_i – коефіцієнт дифузії, R_j – потужність джерел викиду.

У випадку стаціонарності потоку на великих відстанях від місця викиду для замулених у турбулентному потоці радіонуклідів розв'язок рівняння (5.1), має вигляд

$$C = C_0 e^{-\frac{x}{u}(b+\lambda)}, \quad (5.2)$$

де b – константа осадження частинок, яка дорівнює

$$b = \frac{v_s^2}{D} u_x. \quad (5.3)$$

Тут v_s – швидкість стоксовської седиментації частинок.

2) Для визначення радіонуклідів в біосфері модулюється міграція їх по біологічним та харчовим ланцюжкам. З цією метою використовують модель «хижак-жертва», «камерні моделі» та інші.

Для характеристики перетворень і міграції радіонуклідів у екосистемах використовують коефіцієнти накопичення K_n і переходу K_{n-1} . Ці коефіцієнти відбивають частку радіонуклідів, що потрапляють від одного елемента екосистеми до іншого.

Для системи ґрунт – рослини під коефіцієнтом накопичення K_n розуміють відношення активності радіонукліда на 1кг повітряно-сухої біомаси рослин (C_1) до його вмісту в 1кг повітряно-сухого ґрунту (C_2), на якому ці рослини вирощено. Вимірюється у Бк/кг.

$$K_n = \frac{C_1}{C_2}. \quad (5.4)$$

Залежно від просування радіонуклідів у ґрунтовому шарі і глибини залягання основної маси коренів того чи іншого виду рослин оцінки коефіцієнтів накопичення можуть відрізнятись у десятки разів. Тому в

практичній радіоекології використовують іншу характеристику – коефіцієнт переходу K_{Π} :

$$K_{\Pi} = \frac{C_1}{C_3}, \quad (5.5)$$

де C_1 – питома активність радіонуклідів у 1кг повітряно-сухої маси рослин, Бк/кг; C_3 – поверхнева активність радіонуклідів на 1 м^2 ґрунту, Бк/км².

У практичній радіоекології застосовують також коефіцієнт виносу ($K_{\text{в}}$) радіонуклідів із біомасою, який обчислюється за формулою:

$$K_{\text{в}} = \frac{C \cdot V}{A}, \quad (5.6)$$

де C – питома активність (концентрація) радіонукліда в 1кг біомаси рослин, Бк/кг; V – врожай із 1 км^2 площі, кг; A – поверхнева активність (щільність) радіонуклідів, які випали на поверхню, Бк/км².

В радіоекології водних екосистем у формулі (5.4) для коефіцієнту накопичення K_{Π} під C_1 розуміють питому активність радіонукліда в 1кг біомаси, Бк/кг; під C_2 – об’ємну активність радіонукліда в 1л води. Бк/л. При обчисленні коефіцієнту виносу $K_{\text{в}}$ за формулою (5.6) в радіоекології водних екосистем слід розуміти під V – біомасу гідро біонтів в одиниці об’єму середовища їхнього проживання, а під A – активність радіонуклідів, що потрапили в цю одиницю об’єму середовища.

При розрахунку коефіцієнтів K_{Π} і $K_{\text{в}}$ масу біоти розраховують різними способами – виходячи з маси сухої речовини або маси свіжо взятої проби. Тому при проведенні обчислень необхідно указувати спосіб розрахунку, та (у першому з наведених способів), який відсоток маси свіжо взятої проби становить суха речовина.

Приклади розв’язування типових задач

Приклад 5.1. Розрахувати активність води на відстані $x=5$ км від місця викиду замуленого радіонукліду в річку. Активність радіонукліда на місці викиду дорівнює $A_0 = 500\text{ Бк/л}$. Швидкість річки $u=0,5\text{ м/с}$. Константа осадження частинок $b = 5 \cdot 10^{-5}\text{ с}^{-1}$, константа розпаду $\lambda = 10^{-4}\text{ с}^{-1}$.

Розв’язання

$$A_0 = 5 \cdot 10^5 \text{ Бк/м}^3$$

$$u=0,5\text{ м/с}$$

$$b = 5 \cdot 10^{-5}\text{ с}^{-1}$$

$$\lambda = 10^{-4}\text{ с}^{-1}$$

Розв'язання

Радіаційна активність води пропорційна концентрації радіонуклідів у воді. Тому, згідно формулі (4.1), на відстані x від місця викиду активність води дорівнює

$$A = A_0 e^{-\frac{x}{u}(b+\lambda)}.$$

Розрахунок дає: $A = 5 \cdot 10^5 e^{-\frac{5 \cdot 10^3}{0,5}(5+10)10^{-5}} = 1,12 \cdot 10^5 \text{ Бк/м}^3.$

Приклад 5.2. Під час аварії на АЕС річний викид ізотопу йоду ^{131}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 $G = 5 \cdot 10^{-8} \text{ с/м}^3.$

Розв'язання

$$Q = 8,1 \cdot 10^{11} \text{ Бк}$$

$$G = 5 \cdot 10^{-8} \text{ с/м}^3$$

$$t = 1 \text{ рік} = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$$

$$V_{\text{in}} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Зв/Бк}$$

$$V = 23 \text{ м}^3/\text{добу}$$

Розв'язання

Об'ємна активність повітря розраховується за формулою

$$A_V = \frac{Q \cdot G}{t}.$$

Розрахунок дає: $A_V = \frac{8,1 \cdot 10^{11} \cdot 5 \cdot 10^{-8}}{3,16 \cdot 10^7} = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/м}^3.$

Еквівалентну дозу розраховуємо за формулою

$$H_T = A_V \cdot V_i \cdot V,$$

де V_i – дозовий коефіцієнт; V – об'єм спожитого повітря. За 60-тою публікацією МКРЗ (див.табл.5.1) дозовий коефіцієнт для ^{131}I дорівнює $V_{\text{in}} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Зв/Бк}$, середню добову кількість повітря V , вдихуваного дорослими, вважають рівною $23 \text{ м}^3/\text{добу}$.

Таким чином $H_T = 1,28 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-8} \cdot 23 \cdot 12 \cdot 30 = 2,65 \cdot 10^{-7} \text{ Зв/рік}.$

Приклад 5.3. 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 $u=1,6\text{м/с}$, відстань від місця викиду – 3км у напрямку вітру, коефіцієнт шорсткості $z_0=10\text{см}$ (сільська місцевість); коефіцієнт екранування будівлями $k_e=0,4$.

Розв'язання

За довідковими даними знаходимо, що повне завантаження активної зони реактора ураном складає 41,5 т; питома активність q суміші ізотопів Kr і Xe дорівнює $4,06 \cdot 10^{16}\text{Бк/т}$ і $1,07 \cdot 10^{17}\text{Бк/т}$ відповідно; дозовий коефіцієнт $B_{\alpha\gamma}$ для суміші ізотопів Kr і Xe дорівнює $B_{\alpha\gamma} = 1,07 \cdot 10^{-6}\text{Зв} \cdot \text{м}^3 / \text{рік} \cdot \text{Бк}$. Коефіцієнт метеорологічного розбавлення $G = 6,0 \cdot 10^{-5}\text{с/м}^3$. У перерахунку на швидкість вітру $u=1,6\text{м/с}$ отримуємо $G_0 = 6,0 \cdot 10^{-5} / 1,6 = 3,8 \cdot 10^{-5}\text{с/м}^3$. Оскільки точка, у якій проводиться детектування, поза зоною максимуму приземної концентрації, можливо використання геометрії радіоактивної хмари у формі напівнескінченного простору.

$$m=41,5\text{т}$$

$$q_{\text{Kr}} = 4,06 \cdot 10^{16}\text{Бк} / \text{т}$$

$$q_{\text{Xe}} = 1,07 \cdot 10^{17}\text{Бк} / \text{т}$$

$$B_{\alpha\gamma} = 1,07 \cdot 10^{-6}\text{Зв} \cdot \text{м}^3 / \text{рік} \cdot \text{Бк}$$

$$\delta=10\%$$

$$x=3\text{км}$$

$$v=1,6\text{м/с}$$

$$k_e=0,4$$

$$G = 6,0 \cdot 10^{-5}\text{с/м}^3$$

Розв'язання.

Розраховуємо активність суміші радіоактивних газів в точці вимірювання за формулою

$$Q = q \cdot m \cdot \delta = (0,41 + 1,07) \cdot 10^{17} \cdot 41,5 \cdot 0,1 = 6,14 \cdot 10^{17}\text{ (Бк)}$$

Еквівалентну дозу H_T від короточасного викиду Q можна розрахувати за формулою

$$H = Q \cdot B_{\alpha\gamma} \cdot G_0 \cdot k_e$$

$$H = 6,14 \cdot 10^{17} \cdot 1,07 \cdot 10^{-6} \cdot 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,4 / 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 0,32 \text{ (Зв)}.$$

У реальності при такому масштабі аварії дозі зовнішнього і внутрішнього опромінювання будуть значно більшими за рахунок інших радіонуклідів і інших шляхів опромінювання.

Приклад 5.4. Визначити розподіл концентрації радіонуклідів вздовж течії річки в установленому режимі, якщо викид відбувся із труби круглого перерізу, розташованої вздовж течії річки. Механізм розбавлення молярний.

Розв'язання.

Припустимо, що при витіканні суміші, яка містить радіонуклід, з труби радіусу R у річку, в ній після вирівнювання швидкостей річки (v) і потоку (u) трубка току радіусом r , через бокову поверхню якої відбувається молярна дифузія радіонукліду. Радіус трубки r можна знайти за витратами суміші Q , що витікає у річку.

$$Q = \pi R^2 u.$$

Із рівняння нерозривності $\pi R^2 u = \pi r^2 v$. Звідки можна виразити радіус трубки току:

$$r = \sqrt{\frac{Q}{\pi v}}.$$

Запишемо рівняння матеріального балансу

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \text{grad} C = -\text{div} \vec{j} + I, \quad (1)$$

де C – концентрація радіонуклідів; I – функція джерела; \vec{j} – густина потоку радіонукліду, внаслідок якого відбувається розбавлення суміші.

Внаслідок стаціонарності процесу $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$.

Функція стоку знаходиться із закону радіоактивного розпаду, оскільки це – кількість радіонукліда, яка розпалася за одиницю часу в одиниці об'єму речовини:

$$I = \frac{1}{V} \frac{dN}{dt} = \frac{dC}{dt} = -\lambda C,$$

де $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ – константа розпаду ($T_{1/2}$ – період напіврозпаду радіонукліда).

Направимо вісь OX вздовж течії річки. Тоді в циліндричних координатах з віссю OX у якості циліндричної вісі та з урахуванням радіальної симетрії отримуємо:

$$\operatorname{div} \vec{j} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \vec{j}) + \frac{\partial j}{\partial x}.$$

Для молярного механізму дифузії $j = \beta C$. Тоді $\operatorname{div} \vec{j} = \frac{\beta C}{r}$.

З урахуванням наведених виразів рівняння матеріального балансу (1) приймає вигляд:

$$(v + \beta) \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\beta C}{r} - \lambda C, \quad (2)$$

або

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -aC, \quad (3)$$

де $a = \frac{\beta}{v + \beta} + \lambda \approx \frac{\beta \sqrt{\frac{\pi v}{Q}} + \lambda}{v}$ (4), оскільки $\beta \ll v$.

Розв'язок рівняння (3) має вид

$$C = C_0 e^{-ax}. \quad (5)$$

Отже, зміна концентрації радіонукліда у річці відбувається за експоненціальним законом, показник степені якого визначається константою розпаду λ і швидкістю масообміну β .

Ураховуючи вираз (4) розв'язку (5) можна надати вигляд:

$$C = C_0 f e^{-\frac{\lambda x}{v}},$$

де $f = e^{-\beta \sqrt{\frac{\pi v}{Q}} x}$ - функція розбавлення.

Приклад 5.5. На незораному пасовищі поверхнева активність радіонуклідів унаслідок аварії на ЧАЕС становила $18,5 \cdot 10^{10}$ Бк/км² ¹³⁷Cs. Наступного року після аварії (коли повітряним забрудненням трав можна було нехтувати) питома активність ¹³⁷Cs у біомасі рослин становила 3,7 Бк/кг, а в 5-сантиметровому шарі ґрунту – $7,4 \cdot 10^2$ Бк/кг. Визначити коефіцієнти накопичення і переходу.

$$C_1 = 3,7 \text{ Бк/кг}$$

$$C_2 = 7,4 \cdot 10^2 \text{ Бк/кг}$$

$$C_3 = 18,5 \cdot 10^{10} \text{ Бк/км}^2$$

Розв'язання.

За формулами (5.4) і (5.5) розраховуємо шукані коефіцієнти. Коефіцієнт накопичення дорівнює

$$K_n = \frac{C_1}{C_2} = \frac{3,7 \text{ Бк / кг}}{7,4 \cdot 10^2 \text{ Бк / кг}} = 0,005.$$

Коефіцієнт накопичення дозволяє оцінити частку активності радіонуклідів, що переходять в 1кг біомаси рослин із 1кг ґрунту.

Коефіцієнт переходу в перший рік після аварії становив

$$K_n = \frac{C_1}{C_3} = \frac{3,7 \text{ Бк / кг} (1 \cdot 10^{-10} \text{ Кі / кг})}{18,5 \cdot 10^{10} \text{ Бк / км}^2 (5 \text{ Кі / км}^2)} = 0,2.$$

Коефіцієнт переходу діє змогу оцінити частку активності радіонуклідів, що переходять у 1кг біомаси рослин від $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк (1Кі) активності радіонуклідів, що випали на поверхню території.

Задачі для самостійного розв'язування

5.1. Оцінити K_n і K_p у системі ґрунт – рослина (кукурудза), якщо активність ^{137}Cs становить: у ґрунті $18,5 \cdot 10^{10}$ Бк/км² (5Кі/ км²), у сухій біомасі кукурудзи – $3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг (10^{-8} Кі/кг), у зерні – 37Бк/кг (10^{-9} Кі/кг).

5.2. Обчислити радіонуклідну активність врожаю біомаси кукурудзи за рівня активності ^{90}Sr у ґрунті $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк/км² (1Кі/ км²). ($K_n=0,2$; $K_p=1,5$).

5.3. Визначити коефіцієнт виносу радіонуклідів із врожаєм соняшнику, якщо рівень поверхневої активності ^{137}Cs у ґрунті становить $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк/км² (1Кі/ км²), врожай зеленої маси – 400ц/га, $K_n=0,2$; $K_p=1,0$.

5.4. За результатами попередньої задачі оцінити сумарний винос активності ^{137}Cs із врожаєм соняшнику протягом 10 років.

5.5. Описати у вигляді рівнянь стаціонарну камерну модель системи з чотирьох камер: ґрунт – рослина – корова – молоко, якщо рівень активності ^{137}Cs у ґрунті – $18,5 \cdot 10^{10}$ Бк/км² (5Кі/ км²), $K_1=0,3$, $K_2 = 0,03$, $K_3=0,01$. Оцінити очікувану активність радіонуклідів у молоці. Обчислити колективну еквівалентну дозу випромінювання від уживання молока. (5тис.чол., 200 л/рік.

5.6. Обчислити чинник радіо ємності прісноводного водоймища ($k=300$, $h=10$ см, $H = 4$ м, $S = 2$ км²).

5.7. Оцінити радіо ємність прісноводного водоймища ($V = 8 \cdot 10^6$ м³, $k=300$, $h=10$ см, $H = 4$ м) за умови, що його донні відкладення мають містити радіонукліди з питомою активністю не більше ніж $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг (10^{-5} Кі/кг).

5.8. Оцінити допустиме річне складання ^{137}Cs у водоймище за умови, що рівень об'ємної активності радіонуклідів у воді має не перевищувати

18,5Бк/л ($5 \cdot 10^{-10}$ Ки/л). Параметри водоймища: $k=300$, $h=10$ см, $H = 4$ м, $S=2$ км².

5.9. Якими мають бути параметри радіоємності водоймища-охолоджувача АЕС, щоб прийняти скидання ¹³⁷Cs активністю $3,7 \cdot 10^{13}$ Бк (1000Ки) і активність радіонуклідного забруднення води внаслідок цього не перевищувала $5 \cdot 10^{-10}$ Ки/л? Розглянути різні варіанти і запропонувати найбільш вигідні.

5.10. Оцінити чинник радіоємності біоти прісноводного водоймища за параметрами: $P = 5$ г/м³, $K = 300$, $H = 4$ м, $F = 0,7$ (чинник радіоємності донних відкладень).

5.11. Оцінити чинник радіоємності біоти ділянки моря за наведеними параметрами: $H = 200$ м, $S=2000$ км², F донних відкладень = 0,1, $P = 1$ г/м³, $K_0 = 2000$.

5.12. Розрахувати винос ¹³⁷Cs з урожаєм біомаси в агро системах, якщо $A_0=3,7 \cdot 10^{11}$ Бк/км² (10 Ки/км²), V_0 (за перший вегетаційний період) = 4000т/км², $K_0 = 0,1$.

5.13. За умовою задачі 5.12 оцінити винос із врожаєм ¹³⁷Cs наприкінці року з урахуванням стоку і розпаду радіонукліда, якщо $a = 0,999$, $b = 0,98$, $r = 1/30$ (на рік), $T = 1$ рік.

5.14. За умовами задач 4.12 і 4.13 оцінити загальний винос ¹³⁷Cs з урожаєм за 20 років.

5.15. Обчислити річний винос ¹³⁷Cs в агро системі з урахуванням зрошення, якщо $K_b = 2$, $C_b = 18,5$ Бк/л ($5 \cdot 10^{-10}$ Ки/л), $V = 4000$ м³/рік. Використати дані задач 4.12 і 4.13.

5.16. Оцінити щільність радіоактивного забруднення ґрунту після викиду радіонуклідів активністю $3,7 \cdot 10^{12}$ Бк (100Ки) на відстань 10км від джерела викиду) (активність у колі радіусом 1км у середньому становить $74 \cdot 10^{10}$ Бк/км² (або 20Ки/ км²).

5.17. Поверхнева активність ґрунту ⁹⁰Sr - $18,5 \cdot 10^{10}$ Бк/км² (5 Ки/ км²), коефіцієнт вітрового підймання 10^{-8} м⁻¹. Оцінити забруднення повітря радіонуклідом.

5.18. Оцінити чинник радіоємності шельфу океану після разового скидання ¹³⁷Cs активністю $7,4 \cdot 10^{13}$ Бк (2000Ки), якщо $A_1=3,7 \cdot 10^{13}$ Бк (1000Ки), $V_0=0,29 \cdot 10^{13}$ Бк (80Ки).

5.19. Поверхнева активність ґрунту ¹³⁷Cs - $55,5 \cdot 10^{10}$ Бк/км² (15 Ки/км²), а об'ємна активність повітря – 0,6 Бк/м³. Оцінити індивідуальну інгаляційну дозу випромінювання для тракториста, що працює протягом місяця на польових роботах (споживана кількість повітря $8 \cdot 10^3$ м³/рік).

Задача 5.20-29.

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 $B_{ih} = 2,9 \cdot 10^{-7}$ Зв/Бк, для дітей - $B_{ih} = 1,0 \cdot 10^{-6}$ Зв/Бк.

Таблиця

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q, 10^{11}$, Бк	5	6	8	10	10	15	15	17	20	20
$G, 10^{-8}$, с/м ³	2	5	5	5	8	2	5	8	2	5

Задача 5.30-39.

Розрахувати об'ємну активність води в річці уздовж течії на відстані X км від джерела неперервного радіаційного забруднення. Знайти річну еквівалентну дозу H_T на організм дорослої людини, якщо добовий об'єм споживання води становить 4 л/добу і активність води не змінюється протягом року. Початкова об'ємна активність води $A_{V0} = 5 \cdot 10^5$ Бк/м³, швидкість річки u , константа осадження нуклідів b та константа розпаду λ наведені в таблиці

Таблиця

Варіант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$u, \text{м/с}$	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,8	0,8	0,8	0,5
$b, 10^{-5} \text{ 1/с}$	1,5	0,5	0,1	0,2	0,5	0,1	0,2	0,5	1	0,1
$\lambda, 10^{-5} \text{ 1/с}$	2	1	0,5	0,6	0,5	0,1	0,2	1	1	0,2
$X, \text{км}$	5	2	2	5	5	10	10	2	2	1

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

Додаток

Фундаментальні фізичні константи:

Гравітаційна стала	$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{ м}^2/\text{ кг}^2$
Швидкість світла в вакуумі	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 12,5663706144 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Стала Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{ с}$
Маса спокою електрону	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Маса спокою протону	$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Маса спокою нейтрону	$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Елементарний заряд	$e = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Атомна одиниця маси	$1 \text{ а.о.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Стала Авогадро	$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Універсальна газова стала	$R = 8,31441 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{ К})$
Стала Больцмана	$k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Комптонівська довжина хвилі електрона	$\lambda_c = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$

Назви, символи та атомні маси деяких хімічних елементів

№ п/п	Назва	Симво л	Атомна маса	№ п/п	Назва	Сим вол	Атомна маса
1	Водень	H	1,0079	56	Барій	Ba	137,33
2	Гелій	He	4,00260	57	Лантан	La	138,9055
3	Літій	Li	6,90041	58	Церій	Se	140,12
4	Берилій	Be	9,01218	59	Празеодим	Pr	140,9077
5	Бор	B	10,81	60	Неодим	Nd	144,24
6	Вуглець	C	12,011	61	Прометій	Pn	[145]
7	Азот	N	14,0067	62	Самарій	Sn	150,4
8	Кисень	O	15,9994	63	Європій	Eo	151,96
9	Фтор	F	18,9984	64	Гадоліній	Gd	157,25
10	Неон	Ne	20,179	65	Тербій	Tb	158,9254
11	Натрій	Na	22,98977	66	Диспрозій	Dy	162,50
12	Магній	Mg	24,305	67	Гольмій	Ho	164,9304
13	Алюміній	Al	26,98154	68	Ербій	Er	167,26
14	Кремній	Si	28,0855	69	Тулій	Tm	168,9342
15	Фосфор	P	30,97376	70	Ітербій	Yb	173,04

16	Сера	S	32,06	71	Лютецій	Lu	174,967
17	Хлор	Cl	35,453	72	Гафній	Hf	178,49
18	Аргон	Ar	39,948	73	Тантал	Ta	180,947
19	Калій	K	39,0983	74	Вольфрам	W	183,85
20	Кальцій	Ca	40,08	75	Реній	Re	186,21
21	Скандій	Sc	44,9559	76	Осмій	Os	190,2
22	Титан	Ti	47,90	77	Іридій	Ir	192,22
23	Ванадій	V	50,9415	78	Платина	Pt	195,08
24	Хром	Cr	51,996	79	Золото	Au	196,97
25	Марганець	Mn	54,9380	80	Ртуть	Hg	200,59
26	Залізо	Fe	55,847	81	Талій	Tl	204,38
27	Кобальт	Co	58,9332	82	Свинець	Pb	207,2
28	Нікель	Ni	58,71	83	Вісмут	Bi	208,98
29	Мідь	Cu	63,546	84	Полоній	Po	[209]
30	Цинк	Zn	65,38	85	Астат	At	[210]
31	Галій	Ga	69,735	86	Радон	Rn	[222]
32	Германій	Ge	72,59	87	Францій	Fr	[223]
33	Миш'як	As	74,9216	88	Радій	Ra	226,03
34	Селен	Se	78,96	89	Актиній	Ac	[227]
35	Бром	Br	79,904	90	Торій	Th	232,04
36	Криптон	Kr	83,80	91	Протактиній	Pa	[231]
37	Рубідій	Rb	85,467	92	Уран	U	238,03
38	Стронцій	Sr	87,62	93	Нептуній	Np	[237]
39	Ітрій	Y	88,9059	94	Плутоній	Pu	[244]
40	Цирконій	Zr	91,22	95	Америцій	Am	[247]
41	Ніобій	Nb	92,9064	96	Кюрій	Cm	[247]
42	Молібден	Mo	96,94	97	Берклій	Bk	[247]
43	Технецій	Tc	98,9062	98	Каліфорній	Cf	[251]
44	Рутеній	Ru	101,07	99	Ейнштейній	Es	[252]
45	Родій	Rh	102,9055	100	Фермій	Fm	[257]
46	Паладій	Pd	106,4	101	Менделеві	Md	[258]
47	Срібло	Ag	107,868	102	Нобелій	No	[259]
48	Кадмій	Cd	112,401	103	Лоуренсій	Lr	[260]
49	Індій	In	114,82	104	Дубній	Db	[261]
50	Олово	Sn	118,69	105	Джоліотій	Jl	[262]
51	Сурма	Sb	122,75	106	Резерфордій	Rf	[263]
52	Телур	Te	127,60	107	Борій	Bh	[262]
53	Йод	I	125,9045	108	Ганій	Hn	[265]
54	Ксенон	Xe	131,30	109	Майтнерій	Mt	[266]
55	Цезій	Cs	132,9054	110	Унуннілій	Uun	

Атомна маса $m_{ат}$ деяких нуклідів

Нуклід	$m_{ат}$	Нуклід	$m_{ат}$
Водень (^1H)	1,007825	Титан (^{50}Ti)	49,944736
Дейтерій (^2H)	2,014108	Титан (^{51}Ti)	50,949858
Тритій (^3H)	3,016028	Ванадій (^{52}V)	51,944800
Гелій (^3He)	3,016045	Марганець (^{55}Mn)	54,930249
Гелій (^4He)	4,002596	Кобальт (^{58}Co)	57,935776
Літій (^6Li)	6,015110	Стронцій (^{90}Sr)	89,907711
Літій (^7Li)	7,016046	Полоній (^{210}Po)	209,982760
Берилій (^7Be)	7,016925	Радон (^{226}Rn)	222,017422
Бор (^{11}B)	11,009304	Радій (^{226}Ra)	226,025279
Вуглець (^{14}C)	14,003217	Торій (^{232}Th)	232,038112
Силіцій (^{31}Si)	30,975350	Уран (^{238}U)	238,050637
Фосфор (^{31}P)	30,973762	Уран (^{239}U)	239,054149
Кальцій (^{44}Ca)	43,95549	Плутоній (^{239}Pu)	239,052037

Період напіврозпаду $T_{1/2}$ деяких радіоактивних нуклідів

Нуклід	$T_{1/2}$	Нуклід	$T_{1/2}$
Вуглець (^{14}C)	5 730 років	Радій (^{226}Ra)	1 620 років
Кобальт (^{58}Co)	71 доба	Торій (^{232}Th)	$1,41 \cdot 10^{10}$ років
Стронцій (^{90}Sr)	28 років	Уран (^{238}U)	$4,5 \cdot 10^9$ років
Полоній (^{210}Po)	140 діб	Уран (^{239}U)	23,54 хвилини
Радон (^{226}Rn)	3,82 доби	Плутоній (^{239}Pu)	24 390 років

Дозові ціни (дозові коефіцієнти) різних радіонуклідів залежно від шляхів потрапляння їх в організм.

Радіонуклід	Дозова ціна, Зв/Бк		Радіонуклід	Дозова ціна, Зв/Бк	
	у разі проковтування	у разі вдихання		у разі проковтування	у разі вдихання
^{90}Sr	$4 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-7}$	^{144}Ce	$1 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$
^{90}Zr	$1 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	^{238}Pu	$5 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-5}$
^{131}I	$2 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	^{239}Pu	$7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-5}$
^{134}Cs	$2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	^{240}Pu	$5 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-5}$
^{136}Cs	$3 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	^{241}Pu	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$
^{137}Cs	$2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	^{242}Pu	$5 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-5}$
^{141}Ce	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$			

Лінійний коефіцієнт поглинання γ -випромінювання з енергією $\epsilon = 6 \text{ MeV}$
для деяких речовин $\mu, \text{ м}^{-1}$

Речовина	μ
Залізо	23,99
Свинець	49,36
Бетон (густина $\rho = 2,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$)	6,19

ЛІТЕРАТУРА

1. Пристер Б.С., Лоцилов Н.А, Немец О.Ф., Поярков В.А. Основы сельскохозяйственной радиологии. 2-е изд., переработ, и доп. – К.: Урожай, 1991. – 472 с.
2. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. М. Наука. – М.: Наука, 1980. – 671 с.
3. Иродов И.Е. Сборник задач по атомной и ядерной физике. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
4. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. – К: Наукова думка, 1975. – 416 с.
5. Вальтер А.К., Залюбовский И.И. Ядерная физика. – Харьков, Основа, 1991. – 479 с.
6. Гусев Н.Г. Защита от γ - излучения продуктов деления. – М.: Атомиздат, 1968. – 319 с.
7. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика. Ч. 2. Ядерная физика. – М.: Наука, 1989. – 416 с.
8. Курятников В.В. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни “Радіоекологія”. – Одеса: ОДЕКУ, 2002. – 45 с.