

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



**ГІРНИЧИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра екології та технологій
захисту навколишнього середовища**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ
РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ «РАДІОЕКОЛОГІЯ»**

для студентів спеціальностей 091 «Біологія», 101 «Екологія» та
183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Дніпро
НТУ «Дніпровська політехніка»
2019

Павличенко А. В. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт з дисциплін «Радіоекологія» для студентів спеціальностей 091 «Біологія», 101 «Екологія» та 183 «Технології захисту навколишнього середовища» [Текст] / А. В. Павличенко, С. А. Риженко, А. Г. Рудченко, А. А. Юрченко; НТУ «Дніпровська політехніка». — Дніпро: НТУ «ДП», 2019. — 64 с.

Автори:

А. В. Павличенко, д-р техн. наук, проф.;

С. А. Риженко, д-р мед. наук, проф.;

А. Г. Рудченко, ст. викл.;

А. А. Юрченко, к-т техн. наук, доц.

Затверджено методичними комісіями з спеціальностей 091 «Біологія» (протокол №2 від 13.02.2019), 101 «Екологія» (протокол № 2 від 13.02.2019) та 183 «Технології захисту навколишнього середовища» (протокол №2 від 13.02.2019) за поданням кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища (протокол №6 від 13.02.2019).

Подано методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Радіоекологія» для студентів спеціальностей 091 «Біологія», 101 «Екологія» та 183 «Технології захисту навколишнього середовища». Розглянуто екологічні аспекти захисту елементів довкілля від іонізуючого впливу.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, д-р техн. наук, проф. А. В. Павличенко

© Павличенко А.В., Риженко С.А., Рудченко А.Г., Юрченко А.А.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2019

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

За останні декілька десятиліть людина створила декілька сотень природних радіонуклідів та навчилася використовувати енергію атому в медицині, для створення ядерної зброї, для виробництва енергії, виявлення пожеж та ін. Все це призводить до збільшення дози опромінення людини. При розширенні мережі АЕС буде збільшуватися число районів з підвищеним вмістом природних радіонуклідів. Навіть в режимі безаварійної роботи всі підприємства ядерної енергетики є потенційними джерелами забруднення біосфери на всіх етапах ядерного циклу: видобуванні та переробці уранових руд, перетворенні руди в ядерне паливо, виготовленні тепловиділяючих елементів, виробництві енергії в реакторах, зберіганні та переробці опроміненого ядерного палива, зберіганні та захороненні радіоактивних відходів. Паливний ядерно-енергетичний цикл є джерелом більшості радіоактивних відходів, що потрапляють в біосферу. Радіонукліди забруднюють атмосферу, гідросферу та літосферу, мігрують в усіх цих складових біосфери, і в підсумку можливе їх потрапляння по харчовим ланцюгам до організму людини.

Мета практикуму – систематизація та закріплення теоретичних знань, одержаних студентами на лекціях з дисципліни «Радіоекологія», а також уміння практично використовувати ці знання для оцінки та попередження негативних наслідків впливу іонізуючої радіації на стан навколишнього середовища та живі організми.

У результаті вивчення дисципліни «Радіоекологія» студент повинен вміти: використовувати методи дозиметрії та радіометрії для оцінки радіаційного стану навколишнього середовища та окремих його компонентів; оцінювати наслідки впливу іонізуючих випромінювань на стан живих організмів; визначати закономірності впливу іонізуючих випромінювань на людину, рослинний та тваринний світ на різних рівнях його організації; прогнозувати закономірності поширення радіонуклідів в природному середовищі та закономірності їх потрапляння та виведення з живих організмів; застосовувати заходи для протипроменевого захисту навколишнього середовища та живих організмів.

Даний практикум містить сім практичних робіт. Кожна робота має назву, мету, постановку задачі та приклад виконання. В кінці кожної роботи наводиться перелік контрольних питань для самоперевірки.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №1 ВИЗНАЧЕННЯ ДОЗ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета роботи: ознайомитися з дозами випромінювання та навчитися їх визначати.

1.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Радіоактивність – це самовільне перетворення нестабільних атомних ядер в інші ядра, яке супроводжується випусканням елементарних часток або ядер.

Одиниці радіоактивності. Для вимірювання радіоактивності в системі одиниць СІ прийнята одиниця Бк (Бекерель).

1 Бк=1 розпаду в сек. Попередньою позасистемною одиницею є Кі (Кюрі).
1 Кі=3,7·10¹⁰ Бк або 1 Бк=2,7·10⁻¹¹ Кі.

Окрім цих одиниць ще існує Рд (Резерфорд): 1 Рд=10⁶ Бк. Концентрацію радіоактивних речовин зазвичай вказують в Кі/л або в Кі/см³.

Енергія іонізуючого випромінювання зазвичай вказується в еВ. 1 еВ=1,6·10⁻¹⁹ Дж – це кількість енергії, яку набуває один електрон при проходженні різниці потенціалів 1 В. Часто використовують одиниці кеВ або МеВ.

Доза випромінювання – це величина, яка використовується для оцінки дії на будь-які речовини та біоти. Розрізняють декілька доз в залежності від особливостей випромінювання та характеру його дії.

Поглинена доза випромінювання ($D_{\text{погл}}$) – це відношення поглиненої енергії (W) до маси опромінюваної речовини (m):

$$D_{\text{погл}} = \frac{W}{m} \quad (1.1)$$

Одиниця $D_{\text{погл}}$ в СІ Гр (Грей) відповідає поглинанню 1 Дж випромінювання 1 кг речовини, тобто $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ кг}$.

Позасистемна одиниця рад відповідає поглинанню 100 ерг випромінювання 1 г речовини. Звідси: 1 рад=10⁻² Гр.

Еквівалентна доза випромінювання ($D_{\text{екв}}$) або біологічна доза визначається шляхом множення поглиненої дози на коефіцієнт K – коефіцієнт якості випромінювання (у випадку зовнішнього випромінювання):

$$D_{\text{екв}} = K D_{\text{погл}} \quad (1.2)$$

Значення K наведено у табл. 1.1.

Одиниця $D_{\text{екв}}$ у СІ Зв (Зіверт). Позасистемна одиниця бер 1 бер=10⁻² Зв. Доза випромінювання дорівнює 1 бер, якщо вона здійснює таку ж біологічну дію, що і рентгенівське випромінювання 1 Р.

Згідно діючих «Норм радіаційної безпеки» (НРБУ) річна допустима еквівалентна доза $D_{\text{екв}}$ випромінювання всього тіла для населення 0,005 Зв, а для профробітників – 0,05 Зв.

Таблиця 1.1 – Значення K для різноманітних видів випромінювання

K	Вид випромінювання, енергія іонізуючих часток
1	γ -, рентгенівське випромінювання, потік електронів та позитронів
3	Потік нейтронів з енергією менше 20 кеВ
10	Потік протонів з енергією менше 20 кеВ; потік нейтронів з енергією між 0,1 та 10 МеВ
20	Важкі ядра віддачі та потік α -часток з енергією менше 10 МеВ

Експозиційна доза випромінювання ($D_{експ.}$) дорівнює відношенню сумарного електричного заряду Δq іонів одного знаку, утвореного випромінюванням, до маси поглинаючої речовини m :

$$D_{експ.} = \frac{\Delta q}{m} \quad (1.3)$$

де $D_{експ.}$ – це міра іонізації речовини рентгенівським та γ -випромінюванням.

Позасистемною одиницею є Р (Рентген). $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.
Співвідношення між Рентгеном та іншими одиницями:

$$1 \text{ Р} = 0,873 \text{ рад} \quad D_{експ.} = 0,873 \cdot D_{погл.} \quad (\text{у повітрі})$$

$$1 \text{ Р} = 0,96 \text{ рад} \quad D_{експ.} = 0,96 \cdot D_{погл.} \quad (\text{у біологічній тканині})$$

Одиницею $D_{експ.}$ в СІ є К (Керма). $1 \text{ К} = 1 \text{ Дж/кг}$.

Ефективна доза ($D_{эф.}$) використовується для оцінки здатності організму людини відновлювати більшу частину радіаційного ураження. Ця частина складає 90% загальної дози та називається *зворотною дозою*, 10% радіаційного ураження не відновлюється – це *залишкова доза*. Щоб отримати $D_{эф.}$ треба скласти 10% залишкової дози та ту частину зворотної дози, від якої організм на даний час ще не позбавився. Одиницею вимірювання є Р (Рентген).

Розрахунок $D_{эф.}$ при одноразовому випромінюванні:

$$D_{эф.} = aD_0 \quad (1.4)$$

де D_0 – одноразово отримана доза; a – коефіцієнт, який враховує значення зворотної та залишкової дози, його знаходять за графіком (рис. 1.1) в залежності від часу.

Розрахунок $D_{эф.}$ при багаторазовому випромінюванні:

$$D_{эф.} = aD_0 + bD \quad (1.5)$$

де D – добова доза опромінювання; b – коефіцієнт, фізичний сенс якого аналогічно a , знаходиться за графіком (рис. 1.2) в залежності від часу.

Ефективна еквівалентна доза – це еквівалентна доза, яка враховує різноманітну чутливість тканин та органів людини до опромінювання. Її визначають складанням еквівалентної дози, помноженої на коефіцієнти радіаційного ризику для різних систем організму. Одиниця вимірювання Зв.

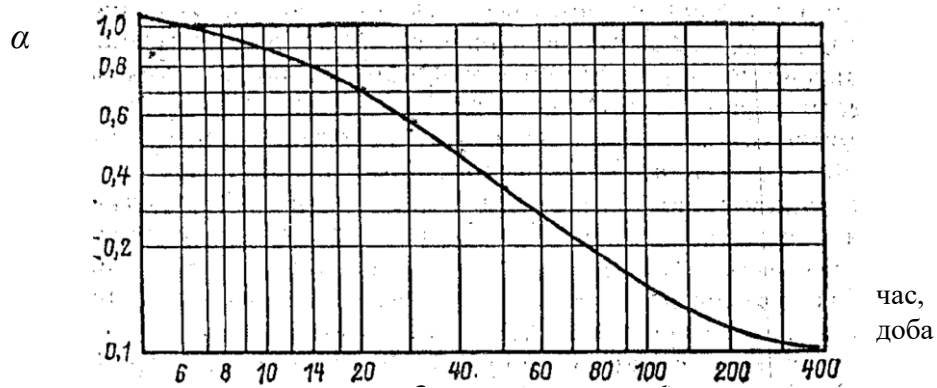


Рис. 1.1 – Коефіцієнт α дози одноразового опромінення, який використовується при вирахуванні ефективної дози за будь-який час

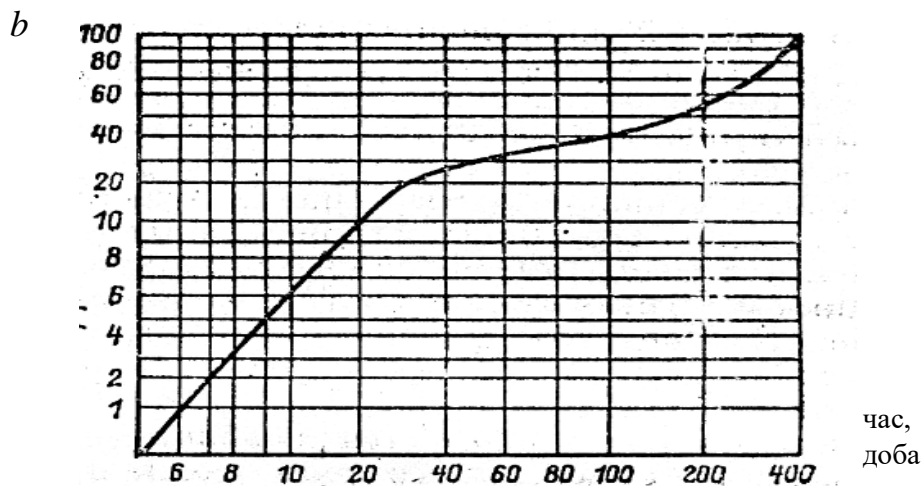


Рис. 1.2 – Коефіцієнт b для визначення ефективної дози при багаторазовому опроміненні

Коллективні дози.

Коллективна ефективна еквівалентна доза – це ефективна еквівалентна доза, отримана групою людей від будь-якого джерела радіації. Одиниця вимірювання люд.-Зв (людино-Зіверт).

Повна коллективна ефективна еквівалентна доза – це коллективна ефективна еквівалентна доза, яку отримують покоління людей від будь-якого джерела радіації за весь час його подальшого існування. Одиниця вимірювання люд.-Зв.

Потужність дози випромінювання (P) – це відношення дози до часу:

$$P = \frac{D}{t} \quad (1.6)$$

1.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. В 10 г тканини поглинається 10^8 α -частинок з енергією приблизно 10 МеВ. Знайдіть $D_{\text{погл.}}$ та $D_{\text{екв.}}$.

Розв'язок.

1. Визначаємо $D_{\text{погл}}$.

$$D_{\text{погл}} = \frac{W}{m}$$

де W – енергія, яку поглинає вся маса речовини: $W = Eqn$, де n – число α -часток; q – коефіцієнт переведення з еВ в Дж, дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19}$; E – енергія α -частки в еВ. Тоді: $W = 10^7 \cdot 10^8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,6 \cdot 10^{-4}$ Дж.

$$\text{Звідси } D_{\text{погл}} = \frac{W}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-3}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ Гр або } 1,6 \text{ рад.}$$

2. Визначаємо $D_{\text{екв}}$.

$$D_{\text{екв}} = K D_{\text{погл}}$$

K для α -часток дорівнює 20, тоді $D_{\text{екв}} = 20 \cdot 1,6 \cdot 10^{-2} = 32 \cdot 10^{-2}$ Зв = 32 бер.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $n = 10^8 N_{\text{вар}}$, α -часток з енергією 10 МеВ; $m = 10 N_{\text{вар}}$, $N_{\text{вар}}$ – номер студента в журналі академічної групи (поток).

Завдання 2. Визначити $D_{\text{екв}}$ у Зв та бер, якщо в змішаному випромінюванні 30% складають повільні нейтрони, а 70% – швидкі нейтрони при загальній величині поглиненої дози 5 мГр.

Розв'язок.

1. Визначимо $D_{\text{екв}}$ за рахунок повільних нейтронів, враховуючи їх пропорційний внесок в змішане випромінювання 30% або долю 0,3:

$$D_{\text{екв}} = D_{\text{погл}} \cdot K = 3 \cdot 0,3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ Зв;}$$

2. Визначимо $D_{\text{екв}}$ за рахунок швидких нейтронів: $D_{\text{екв}} = 0,7 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 35 \cdot 10^{-3}$ Зв;

3. Сумарна $D_{\text{екв}} = 39,5 \cdot 10^{-3}$ Зв або 3,95 бер.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $D_{\text{погл}} = 3 N_{\text{вар}}$, мГр, де $N_{\text{вар}}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 3. Визначити величину еквівалентної дози в Зв та бер за місяць при опроміненні людини експозиційною дозою рентгенівського випромінювання потужністю 0,05 мкР/с.

Розв'язок.

1. Визначимо величину $D_{\text{експ}}$ за місяць:

$$D_{\text{експ}} \cdot t = 5 \cdot 10^{-8} \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3600 = 0,1296 \text{ Р;}$$

2. Визначимо величину $D_{\text{екв}}$ за місяць, для цього використовуємо зв'язок $D_{\text{експ}}$ та $D_{\text{погл}}$:

$$D_{\text{експ}} = 0,96 \cdot D_{\text{погл}} \text{ (опромінення людини, тобто біологічної тканини).}$$

Так як $D_{\text{погл}} = D_{\text{екв}}$ для випадку рентгенівського випромінювання ($K=1$), то:

$$D_{екв} = D_{експ} / 0,96 = 0,1296 / 0,96 = 0,135 \text{ бер або } 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ Зв.}$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $P = 0,01N_{вар}$, мкР/с, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток).

Завдання 4. Разова експозиційна доза дорівнює 150 Р. Наступне опромінення на протязі 20 діб склало приблизно по 15 Р на добу. Визначить $D_{эф}$.

Розв'язок.

$D_{эф}$ для випадку багаторазового опромінення визначається за формулою:

$$D_{эф} = aD_0 + bD$$

Коефіцієнти a та b визначаємо за відповідними графіками для часу $t=20$ діб. Знаходимо, що $a=0,7$, $b=10$, звідси:

$$D_{эф} = 150 \cdot 0,7 + 15 \cdot 10 = 225 \text{ Р}$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $D_0 = 50N_{вар}$, Р; $D = 5N_{вар}$, Р; $t = 10N_{вар}$, діб, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток).

Завдання 5. Потужність дози γ -випромінювання в приміщенні складає 20 мкР/год, час перебування в приміщенні 14 годин на добу. На присадибній ділянці потужність дози 15 мкР/год. Розрахуйте добову дозу зовнішнього опромінення.

Розв'язок.

1. Визначимо час перебування на присадибній ділянці: $t_{вул.} = 24 - 14 = 10$ год/доб;

2. Визначимо дозу опромінення в приміщенні: $D_{прим.} = P_{прим.} \cdot t_{прим.} = 20 \cdot 14 = 280$ мкР;

3. Визначимо дозу опромінення на присадибній ділянці: $D_{вул.} = P_{вул.} \cdot t_{вул.} = 15 \cdot 10 = 150$ мкР;

4. Тоді добова доза зовнішнього опромінення складе: $D_{зовн.} = D_{прим.} + D_{вул.} = 280 + 150 = 430$ мкР.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $P_{прим} = 5N_{вар}$, мкР/год; $P_{вул} = 3N_{вар}$, мкР/год, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Час перебування в приміщенні 14 годин на добу.

Контрольні запитання:

1. Дайте визначення терміну «радіоактивність».
2. Наведіть одиниці виміру радіоактивності.
3. Що таке доза випромінювання?
4. Визначення поглинутої дози опромінення та одиниці виміру.
5. Визначення еквівалентної дози опромінення та одиниці виміру.

6. Визначення експозиційної дози опромінення та одиниці виміру.
7. Методика розрахунку ефективної дози.
8. Які колективні дози Ви знаєте?
9. Визначення потужності дози опромінення.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 РАДІАЦІЙНИЙ ЗАХИСТ

Мета роботи: ознайомитися з методами радіаційного захисту та навчитися їх застосувати.

2.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Розрахунок дози зовнішнього опромінення у випадку фотонних випромінювань розраховується за наступною формулою:

$$D = \frac{P_0 t}{R^2} \quad (2.1)$$

де D – доза зовнішнього опромінення, Р; t – час опромінення, год.; R – відстань від джерела, см; P_0 – потужність дози на відстані 1 см від джерела, Р/год.

Для більшості радіоактивних ізотопів вказується їх активність. В цьому випадку потужність визначається за формулою:

$$P_0 = Q \cdot K_\gamma,$$

де Q – активність джерела, мКі; K_γ – гама-стала даного ізотопу, $\frac{P \cdot \text{см}^2}{\text{год} \cdot \text{мКі}}$ (визначають за додатком 1).

Звідси доза:

$$D = \frac{K_\gamma Q t}{R^2} \quad (2.2)$$

Якщо активність джерела виражається в мг-екв Ra (m), то формула (2.2) буде інша.

m – гама-еквівалент радію – це маса джерела ^{226}Ra , який утворює на даній відстані таку ж потужність експозиційної дози, як дане джерело. 1 мг-екв Ra=8,4 Р/год.

В цьому випадку:

$$D = \frac{8,4 m t}{R^2} \quad (2.3)$$

Таким чином, $8,4 \cdot m = Q \cdot K_\gamma$.

При використанні захисних екранів в знаменник формул (2.1-2.3) вводиться коефіцієнт послаблення випромінювання k :

$$k = \frac{P_0}{P_x} \quad (2.4)$$

де P_0 – потужність дози без захисту; P_x – допустима потужність дози.

Якщо гранично допустима річна доза для професійних робітників дорівнює 0,05 Зв, то за тиждень це складе $\frac{0,053\text{в}}{50} = 0,0013\text{в} = 0,1\text{бер} \approx 0,1P$.

Тобто:

$$D = 0,1 = \frac{8,4mt}{kR^2} \quad (2.5)$$

Після перетворення отримаємо:

$$\frac{mt}{kr^2} = 120 \quad (2.6)$$

де t – робочі години на тиждень, год.; r – відстань від джерела, м.

2.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. Працівник АЕС має 36-годинний тиждень, його робоче місце в 1,5 м від джерела γ -випромінювання. З якою допустимою активністю джерела можна працювати без захисту?

Розв'язок.

За умовами завдання відомо, що робітник працює без захисту, тобто між ним та джерелом знаходиться шар повітря з $k=1$.

Використовуючи формулу (2.6), знаходимо m :

$$m = \frac{120kr^2}{t} = \frac{120 \cdot 1 \cdot 1,5^2}{36} = 7,5 \text{ мг-екв Ra.}$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $r = N_{\text{вар}}$, м, де $N_{\text{вар}}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 2. Дефектоскопіст впродовж 30 годин на тиждень працює з джерелом γ -випромінювання активністю 4 мг-екв Ra. Визначить допустиму відстань, на якій можна знаходитись дефектоскопісту вказаний час.

Розв'язок.

$k=1$, так як дефектоскопіст працює без захисту. З формули (2.6) знаходимо r :

$$r = \sqrt{\frac{mt}{120k}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 30}{120 \cdot 1}} = 1 \text{ м.}$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $m = 2N_{\text{вар}}$, мг-екв Ra, де $N_{\text{вар}}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 3. На відстані 0,3 м від джерела γ -випромінювання потужність експозиційної дози складає 40 мР/год. На якій відстані від джерела слід встановити дисциплінарну перегородку, щоб забезпечити роботу на протязі

36 годин на тиждень для персоналу? Прийняти гранично допустиму дозу для професійних робітників за тиждень 0,1 Р.

Розв'язок.

1. Визначимо потужність дози на відстані 1 см від джерела P_0 . Потужність дози зворотно пропорційна квадрату відстані, тому

$$P_1 = \frac{P_0}{R^2}, \text{ звідси: } P_0 = P_1 R^2 = 40 \cdot 10^{-3} \cdot 30^2 = 36 \text{ Р/год.}$$

2. Визначимо відстань до дисциплінарної перегородки. Використовуючи формулу (2.1):

$$R_2 = \sqrt{\frac{P_0 t}{0,1}} = \sqrt{\frac{36 \cdot 36}{0,1}} \approx 114 \text{ см}$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $R = 0,1 N_{\text{вар}}$, м, $P = 10 N_{\text{вар}}$, мР/год, де $N_{\text{вар}}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 4. Джерело з ефективною енергією 0,9 МеВ та γ -еквівалентом 0,1 г-екв радію розташоване на відстані 2 м від оператора. Який захист з заліза та цегли ($\rho_{\text{цегл.}} = 1,4 \text{ г/см}^3$) необхідно передбачити для професійного опромінення на протязі тижня (5 робочих днів) при 6-годинному робочому дні?

Розв'язок. Для того, щоб розрахувати товщину захисту з будь-якого матеріалу необхідно визначити кратність послаблення потоку випромінювання цим матеріалом (k) до допустимого рівня. Потім, знаючи k та ефективну енергію джерела, за «Універсальними таблицями для розрахунку захисту від γ -випромінювання» визначають товщину захисту з визначеного матеріалу (додатки 2-6).

1. Визначимо кратність послаблення випромінювання, використовуючи формулу (2.5). При цьому γ -еквівалент надати в мг-екв.

$$\text{Звідси } k = \frac{8,4mt}{0,1R^2} = \frac{8,4 \cdot 0,1 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 5}{0,1 \cdot 200^2} = 6,3$$

2. За таблицею «Товщина захисту із заліза ($\rho = 7,89 \text{ г/см}^3$) для різної кратності послаблення k γ -випромінювання» (Додаток 4) визначимо величину товщини залізного захисту. Ми знайшли, що $k=6,3$, але в таблиці маються тільки кратності послаблення 5 та 8, яким для $E=0,9 \text{ МеВ}$ відповідають товщини 6,1 см та 7,5 см. Для визначення товщини при $k=6,3$ проведемо лінійну інтерполяцію, попередньо позначив:

$$\begin{array}{ll} k_1=5 & d_1=6,1 \\ k_x=6,3 & d_x \\ k_2=8 & d_2=7,5 \end{array}$$

Тоді:

$$d_x = d_1 + \frac{d_2 - d_1}{k_2 - k_1} (k_x - k_1) = 6,1 + \frac{7,5 - 6,1}{8 - 5} (6,3 - 5) = 6,71 \text{ см}$$

3. Визначимо товщину захисту із цегли. Для цього скористаємось співвідношенням $\frac{d_1}{d_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ або в нашому випадку $\frac{d_{зал}}{d_{цегл}} = \frac{\rho_{цегл}}{\rho_{зал}}$. Звідси

$$d_{цегл} = \frac{d_{зал} \rho_{зал}}{\rho_{цегл}} = \frac{6,71 \cdot 7,89}{1,4} = 37,8 \text{ см}$$

Таким чином, зі зменшенням щільності матеріалу захисту збільшується його товщина.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $E = 0,1N_{вар}$, MeB, $m = 0,1N_{вар}$, г-екв радію, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 5. Визначить необхідну товщину захисту з бетону, якщо на відстані 3 метрів від оператора знаходиться джерело ^{47}Ca з активністю 2 Кі. Тривалість роботи 4 години при 6-дневому робочому тижні.

Розв'язок.

1. Визначимо кратність послаблення випромінювання, використовуючи формулу (2.2).

$$\text{Звідси } k = \frac{K_\gamma Q t}{0,1R^2}$$

Невідому величину K_γ знаходимо за таблицею «Характеристики деяких радіоактивних нуклідів як γ -випромінювачів» (Додаток 1). Для ^{47}Ca дорівнює

$$K_\gamma = 5,14 \frac{P \cdot \text{см}^2}{\text{год} \cdot \text{мКи}}. \text{ Тоді } k = \frac{5,14 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 6}{0,1 \cdot 300^2} = 27,4$$

2. Визначимо товщину захисту з бетону. Для цього необхідно знати ефективну енергію γ -квантів. Її оптимальне значення визначимо з Додатку 1 як відповідну максимальному виходу γ -квантів на один розпад, тобто 1,29 MeB, що відповідає 71% виходу. В таблиці «Товщина захисту з бетону...» (Додаток 3) не наведені такі величини енергії та кратності послаблення. Для збільшення міцності захисту приймемо, що енергія γ -квантів більше, тобто не 1,29, а 1,5 MeB, тоді лінійну інтерполяцію проводимо тільки за k .

$$\begin{aligned} k_1 &= 20 & d_1 &= 42,5 \\ k_x &= 27,4 & d_x & \\ k_2 &= 30 & d_2 &= 46,5 \end{aligned}$$

$$\text{Тоді: } d_x = d_1 + \frac{d_2 - d_1}{k_2 - k_1} (k_x - k_1) = 42,5 + \frac{46,5 - 42,5}{30 - 20} (27,4 - 20) = 45,5 \text{ см}$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $Q = 0,5N_{вар}$, Кі,

$R = 2N_{вар}$, м, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 6. До пункту, який знаходиться на відстані 250 км від заводу, транспортується на автомашині джерело активністю 610 мКі з ефективною енергією 1,5 МеВ та γ -еквівалентом 2,0 мг-екв Ra на 1 мКі. Джерело знаходиться на відстані 0,5 м від водія. Середня швидкість автомобілю 50 км/год. Визначить необхідну товщину стінки свинцевого контейнеру, якщо доза при перевезенні не повинна перевищувати денної дози професійного опромінення.

Розв'язок. Час перебування водія близько джерела дорівнює часу руху автомобіля, тобто $250/50=5$ годин.

1. Визначимо кратність послаблення випромінювання. Для цього необхідно знати або Q та K_γ , або m . Так як нам невідомо яке джерело транспортується, то визначити K_γ неможливо. Виходячи з даних, що маємо визначимо m із пропорції:

2,0 мг-екв Ra – 1 мКі

m мг-екв Ra – 610 мКі

$$m \frac{2 \cdot 610}{1} = 1220 \text{ мг-екв Ra.}$$

$$\text{Тоді } k = \frac{8,4mt}{0,1R^2} = \frac{8,4 \cdot 1220 \cdot 5}{0,1 \cdot 50^2} = 205$$

2. Визначимо товщину захисту із свинцю (Додаток б).

Так як $k=205$ (можна привести до $2 \cdot 10^2$), то $d_{Pb}=11,1$ см.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $L = 50N_{вар}$, км;

$m = 100N_{вар}$, мКі, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). γ -еквівалент джерела 2,0 мг-екв Ra на 1 мКі. Інші значення наведено в прикладі.

Контрольні запитання:

1. Методика розрахунку дози зовнішнього опромінення у випадку фотонних випромінювань.

2. Що таке гама-еквівалент радію?

3. Особливості розрахунку дози якщо активність джерела надано в мг-екв Ra.

4. Визначення коефіцієнта послаблення випромінювання.

5. Які захисні екрани використовуються для послаблення дії випромінювання?

ПРАКТИЧНА РОБОТА №3 РАДІОАКТИВНІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: ознайомитися з методами визначення та розрахунку радіоактивності будівельних матеріалів.

3.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.

Радіоактивність будівельних матеріалів перш за все обумовлена наявністю ізотопів ^{223}Ra , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{40}K . Радіоактивність будівельного каміння залежить від використаної для його виробництва гірничої породи, місця видобутку сировини та відходів промисловості, які застосовують в якості заповнювачів.

Попередня гігієнічна оцінка будівельних матеріалів може бути встановлена за величиною питомої активності $C_{\text{еф}}$:

$$C_{\text{еф}} = C_{\text{Ra}} + 1,31C_{\text{Th}} + 0,085C_{\text{K}} \quad (3.1)$$

де C_{Ra} , C_{Th} , C_{K} – питомі активності радію, торію і калію відповідно; 1,31 і 0,085 – зважені коефіцієнти торія-232 і калія-40 відповідно по відношенню до радію-226.

Повний перелік класів радіаційної небезпеки відходів в залежності від галузі їх застосування наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Критерії використання відходів в залежності від величини ефективної питомої активності

Клас відходів	$C_{\text{еф}}$, Бк/кг	Галузь застосування
I	$C_{\text{еф}} < 370$	Без обмежень у будівництві
II	$370 < C_{\text{еф}} < 740$	У промисловому та дорожньому будівництві, поза житловою зоною у якості заповнювача бетонів та залізобетонів
III	$740 < C_{\text{еф}} < 2240$	У промислових зонах, поза населених пунктів, для будівництва дамб
IV	$2240 < C_{\text{еф}} < 3700$	У регіонах їх отримання, для будівництва дамб, хвостосховищ й закладки виробок
V	$C_{\text{еф}} > 3700$	Тільки для захоронення і закриття гірничих виробок

Річна ефективна еквівалентна доза γ -випромінювання (мкЗв/рік) для людей, які живуть в сучасних кам'яних будівлях, оцінюються за формулою:

$$D_{\text{прим.}} = 4,74 \overline{C_{\text{еф}}} \quad (3.2)$$

де $\overline{C_{ef.}}$ – середня ефективна питома активність природних радіонуклідів у будівельних конструкціях, які виготовлені з різних матеріалів:

$$\overline{C_{ef.}} = \frac{\sum_i (C_{ef.})_i m_i}{\sum_i m_i}, \text{ Бк/кг} \quad (3.3)$$

де $(C_{ef.})_i$ – ефективна питома активність природних радіонуклідів в різних будівельних матеріалах; m_i – маса будівельного матеріалу.

Для будматеріалів, які використовуються в СНД: $\overline{C_{ef.}} = 93 \text{ Бк/кг}$.

Потужність дози γ -випромінювання в цегляних та бетонних будівлях складає 0,05-0,07 мкГр/год. За рахунок геометрії опромінення доза зовнішнього опромінення на відкритій місцевості менша приблизно на 0,2-0,3 дози зовнішнього опромінення людини, яка проводить більшу частину часу в кам'яних приміщеннях.

Розмір дози, що одержана за рахунок γ -випромінювання природних радіонуклідів будівельних матеріалів розраховується за формулою:

$$\Delta D = D_{прим} - 305, \text{ мкЗв/рік}, \quad (3.4)$$

де 305 мкЗв/рік – це доза, яку отримали б люди, якщо цілий рік знаходились на відкритій місцевості для географічних широт України.

Заміна будівельних матеріалів з підвищеною радіоактивністю на альтернативні є доцільною, якщо дотримується нерівність:

$$0,0095[(C_{ef.})_0 - (C_{ef.})_i] \geq (x_i - x_0), \quad (3.5)$$

де x_i та x_0 – вартість однієї тони альтернативного матеріалу та матеріалу, який замінюють, враховуючи вартість їхнього виробництва та транспортування, грн./т (умовні грошові одиниці).

Величину середньої тканинної дози людини, що обумовлена вдиханням радону, можна оцінити за допомогою рівняння:

$$D_{Rn-222} = 5 \cdot 10^{14} C_{Rn-222} \cdot \text{бер/рік}, \quad (3.6)$$

де C – концентрація еманцій, Кі/л.

При використанні цього співвідношення приймаються наступні вимоги: концентрація радону у повітрі, що вдихується постійна; радон знаходиться у рівновазі зі своїми дочірніми продуктами розпаду; у легенях людини затримується біля 60% аерозольних часток, що несуть радіоактивні продукти розпаду радону; об'єм легені дорівнює 3000 см³, а маса 800 г.

У випадку з вентилятованими забудовами із повним об'ємом, при цьому за 1 секунду змінюється 0,001 об'єму повітря, використовують рівняння:

$$D_{Rn-222} = 1,4 \cdot 10^{14} C_{Rn-222} \cdot \text{бер/рік}, \quad (3.7)$$

3.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. Розрахуйте дозу γ -опромінення людей, які живуть в будівлі, побудованій із 2 т цегли з $C_{\text{еф.}}=130$ Бк/кг, 10 т бетону з $C_{\text{еф.}}=210$ Бк/кг та 6 т будівельного розчину з $C_{\text{еф.}}=80$ Бк/кг.

Розв'язок.

1. Визначимо середню ефективну питому активність природних радіонуклідів для будівельної конструкції:

$$\overline{C_{\text{еф.}}} = \frac{\sum_i (C_{\text{еф.}})_i m_i}{\sum_i m_i} = \frac{130 \cdot 2 + 210 \cdot 10 + 80 \cdot 6}{2 + 10 + 6} = 158 \text{ Бк/кг.}$$

2. Розрахуємо $D_{\text{прим.}}$:

$$D_{\text{прим.}} = 4,74 \overline{C_{\text{еф.}}} = 4,74 \cdot 158 = 749 \text{ мкЗв/рік.}$$

Вихідні дані для виконання роботи: $m_{\text{цегла}} = N_{\text{вар}}$, т; $m_{\text{бетон}} = 5N_{\text{вар}}$, т; $m_{\text{будроз}} = 3N_{\text{вар}}$, т, де $N_{\text{вар}}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 2. Визначить чи доцільна заміна будівельного матеріалу з $C_{\text{еф.}}$, яка перевищує норматив $(C_{\text{еф.}})_0=200$ Бк/кг для матеріалів, які використовуються в житловому будівництві, на матеріал з $C_{\text{еф.}}=89$ Бк/кг.

Розв'язок.

Доцільність заміни будівельного матеріалу визначимо за нерівністю

$$0,0095[(C_{\text{еф.}})_0 - (C_{\text{еф.}})_i] \geq (x_i - x_0)$$

$$0,0095[200 - 89] \geq (x_i - x_0)$$

$$1,05 \geq (x_i - x_0)$$

Таким чином, заміна є доцільною та витрати на неї виправдані, якщо вартість альтернативного матеріалу перевищує вартість вихідного не більше, ніж на 1 гривню 5 коп. за 1 тону.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $C_{\text{еф.}} = 70 + 5N_{\text{вар}}$, Бк/кг, де $N_{\text{вар}}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Контрольні запитання:

1. Якими ізотопами обумовлена радіоактивність будівельних матеріалів?
2. Як визначається питома активність і для яких цілей?
3. Методика оцінки річної ефективної еквівалентної дози γ -випромінювання.
4. Доза опромінення на відкритій місцевості.
5. Розрахунок дози, що одержана за рахунок γ -випромінювання

природних радіонуклідів будівельних матеріалів.

6. Визначення доцільності заміни будівельних матеріалів з підвищеною радіоактивністю на альтернативні.

7. Що таке радон та його вплив на людину.

8. Методика визначення дози, що обумовлено вдиханням радону.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4 МЕТОДИ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ МІГРАЦІЇ ШТУЧНИХ РАДІОНУКЛІДІВ ЗА ТРОФІЧНИМИ РІВНЯМИ

Мета роботи: ознайомитися з методами кількісної оцінки міграції штучних радіонуклідів за трофічними рівнями.

4.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.

Розроблено ряд кількісних характеристик, що застосовуються для оцінки переходу радіонуклідів за трофічними рівнями. Опишемо основні з них.

Вміст радіонукліда – це кількість радіонукліда у всьому органі, його виражають в долях K_i на орган.

Концентрація – це кількість радіонукліда у ваговій частині органу, виражається в мкКі/кг сирової тканини.

Кратність накопичення F (КН) рівна відношенню кількості радіонукліда на трофічному рівні до його кількості на попередньому рівні:

$$F = \frac{q_n}{q_{n-1}} = \frac{C_n m_n}{C_{n-1} m_{n-1}} \quad (4.1)$$

Розглянемо перехід радіонукліда з корму в організм тварини. При тривалому дозованому надходженні в організм з кормом радіонуклід накопичується в органі в кількості, кратній добовій дозі. Його вміст в органі виражають кратністю накопичення – величиною, що показує в скільки разів вміст радіонукліда в органі перевищує дозу, що щодоби вводиться, або яку частину останньої вона складає:

$$F = \frac{C_p m}{q}, \quad (4.2)$$

де C_p – концентрація радіонукліда в органі, мкКі/кг; m – маса органу, кг; q – кількість радіонукліда, що щодня поступає в організм, мкКі.

Межа допустимого вмісту радіонукліда (A) в раціоні тварин:

$$A = \frac{C_{сер} m}{F}, \text{ мкКі}, \quad (4.3)$$

де $C_{сер}$ – середня допустима концентрація радіонукліда в харчовому продукті, мкКі/кг; m – маса продукту (м'язова або кісткова тканина), кг; F – КН в скелеті або м'язах.

Коефіцієнт концентрації (накопичення) (КК) застосовується для оцінки накопичення радіонуклідів в природних умовах. КК – це відношення концентрацій радіонукліда на трофічному рівні до його концентрації на попередньому рівні:

$$KK = \frac{C_n}{C_{n-1}} \quad (4.4)$$

Для тварин, визначаючи КК, зазвичай співвідносять концентрацію радіонукліда в критичному органі тварини до його концентрації в їжі. Концентрація радіонукліда в рослинах, як правило, вище аналогічного для ґрунту, отже, $KK > 1$.

На підставі КК можна судити про закономірності міграції елементів по трофічних рівнях, а по характеру накопичення радіоактивних елементів наземними тваринами їх можна розділити на три зоогеохімічні групи.

Накопичувачі містять елемент, що вивчається, в більшій концентрації, чим в харчовому субстраті ($KK \gg 1$);

Розсіювачі містять елемент в однаковій з харчовим субстратом концентрації ($KK \approx 1$);

Очищувачі містять елемент в меншій концентрації, чим харчовий субстрат ($KK < 1$), і сприяють «очищенню» харчового ланцюга від досліджуваного елементу.

Відзначимо істотну обставину, що при міграції радіонуклідів по трофічних рівнях великий вплив на концентрацію їх в органах і тканинах надають ізотопні і неізотопні носії.

Ізотопний носій – це стабільний ізотоп даного елементу, хімічні властивості якого тотожні його радіоактивному ізотопу. Наприклад, стабільний ^{31}P і радіоактивний ^{32}P .

Неізотопний носій – це стабільний ізотоп хімічного аналога елементу, який лише аналогічний по групових хімічних властивостях радіонукліду. Наприклад, Са – неізотопний носій по відношенню до $^{89}, ^{90}\text{Sr}$; К – по відношенню до $^{134}, ^{137}\text{Cs}$. Оскільки ці елементи близькі за своїми хімічними властивостями, то вони беруть участь в одних і тих же обмінних процесах. Тому ввели поняття про стронцієву і цезієву одиниці.

Стронцієва одиниця – це відношення вмісту в зразку ^{90}Sr , вираженого в пКі, до маси в цьому зразку Са в грамах. Або 1 пКі ^{90}Sr на 1 г Са рівний 1 с.о.

Цезієва одиниця – це відношення активності ^{137}Cs в пКі до маси К в грамах. Або 1 ц.о.=1 пКі ^{137}Cs на 1 г К.

У певних ситуаціях між цими ізотопами існують і конкурентні відносини. Наприклад, переважне засвоєння Са в збиток ^{90}Sr або відносно більше виведення ^{90}Sr з організму, чим Са.

Тому ^{90}Sr в скелеті тварини відкладається в іншому співвідношенні, чим

Ca. Кальцій при переході з кормів в органи тварини, як би захищає організм від ^{90}Sr , тобто відбувається його утиск, дискримінація. Зрозуміло, що при переході з ґрунту в рослини дискримінація радіонуклідів відчутна, при листовому засвоєнні – практично відсутня.

Коефіцієнт дискримінації – це величина, що показує, наскільки зміниться вміст ^{90}Sr або ^{137}Cs по відношенню до Ca або K під час переходу їх на подальший трофічний рівень, наприклад, з ґрунту в рослину:

$$K_{\partial} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_n \div \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{n-1}, \quad (4.5)$$

де K_{∂} – коефіцієнт дискримінації; C – концентрація елементу.

Чим менше K_{∂} , тим більше виражена дискримінація.

Іноді замість K_{∂} вживають поняття «спостережуване відношення». Його використовують для характеристики сумарного впливу дискримінаційних актів, наприклад, на відрізок міграційного ланцюга від ґрунту до тварини:

$$CB = (K_{\partial})_1 (K_{\partial})_2 \cdots (K_{\partial})_n \quad (4.6)$$

Зворотна величина CB названа **захисним коефіцієнтом K_3** :

$$K_3 = \frac{1}{CB} \quad (4.7)$$

Він характеризує ступінь зниження відносного вмісту радіонукліда при його пересуванні по міграційних шляхах.

Комплексний показник (КП) дає можливість визначити накопичення ^{90}Sr в рослинах. При визначенні КП вміст стронцію-90 в мКі на 1 км² ділять на кількість обмінного кальцію в мг-екв на 100 г ґрунту, після чого кількість стронцієвих одиниць в рослинах ділять на цю величину.

Визначення такого показника як КП було запропоноване В.М. Ключковським у 1969 р. Значення комплексного показника, експериментально визначеного в дослідях, приведені в табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Величина КП для деяких видів сільськогосподарської продукції

Вид продукції	Середнє значення КП
Сіно: природних луків	60
конюшини	15
люцерна	12
Силосні культури і солома зернових і зернобобових культур	14
Зерно злакових і зернобобових культур	9

Окремо зупинимося на радіоактивному забрудненні рослин при

глобальних опадах. Глобальні радіоактивні випадання характеризуються тривалою дією, при цьому відбувається забруднення рослин по двох шляхах: кореневому і через атмосферні опади. Надходження радіонуклідів в сільськогосподарську продукцію можна виразити співвідношенням:

$$C = K_e S + K_n d \quad (4.8)$$

де C – концентрація радіонукліда в рослинах; S – кумулятивний вміст радіонуклідів в ґрунті; d – інтенсивність випадань радіонукліда; K_e і K_n – ґрунтовий і повітряний коефіцієнти пропорційності, що визначаються емпірично.

Величина K_e різна для різних видів рослин і типів ґрунтів. K_e для ^{90}Sr залежить від вмісту Ca в ґрунті. K_e визначають за формулою Клечковського-Архіпова, що зв'язує концентрацію радіонуклідів Sr в рослинній продукції з щільністю забруднення ґрунту і вмістом стабільного Ca в ґрунті і рослинності:

$$C = \frac{K C a_p S}{C a_2} \quad (4.9)$$

$$K_e = C/S \quad (4.10)$$

де C – концентрація радіоактивного Sr в рослинному зразку (пКі/кг); $C a_p$ – концентрація Ca в рослинному зразку (г/кг сухої речовини); S – щільність забруднення ґрунту радіостронцієм (мКі/км²); $C a_2$ – концентрація Ca в ґрунті (мг-екв/100 г ґрунту); K – коефіцієнт забруднення, залежний від типу рослинності.

Дана формула дозволяє виразити ґрунтовий коефіцієнт K_e у вигляді:

$$K_e = \frac{K C a_p}{C a_2} \quad (4.11)$$

Для оцінки величини K_n доцільно використовувати середньомісячну щільність опадів радіоізоотопів протягом вегетаційного сезону. Для різних видів рослинності K_n визначають за співвідношенням:

$$K_n = \frac{10^9 R n}{m} \quad (4.12)$$

де R – частка опадів, що затримуються рослинністю, займаною одиницею площі, від кумулятивних опадів на цю одиницю площі з початку вегетації; n – період експозиції (місяць); m – запас біомаси зразка на одиницю площі в кг сухої речовини на км².

4.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. Визначити кратність накопичення, коефіцієнт концентрації і межу допустимого вмісту при накопиченні ^{90}Sr твариною, загальна маса

скелета якого 28 кг. Стронцій щодня поступає з рослинним кормом масою 6 кг і середньою концентрацією радіонукліда 165 пКі/кг. Концентрація ^{90}Sr в кістковій тканині тварини 0,0085 мкКі/кг, а середня допустима його концентрація – 96 пКі/кг.

Розв’язок.

1. Для розрахунку кратності накопичення F (КН) використовуємо відношення (4.1). Оскільки в даному випадку радіонуклід ^{90}Sr переходить з трофічного рівня – трави на трофічний рівень – організм тварини (скелет), то можна записати, що:

$$F = \frac{q_{ск}}{q_{тр}} = \frac{C_{ск}m_{ск}}{C_{тр}m_{тр}} = \frac{8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 \cdot 28}{165 \cdot 6} = 240$$

Чисельник помножили на 10^6 для переведення одиниць вимірювання $C_{ск}$ в пКі/кг.

2. Для розрахунку коефіцієнта концентрації KK використовуємо відношення:

$$KK = \frac{C_n}{C_{n-1}} = \frac{C_{ск}}{C_{тр}} = \frac{8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{165} = 51,5.$$

Оскільки значення $KK > 1$, то тварина відноситься до накопичувачів.

3. Розрахунок межі допустимого вмісту проводимо за формулою:

$$A = \frac{C_{сер}m}{F} = \frac{96 \cdot 28}{240} = 11,2 \text{ пКі або } 11,2 \cdot 10^{-6} \text{ мкКі.}$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $m_{ск} = 25 + 2N_{вар}$, кг;
 $m_{тр} = 3 + 2N_{вар}$, кг, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 2. Визначить кратність накопичення і коефіцієнт концентрації під час надходження радіонукліда ^{131}I з ґрунту в рослину. При проведенні експерименту в масі ґрунту 1,5 кг була визначена концентрація ^{131}I 220 пКі/кг, а в зеленій траві масою 2 кг концентрація ^{131}I складала 0,16 пКі/г.

Розв’язок.

1. Розрахунок кратності накопичення проводимо за формулою:

$$F = \frac{q_{тр}}{q_2} = \frac{C_{тр}m_{тр}}{C_2m_2} = \frac{0,16 \cdot 10^3 \cdot 2}{220 \cdot 1,5} = 0,97$$

Чисельник помножили на 10^3 для переводу одиниць вимірювання $C_{тр}$ в пКі/кг.

2. Розрахунок коефіцієнта концентрації проводимо за формулою:

$$KK = \frac{C_n}{C_{n-1}} = \frac{C_{тр}}{C_2} = \frac{0,16 \cdot 10^3}{220} = 0,73$$

Значення KK менше одиниці, тому трав'яну рослинність можна віднести до очищувачів.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $C_2 = 200 + 3N_{вар}$, пКі/кг;
 $C_{тр} = 0,15 + 0,01N_{вар}$, пКі/г;, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 3. Для яких ланок харчового ланцюга дискримінація виражена сильніше, якщо експериментально визначені концентрації C_s (пКі/кг) і K (г/кг) наступні: $[C_s]_{грунт} = 26,6$; $[C_s]_{росл.} = 120$; $[C_s]_{м'язи\ людини} = 17$; $[K]_{грунт} = 0,4$; $[K]_{росл.} = 30$; $[K]_{м'язи\ людини} = 2,36$.

Розв'язок. Цезій пересувається по харчовому ланцюгу ґрунти – рослина – людина, накопичуючись в кінцевій ланці – м'язовій тканині людини. Можна розрахувати два коефіцієнти дискримінації: $K_{\partial 1}$ – для переходу C_s ґрунт–рослина і $K_{\partial 2}$ – для переходу рослина–м'язова тканина людини. Розрахунок K_{∂} проводимо за формулою (4.5):

1. Коефіцієнти дискримінації: $K_{\partial 1}$ – для переходу C_s ґрунт–рослина:

$$K_{\partial 1} = \frac{[C_s]_{росл.}}{[K]_{росл.}} \div \frac{[C_s]_{грунт}}{[K]_{грунт}} = \frac{120}{30} \div \frac{26,6}{0,4} \approx 0,06$$

2. Коефіцієнти дискримінації: $K_{\partial 2}$ – для переходу рослина–м'язова тканина людини:

$$K_{\partial 2} = \frac{[C_s]_{м'язи}}{[K]_{м'язи}} \div \frac{[C_s]_{росл.}}{[K]_{росл.}} = \frac{17}{2,36} \div \frac{120}{30} \approx 1,62$$

Дискримінація C_s по відношенню до K виражена сильніше при переході з ґрунту в рослини.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $[C]_{грунт} = 20 + 0,1N_{вар}$, пКі/кг; $[C]_{росл.} = 100 + 4N_{вар}$, пКі/кг; $[C]_{м'язи} = 15 + 0,1N_{вар}$, пКі/кг;, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 4. Порівняйте накопичення ^{90}Sr в сіні конюшини і соломі зернобобових культур, якщо в ґрунті міститься 29 мКі $^{90}\text{Sr}/\text{км}^2$ і 8,5 мг-екв $\text{Ca}/100$ г ґрунту.

Розв'язок.

1. Значення комплексних показників ($KП$) для сіна конюшини і соломі зернобобових узяті з табл. 4.1: $KП_k = 15$, $KП_c = 14$.

Величина $KП$ визначається як:

$$KП = \frac{(c.o.)_{росл.}[Ca]_e}{[Sr]_e}$$

тоді рівень забруднення рослинної продукції (с.о.) можна виразити таким

чином:

$$(c.o.)_{\text{посл}} = \frac{KП[Sr]_e}{[Ca]_e}$$

2. Стронцієві одиниці (с.о.) в сінї конюшини і соломї зернобобових культур:

$$(c.o.)_k = \frac{KП_k[Sr]_e}{[Ca]_e} = \frac{15 \cdot 29}{8,5} \approx 51,2 \text{ с.о.}$$

$$(c.o.)_c = \frac{KП_c[Sr]_e}{[Ca]_e} = \frac{14 \cdot 29}{8,5} \approx 47,8 \text{ с.о.}$$

Таким чином, ступінь забруднення конюшини вищий, ніж зернобобових культур.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $[Sr]_e = 20 + N_{\text{вар}}$, мКі $^{90}\text{Sr}/\text{км}^2$; $[Ca]_e = 8,5 + 0,01N_{\text{вар}}$, мг-екв Са/100 г ґрунту, де $N_{\text{вар}}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (потоку). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 5. Розрахуйте концентрацію ^{90}Sr в рослинному зразку, якщо надходження радіонукліда здійснювалося через ґрунт, щільність забруднення якого радіостронцієм складає $0,09 \text{ мКі}/\text{км}^2$. Вміст кальцію в ґрунті $0,12 \text{ мг-екв}/100 \text{ г}$ ґрунту, в рослинній продукції – $21 \text{ г}/\text{кг}$. Коефіцієнт забруднення даної рослинності рівний $0,37$.

Розв'язок.

Надходження ^{90}Sr в сільськогосподарську продукцію можна виразити співвідношенням: $C_{Sr} = K_e S + K_n d$, якщо реалізується ґрунтовий шлях міграції стронцію через кореневу систему і повітряний шлях через відкладення на листі. У даному випадку ^{90}Sr поступає тільки через коріння рослини, тому $C_{Sr} = K_e S$.

1. Ґрунтовий коефіцієнт K_e можна визначити за формулою *Архінова-Клечковського*:

$$K_e = \frac{[Ca]_{\text{посл}} K}{[Ca]_{\text{ґрунт}}} = \frac{21 \cdot 0,37}{0,12} = 64,75$$

2. Тоді $C_{Sr} = K_e S = 64,75 \cdot 0,09 = 5,83 \text{ пКі}/\text{кг}$.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $S = 0,09 + 0,01N_{\text{вар}}$, мКі/км²; $K = 0,37 + 0,01N_{\text{вар}}$, де $N_{\text{вар}}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (потоку). Інші значення наведено в прикладі.

Контрольні питання

1. Дайте визначення термінам «вміст радіонукліда» та «концентрація».

2. Як розраховується кратність накопичення?
3. Визначення межі допустимого вмісту радіонукліда.
4. Розрахунок коефіцієнту концентрації.
5. Назвіть зоогеохімічні групи в залежності від значення коефіцієнту концентрації.
6. Що таке ізотопні та неізотопні носії?
7. Дайте визначення терміну «стронцієва одиниця».
8. Дайте визначення терміну «цезієва одиниця».
9. Визначення коефіцієнту дискримінації.
10. Дайте визначення терміну «спостережуване відношення» та його зворотна величина.
11. Розрахунок комплексного показника.
12. Радіоактивне забруднення рослин при глобальних опадах.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5 ПРОГНОЗУВАННЯ ВІРОГІДНОГО РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ

Мета роботи: ознайомитися з методами прогнозування вірогідного рівня забруднення об'єктів довкілля радіонуклідами.

5.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.

Рівень забруднення ґрунту. Кількість радіоактивних ізотопів Cs, Sr, I, що осіли на поверхню ґрунту, розраховується за рівнянням:

$$A = \frac{0,693 EY}{TDSP} \quad (5.1)$$

де A – щільність радіоактивного забруднення ґрунту ізотопами, пКі/м²; $E=1,43 \cdot 10^{23}$ – число ділень ²³⁵U на 1 кг; Y – частка ізотопу при діленні %; T – період напіврозпаду, діб; $D=3,2 \cdot 10^3$ – кількість розпадів в добу, що відповідає 1 пКі; $C=10^6$ м²/км²; $P=11,7 \cdot 10^4$ мР/год на 1 кг/км² на висоті 1 м над землею у момент $t+24$.

Вірогідний рівень концентрації радіонукліда в тканинах рослини в будь-який термін після випадання можна оцінити за допомогою наступного рівняння:

$$P_t = P_0 e^{-\lambda_p t}, \quad (5.2)$$

де P_t – концентрація радіонукліда в рослині, пКі/г сухої речовини; P_0 – початкова концентрація радіонукліда в рослині; $\lambda_p = 0,693/T_p$; $T_p=T_{эф}$ – напіввиведення ізотопу з рослини: для ⁸⁹Sr $T_p=18$ діб, для ¹³¹I $T_p= 5,5$ діб; t – дні після випадання радіоактивних речовин.

Концентрація ⁸⁹Sr в кістковій тканині травоядних тварин:

$$A_k = \frac{P_0 Q_D f_{Sr} (K_1 + K_2)}{Q_k}, \quad (5.3)$$

де A_k – питома активність кісткової золи, пКі/г золи; Q_D – маса корму тварини за добу, г; Q_k – маса золи кісток однієї тварини, г; f_{Sr} – частка ^{89}Sr , що поглинена і відклався в критичній тканині (органі). Для людини $f_{Sr}=0,03$. Для великої рогатої худоби $f_{Sr}=0,01$; $\lambda_k = 0,693/T_k$; $T_k = T_{ef}$ – напіввиведення ізотопу ^{89}Sr з кістки: кролика $T_k=20$ діб; для великої рогатої худоби $T_k=52$ доби; для людини $T_k=50,4$ дні;

$$K_1 = \frac{e^{-\lambda_p t}}{\lambda_k - \lambda_p} \quad \text{та} \quad K_2 = \frac{e^{-\lambda_k t}}{\lambda_p - \lambda_k}$$

Концентрація йоду в щитовидній залозі тварин може бути знайдена за рівнянням:

$$A_q = P_0 Q_p f_q (K_3 + K_4), \quad (5.4)$$

де A_q – вміст ^{131}I у всій щитовидній залозі при $t>0$, пКі; f_q – частка ^{131}I , що поглинений і відклався в щитовидній залозі: для людини $f_q=0,2$; для великої рогатої худоби $f_q=0,4$; для свині $f_q=0,2$; для овець $f_q=0,1$; $\lambda_q = 0,693/T_q$; $T_q = T_{ef}$ – для щитовидної залози;

$$K_3 = \frac{e^{-\lambda_p t}}{\lambda_q - \lambda_p} \quad \text{та} \quad K_4 = \frac{e^{-\lambda_q t}}{\lambda_p - \lambda_q}$$

Вірогідний ступінь забруднення молока корів, які випасаються на сліді радіоактивної хмари, ізотопами ^{90}S , ^{137}Cs , ^{131}I :

$$L_t = P_0 N_L f_L (K_5 + K_6), \quad (5.5)$$

де L_t – питома активність молока, пКі/мл; N_L – відношення маси сухого корму, що з'їдається за день, до добового об'єму молока, г/мл. Зазвичай $N_L=1,4$ г/мл·доб; f_L – частка ізотопу, що виділяється з молоком корови, від його загальної кількості, що потрапила в тіло. Для Sr $f_L=0,02$; для I $f_L=0,01-0,06$; $\lambda_L = 0,693/T_m$; $T_m = T_{ef}$ – зниження концентрації ізотопу в молоці корів. Для ^{89}Sr $T_L=2,5$ днів; для ^{131}I $T_L=2$ дні;

$$K_5 = \frac{e^{-\lambda_p t}}{\lambda_L - \lambda_p} \quad \text{та} \quad K_6 = \frac{e^{-\lambda_L t}}{\lambda_p - \lambda_L}$$

Вміст ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{131}I в критичних тканинах людини, що вживає молоко:

$$A_t = P_0 N_L f_L N_t f_t (K_7 + K_8 + K_9), \quad (5.6)$$

де A_t – питома активність тканини або критичного органу людини, пКі/г; N_t – відношення об'єму молока, споживаного в добу, до маси органу або тканини людини, мл/г·добу: для дітей N_t $^{89}\text{Sr}=0,14$ мл/г добу; N_t $^{131}\text{I}=500$ мл/г·добу; для дорослих N_t $^{89}\text{Sr}=0,14$ мл/г·добу; N_t $^{131}\text{I}=50$ мл/г·добу; f_t – частка

нукліда, що поглинається та відкладається в тканині або критичному органі людини: для ^{89}Sr $f_t=0,21$; для ^{131}I $f_t=0,30$; $\lambda_t = 0,693/T_{\text{еф}}$; $T_{\text{еф}}$ – ефективний період напіввиведення ізотопу з критичного органу людини: для ^{89}Sr $T_{\text{еф}}=50,4$ дня; для ^{131}I $T_{\text{еф}}=7,5$ дня;

$$K_7 = \frac{e^{-\lambda_p t}}{(\lambda_L - \lambda_p)(\lambda_t - \lambda_p)}, \quad K_8 = \frac{e^{-\lambda_L t}}{(\lambda_p - \lambda_L)(\lambda_t - \lambda_L)}, \quad K_8 = \frac{e^{-\lambda_t t}}{(\lambda_p - \lambda_t)(\lambda_L - \lambda_t)}$$

Для зручності користування в практичних цілях цими математичними моделями доцільно побудувати номограми, для яких, задаючись певними початковими параметрами (P_0), можна побудувати криві, що відображають весь хід змін концентрації радіонуклідів в біосубстратах в часі. Результати такого розрахунку, в якому було прийнято, що початкова щільність забруднення рослин P_0 $^{87}\text{Sr}=100$ пКі/г, P_0 $^{131}\text{I}=400$ пКі/г, представлені на номограмах (додаток 7 та 8). Для інших значень P_0 відповідні величини P_t , L_t , A_t і A_q пропорційно змінюватимуться. При використанні тих же характеристик ефективних періодів напіввиведення, але інших значень N_L , N_t , f_L і f_t виходитимуть величини, пропорційно великі або менші приведених на номограмах значень L_t і A_t .

5.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. Розрахуйте концентрацію ^{89}Sr в пасовищних трав'янистих рослинах через 80 діб після радіоактивного випадання, якщо початкова концентрація ^{89}Sr в рослинах 131 пКі/г.

Розв'язок.

За номограмою (додаток 8) визначимо рівень забруднення стронцієм при початковій концентрації $P_0=100$ пКі/г. Для цього відновимо перпендикуляр з точки $t=80$ діб до перетину з кривою P_t , потім опустимо перпендикуляр на вісь $\lg P_t$. Значення $\lg P_t$ лежить між 3 і 4. Для точнішого його визначення проведемо лінійну інтерполяцію. На великомасштабній номограмі одна одиниця $\lg P_t$ відповідає 21,8 см, тоді:

$$21,8 \text{ см} - 1$$

$$14,7 \text{ см} - x$$

$$\text{або } x = \frac{14,7 \cdot 1}{21,8} = 0,67. \text{ Звідси } \lg P_t = 3 + 0,67 = 3,67.$$

При використанні номограми іншого масштабу пропорція міняється, а саме пропорційно зменшуються значення 21,8 см і 14,7 см. Розмірність P_t вказана на осі OY .

Знаходимо P_t за значенням антилогарифму:

$$P_t = 10^{3,67} = 4677,4 \text{ пКі/кг.}$$

Номограма побудована для значення $P_0=100$ пКі/кг, в нашому випадку P_t

пропорційно змінюється:

$$P'_t = P_t \frac{P'_0}{P_0} = 4677,4 \frac{131}{100} = 6127,4 \text{ пКі/кг.}$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $t = 10 + 10N_{вар}$, діб;
 $P'_0 = 120 + 3N_{вар}$, пКі/г, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 2. Встановіть вірогідний ступінь забруднення молока корів радіоїодом через 30 діб після радіоактивного забруднення при початковій концентрації ^{131}I в рослинах пасовища 418 пКі/г і значенні відношення маси сухого корму, що з'їдається за день, до сухого об'єму молока 1,19 г/мл·добу.

Розв'язок.

За номограмою (додаток 7) визначимо рівень забруднення молока йодом-131 через 30 діб при початковій концентрації радіонукліда 400 пКі/г. При опусканні перпендикуляра на вісь OY набуваємо значення $\lg L_t$ між 4 і 5.

Точне значення дає лінійна інтерполяція: $\lg L_t = 4,75$. Звідси:

$$L_t = 10^{4,75} = 56234 \text{ пКі/кг.}$$

Значення L_t , отримане за номограмою, уточнюємо:

$$L'_t = L_t \frac{P'_0}{P_0} \frac{N'_L}{N_L} = 56234 \frac{418}{400} \frac{1,19}{1,4} = 49950 \text{ пКі/кг.}$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $t = 4 + 2N_{вар}$, діб;
 $P'_0 = 400 + 5N_{вар}$, пКі/г; $N'_L = 1,4 + 0,1N_{вар}$, г/мл·добу, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 3. Розрахуйте концентрацію радіоїоду в тканині щитовидної залози людини через 10 діб після радіоактивного випадання при концентрації ^{131}I в пасовищній траві в початковий момент часу 378 пКі/г і значеннях коефіцієнтів $N_L' = 1,52$ і $N_t' = 51,2$.

Розв'язок. За номограмою (додаток 7) визначаємо значення A_q для періоду часу 10 діб при початковому рівні забруднення трави 400 пКі/г: $\lg A_q = 4,58$, звідси: $A_q = 10^{4,58} = 38019$ пКі/кг.

Пропорційно змінимо значення A_q :

$$A'_q = A_q \frac{P'_0}{P_0} \frac{N'_L}{N_L} \frac{N'_t}{N_t} = 38019 \frac{378}{400} \frac{1,52}{1,4} \frac{51,2}{50} = 39944 \text{ пКі/кг.}$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: $t = 5 + N_{вар}$, діб;
 $P'_0 = 300 + 10N_{вар}$, пКі/г, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Контрольні питання:

1. Визначення рівня забруднення ґрунту.
2. Вірогідний рівень концентрації радіонукліда в тканинах рослини.
3. Концентрація ^{89}Sr в кістковій тканині травоядних тварин.
4. Концентрація йоду в щитовидній залозі тварин.
5. Вірогідний ступінь забруднення молока корів.
6. Вміст ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{131}I в критичних тканинах людини, що вживає молоко.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6 КІЛЬКІСНА ОЦІНКА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ РАДІАЦІЇ ТА ІНШИХ ЧИННИКІВ

Мета роботи: ознайомитися з методами кількісної оцінки комбінованої дії радіації та інших чинників.

6.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.

У наше століття зростаючого забруднення навколишнього середовища біологічно активними речовинами (мутагенами, канцерогенами, отруйними речовинами) і фізичними агентами (короткими і ультракороткими радіохвилями, вібрацією, ультразвуком і іншими) проблема біологічної дії радіації і інших хімічних і фізичних чинників привертає велику увагу радіобіологів. Відкриваються можливості практичного використання іонізуючої радіації у поєднанні з іншими чинниками в медицині, біологічній технології, сільському господарстві.

Підкреслимо, що при одночасній дії іонізуючої радіації і іншого агента на біологічні об'єкти можливі три ситуації:

- агент знижує біологічну дію радіації, виявляється інгібування, тобто **антагонізм** дії;
- агент не міняє ефекту від радіації. Результат комбінованої дії рівний сумі дій радіації і другого агента, тобто виявляється **адитивність** (сумація) дії;
- агент підсилює дію радіації. У разі посилення дії радіації реєструється біологічний ефект, не спостережуваний при роздільній дії чинників в узятих дозах. Важливо пам'ятати, що в цьому випадку розрізняють 2 класи явищ залежно від властивостей другого агента:
 - якщо другий агент сам викликає радіобіологічний ефект (наприклад, хімічні мутагени, канцерогени, тепло та інші), який посилюється при комбінованій дії і виявляється вищим адитивного, то говорять про **синергізм** або потенціювання дії;
 - якщо другий агент не здатний сам по собі викликати спостережуваний ефект, але підсилює дію радіації, то явище носить назву **сенсibiliзація**, а

другий агент – сенсibilізатора.

На практиці ситуація зменшення дії радіації є хімічним захистом з використанням радіопротекторів або радіозахисних засобів.

Радіозахисні засоби – це речовини, що полегшують тяжкість ураження людини або тварин іонізуючим випромінюванням.

Вони зменшують ефективну дозу радіації. Сам процес ослаблення ураження називається **хімічним захистом**.

Важливо знати кількісні критерії комбінованої дії радіації і інших чинників. Основними критеріями є **чинник зменшення дози (ЧЗД)** і **чинник зміни логарифма виживання (ЧЗЛ)**. Приклади їх графічного визначення представлені на рис. 6.1 та 6.2. ЧЗД рівний відношенню доз радіації, що надають однаковий біологічний ефект на організм, за наявності (D_2) і у відсутність іншого агента (D_1):

$$ЧЗД = \frac{D_2}{D_1} \quad (6.1)$$

При синергізмі дії ЧЗД менше одиниці, взаємне розташування кривих $\lg S$ – D : вище лежить крива при дії радіації (контроль).

При адитивності дії ЧЗД рівний одиниці, криві співпадають одна з одною. При антагонізмі дії ЧЗД більше одиниці, вище лежить крива комбінованої дії. На рис. 6.1 представлений приклад визначення ЧЗД у присутності радіопротектора. ЧЗД в таких випадках рівний 2-3.

Іншою кількісною характеристикою є чинник зміни логарифма виживання (ЧЗЛ):

$$ЧЗЛ = \ln \frac{S_1}{S_2} = 2,3 \lg(S_1 - S_2) \quad (6.2)$$

де S – виживання клітин.

При синергізмі дії ЧЗЛ більше нуля, при адитивності – рівний нулю, при антагонізмі дії – менше нуля. Приклад графічного визначення ЧЗЛ у присутності радіопротектора приведений на рис. 6.2.

Третім кількісним критерієм дії радіопротекторів є **коефіцієнт модифікації** – відношення різниці між питомим ураженням (смертю) в контролі (тобто при дії радіації) і в експерименті (тобто при комбінованій дії) до питомого ураження в контролі.

Крім того, використовують ще два критерії, які сильно залежать від величини доз, при яких проводиться оцінка, тому вони дають неточне уявлення про ступінь що модифікує, у тому числі і захисного, ефекту. Це:

- абсолютна величина різниці між показниками виживання в експерименті (комбінована дія) і в контролі;
- індекс ефекту – відношення показників виживання в дослідній і

контрольній групах.

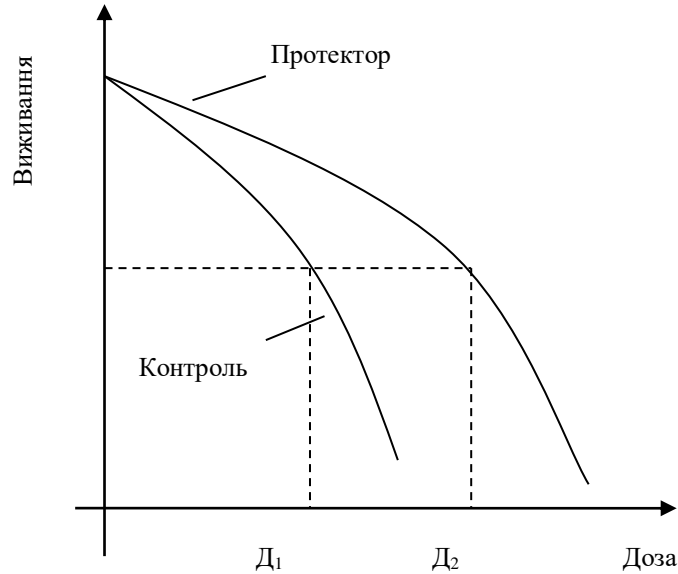


Рис. 6.1 – Приклад визначення ЧЗД за кривою виживання

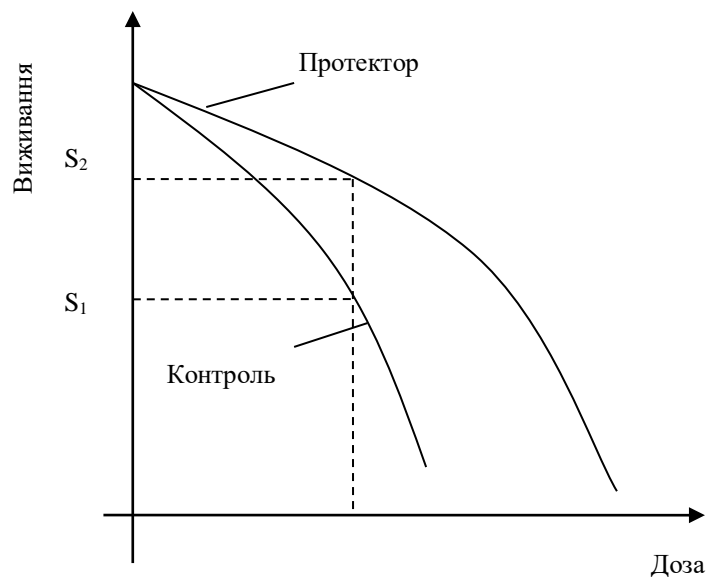


Рис. 6.2 – Приклад визначення ЧЗЛ за кривою виживання

Ці показники частіше використовуються для якісної оцінки наявності або відсутності захисного, або іншого ефекту.

6.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. Визначити характер комбінованої дії радіації і підвищеної температури згідно з приведеними експериментальними даними (табл. 6.1). Оцініть комбіновану дію кількісно шляхом розрахунку ЧЗД при виживанні клітинних культур 40 % і ЧЗЛ при дозі 500 рад.

Таблиця 6.1 – Експериментальні данні

Д, рад	Вживання при дії радіації (S_1 , %) (у контролі)	Вживання при сумісній дії радіації і гіпертермії (S_2 , %)
0	100	100
100	79	40
200	61	14
300	43,5	5
400	27,5	3
500	16	1,8
600	7,5	1,1
700	4,5	-
800	2,5	-
900	1	-

Розв'язок.

Оцінка комбінованої дії проводиться шляхом побудови графічної залежності $\lg S - D$. Для цього прологарифмуємо значення S_1 та S_2 (табл. 6.2).

За виглядом графічної залежності (рис. 6.3) характер комбінованої дії радіації і гіпертермії можна оцінити як синергізм. Розрахуємо кількісні характеристики комбінованої дії.

Таблиця 6.2 – Логарифмовані експериментальні данні

Д, рад	$\lg S_1$	$\lg S_2$
0	2	2
100	1,9	1,6
200	1,78	1,15
300	1,63	0,7
400	1,44	0,48
500	1,2	0,26
600	0,87	0,04
700	0,65	-
800	0,39	-
900	0	-

1. Розрахунок ЧЗД при $S=40\%$ ($\lg S=1,6$): графічно знаходимо $D_1=320$ рад; $D_2=100$ рад. Звідси:

$$\text{ЧЗД} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{100}{320} = 0,31$$

Значення ЧЗД < 1, що підтверджує синергізм комбінованої дії.

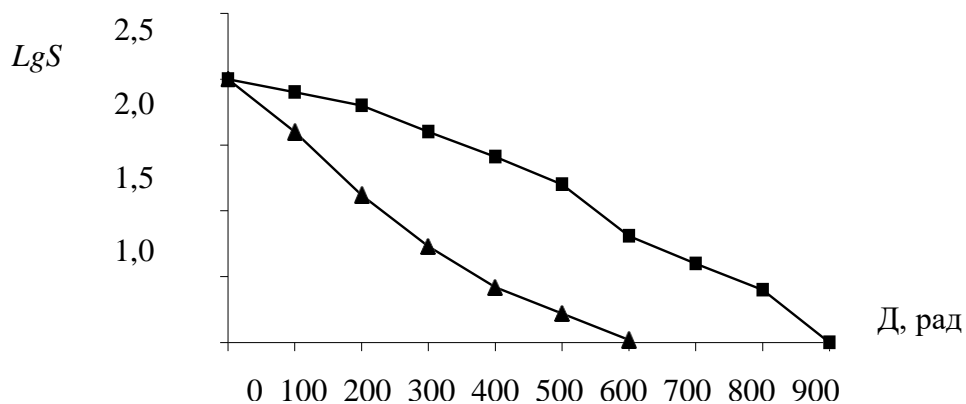


Рис. 6.3 – Графічна залежність виживання клітинних культур від величини дози радіації

2. Розрахунок ЧЗЛ при $D = 500$ рад: графічно знаходимо $\lg S_1 = 1,2$; $\lg S_2 = 0,26$.

Звідси: $\text{ЧЗЛ} = 2,3(\lg S_1 - \lg S_2) = 2,3 \cdot (1,2 - 0,26) = 2,16$.

Значення $\text{ЧЗЛ} > 0$, що підтверджує синергізм комбінованої дії. Значення ЧЗД і ЧЗЛ, а також взаємне розташування кривих $\lg S - D$ (сильна розбіжність) свідчать про прояв синергізму в значній мірі.

Вихідні дані: виживання клітинних культур $20 + 5N_{\text{вар}}$, %; $D = 100 + 50N_{\text{вар}}$, рад, де $N_{\text{вар}}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 2. Визначить ЧЗД при 20 % виживанні і ЧЗЛ при дозі 3,5 Гр, використовуючи експериментальні дані (табл. 6.3). Визначить характер комбінованої дії радіації і хімічного агента.

Таблиця 6.3 – Експериментальні данні

D, Гр	Вживання при дії радіації (S_1 %)	Вживання при дії радіації і хімічного агента (S_2 , %)
0	100	100
0,5	79	40
1,0	60	16
1,5	40	9
2,0	23	7
2,5	12	5
3,0	4	4
3,5	1,6	3
4,0	1	2,4
4,5	-	1,6
5,0	-	1

Розв'язок.

Побудуємо графічну залежність $\lg S$ - D . Для цього прологарифмуємо значення S_1 і S_2 (табл. 6.4).

Таблиця 6.4 – Логарифмовані експериментальні данні

D , рад	$\lg S_1$	$\lg S_2$
0	2,0	2,0
0,5	1,9	1,6
1,0	1,78	1,2
1,5	1,6	0,95
2,0	1,36	0,85
2,5	1,08	0,70
3,0	0,6	0,6
3,5	0,2	0,48
4,0	0	0,38
4,5	-	0,2
5,0	-	0

За виглядом графічної залежності (рис. 6.4) характер комбінованої дії можна оцінити як перехідний. До дози 3 Гр спостерігається синергізм дії. У точці $D=3$ Гр спостерігається адитивність дії. При дозі більше 3 Гр спостерігається антагонізм дії. У результаті комбіновану дію можна оцінити як синерго-антагоністичну. Розрахуємо кількісні характеристики комбінованої дії.

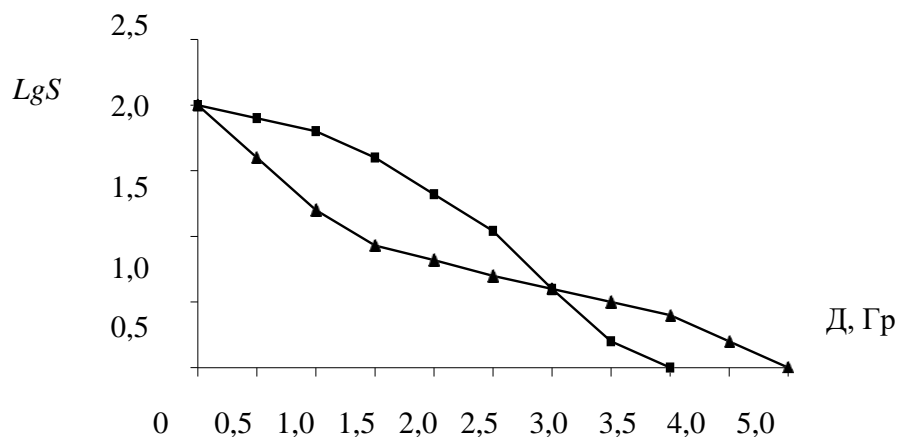


Рис. 6.4 – Графічна залежність виживання від величини дози радіації

1. Розрахунок ЧЗД при $S=20\%$ ($\lg S=1,3$): графічно знаходимо $D_1=2,1$ Гр; $D_2=0,8$ Гр. Звідси:

$$ЧЗД = \frac{D_2}{D_1} = \frac{0,8}{2,1} = 0,38$$

Значення ЧЗД < 1, що підтверджує синергізм дії радіації і хімічного агентів області доз менше 3 Гр.

2. Розрахунок ЧЗЛ при $D=3,5$ Гр: графічно знаходимо $\lg S_1=0,2$; $\lg S_2=0,5$.

Звідси: $ЧЗЛ=2,3(\lg S_1-\lg S_2)=2,3 \cdot (0,2-0,5) = -0,69 < 0$.

Значення ЧЗЛ < 0 підтверджує прояв антагонізму дії в області доз більше 3 Гр.

Значення ЧЗД і ЧЗЛ, а також взаємне розташування кривих $\lg S_1 - D$ свідчать про прояв значного синергізму, а потім про різку зміну характеру дії до явного антагонізму.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: виживання клітинних культур $5 + 5N_{вар}$, %; $D = 0,5N_{вар}$, Гр, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 3. Визначить ЧЗД при 4 % виживанні, ЧЗЛ при дозі 500 рад, використовуючи експериментальні дані (табл. 6.5). Оцініть характер дії радіації і хімічного агента. Чи можна рекомендувати дану речовину до використання як радіопротектор з позицій ефективності радіаційного захисту?

Таблиця 6.5 – Експериментальні данні

D, рад	Вживання при дії радіації (S_1 , %)	Вживання при дії радіації і хімічного агента (S_2 , %)
0	100	100
100	48	48
200	24	24
250	16,5	16,5
300	8	10
400	1,9	4
500	0,5	2
550	0,4	-
600	-	0,5
700	-	0,4

Розв'язок.

Побудуємо графічну залежність $\lg S - D$. Для цього прологарифмуємо значення S_1 і S_2 (табл. 6.6).

За виглядом залежності $\lg S - D$ (рис. 6.5) можна оцінити характер комбінованої дії радіації і хімічного об'єкту: до $D=250$ рад спостерігається адитивність дії. При дозах вище 250 рад спостерігається антагонізм дії.

Антагонізм виражений несильно, оскільки криві трохи розходяться. Оцінимо кількісно антагонізм дії.

Таблиця 6.6 – Логарифмовані експериментальні данні

Д, рад	$\lg S_1$	$\lg S_2$
0	2,0	2,0
100	1,68	1,68
200	1,38	1,38
250	1,22	1,22
300	0,90	1,0
400	0,28	0,60
500	-0,30	0,30
550	-0,40	-
600	-	-0,30
700	-	-0,40

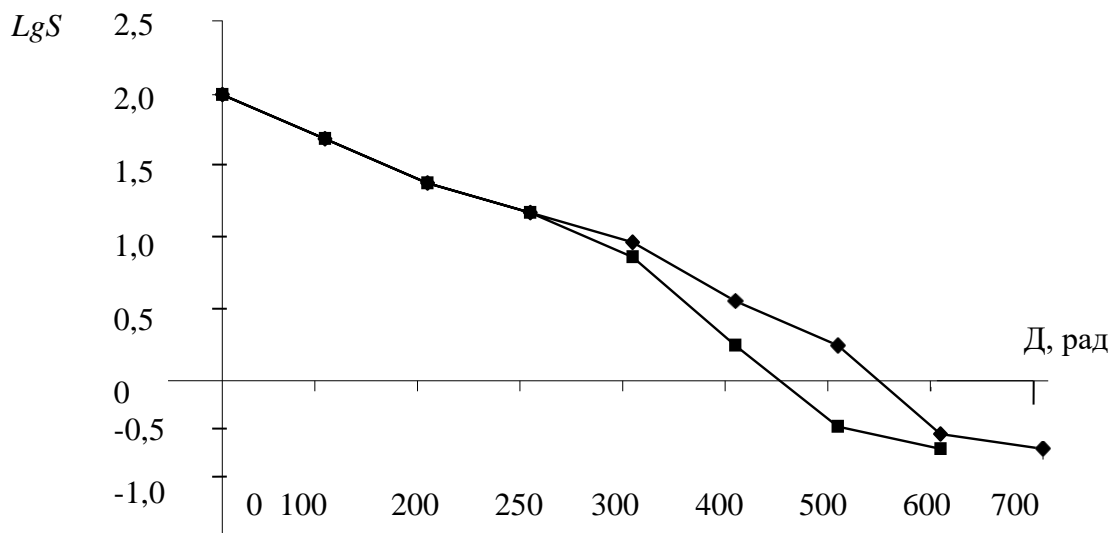


Рис. 6.5 – Графічна залежність виживання від величини дози радіації

1. Розрахунок ЧЗД при $S=4\%$ ($\lg S=0,6$): графічно знаходимо $D_1=360$ рад; $D_2=400$ рад. Звідси:

$$\text{ЧЗД} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{400}{360} = 1,11 > 1. \text{ Спостерігається антагонізм дії.}$$

2. Розрахунок ЧЗЛ при дозі 500 рад: графічно знаходимо $\lg S_1=-0,24$; $\lg S_2=0,27$.

$$\text{Звідси: ЧЗЛ} = 2,3(\lg S_1 - \lg S_2) = 2,3 \cdot (-0,24 - 0,27) = -1,17 < 0.$$

Підтверджується антагонізм дії.

Дану хімічну речовину не можна рекомендувати як протектор, оскільки

значення ЧЗД низьке (для радіопротекторів ЧЗД повинен дорівнювати 2–3). Речовина неефективна в плані радіаційного захисту. Крім цього, в області доз до 250 рад протекторна дія взагалі не спостерігається.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: виживання клітинних культур $4 + 0,1N_{вар}$, %; $D = 100 + 40N_{вар}$, рад, де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Контрольні питання:

1. Комбінована дія радіації та інших чинників впливу на довкілля.
2. Назвіть можливі ситуації при одночасній дії іонізуючої радіації і іншого агента на біологічні об'єкти.
3. Що таке синергізм та сенсibilізація?
4. Дайте визначення термінам «радіаційні засоби» та «хімічний захист».
5. Чинник зменшення дози та його розрахунок.
6. Чинник зміни логарифма виживання та його розрахунок.
7. Коефіцієнт модифікації.
8. Які показники використовуються для якісної оцінки наявності або відсутності захисного, або іншого ефекту.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7 ДОПУСТИМИ КОНТРОЛЬНИ РІВНІ ЯК ОСНОВА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Мета роботи: ознайомитися з системою допустимих контрольних рівнів, що використовуються як норми радіаційної безпеки.

7.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.

Основні регламентовані величини

У основу НРБУ покладені рекомендації МКРЗ, видані в 1989–96 рр. Рекомендації НРБУ ґрунтуються на наступних положеннях:

- концепції ефективної дози;
- новій системі допустимих рівнів з використанням вікозалежних дозиметричних моделей;
- двох груп опромінюваних осіб: персонал і населення;
- системі чотирьох груп радіаційно-гігієнічних регламентів:
 - регламенти по обмеженню опромінювання при практичній діяльності;
 - регламентація аварійного опромінювання населення;
 - регламентація опромінювання від техногенно-посилених джерел природного походження;

- обмеження медичного опромінювання.

Радіаційна безпека і протирадіаційний захист по відношенню до практичної діяльності будуються з використанням наступних принципів:

– будь-яка практична діяльність не повинна здійснюватися, якщо вона не приносить більшої користі опромінюваним особам в порівнянні з шкодою, яку вона заподіює (принцип виправданості);

– рівні опромінювання від всіх видів практичної діяльності і іонізуючих випромінювань не повинні перевищувати встановлені межі доз (принцип не перевищення);

– рівні опромінювання індивідуумів і/або кількість опромінюваних осіб повинні бути настільки низькими, наскільки це може бути досягнуто з урахуванням економічних і соціальних чинників (принцип оптимізації).

НРБУ-97 включають 4 групи радіаційно-гігієнічних регламентованих величин.

1 група – регламенти контролю за практичною діяльністю, метою яких є підтримка опромінювання персоналу і населення на прийнятному для індивідуума і суспільства рівні.

До цієї групи входять:

- межі доз;
- похідні рівні:
- допустимі рівні;
- контрольні рівні.

2 група – регламенти, метою яких є обмеження опромінювання людини від медичних джерел.

До цієї групи входять:

- рівні, що рекомендуються.

3 група – регламенти, що визначають величину дози опромінювання населення, що запобігає унаслідок втручання, в умовах радіаційної аварії.

До цієї групи входять:

- рівні втручання;
- рівні дії.

4 група – регламенти, що визначають величину дози опромінювання населення, що запобігає унаслідок втручання, від техногенно-посилених джерел природного походження.

До цієї групи входять:

- рівні обов'язкових дій;
- рівні дії.

НРБУ встановлюються 3 категорії опромінюваних осіб:

Категорія А (персонал) – особи, які постійно або тимчасово працюють

безпосередньо з джерелами іонізуючих випромінювань;

Категорія Б (персонал) – особи, які безпосередньо не зайняті роботою з джерелами іонізуючого випромінювання, але у зв'язку з розташуванням робочих місць на об'єктах з радіаційно-ядерними технологіями можуть отримувати додаткове опромінювання;

Категорія В – все населення.

Допустимі рівні внутрішнього опромінювання.

Розрахунок гранично допустимого річного надходження радіонуклідів

Граничне допустиме річне надходження (ГДН) – це таке надходження радіоактивних речовин в організм протягом року, яке за 50 років створює в критичному органі еквівалентну дозу, рівну одній **гранично допустимій дозі (ГДД)**. ГДД – це найбільше значення індивідуальної еквівалентної дози за рік, яке при рівномірній дії протягом 50 років не викличе в стані здоров'я персоналу несприятливих змін. ГДН розраховується для категорії А.

Для категорії Б розраховують **граничне річне надходження (ГРН)** – це таке надходження радіоактивних речовин в організм протягом року, яке за 70 років створює в критичному органі еквівалентну дозу, рівну одній **граничній дозі (ГД)**. ГД – це гранична еквівалентна доза за рік.

Розрахунок допустимої концентрації радіонуклідів

Допустима концентрація (ДК) – це відношення ГДН радіоактивної речовини до об'єму води або повітря, з якими воно поступає в організм людини протягом року. Річний об'єм споживаної води 800 л, повітря: для категорії А – $2,5 \cdot 10^6$ л, для категорії Б – $7,3 \cdot 10^6$ л.

$ДК_A$ радіонуклідів при їх постійному рівні вмісту в повітрі знаходять за формулою:

$$ДК_A = \frac{ГДН}{2,5 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \cdot f_1}, \text{ Кі/л}, \quad (7.1)$$

де f_1 – коефіцієнт затримки радіоактивної речовини в легенів; $2,5 \cdot 10^6$ – об'єм легеневої вентиляції у профробітників, л/рік; 10^6 – коефіцієнт перекладу активності мкКі в Кі.

$ДК_B$ радіонуклідів при їх постійному рівні вмісту в повітрі знаходять за формулою:

$$ДК_B = \frac{ГДН}{7,3 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \cdot f_1}, \text{ Кі/л}, \quad (7.2)$$

де $7,3 \cdot 10^6$ – об'єм легеневої вентиляції у осіб категорії Б.

Розрахунок допустимих рівнів внутрішнього опромінювання для суміші радіонуклідів.

Якщо відомий склад суміші радіонуклідів, то ДВ, ДК, ГДН можна

розрахувати за формулою:

$$ГДН_{\text{суміші}} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{ГДН_i}}, \quad (7.3)$$

де $ГДН_i$ – ГДН окремого i -го радіонукліда; n_i – його відносний вміст в суміші в %.

Розрахунок ДК і потужності дози радіонуклідів благородних газів

Радіаційні дії від присутності в повітрі радіонуклідів благородних газів (РБГ): аргону, криптону, ксенону, а також короткоживучих радіонуклідів С, N і О визначається не внутрішнім опромінюванням, а зовнішнім β і γ -випромінюванням з об'єму повітря приміщення.

ДК суміші РБГ розраховують за формулою:

$$ДК_{\text{суміші}} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{ДК_i}}, \quad (7.4)$$

де n_i – відносний вміст радіонукліда в суміші %; $ДК_i$ – допустима концентрація i -го радіонукліда.

Для набуття точного значення $ДК_{\text{суміші}}$ розраховують окремо три значення ДК для кожного з критичних органів (шкіри, підшкірних тканин і гонад), дійсним значенням $ДК_{\text{суміші}}$ вважають найменше.

Потужність дози (P), створювана РБГ в критичних органах за рахунок зовнішнього γ і β -випромінювання з повітря приміщень різного об'єму і на відкритій місцевості, може бути розрахована за формулою:

$$P = P_{\beta} + P_{\gamma} = \sum P_{\beta_i} n_i C_i + \sum P_{\gamma_i} n_i C_i, \text{ рад/с}, \quad (7.5)$$

де n_i – відносний вміст в суміші i -го радіонукліда; C_i – його концентрація; P_{β_i} та P_{γ_i} – потужність дози β і γ -випромінювання, створювана i -м радіонуклідом при його концентрації 1 Кі/л, рад·л/с·Кі.

Поглинена тканинна доза

Виходячи з енергії джерела іонізуючого випромінювання (радіонукліда), його активності і ряду інших параметрів, можна розрахувати потужність дози β -випромінювання і поглинені тканинні дози β і γ -випромінювань.

Щоб розрахувати потужність дози, створювану β -випромінювачем в тканині, необхідно знати концентрацію активності в тканини і енергію частинок. У разі β -випромінювачів при розрахунку тканинних доз використовується середня енергія частинок, рівна 1/3 максимальній енергії.

Потужність дози визначається як енергія, поглинена в 1 г тканині в одиницю часу. Одиниця $D_{\text{погл.}}$ – 1 рад.

Потужність дози β -випромінювання дорівнює:

$$P_{\beta} = 3,7 \cdot 10^4 C \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \bar{E} \cdot 10^{-2} = 5,92 \cdot 10^{-4} \bar{E} C, \text{ рад/с}, \quad (7.6)$$

де $3,7 \cdot 10^4$ – число розпадів в секунду на 1 мкКі; C – концентрація активності, мкКі/г; \bar{E} – середня енергія β -часток на розпад, МеВ; $1 \text{ МеВ} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ ерг}$; $10^{-2} \text{ рад} = 1 \text{ ерг/г}$.

Якщо $[C] = \text{мКі}$, те рівняння (7.6) приймає вигляд:

$$P_{\beta} = 0,592 \bar{E} C, \text{ рад/с}, \quad (7.7)$$

Доза визначається за рівнянням:

$$D_{\beta} = \int_0^t P_{\beta} dt \quad (7.8)$$

Якщо початкова активність ізотопу, що потрапив в організм, C_0 , то після часу t :

$$C = C_0 e^{-\lambda_{\text{еф}} t} = C_0 e^{-\frac{0,693}{T_{\text{еф}}} t} \quad (7.9)$$

Тоді:

$$\begin{aligned} D_{\beta} &= \int_0^t P_{\beta} dt = 0,592 \bar{E} \int_0^t C_0 e^{-\frac{0,693}{T_{\text{еф}}} t} dt = 0,592 \bar{E} C_0 \frac{T_{\text{еф}}}{0,693} \left(1 - e^{-\frac{0,693}{T_{\text{еф}}} t} \right) = \\ &= 0,854 \bar{E} C_0 T_{\text{еф}} \left(1 - e^{-\frac{0,693}{T_{\text{еф}}} t} \right) \end{aligned} \quad (7.10)$$

$[T_{\text{еф}}] = \text{с}$.

Якщо $[T_{\text{еф}}] = \text{доба}$, то:

$$D_{\beta} = 7,39 \cdot 10^4 \bar{E} C_0 T_{\text{еф}} \left(1 - e^{-\frac{0,693}{T_{\text{еф}}} t} \right) \quad (7.11)$$

Якщо t завелике, то:

$$D_{\beta} = 7,39 \cdot 10^4 \bar{E} C_0 T_{\text{еф}}, \text{ рад} \quad (7.12)$$

Доза, створювана β -випромінювачем в критичному органі, після заковтування 1 мКі ізотопу визначається співвідношенням:

$$D_{\beta} = \frac{7,39 \cdot 10^4 \bar{E} C_0 T_{\text{еф}} f}{m}, \text{ рад} \quad (7.13)$$

де m – маса органу, г; f – частка ізотопу, що досягає критичного органу.

Поглинена тканинна доза від інкорпорованого γ -випромінювача розраховується за формулою:

$$D_{\beta} = \frac{97 \tau K_{\gamma} g}{100 m}, \quad (7.14)$$

де τ – середня тривалість життя радіонукліда, год.

$$\tau = \frac{T_{ef}}{0,693} = \frac{1}{\lambda_{ef}}$$

K_γ – гама-стала; m – маса, г; 100 – перехідний коефіцієнт для виразу поглиненої дози в радах (1 рад=100 ерг); 97 – поглинена доза в ерг при поглинанні 1 Р в 1 г тканині; g – геометричний чинник (для тулуба людини $g=200$).

Введення поняття геометричного чинника викликано наступним. Унаслідок великої проникаючої здатності γ -квантів при розрахунку дози внутрішнього опромінювання виникають певні математичні труднощі. Для спрощення розрахунків всі органи представляють у вигляді простих геометричних тіл: сфери, циліндра. Розраховані числові значення g для центрів сфери і циліндра залежно від їх радіусу і висоти циліндра при $\mu=0,03 \text{ см}^{-1}$ (біологічна тканина) і для людського тіла. Середній геометричний чинник для всього сферичного об'єму: $\bar{g} = 3\pi R_{cf}$, якщо $R_{cf} < 10 \text{ см}$.

Значення геометричного чинника для тіла людини наведені у Додатку 12.

7.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Завдання 1. Розрахуйте допустиму концентрацію суміші радіонуклідів ^{85m}Kr і ^{88}Kr , з яких перший дає 20% у загальну активність, для категорії А опромінюваних в приміщенні об'ємом 250 м^3 .

Розв'язок.

Дійсне значення $DK_{\text{суміші}}$ радіонуклідів буде рівне найменшому значенню з трьох розрахованих значень: для шкіри, підшкірних тканин і гонад. Значення DK окремих радіонуклідів для вказаних тканин представлені в Додатку 7 «Допустима концентрація DK радіонуклідів РБГ, робочих приміщень, що містяться в повітрі, і на відкритій місцевості».

Розрахунок DK проводять за формулою (7.4):

$$DK_{\text{шкіри}} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{DK_i}} = \frac{100}{\frac{20}{7,6 \cdot 10^{-8}} + \frac{80}{2,1 \cdot 10^{-8}}} = 2,46 \cdot 10^{-8} \text{ Кі/л}$$

$$DK_{\text{підшкірн}} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{DK_i}} = \frac{100}{\frac{20}{2,8 \cdot 10^{-7}} + \frac{80}{1,5 \cdot 10^{-8}}} = 1,85 \cdot 10^{-10} \text{ Кі/л}$$

$$DK_{\text{гонад}} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{DK_i}} = \frac{100}{\frac{20}{6,8 \cdot 10^{-7}} + \frac{80}{8,7 \cdot 10^{-7}}} = 8,24 \cdot 10^{-9} \text{ Кі/л}$$

Найменшим значенням є $DK_{\text{підшкірн}}$, отже $DK_{\text{суміші}} = 1,85 \cdot 10^{-10} \text{ Кі/л}$.

Вихідні дані для виконання роботи студентом: Для $N_{\text{вар}} < 5$ об'єм приміщення 50 м^3 , для $5 < N_{\text{вар}} < 10$ об'єм приміщення 2000 м^3 , для інших

варіантів 17000 м³. Радіонуклід визначає викладач. Де $N_{вар}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 2. Розрахуйте потужність дози β - і γ -випромінювань при опромінюванні підшкірних тканин людини РБГ, що складається з 4% ⁸⁸Kr та 12% ⁸⁹Kr при їх концентраціях, Кі/л: ⁸⁸Kr – 0,6; ⁸⁹Kr – 1,3; на відкритій місцевості.

Розв'язок.

Розрахунок потужності дози випромінювання від РБГ проводиться за формулою (7.5). Значення $P_{\beta i}$ і $P_{\gamma i}$ беруться з Додатку 8 «Потужність дози, що створюється в критичних органах людини».

Звідси:

$$P_{\beta} = P_{\beta_{Kr-88}} \cdot C_{Kr-88} \cdot N_{Kr-88} + P_{\beta_{Kr-89}} \cdot C_{Kr-89} \cdot N_{Kr-89} = 38 \cdot 0,6 \cdot 0,04 + 158 \cdot 1,3 \cdot 0,12 = 25,56 \text{ рад/с};$$

$$P_{\gamma} = P_{\gamma_{Kr-88}} \cdot C_{Kr-88} \cdot N_{Kr-88} + P_{\gamma_{Kr-89}} \cdot C_{Kr-89} \cdot N_{Kr-89} = 501 \cdot 0,6 \cdot 0,04 + 414 \cdot 1,3 \cdot 0,12 = 76,6 \text{ рад/с}.$$

Сумарна потужність дози дорівнює: $(P_{\beta} + P_{\gamma}) = 25,56 + 76,6 = 102,16 \text{ рад/с}$, при цьому потужність дози γ -випромінювання перевищує потужність дози β -випромінювання:

$$\frac{P_{\gamma}}{P_{\beta}} = \frac{76,6}{25,56} \approx 3.$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: Для $N_{вар} < 5$ об'єм приміщення 50 м³, для $5 < N_{вар} < 10$ об'єм приміщення 2000 м³, для інших варіантів відкрита місцевість. Радіонуклід задає викладач. Де $N_{вар}$ – номер студента в журналі академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Завдання 3. Людині зростом 160 см і вагою 60 кг ввели 0,06 мКі радіонукліда ⁹⁰Y ($K_{\gamma} = 0,019 \text{ Р} \cdot \text{см}^2 / \text{мКі} \cdot \text{год}$) з середньою енергією β -випромінювання 2,28 МеВ. Визначить сумарну тканинну дозу β і γ -випромінювань і співвідношення цих доз.

Розв'язок.

$T_{ef} = 2,68$ діб. (Додаток 9); $g = 122$ (Додаток 10).

Розрахунок D_{β} проводиться за формулою:

$$D_{\beta} = \frac{7,39 \cdot 10^4 \bar{E} C_0 T_{ef} f_2}{m} = \frac{7,39 \cdot 10^4 \cdot 2,28 \cdot 0,06 \cdot 2,68 \cdot 1}{60000} = 0,45 \text{ рад}.$$

Розрахунок D_{γ} проводиться за формулою:

$$D_{\beta} = \frac{97 \tau K_{\gamma} g}{100 m}$$

де K_{γ} – повна гамма-постійна ⁹⁰Y = 0,019 Р·см²/мКі·год; g – геометричний чинник для радіонукліда, розподіленого в тілі людини: при $h = 160$ см і $m = 60$ кг

$g=122$ (взятий з Додатку 10 «Середній геометричний чинник для γ -активного радіонукліда, рівномірно розподіленого в тілі людини»); τ – середня тривалість життя радіонукліда, год. τ визначається за величиною ефективного періоду напіввиведення T_{ef} за формулою:

$$\tau = \frac{T_{\text{ef}}}{0,693} = \frac{2,68 \cdot 24}{0,693} = 92,8 \text{ год.}$$

Звідси:

$$D_{\beta} = \frac{97 \tau K_{\gamma} g}{100m} = \frac{97 \cdot 92,8 \cdot 0,019 \cdot 122}{100 \cdot 60000} = 3,48 \cdot 10^{-3} \text{ рад.}$$

Тоді сумарна тканинна доза дорівнює:

$$(D_{\beta} + D_{\gamma}) = 0,45 + 3,48 \cdot 10^{-3} = 0,45 + 0,00348 = 0,4535 \text{ рад.}$$

Вихідні дані для виконання роботи студентом: Значення зросту та вагу задати самостійно. Радіонуклід задає викладач. $C_0 = 0,01 + 0,02N_{\text{вар}}$, мКі, де $N_{\text{вар}}$ – номер студента згідно журналу академічної групи (поток). Інші значення наведено в прикладі.

Контрольні питання:

1. Що покладено в основу «Норм радіаційної безпеки України» (НРБУ)?
2. Які принципи використовуються в радіаційна безпеці і протирадіаційному захисту по відношенню до практичної діяльності?
3. Охарактеризуйте основні групи радіаційно-гігієнічних регламентованих величин в НРБУ-97.
4. Дайте визначення категорія опромінюваних осіб згідно НРБУ-97.
5. Розрахунок гранично допустимого річного надходження радіонуклідів.
6. Розрахунок допустимої концентрації радіонуклідів.
7. Розрахунок допустимих рівнів внутрішнього опромінювання для суміші радіонуклідів
8. Розрахунок ДК і потужності дози радіонуклідів благородних газів.
9. Методика визначення поглиненої тканинної дози.

Додаток 1

Характеристики деяких радіонуклідів як γ -випромінювачів

Нуклід	Період поіврозпаду, $T_{1/2}$	Енергія γ -квантів E_{oi} , МеВ	Вихід γ -квантів на один розпад $n_i, \%$	Повні гама-сталі K_γ , (Р·см ² /год·мКі)
$^{22}_{11}\text{Na}$	2,58 р.	1,275 0,511	99,9 180	11,89
$^{24}_{11}\text{Na}$	14,9 год.	5,22 4,24 3,85 2,75 1,37	$2 \cdot 10^{-5}$ $1,5 \cdot 10^{-2}$ $9 \cdot 10^{-2}$ 100 100	18,55
$^{31}_{14}\text{Si}$	2,62 год.	1,26	0,07	0,005
$^{41}_{18}\text{Ar}$	1,82 год.	1,29	99,0	6,58
$^{40}_{19}\text{K}$	$1,39 \cdot 10^9$ р	1,46	11,0	0,80
$^{47}_{20}\text{Ca}$	4,5 р	1,290 0,812 0,500	71,0 5,0 5,0	5,14
$^{47}_{21}\text{Sc}$	3,3 діб	0,159	60,0	0,48
$^{56}_{25}\text{Mn}$	2,576 год.	3,39 2,96 2,66 2,52 2,12 1,81 0,845	0,15 0,5 0,5 0,85 14,5 25,5 98,8	8,28
$^{60}_{27}\text{Co}$	5,27 р	2,158 1,333 1,172 0,825	$1,2 \cdot 10^{-3}$ 100 99 $2,8 \cdot 10^{-3}$	12,93
$^{64}_{29}\text{Cu}$	12,8 год.	1,34 0,511	0,05 38,0	1,12
$^{65}_{30}\text{Zn}$	245 діб	1,120 0,511	49,0 3,4	3,02
$^{74}_{33}\text{As}$	17,9 діб	2,22 1,60 1,19 0,635 0,600	0,04 $4 \cdot 10^{-3}$ 0,7 16,0 0,17	4,43

Нуклід	Період попіврозпаду, $T_{1/2}$	Енергія γ -квантів E_{oi} , МеВ	Вихід γ -квантів на один розпад $n_i, \%$	Повні гама-сталі K_γ , (Р·см ² /год·мКі)
		0,596	63,0	
		0,511	55,6	
$^{95}_{40}\text{Zr} + ^{95m}_{41}\text{Nb}$	65 діб	0,757	43	4,10
		0,724	55	
		0,231	2	
$^{95}_{41}\text{Nb}$	35 діб	0,768	100	4,31
$^{110}_{47}\text{Ag} + ^{110}_{48}\text{Cd}$	253 діб	1,565	1	14,25
		1,506	14	
		1,476	5	
		1,384	26	
		0,935	29	
		0,885	69	
		0,818	8	
		0,762	21	
		0,742	5	
		0,705	17	
		0,686	6	
		0,677	8	
		0,656	0,17	
		0,619	5	
		0,556	95	
0,511	1,2			
0,447	5			
0,116	0,02			
$^{131}_{53}\text{I}$	8,08 діб	0,722	3,0	2,15
		0,637	9,0	
		0,364	78,4	
		0,284	5,0	
		0,080	0,74	
$^{134}_{55}\text{Cs}$	2,2 р.	1,370	3,3	8,58
		1,170	2,5	
		1,040	1,5	
		0,960	0,6	
		0,801	10	
		0,796	80	
		0,605	95	
		0,570	0,119	
		0,569	14	
		0,563	10	
0,475	0,128			
$^{137}_{55}\text{Cs} + ^{137m}_{55}\text{Ba}$	26,6 р.	0,661	82,5	3,10

Нуклід	Період попіврозпаду, $T_{1/2}$	Енергія γ - квантів E_{oi} , МеВ	Вихід γ -квантів на один розпад $n_i, \%$	Повні гама-сталі K_γ , (Р·см ² /год·мКі)
$^{140}_{56}\text{Ba}$	12,8 діб	0,537	25,0	1,16
		0,436	5,0	
		0,304	4,6	
		0,162	5,0	
		0,132	1,4	
		0,030	16,0	
$^{140}_{57}\text{La}$	40,22 год.	2,890	0,08	11,14
		2,515	3,5	
		2,343	0,74	
		1,597	95,0	
		0,923	9,1	
		0,868	5,0	
		0,815	18,6	
		0,748	3,3	
		0,491	40	
		0,400	2,8	
0,323	20,0			
$^{155}_{63}\text{Eu}$	1,7 р.	0,132	5,5	0,861
		0,125	16,7	
		0,106	27,5	
		0,100	30,4	
		0,087	72,5	
		0,061	24,6	
$^{154}_{63}\text{Eu}$	16 р.	1,277	42	6,24
		1,007	17	
		0,998	14	
		0,875	13	
		0,725	21	
		0,593	4	
0,248	6			
$^{170}_{69}\text{Tm}$	129 діб.	0,084	2,5	0,01
$^{192}_{77}\text{Ir}$	74,34 діб	1,060	0,395	4,65
		0,613	6,34	
		0,604	10,9	
		0,588	5,65	
		0,485	2,93	
		0,468	47,5	
		0,417	1,27	
		0,375	1,46	
		0,316	83,3	
		0,308	27,2	
		0,296	26,1	
		0,283	0,488	

Нуклід	Період попіврозпаду, $T_{1/2}$	Енергія γ - квантів E_{oi} , МеВ	Вихід γ -квантів на один розпад $n_i, \%$	Повні гама-сталі K_γ , (Р·см ² /год·мКі)
		0,206 0,201	2,73 0,34	
$^{203}_{80}\text{Hg}$	46,9 діб	0,279	81,5	1,25
$^{226}_{88}\text{Ra}$	1622 р.	2,446 2,410 2,297 2,204 2,117 2,090 2,017 1,900 1,862 1,848 1,764 1,728 1,668 1,605 1,583 1,541 1,509 1,403 1,378 1,281 1,238 1,207 1,155 1,120 1,050 0,960 0,935 0,885 0,837 0,806 0,787 0,769 0,740 0,721 0,703 0,666 0,609 0,535 0,509 0,485	1,6 0,2 0,4 5,2 1,4 0,1 0,1 0,4 0,8 2,0 16,3 2,4 1,0 0,4 1,1 0,8 2,2 4,0 4,8 1,7 6,0 0,6 1,8 16,0 0,5 0,5 3,3 0,4 0,9 1,5 1,2 5,3 0,4 0,7 0,8 2,3 47,1 0,9 1,3 1,5	9,36

Нуклід	Період попіврозпаду, $T_{1/2}$	Енергія γ -квантів E_{oi} , МеВ	Вихід γ -квантів на один розпад $n_i, \%$	Повні гама-сталі K_γ , (Р·см ² /год·МКі)
		0,465	1,0	
		0,450	1,0	
		0,417	1,8	
		0,395	1,3	
		0,352	37,7	
		0,295	18,9	
		0,285	5,2	
$^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ р.	0,112 0,048	0,023 18,7	0,072

Додаток 2

Товщина захисту із води ($\rho=1,0$ г/см³) для різної кратності зменшення k γ -випромінювання (широкий пучок)

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, МеВ											
	0,1	0,2	10,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,25	1,5
1,5	19	23	23	22	21	20	20	20	20	20	19	19
2	21	27	28	28	28	27	27	27	28	28	28	28
5	25	37	43	45	46	47	47	48	49	50	52	54
8	27	41	49	52	54	54	54	56	57	58	62	66
10	30	45	51	54	57	57	58	60	61	62	66	70
20	33	50	60	64	68	69	71	72	74	76	82	87
30	37	54	65	70	73	75	77	79	81	83	89	94
40	38	57	69	74	77	80	82	84	87	89	95	101
50	39	60	71	77	80	83	85	88	90	93	99	106
60	40	62	74	79	83	86	88	91	93	96	102	109
80	45	65	77	83	87	90	93	96	99	102	110	116
10^2	46	67	80	86	89	93	96	100	103	105	114	120
$2 \cdot 10^2$	48	73	87	94	99	103	107	111	115	118	127	135
$5 \cdot 10^2$	52	83	97	104	110	115	120	124	129	133	145	155
10^3	58	89	105	113	119	125	131	136	141	145	157	168
$2 \cdot 10^3$	63	95	112	120	128	134	140	146	152	156	170	182
$5 \cdot 10^3$	68	102	121	131	140	146	153	160	165	171	185	199
10^4	74	109	129	139	148	155	162	169	177	183	198	213
$2 \cdot 10^4$	80	114	135	147	157	165	172	180	187	194	211	227
$5 \cdot 10^4$	82	121	144	157	168	177	185	193	201	208	227	244
10^5	88	126	150	164	176	185	194	203	211	220	240	259
$2 \cdot 10^5$	90	133	157	172	184	194	203	213	221	231	252	272
$5 \cdot 10^5$	97	140	166	182	195	205	216	226	235	246	268	289
10^6	102	146	172	189	203	213	224	234	245	254	279	302
$2 \cdot 10^6$	110	153	179	195	211	221	232	242	252	262	287	310
$5 \cdot 10^6$	120	160	187	205	221	234	247	258	270	281	308	333
10^7	129	167	193	212	229	242	256	269	280	292	318	345

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, МеВ							
	1,75	2	2,2	3	4	6	8	10
1,5	19	20	20	21	22	23	25	25
2	29	30	31	34	35	39	41	41
5	56	59	61	67	71	83	89	93
8	68	72	74	81	89	105	113	120
10	74	78	80	88	97	115	124	131
20	91	96	99	111	125	144	159	170
30	100	105	109	122	139	162	178	190
40	106	112	116	131	149	173	192	204
50	112	118	122	138	156	184	204	217
60	116	123	127	144	162	191	213	226
80	123	130	134	153	171	204	225	240
10^2	128	134	139	159	180	211	235	251
$2 \cdot 10^2$	1431	152	157	179	204	242	268	285
$5 \cdot 10^2$	164	173	180	207	236	278	310	330
10^3	178	188	195	225	257	305	343	366
$2 \cdot 10^3$	193	204	212	245	280	330	372	398
$5 \cdot 10^3$	212	224	234	271	308	368	413	443
10^4	227	241	251	290	330	393	444	477
$2 \cdot 10^4$	243	258	270	311	354	420	475	511
$5 \cdot 10^4$	261	277	290	334	383	457	516	556
10^5	276	294	306	353	404	484	547	590
$2 \cdot 10^5$	290	308	322	372	426	511	578	622
$5 \cdot 10^5$	310	329	343	380	454	543	616	665
10^6	324	345	360	417	478	597	649	701
$2 \cdot 10^6$	334	357	373	435	498	597	677	773
$5 \cdot 10^6$	357	379	397	462	528	633	719	778
10^7	370	393	411	480	549	659	748	810

Додаток 3

Товщина захисту із бетону ($\rho=2,3 \text{ г/см}^3$) для різної кратності послаблення k
 γ -випромінювання (широкий пучок)

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, МеВ										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25
1,5	2,6	4,7	6,3	7,5	8,2	8,2	8,2	8,3	8,3	8,5	8,6
2	4,7	7,6	6,9	11,3	12,3	12,4	12,4	12,6	12,6	12,9	13,3
5	5,6	11,0	15,5	18,8	21,1	21,8	22,3	22,6	23,0	23,5	24,6
8	7,0	12,9	17,8	22,0	24,6	25,6	26,4	27,2	27,9	28,8	30,5
10	8,2	14,6	19,7	23,7	25,8	26,8	27,6	28,4	29,1	29,9	31,9
20	8,2	15,3	21,4	25,8	29,9	31,9	33,6	35,0	36,2	37,0	39,9

30	8,5	16,4	2,8	27,7	32,9	34,8	36,4	37,8	39,2	40,5	43,7
40	8,5	17,6	24,2	29,6	44,0	36,2	37,9	39,6	41,3	42,8	45,3
50	9,9	18,8	25,1	30,8	35,0	37,6	39,4	41,2	42,8	44,6	48,5
60	11,0	20,0	26,1	31,7	36,4	38,5	40,5	42,5	44,1	45,8	50,1
80	11,5	20,4	27,7	33,6	38,7	41,1	43,0	44,8	46,5	48,1	52,4
10 ²	11,5	21,1	28,9	35,2	39,9	43,0	45,8	47,2	48,8	50,5	54,5
2·10 ²	12,7	23,5	32,4	39,2	44,6	47,9	50,5	52,6	54,6	56,4	60,8
5·10 ²	13,8	24,6	35,2	43,9	50,5	54,5	57,3	58,8	62,5	64,6	69,8
10 ³	15,5	28,2	39,2	48,1	55,2	59,2	62,5	65,3	67,8	70,4	76,1
2·10 ³	17,6	30,5	42,3	52,4	59,9	64,1	67,4	70,4	73,2	75,7	82,2
5·10 ³	18,8	33,1	45,6	56,4	65,7	70,0	74,0	77,0	80,2	82,8	90,2
10 ⁴	18,8	35,2	48,5	60,3	69,3	74,7	79,1	82,9	86,2	89,2	97,2
2·10 ⁴	21,1	38,4	51,9	63,4	72,8	78,2	83,1	87,3	91,1	94,5	102,7
5·10 ⁴	23,3	42,3	56,4	68,6	78,1	83,4	88,7	93,4	97,9	102,1	111,5
10 ⁵	30,5	50,5	64,6	75,1	82,8	88,3	93,5	98,1	102,5	106,8	116,9
2·10 ⁵	38,3	56,7	69,8	79,4	86,9	92,4	97,7	102,8	108,0	112,7	125,1
5·10 ⁵	44,8	61,5	73,7	83,7	91,6	98,1	103,9	109,5	114,8	119,7	133,8
10 ⁶	49,3	66,4	79,8	89,8	97,4	103,7	109,2	114,1	119,5	124,4	140,2
2·10 ⁶	67,6	73,1	84,5	93,3	101,0	107,4	113,6	119,7	125,6	131,5	148,4
5·10 ⁶	59,4	79,7	91,6	100,6	108,0	141,1	120,2	126,0	133,7	133,8	154,7
10 ⁷	64,0	84,9	95,7	130,7	110,3	117,4	123,6	130,0	136,2	142,0	160,0

Продовж. додатка 3

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, MeV								
	1,5	1,75	2,0	2,2	3	4	6	8	10
1,5	8,7	8,7	8,8	8,9	9,4	10,0	11,7	11,7	11,7
2	13,6	13,8	14,1	14,3	15,3	16,4	18,8	18,8	18,8
5	25,8	27,0	28,2	29,4	32,9	35,2	38,7	39,3	39,9
8	32,2	33,8	35,2	36,4	39,9	43,4	48,1	48,7	49,3
10	34,0	35,9	37,6	39,0	43,4	47,5	51,6	52,8	54,0
20	42,5	44,8	47,0	48,6	54,0	58,7	64,4	65,7	69,3
30	46,5	49,3	51,6	53,5	59,9	65,7	71,6	72,8	78,1
40	49,8	52,8	55,2	57,3	64,0	69,8	77,5	79,2	84,5
50	52,1	55,2	58,1	60,1	66,9	72,8	81,6	83,9	89,8
60	54,0	57,5	60,5	62,7	69,8	74,0	85,1	88,0	93,9
80	56,4	59,9	63,4	65,7	74,0	81,0	90,4	93,9	100,4
10 ²	58,3	62,2	65,7	68,6	77,5	83,5	95,1	98,0	105,1
2·10 ²	65,3	69,7	74,0	77,2	88,0	95,7	108,0	112,1	120,9
5·10 ²	74,8	79,8	84,5	88,5	101,0	110,4	124,4	129,7	139,7
10 ³	81,7	87,6	92,7	97,0	110,9	120,9	137,9	143,2	155,0
2·10 ³	88,5	94,6	100,4	104,0	120,9	132,1	150,3	156,1	168,5
5·10 ³	97,4	104,2	110,9	115,5	132,7	146,8	166,7	173,8	186,7

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, MeV								
	1,5	1,75	2,0	2,2	3	4	6	8	10
10^4	104,5	111,5	118,6	124,7	143,2	156,7	179,0	187,8	201,3
$2 \cdot 10^4$	110,8	118,6	126,2	131,7	152,6	167,3	190,8	201,9	216,0
$5 \cdot 10^4$	124,0	128,4	136,2	142,0	164,9	181,4	206,6	218,4	233,6
10^5	126,6	135,7	144,4	150,7	173,8	191,4	218,4	231,3	248,9
$2 \cdot 10^5$	135,6	145,1	153,8	160,2	177,3	201,9	231,3	245,5	263,0
$5 \cdot 10^5$	142,5	152,6	162,0	169,2	196,0	214,8	247,1	261,8	281,2
10^6	149,8	160,6	171,4	178,6	205,4	225,4	260,6	274,7	295,8
$2 \cdot 10^6$	157,8	169,2	179,6	187,2	213,7	237,1	272,4	287,6	308,8
$5 \cdot 10^6$	165,8	178,0	189,0	197,8	227,8	250,1	287,6	302,6	327,5
10^7	170,8	183,6	194,9	203,4	236,0	259,4	299,4	314,6	340,5

Додаток 4

Товщина захисту із заліза ($\rho=7,89 \text{ г/см}^3$) для різної кратності послаблення k γ -випромінювання (широкий пучок)

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, MeV										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25
1,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,6	1,7	1,85	2,0	2,05	2,1	2,15
2	0,7	1,2	1,7	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,3	3,45
5	1,4	2,5	3,4	4,1	4,8	5,1	5,5	5,7	6,1	6,4	6,9
8	1,7	3,1	4,2	5,1	5,8	6,3	6,7	7,1	7,5	7,8	8,5
10	1,9	3,5	4,6	5,6	6,3	6,8	7,3	7,7	8,1	8,5	9,3
20	2,3	4,3	5,7	6,8	7,7	8,3	8,8	9,4	9,8	10,3	11,3
30	2,4	4,5	6,2	7,5	8,5	9,2	9,8	10,4	10,9	11,4	12,6
40	2,5	4,8	6,6	8,0	9,1	9,8	10,5	11,1	11,7	12,2	13,3
50	2,9	5,2	7,1	8,4	9,5	10,3	11,0	11,6	12,2	12,7	13,9
60	3,1	5,6	7,5	8,8	9,8	10,7	11,4	12,1	12,7	13,2	14,5
80	3,2	5,9	7,7	9,2	10,4	11,2	12,0	12,7	13,4	14,0	15,5
10^2	3,4	6,1	8,1	9,6	10,8	11,7	12,5	13,2	13,9	14,5	16,1
$2 \cdot 10^2$	4,2	7,0	9,1	10,7	12,0	13,1	14,0	14,8	15,6	16,3	18,0
$5 \cdot 10^2$	4,4	7,7	10,1	12,0	13,7	14,9	16,0	17,0	17,9	18,7	20,6
10^3	4,5	8,2	11,0	13,2	15,0	16,3	17,5	18,6	19,6	20,5	22,6
$2 \cdot 10^3$	4,9	9,0	11,1	14,4	16,2	17,7	19,0	20,2	21,2	22,2	24,5
$5 \cdot 10^3$	5,6	10,1	13,4	15,8	17,7	19,3	20,7	22,0	23,2	24,3	27,0
10^4	6,8	11,5	14,7	17,1	19,0	20,7	22,3	23,6	24,9	26,0	28,8
$2 \cdot 10^4$	8,0	12,9	16,0	18,3	20,2	21,9	23,4	24,8	26,3	27,6	30,6
$5 \cdot 10^4$	8,0	13,8	17,0	19,0	21,8	23,6	25,2	26,9	28,4	29,9	33,0
10^5	10,0	15,8	18,2	20,8	23,0	24,9	26,7	28,4	30,0	31,5	34,9
$2 \cdot 10^5$	11,3	15,9	19,3	21,8	24,1	26,1	28,1	29,9	31,5	33,3	36,8
$5 \cdot 10^5$	12,0	16,9	20,4	23,2	25,6	27,8	29,9	31,8	33,6	35,4	39,1
10^6	12,8	17,9	21,4	24,2	26,7	28,9	31,2	33,3	35,2	37,0	40,1
$2 \cdot 10^6$	13,5	18,9	22,1	25,0	27,7	30,3	32,7	34,8	36,8	38,7	42,9

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, MeV										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25
$5 \cdot 10^6$	14,5	19,4	23,2	26,5	29,3	32,2	34,6	36,7	38,8	40,9	45,5
10^7	15,0	20,3	24,3	27,6	30,5	33,2	35,8	38,1	40,2	42,4	47,1

Продовж. додатка 4

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, MeV								
	1,5	1,75	2,0	2,2	3	4	6	8	10
1,5	2,2	2,3	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9	2,4	2,0
2	3,6	3,8	3,9	4,1	4,4	4,5	4,6	4,0	3,4
5	7,4	7,8	8,1	8,3	8,9	9,4	9,6	9,0	8,0
8	9,1	9,6	10,1	10,3	11,2	11,6	12,1	11,2	10,4
10	10,0	10,6	11,0	11,4	12,2	12,6	13,2	12,4	11,4
20	12,2	13,0	13,6	14,1	15,3	15,9	16,6	16,0	15,0
30	13,6	14,4	15,1	15,6	17,0	17,7	18,8	18,0	17,0
40	14,4	15,3	16,1	16,6	18,2	19,1	20,4	19,4	18,4
50	15,1	16,1	16,9	17,5	19,1	20,0	21,5	20,6	19,6
60	15,7	16,7	17,6	18,2	19,9	21,0	22,4	21,3	20,6
80	16,3	17,8	18,7	19,4	21,2	22,2	24,0	23,0	22,0
10^2	17,3	18,5	19,5	20,2	22,1	23,3	25,0	24,0	23,1
$2 \cdot 10^2$	19,6	20,8	22,0	22,8	25,0	26,6	28,4	27,4	26,6
$5 \cdot 10^2$	22,3	23,7	25,0	25,9	28,8	30,6	32,7	32,0	31,4
10^3	24,4	26,1	27,5	28,6	31,7	33,7	36,0	35,4	34,6
$2 \cdot 10^3$	26,5	28,3	30,0	31,2	34,6	36,8	39,2	38,7	37,9
$5 \cdot 10^3$	29,4	31,4	33,3	34,3	38,2	40,7	43,2	43,0	42,2
10^4	31,3	33,6	35,5	36,9	40,9	43,7	46,5	46,3	45,2
$2 \cdot 10^4$	33,2	35,6	37,8	39,2	43,4	46,5	50,8	49,6	48,6
$5 \cdot 10^4$	35,9	38,4	40,8	42,3	47,2	50,4	55,0	54,0	53,0
10^5	38,0	40,7	43,2	44,7	50,0	53,4	58,3	57,2	56,1
$2 \cdot 10^5$	40,1	43,0	45,4	47,1	52,6	56,4	61,8	60,8	59,8
$5 \cdot 10^5$	42,5	45,5	48,3	49,9	56,1	60,2	66,0	65,0	64,0
10^6	44,7	47,8	50,6	52,3	58,8	63,3	69,0	68,3	67,0
$2 \cdot 10^6$	46,6	49,9	52,8	54,7	61,4	66,2	72,3	71,2	70,3
$5 \cdot 10^6$	49,4	52,7	55,7	57,7	64,9	70,3	76,5	75,5	74,8
10^7	51,3	54,8	57,9	60,1	67,5	73,1	79,4	78,8	78,0

Додаток 5

Товщина захисту із свинцевого скла марки ТФ -1 ($\rho = 6 \text{ г/см}^3$) для різної кратності послаблення k γ -випромінювання (широкий пучок)

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, MeV										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25
1,5	0,4	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	3,1
2	0,5	0,8	1,4	1,9	2,4	2,9	3,4	3,8	4,3	4,6	5,1
5	1,0	1,6	2,9	4,0	5,1	6,2	7,3	8,2	9,1	9,7	11,2

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, МеВ										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25
8	1,1	2,0	3,6	5,0	6,4	7,9	9,2	10,2	11,3	12,3	14,0
10	1,2	2,2	4,0	5,4	7,1	8,6	10,0	11,2	12,4	13,4	15,4
20	1,6	2,7	4,9	6,7	8,9	10,8	12,6	14,1	15,7	16,9	19,3
30	1,7	3,0	5,5	7,4	9,9	12,1	14,0	15,8	17,4	18,8	21,6
40	1,8	3,2	5,9	8,0	10,6	13,1	15,0	16,9	18,7	20,2	23,2
50	1,9	3,4	6,2	8,4	11,2	13,7	15,8	17,8	19,7	21,2	24,3
60	2,0	3,6	6,5	8,8	11,6	14,3	16,4	18,5	20,4	22,0	25,3
80	2,1	3,8	6,9	9,3	12,4	15,2	17,4	19,7	21,7	23,4	26,8
10^2	2,2	4,0	7,2	9,7	12,9	14,8	18,2	20,5	22,6	24,4	27,9
$2 \cdot 10^2$	2,4	4,7	8,2	11,1	14,7	17,8	20,5	23,1	25,4	27,4	31,4
$5 \cdot 10^2$	2,8	5,4	9,4	12,8	16,8	20,4	23,6	26,5	29,2	31,4	36,1
10^3	3,0	6,0	10,4	14,2	18,5	22,5	26,0	29,2	32,2	34,5	39,7
$2 \cdot 10^3$	3,2	6,7	11,4	15,6	20,3	24,4	28,3	31,8	35,0	37,5	43,2
$5 \cdot 10^3$	3,6	7,4	12,6	17,3	22,4	27,0	31,4	35,2	38,7	40,5	48,0
10^4	4,0	8,0	13,6	18,6	24,0	29,0	33,8	37,8	41,6	44,5	51,6
$2 \cdot 10^4$	4,2	8,7	14,6	20,0	25,8	31,1	36,1	40,5	44,4	47,5	55,2
$5 \cdot 10^4$	4,4	9,4	15,8	21,7	27,9	33,7	39,2	43,9	48,2	51,5	60,0
10^5	4,6	10,0	16,8	23,0	29,4	35,6	41,6	46,4	51,0	54,5	63,4
$2 \cdot 10^5$	5,0	10,7	17,8	24,4	31,2	37,6	43,9	49,0	53,8	57,5	67,2
$5 \cdot 10^5$	5,2	11,4	19,0	26,1	33,3	40,2	47,0	52,5	57,6	61,6	71,8
10^6	5,4	12,0	20,0	27,4	35,0	42,2	49,2	56,0	60,4	64,4	75,3
$2 \cdot 10^6$	5,8	12,7	21,0	28,8	36,8	44,2	51,9	58,8	63,2	67,4	79,1
$5 \cdot 10^6$	6,0	13,4	22,2	30,5	38,9	46,8	55,0	62,3	67,0	71,5	83,7
10^7	6,2	13,0	23,2	31,9	40,6	48,8	57,2	65,8	69,8	74,4	87,2

Продовж. додатка 5

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, МеВ								
	1,5	1,75	2,0	2,2	3	4	6	8	10
1,5	3,5	3,8	4,0	4,2	4,6	4,8	4,8	4,4	4,0
2	5,8	6,3	6,6	7,0	7,5	8,0	7,3	6,4	5,8
5	12,5	13,4	14,2	14,8	16,0	16,7	16,1	14,7	13,5
8	15,7	16,9	17,9	18,7	20,3	21,0	20,4	19,0	17,8
10	17,1	18,4	19,4	20,3	22,2	22,8	22,2	21,0	19,7
20	21,4	23,2	24,5	25,5	28,0	28,8	28,6	27,2	25,8
30	24,0	25,8	27,3	28,4	31,1	32,2	32,4	30,8	29,4
40	25,6	27,6	29,2	30,4	33,3	34,6	35,0	33,4	32,0
50	26,9	29,0	30,8	32,0	38,0	36,4	37,0	35,4	34,0
60	28,0	30,2	32,0	33,2	36,2	38,0	36,6	37,0	35,5
80	29,6	32,0	34,0	35,2	38,4	40,4	41,2	39,6	38,1
10^2	30,9	33,3	35,4	36,6	40,0	42,2	43,2	41,5	40,0
$2 \cdot 10^2$	35,0	37,6	40,0	41,4	45,3	48,2	49,5	47,8	46,1

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, МеВ								
	1,5	1,75	2,0	2,2	3	4	6	8	10
$5 \cdot 10^2$	40,2	43,3	46,1	47,7	52,4	55,8	57,8	56,0	54,2
10^3	44,3	47,9	50,6	52,4	57,7	61,8	54,3	62,6	60,4
$2 \cdot 10^3$	48,2	51,9	55,3	57,3	63,2	67,7	70,6	68,7	66,6
$5 \cdot 10^3$	53,4	57,6	61,4	63,6	70,2	75,4	78,8	77,0	74,6
10^4	57,4	62,0	66,0	68,6	75,7	81,1	85,4	83,4	80,8
$2 \cdot 10^4$	61,6	66,4	70,4	73,4	81,0	87,0	91,7	89,6	87,2
$5 \cdot 10^4$	66,8	72,0	76,7	79,6	88,0	94,7	100,0	97,9	95,2
10^5	70,3	76,2	81,2	84,2	93,4	100,4	106,2	104,2	101,2
$2 \cdot 10^5$	74,8	80,6	85,9	89,2	98,6	106,4	112,6	110,4	107,3
$5 \cdot 10^5$	80,0	86,3	92,0	95,4	105,8	113,8	120,9	118,6	115,4
10^6	84,0	90,8	96,3	100,0	110,0	119,5	127,2	124,8	121,5
$2 \cdot 10^6$	88,5	95,2	101,0	105,0	116,2	125,5	133,6	131,0	127,6
$5 \cdot 10^6$	93,7	100,9	107,9	111,2	123,4	132,9	141,9	139,2	137,7
10^7	97,4	105,2	111,4	115,7	128,4	138,7	148,2	145,4	141,8

Додаток 6

Товщина захисту із свинцю ($\rho=11,3$ г/см³) для різної кратності послаблення k γ -випромінювання (широкий пучок)

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, МеВ										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25
1,5	0,05	0,1	0,15	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,95
2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,15	1,3	1,5
5	0,2	0,4	0,6	0,9	1,1	1,5	1,9	2,2	2,5	2,8	3,4
8	0,2	0,5	0,8	1,1	1,5	1,95	2,35	2,8	3,2	3,5	4,2
10	0,3	0,55	0,9	1,3	1,6	2,1	2,6	3,05	3,5	3,8	4,5
20	0,3	0,6	1,1	1,5	2,0	2,6	3,25	3,85	4,4	4,9	5,8
30	0,35	0,7	1,15	1,7	2,3	3,0	3,65	4,3	4,95	5,5	6,5
40	0,4	0,8	1,3	1,8	2,4	3,1	3,8	4,5	5,2	5,8	6,85
50	0,4	0,85	1,4	1,95	2,6	3,25	3,95	4,6	5,3	6,0	7,2
60	0,45	0,9	1,45	2,05	2,7	3,45	4,2	4,95	5,6	6,3	7,5
80	0,45	1,0	1,55	2,15	2,8	3,7	4,5	5,3	6,0	6,7	8,0
10^2	0,5	1,0	1,6	2,3	3,0	3,85	4,7	5,5	6,3	7,0	8,45
$2 \cdot 10^2$	0,6	1,25	1,9	2,6	3,4	4,4	5,3	6,3	7,2	8,0	9,65
$5 \cdot 10^2$	0,65	1,4	2,2	3,1	4,0	5,1	6,1	7,2	8,2	9,2	11,3
10^3	0,7	1,5	2,4	3,3	4,4	5,7	0,95	8,1	9,2	10,2	12,3
$2 \cdot 10^3$	0,85	1,7	2,7	3,8	5,0	6,3	7,6	8,8	10,0	11,1	13,5
$5 \cdot 10^3$	0,9	1,9	3,0	4,2	5,5	7,0	8,5	9,9	11,2	12,4	14,9
10^4	1,05	2,1	3,3	5,55	5,9	7,5	9,1	10,6	12,0	13,3	16,1
$2 \cdot 10^4$	1,1	2,2	3,5	4,85	6,3	8,0	9,7	11,3	12,8	14,2	17,2
$5 \cdot 10^4$	1,15	2,35	3,7	5,2	6,9	8,7	10,5	12,3	14,0	15,6	18,8
10^5	1,15	2,4	3,8	5,4	7,2	9,2	11,1	13,0	14,8	16,5	20,1

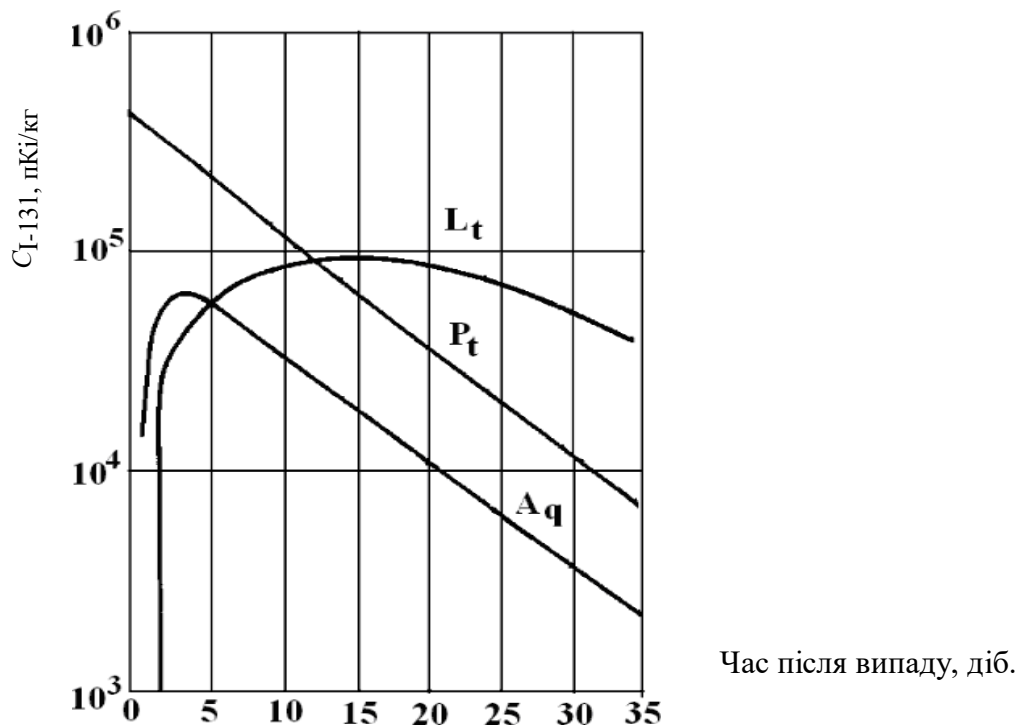
Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, МеВ										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25
$2 \cdot 10^5$	1,3	2,6	4,1	5,7	7,6	9,6	11,6	13,6	15,6	17,4	21,3
$5 \cdot 10^5$	1,4	2,8	4,4	6,1	8,2	10,2	12,3	14,4	16,5	18,5	22,3
10^6	1,45	3,0	4,7	6,5	8,7	10,9	13,1	15,3	17,5	19,5	23,5
$2 \cdot 10^6$	1,55	3,2	5,0	7,0	9,1	11,5	14,0	16,3	18,5	20,4	24,4
$5 \cdot 10^6$	1,65	3,3	5,3	7,3	9,6	12,1	14,7	17,2	19,5	21,6	26,2
10^7	1,7	3,4	5,4	7,6	10,1	12,6	15,2	17,8	20,3	22,5	27,5

Продовж. додатка 6

Кратність зменшення k	Товщина захисту (см) при енергії γ -випромінювання, МеВ								
	1,5	1,75	2,0	2,2	3	4	6	8	10
1,5	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,2	1,0	0,9	0,9
2	1,7	1,85	2,0	2,0	2,1	2,0	1,6	1,5	1,35
5	3,8	4,1	4,3	4,4	4,6	4,5	3,8	3,3	3,0
8	4,8	5,25	5,5	5,7	5,9	5,8	5,0	4,3	3,8
10	5,1	5,6	5,9	6,1	6,5	6,4	5,5	4,9	4,2
20	6,6	7,2	7,6	7,8	8,3	8,2	7,1	6,3	5,6
30	7,3	8,0	8,5	8,8	9,3	9,2	8,0	7,2	6,3
40	7,8	8,6	9,1	9,4	10,0	9,9	8,7	7,8	6,8
50	8,2	9,0	9,6	10,0	10,6	10,5	9,2	8,3	7,3
60	8,6	9,5	10,1	10,4	11,0	10,9	9,7	8,7	7,7
80	9,2	10,1	10,7	11,1	11,7	11,6	10,4	9,4	8,2
10^2	9,65	10,6	11,3	11,7	12,2	12,1	10,9	9,9	8,7
$2 \cdot 10^2$	11,1	12,2	12,9	13,4	14,0	13,8	12,6	11,4	10,2
$5 \cdot 10^2$	12,9	14,2	15,0	15,4	16,3	16,1	14,9	13,3	11,9
10^3	14,1	15,5	16,5	17,0	18,0	17,8	16,5	15,1	13,3
$2 \cdot 10^3$	15,4	16,8	17,9	18,5	19,7	19,5	18,1	16,6	14,8
$5 \cdot 10^3$	17,0	18,6	19,8	20,5	21,9	21,7	20,3	18,5	16,6
10^4	18,3	20,1	21,3	22,1	23,5	23,4	22,0	20,1	18,0
$2 \cdot 10^4$	19,5	21,4	22,7	23,5	25,1	25,0	23,6	21,7	19,5
$5 \cdot 10^4$	21,4	23,3	24,7	25,5	27,3	27,2	25,8	23,7	21,5
10^5	22,7	24,7	26,2	27,0	28,9	28,9	27,5	25,3	22,9
$2 \cdot 10^5$	24,1	26,1	27,6	28,5	30,5	30,5	29,2	26,9	24,3
$5 \cdot 10^5$	25,4	27,8	29,5	30,4	32,7	32,7	31,4	28,9	26,3
10^6	26,8	29,2	31,0	32,0	34,3	34,4	33,0	30,4	27,7
$2 \cdot 10^6$	27,8	30,5	32,4	33,5	36,0	36,1	34,6	32,0	29,2
$5 \cdot 10^6$	29,7	32,3	34,3	35,5	38,1	38,3	36,8	34,0	31,1
10^7	31,2	33,9	35,8	37,0	39,7	39,9	38,4	35,5	32,5

Додаток 7

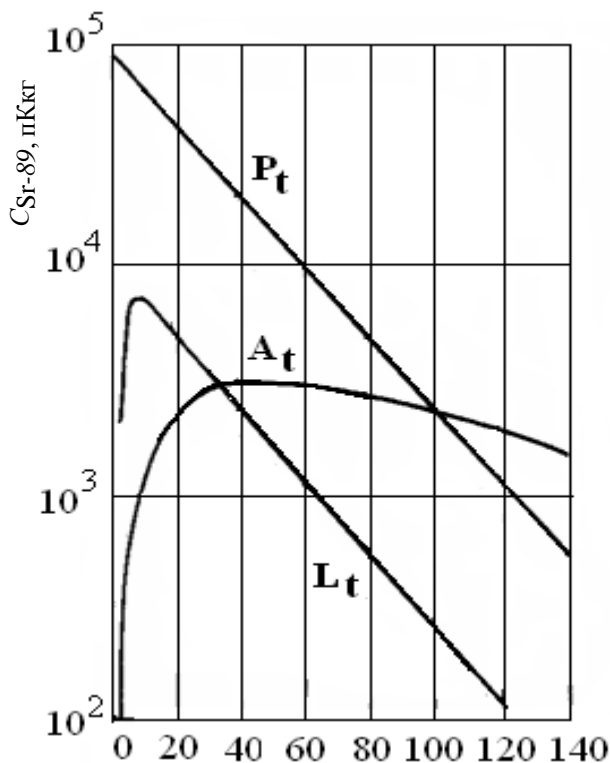
Можливі концентрації ^{131}I в пасовищних рослинах, в молоці корів та в щитовидній залозі людини



P_t – концентрація ^{131}I в траві, пКі/кг; L_t – концентрація ^{131}I в молоці, пКі/л; Aq – вміст ^{131}I в щитовидній залозі, пКі; $P_0 = 400$ пКі/г; $N_t = 50$ мл/г·добу.

Додаток 8

Можливі концентрації ^{89}Sr в пасовищних рослинах, в молоці корів та в щитовидній залозі людини



Час після випаду, доб.

P_t – концентрація ^{89}Sr в траві, пКі/кг; L_t – концентрація ^{89}Sr в молоці, пКі/л; A_t – вміст ^{89}Sr в щитовидній залозі, пКі; $P_0 = 100$ пКі/г; $N_t = 0,14$ мл/г·добу.

Додаток 9

Допустима концентрація ДК радіонуклідів РБГ робочих приміщень, що містяться в повітрі і на відкритій місцевості, Кі/л

Радіонуклід	Критичний орган	Об'єм приміщення, м ³					Відкрита місцевість	
		7	50	250	2000	17000	Категорія А	Категорія Б
^{41}Ar	шкіра	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-10}$
	підшкір. тканини	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$	$6,9 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$6,1 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$
	гонади	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$6,8 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$4,9 \cdot 10^{-11}$
^{85}Kr	шкіра	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$
	підшкір. тканини	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$
	гонади	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$
^{85m}Kr	шкіра	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$9,3 \cdot 10^{-8}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$	$8,9 \cdot 10^{-8}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
	підшкір. тканини	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
	гонади	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$7,9 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$

Радіонуклід	Критичний орган	Об'єм приміщення, м ³					Відкрита місцевість	
		7	50	250	2000	17000	Категорія А	Категорія Б
⁸⁷ Kr	шкіра	4,8·10 ⁻⁸	3,5·10 ⁻⁸	2,4·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁻⁸	1,7·10 ⁻⁸	9,8·10 ⁻⁹	2,2·10 ⁻¹⁰
	підшкір. тканини	4,0·10 ⁻⁸	2,9·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁻⁸	1,3·10 ⁻⁸	1,2·10 ⁻⁸	6,0·10 ⁻⁹	1,3·10 ⁻¹⁰
	гонади	8,0·10 ⁻⁷	4,0·10 ⁻⁷	2,4·10 ⁻⁷	1,2·10 ⁻⁷	6,0·10 ⁻⁸	3,5·10 ⁻⁹	8,1·10 ⁻¹¹
⁸⁸ Kr	шкіра	8,4·10 ⁻⁸	6,1·10 ⁻⁸	4,9·10 ⁻⁸	4,2·10 ⁻⁸	3,6·10 ⁻⁸	7,0·10 ⁻⁹	1,6·10 ⁻¹⁰
	підшкір. тканини	1,1·10 ⁻⁷	7,1·10 ⁻⁸	5,0·10 ⁻⁸	3,9·10 ⁻⁸	3,0·10 ⁻⁸	3,8·10 ⁻⁹	8,6·10 ⁻¹¹
	гонади	3,1·10 ⁻⁷	1,5·10 ⁻⁷	9,2·10 ⁻⁸	4,6·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁻⁸	1,3·10 ⁻⁹	3,1·10 ⁻¹¹
⁸⁹ Kr	шкіра	6,0·10 ⁻⁸	3,2·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁻⁸	1,7·10 ⁻⁸	1,5·10 ⁻⁸	5,5·10 ⁻⁹	1,2·10 ⁻¹⁰
	підшкір. тканини	4,9·10 ⁻⁸	2,6·10 ⁻⁸	1,7·10 ⁻⁸	1,2·10 ⁻⁸	1,1·10 ⁻⁸	3,0·10 ⁻⁹	7,0·10 ⁻¹¹
	гонади	2,9·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁻⁷	8,9·10 ⁻⁸	4,4·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁻⁸	1,3·10 ⁻⁹	3,0·10 ⁻¹¹
⁴¹ Ar	шкіра	3,9·10 ⁻⁷	3,8·10 ⁻⁷	3,7·10 ⁻⁷	3,6·10 ⁻⁷	3,4·10 ⁻⁷	1,9·10 ⁻⁷	4,3·10 ⁻⁹
	підшкір. тканини	1,5·10 ⁻⁵	8,6·10 ⁻⁶	5,3·10 ⁻⁶	2,7·10 ⁻⁶	1,3·10 ⁻⁶	1,8·10 ⁻⁷	4,2·10 ⁻⁹
	гонади	6,3·10 ⁻⁶	3,1·10 ⁻⁶	1,8·10 ⁻⁶	9,2·10 ⁻⁷	4,6·10 ⁻⁷	6,1·10 ⁻⁸	4,3·10 ⁻⁹
⁸⁵ Kr	шкіра	1,3·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁷	1,0·10 ⁻⁷	9,8·10 ⁻⁸	9,6·10 ⁻⁸	8,2·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁻⁹
	підшкір. тканини	7,4·10 ⁻⁶	4,5·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁶	1,7·10 ⁻⁶	1,0·10 ⁻⁶	2,2·10 ⁻⁷	5,1·10 ⁻⁹
	гонади	5,3·10 ⁻⁶	2,6·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁶	8,0·10 ⁻⁷	3,9·10 ⁻⁷	7,8·10 ⁻⁸	1,7·10 ⁻⁹
^{85m} Kr	шкіра	8,2·10 ⁻⁸	7,7·10 ⁻⁸	7,6·10 ⁻⁸	7,5·10 ⁻⁸	7,1·10 ⁻⁸	3,6·10 ⁻⁸	8,3·10 ⁻¹⁰
	підшкір. тканини	3,6·10 ⁻⁷	3,0·10 ⁻⁷	2,8·10 ⁻⁷	2,5·10 ⁻⁷	2,0·10 ⁻⁷	3,0·10 ⁻⁸	7,0·10 ⁻¹⁰
	гонади	2,2·10 ⁻⁶	1,1·10 ⁻⁶	6,8·10 ⁻⁷	3,4·10 ⁻⁷	1,7·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁸	2,5·10 ⁻¹⁰
⁸⁷ Kr	шкіра	1,6·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁻⁷	1,3·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁷	3,1·10 ⁻⁸	7,1·10 ⁻¹⁰
	підшкір. тканини	3,1·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁶	9,8·10 ⁻⁷	5,1·10 ⁻⁷	2,6·10 ⁻⁷	1,9·10 ⁻⁸	4,4·10 ⁻¹⁰
	гонади	1,1·10 ⁻⁶	5,8·10 ⁻⁷	3,5·10 ⁻⁷	1,7·10 ⁻⁷	8,8·10 ⁻⁸	6,5·10 ⁻⁹	1,4·10 ⁻¹⁰
⁸⁸ Kr	шкіра	6,2·10 ⁻⁸	3,6·10 ⁻⁸	2,1·10 ⁻⁸	1,6·10 ⁻⁸	1,6·10 ⁻⁸	1,3·10 ⁻⁸	3,1·10 ⁻¹⁰
	підшкір. тканини	5,0·10 ⁻⁶	2,4·10 ⁻⁶	1,5·10 ⁻⁶	1,2·10 ⁻⁶	1,1·10 ⁻⁶	9,3·10 ⁻⁹	2,1·10 ⁻¹⁰
	гонади	2,8·10 ⁻⁶	1,4·10 ⁻⁶	8,7·10 ⁻⁷	4,4·10 ⁻⁷	2,2·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁻⁸	3,4·10 ⁻¹⁰
⁸⁹ Kr	шкіра	4,5·10 ⁻⁸	3,1·10 ⁻⁸	2,5·10 ⁻⁸	2,3·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁻⁸	9,3·10 ⁻⁹	2,1·10 ⁻¹⁰
	підшкір. тканини	3,7·10 ⁻⁸	2,8·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁻⁸	1,9·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁻⁸	5,7·10 ⁻⁹	1,3·10 ⁻¹⁰
	гонади	5,7·10 ⁻⁷	2,8·10 ⁻⁷	1,7·10 ⁻⁷	1,5·10 ⁻⁷	1,2·10 ⁻⁷	2,5·10 ⁻⁹	5,8·10 ⁻¹¹

Додаток 10

Потужність дози, що створюється в критичних органах людини (шкіра, підшкірні тканини, все тіло) зовнішнім бета- і гама- випромінюванням окремих радіонуклідів РБГ, що містяться в повітрі приміщень різного об'єму і на відкритій місцевості рад·л/(с·Кі) (для шкіри і підшкірної тканини вказана потужність дози β -випромінювання, а для всього тіла – потужність дози γ -випромінювання) при концентрації 1 Кі/л

Нуклід	7 м ³			50 м ³			250 м ³			2000 м ³			17000 м ³			На відкритій місцевості		
	β		γ	β		γ	β		γ	β		γ	β		γ	β		γ
	шкіра	підшкір.	тіло	шкіра	підшкір.	тіло	шкіра	підшкір.	тіло	шкіра	підшкір.	тіло	шкіра	підшкір.	тіло	шкіра	підшкір.	тіло
⁴¹ Ar	78	19	1,5	79	19,4	3,0	80	19,7	4,9	80	19,8	10	80	19,8	20	80	19,8	315
⁸⁵ Kr	34	1,3	0,1	35	1,4	0	35	1,4	0,01	35	1,4	0,002	35	1,4	0,004	35	1,4	0,5
^{85m} Kr	43	4,4	0,3	44	5	0,50	45	5,2	0,85	45	5,2	1,7	45	5,2	3,4	45	5,2	38,6
⁸⁷ Kr	85	51	0,8	117	68,3	1,6	169	107	2,8	219	145	5,5	228	152	11	228	152	191
⁸⁸ Kr	47	16	2,2	63	24,6	4,3	76	33,5	7,0	83	38	14	84	38	28	84	38	501
⁸⁹ Kr	67	40	2,3	125	74	4,5	175	113	7,6	226	150	15	237	158	30	237	158	414
¹³³ Xe	11	0,02	0,11	11	0,02	0,2	11	0,02	0,35	11	0,02	1	11	0,02	1,3	11	0,02	11,1
^{133m} Xe	31	0,15	0,1	37	0,2	0,3	40	0,25	0,40	42	0,3	0,8	42	0,3	1,4	42	0,3	8,7
¹³⁵ Xe	50	5,4	0,3	53	6,2	0,6	53	6,2	1,0	53	6,2	1,9	53	6,2	3,8	53	6,2	59
^{135m} Xe	24	0,07	0,6	27	0,1	1,1	27	0,15	1,9	27	0,15	3,7	27	0,15	7,3	27	0,15	104
¹³⁷ Xe	66	41	0,2	130	83	0,4	195	131	0,76	250	177	1,4	257	177	3,0	257	177	45,2
¹³⁸ Xe	91	55	1,2	131	71	2,3	162	90	4,0	172	96	7,9	172	96	15	172	96	264

Біологічні та фізичні константи радіонуклідів

Нуклід, період напіврозпаду	Критичний орган	Період напів-виведення, T_{ef} , діб.	Доля нукліду в критичному органі, f_2	ДВА, Бк	Група радіаційної небезпеки
^{60}Co 5,25 р.	Все тіло	9,5	1,0	$4,81 \cdot 10^3$	В
	Печінка	9,5	0,02	-	
	Селезінка	9,5	$1,1 \cdot 10^{-3}$	-	
	Підшлункова залоза	9,5	$2,0 \cdot 10^{-3}$	-	
^{90}Sr 28,6 р.	Все тіло	5700	1,0	$- 7,4 \cdot 10^4$	Б
	Кісткова тканина	$6,4 \cdot 10^3$	0,99	$2,8 \cdot 10^4$	
	Легені, ШКТ	$6,4 \cdot 10^3$	-	-	
^{90}Y 2,68 доб.	Все тіло	2,68	1,0	-	В
	Кісткова тканина	2,68	0,75	-	
^{95}Zr 65 доб.	Все тіло	55,5	1,0	$6,66 \cdot 10^3$	В
	Кісткова тканина	59,5	0,38	-	
	Нирки	59,5	0,02	-	
	Селезінка	59,0	$6,4 \cdot 10^{-3}$	-	
	Печінка	53,0	0,07	-	
^{235}U $7,1 \cdot 10^8$ р.	Все тіло	100	1,0	- 37	Б
	Нирки	15	0,065	$8,88 \cdot 10^2$	
	Кісткова тканина	300	0,85	-	
^{131}I 8,06 доб.	Все тіло	7,6	1,0	-	Б
	Щитовидна залоза	7,6	0,2	$2,59 \cdot 10^3$	
	Нирки	3,73	0,02	-	
	Печінка	3,73	0,06	-	
	Селезінка	3,73	0,0025	-	
^{137}Cs 30 р.	Все тіло	70	1,0	$1,22 \cdot 10^6$	В
	М'язи	138	0,79	$5,18 \cdot 10^5$	
	Легені	138	$6 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^4$	
	Нирки	42	$6 \cdot 10^{-3}$	-	
	Селезінка	97	$7 \cdot 10^{-3}$	$1,258 \cdot 10^4$	
	Печінка	89	0,09	$1,295 \cdot 10^5$	
	Кісткова тканина	137	0,08	-	
^{144}Ce 284,5 доб.	Все тіло	191	1,0	-	Б
	Кісткова тканина	243	0,38	$6,29 \cdot 10^4$	
	Печінка	146	0,19	-	
	Нирки	191	0,02	-	
^{210}Po 138,4	Все тіло	25	1,0	-	А
	Нирки	46	1,13	$8,14 \cdot 10^2$	
	Селезінка	42	0,07	$4,07 \cdot 10^2$	

Нуклід, період напіврозпаду	Критичний орган	Період напів-виведення, T_{ef} , діб.	Доля нукліду в критичному органі, f_2	ДВ _A , Бк	Група радіаційної небезпеки
доб.	Печінка Кісткова тканина	32 20	0,22 0,08	- $7,4 \cdot 10^2$	
^{226}Ra 1600 доб.	Кісткова тканина Нирки Легені	44 роки 44 роки 44 роки	- - -	$1,887 \cdot 10^3$ $4,07 \cdot 10$ $1,332 \cdot 10^2$	A
^{228}Th 1,9 р.	Кісткова тканина Легені	693 693	- -	210 63	A

Додаток 12

Середній геометричний чинник для γ -активного радіонукліда рівномірно розподіленого в тілі людини

Маса людини, кг	Зріст людини, см						
	200	190	180	170	160	150	140
100	138	139	142	145	147	150	154
90	134	136	138	140	143	146	148
80	129	130	131	134	136	139	141
70	123	124	125	126	129	131	135
60	117	118	119	120	122	125	128
50	112	113	114	116	117	119	122
40	102	104	105	106	108	109	110

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки з дисципліни «Радіоекологія» для виконання індивідуального завдання студентами, які вивчаються за напрямом 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування»/ Е. Б. Хоботова. – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2009. – 108 с.
2. Кутлахмедов Ю.О. Основи радіоекології. К.: Вища школа, 2003.- 319 с.
3. Константінов М.П., Журбенко О.А. Радіаційна безпека. Суми, 2003.- 189 с.
4. Максимов М.Т., Оджагов Г.О. Радиоактивные загрязнения и их измерение. М.: Энергоиздат, 1986. - 224 с.
5. Коваленко Г.Д., Рудя К.Г. Радиоэкология Украины. К, 2001.- 242 с.
6. Шутенко Л.М. Міський житловий фонд: життєвий цикл і радіаційна

безпека. – К.: Техніка, 2002. – 251 с.

7. Голутвина М.М., Абрамов Ю.В. Контроль за поступлением и содержанием радиоактивных веществ в организм человека. М.: Медицина, 1989. – 319 с.

8. Савинский А.К. Взаимодействие электронов с тканеэквивалентными средами. М.: Энергоиздат, 1984. – 289 с.

9. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справ. изд./ В.А. Батенов, Л.А. Булдаков, И.Я. Василенко и др. Л.: Химия, 1990. – 554 с.

10. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97). К, 1998. – 159 с.

11. Пределы поступления радионуклидов для работающих с радиоактивными веществами в открытом виде. Публ. 30 МКРЗ, 1983. – 77 с.

12. Пределы ингаляционного поступления дочерних продуктов радона для профессиональных работников. Публ. 32 МКРЗ, 1984. – 91 с.

13. Кириллов В.Ф., Книжников В.А., Коренков И.П. Радиационная гигиена. М.: Медицина, 1988. – 383 с.

14. Радиация: Дозы, эффект, риск. М.: Мир, 1988. – 171 с.

15. Выброс радионуклидов в окружающую среду. Расчет доз облучения человека. Публ. 29 МКРЗ, 1980. – 107 с.

16. Модель определения дозовых нагрузок с учетом миграции радионуклидов и поступления их по пищевым цепочкам. Серия ОРБ – 11, 1980. – 124 с.

17. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник, М.: Энергоиздат, 1991. – 589 с.

18. Петин В.Г., Комаров В.П. Количественное описание модификации радиочувствительности. М.: Медицина, 1989. – 418 с.

19. Поляков Ю.А. Радиоэкология и дезактивация почв. М.: Атомиздат, 1970. – 327 с.

20. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды. М, 1980. – 208 с.

21. Юдинцева Е.В., Гулякин И.В. Агрохимия радиоактивных изотопов Sr и Cs. М.: Атомиздат, 1968. – 117 с.

22. Гродзинський Д.М. Радіобіологія. К.: Либідь, 2000.- 448 с.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	3
ПРАКТИЧНА РОБОТА №1 Визначення доз випромінювання	4
ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 Радіаційний захист.....	9
ПРАКТИЧНА РОБОТА №3 Радіоактивність будівельних матеріалів	14
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4 Методи кількісної оцінки міграції штучних радіонуклідів за трофічними рівнями	17
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5. Прогнозування вірогідного рівня забруднення.	24
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6 Кількісна оцінка комбінованої дії радіації та інших чинників.....	28
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7 Допустимі контрольні рівні як основа радіаційної безпеки	36
Додаток 1. Характеристики деяких радіонуклідів як γ -випромінювачів	44
Додаток 2. Товщина захисту із води ($\rho=1,0$ г/см ³) для різної кратності зменшення k γ -випромінювання (широкий пучок).....	48
Додаток 3. Товщина захисту із бетону ($\rho=2,3$ г/см ³) для різної кратності послаблення k γ -випромінювання (широкий пучок)	49
Додаток 4. Товщина захисту із заліза ($\rho=7,89$ г/см ³) для різної кратності послаблення k γ -випромінювання (широкий пучок)	51
Додаток 5. Товщина захисту із свинцевого скла марки ТФ -1 ($\rho=6$ г/см ³) для різної кратності послаблення k γ -випромінювання (широкий пучок).....	52
Додаток 6. Товщина захисту із свинцю ($\rho=11,3$ г/см ³) для різної кратності послаблення k γ -випромінювання (широкий пучок)	54
Додаток 7. Можливі концентрації ¹³¹ I в пасовищних рослинах, в молоці корів та в щитовидній залозі людини	56
Додаток 8. Можливі концентрації ⁸⁹ Sr в пасовищних рослинах, в молоці корів та в щитовидній залозі людини	57
Додаток 9. Допустима концентрація ДК радіонуклідів РБГ робочих приміщень, що містяться в повітрі і на відкритій місцевості, Кі/л	57
Додаток 10. Потужність дози, що створюється в критичних органах людини (шкіра, підшкірні тканини, все тіло) зовнішнім бета- і гама- випромінюванням окремих радіонуклідів РБГ, що містяться в повітрі приміщень різного об'єму і на відкритій місцевості рад·л/(с·Кі) (для шкіри і підшкірної тканини вказана потужність дози β -випромінювання, а для всього тіла – потужність дози γ - випромінювання) при концентрації 1 Кі/л.....	59
Додаток 11. Біологічні та фізичні константи радіонуклідів	60
Додаток 12. Середній геометричний чинник для γ -активного радіонукліда рівномірно розподіленого в тілі людини	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	61

Павличенко Артем Володимирович
Риженко Сергій Анатолійович
Рудченко Андрій Геннадійович
Юрченко Аннета Анатоліївна

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ
РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ «РАДІОЕКОЛОГІЯ»**
для студентів спеціальностей 091 «Біологія», 101 «Екологія» та
183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Друкується в редакційній обробці авторів.

Підписано до друку 20.02.2019 р. Формат 30 x 42/4.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 3,6
Обл.-вид. арк. 3,6. Тираж 30 прим. Зам. №

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.