

24 БУДОВА ЯДРА АТОМА. РАДІОАКТИВНІСТЬ

ЗВЕДЕННЯ ОСНОВНИХ ФОРМУЛ

24.1 Ядро позначається тим самим символом, що і нейтральний атом:



де X - символ хімічного елемента; Z - атомний номер (кількість протонів у ядрі); A - масове число (кількість нуклонів у ядрі). Кількість N нейтронів у ядрі дорівнює різниці $A - Z$.

24.2 Радіус ядра атома можна обчислити за формулою

$$R = R_0 A^{1/3},$$

де $R_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ м.

24.3 Закон радіоактивного розпаду має вигляд

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

де N - кількість атомів, які не розпалися за час t ; N_0 - кількість атомів, які не розпалися, в момент, взятий за початковий (при $t = 0$); λ - стала радіоактивного розпаду.

24.4 Період напіврозпаду $T_{1/2}$ - проміжок часу, за який кількість атомів, які не розпалися, зменшується вдвічі. Період напіврозпаду пов'язаний зі сталою розпаду співвідношенням

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

24.5 Кількість атомів, які розпалися за час t , дорівнює

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

Якщо проміжок часу $\Delta t \ll T_{1/2}$, то для визначення кількості атомів, які розпалися, можна використовувати наближену формулу

$$\Delta N \approx \lambda N \Delta t.$$

24.6 Середній час життя τ радіоактивного ізотопу – проміжок часу, за який кількість ядер, які не розпалися, зменшується у e разів:

$$\tau = 1/\lambda.$$

24.7 Кількість атомів, яка міститься у радіоактивному ізотопі, дорівнює

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

де m - маса ізотопу; M - його молярна маса; N_A - стала Авогадро.

24.8 Активність A нукліда у радіоактивному джерелі (активність ізотопу) є величина, яка дорівнює відношенню кількості dN ядер, які розпалися в ізотопі, до проміжку часу dt , за який відбувся розпад. Активність визначається за формулою

$$A = -\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

або після заміни N за основним законом радіоактивного розпаду одержимо

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

24.9 Активність ізотопу у початковий момент часу ($t = 0$) дорівнює

$$A_0 = \lambda N_0.$$

24.10 Активність ізотопу змінюється з часом за тим самим законом, що і кількість ядер, які не розпалися:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}.$$

24.11 Питома активність a радіоактивного джерела - це величина, яка дорівнює відношенню його активності A до маси m цього ізотопу, тобто

$$a = A/m.$$

24.12 Дефект маси ядра

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_a,$$

де m_p , m_n , m_j , m_H , m_a - маси протона, нейтрона, ядра і атома водню відповідно; Z – зарядове число; A – масове число.

24.13 Енергія зв'язку нуклона у ядрі

$$E_{зв} = \Delta mc^2,$$

де Δm - дефект маси ядра; c - швидкість світла у вакуумі. У випадку, коли енергію виражають у мегаелектрон - вольтах, а масу – в атомних одиницях маси, то

$$c^2 = 931,4 \text{ MeV/a.o.m.}$$

24. 14 Питома енергія зв'язку - енергія, що припадає на один нуклон:

$$\Delta E_{num} = \frac{E_{зв}}{A}.$$

ЕЛЕМЕНТИ ДОЗИМЕТРІЇ

24.15 Доза опромінення (експозиційна доза) – це величина, що дорівнює відношенню суми електричних зарядів усіх іонів одного знака, які утворилися у повітрі внаслідок іонізуючої здатності радіоактивного випромінювання, до маси цього повітря:

$$D_E = \frac{\Delta q}{\Delta m}.$$

24.16 Один рентген (1P) – це позасистемна одиниця вимірювання експозиційної дози.

Один рентген відповідає дозі опромінення, при якій в 1 м^3 сухого повітря за нормальних умов утворюється $2,08 \cdot 10^{15}$ пар іонів.

24.17 Потужність дози опромінення

$$\check{D}_E = \frac{\Delta D_E}{\Delta t}.$$

24.18 Доза поглинання – це величина, що показує яка кількість енергії випромінювання поглинається одиницею маси речовини

$$D_n = \frac{\Delta W}{\Delta m}.$$

24.19 Відносна біологічна ефективність (ВБЕ) випромінювання – це показник, за допомогою якого визначають, у скільки разів біологічна дія іонізуючих випромінювань даного типу (наприклад альфа-, бета-променів, нейтронів і т. ін.) більша (або менша) за дію на той самий біологічний об'єкт стандартного випромінювання (жорстких рентгенівських та гамма-променів). Значення показника ВБЕ наведені у таблиці 24.1.

Одиницями біологічної дози є 1 Бер, 1 Рем та 1 Зіверт.

1 Бер (біологічний еквівалент рентгена) або 1 Рем (радіаційний еквівалент людини, від англ): одиниця вимірювання еквівалентної (біологічної) дози радіації, що враховує різні шляхи передачі енергії від іонізуючої радіації тканинам людського організму:

$$1\text{ Бер} = 1\text{ Рад} \times \text{ВБЕ}.$$

Таблиця 24.1 - *Відносна біологічна ефективність випромінювання*

Тип радіації	ВБЕ
Рентгенівські промені та гамма - випромінювання до 3 МеВ, бета - частинки	1
Теплові нейтрони	5
Протони і дейтрони	10
Швидкі нейтрони	10
Альфа - частинки	20

Таблиця 24.2 – *Одиниці вимірювання доз випромінювання та зв'язок між ними*

Тип дози	Одиниця вимірювання в СІ	Позасистемна одиниця	Зв'язок
Доза опромінення (експозиційна доза)	1 Кл/кг	1 Р	$1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$
Потужність дози опромінення	1 А/кг		$1 \text{ А/кг} = 3876 \text{ Р/с}$
Доза поглинання	$1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}$	1 рад	$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$
Біологічна доза	1 Бер	1 Рем 1 Sv	$1 \text{ Бер} = 1 \text{ Рад} \times \text{ВБЕ}$ $1 \text{ Бер} = 1 \text{ Рем}$ $1 \text{ Sv} = 100 \text{ Рем} = 10$

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 24.1 Період напіврозпаду ізоотпу стронцію ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ складає 28 років. Знайти середній час життя ядра цього ізоотпу.

Розв'язання

Кількість ядер $dN(t)$, що розпадаються за проміжок часу від t до $t + dt$, дорівнює

$\tau - ?$
$T_{1/2} = 28 \text{ років.}$

$$dN = -\lambda N dt,$$

де λ – стала розпаду.

Час життя кожного з цих ядер дорівнює t . Загальний час життя всіх N_0 ядер, які існували при $t = 0$, може бути отримана інтегруванням виразу $t dN(t)$. Розділивши результат на N_0 , отримуємо середній час життя радіоактивного ядра:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t dN(t) = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N(t) dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N_0 \exp(-\lambda t) dt = \\ &= \int_0^{\infty} t \lambda \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda}. \end{aligned}$$

З урахуванням того, що стала розпаду λ і період напіврозпаду пов'язані співвідношенням

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}},$$

отримаємо

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}. \quad (1)$$

Після підставлення числових значень величин у співвідношення (1) знайдемо

$$\tau = \frac{28}{0,693} = 40,4 \text{ (року)}.$$

Відповідь: $\tau = 40,4$ року.

Приклад 24.2 Середній час життя атомів деякої радіоактивної речовини $\tau = 1$ с. Визначити ймовірність ω того, що ядро атома розпадеться за проміжок часу $t = 1$ с.

Розв'язання

$\omega - ?$	
$\tau = 1 \text{ с},$	
$t = 1 \text{ с}.$	

За проміжок часу t розпадається кількість атомів

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 [1 - \exp(-\lambda t)] = N_0 [1 - \exp(-t/\tau)],$$

де N - кількість атомів, які не розпалися за час t ; N_0 - кількість атомів, які не розпалися, в момент, взятий за початковий (при $t = 0$); λ - стала радіоактивного розпаду.

Ймовірність розпаду одного атома дорівнює

$$\omega = \frac{\Delta N}{N_0} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Після підставлення числових значень у це співвідношення знайдемо

$$\omega = 1 - \exp\left(-\frac{1}{1}\right) = 0,63.$$

Відповідь: $\omega = 0,63$.

Приклад 24.3 Визначити початкову активність A_0 радіоактивного магнію ^{27}Mg масою $m = 0,2 \text{ мкг}$, а також його активність A через одну годину. Припустимо, що всі атоми ізотопу - радіоактивні.

Розв'язання

Активність ізотопу у початковий момент часу ($t = 0$) дорівнює

$$A_0 = \lambda N_0, \quad (1)$$

де λ - стала радіоактивного розпаду; N_0 - кількість атомів

у початковий момент.

Візьмемо до уваги, що

$A_0 - ?$	$A - ?$
$m = 0,2 \text{ мкг}$	$2 \cdot 10^{-10} \text{ кг},$
$t = 1 \text{ год} = 3600 \text{ с},$	
$M = 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$	

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}, \quad (2)$$

24 БУДОВА ЯДРА АТОМА. РАДІОАКТИВНІСТЬ

де $T_{1/2}$ - період напіврозпаду, для ^{27}Mg -
 $T_{1/2} = 10 \text{ хв} = 600 \text{ с}$.

Кількість атомів визначимо із співвідношення

$$N_0 = \frac{m}{M} N_A, \quad (3)$$

де N_A - стала Авогадро (кількість атомів у одному молі речовини), $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$; M - молярна маса магнію.

З урахуванням виразів (2) і (3) співвідношення (1) набуде вигляду

$$A_0 = \frac{m N_A}{M T_{1/2}} \ln 2. \quad (4)$$

Активність ізотопу змінюється з часом за законом

$$A = A_0 e^{-\lambda t}. \quad (5)$$

Замінімо у формулі (5) сталу розпаду її значенням (2), тоді отримаємо

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = A_0 \left(e^{-\ln 2} \right)^{-t/T_{1/2}} = \frac{A_0}{2^{t/T_{1/2}}}. \quad (6)$$

Після підставлення числових значень фізичних величин у співвідношення (4) та (6) знайдемо:

$$A_0 = \frac{2 \cdot 10^{-10} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{27 \cdot 10^{-3} \cdot 600} 0,697 = 5,15 \cdot 10^{12} \text{ (Бк)} = 5,15 \text{ (ТБк)},$$

$$A = \frac{5,15 \cdot 10^{12}}{2^{3600/600}} = 8,05 \cdot 10^{10} (\text{Бк}) = 80,5 (\text{ГБк}).$$

Відповідь: $A_0 = 5,15 \text{ ТБк}$; $A = 80,5 \text{ ГБк}$.

Приклад 24.4 Визначити дефект маси Δm , енергію зв'язку $E_{зв}$ та питому енергію зв'язку ядра ${}^1_5\text{B}$.

Розв'язання

Дефект маси ядра дорівнює

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_a,$$

де Z – зарядове число; A – масове число;

m_p , m_n і m_a – маси протона, нейтрона та атома.

У нашому випадку $Z = 5$, $A = 11$. У таблицях А.7 та А.8 додатка А знайдемо маси протона m_p , нейтрона m_n та атома ${}^1_5\text{B}$ m_a :

$$m_p = 1,00728 \text{ а.о.м.},$$

$$m_n = 1,00867 \text{ а.о.м.},$$

$$m_a = 11,00931 \text{ а.о.м.}$$

Підставимо ці дані у формулу для визначення дефекту маси та отримаємо

$$\Delta m = 5 \cdot 1,00728 + (11 - 5) \cdot 1,00867 - 11,00931 = 0,08186 (\text{а.о.м.})$$

Енергія зв'язку нуклона у ядрі

$$E_{зв} = \Delta mc^2,$$

де $c^2 = 931,4 \text{ MeV}/\text{a.o.m.}$

Розрахунки дають

$$E_{зв} = 0,08186 \cdot 931,4 \cdot 76,2 \text{ MeV} = 12,2 \text{ (нДж)}.$$

Питома енергія зв'язку (енергія, що припадає на один нуклон) дорівнює

$$\Delta E_{\text{пит}} = \frac{E_{зв}}{A}.$$

Обчислення дають

$$\Delta E_{\text{пит}} = \frac{76,2}{11} = 6,93 \text{ (MeV/нуклон)}.$$

Відповідь: $\Delta m = 0,08186 \text{ a.o.m.}$; $E_{зв} = 12,2 \text{ нДж}$;

$$\Delta E_{\text{пит}} = 6,93 \text{ MeV/нуклон}.$$

Приклад 24.5 Космічне випромінювання на рівні моря на екваторі утворює в повітрі об'ємом $V = 1 \text{ см}^3$ у середньому $N = 24$ пар іонів за час $t_1 = 10 \text{ с}$. Визначити дозу опромінення, отриману людиною протягом року. Скільки рентген отримає людина за цей час?

Розв'язання

$$\frac{\check{D}_E - ? D(P) - ?}{}$$

$$V = 1 \text{ см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3,$$

$$t_1 = 10 \text{ с},$$

$$N = 24,$$

$$t_2 = 1 \text{ р} = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с}.$$

Потужність дози

Дозу опромінення, отриману людиною, можна визначити за формулою

$$D_E = \check{D}_E t_2, \quad (1)$$

де \check{D}_E - потужність дози опромінення.

$$\check{D}_E = \frac{qm}{t_1},$$

де q - заряд іонів одного знака, утворених випромінюванням за час t_1 у повітрі, маса якого m .

Масу повітря знайдемо як добуток густини ρ повітря на його об'єм V :

$$m = \rho V,$$

де $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ - густина повітря за нормальних умов.

Заряд усіх іонів одного знака дорівнює добутку елементарного заряду $|e|$ на кількість іонів N :

$$q = |e|N.$$

Тоді з урахуванням вищевикладеного формула (1) набуде вигляду

$$D_E = \frac{q}{mt_1} t_2 = \frac{|e| N t_2}{\rho V t_1}. \quad (2)$$

Підставимо числові значення фізичних величин у співвідношення (2) та отримаємо

$$D_E = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 24 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600}{1,29 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 9,41 \cdot 10^{-6} \text{ (Кл/кг)}.$$

Знайдемо дозу опромінення людини у рентгенах, виходячи із визначення рентгена: 1Р відповідає дозі опромінення, при якій в 1 м^3 сухого повітря за нормальних умов утворюється $2,08 \cdot 10^{15}$ пар іонів. Визначимо, скільки пар іонів n утворюється у 1 м^3 сухого повітря за нормальних умов при отриманій дозі опромінення $D_n = 9,41 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/кг}$:

$$n = \frac{N}{V t_1} t.$$

Тоді доза опромінення в рентгенах дорівнює

$$D_n(P) = \frac{N}{2,08 \cdot 10^{15} V t_1} t.$$

Обчислення дають

$$D(P) = \frac{24}{2,08 \cdot 10^{15} \cdot 10^{-6} \cdot 10} 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 0,36(P).$$

Відповідь: $D_E = 9,41 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/кг}$; $D_n(P) = 0,36 P$.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

24.1 Визначити атомні номери, масові числа та хімічні символи ядер, які утворюються, якщо в ядрах ${}^3_2\text{He}$, ${}^7_4\text{Be}$, ${}^{15}_8\text{O}$ протони замінити нейтронами, а нейтрони – протонами.

Відповідь: ${}^3_1\text{H}$, ${}^7_3\text{Li}$, ${}^{15}_7\text{N}$.

24.2 Яку частку від маси нейтрального атома плутонію складає маса його електронної оболонки?

Відповідь: $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$.

24.3 Визначити зарядове та масове числа ізоотопу, який утвориться з торію ${}^{232}_{90}\text{Th}$ після двох α - та двох β -перетворень.

Відповідь: $Z = 88$; $A = 224$.

24.4 Внаслідок радіоактивного розпаду уран ${}^{238}_{92}\text{U}$ перетворюється у свинець ${}^{206}_{82}\text{Pb}$. Скільки α - та β -перетворень при цьому відбулося?

Відповідь: 8 α -перетворень та 6 β -перетворень.

24.5 Визначити середню густину ядра та середню об'ємну густину його електричного заряду.

Відповідь: $\rho = 1,4 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$; $\rho_{el} = 7 \cdot 10^{24} \text{ Кл/м}^3$.

24.6 Визначити вік мінералу, в якому на один атом урану припадає: а) один атом свинцю; б) 0,2 атоми свинцю.

Відповідь: а) $t = 4,5 \cdot 10^9$ років; б) $t = 1,44 \cdot 10^9$ років.

24.7 Визначити, у скільки разів початкова кількість ядер радіоактивного ізоотопу зменшиться за три роки, якщо за один рік вона зменшилася у 4 рази.

Відповідь: $n = 64$.

24.8 Визначити у відсотках, яка частина початкової кількості ядер радіоактивного ізоотопу не розпадеться за час t , що дорівнює двом середнім термінам життя τ радіоактивного ядра.

Відповідь: $\omega = 13,5\%$.

24.9 Визначити, що і у скільки разів є більш тривалим – три періоди напіврозпаду $T_{1/2}$ чи два середніх терміни життя радіоактивного ядра τ .

Відповідь: $3T = 2,08\tau$.

24.10 Визначити період напіврозпаду радіоактивного ізотопу, якщо $5/8$ початкової кількості ядер цього ізотопу розпалося за час $t = 849$ с.

Відповідь: $T_{1/2} = 10$ хв.

24.11 Вивести формулу для визначення швидкості радіоактивного розпаду через період напіврозпаду $T_{1/2}$ і початкове число N_0 радіоактивних атомів.

Відповідь: $\frac{dN}{dt} = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_0 \exp\left(-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}\right)$.

24.12 Лічильник Гейгера зареєстрував за 1 хв 4000 β -частинок, що виникли при розпаді ядер радіоактивного ізотопу, а через добу - тільки 1000 розпадів. Визначити період напіврозпаду ізотопу.

Відповідь: $T_{1/2} = 0,5$ доби.

24.13 Знайти сталу розпаду λ і середній час життя τ радіоактивного ізотопу ${}^{55}_{27}\text{Co}$, якщо відомо, що його активність зменшується на $\eta = 4\%$ за годину? Продукт розпаду нерадіоактивний.

Відповідь: $\lambda = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$; $\tau = 1$ рік.

24.14 Із кожного мільйона атомів радіоактивного ізотопу щосекунди розпадається 200 атомів. Визначити період напіврозпаду ізотопу.

Відповідь: $T_{1/2} = \frac{N}{A} \ln 2 = 3466 \text{ c} = 0,96 \text{ год}$.

24.15 Несистемною одиницею радіоактивності ізотопу є кюрі (Ки) – це активність препарату, що чисельно дорівнює активно-

сті 1 г радію, тобто тій кількості розпадів, що відбуваються у 1 г радію за 1 с. Визначити цю кількість, знаючи, що період напіврозпаду радію $T_{1/2} = 1620$ років.

Відповідь: $A = 3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

24.16 На скільки відсотків зменшиться активність ізотопу іридію $^{193}_{77}\text{Ir}$ за час $t = 15$ діб?

Відповідь: $\frac{A_0 - A}{A_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_{1/2}}\right) = 0,129 = 12,9\%$.

24.17 Визначити дефект маси, енергію зв'язку та питому енергію зв'язку ядра атома важкого водню.

Відповідь: $\Delta m = 0,0024$ а.о.м.; $E_{36} = 2,23$ MeV.

24.18 Визначити: а) енергію зв'язку ядер гелію ^4_2He та дейтерію ^2_1H ; б) яку енергію потрібно витратити, щоб розщепити ядро гелію на два дейтони ^2_1H ?

Відповідь: а) $E_{36,\text{He}} = 28,3$ MeV; $E_{36,\text{H}} = 2,2$ MeV;

б) $E = 23,6$ MeV.

24.19 Визначити енергії зв'язку нейтрона та протона у ядрі ізотопу бора $^{11}_5\text{B}$. Пояснити чому вони є різними.

Відповідь: $E_{36,n} = 11,46$ MeV; $E_{36,p} = 11,24$ MeV.

24.20 Визначити масу m_a нейтрального атома, якщо ядро цього атома складається з трьох протонів та двох нейтронів і енергія зв'язку ядра дорівнює $E_{36} = 26,3$ MeV. Якого елемента це атом?

Відповідь: $m_a = 5,01258$ а.о.м.; це – атом літію ^5_3Li .

24.21 Визначити дозу поглинання при поглинанні енергії γ -випромінювання ^{60}Co (енергія кванта $\varepsilon = 1,3$ MeV) у об'ємі, маса якого $m = 70$ кг, протягом однієї доби. Активність поглинутого випромінювання - $A = 100$ мКи.

Відповідь: $D_n = 0,6 \text{ Гр}$.

24.22 Яка частина усіх молекул повітря за нормальних умов іонізується рентгенівським випромінюванням при експозиційній дозі $D_E = 258 \text{ мкКл/кг}$? Чому дорівнює ця доза в рентгенах?

Відповідь: $\omega = 7,73 \cdot 10^{-11}$; $D_E = 1 \text{ Р}$.

24.23 Повітря за нормальних умов опромінюється γ -випромінюванням. Визначити, яку енергію W поглинає повітря масою $m = 5 \text{ г}$ при експозиційній дозі опромінення $D_E = 258 \text{ мкКл/кг}$. Визначити також дозу поглинання для повітря за умови, що енергія γ -квантів $\varepsilon = 6,8 \text{ еВ}$.

Відповідь: $W = 8,77 \text{ мкДж}$; $D_n = 1,75 \text{ мГр}$.

24.24 Ефективний об'єм іонізаційної камери кишенькового дозиметра дорівнює $V = 1 \text{ см}^3$, електроємність $C = 2 \text{ нФ}$. Камера містить повітря за нормальних умов. Дозиметр був заряджений до потенціалу $\varphi_1 = 150 \text{ В}$. Під дією випромінювання потенціал зменшився до $\varphi_2 = 110 \text{ В}$. Визначити експозиційну дозу опромінення.

Відповідь: $D_E = 62 \text{ мкКл/кг}$.

24.25 Потужність експозиційної дози, створювана джерелом γ -випромінювання з енергією фотонів $\varepsilon = 2 \text{ МеВ}$, дорівнює $\check{D}_E = 0,86 \text{ мкА/кг}$. Визначити експозиційну, поглинуту та біологічну дози такого випромінювання протягом доби. Чому дорівнює біологічна доза α -, β -випромінювання, а також потоку теплових нейтронів з такою самою експозиційною дозою?

Відповідь: $D_E = 740 \text{ мкКл/кг}$; $D_n = 0,148 \cdot 10^5 \text{ Гр}$; $D_B = 287 \text{ БеР}$; $D_{B,\alpha} = 5740 \text{ БеР}$; $D_{B,\beta} = 287 \text{ БеР}$; $D_{B,n} = 1435 \text{ БеР}$.