

С.Г.Авдєєв, Т.І.Бабюк

ЛЕКЦІЇ З ФІЗИКИ

(ядерна фізика і радіаційна екологія)

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С.Г.Авдєєв, Т.І.Бабюк

ЛЕКЦІЇ З ФІЗИКИ

(ядерна фізика і радіаційна екологія)

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів електротехнічних спеціальностей. Протокол №2 від 25.09.03 р.

Вінниця ВНТУ 2004

УДК 53 (075)

А 75

Рецензенти

Р.Д.Венгреневич, доктор фізико-математичних наук, професор

В.Г.Петрук, доктор технічних наук, професор

П.М.Зузяк, доктор фізико-математичних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Авдєєв С.Г., Бабюк Т.І.

А 75 Лекції з фізики (ядерна фізика і радіаційна екологія). Навчальний посібник.- Вінниця: ВНТУ, 2003.- 131 с.

Посібник розроблений у відповідності з планом кафедри та програмами дисциплін “Загальна фізика” і “Радіаційна екологія” в технічному вузі і призначений для самостійної роботи студентів електротехнічних і екологічних спеціальностей.

Посібник також буде корисним для самостійної роботи студентів інших технічних спеціальностей.

УДК 53 (075)

Автори висловлюють подяку студенту 5-го курсу ІнЕЕЕМ Савельєву Сергію Олександровичу за значну допомогу в здійсненні комп'ютерного набору посібника.

Навчальне видання

Сергій Григорович Авдєєв
Тодор Ілліч Бабюк

ЛЕКЦІЇ З ФІЗИКИ
(ядерна фізика і радіаційна екологія)

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено Авдєєвим С.Г.
Редактор В. О. Дружиніна
Коректор З.В.Поліщук

Навчально-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
Серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м.Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку
Формат 29,7 x 42 $\frac{1}{4}$
Друк різнографічний

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум. друк. арк.

Тираж прим.
Зам. №

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м.Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Зміст

Ядерна фізика

Передмова.....	6
3.1. Атомне ядро	
3.1.1. Основні характеристики атомних ядер (лінійні розміри, заряд, зарядове й масове числа, спин, магнітний момент).....	7
3.1.2. Будова ядра. Нуклони, їх характеристики і взаємоперетворення. Нейтрино.....	11
3.1.3. Енергія зв'язку нуклонів у ядрі. Дефект маси. Ядерні сили і їх природа. Мезони	18
3.1.4. Феноменологічні моделі будови атомного ядра.....	22
3.2. Радіоактивність	
3.2.1. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду.....	25
3.2.2. Закономірності альфа - і бета – розпаду.....	28
3.2.3. Гамма-випромінювання. Взаємодії γ - променів з речовиною.....	34
3.3. Ядерні реакції	
3.3.1. Природа ядерних реакцій. Поріг і механізм ядерних реакцій.....	42
3.3.2. Реакції ділення. Ланцюгова реакція. Використання ядерної енергії.....	46
3.3.3. Термоядерні реакції. Енергія зірок. Керований термоядерний синтез.....	48
3.4. Ядерна зброя	
3.4.1. Ядерні вибухові пристрої.....	50
3.4.2. Термоядерні вибухові пристрої.....	54
3.4.3. Послідовність подій при ядерному вибуху.....	54
3.4.4. Нейтронна зброя.....	59
Радіаційна екологія	
3.5. Основи радіаційної екології	
3.5.1. Фізичні основи радіаційної безпеки.....	61
3.5.2. Джерела опромінення. Природна й штучна радіоактивність.....	63
3.5.3. Потік і інтенсивність іонізуючих випромінювань... ..	71
3.6. Взаємодія елементарних частинок з речовиною	
3.6.1. Взаємодія важких заряджених частинок з речовиною.....	72

3.6.2. Вільний пробіг важких заряджених частинок у речовині.....	75
3.6.3. Взаємодія бета-частинок з речовиною.....	76
3.6.4. Взаємодія нейтронів з речовиною.....	78
3.7. Елементи дозиметрії	
3.7.1. Поглинена й експозиційна дози. Одиниці вимірювання дози випромінювання.....	82
3.7.2. Особливості взаємодії різних видів випромінювання з біологічними об'єктами	84
3.7.3. Дія іонізуючого випромінювання на організм людини.....	88
3.7.4. Вплив іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти при загальному опроміненні	93
3.8. Біологічна дія іонізуючого випромінювання	
3.8.1. Основи біологічної дії іонізуючих випромінювань.....	95
3.8.2. Первинні процеси дії іонізуючих випромінювань.....	96
3.8.3. Деякі засоби захисту від зовнішнього і внутрішнього опромінення.....	98
3.8.4. Розрахунок захисту і захисні матеріали.....	100

Д О Д А Т О К 1

Довідковий матеріал

1. Орієнтовані норми радіаційної безпеки людей.....	109
2. Важливо знати.....	109
3. Перевідні коефіцієнти одиниць вимірювання радіоактивності.....	110
4. Середнє опромінення людини на землі, мЗв/рік.....	111
5. Середня величина опромінення населення колишнього СРСР (1991р.) мЗв/рік.....	112
6. Потужності експозиційної дози іонізуючого випромінювання в салоні пасажирського літака.....	112
7. Місця нагромадження радіонуклідів в організмі людини	113
8. Рівні радіоактивності деяких рідин.....	113
9. Гранично допустимі вмісти деяких радіонуклідів в тілі людини (мкКі).....	114
10. Наслідки опромінення людини.....	114
11. Радіоізотопний склад чорнобильського викиду.....	115
12. Розподіл ^{131}I і ^{137}Cs в різних районах земної кулі після аварії на ЧАЕС.....	116

13.Тимчасові допустимі рівні вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr в харчових продуктах і питній воді, установлені після аварії на Чорнобильській АЕС	116
14.Граничні допустимі дози опромінення, схвалені комісією ядерного регулювання США (мЗв/рік).....	117

Д О Д А Т О К 2

Закон України “Про охорону навколишнього природного середовища на Україні”.

Загальні положення	118
Екологічні права й обов’язки громадян	122
Повноваження Рад в області охорони природи	125
Повноваження органів управління в області охорони природи	128
Моніторинг навколишнього природного середовища.....	137
Екологічна експертиза	139
Стандартизація і нормування	141
Контроль і нагляд в області охорони навколишнього природного середовища	143
Література	144

Передмова

Явище радіоактивності було відкрите більше ніж сторіччя тому, а радіаційна екологія як самостійна дисципліна одержала свій розвиток порівняно недавно. Радіоактивність і випромінювання, яке його супроводжує, існували на Землі задовго до зародження на ній життя.

Джерелом радіоактивності, що існує в природі, є сама природа. Навіть їжа з природних причин у певній мірі радіоактивна. Проте, зацікавленість до радіаційної екології в значній мірі зросла в останні роки у зв'язку з тим, що людство міцно вступило в ядерне сторіччя. Разом з тим росте число людей, які мають безпосереднє професійне відношення до радіоактивного випромінювання. У наш час ряд технологічних процесів одержання і застосування ядерної енергії, виробництва й використання штучних радіоізотопів пов'язані з можливістю надходження радіоактивних відходів у навколишнє середовище.

Багаторічні випробовування ядерної і водневої зброї, а також аварії на ядерних об'єктах створили на планеті новий фактор радіаційного впливу на людей. Стає зрозумілим зростання актуальності досліджень, спрямованих на розширення наукових знань у цій області. З повною відповідальністю можна стверджувати, що основне завдання фахівців в області радіаційної екології - не допустити більш-менш помітного збільшення існуючої в природі радіоактивності.

Для вирішення поставленого завдання спеціалісту в області радіаційної екології необхідно, як мінімум, мати уявлення про фізико-хімічні основи явища радіоактивності, взаємодії іонізуючих випромінювань з речовиною і, зокрема, про особливості впливу радіаційного випромінювання на живі організми; а також мати необхідні знання по дозиметрії і методах захисту людей від впливу радіоактивних випромінювань.

Ядерна фізика

3.1. Атомне ядро

3.1.1. Основні характеристики атомних ядер (лінійні розміри, заряд, зарядове й масове числа, спин, магнітний момент).

3.1.2. Будова ядра. Нуклони, їх характеристики і взаємоперетворення. Нейтрино.

3.1.3. Енергія зв'язку нуклонів у ядрі. Дефект маси. Ядерні сили і їх природа. Мезони.

3.1.4. Феноменологічні моделі будови атомного ядра.

3.1.1. Основні характеристики атомних ядер (лінійні розміри, заряд, зарядове й масове числа, спин, магнітний момент)

В дослідях Резерфорда з розсіювання α -частинок на атомах важких металів вперше було встановлено існування атомних ядер. Атомне ядро кожного хімічного елемента, як і будь-який інший матеріальний об'єкт, має ряд характерних властивостей. Серед них: електричний заряд, маса, електричний і магнітний моменти, спин та ін. Розглянемо деякі характеристики атомних ядер.

Електричний заряд є однією з найважливіших характеристик атомів і ядер. Ядро атома завжди має позитивний заряд. Носіями позитивних зарядів у ядрі є протони. Носіями негативних електричних зарядів є електрони, які рухаються на значних відстанях від ядра, утворюючи електронну хмарку. Величину електричного заряду атома визначає число протонів у ядрі і число електронів у нейтральному атомі. Заряд $q_s = Ze$, де Z – зарядове число ядра, яке дорівнює порядковому номеру елемента в таблиці Менделєєва.

Розподіл густини зарядів електричного заряду в ядрах вперше встановив у 1957 році Хофштадтер. Для цього були використані електрони високих енергій (до 1000 MeV). Якщо електрон великої енергії пролітає на відстані b від ядра із зарядом Z_e , то він за допомогою кулонівських сил ядра відхилиться на кут θ (рис. 3.1). Можна розрахувати залежність θ від b .

У випадку коли $b = R$, де R – радіус ядра, кут $\theta = \theta_{\max}$. Виходячи з експериментальних даних і проведених теоретичних розрахунків класичним квантовим методами знайдено, що позитивний заряд в ядрі розподілений з однаковою густиною по об'єму ядра. Про це свідчить рис.3.2.

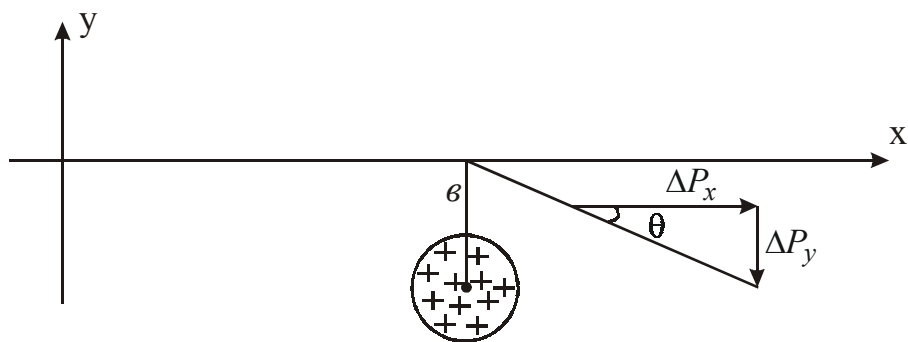


Рис. 3.1

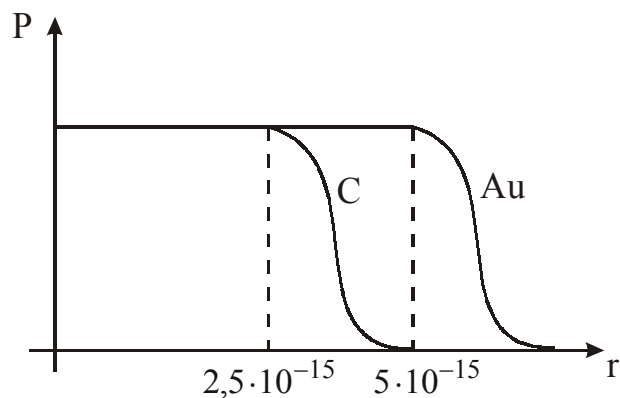


Рис. 3.2

Маса ядра є наступною важливою характеристикою. Практично вся маса атомного ядра збігається з масою атома, оскільки маса електронів на оболонках дуже незначна. Масу атомів, а, відповідно, і масу ядер, визначають за допомогою відхилення іонів цих атомів при їх русі в електричному й магнітному полях. Для цих цілей Астоном був сконструював прилад, який називається мас-спектрометром.

Мас-спектрометр складається із джерела іонів Д, вакуумної камери і приймача іонів П (рис. 3.3).

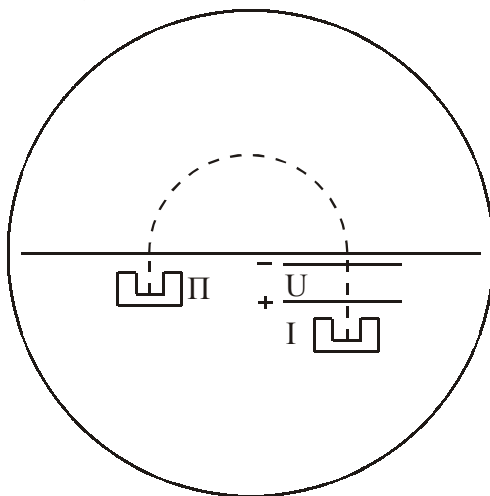


Рис. 3.3

Іонізовані атоми попадають в поле конденсатора К, де прискорюються електричним полем

$$qU = \frac{M_{zA} v^2}{2}, \quad (3.1.1.1)$$

де M_{zA} – маса іона; v – швидкість іона; U – різниця потенціалів між пластинками конденсатора; q – заряд іона.

При відповідній швидкості v іонізовані атоми влітають в область дії лише магнітного поля $\vec{B}$. В цьому випадку на такі атоми діятиме сила Лоренца

$$qvB = \frac{M_{zA} v^2}{R}. \quad (3.1.1.2)$$

Виключивши з (3.1.1) і (3.1.2) швидкість іона, одержуємо

$$M_{z,A} = \frac{qB^2 R^2}{2U}. \quad (3.1.1.3)$$

Попадання в приймач П іонів можливе лише при певній напрузі між пластинками конденсатора. Іони з різною масою попадуть в приймач при різних значеннях U .

На рис. 3.4 показано спектр атомів молібдену при їх дослідженні за допомогою мас-спектрометра.

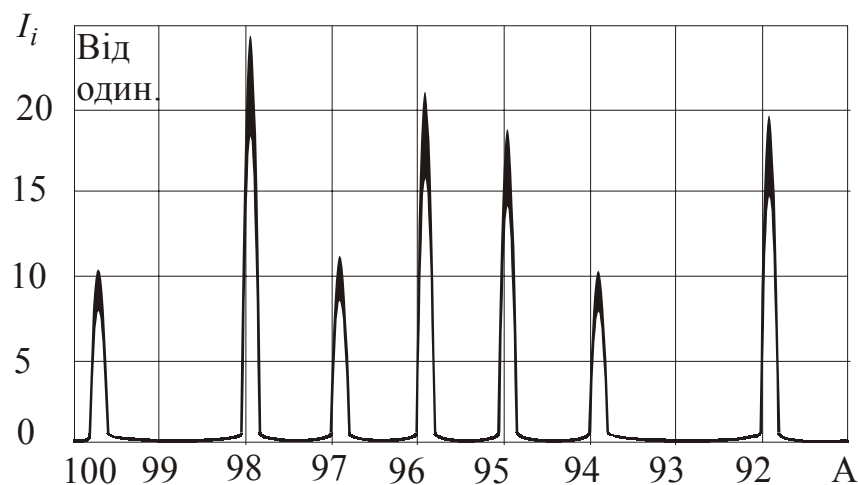


Рис. 3.4

Висота піка визначає процентний вміст даного ізотопу в природному молібдені. Окремі піки в спектрі визначають наявність окремих ізотопів. Точність мас спектроскопічних досліджень не нижче $(10^{-4} - 10^{-3}) \%$.

В результаті проведених досліджень встановлено, що радіус атомного ядра дорівнює:

$$R = 1.2 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3} \text{ м}, \quad (3.1.1.4)$$

де A – атомна маса ядра в атомних одиницях маси.

Знаючи середній радіус атомного ядра, можна розрахувати масову густину ядерної речовини, яка не залежить від розмірів ядра і дорівнює

$$\rho = \frac{A}{V} = \frac{A \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}}{\frac{4}{3} \pi \cdot (1.2 \cdot 10^{-15})^3 \cdot A} = 2.3 \cdot 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (3.1.1.5)$$

Дослідження електричного поля ядра дали можливість зробити висновок про його форму. Встановлено, що не всі ядра є сферично-симетричними, але для всіх ядер без винятку характерна осьова симетрія. Однак відомо, що осьова симетрія можлива лише у випадках, коли ядро має сферичну форму або є еліпсоїдом обертання.

Спін ядра поряд з зарядом і масою є його найважливішою характеристикою. Спіном ядра називають його повний механічний момент, який є сумою власних механічних моментів складових частинок ядра та їхніх орбітальних механічних моментів, зумовлених внутрішньоядерними рухами. Спін ядра залежить від його стану. Оскільки в будь-якому ядрі є Z - протонів і $A - Z$ - нейтронів, спіни яких дорівнюють $\frac{1}{2}$, то всі ядра з парним A мають цілий або нульовий спін, а ядра з непарним A мають завжди півцілий спін. В залежності від величини A ядра можуть бути або ферміонами (A – непарне), або бозонами (A – парне).

Магнітні моменти ядер визначають за допомогою явища магнітного резонансу. Суть цього явища полягає в резонансному поглинанні енергії високочастотного електромагнітного поля, яке відбувається при переорієнтації попередньо зорієнтованих за допомогою постійного магнітного поля магнітних моментів ядер. Вимірюють магнітні моменти ядер у ядерних магнетонах, які вводяться аналогічно магнетона Бора

$$\mu_2 = \frac{e\hbar}{4\pi m_p} = \xi \cdot \hbar, \quad (3.1.1.6)$$

де m_p – маса протона; e – заряд протона; $\hbar$ – стала Планка; $\xi = \frac{e}{2m_p}$ – гіромагнітне відношення.

Аналіз показує, що магнітні моменти ядер є дуже малими і експериментально їх важко виміряти. Це приводить до висновку, що нуклони в ядрі розміщуються так, що їхні спіни і магнітні моменти взаємно компенсуються.

3.1.2. Будова ядра. Нуклони, їх характеристики і взаємоперетворення. Нейтрино

Ядро складається із Z - протонів і $A-Z$ - нейтронів. Протони і нейтрони називають ще нуклонами. Вважають, що ядерна частинка – нуклон, може бути в двох “зарядових станах”: протонному з зарядом $+e$ і нейтронному з зарядом 0 . Маси спокою цих двох станів дещо різні, що має велике значення при радіоактивних перетвореннях. Нуклони характеризуються масою, зарядом, спіном, магнітними моментами тощо.

Протон має масу $m_p = 1.007276$ а.о.м. Заряд протона позитивний, рівний заряду електрона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Спін протона півцілий, рівний $\frac{1}{2}$. Магнітний момент протона $\mu_p = 2.79\mu$, де μ - ядерний магнетон. Спін і магнітний момент у протона орієнтовані в одному напрямі.

Перша ядерна реакція взаємодії α - частинок з ядрами азоту, в результаті якої утворились вільні протони, була здійснена Резерфордом у 1919 році.

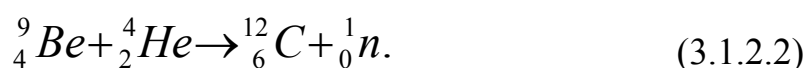


Дія α - частинок на атоми азоту викликала появу нових частинок з великою проникною здатністю. Ретельне вивчення їх в електричному і магнітному полях показало, що ці частини є протонами, тобто ядрами атома водню. Пізніше Резерфорд і Чедвік показали, що крім ядер азоту протони випромінюються під дією швидких α - частинок і на ядра інших легких елементів. Проте більш важкі ядра розщепити α - частинками не

здавалось, α -частинка, попадаючи в ядро, припиняє своє існування, а замість неї вилітає протон. Імовірність попадання α - частинки в ядро атома азоту дуже мала.

Наступна частинка після електронів і протонів була ідентифікована лише у 1932 році Чедвіком. Такими частинками з масою близькою до протона і зарядом, рівним нулю, виявились нейтрони. Ефективним джерелом нейтронів є берилієва мішень, яку опромінюють α - частинками радію. Однак потужні джерела нейтронів були побудовані пізніше – ними виявились атомні реактори.

Реакцію утворення нейтронів при бомбардуванні берилію α - частинками можна записати так



Маса нейтрона $m_n = 1.0086649$ а.о.м., а заряд нейтрона рівний нулю. Магнітний момент нейтрона протилежний до спіна й дорівнює $\mu_n = -1.913\mu$, де μ - ядерний магнетон, менший у 1840 разів за магнетон Бора. Спін нейтрона – $\frac{1}{2}$.

Існують припущення, що внутрішня будова протона досить складна. Так вважається, що у протона позитивний заряд розподілений по всьому об'єму. В центральній частині протона розміщена важка серцевина (корн), в якій зосереджено біля 10% заряду. Решта заряду розміщено в середній частині й на оболонці.

У нейтрона корн і середня частина заряджені негативно, а оболонка має позитивний заряд. Позитивний і негативний заряди компенсують один одного, так що заряд нейтрона дорівнює нулю. І в протона і в нейтрона окремі частини їх будови різко не виражені, тому можна говорити про плавний розподіл їх заряду по об'єму.

Вільний протон є надзвичайно стійкою частинкою. Жодного випадку перетворення протона з вільного стану в інші частинки не зареєстровано. Вважається, що якщо такий факт перетворення протона можливий, то його імовірність близька до нуля.

Вільні нейтрони є радіоактивними. Так, середній вік життя вільного нейтрона не перевищує 11.7 хвилини.

Перетворення нейтрона в протон з виділенням β - частинки і антинейтрино можна показати за допомогою такої реакції



де ${}^0_{-1}\beta$ - електрон; $\tilde{\nu}_e$ - антинейтрино.

Нейтрони в ядрах атомів у випадку, коли їх число близьке до числа протонів, є досить стабільними частинками. Такі елементи в таблиці Менделєєва розміщуються в середній її частині.

Якщо ядро містить надлишок протонів, то його склад може змінитись завдяки перетворенню протона в нейтрон:



де ${}^0_{+1}\beta$ – позитрон, античастинка до електрона; ν_e - нейтрино.

Таке перетворення протона в нейтрон може відбуватись тільки в ядрі. При цьому маса материнського ядра повинна перевищувати масу дочірнього ядра не менше ніж на дві електронні маси.

Існування таких частинок, як нейтрино й антинейтрино було передбачено Паулі ще в 1930 році. Але експериментально цей факт було підтверджено лише в 1953 році. Джерелом антинейтрино був ядерний реактор, який створював досить потужний потік цих частинок, близько 10^{13} частинок через площадку 1 см^2 за 1 секунду. Експериментальна установка розміщувалась глибоко під землею далеко від реактора з потужним захистом від космічного випромінювання і випромінювання реактора. Реєстрація здійснювалась за допомогою рідкого сцинтилятора, який містив кадмій. Були створені всі умови для реєстрації дуже рідкісного явища взаємодії антинейтрино з протоном



Позитрон ${}^0_{+1}\beta$, зустрівшись з електроном сцинтилятора, анігілював на два гамма-кванти



Ця реакція давала перший спалах сцинтилятора. Після цього нейтрон в реакції (3.1.11) за малий проміжок часу сповільнювався і поглинався ядром кадмію. Ядро кадмію спочатку збуджувалось, а потім переходило в нормальний стан, випромінюючи цілий каскад гамма-квантів. Ці гамма-кванти уже давали другий спалах, який теж реєструвався сцинтилятором. Така подія повторювалась в умовах цього експерименту приблизно один раз на три години. Рейнес і Коцен – фізики, які здійснювали цей експеримент, підраховали, що реєстрація антинейтрино одне із найменш імовірних явищ ядерної фізики.

Історична довідка

Уже багато років усе частіше й частіше не тільки в вагомих наукових журналах, але й на сторінках газет і популярних видань приходить зустрічатися з "таємничою" елементарною частинкою, яка носить досить дивну назву - "нейтрино". Що ж це за частинка, яку роль вона відіграє у фізиці елементарних частинок й у Всесвіті?

Коли ця частинка вперше з'явилася у фізиці вчені уже твердо знали, що існують такі елементарні частинки, як нейтрони й протони - "цеглинка", з яких складається атомне ядро.

У 1931 р. відомий швейцарський фізик Вольфганг Паулі прийшов до висновку, що в природі повинна існувати ще одна нейтральна частинка з масою, набагато меншою, ніж у нейтрона, як він говорив, "маленький нейтрон". Коли Паулі викладав цю ідею з трибуни однієї міжнародної наукової конференції, італійський фізик Енріко Фермі перебив його словами:

- Називайте її "нейтрино"!

Справа в тім, що на італійській мові зменшувальне "ино" відповідає російським суфіксам "чик" або "ушк". Так що нейтрино в перекладі з

італійської буде означати "маленький нейтральний", або просто "нейтрончик".

Так нейтрино було винайдено Паулі, а одержало назву з легкої руки Фермі. "Винахід" нейтрино було здійснено завдяки труднощам, виявленим при експериментальному дослідженні так званого процесу бета - розпаду. Цей процес полягає у випромінюванні ядрами деяких хімічних елементів негативних електронів (e^-). Коли нейтрино ще не було "винайдене", припускали, що бета-розпад ядра Z , що має заряд $+Ze$, відбувається за схемою



Але виявилось, що енергії електронів, які вилітають, у цьому процесі не мають дискретного значення. У більшості випадків енергії явно не вистачало в порівнянні з тією, яку вони повинні були теоретично мати. Створювалося враження, що енергія кудись зникає, начебто порушувався закон збереження енергії. Труднощі були настільки значними, що деякі великі фізики пропонували навіть відмовитися від цього фундаментального закону.

Удаване незбереження енергії, однак, мало досить дивний характер. Дійсно, якщо енергія не зберігається в процесі бета-розпаду, то ми повинні були б очікувати, що іноді енергії електронів буде не вистачати, а іноді з'явиться "зайва". Однак виявилось, що "зайвої" енергії не буває.

Таким чином, не природне прагнення зберегти непорушними закони фізики, а факти, яким у науці завжди належить останнє слово, змусили встати на захист закону збереження енергії. Але як?

"Винахідник" нейтрино міркував так. Удаване незбереження енергії обумовлене просто тим, що вищенаведена схема неправильно описує процес бета-розпаду. У цьому процесі повинна брати участь ще одна, не виявлена дослідним шляхом нейтральна (а тому практично невловима) частинка, яка несе "зниклу" енергію. Вона і була названа нейтрино ($\bar{\nu}$). Таким чином, схема бета-розпаду виглядала так:



де e^- - електрон; $\bar{\nu}$ - антинейтрино.

І хоча для всіх частинок, які виділяються в цьому процесі, сумарна енергія має точно визначену величину, вона розподіляється між продуктами розпаду так, що в різних випадках електрон одержує різні її порції. Сам фундаментальний процес бета-розпаду - розпад нейтрона буде тому описаний схемою

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu} . \quad (3.1.2.9)$$

Всередині атомних ядер протон також може перетворюватися в нейтрон з випромінюванням позитивного електрона (або позитрона) і нейтрино:

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu , \quad (3.1.2.10)$$

де e^{+} - позитрон, позитивно заряджений електрон; ν - нейтрино.

Отже, нейтрино - це частинка, яка при бета-розпаді несе частину енергії. Так припускали фізики-теоретики, що із самого початку вважали її як "невловиму" частинку. І відразу ж були передбачені властивості нової частинки: вона повинна бути електрично- нейтральною, мати високу проникну здатність і бути надзвичайно малою за масою. Інакше експериментаторам було б неважко знайти її, а це виявилось зовсім не просто. Остання властивість - вкрай мала маса - відповідно до теорії відносності приводить до того, що нейтрино не може знаходитися в стані спокою: воно завжди рухається зі швидкістю світла.

Після того як гіпотеза про існування нейтрино була сформульована, фізики спробували знайти й інші докази його присутності в бета-розпаді. Як відомо, при перетвореннях частинок, як і при будь-яких фізичних процесах, що відбуваються в будь-якій системі, зберігається не тільки енергія, але і кількість руху або імпульс.

Якщо нейтрон, який дає бета-розпад, нерухомий, то його імпульс дорівнює нулю. Виходить, і сумарний імпульс усіх частинок - продуктів розпаду - також повинен бути рівним нулю. Але в численних дослідях, перший з яких ще в 1934 р. поставив радянський фізик О. Лейпунський, було показано, що сумарний імпульс електрона й ядра віддачі ($Z+1$) при бета-

розпаді ядра Z не дорівнює нулю. Це підтверджує гіпотезу про нейтрино: невідомим частинкам несе "зниклий" імпульс.

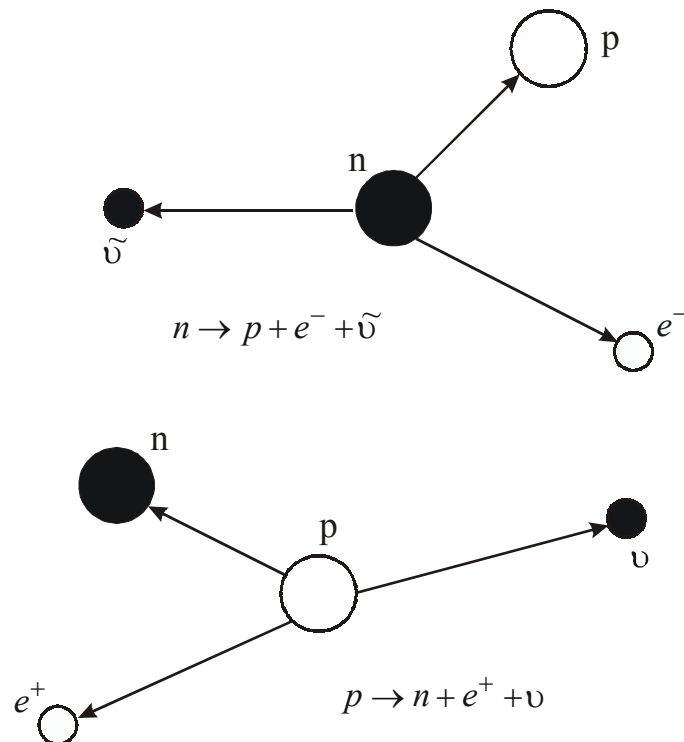


Схема бета - розпаду нейтрона й протона

Як з'ясувалося після відкриття інших елементарних частинок, особливо мезонів, нейтрино бере участь не тільки в бета-розпаді ядер, але й в інших процесах. Його присутність виявляється завжди, коли енергія начебто зникає. До речі, у деяких з цих процесів, де число частинок, що утворюються, дорівнює двом, а не трьом, як у процесі бета-розпаду, характер "незбереження енергії" більш ніж підозрілий і вимагає існування нейтрино ще ясніше, ніж у випадку бета-розпаду.

Наприклад, при розпаді так званого піона (або пі-мезона) завжди "зникає" певна енергія, близько 30 MeV. У процесі захоплення мюона (або мю-мезона) ядром гелію-3



виявленому в Об'єднаному інституті ядерних досліджень у Дубні, "зникає" близько 100 MeV (енергія нейтрино), а ядра віддачі тритію ${}^3\text{H}$ мають енергію, завжди точно рівну 1,9 MeV. Якби ці процеси були відомі раніше,

ніж бета-розпад, не було б необхідності в генії Паулі для "відкриття" нейтрино.

Нейтрино й антинейтрино відрізняються одне від одного тим, що мають різний напрямок "спіральності", причому нейтрино нагадує гвинт із лівим різьбленням, а антинейтрино - із правим.

3.1.3. Енергія зв'язку нуклонів у ядрі. Дефект маси. Ядерні сили і їх природа. Мезони

Внутрішню енергію ядра можна розрахувати за формулою

$$E = \sum_{i=1}^n m_{0i} \cdot c^2 + \sum_{i=1}^n E_{ki} + E_n, \quad (3.1.3.1)$$

де $\sum_{i=1}^n m_{0i} \cdot c^2$ - сумарна енергія спокою всіх нуклонів у ядрі; m_{0i} - маса довільного нуклона; c^2 - квадрат швидкості світла; $\sum_{i=1}^n E_{ki}$ - сумарна кінетична енергія внутрішнього ядерного руху нуклонів; E_n - потенціальна енергія взаємодії нуклонів.

Внутрішню енергію ядра також можна розрахувати за формулою:

$$E = M_{\zeta} c^2, \quad (3.1.3.2)$$

де M_{ζ} - маса спокою ядра; c - швидкість світла.

Праві сторони рівностей (3.1.13) і (3.1.14) прирівнюємо

$$\sum_{i=1}^n m_{0i} c^2 + \sum_{i=1}^n E_{ki} + E_n = M_{\zeta} c^2,$$

звідки

$$\sum_{i=1}^n E_{ki} + E_n = M_{\zeta} c^2 - \sum_{i=1}^n m_{0i} c^2. \quad (3.1.3.3)$$

В лівій стороні рівності (3.1.3.3) сумарну кінетичну енергію внутрішньоядерного руху нуклонів у ядрі в сумі з потенціальною енергією їх взаємодії називають повною енергією зв'язку, взятою із протилежним знаком. Тому

$$E_{\text{зв}} = - \left[\sum_{i=1}^n E_{k,i} + E_n \right] = \sum_{i=1}^n m_{0i} c^2 - M_{\zeta} c^2. \quad (3.1.3.4)$$

Повна енергія зв'язку ядра визначається роботою, яку треба виконати, щоб розділити ядро на окремі нуклони без надання їм кінетичної енергії.

Якщо масу нуклонів у ядрі і масу ядра виразити в а.о.м., то повна енергія зв'язку ядра буде виражатись в MeV згідно з рівністю

$$E_{\text{зв}} = 931.48 \left[\sum m_0 - M_{\zeta} \right] \text{MeV}, \quad (3.1.3.5)$$

де $\sum m_0$ - сумарна маса спокою всіх нуклонів; M_{ζ} - маса ядра спокою; 931.48 MeV – величина, еквівалентна енергії а.о.м.

З урахуванням числа протонів Z у ядрі і числа нейтронів $A-Z$ вираз (3.1.3.5) перепишеться

$$E_{\text{зв}} = 931.48 \left[Z m_p + (A - Z) m_n - M_{\zeta} \right] \text{MeV}, \quad (3.1.3.6)$$

де m_p – маса протона; m_n – маса нейтрона; M_{ζ} – маса ядра.

Втрачаючи енергію на зв'язок нуклонів у ядрі, втрачається також маса. Ядро в зібраному стані завжди має масу меншу за сумарну масу

нуклонів, з яких це ядро складається. Тому різницю мас в цьому випадку прийнято називати *дефектом маси*.

Дефект маси довільного ядра знаходиться за формулою

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - M_{\zeta} . \quad (3.1.3.7)$$

Надзвичайно великі значення енергії зв'язку атомних ядер свідчать про існування надзвичайно великих ядерних сил взаємодії між нуклонами.

Важливим є той факт, що енергія зв'язку, розрахована на один нуклон у будь-якому ядрі, приблизно однакова і складає біля $E_0 \approx 8$ MeV.

$$E_0 = \frac{E_{\text{зв}}}{A} = \frac{931.48}{A} [Z m_p + (A - Z) m_n - M_{\zeta}] , \quad (3.1.3.8)$$

де A – число нуклонів у ядрі.

Залежність енергії зв'язку, розрахованої на один нуклон, в залежності від масового числа атома A стабільних ізотопів відображена на графіку (рис.3.5)

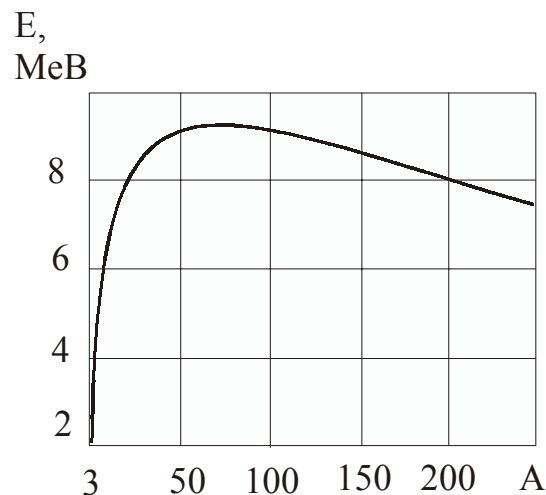


Рис. 3.5

Зменшення енергії зв'язку на один нуклон (питома енергія зв'язку) в ядрах атомів, які розташовані в кінці періодичної системи, вказує на те, що при поділі важкого ядра на два легших ядра виділятиметься енергія і такий

процес може бути самочинним. Це дає змогу використати такі елементи для промислового виділення ядерної енергії, наприклад у ядерних реакторах.

Аналогічно можна звільняти достатньо велику енергію при синтезі з легких ядер більш важких. Цю енергію прийнято називати термоядерною.

Те, що при поділі важких ядер і синтезі з легких ядер більш важких звільняється значна енергія, вказує на значне притягання нуклонів у ядрі, тобто на існування ядерних сил.

Розрахунки показують, що ядерні сили майже у 137 разів перевищують сили кулонівського виштовхування і взаємодії магнітних моментів нуклонів. Це новий тип взаємодій, який істотно відмінний від інших видів взаємодії, серед яких можна назвати гравітаційні та електромагнітні.

Розглянемо основні характерні властивості ядерних сил. Ядерні взаємодії між двома протонами (p-p), двома нейтронами (n-n), протоном і нейтроном (p-n) однакові. Це говорить про те, що ядерні сили не залежать від електричного заряду. Протони й нейтрони мають однаковий ядерний заряд і відносяться до одного типу ядерних частинок – нуклонів. Властивість зарядової незалежності ядерних сил пояснює стійкість ядра дейтерію, яке складається лише з протона і нейтрона.

Ядерні сили мають властивість насичення. Кожний із нуклонів ядра вступає в ядерну взаємодію лише з обмеженим числом інших нуклонів. Такий висновок можна зробити з величини питомої енергії зв'язку нуклонів у ядрі, яка майже не залежить від числа нуклонів. Повна енергія зв'язку нуклонів у ядрі в цьому випадку пропорційна масовому числу A , а не A^2 , у випадку відсутності насичення ядерних сил.

Ядерні сили належать до короткодійних. Радіус їх дії не перевищує $2.0 \cdot 10^{-15}$ м. Дослідження взаємодій α -частинок з ядрами легких елементів показали, що від відстані $2.0 \cdot 10^{-15}$ м. діють ядерні сили притягання, а на відстанях менших за $0.7 \cdot 10^{-15}$ м сили притягання між нуклонами змінюються на досить сильне відштовхування, інакше густина ядерної речовини не була б однаковою для будь-яких ядер.

Ядерні сили не є центральними, оскільки залежать не лише від відстані між нуклонами, а й від взаємної орієнтації їх спінів.

Ядерні взаємодії дістали назву *сильних взаємодій*. Для сильних взаємодій питома енергія зв'язку нуклонів у ядрі складає від 7 до 8.7 МеВ.

Відомо, що будь-який вид взаємодій зводиться до обміну квантами. Так, квантами електромагнітних взаємодій є фотони; гравітаційних

взаємодій – гравітони. У ядерних взаємодіях теж повинні існувати кванти ядерного поля.

У 1935 році японський фізик Юкава висунув сміливу гіпотезу про те, що в природі існують частинки з масою в $200 \div 300$ разів більшою від маси електрона і що саме через них здійснюється взаємодія нуклонів. Носіями ядерних сил виявились π – мезони, відкриті в космічному випромінюванні у 1947 році. Було встановлено, що існують позитивні π^+ - мезони й негативні π^- - мезони, маса яких $273 m_e$, та нейтральні π^0 - мезони, з масою $264 m_e$. Згідно з мезонною теорією нуклони в ядрі постійно обмінюються відповідними мезонами. Цей процес відбувається через кожні $4 \cdot 10^{-24}$ с. Мезони при цьому рухаються з швидкістю, близькою до швидкості світла.

Якщо два протони, або два нейтрони, або протон і нейтрон обмінюються нейтральними π^0 – мезонами, то в цьому випадку на час обміну перетворення нуклонів не відбувається. Нейтрон з протоном також обмінюються π^- -мезоном. Втративши один π^- -мезон нейтрон на короткий час перетворюється в протон. В цей же час протон, поглинувши один π^- - мезон, стає нейтроном. Протон з нейтроном можуть обмінюватись π^+ - мезоном. При цьому протон, втративши один π^+ - мезон, перетворюється в нейтрон, а нейтрон, поглинувши π^+ - мезон, перетворюється в протон.

Безпосередніх змін у масі протона або нейтрона внаслідок випромінювання або поглинання мезона не виявлено. Це дало можливість припустити, що вільними мезони в ядрі перебувають так мало часу, що виявити їх неможливо. Частинки такого типу у фізиці були названі *віртуальними*.

3.1.4. Феноменологічні моделі будови атомного ядра

Для побудови теорії ядра слід точно знати властивості ядерних сил. Але в науці ще не має достатньо ясного уявлення про природу цих сил. Тому фізикам при моделюванні ядерних процесів приходится робити деякі спрощення. Та чи інша модель має право на існування, якщо зіставлення теоретичних розрахунків підтверджується відповідними експериментальними дослідженнями. Сьогодні мають право на існування кілька моделей ядра. Жодна з них не є універсальною. Всі моделі, якими користуються при поясненні тих чи інших процесів в ядрах атома, є наближені.

Здатність до насичення ядерних сил та дуже мала стисливість ядерної речовини стали основою для введення ще в 30-х роках Вейцекером *краплинної моделі* ядра атома. За цією моделлю ядро схоже на краплю рідини сферичної форми, яка наповнена нуклонами. Відомо, що між молекулами краплі будь-якої рідини проявляються короткодійні міжмолекулярні сили. Кожна молекула рідини взаємодіє лише з обмеженим числом інших молекул. Молекули в краплі рідини рухаються хаотично, часто взаємодіють одна з одною. На поверхні краплі молекули втягуються в середину, а це призводить до виникнення поверхневого натягу. Густина рідини краплі не залежить від її розмірів. Такі ж властивості спостерігаються у ядрах атомів. Нуклони, згідно крапельної моделі, інтенсивно і хаотично рухаються. Будь-яка взаємодія нуклонів у ядрі супроводжується обміном енергією і імпульсом. Ядерна крапля не розтікається, оскільки існує поверхневий натяг тощо.

Введення краплинної моделі будови ядра дозволило визначити радіуси ядер; показати, що густина ядерної речовини не залежить від масового числа. Вдалим застосуванням цієї моделі є пояснення на її основі процесу поділу атомних ядер Бором і Уілером. Процес поділу атомних ядер розглядався як розрив електрично зарядженої краплини на дві окремі краплини меншого розміру.

Проте, незважаючи на ці аналогії, слід пам'ятати, що ядерні і молекулярні явища є принципово різними. Так, сили молекулярної взаємодії в рідинах мають електромагнітну природу, тоді як ядерні сили мають зовсім іншу природу. Ядерна “рідина” є сумішшю двох “рідин”: протонної і нейтронної. Не слід також забувати, що рух нуклонів у ядрах є квантовим.

Головним недоліком крапельної моделі ядра є повна відсутність схожості речовини ядра і рідини. Навіть у найменшій краплі рідини містяться мільярди молекул, в той час як у ядрі атома може бути не більше 300 нуклонів. Не пояснює крапельна модель ядра дискретний характер α -випромінювання. Не ясно також, чому серед багатьох хімічних елементів таблиці Менделєєва є особливо стійкі ядра? Виникло і ряд інших запитань, на які ця модель не давала відповіді.

У 1949 – 1950 р.р. Гепперд - Маєр і Йенсон запропонували більш реалістичну *оболонкову модель* будови атомного ядра. Згідно з цією моделлю в ядрах атомів є досить багато вільного місця. Тому нуклони в ядрах перебувають не в хаотичному русі, а рухаються на певних нуклонних оболонках, подібно до електронних енергетичних рівнів в

атомах. Однак, на відміну від атома, в якому є виділений силовий центр – ядро і в якому діють електромагнітні сили з наближеним радіусом дії, для нуклонів такого центра в ядрі немає. Вважається, що нуклони на нуклонних оболонках рухаються в самоузгодженому полі інших нуклонів. Потенціальна енергія кожного нуклона має форму потенціальної ями. В цій моделі ядра були одержані магічні числа, було пояснено спіни і парність основних і деяких збуджених станів атомних ядер. У магічних ядер спостерігається особлива стійкість. Ця стійкість періодично повторюється при магічних числах протонів 2, 8, 20, 50 і 82 і магічних числах нейтронів 2, 8, 20, 50, 82 і 126. Якщо порівняти хімічні властивості елементів з властивостями магічних ядер, то можна відмітити :

- хімічні властивості елементів періодично повторюються при збільшенні порядкового номера Z , а магічні властивості ядер – при збільшенні масового числа A .

Така своєрідна періодичність повторення властивостей ядер стала основою для створення оболонкової моделі ядер. Згідно з цією моделлю нуклони в ядрах групуються на оболонках, кожна із яких за принципом Паулі може містити обмежене число нуклонів. Магічні властивості у ядер спостерігаються тоді, коли зовнішня нуклонна оболонка стане повністю заповненою. Перша нуклонна оболонка повністю заповнена у гелію ${}^4_2\text{He}$ і складається з двох протонів і двох нейтронів. Друга нуклонна оболонка заповнена у кисню ${}^{16}_8\text{O}$. Наступні магічні ядра мають ізотопи ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{100}_{50}\text{Sn}$, ${}^{164}_{82}\text{Pb}$.

В цій моделі ядра було пояснено спіни і парність основних і деяких збуджених станів атомних ядер.

Крапельна й оболонкова моделі не лише суперечать одна одній, а й доповнюють одна одну. Кожна із цих моделей описує властивості ядер, які зовсім не пояснюються іншою моделлю.

Всі переваги крапельної і оболонкової моделі будови атомних ядер були об'єднані у так звану *узагальнену модель*. Ця модель була запропонована Рейнуотером, Бором і Моттельсоном у 1950 – 1953 р.р. В цій узагальненій моделі вважається, що в ядрі існує достатньо стійкий остов, який складається із замкнутих оболонок. Зовнішні нуклони розглядаються в цій моделі незалежними, тому що вони рухаються в полі остова. На відміну від оболонкової моделі тут допускається деформація остова під дією зовнішніх нуклонів. Узагальнена модель пояснила існування несферичних ядер, їх обертальні і коливальні значення енергій.

Узагальнена модель будови ядра атома поділяє ядерні рівні на одночастинні і колективізовані, обумовлені рухом остова, а також дає можливість розрахувати спін кожного такого рівня.

3.2. Радіоактивність

3.2.1. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду.

3.2.2. Закономірності альфа і бета розпаду. Механізм альфа-розпаду.

3.2.3. Гамма-випромінювання. Взаємодії гамма-променів з речовиною.

3.2.1. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду

Явище самочинного перетворення деяких нестійких ядер одних елементів в ядра інших елементів з випромінюванням різних типів елементарних частинок і електромагнітних хвиль надзвичайно малої довжини називається *радіоактивністю*.

Вперше це явище спостерігав французький фізик Анрі Беккерель ще в 1896 році. Подальші дослідження в цій області здійснювало подружжя Кюрі (П'єр Кюрі й Марія Кюрі, а також Резерфорд та ряд інших фізиків). Явище радіоактивності безпосередньо обумовлене лише внутрішньою будовою ядра і не залежить від зовнішніх умов (тиску, агрегатного стану, температури та ін.). Будь-які спроби вплинути на хід радіоактивного розпаду не мали позитивних наслідків. Виявлені закономірності радіоактивного розпаду залишались незмінними. Радіоактивні ядра часто називають материнськими, а ядра, які утворюються при радіоактивному розпаді – дочірніми. Перед розпадом материнське ядро завжди має енергетичну невідповідність, тобто маса вихідного ядра перевищує суму мас продуктів розпаду. Тому кожне радіоактивне перетворення відбувається із виділенням енергії.

За своєю природою явище радіоактивності не відрізняється від розпаду “компаунд”-ядер, утворених дією деяких елементарних частинок на стабільні ядра. Але лише ті “компаунд” – ядра відносяться до радіоактивних, час життя яких можна виміряти експериментально. В даний час до радіоактивних відносяться всі ядра з часом життя $10^{-9} - 10^{22}$ с.

Відмітимо, що радіоактивні ядра містять надлишок нейтронів або протонів порівняно із стабільними ядрами. В першому випадку стабільність ядра знижена підвищеною кількістю нейтрон-нейтронних взаємодій, а в другому випадку – протон-протонних взаємодій. Самочинно змінюючи свій склад, такі ядра переходять в стабільну область.

Радіоактивність може бути як природною так і штучною. Штучна радіоактивність була виявлена після синтезу необхідних ядер в 1936р. подружжям Ф. Жоліо-Кюрі і І. Жоліо-Кюрі.

Як і будь-який квантовий процес радіоактивність – явище статистичне. Однакові радіоактивні ядра в невеликій кількості розпадаються через різні проміжки часу. В цьому випадку будь-який прогноз розпаду є неможливим. Про середній час життя радіоактивних ядер судять лише для дуже великих кількостей однакових радіоактивних ядер. Те, що окремі радіоактивні ядра в системі мають дуже різний час життя, пояснюється такими причинами:

а) кулонівські сили протонів сильно протидіють вилітанням із ядер заряджених частинок;

б) радіоактивні перетворення відбуваються не лише під дією сильних і електромагнітних взаємодій, але і під впливом слабких взаємодій, інтенсивність яких майже на два порядки нижча;

в) розпад відбувається тим повільніше, чим менша енергія при цьому звільнюється;

г) імовірність розпаду залежить від спінів материнського й дочірнього ядер. Чим більше їх спіни відрізняються, тим повільніше йде цей процес.

Імовірність протікання радіоактивного розпаду за одиницю часу визначається сталою розпаду λ . З макроскопічного числа N однакових радіоактивних ядер за одиницю часу розпадається λN ядер. Цей добуток λN називають активністю препарату. За одиницю активності взято один розпад за одну секунду. Цю величину називають Беккерелем.

$$1\text{Бк} = 1 \text{ розп./с.}$$

Часто користуються несистемною одиницею активності Кюрі, яка відповідає активності 1г радію

$$1 \text{ Кюрі} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк.}$$

Розпад ядра завжди вважається подією випадковою, яка може відбутись в довільний момент часу. Це означає, що у відношенні до розпаду всі моменти часу є фізично еквівалентними. Тому радіоактивні ядра не мають природного віку, хоча і мають середній час життя.

Нехай в момент часу $t = 0$ є N_0 радіоактивних ядер. За час dt відбувається dN актів розпаду, пропорційного числу ядер $N(t)$ в момент часу t , тобто

$$dN = -\lambda N(t)dt, \quad (3.2.1.1)$$

де λ - стала радіоактивного розпаду в с^{-1} .

Диференціальне рівняння (3.2.1.1) має вигляд

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (3.2.1.2)$$

де N_0 – початкове число ядер на момент часу $t=0$; $N(t)$ – число ядер, які ще не розпались на момент часу t .

Рівняння (3.2.1.2) дістало назву *закону радіоактивного розпаду*.

Закон радіоактивного розпаду дає можливість визначити період піврозпаду T і середній час життя τ радіоактивних ядер. За час півперіоду $t=T$ число радіоактивних ядер зменшується вдвоє порівняно з початковим числом N_0 , тобто

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T}.$$

Звідки одержуємо

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (3.2.1.3)$$

В інтервалі часу від t до $t + dt$ розпадається $\lambda N dt$ ядер, кожне із яких має час життя t . Загальний час життя цих ядер дорівнює $t \lambda N dt$, а сумарний час життя всіх цих N_0 ядер дорівнює інтегралу від добутку $t \lambda N dt$ в межах від нуля до безмежності. Середній час життя радіоактивних ядер τ дорівнює відношенню інтеграла до N_0 :

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt.$$

Після інтегрування одержуємо

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.2.1.4)$$

Формула (3.2.1.4) показує, що чим більша стала розпаду λ , тим швидше розпадаються радіоактивні ядра. Порівнюючи (3.2.1.3) і (3.2.1.4), бачимо, що T і τ мають один і той же порядок, причому

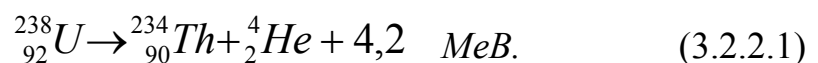
$$T = \tau \cdot \ln 2.$$

3.2.2. Закономірності альфа - і бета – розпаду

а). Механізм альфа – розпаду

Явище альфа – радіоактивності було відкрите при вивченні радіоактивності природних елементів. Природні α - випромінювачі розміщуються в таблиці Менделєєва, починаючи з номера $Z \geq 82$ ($Z=82$ має свинець). Оскільки в α - частинці питома енергія зв'язку виявляється більшою, ніж у важких ядрах, α - розпад енергетично є завжди можливим. Наприклад, нуклід урану $^{238}_{92}\text{U}$ випромінює α - частинки з періодом піврозпаду $4,5 \cdot 10^9$ років.

Самочинно відбувається ядерна реакція



Різниця мас ${}_{92}^{238}\text{U}$ і продуктів розпаду складає $4,2 \text{ MeV}$. (Маса материнського ядра перевищує суму мас продуктів розпаду на $\Delta M = 0.0045 \text{ а.о.м.}$).

Правило зміщення для α -розпаду записують так:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He} + \gamma, \quad (3.2.2.2)$$

де ${}^A_Z X$ - материнське ядро; ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ - дочірнє ядро; ${}^4_2 \text{He}$ - α - частинка; γ - гамма - квант, який звільняється дочірнім ядром при переході у менш збуджений або нормальний стан.

Процес α -розпаду має дві особливості, які були відкриті експериментально.

Між пробігом α -частинки, який може бути мірою її початкової енергії і сталою радіоактивного розпаду λ є проста залежність, емпірично встановлена Гейгером і Неттолом ще у 1911 році і відома під назвою закону Гейгера-Неттола:

$$\ln \lambda = A + B \ln R, \quad (3.2.2.3)$$

де A і B – сталі величини, причому стала B є однаковою для всіх радіоактивних елементів; A – є сталою лише в межах певного радіоактивного ряду.

Із закону Гейгера – Неттола випливає, що чим менш стабільні ядра, тим більша енергія у α -частинок, які при цьому випромінюються.

Наступною особливістю α -розпаду є досить низька енергія α -частинок у момент вилітання із ядра, яка змінюється в межах $4\text{--}9 \text{ MeV}$. Насправді α -частинки у момент вилітання із ядра повинні мати значно більшу енергію, рівну висоті потенціального бар'єра. В реакції ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th}$ потенціальна енергія відштовхування α -частинки на межі ядра торію складає біля 30 MeV . Відповідно α -частинка після подолання

такого бар'єра повинна прискоритися до 30 MeV . Експериментально ж виявлені α -частинки з енергією 4.2 MeV .

Чому енергія α -частинок порівняно невисока, та як можна пояснити закон Гейгера-Неттола? Відповідь на ці запитання дає квантова механіка.

Перед початком α -розпаду в багатьох ядрах уже існує по одній α -частинці. Енергія такої частинки E_{α}^1 . Якби не було потенціального бар'єра, α -частинка вилітала б із ядра з енергією $E_{\alpha} = E_{\alpha}^1 - V_0$ (рис.3.2.1).

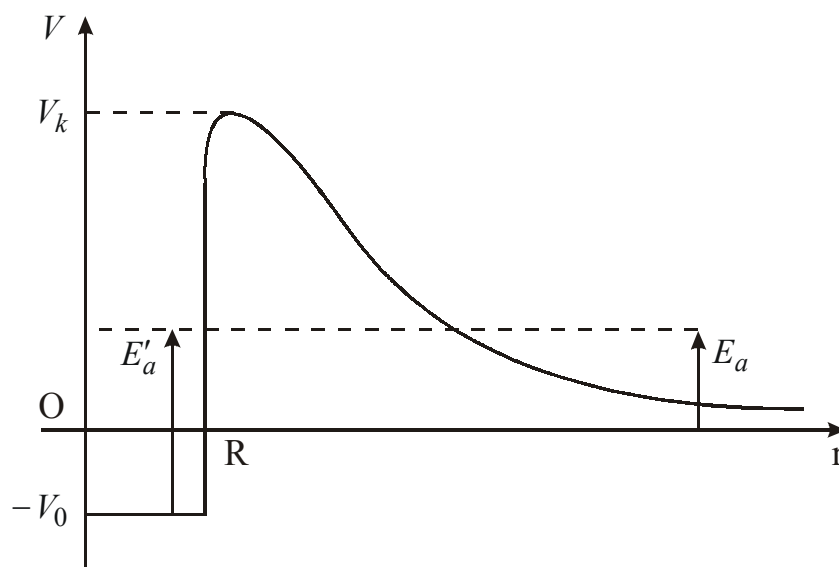


Рис. 3.2.1

На рис. 3.2.1 V_0 – глибина потенціальної ями; E_{α} – енергія α -частинок після вилітання із ядра.

Таке враження, що, залишаючи ядра, α -частинки не помічають існування потенціального бар'єра.

Згідно з законами квантової механіки α -частинки проявляють хвильові властивості. При попаданні на стінку потенціального бар'єра вони відбиваються від неї як хвилі. Але не всі α -частинки відбиваються від стінки. Частина із них проникає крізь стінку і залишає ядро з енергією E_{α} . Ефект проникнення α -частинок крізь потенціальний бар'єр при енергіях значно нижчих його висоти називається *тунельним ефектом*.

Імовірність проникнення α -частинок крізь потенціальний бар'єр визначається його прозорістю D . При цьому стала радіоактивного розпаду λ , яка визначає імовірність розпаду за одиницю часу, дорівнює добутку

“прозорості” бар’єра на число зіткнень n α -частинки з внутрішніми стінками бар’єра, тобто

$$\lambda = D n, \quad (3.2.2.3)$$

$$D = \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m_{\alpha}(V - E_{\alpha})} \cdot r \right], \quad (3.2.2.4)$$

де m_{α} - маса частинки, r – ширина потенціального бар’єра; n – число ударів α -частинки об стінку потенціального бар’єра; D – прозорість бар’єра у цьому місці.

Мала прозорість D бар’єра для проникнення крізь нього α - частинки пояснює малу імовірність α -перетворення (мала стала розпаду λ) і великий період піврозпаду. Це і є пояснення закону Гейгера – Неттола.

При α -розпаді дочірнє ядро, як правило, перебуває у збудженому стані і енергетично є нестабільним. Перехід з такого збудженого стану в нормальний стан супроводжується випромінюванням γ -квантів. Середній час збудженого стану не перевищує 10^{-13} с.

Дискретний спектр α - випромінювання характеризує енергетичну структуру ядра атома. Пояснити дискретний спектр α -випромінювання можна, виходячи лише із оболонкової моделі будови атомного ядра.

б). Закономірності β - розпаду

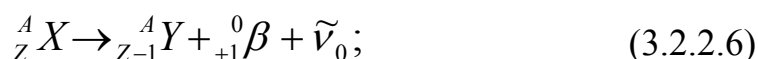
Бета-розпад ядер радіоактивних елементів почали вивчати незабаром після відкриття радіоактивності. Відомі три види β -розпаду. Серед них β^- -розпад, β^+ - розпад і К-захват. Експериментально було встановлено, що β -випромінювання складається з електронів або позитронів і що ці види випромінювання супроводжуються випусканням нейтрино або антинейтрино. Нейтрино – це елементарна частинка з нульовим електричним зарядом і масою спокою рівною нулю. Нейтрино має півцілий спіні подібно до електрона. Аналогічні характеристики має антинейтрино.

Правила зміщення для різних видів β - розпаду можна записати так:

а). електронний β - розпад



б). позитронний β - розпад



в). К-захват, або захват ядром електрона з К-оболонки



де ${}^A_Z X$ – материнське ядро; ${}^A_{Z\pm 1} Y$ – дочірнє ядро; ${}^0_{-1} \beta$ – електрон; ${}^0_{+1} \beta$ – позитрон; $\tilde{\nu}_0$ – антинейтрино; ν_0 – нейтрино.

Для пояснення різних видів β -радіоактивності прийшлося подолати значні труднощі. Перш за все слід було обґрунтувати походження електронів в процесі β -розпаду. Протонно-нейтронна будова ядра усуває можливість вилітання з ядра електронів оскільки їх там немає.

Сучасна теорія β -розпаду ґрунтується на теорії, розробленій Фермі в 1931 р. Фермі у цій теорії стверджує, що протон або нейтрон можуть взаємно перетворюватись в пару частинок позитрон-нейтрино або електрон-антинейтрино. Така пара частинок породжується в ядрі дякуючи слабким взаємодіям подібно тому, як випромінюється фотон за рахунок електромагнітних взаємодій. При цьому слід мати на увазі, що до процесу β -розпаду всередині ядра немає ні електрона ні нейтрино.

Найпростішим прикладом β - розпаду є перетворення вільного нейтрона в протон з періодом піврозпаду 12 хв.:



де $\tilde{\nu}_0$ – антинейтрино; ${}^0_{-1} \beta$ – електрон.

Такі перетворення нейтронів в протони були виявлені ще у 1950 році при дослідженні потужних нейтронних пучків атомних реакторів.

Процес перетворення нейтрона в протон в ядрах атомів супроводжується виконанням законів збереження електричних зарядів, імпульсу, масових чисел, лептонних зарядів та ін. Крім того, таке перетворення енергетично можливе, тому що маса нейтрона в спокої

перевищує масу атома водню, тобто протона і електрона разом узятих. Різниця в масах нейтрона й протона з електроном дорівнює 0.782 MeV . За рахунок цієї енергії може відбуватись самочинне перетворення нейтрона в протон.

При позитронному розпаді, тобто процесі перетворення одного із протонів ядра в нейтрон, недостаток енергії для такого перетворення доповнюється ядром

$${}^1_{+1}p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}\beta + \nu_0, \quad (3.2.2.9)$$

де ν_0 — нейтрино, відрізняється від антинейтрино лише знаком лептонного заряду (для нейтрино -1 , а для антинейтрино $+1$).

Випадків перетворення вільного протона в нейтрон з випромінюванням нейтрино й позитрона поки що не спостерігалось. Такі перетворення заборонені законом збереження маси (баріонного заряду).

Третій вид β -радіоактивності – електронне захоплення було відкрито ще у 1937 році американськими фізиками. Цей вид радіоактивності полягає в тому, що ядром можуть бути захоплені електрони з електронної оболонки власного атома. При цьому це можуть бути К-, L-, М- електрони. Те, що такий процес можливий, пояснюється в квантовій механіці. З квантової точки зору електронних орбіт в атомах не існує через хвильові властивості електронів. Перебування електронів на оболонках має імовірнісний характер. Перебування електронів біля ядра і навіть у ядрі законами квантової механіки не забороняється. Тому в тих випадках, коли материнське ядро дещо перенасичене протонами, можливий електронний захват згідно з схемою:

$${}^1_{+1}p + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^1_0n + \nu_0. \quad (3.2.2.10)$$

Електронний захват завжди супроводжується рентгенівським випромінюванням.

Енергетичний спектр β - випромінювання є завжди суцільним з різкою межею для деякої максимальної енергії $E_{\max}$ (рис.3.2.2.).

Гіпотеза про те, що β -частинки народжуються лише певних енергій, а потім частину її втрачають при вилітанні з ядер, не підтверджується експериментально.

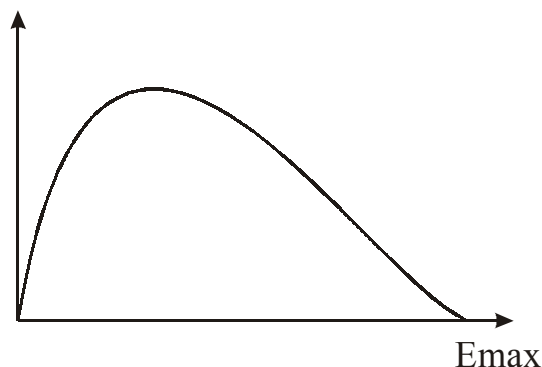


Рис. 3.2.2

Все пояснюється дуже просто: це перш за все процес народження двох частинок – електрона й антинейтрино або позитрона й нейтрино. У випадку, коли електрон має енергію $E_{\max}$, антинейтрино має енергію рівну нулю. Між двома частинками в процесі радіоактивного розпаду енергія розподіляється довільно.

3.2.3. Гамма-випромінювання. Взаємодії γ -променів з речовиною

Якщо ядро збуджене і знаходиться в стані з більш високою енергією, то воно може самочинно перейти на більш низький енергетичний рівень, випустивши при цьому фотон. Відстані між енергетичними рівнями ядер складають величину порядку $1\text{--}2\text{ MeV}$. Тому енергії фотонів, які випускаються ядрами, в сотні і тисячі разів перевищують енергію фотонів атомних оболонок. Такі високо енергетичні фотони, які випускаються ядрами атомів, називаються гамма-фотонами або гамма-квантами.

Установлено, що гамма-випромінювання ядер не є самостійним видом радіоактивності. Цей вид випромінювання завжди супроводжується α - і β -випромінюванням. Гамма-кванти є продуктом випромінювання не материнських а дочірніх ядер. За проміжок часу $10^{-13} - 10^{-14}\text{ с}$ дочірнє ядро переходить у нормальний або у менш збуджений стан, випромінюючи при цьому γ -кванти строго відповідних енергій. Тому спектр γ -випромінювання має дискретний характер.

При γ -випромінюванні масове число A і зарядове число Z не змінюються, тому таке випромінювання не описується жодним правилом зміщення. При радіоактивних розпадах різних ядер γ -кванти можуть мати енергію від 10 keV до 5 MeV .

Гамма-кванти мають нульову масу спокою, а тому не сповільнюються середовищем. При проходженні γ -квантів через середовище вони можуть або поглинатись, або розсіюватись.

Гамма-промені відносяться до сильно проникаючого випромінювання в речовині. Проходячи крізь речовину γ -кванти взаємодіють з атомами, електронами і ядрами, у результаті чого їх інтенсивність зменшується.

Знайдемо закон ослаблення паралельного моноенергетичного пучка γ -квантів у плоскій мішені. Нехай на поверхню плоскої мішені перпендикулярно до неї падає потік γ -квантів I_0 (рис.2.3). Ослаблення пучка в речовині викликається поглинанням і розсіюванням γ -квантів.

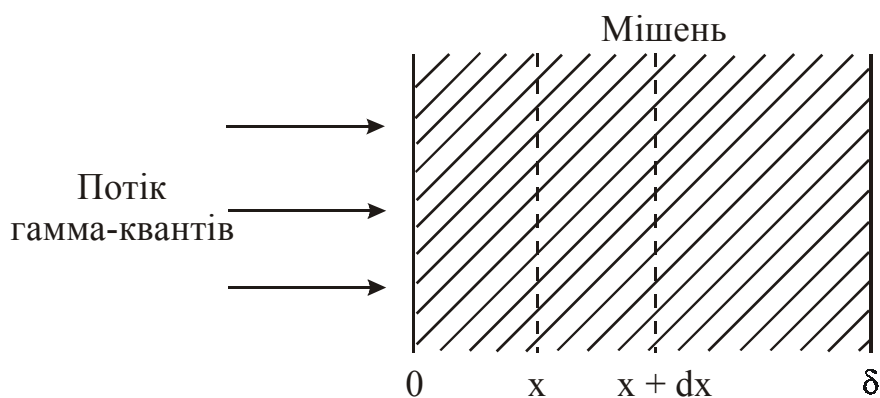


Рис.2.3

Розсіяний γ -квант втрачає частину своєї енергії при зіткненні з електронами і змінює напрямок свого руху. На відстані x від зовнішньої поверхні потік γ -квантів ослабляється до величини $I_{(x)}$. У тонкому шарі мішені товщиною dx з потоку виводиться dI γ -квантів. Величина dI пропорційна потоку $I_{(x)}$ на поверхні шару і товщині шару dx :

$$I = -\mu I dx . \quad (3.2.3.1)$$

Знак мінус у правій частині рівняння показує, що в шарі потік зменшується на dI γ -квантів. Перепишемо це рівняння у вигляді:

$$\mu = -\frac{\frac{dI}{I}}{dx} . \quad (3.2.3.2)$$

Коефіцієнт пропорційності μ називають **повним лінійним коефіцієнтом ослаблення**. Він має розмірність см^{-1} і чисельно дорівнює долі моноенергетичних γ -квантів, які вибувають з паралельного пучка на одиниці шляху випромінювання в речовині. Повний лінійний коефіцієнт ослаблення залежить від густини, порядкового номера речовини, а також від енергії γ -квантів:

$$\mu = \mu(\rho, x, E_j) . \quad (3.2.3.3)$$

Помножимо ліву і праву частини рівняння (3.2.3.2) на dx , а потім проінтегруємо його в межах від 0 до x , одержимо:

$$\ln \frac{I_{(x)}}{I_0} = -\mu x . \quad (3.2.3.4)$$

Після потенціювання одержимо закон Бугера – ослаблення паралельного моноенергетичного пучка γ -квантів у речовині:

$$I_{(x)} = I_0 \cdot e^{-\mu x} . \quad (3.2.3.5)$$

При проходженні товщини речовини, рівної шару половинного ослаблення $d_{1/2}$, потік γ -квантів зменшиться у два рази. Повний лінійний коефіцієнт ослаблення і шар половинного ослаблення пов'язані між собою рівнянням:

$$\mu = \frac{0,693}{d_{1/2}} . \quad (3.2.3.6)$$

Повний лінійний коефіцієнт ослаблення пропорційний густині речовини. Якщо розділити його на густину, то одержимо масовий коефіцієнт ослаблення:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} . \quad (3.2.3.7)$$

Величину μ_m вимірюють у квадратних сантиметрах на грам ($\text{см}^2/\text{г}$). Він чисельно дорівнює частині моноенергетичних γ -квантів, які вибувають з пучка при проходженні шару мішені товщиною $1\text{г}/\text{см}^2$.

Коефіцієнт μ_m залежить від порядкового номера хімічного елемента речовини й енергії γ -квантів:

$$\mu_m = \mu_m(z, E_j) . \quad (3.2.3.8)$$

Речовини з **однаковими** ефективними порядковими номерами мають **рівні** масові коефіцієнти ослаблення. Так, масові коефіцієнти ослаблення води, кисню, азоту, повітря, вуглецю і живої тканини мало відрізняються один від одного, тому що їх ефективні порядкові номери близькі за величиною.

Після заміни $\mu = \mu_m \rho$ закон ослаблення (3.2.3.5) перепишеться у вигляді:

$$I_{(x)} = I_{(0)} e^{-\mu_m \mu_x} , \quad (3.2.3.9)$$

де $\mu_x = \mu_m x$ - маса в грамах шару речовини товщиною x і площею поперечного перерізу 1 см^2 .

Зменшення гамма-квантів в пучку обумовлюється трьома основними незалежними процесами: фотоефектом, комптон-ефектом і ефектом утворення електрон-позитронної пари. Кожний з цих ефектів характеризує взаємодію γ -квантів відповідно з атомами, електронами і ядрами. Унаслідок цього і повний лінійний коефіцієнт ослаблення дорівнює сумі

трьох незалежних лінійних коефіцієнтів - фотоефекта μ_ϕ , комптон-ефекту μ_κ й ефекту утворення пара μ_n :

$$\mu = \mu_\phi + \mu_\kappa + \mu_n . \quad (3.2.3.10)$$

Кожний із коефіцієнтів по-різному залежить від порядкового номера елемента в таблиці Менделєєва й енергії гамма-квантів.

Фотоефект. Фотоефектом називається така взаємодія γ - кванта з атомом, при якій γ - квант поглинається повністю (зникає), а з атома виривається електрон. Одна частина енергії γ - кванта E_j витрачається на розрив зв'язку електрона з ядром ε_e , інша частина перетворюється в кінетичну енергію електрона E_e :

$$E_j = E_{e-} + \varepsilon_{e-} . \quad (3.2.3.11)$$

Перша особливість фотоефекта полягає в тому, що він відбувається тільки тоді, коли енергія γ - кванта більша за енергію зв'язку електрона в оболонці атома.

Фотоелектрон рухається майже перпендикулярно до напрямку руху поглинутого γ -кванта (рис. 2.3). Рух фотоелектрона збігається з напрямком коливання електричної напруженості електромагнітного поля. Це показує, що фотоелектрон виривається з атома електричними силами.

Друга особливість фотоефекту – збільшення фотоелектричного поглинання γ - квантів з ростом енергії зв'язку електронів в атомі. Фотоефект практично не спостерігається на слабо зв'язаних електронах атома. При енергії γ - кванта $E_j \gg \varepsilon_e$ їх можна вважати вільними. Такий електрон не може поглинати γ - квант. Це впливає із законів збереження енергії й імпульсу:

$$E_j = \frac{m_e v^2}{2}, \quad m_e v = \frac{E_j}{c} = \frac{m_e v^2}{2c} . \quad (3.2.3.12)$$

Фотоефект в основному відбувається на К - і L - оболонках атомів. Згідно з другим рівнянням вільний електрон, поглинувши γ -квант, повинен був би рухатися зі швидкістю у два рази більшою за швидкість світла, що заперечує теорія відносності.

Лінійний коефіцієнт ослаблення фотоефекту μ_f різко зменшується із збільшенням енергії і при енергіях понад 10 MeV у свинці практично не виникають фотоелектрони.

Комптон-ефект. На слабо зв'язаних атомних електронах відбувається розсіювання γ -квантів, яке називається **комптон- ефектом**. Взаємодія γ -кванта з електроном у комптон-ефекті це пружне зіткнення

двох кульок з масами $m_j = \frac{h\nu}{c^2}$ і m_e (див. рис.3.2.3).

У кожному пружному зіткненні γ - квант передає частину своєї енергії електрону і розсіюється. Оскільки розсіювання γ - квантів залежить від концентрації атомних електронів $N_e \sim Z$, то і комптон - ефект визначається порядковим номером речовини Z . Розсіювання γ – квантів відбувається головним чином на слабо зв'язаних електронах зовнішніх оболонок атомів.

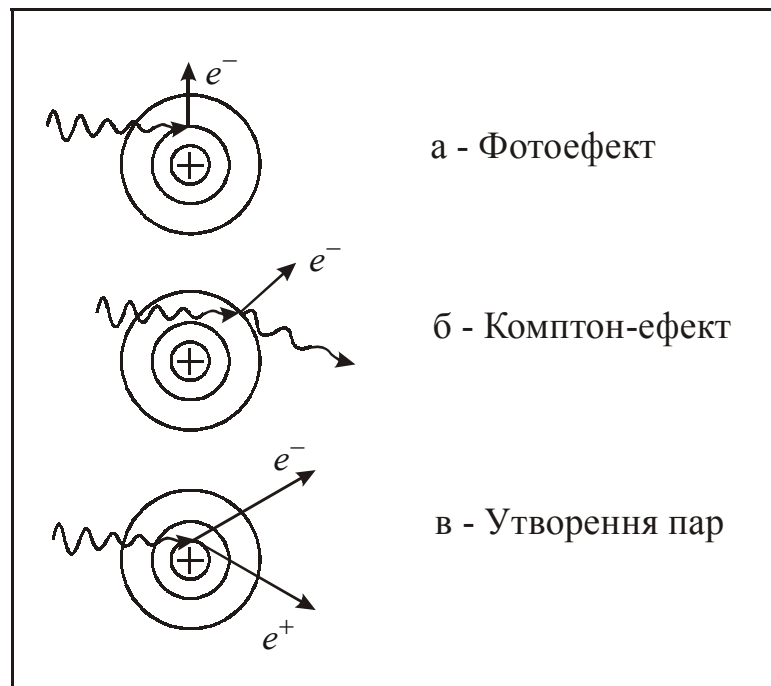


Рис. 3.2.3

Лінійний коефіцієнт ослаблення комптон - ефекту μ_k пропорційний відношенню z/E_j . Тому зі збільшенням енергії доля розсіяних γ - квантів зменшується.

У свинці комптон - ефект починає переважати над фотоефектом в енергетичній області $E_j > 0.5$ MeV (див. рис.2.4). Зменшення коефіцієнта μ_k із збільшенням енергії γ - квантів більш плавне, ніж коефіцієнта μ_{ϕ} . Тому в області енергії $E_j > 0.5$ MeV у свинці утвориться більше комптон - електронів ніж фотоелектронів. Комптон - ефект стає **незначним** при енергіях понад 50 - 100 MeV.

Утворення електрон-позитронних пар. Гамма - квант у полі ядра може утворити пару частинок: електрон і позитрон (див. рис.3.2.4). Вся енергія γ - кванта перетворюється в енергію спокою електрона й позитрона $2m_e c^2$ і в кінетичні енергії цих частинок E_e і E_{e+} . Умова утворення електрон-позитронної пари знаходиться із закону збереження енергії:

$$h\nu = 2m_e c^2 + E_{e-} + E_{e+}. \quad (3.2.3.13)$$

Пари частинок виникають тільки в тому випадку, якщо енергія γ - кванта перевищує подвоєну масу спокою електрона рівну 1.02 MeV. Поза полем ядра, наприклад, електричним полем зарядженої частинки, γ -кванту заборонено перетворюватися в пару частинок тому, що в цьому випадку порушується закон збереження імпульсу. Це впливає із граничної умови утворення пари. Гамма-квант з енергією 1.02 MeV енергетично може утворити електрон і позитрон. Однак їх імпульс буде дорівнювати нулю, тоді як імпульс γ -кванта дорівнює $h\nu/c$, тобто не може дорівнювати нулю.

У полі ядра імпульс і енергія γ - кванта розподіляються між електроном, позитроном і ядром без порушень законів збереження енергії й імпульсу. Маса ядра незрівнянно більша маси електрона і позитрона, тому воно одержує дуже малу частку енергії. В цьому випадку вся енергія γ - кванта перетворюється в енергію електрона й позитрона. Лінійний коефіцієнт ослаблення, пов'язаний з утворенням електрон-позитронної пари μ_n , пропорційний $z^2/\ln E_j$. Цей ефект помітний у важких речовинах при великих енергіях. Коефіцієнт μ_n стає відмінним від нуля при граничній енергії $E_j = 1.02$ MeV. Починаючи з енергії 10 MeV, основне поглинання γ - квантів відбувається в полі ядра. Повний лінійний коефіцієнт ослаблення μ як сума трьох коефіцієнтів із збільшенням енергії спочатку зменшується (див. рис.3.2.4), приймаючи мінімальне значення при енергії 3 MeV, а потім збільшується.

Такий хід кривої пояснюється тим, що при низьких енергіях залежність $\mu(E_j)$ обумовлюється фотоефектом і комптон- ефектом, а вже

при енергіях, більших за 3 MeV, у коефіцієнт μ основний внесок дає ефект утворення електрон-позитронної пари. Свинець найбільш прозорий для γ - квантів з енергією близько 3 MeV.

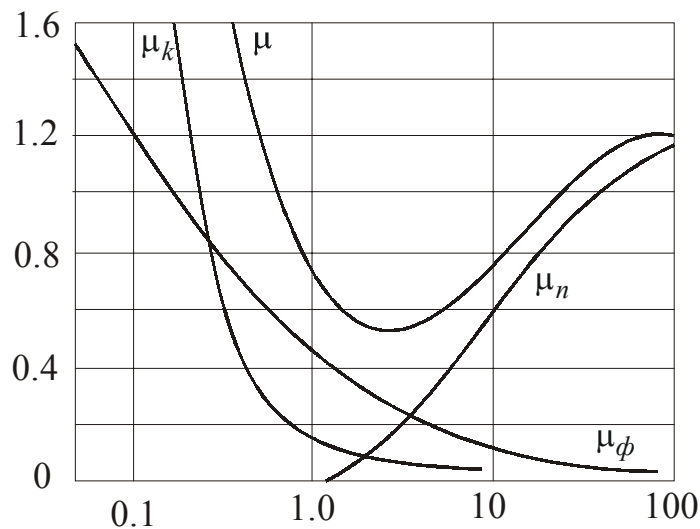


Рис. 3.2.4

Взаємодія випромінювання з речовиною відбувається в одних ефектах поглинанням γ - квантів (фотоефект, утворення пар), в інших – розсіюванням (комптон - ефект). Тому повний лінійний коефіцієнт часто поділяють на дві складові:

$$\mu = \mu_a + \mu_s, \quad (3.2.3.14)$$

де $\mu_a = \mu_\phi + \mu_n$ - лінійний коефіцієнт поглинання; $\mu_s = \mu_k$ - лінійний коефіцієнт розсіювання.

Використовуючи лінійний коефіцієнт поглинання легко розрахувати енергію випромінювання E , поглинену в одиниці об'єму речовини. Якщо потік моноенергетичних γ -квантів з енергією E_j дорівнює Φ , то:

$$E_a = \mu_a \cdot \Phi E_j. \quad (3.2.3.15)$$

Процес перетворення γ -кванта в електрон-позитронну пару записують так:

$$\gamma \rightarrow {}^0_{-1}\beta + {}^0_{+1}\beta, \quad (3.2.3.16)$$

де ${}^0_{-1}\beta$ - електрон; ${}^0_{+1}\beta$ - позитрон.

Зворотний процес взаємодії позитрона й електрона називається анігіляцією

$${}^0_{-1}\beta + {}^0_{+1}\beta \rightarrow 2\gamma'. \quad (3.2.3.17)$$

При проходженні γ -променів у речовині поряд із фотоефектом, комптонівським розсіюванням і утворенням електрон-позитронних пар спостерігаються також резонансні явища. Якщо ядро опромінювати γ -квантами з енергією, яка дорівнює різниці одного із збуджених нуклонних рівнів і основного енергетичного стану ядра, то спостерігається резонансне поглинання γ -випромінювання ядрами. Ядра здатні поглинати енергію γ -квантів в тих випадках, коли вони можуть випромінювати такі ж γ -кванти у випадку збудженого стану. Це явище вперше спостерігав у 1958 році Мессбауер, яке на його честь було названо ефектом Мессбауера. Явище Мессбауера має досить широке використання в медичній діагностиці.

3.3. Ядерні реакції

3.3.1. Природа ядерних реакцій. Поріг і механізм ядерних реакцій.

3.3.2. Реакції ділення. Ланцюгова реакція. Використання ядерної енергії.

3.3.3. Термоядерні реакції. Енергія зірок. Керований термоядерний синтез.

3.3.4. Ядерна зброя.

3.3.1. Природа ядерних реакцій. Поріг і механізм ядерних реакцій

Ядерні реакції – це штучне перетворення ядер одних хімічних елементів в ядра інших хімічних елементів під дією на ядра-мішені частинок-снарядів. Вперше ядерну реакцію здійснив у 1919 році

Резерфорд, діючи α -частинками з енергією біля 7.5 MeV на ядра азоту ${}^{14}_7N$:



Ядерні реакції відбуваються з виконанням законів збереження сумарного масового числа (верхні індекси) і сумарного електричного заряду (нижні індекси). При здійсненні ядерних реакцій виконуються також закон збереження енергії, імпульсу, моменту імпульсу тощо.

Ядерні реакції можуть бути ендотермічними (з поглинанням енергії) і екзотермічними (з виділенням енергії).

Найменша енергія частинки-снаряду, при якій можлива ендотермічна ядерна реакція, називається енергетичним порогом ядерної реакції.

Екзотермічні реакції не мають енергетичного порога і можуть відбуватись при будь-яких значеннях енергії частинок-снарядів. Однак імовірність ядерних перетворень зростає з ростом енергії частинок - снарядів. В ядерній реакції, яку спостерігав Резерфорд у 1919 році, вперше виявлено вільні протони, які до цього часу ще не реєструвались. Ця ядерна реакція відбувається протягом дуже малого часу $\tau \approx 10^{-23} \text{ c}$, необхідного для пролітання нуклоном з швидкістю, близькою до швидкості світла, через ядро. Такі реакції називають прямими ядерними реакціями.

В 1930 році здійснена пряма ядерна реакція взаємодії α -частинки з ядром берилію і утворенням вільних нейтронів. Нейтронне випромінювання мало досить велику проникну здатність через відсутність електричного заряду.

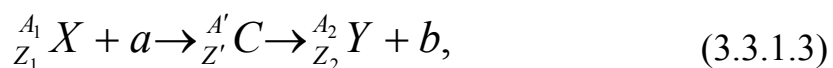


З відкриттям нейтронів (Чедвік, 1932р.) розпочалась ера різноманітних ядерних реакцій.

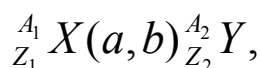
В основі переважної більшості ядерних реакцій є зіткнення частинок-снарядів (до яких відносяться нейтрони, α -частинки, протони, дейтрони) з ядрами-мішенями. Частинка-снаряд повинна мати достатню енергію для подолання значного потенціального бар'єру кулонівських сил відштовхування ядра-мішені. Проникнувши в ядро- мішень частинка-

снаряд застрягає в ньому, передаючи при цьому свою енергію значному числу нуклонів в радіусі дії ядерних сил. Якщо ядро – мішень, одержавши таку енергію, стає збудженим протягом часу $\tau_1 \approx 10^{-14} \text{ с}$, то такі ядерні реакції відбуваються через складене або компаунд-ядро.

Складене або компаунд-ядро через час $\tau_1 \approx 10^{-14} \text{ с}$ переходить в нормальний стан, випромінюючи іншу частинку. Схематично ядерні перетворення через проміжне складене ядро виглядають так:



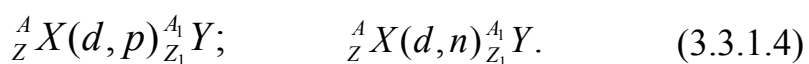
або



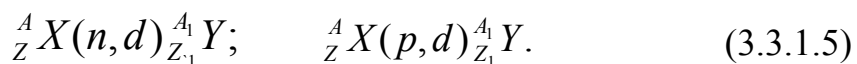
де ${}_{Z_1}^{A_1}X$ – вихідне ядро-мішень; a – частинка-снаряд; ${}_{Z'}^{A'}C$ – складене або компаунд-ядро; b – частинка, яка вилітає з ядра внаслідок реакції; ${}_{Z_2}^{A_2}Y$ – ядро, яке є продуктом ядерної реакції.

Серед ядерних реакцій, які відбуваються через складене ядро, слід відмітити ядерні реакції відриву і ядерні реакції захоплення.

При ядерних реакціях відриву частинки-снаряди (дейтрони) віддають ядру-мішені або один протон, або один нейтрон згідно з схемою:

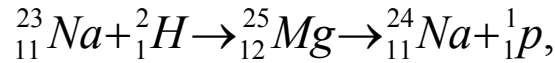


При ядерних реакціях захоплення ядро-мішень, поглинувши один протон або один нейтрон, випромінює дейтрон:



Прямі ядерні реакції, а також ті, які відбуваються через складене ядро, потребують досить великих енергій налітаючих частинок.

Якщо складене ядро переходить в нормальний стан через час значно більший $\tau \approx 10^{-14} \text{ c}$, то говорять, що в такому випадку відбувається штучна радіоактивність. Такою реакцією може бути така реакція:



Знайдемо тепловий ефект ядерної реакції, яка здійснюється за схемою ${}_Z^AX(a, b){}_{Z_1}^{A_1}Y$. Запишемо спочатку баланс енергій в цій ядерній реакції, враховуючи, що повна енергія ядер дорівнює енергії спокою і кінетичній енергії:

$$M_{\varsigma}(Z, A) \cdot c^2 + m_a c^2 + E_1 + E_a = M_{\varsigma}(Z_1, A_1) \cdot c^2 + m_b c^2 + E_2 + E_b,$$

де індексами a і b позначені енергії відповідних частинок E_a і E_b ; E_1 – кінетична енергія ядра-мішені; E_2 – кінетична енергія вихідного ядра.

Згрупуємо енергії спокою в лівій частині, а кінетичні енергії – в правій:

$$\left[M_{\varsigma}(Z, A) + m_a - M_{\varsigma}(Z_1, A_1) - m_b \right] c^2 = E_2 + E_b - E_1 - E_a.$$

Зміна кінетичної енергії в реакції дорівнює абсолютному значенню зміни енергії спокою і називається тепловим ефектом ядерної реакції Q .

$$Q = \left[M_{\varsigma}(Z, A) + m_a - M_{\varsigma}(Z_1, A_1) - m_b \right] \cdot c^2. \quad (3.3.1.6)$$

У випадку, коли відповідні маси спокою взяті у а.о.м., тепловий ефект реакції Q дорівнює:

$$Q = [M_{\zeta}(Z, A) + m_a - M_{\zeta}(Z_1, A_1) - m_b] \cdot 931 \text{ MeV}. \quad (3.3.1.7)$$

3.3.2. Реакції ділення. Ланцюгова реакція. Використання ядерної енергії

Взаємодія ядер важких елементів (уран, торій) з нейтронами може привести до поділу цих ядер на приблизно рівні осколки. Ядерні реакції такого типу називають реакціями поділу.

Механізм ділення важкого ядра після його взаємодії з нейтроном можна пояснити, виходячи з краплинної моделі будови ядра. В такому ядрі діють ядерні й кулонівські сили. Припустимо, що ядро поглинуло один нейтрон. Таке ядро, перебуваючи в збудженому стані, здійснює відповідну пульсацію, доволі змінюючи свою форму. Серед великої кількості різноманітних пульсацій форма ядра може випадково стати еліпсоїдною. Завдяки дії поверхневих ядерних сил, а також кулонівських сил відштовхування є велика імовірність, що еліпсоїдне ядро стане гантелеподібним і після цього буде розірване на дві частини.

Схематично це виглядає так:

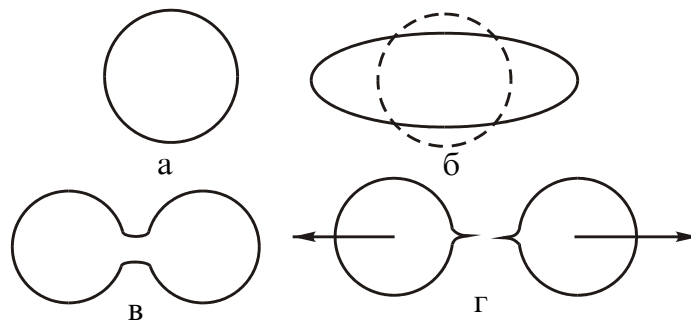


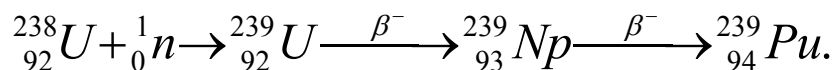
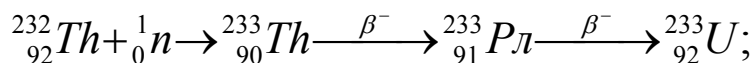
Рис. 2.3.1.

В середній частині “гантелі” буде підвищена концентрація нейтронів. Ці нейтрони не перебувають під дією кулонівських сил, а тому, як правило, 2÷3 з них не встигають потрапити у відповідні осколки ділення. Отже, реакція ділення починається з поглинання важким ядром одного

теплого нейтрона і закінчується розривом його на два приблизно рівні осколки з виділенням ще двох-трьох теплових нейтронів.

Зупинимось на реакціях ділення урану. Природний уран складається з двох основних ізотопів ${}^{235}_{92}\text{U}$ (0,7 %) і ${}^{238}_{92}\text{U}$ (99,3 %). Поглинувши тепловий нейтрон ($W \approx 25$ кеВ), ядро ${}^{235}_{92}\text{U}$ перетворюється в ядро ${}^{236}_{92}\text{U}$ з енергією збудження 6,4 МеВ, а поріг ділення ${}^{236}_{92}\text{U}$ дорівнює 5,8 МеВ. Тому робимо висновок, що ядро ${}^{235}_{92}\text{U}$ ділиться під дією нейтрона довільної енергії. В той же час для ${}^{239}_{92}\text{U}$ поріг ділення досягає енергії 5,8 МеВ, а енергія збудженого ядра після взаємодії ${}^{238}_{92}\text{U}$ з нейтроном складає приблизно 4,8 МеВ. Робимо висновок, що ядро ${}^{238}_{92}\text{U}$ зможе ділитись лише після взаємодії з нейтроном, енергія якого не нижча 1 МеВ.

Теплові нейтрони ділять крім ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ ще ядра ${}^{233}_{92}\text{U}$ і ядра ${}^{239}_{94}\text{Pu}$, які в природі не зустрічаються. Ці ізотопи одержують штучно в ядерних реакторах на швидких нейтронах ($W \geq 1$ МеВ):



Торій і ${}^{238}_{92}\text{U}$, які використовуються для одержання необхідних матеріалів, називають ядерною сировиною.

Ізотопи ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ є ядерним горючим для ядерних котлів і матеріалами для виготовлення ядерних бомб.

Для практичного застосування поділу важких ядер масу матеріалів ділення підбирають такою, щоб нейтрони після першого акту ділення змогли зустрітись з іншими ядрами і спричинити їх ділення. Процес наростання числа актів поділу буде лавиноподібним, а реакція ділення в такому випадку буде називатись ланцюговою.

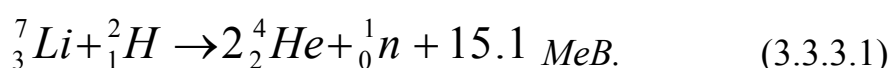
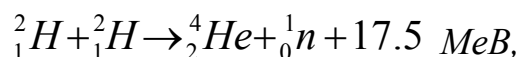
Ланцюгова реакція може бути керованою при розміщенні в активній зоні реактора сповільнювача нейтронів (як правило це графіт або важка вода) і поглинача нейтронів (кадмій). За допомогою цих матеріалів досягають коефіцієнта розмноження нейтронів $K=1$; У випадку коли $K>1$ ланцюгова реакція може стати надкритичною і спричинити вибух. Якщо $K<1$, то ланцюгова реакція є підкритичною і може зменшитись до нуля. В будь-якому реакторі відповідна система автоматики підтримує коефіцієнт розмноження нейтронів в критичному стані $K=1$.

Об'єм активної зони стане набагато меншим, якщо використовувати збагачений ${}^{235}_{92}\text{U}$. Чим більша концентрація ${}^{235}_{92}\text{U}$, тим менша робоча зона і менша кількість матеріалу, що ділиться, перебуває в активній зоні.

Некерована ланцюгова реакція може здійснюватись в ядерній бомбі, розміри якої тим менші, чим вища концентрація матеріалу, що ділиться.

3.3.3. Термоядерні реакції. Енергія зірок. Керований термоядерний синтез

Оскільки у гелію ${}^4_2\text{He}$ енергія зв'язку нуклонів у ядрі дуже велика (28.3 MeV), то є можливість одержувати ядерну енергію при здійсненні таких ядерних реакцій

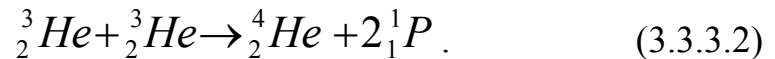
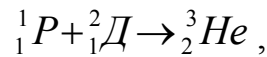
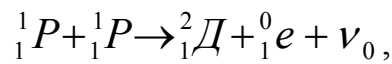


В обох випадках частинка-снаряд має позитивний заряд. Проникнення такої частинки в ядро-мішень потребує величезної енергії. Температура плазми, в якій можливі подібні реакції, повинна досягати мільйонів градусів. Такі реакції називаються термоядерними.

Термоядерні реакції відбуваються в зірках і є джерелом їх енергії. Некерована термоядерна реакція здійснюється у водневій бомбі, джерелом енергії в якій є вибух ядерної бомби.

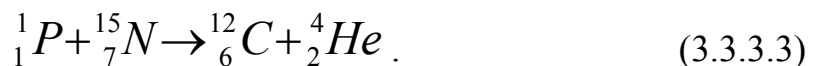
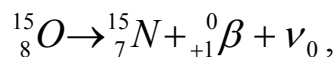
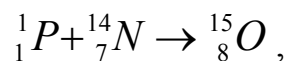
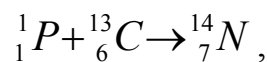
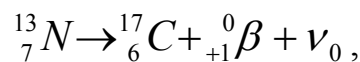
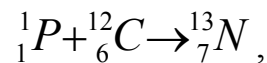
Керований термоядерний синтез пов'язаний з надзвичайно великими технічними труднощами, які ряд учених надіються подолати у 21 сторіччі.

Якщо температура зірки в її центральній частині не перевищує 10^7 К, то імовірно, що в її надрах здійснюється протон-протонний термоядерний цикл



Повний енергетичний вихід такого процесу складає біля 28.3 МеВ. Час, за який відбувається повний протон-протонний цикл, складає мільйони років.

На більш гарячих зірках, температура в надрах яких $t > 10^8$ К, імовірно відбувається вуглецево - азотний цикл або цикл Бете.



Весь цикл Бете відбувається в середньому за 13 мільйонів років. Енергія, яка виділяється при цьому, становить 26.8 МеВ.

Хоч термоядерні реакції на Сонці й зірках приводять до зменшення водню розрахунки показують, що кількості водню на Сонці вистачить ще на мільярди років.

3.4. Ядерна зброя

3.4.1. Ядерні вибухові пристрої.

3.4.2. Термоядерні вибухові пристрої.

3.4.3. Послідовність подій при ядерному вибуху.

3.4.4. Нейтронна зброя.

3.4.1. Ядерні вибухові пристрої

Ядерна реакція, енергія якої використовується в ядерних вибухових пристроях, полягає в поділі ядра за рахунок захоплення ним нейтрона. Поглинання нейтрона здатне привести до поділу практично будь-якого ядра, однак для переважної більшості елементів реакція ділення можлива тільки у випадку якщо нейтрон до його поглинання ядром мав енергію, яка перевищує деяке граничне значення. Можливість практичного використання ядерної енергії у ядерних вибухових пристроях або у ядерних реакторах обумовлена існуванням елементів, ядра яких можуть ділитись під впливом нейтронів будь-якої енергії, у тому числі і як завгодно малої. Речовини, які мають подібні властивості, називаються речовинами, що діляться.

Єдиним хімічним елементом, який може давати ядерну реакцію поділу і міститься в природі в значних кількостях, є ізоотп урану-235. Вміст цього ізоотпу в природному урані складає усього 0.7%. Частина, що залишилася, приходить на уран-238. Оскільки хімічні властивості ізоотпів абсолютно однакові, для виділення урану-235 із природного урану необхідне здійснення достатньо складного процесу поділу ізоотпів. У результаті може бути отриманий високозбагачений уран, який містить близько 94% урану-235, придатного для використання в ядерній зброї.

Речовини, які при певних умовах можуть давати реакцію поділу, можуть бути отримані також штучно, причому найменш складним із практичної точки зору є одержання плутонію-239. Він утворюється в результаті захоплення нейтрона ядром урану-238 (і наступного ланцюжка радіоактивних перетворень проміжних ядер). Подібний процес можна здійснити в ядерному реакторі, який працює на природному або слабо збагаченому урані. Надалі плутоній може бути виділений з відпрацьованого палива реактора у процесі хімічної переробки.

Для створення ядерних вибухових пристроїв можуть бути використані й інші речовини, що здатні давати реакцію поділу, наприклад

уран-233, який отримують опроміненням в ядерному реакторі торію-232. Однак, практичне застосування знайшли лише уран-235 і плутоній-239 насамперед через відносну простоту одержання цих ізотопів.

Можливість практичного використання енергії, яка виділяється при поділі ядер, обумовлена тим, що реакція поділу може мати ланцюговий, самопідтримувальний характер. У кожному акті поділу утворюється приблизно два вторинних нейтрони, які, будучи захоплені іншими ядрами, можуть викликати їх поділ, а це в свою чергу приводить до утворення цілої лавини нейтронів. При створенні спеціальних умов кількість нейтронів, а, отже, й актів поділу, росте від покоління до покоління.

Залежність кількості актів поділу від часу може бути описане за допомогою коефіцієнта розмноження нейтронів k , який дорівнює різниці кількості нейтронів в одному акті поділу і кількості нейтронів, втрачених за рахунок поглинання. Якщо параметр k менший одиниці, то реакція поділу не має ланцюгового характеру, тому що кількість нейтронів, здатних викликати поділ, виявляється меншою ніж їх початкова кількість. При досягненні значення $k=1$ кількість нейтронів, які викликають поділ, а, значить, і актів поділу, не змінюється від покоління до покоління. Реакція поділу набуває самопідтримувального ланцюгового характеру. Стан речовини, у якому реалізується ланцюгова реакція поділу з $k=1$, називається критичним. При $k>1$ говорять про надкритичний стан.

Залежність кількості актів поділу від часу може бути показано за допомогою формули:

$$N = N_0 e^{\frac{(k-1)t}{\tau}},$$

де N – повне число актів поділу, через час t від початку реакції; N_0 – число ядер, які зазнали поділу у першому поколінні; k – коефіцієнт розмноження нейтронів; t - час "зміни поколінь," тобто середній час між послідовними актами поділу, характерне значення якого складає 10^{-8} с.

Якщо допустити, що ланцюгова реакція починається з одного акту поділу і значення коефіцієнта розмноження складає 2, то нескладно оцінити кількість поколінь, необхідних для виділення енергії, еквівалентної вибуху 1 кілотонни тринітротолуолу ($4.19 \cdot 10^{12}$ Дж). Оскільки в кожному акті поділу виділяється приблизно 180 MeV ($2.9 \cdot 10^{-11}$ Дж), то повинно відбутися $1.451 \cdot 10^{23}$ актів поділу (що відповідає поділу приблизно 57 г урану - 235). Подібна кількість поділів відбувається за

приблизно 53 покоління. Весь процес займає близько 0.5 мікросекунди, причому основна частка енергії виділиться протягом останніх декількох поколінь. Продовження процесу всього на кілька поколінь приведе до значного росту виділеної енергії. Так, для збільшення енергії вибуху в 10 разів (до 100 кт) необхідно всього п'ять додаткових поколінь.

Основним параметром, який визначає можливість здійснення ланцюгової реакції поділу і швидкості виділення енергії в ході цієї реакції є *коефіцієнт розмноження нейтронів*. Цей коефіцієнт залежить як від властивостей ядер, так і від кількості вторинних нейтронів, перетину реакцій поділу і захоплення, так і від зовнішніх факторів, які визначають втрати нейтронів, викликані їх вильотом за межі активної зони. Імовірність втрати нейтронів залежить від геометричної форми зразка і збільшується із збільшенням площі його поверхні. Імовірність же захоплення нейтрона пропорційна концентрації ядер речовини поділу і довжині шляху, який проходять нейтрони у зразку. Якщо взяти зразок у формі кулі, то при збільшенні маси зразка імовірність захоплення нейтрона, який приводить до поділу, росте швидше, ніж імовірність його втрати, а це приводить до збільшення коефіцієнта розмноження. Маса, при якій подібний зразок досягає критичного стану, ($k=1$), називають *критичною масою речовини*. Для високозбагаченого урану значення критичної маси складає близько 52 кг, для чистого плутонію - 11 кг. Критичну масу можна зменшити приблизно вдвічі, оточивши зразок речовини, що ділиться, шаром матеріалу, який відбиває нейтрони, наприклад, берилію або природного урану.

Ланцюгова реакція можлива і при наявності меншої кількості речовини. Оскільки імовірність захоплення пропорційна концентрації ядер збільшення щільності зразка, наприклад, у результаті його стиску, може призвести до виникнення у зразку критичного стану. Саме цей спосіб і застосовується в ядерних вибухових пристроях, у яких маса речовини поділу, що перебуває в підкритичному стані, переводиться у надкритичний стан за допомогою спрямованого вибуху деякого заряду і створення сильного ступеня стиску. Мінімальна кількість речовини поділу, необхідної для здійснення ланцюгової реакції, залежить в основному від досяжного на практиці ступеня стиску.

Ступінь і швидкість стиску маси речовини поділу визначають не тільки кількість матеріалу, що розщеплюється, необхідного для створення вибухового пристрою, але і потужність вибуху. Причиною цього служить той факт, що енергія, яка виділяється в ході ланцюгової реакції, приводить

до швидкого розігріву маси речовини поділу і, як результат, до розльоту цієї маси. Через якийсь час заряд втрачає критичність і ланцюгова реакція зупиняється. Оскільки повна енергія вибуху залежить від кількості ядер, що встигли поділитися за час, протягом якого заряд знаходився в критичному стані, для одержання досить великої потужності вибуху необхідно утримувати масу речовини, що ділиться, у критичному стані як можна довше. На практиці це досягається шляхом швидкого стиску заряду за допомогою спрямованого вибуху, так що в момент початку ланцюгової реакції маса речовини поділу має дуже великий запас критичності.

Оскільки в процесі стиску заряд знаходиться в критичному стані необхідно усунути сторонні джерела нейтронів, які можуть дати початок ланцюгової реакції ще до досягнення зарядом необхідного ступеня критичності. Передчасний початок ланцюгової реакції приведе, по-перше, до зменшення швидкості виділення енергії, а по-друге - до більш раннього розльоту заряду і втрати ним критичності. Після того як маса речовини поділу виявилася в критичному стані початок ланцюгової реакції можуть дати акти спонтанного поділу ядер урану або плутонію. Однак, інтенсивність спонтанного поділу виявляється недостатньою для того, щоб забезпечити необхідний ступінь синхронізації моменту початку ланцюгової реакції з процесом стиску речовини і для забезпечення досить великої кількості нейтронів у першому поколінні. Для вирішення цієї проблеми в ядерних вибухових пристроях застосовують спеціальне джерело нейтронів, що забезпечує "вприскування" нейтронів у масу речовини поділу. Момент "вприскування" нейтронів повинний бути ретельно синхронізований із процесом стиску, тому що занадто ранній початок ланцюгової реакції приведе до швидкого початку розльоту речовини поділу і, отже, до значного зменшення енергії вибуху.

Вибух першого ядерного вибухового пристрою був здійснений у США 16 липня 1945 р. в Аламогордо, штат Нью Мексико. Пристрій був плутонієвою бомбою, у якій для створення необхідної критичності використовувався спрямований вибух. Потужність вибуху такої бомби склала близько 20 кт. У Радянському Союзі вибух першого ядерного вибухового пристрою, аналогічного американському, був здійснений 29 серпня 1949 р.

3.4.2. Термоядерні вибухові пристрої

У термоядерній зброї енергія вибуху утворюється в ході реакції синтезу легких ядер, таких як дейтерій і тритій, що є ізотопами водню або літію. Подібні реакції можуть відбуватися тільки при дуже високих температурах, при яких кінетична енергія ядер достатня для їх зближення на досить малу відстань. Температури, про які йде мова, складають близько 10^7 - 10^8 К.

Використання реакцій синтезу для збільшення потужності вибуху може бути здійснене різними способами. Перший спосіб полягає у розміщенні усередину звичайного ядерного пристрою контейнера з дейтерієм і тритієм. Високі температури, які виникають у момент вибуху ядерного заряду приводять до того, що ядра легких елементів вступають у реакцію, за рахунок якої відбувається додаткове виділення енергії. За допомогою подібного методу можна помітно збільшити потужність вибуху. У той же час потужність подібного вибухового пристрою як і раніше обмежується кінцевим часом розльоту речовини поділу.

Інший спосіб – створення багатоступінчастих вибухових пристроїв, у яких за рахунок спеціальної конфігурації вибухового пристрою енергія звичайного ядерного заряду (так званий первинний заряд) використовується для створення необхідних температур в окремо розташованому "вторинному" термоядерному заряді, енергія якого, у свою чергу, може бути використана для підризу третього заряду і т.д. Перше випробування подібного пристрою під назвою "Майк" було здійснено в США 1 листопада 1952 р. У Радянському Союзі подібний пристрій було вперше випробувано 22 листопада 1955 р. Потужність вибухового пристрою, сконструйованого подібним чином, може бути як завгодно великою. Найпотужніший ядерний вибух був здійснений саме за допомогою багатоступінчастого вибухового пристрою. Потужність вибуху склала 60 Мт, причому потужність пристрою була використана лише на одну третину.

3.4.3. Послідовність подій при ядерному вибуху

Виділення величезної кількості енергії у ході ланцюгової реакції поділу приводить до швидкого нагрівання речовини вибухового пристрою до температури близько 10^7 К. При таких температурах речовина стає інтенсивно випромінювальною іонізованою плазмою. На цьому етапі

виділяється близько 80% енергії вибуху у вигляді енергії електромагнітного випромінювання. Максимум енергії цього випромінювання припадає на рентгенівський діапазон спектра. Подальший хід подій при ядерному вибуху визначається в основному характером взаємодії первинного теплового випромінювання з навколишнім до епіцентра вибуху середовищем, а також властивостями цього середовища.

У випадку, якщо вибух здійснено на невеликій висоті в атмосфері, первинне випромінювання поглинається повітрям до відстаней декількох метрів від епіцентра вибуху. Поглинання рентгенівського випромінювання приводить до утворення так званої хмари вибуху, що характеризується дуже високою температурою. На першій стадії ця хмара зростає в розмірах за рахунок радіаційної передачі енергії з гарячої внутрішньої частини до її холодної периферії. Температура газу в хмарі вибуху приблизно постійна по об'єму і знижується із його збільшенням. У момент коли температура хмари знижується до приблизно 300 тисяч градусів, швидкість фронту хмари зменшується до величин, порівнюваних зі швидкістю звуку. У цей момент формується ударна хвиля, фронт якої "відривається" від границі хмари вибуху. Для вибуху потужністю 20 кт ця подія настає приблизно через 0.1 мс після вибуху. Радіус хмари вибуху в цей момент може сягати близько 12 метрів.

Інтенсивність теплового випромінювання хмари вибуху цілком визначається видимою температурою її поверхні. На якийсь час повітря, нагріте в результаті проходження вибухової хвилі, маскує хмару вибуху, поглинаючи випромінювану нею радіацію, так що температура видимої поверхні хмари вибуху відповідає температурі повітря за фронтом ударної хвилі. Із збільшенням розмірів фронту температура у фронті хвилі через приблизно 10 мс після початку вибуху падає до 3000°C і він знову стає прозорим для випромінювання хмари вибуху. Температура видимої поверхні хмари вибуху знову починає рости і через приблизно 0.1 с після початку вибуху сягає приблизно 8000°C (для вибуху потужністю 20 кт). У цей момент потужність випромінювання хмари вибуху максимальна. Після цього температура видимої поверхні хмари і, відповідно, випромінювана нею енергія швидко падає. У результаті вибуху основна частина енергії випромінювання висвічується за час менше однієї секунди.

Формування імпульсу теплового випромінювання й утворення ударної хвилі відбувається на ранніх стадіях існування хмари вибуху. Оскільки усередині хмари міститься основна частка радіоактивних

речовин, що утворюються в ході вибуху, подальша його еволюція визначає формування сліду радіоактивних опадів. Після того як хмара вибуху охолоне настільки, що вже не випромінює у видимій області спектра, процес збільшення її розмірів продовжується за рахунок теплового розширення і вона починає підніматися вгору. У процесі підйому хмара захоплює за собою значну масу повітря і ґрунту. Протягом декількох хвилин хмара досягає висоти в кілька кілометрів і може досягти стратосфери. Швидкість випадання радіоактивних опадів залежить від розміру твердих частинок, на яких вони конденсуються. Якщо в процесі свого формування хмара вибуху досягла поверхні кількості ґрунту, захопленого при підйомі хмари, буде досить великою і радіоактивні речовини осідають в основному на поверхні частинок ґрунту, розміри яких можуть досягати декількох міліметрів. Такі частинки випадають на поверхню землі у відносній близькості від епіцентра вибуху, причому за час випадання їх радіоактивність практично не зменшується.

У випадку якщо хмара вибуху не дотикається до поверхні землі, радіоактивні речовини, що містяться в ній, конденсуються в набагато менші частинки з характерними розмірами 0.01-20 мікрон. Оскільки такі частинки можуть досить довго існувати у верхніх шарах атмосфери вони розсіюються над дуже великою площею і за час, що пройшов до їх випадання на поверхню, встигають втратити значну частину своєї радіоактивності. У цьому випадку радіоактивний слід практично не спостерігається. Мінімальна висота, вибух на яку не приводить до утворення радіоактивного сліду, залежить від потужності вибуху і складає приблизно 200 метрів для вибуху потужністю 20 кт і близько 1 км для вибуху потужністю 1 Мт.

Ударна хвиля, яка формується на ранніх стадіях існування хмари вибуху, являє собою один з основних руйнівних факторів атмосферного ядерного вибуху. Основними характеристиками ударної хвилі є піковий надлишковий тиск і динамічний тиск у фронті хвилі. Здатність об'єктів витримувати вплив ударної хвилі залежить від безлічі факторів, таких як наявність несучих елементів, матеріал будівлі, орієнтація стосовно фронту. Надлишковий тиск у 1 атм, що виникає на відстані 2.5 км від наземного вибуху потужністю 1 Мт, здатний зруйнувати багатоповерховий будинок із залізобетону. Для протистояння впливу ударної хвилі військові об'єкти, особливо шахти балістичних ракет, проектуєть таким чином, щоб вони могли витримати надлишкові тиски в сотні атмосфер. Радіус області, у якій при вибуху в 1 Мт створюється подібний тиск, складає близько 200 метрів.

Відповідно для руйнування укріплених цілей особливу роль відіграє точність попадання атакуючих балістичних ракет.

На початкових стадіях існування ударної хвилі її фронт є сферою з центром у точці вибуху. Після того як фронт досягає поверхні, утвориться відбита хвиля. Оскільки відбита хвиля поширюється в середовищі, через яку пройшла пряма хвиля, швидкість її поширення виявляється трохи більшою. У результаті на деякій відстані від епіцентру дві хвилі зливаються біля поверхні землі і утворюють фронт з приблизно в два рази більшим значенням надлишкового тиску. Оскільки для вибуху даної потужності відстань, на якій утвориться подібний фронт, залежить від висоти вибуху, останню можна підібрати для одержання максимальних значень надлишкового тиску на визначеній площі. Якщо метою вибуху є знищення укріплених військових об'єктів, оптимальна висота вибуху вибирається дуже малою, що неминуче приводить до утворення значної кількості радіоактивних опадів.

Ще одним руйнівним фактором ядерної зброї є проникна радіація, яка є потоком високо енергетичних нейтронів і гамма-квантів, що утворюються як безпосередньо в ході вибуху, так і в результаті розпаду продуктів поділу. Поряд з нейтронами й гамма-квантами у ході ядерних реакцій утворюються також альфа- і бета-частинки, вплив яких можна не враховувати через те, що вони дуже ефективно поглинаються на відстанях декількох метрів. Нейтрони й гамма-кванти продовжують виділятися протягом досить тривалого часу після вибуху, негативно впливаючи на радіаційну обстановку. До проникної радіації відносять нейтрони й гамма-кванти, які з'являються в процесі першої хвилини після вибуху. За час близько однієї хвилини хмара вибуху встигає піднятися на достатню висоту щоб радіаційний потік на поверхні землі став практично непомітним.

Інтенсивність потоку проникної радіації і відстань, на якій її дія може завдати найбільшої шкоди, залежать від потужності вибухового пристрою і його конструкції. Доза радіації, отриманої на відстані близько 3 км від епіцентру термоядерного вибуху потужністю 1 Мт, достатня для того, щоб викликати значні біологічні зміни в організмі людини. Ядерний вибуховий пристрій може бути спеціально сконструйований таким, щоб збільшити шкоду, яка наноситься проникною радіацією в порівнянні зі шкодою, яка наноситься іншими вражаючими факторами (так звана *нейтронна зброя*).

Процеси, які відбуваються в ході вибуху на значній висоті, де густина повітря невелика, трохи відрізняються від процесів, що відбуваються при проведенні вибуху на невеликих висотах. Насамперед, через малу густину повітря поглинання первинного теплового випромінювання відбувається на значно більших відстанях і розміри хмари вибуху можуть досягати десятків кілометрів. Істотний вплив на процес формування хмари вибуху пов'язаний з процесами взаємодії іонізованих частинок хмари з магнітним полем Землі. Іонізовані частинки, які утворилися в ході вибуху, здійснюють також помітний вплив на стан іоносфери, утрудняючи, а іноді і створюючи неможливим поширення радіохвиль (цей ефект може бути використаний для осліплення радіолокаційних станцій).

Одним з результатів проведення висотного вибуху є виникнення потужного електромагнітного імпульсу, який поширюється над дуже великою територією. Електромагнітний імпульс виникає й у результаті вибуху на малих висотах, однак напруженість електромагнітного поля в цьому випадку швидко спадає із збільшенням відстані від епіцентру. У випадку ж висотного вибуху область дії електромагнітного імпульсу охоплює практично усю видиму з точки вибуху поверхню Землі.

У випадку, якщо ядерний вибух здійснено під землею, на початковій стадії вибуху поглинання навколишнім середовищем первинного теплового випромінювання приводить до утворення порожнини, тиск у якій протягом менш ніж мікросекунди зростає до декількох мільйонів атмосфер. Далі протягом долі секунди в навколишній породі формується ударна хвиля, фронт якої обганяє поширення порожнини вибуху. Ударна хвиля викликає руйнування породи в безпосередній близькості від епіцентру і, ослаблюючись із просуванням, дає початок серії сейсмічних імпульсів, які супроводжують підземний вибух. Порожнина вибуху продовжує розширюватися з трохи меншою ніж на початку швидкістю, досягаючи значних розмірів. Так, радіус порожнини, утвореної вибухом потужністю 150 кт, може досягти 50 метрів. На цьому етапі стіни порожнини є розплавленою породою. На третьому етапі газ усередині порожнини охолоджується, а розплавлена порода твердне на дні порожнини.

Протягом наступної стадії, яка може тривати від декількох секунд до декількох годин, тиск газів у порожнині падає так, що вони більше нездатні витримувати навантаження верхніх шарів породи і порожнина руйнується. У результаті утворюється вертикальна сигароподібна

структура, заповнена уламками породи. Розміри цієї структури залежать від характеру породи, у якій здійснено вибух. У верхньому кінці цієї структури залишається порожнина, заповнена радіоактивними газами. У випадку якщо вибух відбувся на недостатньо великій глибині, частина газів може вийти на поверхню і створювати радіоактивне забруднення території.

3.4.4. Нейтронна зброя

Більш ніж піввікова історія ядерної зброї зазнала значних досягнень в справі її удосконалювання. Ядерна зброя першого покоління (його нерідко називають атомним) основана на використанні енергії, яка виділяється в ході ланцюгової ядерної реакції поділу ядер важких елементів урану або плутонію. Буквально через кілька років після випробування перших атомних зарядів вченим США і СРСР вдалося майже одночасно створити ядерну зброю другого покоління - термоядерну бомбу, в основі дії якої лежить реакція синтезу важких ізотопів водню - дейтерію і тритію. Значно більше часу треба було вченим для створення зброї третього покоління. Найбільш відомим зразком ядерної зброї третього покоління є нейтронна зброя.

Нейтронною бомбою або N-бомбою називають термоядерні заряди порівняно невеликої потужності з тротиловим еквівалентом від 1 до 10 кт із зміщенням енергетичного виходу в сторону нейтронного випромінювання. При вибуху такого заряду за рахунок зменшення частини енергії, яка перетворювалась в ударну хвилю і світлове випромінювання, забезпечується значне збільшення енергії, яка виділялася у вигляді потоку швидких нейтронів. Принципова відмінність нейтронної бомби від термоядерної полягає в різній швидкості виділення енергії. У нейтронній бомбі виділення енергії відбувається значно повільніше, щось на зразок вибуху уповільненої дії. Для підігріву суміші дейтерію й тритію до температури в десятки мільйонів градусів використовується атомний міні детонатор з високозбагаченого плутонію-239.

Основним “руйнівним” фактором цієї зброї є потік швидких нейтронів з енергією до 14 МеВ. Кількість нейтронів, що виділяється в цьому випадку, прямо пропорційна масі речовин, які беруть участь у реакції синтезу, і складає близько 10^{24} нейтронів на кілотонну потужність заряду. При цьому необхідно враховувати, що вибух нейтронних боєприпасів супроводжуються також випромінюванням гамма-квантів. При русі

нейтронів і гамма-квантів в атмосфері відбувається поступове зменшення їх енергії унаслідок взаємодії з молекулами повітря. На близьких відстанях від епіцентру вибуху доля нейтронів у загальному потоці проникної радіації значно переважає долю гамма-випромінювання. Однак внаслідок різної довжини релаксації випромінювань у повітрі (відстань, на якій енергія випромінювання зменшується в e разів, де $e = 2,72$ – основа натурального логарифма, - 235 метрів для нейтронів і 350 метрів для гамма-квантів) співвідношення між ними поступово змінюється. Для зарядів потужністю 1 кт, починаючи з відстаней близько 1500 метрів і далі, доля гамма-квантів спочатку вирівнюється з долею нейтронів, а потім буде переважати її.

Дослідження, проведені в останні десятиліття, дозволили розкрити механізм дії нейтронів на молекули органічних речовин. Ці дослідження показали, що швидкі нейтрони за своєю біологічною ефективністю значно перевершують інші види випромінювань ядерного вибуху. Після вибуху нейтрони рухаються зі швидкостями в кілька десятків кілометрів за секунду. Проникаючи, немов снаряди, у живі клітини, вони вибивають ядра з атомів, рвуть молекулярні зв'язки, утворюють вільні радикали, що мають високу реакційну здатність, а це приводить до порушення основних циклів життєвих процесів у клітинах. Руйнівна дія нейтронів в живих організмах визначається сумарною дозою, яка ними поглинається. Вражені нейтронними променями живі організми в страшних муках за досить короткий час гинуть. Нейтронна бомба призначена для знищення нематеріальних цінностей (руйнування незначні), а живої сили.

Радіаційна екологія

3.5. Основи радіаційної безпеки

3.5.1. Фізичні основи радіаційної безпеки.

3.5.2. Джерела опромінення. Природна й штучна радіоактивність.

3.5.3. Потік і інтенсивність іонізуючих випромінювань.

3.5.1. Фізичні основи радіаційної безпеки

Радіаційна безпека - нова науково - практична дисципліна, яка виникла в момент створення атомної промисловості і вирішує комплекс теоретичних і практичних завдань, пов'язаних із зменшенням можливості виникнення аварій і аварійних ситуацій на радіаційно-небезпечних об'єктах. Нижче висвітлюється весь комплекс завдань, що стоять перед радіаційною безпекою.

Головним завданням радіаційної безпеки є :

- а) вироблення критеріїв оцінювання іонізуючого випромінювання як шкідливого фактору впливу на окремих людей, популяцію в цілому й об'єкти навколишнього середовища;
- б) вироблення та впровадження способів оцінювання й прогнозування радіаційної обстановки, а також знаходження шляхів приведення її у відповідність з уже діючими критеріями безпеки на основі комплексу технічних, медико-санітарних і адміністративно-організаційних заходів;

В кожному випадку для вироблення необхідних критеріїв використовуються багаторічні спостереження за людьми, які працюють або працювали на об'єктах з рівнем радіації, що перевищує допустимі межі, а також спостереження за штучно опроміненими тваринами. Прогнозування радіаційної обстановки для випадків можливих аварій або аварійних ситуацій здійснюється на основі математичних розрахунків і даних, отриманих при вивченні аварій і аварійних ситуацій, які відбулися у різних країнах світу за весь період розвитку атомної промисловості й

атомної енергетики. В даний момент існує розроблена система допустимих меж впливу іонізуючого випромінювання на людський організм, оформлених у вигляді законодавчих документів - Норм Радіаційної Безпеки України (НРБУ-97) та “Закон України про охорону навколишнього природного середовища”.

Другим немаловажним завданням радіаційної безпеки є розробка та впровадження ефективних систем радіаційного контролю в умовах експлуатації різних радіаційних установок, виробництва та використання для практичних цілей радіоактивних речовин. Економія матеріальних ресурсів диктує необхідність усвідомленого вибору засобів і частоти вимірювань рівня радіації, концентрації радіоактивних речовин. Так, при експлуатації гамма-дефектоскопів досить обмежитися контролем рівня гамма-випромінювання, а на радіохімічних підприємствах поряд із зазначеним контролем щоб не допустити переопромінення співробітників, необхідно проводити вимірювання концентрації радіоактивних газів у повітрі і рівень забруднення робочих приміщень.

Радіаційна безпека, крім перерахованих вище завдань, вирішує ще досить важливе функціональне завдання - зниження рівня опромінення персоналу й населення, яке проживає на забрудненій території до нижчого рівня (у крайньому випадку до регламентованої межі), на основі таких заходів:

- технічних (створення захисних огорожень, автоматизація технологічного процесу, очищення викидів від радіоактивних речовин);
- медико-санітарних (забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту, постачання місцевим штабам ЦО засобів захисту населення);
- організаційних (створення спеціального графіка роботи в умовах переопромінення);

Створення ефективних систем радіаційного контролю дозволяє оперативно реагувати на зміни в радіаційній обстановці. Нарешті необхідно визнати, що надійність систем радіаційної безпеки набагато вища, ніж систем захисту від аварій і аварійних ситуацій інших галузей промисловості. Це пояснюється тим, що вперше використана атомна енергія для воєнних цілей (бомбардування деяких міст Японії у 1945 році) призвела до значних руйнувань і жертв і тим самим викликала упереджене

відношення до неї, а це пішло на користь радіаційної й екологічної безпеки.

3.5.2. Джерела опромінення. Природна й штучна радіоактивність

Основну частину опромінення населення земної кулі одержує від природних джерел радіації. Радіоактивні елементи природного походження присутні всюди в навколишньому середовищі. У великих обсягах утворюються штучні радіонукліди, головним чином як побічний продукт на підприємствах оборонної промисловості й атомної енергетики. Потрапляючи в навколишнє середовище, вони здійснюють впливи на живі організми у чому і полягає їхня небезпека. Для правильного оцінювання цієї небезпеки необхідно мати чітке уявлення про масштаби забруднення навколишнього середовища, про необхідність мати виробництво, основним або побічним продуктом якого є радіонукліди, і про можливі втрати, пов'язані з відмовою від такого виробництва, про реальні механізми дії радіації, наслідки її дії і існуючі міри захисту.

Всі джерела радіації можна поділити на такі групи:

- природні джерела, які дають середні річні ефективні дози опромінення 2 мЗв (мілізіверти);
- джерела, які використовуються у медицині, середньостатистичні дози опромінення від яких за рік складають близько 0.4 мЗв;
- радіоактивні опади, які приблизно дають за один рік дозу, що дорівнює 0.02 мЗв;
- атомна енергетика, доза опромінення від якої складає за рік 0.001 мЗв.

Більшість з цих джерел такі, що уникнути опромінення від них практично неможливо, тому що вони є природними джерелами радіації.

Це перш за все:

- джерела земного походження, внутрішнє опромінення від яких складає 1.325 мЗв;

- джерела земного походження, зовнішнє опромінення від яких складає 0.35 мЗв;
- космічне зовнішнє опромінення, що складає 0.35 мЗв;
- космічне внутрішнє опромінення, яке значно менше й наближено складає 0.015 мЗв.

Люди в основному опромінюються двома способами – *зовнішнім* і *внутрішнім*. Радіоактивні речовини (РР), які перебувають поза організмом, опромінюють його зовні. У цьому випадку говорять про *зовнішнє опромінення*. Але радіоактивні речовини можуть виявитися і у їжі, і у воді, і у повітрі і потрапити усередину організму разом з їжею, водою або через органи дихання. Такий спосіб опромінення називається *внутрішнім*. Зупинимось дещо детальніше на цих видах опромінення.

Зовнішнє опромінення

Протягом всієї історії існування Землі різні види випромінювання надходять від радіоактивних речовин, які є в земній корі, а також падають на поверхню Землі з космосу у вигляді космічних променів.

Космічні промені дають радіаційний вклад дещо менший половини зовнішнього опромінення, яке населення одержує від природних джерел. Космічні промені в основному *складаються* із заряджених частинок.

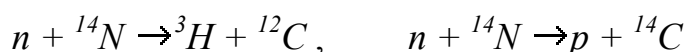
Космічному зовнішньому опроміненню піддається вся поверхня Землі. Однак опромінення це нерівномірне. Інтенсивність космічного випромінювання залежить від сонячної активності, географічного положення об'єкта і зростає з висотою над рівнем моря. Велика частина космічних променів надходить до Землі із глибин Всесвіту, але деяка його частина народжується на Сонці під час сонячних спалахів. Космічні промені можуть досягати поверхні Землі або взаємодіяти з її атмосферою і породжувати вторинне випромінювання, яке в свою чергу стає причиною утворення різних радіонуклідів.

Північний і Південний полюси опромінюються значно більше, ніж екваторіальні області. Це пов'язано з існуванням біля Землі магнітного поля, яке відхиляє заряджені частинки. Істотно також, що рівень опромінення зростає із зростанням висоти. Причиною цього зростання є зменшення шару повітря, яке відіграє роль захисного екрана.

Поглинена потужність дози космічного випромінювання в повітрі на рівні моря дорівнює 32 нГр/годину і формується в основному мюонами. Для нейтронів на рівні моря потужність поглиненої дози складає 0.8 нГр/год. і потужність еквівалентної дози складає 2.4 нЗв/год. За рахунок космічного випромінювання більшість населення одержує дозу, рівну 0.35 мЗв на рік.

Сонячні спалахи мають велику радіаційну небезпеку під час космічних польотів. Космічні промені, що йдуть від Сонця, в основному складаються з протонів широкого енергетичного спектру (енергія протонів до 100 МеВ). Заряджені частинки від Сонця здатні досягати Землі через 15-20 хв після того, як спалах на його поверхні стає видимим. Тривалість спалаху може сягати декількох годин.

У результаті ядерних реакцій, що відбуваються в атмосфері під впливом космічних променів, утворюються радіоактивні ядра – космогенні радіонукліди. Наприклад



У створення дози найбільший вклад вносять ${}^3\text{H}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^{14}\text{C}$ і ${}^{22}\text{Na}$, які надходять разом з їжею в організм людини (табл.1)

Таблиця 1

Середнє річне надходження космогенних радіонуклідів в організм людини		
Радіонуклід	Надходження, Бк/рік	Річна ефективна доза, мкЗв
${}^3\text{H}$	250	0,004
${}^7\text{Be}$	50	0,002
${}^{14}\text{C}$	20000	12
${}^{22}\text{Na}$	50	0,15

Доросла людина споживає з їжею 95 кг вуглецю на рік при середній активності на одиницю маси вуглецю 230 Бк/кг. Сумарний внесок космогенних радіонуклідів в індивідуальну дозу складає близько 15 мкЗв/рік.

Земна радіація обумовлена наявністю у гірських породах Землі радіоактивних ізотопів калію-40, рубідію-87 і цілого ряду інших складників радіоактивних сімейств, які входять до складу Землі. Всі ці ізотопи беруть початок відповідно від урану-238 і торію-232, і мають тривалі періоди піврозпаду. Рівні земної радіації також неоднакові для різних місць і залежать від концентрації радіонуклідів на тій чи іншій ділянці земної поверхні. Приблизно 95% населення Землі проживає у місцях, де потужність дози земної радіації складає (0.3 - 0.6) мЗв на рік. Близько 3% населення Землі одержує приблизно 1,0 мЗв на рік, а близько 1.5% - більше ніж 1.4 мЗв на рік. Є місця, де рівні земної радіації значно вищі. За підрахунками науковців, середня ефективна еквівалентна доза зовнішнього опромінення, яке людина одержує від земних джерел природної радіації, складає приблизно 350 мкЗв. Це трохи більше середньої індивідуальної дози опромінення, яке створюється космічними променями на рівні моря.

Внутрішнє опромінення

В середньому дві третини ефективної еквівалентної дози опромінення, яке людина одержує від природних джерел радіації, надходять від радіоактивних речовин, які потрапили в організм із їжею, водою або повітрям. Невелика частина цієї дози припадає на радіоактивні ізотопи типу вуглецю-14 і тритію, які утворюються під впливом космічної радіації. Все інше надходить від джерел земного походження. Кожна людина одержує близько 180 мікрозівертів на рік за рахунок калію-40, що засвоюється організмом разом з нерадіоактивними ізотопами калію, необхідними для життєдіяльності організму. Однак значно більшу дозу внутрішнього опромінення людина одержує від нуклідів радіоактивного ряду урану-238 і дещо меншу від радіоактивного ряду торію-232.

Деякі з цих нуклідів, наприклад нукліди свинцю-210 і полонію-210, надходять в організм із їжею. Таких нуклідів досить багато у рибі і у молюсках, тому люди, які споживають багато риби й інших дарунків моря, можуть одержувати відносно високі дози внутрішнього опромінення.

Природні джерела радіації

Найбільш вагомим із всіх природних джерел радіації є важкий газ (у 7.5 разів важчий за повітря) – радон. У природі радон зустрічається у двох

модифікаціях: у вигляді радону-222, складник радіоактивного ряду урану-238, і у вигляді радону – 220, складник радіоактивного ряду торію-232. Основну частину дози опромінення від радону людина одержує, перебуваючи у закритих приміщеннях. Концентрація радону в закритих приміщеннях в середньому у вісім разів вища, ніж на відкритому повітрі.

Радон концентрується у повітрі приміщень лише в тих випадках, коли вони в достатній мірі ізольовані від зовнішнього середовища. Причинами надходження радону в приміщення є його просочування через фундамент і підлогу з ґрунту, або вивільнення з матеріалів, які використовуються у конструкціях будинку. Тому в приміщеннях можуть виникати досить високі рівні радіації. Іноді концентрація радону в закритому приміщенні в 5000 разів вища концентрації радону на відкритому повітрі.

Найпоширеніші будівельні матеріали, такі як дерево, цегла і бетон, виділяють відносно невелику кількість радону. Основним джерелом надходження радону у житлові приміщення є граніт і вулканічні викиди – пемза.

В таблиці 2 наведені питомі радіоактивності деяких будівельних матеріалів:

Таблиця 2

Будівельні матеріали	Питомі радіоактивності (Бк на 1кг)
Дерево	1,1
Зола (вугільний шлак)	341
Цемент	менше 45
Цегла	126
Кальцій – силікатний шлак	2140
Відходи уранових руд	4625
Граніт	170
Пісок і гравій	34
Природний гіпс	29

Відповідно до отриманих оцінок люди, які проживають у будинках, де використовуються матеріали на основі фосфогіпсу, можуть одержати колективну ефективну еквівалентну дозу, яка на 30% вища, ніж при використанні звичайного гіпсу. Тому радіаційний контроль будівельних матеріалів заслуговує найпильнішої уваги.

Однак головне джерело радону в закритих приміщеннях – це ґрунт. Концентрація радону на верхніх поверхах багатопверхових будинків, як правило, нижча, ніж на першому поверсі. Швидкість проникнення радону з ґрунту в приміщення фактично визначається товщиною і цілісністю міжповерхових перекриттів. Емісія радону зі стін зменшується у 10 разів при облицюванні стін пластиковими матеріалами типу поліаміду або полівінілхлориду, або трьома шарами олійної фарби. Навіть при обклеюванні стін шпалерами швидкість емісії радону зменшується на 30%.

Ще одне важливе джерело надходження радону в приміщення пов'язане з водою і природним газом. Концентрація радону у звичайній воді надзвичайно мала, але вода з деяких джерел, особливо з глибоких колодязів або артезіанських свердловин, містить дуже багато радону. Однак основна небезпека радіаційного опромінення приходить зовсім не від питної води, а води в складі їжі після її кип'ятіння. При кип'ятінні води радон у значній мірі видаляється разом з паром. Велику небезпеку створює попадання пари води з високим вмістом радону в легені разом із повітрям, що найчастіше відбувається у ванній кімнаті. В ряді країн Західної Європи виявлено, що концентрація радону у ванній кімнаті в три рази вища, ніж на кухні, і приблизно в сорок разів вища, ніж у житлових кімнатах.

Глибоко під землею радон проникає також у природний газ. У результаті попередньої переробки газу й у процесі його зберігання, перед надходженням до споживача, велика частина радону зникає. Але концентрація радону в приміщенні може зрости, якщо кухонні плити, опалювальні й інші нагрівальні пристрої, у яких спалюється природний газ, не оснащені надійною витяжкою. За оцінюванням фахівців ефективна еквівалентна доза опромінення від радону і його дочірніх продуктів складає у середньому біля одного мЗв/рік, тобто біля половини всієї річної дози, одержуваної людиною в середньому від усіх природних джерел радіації.

Інші джерела радіації

Вугілля, подібно більшості інших природних матеріалів, містить незначну кількість первинних радіонуклідів. Концентрація радіонуклідів у різних вугільних шарах відрізняється у сотні разів. В основному вугілля містить менше радіонуклідів, ніж земна кора. Але при спалюванні вугілля

велика частина його мінеральних компонентів спікається у шлак або золу, де в основному і концентруються радіонукліди. Використання золи як добавки до цементу і бетонів, може призвести до збільшення радіаційного опромінення.

Фосфати. Видобуток фосфатів, які використовуються для виробництва мінеральних добрив, супроводжується підвищенням радіоактивного фону. Це пов'язано з тим, що більшість відкритих фосфатних родовищ містять уран. У процесі видобутку і переробки руди виділяється радон, та й самі добрива містять радіоізотопи, що проникають із ґрунту в харчові культури.

Штучні джерела радіації

За останнє десятиліття створено кілька сотень штучних радіонуклідів, а також активно використовується енергія атома в різних цілях. Однак, на відміну від природних джерел, породжуване штучними джерелами радіоактивне випромінювання практично в усіх випадках контролюється. Умовно штучні джерела радіації можна поділити на групи:

- рентгенівські апарати, діагностичні пристрої на базі використання радіоізотопів, променева терапія;
- ядерні вибухи;
- атомна енергетика;
- предмети, що містять радіоактивні речовини.

Ще й сьогодні можна зустріти годинники з циферблатами, які виготовлялися із застосуванням радію або трохи менш небезпечного тритію; антистатичні щітки для видалення пилу з фотографічних плівок, дія яких основана на випромінюванні α -частинок; радіоізотопні детектори диму, принцип дії яких оснований на використанні α -випромінювання плутонію 239; кольорові телевізори, що випускають м'яке рентгенівське випромінювання й інші пристрої.

Основні джерела опромінення населення й обумовлені ними ефективні та еквівалентні дози можна наочно подати у вигляді таблиці 3:

Таблиця 3

Джерела опромінення	Доза (мкЗв/рік)
Природні:	
Космічні промені на поверхні Землі (Рівень опромінення космічними променями росте з висотою і подвоюється кожні 500 метрів)	0,320
Гамма випромінювання:	
- фонове	3,00
- додаткове (будматеріали)	1,10
Внутрішнє опромінення:	2,00
- бета-випромінювачі	1,60
- альфа-випромінювачі	0,003
Додаткове від:	
добрих, спалювання вугілля	0,02
Радон-222, радон-220	2,80
- фонове	4,80
- додаткове від будматеріалів	1
- ґрунту	0,90
Усього	29,40
Медичні:	
Рентгенодіагностика	12,00
Радіонуклідна діагностика	0,30
Усього	12,30
Інші штучні джерела:	
Випробування ядерної зброї	0,20
Ядерна енергетика	0,001
Професійне опромінення	0,03
Наслідку аварії на Чорнобильської АЕС	0,30
Усього	0,53
Усього в рік	42,000

3.5.3. Потік і інтенсивність іонізуючих випромінювань

Потік будь-якого радіоактивного випромінювання Φ визначають відношенням числа частинок, які падають на поверхню S , розташовану перпендикулярно до напрямку поширення випромінювання за час t .

$$\Phi = \frac{N}{St}. \quad (3.4.3.1)$$

Позначимо число частинок в одиниці об'єму, які рухаються в напрямку до мішені, буквою n . Це число називається *концентрацією частинок*. За одиницю часу на мішень попадають ті частинки, відстань яких від мішені не перевищує довжини, чисельно рівної швидкості v . Оскільки одиничну площадку мішені перетинають частинки, які розміщуються у циліндрі висотою v і одиничною площею поперечного перерізу S , то потік такого випромінювання буде дорівнювати:

$$\Phi = \frac{nSvt}{St} = nv. \quad (3.4.3.2)$$

Потік частинок вимірюють в одиницях *част./($m^2 \cdot c$)* або *част./($cm^2 \cdot c$)*, причому:

$$\frac{\text{част.}}{m^2 c} = 10^4 \frac{\text{част.}}{cm^2 c}. \quad (3.4.3.3)$$

Сумарне число частинок, які падають щосекунди на мішень площею S , можна визначити за формулою $N = \Phi \cdot S$.

Інтенсивність випромінювання J – це енергія випромінювання, яка переноситься частинками за одиницю часу через одиничну площадку, перпендикулярну напрямку поширення випромінювання. Одиницею інтенсивності випромінювання є ват, поділений на квадратний метр ($Вт/м^2$).

$$J = \frac{W}{St}. \quad (3.4.3.4)$$

Інтенсивність випромінювання вимірюється в $\text{Дж}/\text{м}^2\text{с}$ або в $\text{Вт}/\text{м}^2$, або в $\text{МеВ}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$. Зв'язок між одиницями інтенсивності $\text{Вт}/\text{м}^2$ і $\text{МеВ}/\text{см}^2\text{с}$ має вигляд:

$$\frac{\text{МеВ}}{\text{см}^2\text{с}} = 6,25 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (3.4.3.5)$$

Для моноенергетичного пучка частинок з кінетичними енергіями E потік і інтенсивність випромінювання пов'язані досить простим співвідношенням:

$$J = \Phi \cdot E. \quad (3.4.3.6)$$

Якщо пучок випромінювання складається з немоноенергетичних частинок, то за кінетичну енергію в останній формулі приймають середню кінетичну енергію цих частинок :

$$J = \Phi \bar{E}. \quad (3.4.3.7)$$

3.6. Взаємодія елементарних частинок з речовиною.

3.6.1. Взаємодія важких заряджених частинок з речовиною.

3.6.2. Вільний пробіг важких заряджених частинок у речовині.

3.6.3. Взаємодія електронів з речовиною.

3.6.4. Взаємодія нейтронів з речовиною.

3.6.1. Взаємодія важких заряджених частинок з речовиною

До важких частинок відносяться частинки, маси яких у сотні разів більші за масу електрона. При русі в речовині важкі заряджені частинки стикаються з електронами атомів і взаємодіють з ними завдяки взаємодії їх електричних полів. Зіткнення важких заряджених частинок з ядрами атомів досить рідке явище, тому що ядра займають в атомах відносно малий об'єм. Ядра мало впливають на гальмування важких заряджених частинок.

Розглянемо якісну взаємодію важкої частинки A із зарядом q , яка рухається із деякою швидкістю повз електрон e (рис. 3.4.1). Якщо

швидкість електрона набагато менша швидкості частинки, то електрон можна вважати нерухомим. При дії зарядженої частинки на нерухомий електрон виникає кулонівська сила:

$$F_k = \frac{qe}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (3.5.1.1)$$

де r – відстань між зарядами (залежить від часу); $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - діелектрична проникність вакууму.

Кулонівська сила спрямована вздовж радіуса r . Позитивно заряджена частинка притягує електрон і він починає рухатися у напрямку до частинки. Негативно заряджена частинка, навпаки, відштовхує електрон. Оскільки маса важкої частинки набагато більша маси електрона, то частинка після зіткнення з електроном майже не змінює напрямку свого руху.

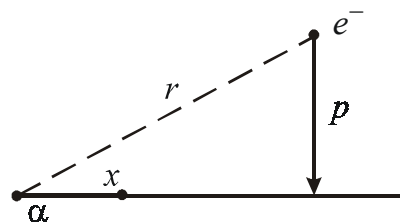


Рис.3.4.1

Енергетичні втрати важкої зарядженої частинки на одне зіткнення з електроном оцінюють за формулою:

$$\Delta E \approx \frac{q^2 e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 m_e v^2} \cdot \frac{1}{p}, \quad (3.4.3.2)$$

де p – найкоротша відстань електрона до траєкторії частинки (параметр зіткнення, рис.3.4.1).

Енергетичні втрати пропорційні квадрату заряду частинки. Із збільшенням швидкості v час взаємодії частинки з електроном, а разом з ним і втрати енергії на одне зіткнення зменшуються. Енергетичні втрати не

залежать від маси частинки, тому що під зіткненням частинки з електроном розуміють взаємодію їх електричних полів. Мінімальні непружні втрати обмежуються енергією збудження електрона в атомі. Частинка може передати електрону лише порцію енергії, що дає можливість перевести його на один із збуджених рівнів атома. Внаслідок цього, починаючи з деякого параметра зіткнення $p > p_0$, частинка взаємодіє не з окремим електроном, а з усім атомом. У цьому випадку відбувається пружне зіткнення частинки з атомом.

Максимальний параметр зіткнення p_0 , при якому атом збуджується або іонізується, залежить від порядкового номера Z , тобто від ступеня зв'язку електронів в атомі.

Енергетичні втрати зарядженої частинки в непружних (збудження й іонізація) і пружних (зіткненнях з атомами) прийнято відносити до *іонізаційних втрат*. Вони характеризуються питомою іонізацією, рівною числу іонних пар (електрон, іон), які виникають на одиниці шляху руху частинки. На створення однієї іонної пари в одній і тій же речовині всі заряджені частинки витрачають в середньому однакову енергію, з якої приблизно одна половина йде на іонізацію, а інша – на збудження і на пружні зіткнення з молекулами. Наприклад, заряджені частинки витрачають на утворення однієї іонної пари в повітрі приблизно 34 еВ своєї енергії. З цієї енергії на іонізацію молекули йде близько 15 еВ, а інші 19 еВ – на збудження і пружні зіткнення.

Питому іонізацію неважко розрахувати виходячи з питомих втрат енергії (dE/dx), яка дорівнює зміні кінетичної енергії частинки на одиницю пройденого шляху в речовині. Число іонних пар N_i на одиниці шляху дорівнює питомій втраті енергії, поділеній на середні втрати енергії в речовині на утворення однієї іонної пари:

$$N_i = \frac{1}{E_n} \cdot \left(\frac{dE}{dx} \right)_n. \quad (3.5.1.2)$$

Питома втрата енергії частинки, як і зміна енергії електричного поля при зіткненні з електроном, залежить від квадрата заряду частинки і від квадрата її швидкості. Крім того, вона пропорційна числу електронів, з якими відбуваються зіткнення на одиниці шляху. Кількість таких зіткнень в свою чергу пропорційна концентрації атомних електронів у речовині N_e :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_n \sim \frac{N_e q^2}{v^2}. \quad (3.5.1.3)$$

Питомі втрати енергії лінійно залежать від густини атомних електронів N_e . В свою чергу густина атомів N для твердих речовин майже постійна, а $N_{e1} = N_{e2}$. Тому іонізаційні питомі втрати енергії в двох простих речовинах відносяться між собою як їх порядкові номери в таблиці Менделєєва:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{n1} \div \left(\frac{dE}{dx}\right)_{n2} = z_1 \div z_2. \quad (3.5.1.4)$$

Так, іонізаційні втрати протона у свинці ($z = 82$) приблизно в 16 разів більші, ніж у вуглеці ($z = 6$).

3.6.2. Вільний пробіг важких заряджених частинок у речовині

Заряджена частинка проходить у речовині деяку відстань перш ніж вона втратить всю свою кінетичну енергію. Пройдений зарядженою частинкою в речовині шлях до зупинки називають вільним пробігом R . Величину вільного пробігу визначають за питомими втратами енергії. Чим більша густина атомних електронів і заряд частинки, тим ці втрати більші і тим менший пробіг частинки в речовині. Важкі заряджені частинки, які взаємодіють в основному з атомними електронами, мало відхиляються від напрямку свого початкового руху. Тому пробіг важкої частинки вимірюють відстанню по прямій від джерела частинок до точки її зупинки.

Параметр зіткнення a -частинок з електронами має імовірний характер, а тому вільні пробіги a -частинок у речовині мають деякий розкид. Незначна частина a -частинок проникає далі інших від джерела. Середній пробіг Ra моноенергетичних a -частинок звичайно розраховують за допомогою емпіричних формул. Так, у повітрі при нормальних умовах:

$$R_a = B \cdot E_a^n, \quad (3.5.2.1)$$

де R_a – пробіг у см; E_a – кінетична енергія a – частинок у MeV.

Для a – частинок природних α – випромінювачів ($4 \text{ MeV} < E_a < 9 \text{ MeV}$), $B = 0.318$, $n = 1.5$. Для a – частинок з більш високими енергіями $E_a \geq 200$ (MeV) $B = 0.148$, $n = 1.8$. Так, α – частинки з енергіями $E_a = 5 \text{ MeV}$ пробігають у повітрі відстань 3.51 см, а з енергією $E_a = 30 \text{ MeV}$ – 68 см. Відношення лінійних пробігів двох типів частинок, які розпочинають рух у повітрі з однаковими швидкостями, пропорційний відношенню питомих втрат енергії цих частинок:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2, \quad (3.5.2.2)$$

де m_1 і m_2 – відповідно, маси частинок; z_1 і z_2 – зарядові числа частинок.

Часто замість лінійного пробігу використовують масовий пробіг *зарядженої частки* R_m , який виражається у грамах на квадратний сантиметр (г/см^2). Чисельно масовий пробіг дорівнює масі речовини, яка розміщена в циліндрі, висота якого дорівнює лінійному пробігу частинки R у сантиметрах, з площею поперечного перерізу – 1 см^2 .

$$R_m = \rho R, \quad (3.5.2.3)$$

де ρ – густина речовини в г/см^3 .

Масовий пробіг зарядженої частинки зручний тим, що він мало залежить від хімічного складу речовини.

3.6.3. Взаємодія бета-частинок з речовиною

При русі в речовині легкі заряджені частинки втрачають свою енергію. Ці втрати можна поділити на іонізаційні й радіаційні.

При русі легких заряджених частинок у речовині *питомі іонізаційні втрати* зменшуються із збільшенням їх швидкості до кінетичних енергій, які дорівнюють подвоєній енергії спокою електрона, а потім повільно зростають.

Радіаційні втрати спостерігаються при прискореному русі вільних заряджених частинок в електричному полі ядра. Пролітаючи поблизу ядра, заряджена частинка відхиляється від свого попереднього напрямку під дією кулонівської сили F . Ця сила пов'язана з масою частинки m і її прискоренням a другим законом Ньютона $F = ma$. Вільний заряд, який рухається з прискоренням a , випромінює електромагнітні хвилі, енергія яких пропорційна порядковому номеру елемента. Оскільки кулонівська сила пропорційна порядковому номеру елемента в таблиці Менделєєва z , то $a^2 \sim z^2/m^2$. Отже, радіаційні втрати важких заряджених частинок значно менші радіаційних втрат електронів і позитронів. Із збільшенням енергії електронів їх електричне поле в перпендикулярному напрямку підсилюється, тому радіаційні втрати ростуть пропорційно до зростання кінетичної енергії електронів E_{e-} . Отже, *питомі радіаційні втрати енергії* E_{e-} пропорційні енергії і квадрату порядкового номера речовини:

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_n \sim z^2 \cdot E_{e-}. \quad (3.5.3.1)$$

Іонізаційні втрати в електронів переважають в області порівняно невеликих енергій. Із збільшенням кінетичної енергії внесок іонізаційних втрат у загальних втратах енергії зменшується. Оскільки *питомі іонізаційні втрати* $\left(\frac{dE}{dx} \right)_n \sim z$, то відношення питомих радіаційних і іонізаційних втрат k енергії пропорційне zE_{e-}^2 , тобто

$$k = 1.25 \cdot 10^{-3} \cdot z \cdot E_{e-}^2, \quad (3.5.3.2)$$

тут E_{e-} береться у МеВ.

Енергію електронів, при якій *питомі іонізаційні і радіаційні втрати* рівні ($k = 1$), називають *критичною*. Критична енергія для заліза ($z = 26$)

дорівнює 31 MeV, а для свинцю ($z = 82$) - приблизно 9.8 MeV. Практичний інтерес має не дійсний *лінійний* пробіг, а *ефективний*. Він дорівнює товщині шару речовини, яка повністю поглинає електрони. Ефективні масові пробіги R_{me} моноенергетичних електронів знаходять за емпіричними формулами:

$$R_{me^-} = 0,407 \cdot E_{e^-}^{1,38} \quad \text{для } E_{e^-} \leq 0,8 \text{ MeV},$$

$$R_{me^-} = 0,542 \cdot E_{e^-} - 0.133 \quad \text{для } E_{e^-} > 0,8 \text{ MeV}, \quad (3.5.3.3)$$

де R_{me} вимірюють у грамах на квадратний сантиметр (г/см^2); E_e - кінетична енергія електронів у MeV.

3.6.4. Взаємодія нейтронів з речовиною

Нейтрони, пролітаючи крізь речовину, безпосередньо не іонізують атоми й молекули, подібно до заряджених частинок. Тому нейтрони виявляють за допомогою вторинних ефектів, які виникають при взаємодії їх з ядрами. У результаті зіткнення нейтронів з ядрами речовини природа останніх не змінюється, а самі нейтрони розсіюються на атомних ядрах.

Зіткнення нейтронів з ядрами можуть бути пружними й не пружними. При непружних взаємодіях відбуваються ядерні реакції типу (n, α) , (n, p) , (n, γ) , $(n, 2n)$ і т.д., і спостерігаються ядерні реакції поділу важких ядер.

Імовірність проходження тієї чи іншої ядерної реакції визначається мікроскопічним перерізом реакції $\sigma(n, \alpha)$, $\sigma(n, p)$, $\sigma(n, \gamma)$, $\sigma(n, 2n)$ і т.д. (першою в дужках записується частинка, яка бомбардує нейтрон, другою – частинка, що випускається, або γ -квант).

Мікроскопічний переріз σ можна уявити як перетин сфери, описаної навколо ядра. Перетинаючи сферу, нейтрон може вступити в реакцію з ядром. Поза сферою радіусом $r = \sqrt{\sigma/\pi}$ взаємодії не відбуваються. Мікроскопічний переріз вимірюється в квадратних сантиметрах (см^2) і барнах ($1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$). Експериментально доведено, що при енергіях нейтронів, більших за 10 MeV, повний ефективний переріз дорівнює :

$$\sigma_m = 2\pi \cdot R^2, \quad (3.5.4.1)$$

де R - радіус ядра.

Звідси радіус ядра дорівнює

$$R = \sqrt{\frac{\sigma_m}{2\pi}}. \quad (3.5.4.2)$$

Більш точні експериментальні вимірювання радіуса ядра R в залежності від масового числа A були проведені з використанням нейтронів з енергіями 14 і 25 МеВ. Вимірювання показали, що

$$R = (1,3 \div 1,4) \cdot 10^{-15} A^{1/3} \text{ м}. \quad (3.5.4.3)$$

Помноживши мікроскопічний переріз σ на число ядер у 1 см^3 поглинаючої речовини N , одержимо повний переріз усіх ядер у 1 см^3 поглинаючої речовини. Макроскопічний переріз Σ в цьому випадку дорівнює:

$$\Sigma = \sigma \cdot N. \quad (3.5.4.4)$$

Макроскопічний переріз має розмірність, обернено пропорційну до розмірності довжини, см^{-1} . Тому при $N = N_0 \cdot \rho / A$, де N_0 - число Авогадро, маємо

$$\Sigma = \sigma \frac{N_0 \rho}{A}. \quad (3.5.4.5)$$

В залежності від енергії нейтронів їх ділять на такі групи:

- ультрахолодні нейтрони;

- нейтрони з енергією меншою 10^{-7} еВ;
- холодні нейтрони;
- нейтрони з енергією меншою за $5 \cdot 10^{-3}$ еВ.

Ультрахолодні й холодні нейтрони мають дуже великі проникні здатності в полікристалічних речовинах. Теплові нейтрони – це нейтрони, які перебувають у термодинамічній рівновазі з атомами навколишнього розсіюючого середовища. Через відносно слабе поглинання в середовищі їх швидкості підпорядковуються максвеллівському розподілу. Тому такі нейтрони називаються тепловими. Енергія теплових нейтронів при кімнатній температурі дорівнює 0,025 еВ. Швидкості теплових нейтронів характеризуються енергією $E_0 = k \cdot T$, де T - абсолютна температура, а k - стала Больцмана.

Надтеплові нейтрони – нейтрони з енергією від 0.1 еВ до 0.3 кеВ. При проходженні надтеплових нейтронів через поглинаючі і розсіюючі середовища, переріз взаємодії підпорядковується закону $1/v$, де v швидкість нейтрона. При цих значеннях енергії нейтронів у речовині відбуваються реакції радіаційного захоплення типу (n, γ) .

Нейтрони проміжних енергій - нейтрони з енергією від 0.5 кеВ до 0.2 МеВ. Для нейтронів цих енергій найбільш типовим процесом взаємодії з речовиною є пружне розсіювання.

Швидкі нейтрони - нейтрони з енергією від 0.2 МеВ до 20 МеВ, характеризуються як пружними, так і не пружними розсіюваннями і виникненням граничних ядерних реакцій.

Надшвидкі нейтрони - це нейтрони, які мають енергію понад 20 МеВ. Вони характеризуються ядерними реакціями з виділенням великого числа частинок. При енергіях нейтронів більших за 300 МеВ, спостерігається слабка їх взаємодія з ядрами (ядра стають прозорими для надшвидких нейтронів). В цьому випадку появляються так звані "реакції сколювання", у результаті яких ядра, у які проникли нейтрони, діляться на кілька осколків.

Нейтрони тієї чи іншої енергетичної групи, проходячи через матеріальне середовище, поведуться досить специфічно. У загальному випадку нейтрони, які проникли в речовину, розсіюються і поглинаються ядрами. Якщо на поверхню плоскої мішені (речовини, що опромінюється нейтронами) товщиною d падає паралельний пучок моноенергетичних нейтронів, швидкості яких спрямовані перпендикулярно до поверхні мішені, то після проходження цієї речовини частина нейтронів вибуває з

пучка. На глибині x величина потоку первинних нейтронів ослабляється до значення $\Phi(x)$. Зменшення величини потоку нейтронів $d\Phi$ у шарі dx дорівнює добутку $\sigma_t \cdot N dx$ помножену на величину $\Phi(x)$:

$$d\Phi = -\sigma_t \Phi(x) n dx, \quad (3.5.4.5)$$

де $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$ - повний переріз реакції; σ_s – переріз пружного розсіювання нейтронів; σ_a – переріз поглинання нейтронів; n – концентрація ядер поглинаючої речовини.

Знак мінус показує на зменшення потоку нейтронів у шарі речовини.

Розділимо змінні та інтегруємо це рівняння, одержимо:

$$\ln \Phi(x) = -n \sigma_t x + C. \quad (3.5.4.6)$$

Постійну інтегрування C знайдемо з граничних умов: при $x = 0$, $\Phi = \Phi_0$ і $\ln \Phi_0 = C$. Замінімо в рівнянні (3.5.4.6) постійну C й одержимо:

$$\ln \frac{\Phi(x)}{\Phi_0} = -n \sigma_t x. \quad (3.5.4.7)$$

Потенціюючи останнє рівняння, одержимо закон ослаблення паралельного пучка нейтронів у плоскій мішені речовини, яка ними опромінюється:

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-n \sigma_t x}. \quad (3.5.4.)$$

Густина потоку $\Phi(x)$ зменшується із збільшенням товщини шару речовини за експонентним законом. Розподіл густини потоку первинних нейтронів по товщині мішені залежить від величини перерізу σ_t і концентрації ядер n .

Переріз σ_t вимірюється експериментально. Експериментальні дані нейтронних перерізів можна знайти в спеціалізованих збірниках і атласах ядерних констант.

3.7. Елементи дозиметрії

3.7.1. Поглинена й експозиційна дози. Одиниці вимірювання дози випромінювання.

3.7.2. Особливості взаємодії різних видів випромінювання з біологічними об'єктами.

3.7.3. Дія іонізуючого випромінювання на організм людини

3.7.1. Поглинена й експозиційна дози. Одиниці вимірювання дози випромінювання

Для визначення поглиненої енергії будь-якого виду випромінювання в середовищі використовують поняття *поглиненої дози випромінювання*.

Поглинена доза випромінювання визначається енергією, яка поглинається одиницею маси опроміненої речовини. За одиницю поглиненої дози випромінювання приймається джоуль на кілограм (Дж/кг). Джоуль на кілограм - поглинена доза випромінювання, яка відповідає енергії в один джоуль будь-якого іонізуючого випромінювання, що поглинається масою в один кілограм опроміненої речовини. В системі СІ одиницю поглиненої дози будь-якого випромінювання називають грей (Гр), $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$.

Позасистемною *оддиницею* поглиненої дози випромінювання є *рад*. Один *рад* відповідає поглиненій енергії в 10^{-5} Дж на 1кг будь-якої речовини: $1 \text{ рад} = 10^{-5} \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр}$. Відповідно до вищевикладеного

$$D_{\text{погл.}} = \frac{\Delta E}{\Delta m} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right), \quad (3.6.1.1)$$

де $D_{\text{погл.}}$ - поглинена доза випромінювання, ΔE - енергія, поглинена речовиною, що опромінюється, Δm - маса речовини.

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

Для характеристики дози з точки зору іонізації застосовується так звана *експозиційна доза* рентгенівського й γ - випромінювання. *Експозиційна доза* виражає енергію випромінювання, перетворену в кінетичну енергію заряджених частинок в одиниці маси атмосферного повітря.

За одиницю експозиційної дози рентгенівського й γ - випромінювань приймається кулон на кілограм - 1 Кл/кг. Кулон на кілограм це така експозиційна доза рентгенівського й γ - випромінювань, при якій пов'язана з цим випромінюванням корпускулярна емісія на кілограм сухого повітря при нормальних умовах (при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ і тиску 760 мм рт. ст.) створює у повітрі іони, які мають заряд в один кулон електрики кожного знака.

Позасистемною одиницею експозиційної дози рентгенівського й γ - випромінювань є *рентген*. Рентген – одиниця експозиційної дози фотонного випромінювання, при проходженні якого крізь 0,001293 г повітря в результаті завершення всіх іонізаційних процесів в повітрі створюються іони, що несуть заряд $3,33 \cdot 10^{-10}$ Кл (одну електростатичну одиницю кількості електрики) кожного знака. Маса 0,001293 г - це маса 1 см^3 атмосферного сухого повітря за нормальних умов: при температурі 0°C та тиску $1,013 \cdot 10^5$ Па (760 мм рт.ст.). Експозиційна доза може також вимірюватись в долях рентгена - мілірентгенах - мР або в мікрорентгенах - мкР ($1 \text{ Р} = 10^3 \text{ мР} = 10^6 \text{ мкР}$).

Величину експозиційної дози можна оцінити за допомогою формули

$$D_{\text{експ.}} = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}, \quad (3.6.1.2)$$

об'єму; Δm - маса повітря, що опромінюється, у цьому об'ємі. де $D_{\text{експ.}}$ - експозиційна доза рентгенівського й γ - випромінювань; ΔQ - заряд, що виникає у результаті іонізації повітря в елементі

Експозиційній дозі 1 Р відповідає величина в системі СІ (Дж/кг)

$$D_{\text{експ.}} = \frac{\Delta Q}{\Delta m} = \frac{3,33 \cdot 10^{-10}}{1,293 \cdot 10^{-6}} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

Якщо врахувати, що середня енергія утворення іонів у повітрі $E = 34 \text{ еВ}$ і $n = 2,08 \cdot 10^9 \text{ 1/см}^3$, то одиниці експозиційної дози "рентгену" буде відповідати:

$$D_{\text{експ.}} = n \cdot E = \frac{3,33 \cdot 10^{-10}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \frac{34}{10^6} = 2,08 \cdot 10^9 \cdot 34 \cdot 10^{-6} = 7,06 \cdot 10^4 \text{ МеВ/см}^3.$$

При перерахуванні на один грам повітря "рентгену" буде відповідати:

$$D_{\text{експ.}} = n \cdot E = 1.61 \cdot 10^{12} \cdot 34 \cdot 10^{-6} = 5.47 \cdot 10^7 \text{ MeB/г.}$$

Отже, для одержання експозиційної дози в один рентген потрібно, щоб енергія, витрачена на іонізацію в одному кубічному сантиметрі повітря (або грамі), відповідно дорівнювала

$$1 \text{ P} = 7.06 \cdot 10^4 \text{ MeB/см}^3 = 5.47 \cdot 10^7 \text{ MeB/г.}$$

Співвідношення між поглинутою дозою випромінювання $D_{\text{погл.}}$, вираженою в радах ($1 \text{ рад} = 10^{-5} \text{ Дж/г}$), і експозиційною дозою рентгенівського й γ - випромінювань $D_{\text{експ.}}$, вираженою в рентгенах ($1 \text{ P} = 87.7 \cdot 10^7 \text{ Дж/г}$), для повітря має вигляд:

$$D_{\text{експ.}} = 0.877 D_{\text{погл.}}$$

Із зіставлення доз випливає, що в умовах електронної рівноваги при експозиційній дозі, рівній одному рентгену, поглинута доза дорівнює 0.877 рад, або 0,00877 Гр. ($1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$)

3.7.2. Особливості взаємодії різних видів випромінювання з біологічними об'єктами

За останні десятиліття людина створила кілька сотень штучних радіонуклідів і навчилася використовувати енергію атома для різноманітних цілей: у медицині, для створення ядерної зброї, для виробництва електроенергії, виявлення пожеж, для пошуку корисних копалин, розвитку перспективних новітніх радіаційних технологій. Усе це призводить до збільшення дози опромінення як окремих людей, так і населення Землі в цілому.

У цьому зв'язку впливу іонізуючих випромінювань на живі організми присвячені численні дослідження, результати яких показані в

численних статтях, працях симпозіумів, підручниках, методичних й навчальних посібниках.

Різні види випромінювань супроводжуються вивільненням різної кількості енергії і мають різну проникну здатність, тому вони здійснюють неоднакові впливи на тканини живого організму. Альфа-випромінювання, яке складається з нейтронів і протонів, практично не проникає через зовнішній шар шкіри, утворений відмерлими клітинами. Тому воно не створює небезпеки доти, поки радіоактивні речовини, що випромінюють α - частинки, не потрапляють всередину організму через відкриту рану, з їжею або з повітрям; тоді вони стають надзвичайно небезпечними.

Бета-випромінювання має більшу проникну здатність: воно проходить у тканини організму на глибину один - два сантиметри. Проникна здатність гамма-випромінювання, яке поширюється зі швидкістю світла, дуже велика: його може затримати лише товста свинцева або бетонна плита.

Ушкоджень, викликаних у живому організмі випромінюванням, буде тим більше, чим більше енергії воно передає тканинам: *кількість переданої організму енергії називається дозою*. Дозу випромінювання організм може одержати від будь-якого джерела випромінювання незалежно від того, знаходяться радіонукліди поза організмом або всередині його (у результаті попадання з їжею, водою або повітрям). У цьому зв'язку розрізняють *зовнішнє і внутрішнє опромінення*.

Кількість енергії випромінювання, одержуваної одиницею маси тіла, яке опромінюється, (тканини організму), називається *поглиненою дозою*. Ця величина так само як і при опроміненні будь-якої речовини вимірюється в системі СІ в Грєях ($1\text{Гр} = 1\text{ Дж/кг}$) і радах ($1\text{ рад} = 0.01\text{ Гр}$). Але ця величина не враховує того, що при однаковій поглиненій дозі альфа - випромінювання небезпечніше ніж бета або гамма-випромінювання.

Якщо взяти до уваги цей факт, то дозу варто помножити на зважувачий фактор, який відображує здатність випромінювання даного виду зашкодити тканинам організму. Біологічний ефект випромінювань при хронічному (професійному) опроміненні всього тіла враховує зважувачий фактор випромінювання W (табл. 3). Він показує, у скільки

разів даний вид випромінювання створює більший біологічний ефект, ніж гамма - випромінювання, при рівних дозах обох випромінювань.

Добуток поглиненої дози D даного виду випромінювання на його зважуючий фактор W називається *еквівалентною дозою*:

$$D_e = W \cdot D. \quad (3.6.2.1)$$

Одиниця еквівалентної дози в системі СІ, називається зівертом (Зв). Один зіверт відповідає поглинутій еквівалентній дозі 1 Дж/кг (для рентгенівського, γ - і β -випромінювань). На практиці також використовується одиниця еквівалентної дози, яка називається біологічним еквівалентом рада "бер" ($1 \text{ бер} = 0.01 \text{ Зв}$).

Еквівалентну дозу випромінювання, віднесену до одиниці часу, називають *потужністю еквівалентної дози*. Якщо за інтервал часу від t_1 до t_2 середовище одержало еквівалентну дозу D , то середня *потужність еквівалентної дози* буде дорівнювати

$$P = \frac{D}{t_2 - t_1} \frac{\text{Зв}}{\text{с}} \quad (3.6.2.2)$$

Радіаційний зважуючий фактор – коефіцієнт, що враховує відносну біологічну ефективність різних видів іонізуючого випромінювання. Використовується винятково при розрахунку ефективної та еквівалентної доз.

Зважуючий фактор випромінювань (W) для деяких речовин показаний в таблиці 3 (НРБУ – 97)

Таблиця 3

Вид випромінювання	W	Вид випромінювання	W
Рентгенівське і γ -випромінювання	1	Протони ($E_p = 10 \text{ MeV}$)	5
		Важкі ядра	20
		Теплові нейтрони $< 10 \text{ keV}$	5
Альфа-випромінювання ($E_\alpha = 10 \text{ MeV}$)	20	Нейтрони з енергією: 5 keV	5

		20 кеВ	10
		100 кеВ	20
		1 МеВ	20
		10 МеВ	10
		> 20 МеВ	5
Бета-випромінювання	1		

Біологічна дія випромінювання на організм людини залежить і від потужності дози. При однаковій дозі випромінювання біологічний ефект зростає зі зменшенням інтервалу часу $t_1 - t_2$. Тому в робочих приміщеннях ядерних установок контролюють не тільки дозу випромінювання, але й потужність дози випромінювання.

Для персоналу, який працює у полі випромінювання, встановлюються ліміти доз (ЛД). Ліміти доз беруться в рамках індивідуальної ефективної дози (в деяких випадках – еквівалентної) за календарний рік (ліміт річної ефективної дози) для осіб категорій А і Б та річної ефективної дози для критичних груп осіб категорії В (населення). Останнє означає, що значення річної дози опромінення осіб, які входять в критичну групу, не повинно перевищувати ліміту дози, встановленої для категорії В. Орієнтовні значення ЛД для різних категорій осіб А, Б, В наведені в НРБУ-97.

Потужність дози оцінюють шляхом ділення встановленого ЛД, наприклад 1,00 мЗв за робочий тиждень на тривалість робочого тижня

$$P_{\text{лд}} = \frac{100}{t} = \frac{\text{мбер}}{\text{год}}, \quad (3.6.2.3)$$

Де t - тривалість робочого тижня, год.

Якщо $t = 36$ год., то $P_{\text{лд}} = 2,8$ мбер/год. . Варто враховувати також, що одні частини тіла (органи, тканини) більш чутливі, ніж інші: наприклад, при однаковій еквівалентній дозі опромінення виникнення пухлини в легенях більш імовірно, ніж у щитовидній залозі, а опромінення полових залоз особливо небезпечно через ризик генетичних ушкоджень. Тому дози опромінення органів і тканин також варто враховувати з різними коефіцієнтами.

Коефіцієнти радіоактивного ризику:

- червоний кістковий мозок - 0.12;
- кісткова тканина - 0.03;
- щитовидна залоза - 0.05;
- легені - 0.12;
- яєчники і сім'яники - 0.20;
- молочна залоза - 0,05
- шкіра - 0,01
- інші тканини - 0.05;
- стравохід - 0,05
- організм у цілому - 1.00;

Помноживши еквівалентні дози на відповідні коефіцієнти і просумувавши по всіх органах і тканинах, одержимо ефективну еквівалентну дозу, яка відображує сумарний ефект опромінення для організму: вона також вимірюється в зівертах і берах.

3.7.3. Дія іонізуючого випромінювання на організм людини

У результаті впливу іонізуючого випромінювання на організм людини в тканинах можуть відбуватися складні фізичні, хімічні й біологічні процеси.

Первинним фізичним актом взаємодії іонізуючого випромінювання з біологічним об'єктом є іонізація. Саме через іонізацію відбувається передача енергії об'єкта. Відомо, що в біологічній тканині 60-70 % по масі є вода. У результаті іонізації молекули води утворюють вільні радикали H^+ і OH^- за такою схемою:



У присутності кисню утвориться також вільний радикал гідроперекису ($\text{H}_2\text{O}^\cdot$) і перекис водню (H_2O_2), що є сильними окислювачами.

Вільні радикали й окислювачі, які є продуктами радіолізу води, мають високу хімічну активність, а тому вступають у хімічні реакції з молекулами білків, ферментів й інших структурних елементів біологічної тканини, що призводить до зміни біологічних процесів в організмі. У результаті порушуються обмінні процеси, придушується активність ферментних систем, сповільнюється і припиняється ріст тканин,

виникають нові хімічні сполуки, не властиві організму - *токсини*. Це приводить до порушень життєдіяльності окремих функцій або систем організму в цілому. У залежності від *величини* поглиненої дози й *індивідуальних* особливостей організму викликані зміни можуть бути зворотними або незворотними.

Деякі радіоактивні речовини *накопичуються* в окремих внутрішніх органах. Наприклад, джерела альфа - випромінювання (радій, уран, плутоній), бета - випромінювання (стронцій і ітрій) і гамма-випромінювання (цирконій), відкладаються в кісткових тканинах. Усі ці речовини важко виводяться з організму.

Місця накопичування радіонуклідів в організмі людини наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Щитовидна залоза	^{129}I , ^{131}I , ^{99}Tc .
Легені	^{85}Kr , ^{238}Pt , ^{239}Pt , ^{222}Rd , ^{233}U , ^{133}Xe , ^{135}Xe .
Печінка	^{137}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{239}Ne , ^{238}Pt , ^{239}Pt , ^{241}Pt .
Кістки	^{140}Ba , ^{14}C , ^{154}Er , ^{155}Er , ^{32}P , ^{238}Pt , ^{239}Pt , ^{241}Pt , ^{147}Pr , ^{226}Ra , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{234}Th , ^{233}U , ^{90}Y , ^{65}Zn .
Підшлункова залоза	^{210}Po .
Нирки	^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{106}Rt .
Яєчники	^{140}Ba , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{131}I , ^{85}Kr , ^{239}Pt , ^{40}K , ^{42}K , ^{106}Rt , ^{90}Y , ^{65}Zn .
М'язи	^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{154}Er , ^{155}Er , ^{40}K , ^{42}K .
Шкіра	^{35}S

При вивченні дії випромінювання на організм були встановлені такі особливості:

- Висока ефективність поглиненої енергії. Малі кількості поглиненої енергії випромінювання можуть викликати глибокі біологічні зміни в організмі;
- Наявність прихованого, або інкубаційного, прояву дії іонізуючого випромінювання. Цей період часто називають періодом уявного

благополуччя. Тривалість його скорочується при опроміненні великими дозами;

- дія від малих доз може додаватися або накопичуватися. Цей ефект називається кумуляцією;
- випромінювання впливає не тільки на даний живий організм, але і на його потомство. Це так званий генетичний ефект;
- різні органи живого організму мають свою чутливість до опромінення. При щоденному впливі дози 0.02-0.05 Р уже настають зміни в крові;
- не кожен організм у цілому однаково реагує на опромінення;
- опромінення залежить від частоти. Одноразове опромінення у великій дозі викликає більш глибокі наслідки ніж її частини.

У результаті впливу іонізуючого випромінювання на організм людини в тканинах можуть відбуватися складні фізичні, хімічні й біологічні процеси, які в кінцевому результаті зводяться до порушення нормального проходження біохімічних процесів і обміну речовин. *Поглинена доза випромінювання*, що викликає руйнування окремих частин тіла, а потім смерть, перевищує смертельну поглинену дозу опромінення всього тіла.

Смертельні поглинені дози для окремих частин тіла такі: голова – 20 Гр; нижня частина живота – 50 Гр; грудна клітка – 100 Гр; кінцівки – 200 Гр.

Ступінь чутливості різних тканин до опромінення неоднакова. Якщо розглядати тканини органів у порядку зменшення їхньої чутливості до дії випромінювання, то одержимо таку послідовність:

- лімфатична тканина;
- лімфатичні вузли;
- підшлункова залоза;
- зобна залоза;
- кістковий мозок;
- зародкові клітини.

Велика чутливість кровотворних органів до радіації лежить в основі визначення характеру променевої хвороби. При однократному опроміненні всього тіла людини поглиненою дозою 0,5 Гр через день після

опромінення може різко скоротитися число лімфоцитів, зменшиться також і кількість еритроцитів (червоних кров'яних тілець).

У здорової людини нараховується близько 10^{14} червоних кров'яних тілець при щоденному відтворенні 10^{12} , а в хворого таке співвідношення порушується.

Важливим фактором дії іонізуючого випромінювання на організм є час опромінення. Із збільшенням потужності дози руйнівна дія випромінювання зростає. Чим більший проміжок часу випромінювання певної дози буде діяти на організм, тим менша руйнівна дія буде в нього.

Біологічна ефективність кожного виду іонізуючого випромінювання знаходиться в залежності від питомої іонізації. Так, наприклад, α -частинки з енергією 3 МеВ утворюють 40 000 пар іонів на одному міліметрі шляху, β -частинки з такою ж енергією - до чотирьох пар іонів. Альфа - частинки проникають через поверхню шкіри до глибини 40 мкм, бета – частинки - до 0.13 см.

Зовнішнє опромінення α - і β - випромінюваннями менш небезпечне, тому що α - і β - частинки мають невелику довжину пробігу в тканині і не досягають кровотворних і інших органів.

Ступінь враження організму залежить від розміру поверхні, яка опромінюється. Зі зменшенням поверхні, що опромінюється, зменшується і біологічний ефект. Так, при опроміненні фотонами поглинутою дозою 4,50 Гр ділянки тіла площею 6 см² помітного руйнування організму не спостерігалось, а при опроміненні такою ж дозою всього організму спостерігається близько 50% летальних випадків.

Індивідуальні особливості організму людини проявляються лише при невеликих поглинутих дозах. Чим молодша людина, тим вища її чутливість до опромінення, особливо висока вона у дітей. Доросла людина у віці 25 років і більше найбільш стійка до опромінення.

Є ряд професій, де існує велика імовірність опромінення. При деяких надзвичайних обставинах (наприклад, вибух на АЕС) опроміненню може піддатися населення, яке проживає на величезних територіях. Не існує речовин, здатних цілком захистити персонал у таких випадках, але є речовини, які частково захищають організм людини від випромінювання. Вони називаються *радіопротекторами*. Історично відмічено, що на час вибухів атомних бомб у Японії, практично не постраждали від опромінення люди, які на момент вибуху перебували в безпечній зоні і

були дуже п'яні. Тут етиловий спирт в значних дозах відіграв роль радіопротектора.

Радіопротектори частково запобігають виникненню хімічно активних радикалів, що утворюються під впливом випромінювання. Механізми дії радіопротекторів різні. Одні з них вступають у хімічну реакцію з радіоактивними ізотопами, що попадають в організм, і нейтралізують їх, утворюючи нейтральні речовини, які легко виводяться з організму. Інші мають відмінний механізм. Одні радіопротектори діють протягом короткого проміжку часу, час дії інших більш тривалий. Існує кілька різновидностей радіопротекторів: таблетки, порошки й розчини.

При попаданні радіоактивних речовин усередину організму руйнівну дію здійснюють в основному α - джерела, а потім β - й γ - джерела, тобто в зворотній послідовності до зовнішнього опромінення. Альфа - частинки, що мають велику щільність іонізації, руйнують слизисту оболонку шлунку, що є слабшим захистом внутрішніх органів у порівнянні з шкірою.

Негативні наслідки при попаданні твердих частинок у дихальні органи залежать від ступеня дискретності частинок. Так, частинки з розмірами меншими 0.1 мкм при вдиханні разом з повітрям попадають у легені, а при видиханні виводяться. У легенях залишається тільки невелика їх частина. Великі частинки з розмірами більшими понад 5 мкм, майже усі затримуються носовою порожниною.

Ступінь небезпеки залежить також від *швидкості виведення* речовини з організму. Якщо радіонукліди, що потрапили усередину організму, однотипні з елементами, що споживаються людиною разом з їжею, то вони не затримуються на тривалий час в організмі, а виділяються разом з ними (натрій, хлор, калій і інші).

Інертні радіоактивні гази (аргон, ксенон, криптон і інші) не входять до складу біологічної тканини. Тому вони згодом повністю виводяться з організму.

Деякі радіоактивні речовини, потрапляючи в організм, розподіляються в ньому більш або менш рівномірно, інші концентруються в окремих внутрішніх органах (табл. 4). Так у кісткових тканинах відкладаються такі джерела α - випромінювань, як радій, уран і плутоній. Стронцій і ітрій, що є джерелами β - випромінювання, і цирконій - джерело γ - випромінювання теж відкладаються в кісткових тканинах. Ці елементи хімічно зв'язуються з кістковою тканиною, а тому дуже важко виводяться з організму.

Тривалий час утримуються в організмі також елементи з великим атомним номером (полоній, уран і ін.). Елементи, що утворюють в організмі легкорозчинні солі і накопичуються в м'яких тканинах, легко виводяться з організму.

На швидкість виведення радіоактивної речовини великий вплив має період піврозпаду даної радіоактивної речовини T . Якщо позначити T_6 період біологічного піввиведення радіоактивного ізотопу з організму, то ефективний період піврозпаду $T_{\text{еф}}$, що враховує радіоактивний розпад і біологічне виведення, виразиться формулою:

$$T_{\text{еф}} = T \cdot T_6 / (T + T_6) .$$

Основні особливості біологічної дії іонізуючого випромінювання такі:

- Дія іонізуючого випромінювання на організм не відчутна людиною. Тому це небезпечно. Дозиметричні прилади є як би додатковим органом чуття, призначеним для сприйняття іонізуючого випромінювання;
- Видимі враження шкірного покриву, нездужання, характерні для променевого захворювання, з'являються не відразу, а через деякий час;
- Підсумовування доз відбувається приховано. Якщо в організм людини систематично будуть попадати радіоактивні речовини, то згодом дози додаються, що неминуче приводить до променевих хвороб.

3.7.4. Вплив іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти при загальному опроміненні

Небажані радіаційні ефекти, від яких необхідний захист, поділяються на *соматичні* й *спадкоємні (генетичні)*.

Соматичні ефекти виявляються безпосередньо в опроміненій людини, а *генетичні* - у його потомстві. Слід пам'ятати, що такий розподіл у значній мірі є умовним, тому що результати опромінення залежать від того, у яких клітинах відбулися порушення - у соматичних чи у зародкових.

Генетичний апарат ушкоджується в обох випадках, а, отже, і ушкодження завжди можуть успадковуватися.

Різноманітні ушкодження генів, різні види аберацій хромосом і соматичних клітин об'єднані в поняття *соматичного мутагенезу*.

Аберації хромосом, які виникають у клітинах критичних органів (кістковому мозку і шлунку), - одна з основних причин гострого променевого синдрому внаслідок масового відмирання таких клітин.

Таким чином, велике значення для конкретної (опроміненої) особи і її нащадків має не характер ефекту, а вид мутацій і те, у яких клітинах (зародкових чи соматичних) вони виникають. Якщо домінантні мутації (до числа яких відносяться і багато аберацій хромосом) виникають у зародкових клітинах, то вони або приводять до зменшення запліднення й народжуваності, або проявляються, як правило, у першому поколінні, не переходячи в наступні.

Пошкодження, які виникають у соматичних клітинах, найчастіше приводять до смерті самих клітин або їх потомства і можуть бути причиною втрати генетичного контролю за рядом важливих функцій організму.

Рецесивні мутації викликаються ушкодженнями окремих генів у більшості випадків у вигляді точкових мутацій. Якщо такі мутації виникають у зародкових клітинах, то ефект опромінення може проявлятися тривалий час в безмежному ряді поколінь, підкоряючись загальним законам розщеплення ознак, імовірність прояву яких зростає з числом опромінених осіб у популяції.

Незважаючи на очевидну необхідність ретельного розмежування понять, до *соматичних* умовно відносять безпосередні ефекти опромінення (гостру або хронічну променеву хворобу і локальні променеві ушкодження) і його віддалені наслідки (скорочення тривалості життя, виникнення пухлин, лейкозів і ін.), а до *генетичних* - спадкоємні ушкодження генів зародкових клітин, які проявляються в потомстві опромінених.

Віддалені наслідки опромінення іноді називають стохастичними (підкреслюючи їх імовірнісний характер) на відміну від нестохастичних, що проявляються тільки після накопичування дози більшої за граничну (імовірність появи і вага яких швидко зростає із зростанням дози).

До нестохастичних ефектів відносять променеву *катаракту*, порушення репродуктивної функції, променеві ушкодження зародка і

плоду, косметичні дефекти шкіри, склеротичні і дистрофічні ушкодження різних тканин і інші.

Під стохастичними розуміють такі наслідки опромінення, імовірність появи яких існує при як завгодно малих дозах іонізуючого випромінювання і зростає з дозою, тоді як вага прояву від дози не залежить. До стохастичних відносять пухлини і передані потомству спадкоємні зміни; вони виявляються лише при тривалому спостереженні за великими групами населення, що нараховують десятки або сотні тисяч людей. Для одержання надійних кількісних даних про вплив на спадковість опромінення в малих дозах необхідні спостереження й аналіз ще більш численних популяцій, які включають не одне покоління нащадків.

Зрозуміло, що такі дослідження вимагають тривалого часу спостережень, великих затрат праці й коштів, навіть якщо вони проводяться на тваринах, які швидко розмножуються і є генетично добре вивченими об'єктами, наприклад мишами.

3.8. Біологічна дія іонізуючого випромінювання

3.8.1. Основи біологічної дії іонізуючих випромінювань.

3.8.2. Первинні процеси дії іонізуючих випромінювань.

3.8.3. Деякі міри захисту від зовнішнього і внутрішнього опромінення .

3.8.4. Розрахунок захисту і захисні матеріали.

3.8.1. Основи біологічної дії іонізуючих випромінювань

Іонізуюче випромінювання на перший погляд зовсім не еквівалентне величині поглинутої енергії. Дійсно, летальна доза для ссавців складає близько 10 Гр (1 000 рад). Поглинута при цьому тканинами й органами енергія могла б підвищити температуру тіла всього на тисячні частки градуса. Ясно, що таке підвищення температури не може викликати настільки вираженого ефекту руйнування; у той же час безпосередньо прямі порушення в хімічних зв'язках біологічних молекул у клітинах і тканинах, що виникають слідом за опроміненням, незначні.

У зв'язку з зазначеними обставинами в даний час висувається гіпотеза про можливість існування в клітинах ланцюгових автокаталітичних реакцій, які підсилюють первинну дію опромінення.

Поява в клітинах позитивних зворотних зв'язків підтримується незалежно від існування причини їх виникнення.

Процеси взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною клітин приводять до утворення в клітинах іонізованих і збуджених атомів й молекул, які тривалий час взаємодіють між собою і з різними молекулярними системами, даючи початок хімічно активним центрам (вільні радикали, іони, іон - радикали й ін.). У цей же період можливе виникнення розривів зв'язків у молекулах як за рахунок безпосередньої взаємодії з іонізуючим агентом, так і за рахунок внутрішньої міжмолекулярної передачі енергії порушення.

Надалі мають місце реакції хімічно активних речовин з різними біологічними структурами, при яких відзначається як деструкція, так і утворення нових не властивих для організму сполук.

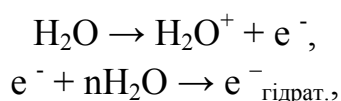
Наступні етапи розвитку променевої хвороби проявляються в порушенні обміну речовин у біологічних системах із зміною відповідних функцій.

Явища, що відбуваються на початкових фізико-хімічних етапах променевого впливу, прийнято називати первинними або пусковими, оскільки саме вони визначають весь подальший хід розвитку променевих ускладнень.

3.8.2. Первинні процеси дії іонізуючих випромінювань

При опроміненні біологічних об'єктів, які містять воду, що знаходиться частково у вільному стані, а частково входить до складу органел відповідних біологічних систем, прийнято вважати, що 50% поглиненої дози в пересічній клітині приходить на воду, інші 50% на її органели і розчинені речовини. Відповідно до локалізації поглиненої енергії (у воді або в основній речовині) можна говорити про пряму і непряму дію іонізуючого випромінювання.

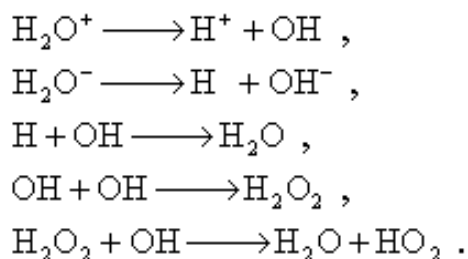
При взаємодії іонізуючого випромінювання з водою в кінцевому підсумку відбувається вибивання електронів з молекул води з утворенням так званих молекулярних іонів, що несуть позитивний і негативний заряд. Схематично цей процес можна подати в такий спосіб:



де $e^-_{\text{гідрат.}}$ – гідратований електрон.

В більшості випадків електрони, які виникають в першій реакції, стають гідратованими, тобто оточеними нейтральними молекулами води. Гідратований електрон є однією із головних відновних форм в опромінених водних розчинах.

Утворені іони води у свою чергу розпадаються з виникненням цілого ряду радикалів, які також взаємодіють між собою:



Вважається, що основний ефект променевого впливу на водні розчини в біологічних системах обумовлений такими радикалами, як H^+ , OH^- і особливо H_3O^+ . Останній радикал має високу окисну здатність.

Вихід цього радикала зменшується пропорційно падінню парціального тиску кисню. Цим пояснюється кисневий ефект опромінення, суть якого полягає в тому, що при зниженні концентрації кисню в клітинах в період опромінення зменшується ефект променевого впливу. Кисневий ефект відсутній при опроміненні біологічних об'єктів нейтронами.

При опроміненні води важкими частинками іонізаційні ефекти в клітинах досить інтенсивні. Це є причиною локального сполучення радикалів з утворенням H_2 і H_2O_2 . При опроміненні електронами й гамма-квантами води, яка міститься в клітинах, спостерігається досить низька густина іонізації. Це призводить до зростання швидкості дифузії радикалів з утворенням HO_2 , H_2^+ і O^- .

В дуже чистій воді не відбувається розкладання молекул під дією гамма-квантів і рентгенівського випромінювання. В цьому випадку спостерігається стійка рівновага швидкості дисоціації й рекомбінації.

3.8.3. Деякі заходи захисту від зовнішнього і внутрішнього опромінення

Як уже відзначалося, біологічний вплив різних видів випромінювання є неоднозначним, тобто та сама поглинена доза гамма - й альфа - випромінювання призводить до різного біологічного ефекту. З метою відповідної стандартизації наслідків впливу різних видів випромінювання за їх біологічною ефективністю введено поняття "*відносної біологічної ефективності*" випромінювання й еквівалентної дози опромінення, одиницею якої є зіверт (Зв).

Характер радіаційного впливу на живий організм визначається не лише видом випромінювання, але й тим, чи було опромінення зовнішнім або внутрішнім.

Радіоактивні речовини можуть знаходитися поза організмом і опромінювати його зовні; у цьому випадку говорять про зовнішнє опромінення. Якщо ж вони є у повітрі, яким дихає людина, або у їжі чи воді і попадають усередину організму, то відбувається внутрішнє опромінення тканин. В середньому приблизно дві третини ефективної еквівалентної дози опромінення, яке людина одержує від природних джерел радіації, надходить від радіоактивних речовин, що потрапили в організм із їжею, водою або повітрям.

Перш ніж потрапити в організм людини радіоактивні речовини проходять по складних маршрутах у навколишньому середовищі і це приходить враховувати при оцінюванні доз опромінення, отриманих від якого-небудь джерела. Радіоактивні речовини, що випадають на поверхню землі, включаються в біологічний кругообіг речовин, насамперед через рослини. Серед різних продуктів поділу особливо велике значення має включення в біологічний кругообіг речовин радіонуклідів стронцію і насамперед ^{90}Sr , що має тривалий період напіврозпаду. При будь-якому способі попадання в організм стронцій міцно фіксується в ньому і дуже повільно виводиться.

Одним з істотних бар'єрів, які перешкоджають включенню продуктів поділу в біологічний цикл, є ґрунт, що їх зв'язує. На відміну від більшості продуктів поділу ^{90}Sr порівняно легко зв'язується з катіонами нейтральних солей, що полегшує його надходження в рослини і нагромадження у вирощеному врожаї.

З метою скорочення надходження ^{90}Sr і деяких інших радіонуклідів в організм людини і тварин необхідно знижувати інтенсивність їх

залучення в біологічний кругообіг через рослини. Оскільки ^{90}Sr концентрується, як правило, у верхньому шарі ґрунту товщиною близько 5 см (до 70% - 80%), його можна перевести глибокою оранкою в нижні шари ґрунтового шару, до яких не доходить коренева система рослин. На глибині 25-30 см він не буде сильно впливати на життя рослин. Необхідно відзначити також, що застосування деяких агротехнічних заходів, таких, як внесення в ґрунт органічних добрив суттєво знижує надходження в рослини ^{90}Sr .

Необхідно також вжити заходів, що запобігають надходження в організм радіоактивних речовин із харчовими продуктами і водою. Запаси харчових продуктів і води слід зберігати в закритих - водонепроникних ємностях. Якщо запаси продуктів виявилися забрудненими і виникне необхідність споживання забруднених продуктів, то їх необхідно піддати дезактивації. Наприклад, достатньо свіжі фрукти й овочі обмити водою або зняти з них шкірку. Погано дезактивуються продукти, які мають пористу поверхню, вони підлягають знищенню або тривалому відлежуванню. Молоко від корів, що знаходяться в зоні радіоактивного забруднення, у зв'язку з наявністю в ньому радіоактивного йоду, можливо, виявиться непридатним для вживання в їжу, тому що радіоактивність молока може зберігатися протягом декількох тижнів.

При забрудненні водою радіоактивні речовини можуть надходити в організм людини завдяки біологічним ланцюжкам вода - водорості, планктон - риба - людина, якщо водоюма безпосередньо служить для питного водопостачання, то по ланцюжку вода - людина. На водопровідних станціях питна вода, яка збирається в підземних резервуарах, може бути очищена від радіоактивних речовин шляхом осадження колоїдних частинок з наступною фільтрацією. Питна вода, одержана з підземних криниць або збережена в герметичних ємностях, звичайно не піддається забрудненню радіоактивними речовинами.

Серед заходів щодо скорочення надходження радіоактивних речовин в організм людини важливе місце приділяється використанню засобів захисту органів дихання. Для цієї мети придатні в першу чергу респіратори різних типів (Р-2, Р-2д, "Пелюсток", "Астра" і інші). При відсутності респіраторів можуть бути використані протигази або найпростіші засоби захисту органів дихання, такі, як протипилова маска, ватно-марлева пов'язка й інші. Застосовуються ці засоби в період випадання радіоактивних опадів і протягом ще декількох наступних діб, доки

радіоактивні речовини можуть попадати в повітря у результаті вторинного пилоутворення, маючи при цьому ще досить високу активність.

Основними правилами, які визначають характер захисту від γ – випромінювання на забрудненій території є:

- Потужність дози γ - випромінювання найбільш висока на початку після випадання радіоактивних опадів, тому захист від γ – випромінювання необхідно здійснювати буквально з першої години, навіть з перших хвилин випадання радіоактивних опадів. Початок випадання виявляється різким підвищенням рівня радіації;
- Перебування в будь-якому будинку або споруді знижує дозу γ -опромінення на величину коефіцієнта ослаблення γ -випромінювання будинком або спорудою;
- Внаслідок того, що потужність дози γ - випромінювання знижується швидше на початку забруднення, укриття людини в спорудах з відомим коефіцієнтом ослаблення має бути по можливості тривалим.

У першу добу після випадання радіоактивних опадів укриття рятує людину від дії випромінювання в значно більшій мірі, ніж у другу і тим більше в наступну добу.

На підставі цих правил можна зробити важливий висновок:
для надійного захисту людини від зовнішнього γ -випромінювання на забрудненій території доцільно знати, що найвища загроза опромінення існує лише в перші години після забруднення території. Ці перші години слід перебувати в приміщеннях з найвищим коефіцієнтом захисту.

3.8.4. Розрахунок захисту і захисні матеріали

Робота з радіоактивними речовинами повинна виконуватися в окремих спеціально обладнаних приміщеннях. Для роботи з газоподібними речовинами використовуються бокси (шафи) із вмонтованими в них гумовими рукавичками або механічними маніпуляторами. Такі бокси повинні мати закриту систему вентиляції. Роботи з відкритими джерелами (наприклад, радіоактивними пробами ґрунту і т.п.) також проводять у боксах, або використовують індивідуальні захисні засоби, такі як протигази, гумові рукавички і т.п.

Джерела великої активності, рівні дози яких перевищують допустиму межу дози, закривають захисними екранами. Вибір матеріалу і товщини захисного екрана залежить від виду випромінювання, його енергії й активності джерела.

Найбільш розповсюдженим методом розрахунку захисту від зовнішнього опромінення є розрахунок необхідної кратності ослаблення.

Необхідна кратність ослаблення $K_{необх}$ визначається відношенням дози випромінювання у відповідній точці до ліміту дози (ЛД) і показує у скільки разів необхідно понизити рівень радіації за допомогою захисних засобів щоб забезпечити безпечні умови праці:

$$K_{необх} = \frac{f \cdot X}{ЛД}, \quad (3.7.4.1)$$

де X - експозиційна доза, P ; $ЛД$ - ліміт дози (задається НРБУ - 97), мЗв;
 $f = 9.3$ мЗв/Р – нормувальний коефіцієнт.

Знаючи необхідну кратність ослаблення, можна розрахувати необхідний захист. Зупинимося в першу чергу на розрахунку захисту від γ -випромінювання, тому що закриті γ -джерела знайшли широке застосування в науці і техніці. Ослаблення інтенсивності γ -випромінювання (вузького пучка) у речовині відбувається за експонентним законом Бугера

$$I_d = I_0 e^{-\mu d}, \quad (3.7.4.2)$$

де I_0 - інтенсивність γ - випромінювання, виміряна приладом при відсутності захисного екрана; I_d - інтенсивність γ -випромінювання при наявності захисного екрана товщиною d см; μ - лінійний коефіцієнт ослаблення γ -променів, см^{-1} , що характеризує відносну зміну інтенсивності випромінювання на одиницю товщини захисного екрана.

Логарифмуючи вираз (3.7.4.2), одержуємо формулу для визначення лінійного коефіцієнта ослаблення.

$$\mu = \left(\ln \frac{I_0}{I_d} \right) \frac{1}{d}. \quad (3.7.4.3)$$

Відношення $K = I_0/I_d$ називають кратністю ослаблення, що у даному випадку показує у скільки разів послаблюється інтенсивність потоку γ - випромінювання захисним матеріалом товщиною d .

Звичайно в довідниках приводять значення масових коефіцієнтів ослаблення різних речовин. Лінійний коефіцієнт ослаблення μ пов'язаний з масовим коефіцієнтом ослаблення μ_l співвідношенням.

$$\mu_l = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{M^2}{K^2} \right], \quad (3.7.4.4)$$

Врахувавши всі ці зауваження легко розрахувати товщину захисту для вибраного матеріалу

$$d = \frac{\ln K_{\text{необх}}}{\mu_l \rho} \quad (\text{м}). \quad (3.7.4.5)$$

Користуючись виразом (3.7.4.5), можна визначити товщину матеріалу, що забезпечує ослаблення інтенсивності вдвічі - шар половинного ослаблення:

$$d_{0,5} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \quad (\text{м}), \quad (3.7.4.6)$$

і в десять разів – товщина шару десятикратного ослаблення

$$d_{0,1} = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2,3}{\mu} \quad (\text{м}). \quad (3.7.4.7)$$

Якщо виходити з довжини максимального пробігу заряджених частинок в тому або іншому матеріалі, то товщина шару поглинання може виявитись дещо більшою за розраховану. Так, шар матеріалу товщиною 0,2 мм повністю затримує α - випромінювання.

Пробіг a - частинок у будь-якій речовині розраховується за такою емпіричною формулою

$$L_{\text{реч.}} = \frac{1,1 \cdot 10^{-4}}{\rho_{\text{реч.}}} \cdot \sqrt{A_{\text{реч.}} \cdot E^3} \quad (\text{см}) \quad (3.7.4.8)$$

де $A_{\text{реч.}}$ - атомна маса речовини; $\rho_{\text{реч.}}$ - густина речовини, г/см³; E – енергія альфа - випромінювання в МеВ.

Для захисту від α - випромінювання достатній шар повітря в кілька сантиметрів або екран з плексигласу чи скла товщиною в кілька міліметрів.

Пробіг α - частинок у повітрі розраховується за емпіричною формулою:

$$L_{\text{нов.}} = K_1 E^{\frac{3}{2}} = K_2 V^3 \quad (\text{см}), \quad (3.7.4.9)$$

де K_1 - коефіцієнт, що залежить від температури і тиску; K_2 – коефіцієнт, рівний $9,67 \cdot 10^{-28}$; E – енергія α -частинок, МеВ; V – швидкість α -частинок, см/с.

Для поглинання β - випромінювання необхідний шар води або пластмаси товщиною не менше 15 мм. Якщо ж в якості поглинаючої речовини використовується речовина з вищим атомним номером, то товщина шару поглинання зменшується.

Для роботи з β - випромінюванням необхідно передбачити захист безпосередньо від β - частинок і захист від гальмового випромінювання, яке виникає при гальмуванні β - частинок у захисному екрані. Гальмівне випромінювання є квантами енергії, аналогічними до γ - квантів.

Захист від β - частинок здійснюється з допомогою комбінованих екранів. У такому екрані з боку джерела розташовують шар матеріалу з малою атомною масою (плексиглас, карболіт і ін.); це дає можливість знизити енергію квантів гальмівного випромінювання. Товщина цього шару повинна відповідати довжині максимального пробігу β - частинок у даному матеріалі. За ним розміщується шар матеріалу з великою атомною масою, що забезпечує ослаблення наведеного гальмівного випромінювання.

Дані про максимальний пробіг β - частинок різної енергії в повітрі, воді (або біологічній тканині) і алюмінії наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Речовина	Енергія бета-частинок у MeV					
	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0
Повітря, м	0,13	0,75	1,6	3,9	8,7	17,8
Вода, мм	0,14	0,64	1,8	4,4	9,8	20,6
Алюміній, мм	0,07	0,3	0,84	2,06	4,6	9,84

Максимальний пробіг β - частинок з найбільшою енергією в межах від 0.5 до 20 MeV розраховують за емпіричною формулою:

$$L_{\text{реч.}} = \frac{0,53 \cdot E_{\text{max}} - 0,26}{\rho_{\text{реч.}}}, \quad (3.7.4.9)$$

де E_{max} - максимальна енергія β - частинок, MeV; $\rho_{\text{реч.}}$ - густина речовини, г/см³.

В першому наближенні можна вважати, що в повітрі максимальний пробіг β - частинок $L = 0,41E_{\text{макс}}$ [см], у воді (або біологічній тканині) - $L = 5E_{\text{макс}}$ [мм], в алюмінії - $L = 2E_{\text{макс}}$ [мм].

Ослаблення потоку β - частинок на більшій частині пробігу в речовині має експонентний характер

$$I_d = I_0 e^{-\mu d}, \quad (3.7.4.10)$$

де I_0 - потік β - частинок при відсутності захисного екрана, частинок/с; I_d - потік β - частинок при наявності захисного екрана товщиною d см; μ - лінійний коефіцієнт ослаблення β - випромінювання в речовині захисного екрана, см⁻¹.

Нейтрони й γ - випромінювання не мають певної довжини вільного пробігу. Залежність між товщиною шару поглинання й інтенсивністю випромінювання тут має логарифмічний характер. При будь-якій товщині поглинання у цьому випадку досягається лише часткове зниження інтенсивності.

Для захисту від нейтронного випромінювання застосовують різні матеріали в залежності від його енергії. Нейтрони із енергією більшою за 0.5 MeV добре поглинаються в результаті процесів непружного

розсіювання залізом. Нейтрони з енергією меншою 0.5 MeV ефективно поглинаються захисним екраном, що містить водень (вода, парафін), а також берилій або графіт. Найбільш ефективно поглинають теплові нейтрони кадмій, бор і залізо. Процес захоплення теплових нейтронів супроводжується випускненням γ - випромінювання. Для комбінованого захисту від нейтронного і γ - випромінювання застосовують шарові екрани з важких і легких матеріалів.

На підставі розрахункових і експериментальних даних створені таблиці для визначення товщини захисту від γ - випромінювання з різних матеріалів.

Для захисту від γ - випромінювання використовують свинець, бетон, залізо, воду, вольфрам, збіднений уран і осмій. Захист із бетону ($\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$) міцний, дешевий, але дуже громіздкий і важкий. Свинець ($\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$) ефективний, але має погані механічні властивості. Свинець використовують для виготовлення контейнерів (в комбінації із залізом) для транспортування різних ізотопів. Вольфрам ($\rho = 19.3 \text{ г/см}^3$) і збіднений уран ($\rho = 18.7 \text{ г/см}^3$) використовують в особливо відповідальних пристроях для забезпечення мінімальної ваги захисту.

Як приклад у табл. 6 наведені дані, що дозволяють визначити товщину захисту із свинцю, заліза й бетону для γ - випромінювання різних енергій.

Таблиця 6

I_0/I_a	Свинець ($\rho=11,34 \text{ г/см}^3$)			Залізо ($\rho = 7,89 \text{ г/см}^3$)			Бетон ($\rho=2,3 \text{ г/см}$)		
	1MeV	2 MeV	3MeV	1MeV	2MeV	3 MeV	1 MeV	2 MeV	3 MeV
2	1,3	2,0	2,1	3,3	3,9	4,4	12,9	14,1	15,3
10	3,8	5,9	6,5	8,5	11,0	12,2	29,9	37,7	43,4
10^2	7,0	11,3	12,2	14,5	19,5	22,1	50,5	65,7	77,5
10^3	10,2	16,5	18,0	20,5	27,5	31,7	70,4	92,7	110,9
10^4	13,3	21,3	23,5	26,0	35,5	40,9	89,2	118,6	143,2
10^5	16,5	26,2	28,9	31,5	43,2	50,0	106,8	144,4	173,8
10^6	19,5	31,0	34,3	37,0	50,6	58,8	124,4	171,4	205,4

Більшість джерел γ -випромінювання, маючи дискретний лінійчастий характер γ -спектра, випромінюють від одної до кількох

десятків окремих ліній. Так в γ -спектрі ^{226}Ra , який перебуває у радіоактивній рівновазі з продуктами свого розпаду, нараховується біля 50 характерних ліній, із них відмічається шість найбільш інтенсивних з інтервалом енергії від 0,3 до 1,76 МеВ. Гамма-джерела мають як правило невеликі розміри d . На відстанях $r > 4d$ будь яке гамма-джерело можна вважати точковим. Крім того, точкові гамма-джерела відносяться до ізотропних джерел, які випускають гамма-кванти з однаковою імовірністю у всіх напрямках.

Радіоактивні речовини розміщують у герметичні металеві ампули, стінки яких певним чином змінюють спектр гамма-випромінювання. Стінки ампул, а також матеріали, які використовуються для ампул, поглинають частину гамма-ліній і тому називаються фільтрами.

Потужність експозиційної дози в повітрі від точкового ізотропного джерела характеризується іонізаційною гамма-сталого $K\gamma$. Вона чисельно дорівнює потужності експозиційної дози (Р/год) нефільтрованого гамма-випромінювання від точкового ізотропного джерела активністю 1 мКі на відстані 1 см від нього. Величину $K\gamma$ виражають в одиницях $\frac{P \cdot \text{см}^2}{\text{год} \cdot \text{мКі}}$. Її величину вимірюють експериментально і приводять в довідниках (таблиця 7).

Таблиця 7

Речовина	$T_{1/2}$	$K\gamma, \frac{P \cdot \text{см}^2}{\text{год} \cdot \text{мКі}}$	γ -еквівалент 1 мКі речовини, мг-екв. Ra
^{24}Na	14,9 роки	18,55	2,20
^{60}Co	5,27 роки	12,93	1,54
^{75}Se	127 діб	1,84	0,23
^{134}Cs	2,2 роки	8,58	1,02
^{226}Ra	1622 роки	9,36	1,11

Фільтрація γ -випромінювання зменшує $K\gamma$ до $K\gamma(\delta)$, де δ – товщина фільтра. В розрахунках зміна величини $K\gamma$ враховується за допомогою коефіцієнта χ , меншого за одиницю, тобто $K\gamma(\delta) = \chi K\gamma$.

Для свинцевих, залізних і алюмінієвих ампул товщиною 0,1 – 0,3 см значення χ перебуває в межах від 0,85 до 0,98 для енергій гамма-квантів більших за 1 МеВ.

Величина K_γ значно спрощує розрахунки експозиційної потужності дози $P(R)$ на відстані R від незахищеного точкового гамма-джерела. Оскільки інтенсивність гамма – джерела пропорційна $1/R$, то

$$P(R) = A \cdot K_\gamma / R^2, \quad (3.7.4.11)$$

де $P(R)$ – експозиційна доза, Р/год; A – активність гамма-джерела, мКі; R – відстань до гамма-джерела, см.

В дозиметрії гамма-джерела часто порівнюють з іонізацією повітря. Дві радіоактивні речовини, які при однакових умовах створюють однакові потужності експозиційної дози, мають однаковий γ -еквівалент. Гамма-еквівалент вимірюють в міліграм - еквівалентах радію (мг-екв Ra). Ця одиниця дорівнює такій кількості радіоактивної речовини, γ – випромінювання якої при даній фільтрації і тотожних умовах створює таку ж потужність експозиційної дози, що й 1 мг-екв радію. Потужність експозиційної дози в 1 мг-екв. Ra на відстані 1 см дорівнює 8,4 Р/год.

Гамма-еквівалент речовини m (мг-екв Ra) пов'язаний з її активністю A (мКі) і величиною K_γ (Р·см²/(год.мКі)) співвідношенням

$$m = A \cdot K_\gamma / 8,4. \quad (3.7.4.12)$$

Замінімо у формулі (3.7.4.11) $A \cdot K_\gamma$ на $8,4m$, одержимо

$$P(R) = 8,4m / R^2, \quad (3.7.4.13)$$

де $P(R)$ – потужність експозиційної дози, Р/год; m – гамма-еквівалент речовини, мг-екв Ra; R – відстань до джерела, см.

ПРИКЛАД. На якій відстані R від точкового джерела ^{60}Co масою 10^{-6} г за шестигодинний робочий день доза опромінення не перевищить гранично допустимої дози (ГДП)? Розрахувати також гамма – еквівалент цього джерела.

Кількість атомів у 10^{-6} г ^{60}Co буде дорівнювати

$$N = \frac{m}{\mu} N_a = \frac{10^{-9}}{60 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 1,0 \cdot 10^{16} \text{ атомів.}$$

Активність кобальту, період напіврозпаду якого дорівнює $T_{1/2} = 5,27$ років, розраховується так

$$A = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2 \cdot N}{T_{1/2}} = \frac{0,693 \cdot 1,0 \cdot 10^{16}}{5,27 \cdot 3,15 \cdot 10^7 \cdot 3,7 \cdot 10^7} = 1,13 \text{ мКі,}$$

Враховано, що $3,7 \cdot 10^7$ відповідає розмірності 1 мКі.

Гранично допустима потужність дози при шестигодинному робочому дні для кобальту – $60 \text{ Р}_{\text{г.д}} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ бер/год.}$

Довідковий матеріал

Частина довідкового матеріалу взята із посібника, складеного Смоленською Державною Медичною Академією (СДМА) за редакцією Литвинова А.В., решта з НРБУ - 97

1. Орієнтовні норми радіаційної безпеки людей

Квартальний ліміт дози	30 мЗв - 3 бер - 3,4 Р
Річний ліміт дози	50 мЗв - 5 бер - 5,7 Р
Аварійна доза	100 мЗв - 10 бер - 11,4 Р
Катастрофічна доза	259 мЗв - 25 бер - 28,4 Р
Критична доза	1,0 Зв - 100 бер - 113,6 Р
Напівлетальна доза	4,0 Зв - 400 бер - 454,5 Р
Летальна доза	7,0 Зв - 700 бер - 795,4 Р

2. Важливо знати, що :

- 4,5 Зв, або 450 бер – важкий ступінь променевої хвороби (ПХ);
- 1,0 Зв, або 100 бер - нижній рівень розвитку променевої хвороби;
- 0,75 Зв, або 75 бер – короточасні незначні зміни складу крові;
- 0,3 Зв, або 30 бер – опромінення при рентгеноскопії шлунка (місцеве);
- 3,7 мЗв, або 370 мбер – опромінення при флюорографії;
- 0,25 мЗв, або 25 бер - допустиме аварійне опромінення персоналу (разове);
- 0,1 мЗв, або 10 бер - допустиме аварійне опромінення населення (разове);
- 0,05 мЗв, або 5 бер - допустиме опромінення персоналу в нормальних умовах за один рік;
- 0,03 мЗв, або 3 бер – опромінення при рентгенографії зубів (місцеве);

- 5 мЗв, або 500 мбер - допустиме опромінення населення за один рік;
- 0,01 мЗв, або 100 мбер - фонове опромінення за один рік;
- 5 мкЗв, або 0,5 мбер – перегляд програм ТБ протягом 3 годин за один день;
- 2,5 пЗв, або 0,25 мкбер/рік - на відстані 2,5 м від екрану;
- 10 пЗв, або 1 мкбер/рік - на відстані 50 см. від екрана (монітор комп'ютера);
- 10 пЗв, або 1 мкбер - перегляд однієї хокейної гри по ТБ;
- 1 пЗв, або 0,1 мкбер - політ на літаку на відстань 2400 км;
- (0,14 – 0,15)Зв, або (14 – 15) бер – пересічна людина отримує від всіх джерел опромінення протягом всього життя.

3. Перевідні коефіцієнти одиниць вимірювання радіоактивності:

- 1 Бк = 1 рзп/с;
- $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ рзп/с} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$;
- $1 \text{ мКи} = 10^{-3} \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ Бк}$;
- $1 \text{ мкКи} = 10^{-6} \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ Бк}$;
- $1 \text{ нКи} = 10^{-9} \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10 \text{ Бк}$;
- $1 \text{ пКи} = 10^{-12} \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Бк}$;
- $1 \text{ Ки/км}^2 = 1 \text{ Кл/кг}$;
- $1 \text{ Р} = 0,88 \text{ рад} = 0,88 \text{ бер}$;
- $1 \text{ бер} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}$;
- $1 \text{ рад} = 0,001 \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр}$;
- $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$;
- $1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$;
- $1 \text{ Р/Год} = 7,166667 \cdot 10^{-8} \text{ А/кг}$;
- $1 \text{ Р/хв} = 4,31 \cdot 10^{-6} \text{ А/кг}$;
- $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}$;
- $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$;
- Ки – кюрі;
- мки - мілікюрі (0,001 Ки);
- мкКи - мікрокюрі (0,000001 Ки);
- нКи - нанокюрі (0,000000001 Ки);
- пКи - пікокюрі (0,000000000001 Ки);

- Бк – Беккерель;
- Гр – Грей;
- Р – Рентген;
- бер - біологічний еквівалент рентгена;
- рад – позасистемна одиниця потужності поглиненої дози;
- А – ампер;
- Зв - Зіверт

4. Середнє опромінення людини на землі, мЗв/рік

Природні джерела	2
У тому числі:	
внутрішнє опромінення земного походження	1,325
зовнішнє опромінення земного походження	0,35
внутрішнє опромінення за рахунок космічних променів	0,015
Зовнішнє опромінення за рахунок космічних променів	0,35
Техногенні джерела	0,4
У тому числі:	
медичного призначення .	0,4
радіоактивні викиди	0,02
ядерна енергетика .	0.001
Разом:	2,5

5. Середня величина опромінення населення колишнього СРСР (1991р.) мЗв/рік

Природний і технологічний фон	2,37
У тому числі:	
космічне випромінювання .	0,32
природні радіонукліди:	
зовнішнє опромінення	0,48
внутрішнє опромінення .	0,37
радон і торон	1,20
Техногенні джерела. В тому числі:	
медичного призначення	0,69
ядерна енергетика .	0,0002
аварія на Чорнобильській АЕС	0,024
вугільна енергетика	0,02
професійне опромінення	0,006
ядерні випробування	0,02
інші види опромінення	0,05
Разом	4,2

6. Потужності експозиційної дози іонізуючого випромінювання в салоні пасажирського літака

Ту - 154 - Б2		ІЛ - 86	
Висота, м	мкР/год	Висота, м	мкР/год
11600,0	234,0	-	-
11000,0	193,0	10000,0	143,0
9000,0	115,0	9000,0	123,0
8000,0	89,0	8000,0	89,0
7000,0	65,0	7000,0	62,0
6000,0	44,0	6000,0	46,0
5000,0	34,0	5000,0	31,0

4000,0	28,0	4000,0	21,0
3000,0	16,0	3000,0	16,0
2000,0	13,0	2000,0	11,8
1000,0	7,0	1000,0	7,0
0,0	10,0	0,0	9,0

7. Місця нагромадження радіонуклідів в організмі людини

Щитовидна залоза	^{129}I , ^{131}I , ^{99}Tc .
Легені	^{85}Kr , ^{238}Pt , ^{239}Pt , ^{222}Rd , ^{233}U , ^{133}Xe , ^{135}Xe .
Печінка	^{137}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{239}Ne , ^{238}Pt , ^{239}Pt , ^{241}Pt .
Кістки	^{140}Ba , ^{14}C , ^{154}Er , ^{155}Er , ^{32}P , ^{238}Pt , ^{239}Pt , ^{241}Pt , ^{147}Pr , ^{226}Ra , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{234}Th , ^{233}U , ^{90}Y , ^{65}Zn .
Селезінка	^{210}Po .
Нирки	^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{106}Rt .
Яєчники	^{140}Ba , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{131}I , ^{85}Kr , ^{239}Pt , ^{40}K , ^{42}K , ^{106}Rt , ^{90}Y , ^{65}Zn .
М'язи	^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{154}Er , ^{155}Er , ^{40}K , ^{42}K .
Шкіра .	^{35}S

8. Рівні радіоактивності деяких рідин

Типові скиди води АЕС	$3,7 \cdot 10^{-2} - 3,7 \cdot 10^{-1}$
Водопровідна вода	0,74
Річкова вода	0,37 - 3,7
4 % пиво	4,81
Океанська вода	12,95
Віскі	44,4
Молоко	51,8
Соняшникова олія	181,3

9. Гранично допустимі вмісти деяких радіонуклідів в тілі людини (мкКі)

⁹⁰ Sr: кістки	2,0
легені	0,8
¹³⁷ Cs: все тіло	33
легені	2
¹³¹ I: щитовидна залоза	0,07
легені	2,8

10. Наслідки опромінення людини

Летальні дози, Гр (нестохастичні ефекти):	
100	Смерть через кілька годин або діб (руйнування мозку)
10 - 50	Смерть через 1 - 2 тижні (внутрішні крововиливи)
3 - 5	50 % опромінених вмирають протягом 1 - 2 місяців (руйнування кісткового мозку)
Імовірне оцінювання для дози 1 Гр (стохастичні ефекти):	
Смерть от лейкемії	2 люд. із 1 тис. опромінених осіб
Рак щитовидної залози.	10 осіб із 1 тис. опромінених осіб
Рак молочної залози	10 осіб із 1 тис. опромінених жінок
Рак легенів	2 - 3 люд. із 1 тис. опромінених осіб

Народження дитини із спадковими вадами (одне покоління):	
домінантні и рецесивні мутації .	1,5 осіб на 1 тис. народжених
хромосомні аберації	0,24 особи на 1 тис. народжених
Інші	0,45 осіб на 1 тис. народжених
Без помітних змін	0,25 бер, або 2,5 мЗв
Порогові ефекти виникають при опроміненні всього організму дозою більшою за 10 бер/рік	

11. Радіоізотопний склад Чорнобильського викиду

Радіо-нуклід	Було всього радіоактивності в реакторі, 10^{18} Бк	Відсоток викинутої активності на 5.5.86 г.	Попало в навколишнє середовище 10^{16} Бк		Період напіврозпаду нукліда
^{85}Kr	0,003	100	3,3	0,26	10,72 години
^{133}Xe	1,7	100	170	246	5,25 діб
^{131}I	1,3	50	65	142	8,05 діб
^{132}Te	0,32	35	11	9,8	3,26 діб
^{137}Cs	0,29	30	8,7	27000	30 років
^{134}Cs	0,19	25	4,7	980	2,06 років
^{89}Sr	2,0	10	20	186	50,5 діб
^{90}Sr	0,19	10	2	4000	29,12 років
^{95}Zn	4,4	8	35	440	64 діб
^{103}Rt	4,1	8	53	275	39,3 діб
^{106}Rt	2,1	8	17	1370	368 діб
^{140}Ba	2,9	15	43,5	160	12,7 діб

^{144}Ce	3,2	8	25,5	2160	284 діб
^{238}Pt	0,001	8	0,008	125	87,74 роки
^{239}Pt	0,0008	8	0,006	26400	24390 роки
^{240}Pt	0,001	8	0,008	9470	6537 роки
^{241}Pt	0,17	8	1,4	3665	14,4 роки

12. Розподіл ^{131}I і ^{137}Cs в різних районах земної кулі після аварії на ЧАЕС

Регіон	Відсоток від активності на території земної кулі	
	^{131}I	^{137}Cs
Республіка Білорусія	19	11
Північна частина України	20	6
Центральний економічний район Росії	12	7
Інша частина території європейської частини колишнього СРСР	14	18
Азіатська частина колишнього СРСР	1	2
Колишній СРСР в цілому	66	44
Європа (без колишнього СРСР)	28	38
Інша частина світу	6	18

13. Тимчасові допустимі рівні вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr в харчових продуктах і питній воді, установлені після аварії на Чорнобильській АЕС (1991р.)

	^{137}Cs	^{90}Sr
Вода питна, Кі/л .	$5,0 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$
Молоко и молокопродукти, Кі/л .	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$

Молоко сухе, Кі/кг	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$
М'ясо, птиця, яйця, Кі/кг .	$2,0 \cdot 10^{-8}$	-
Корнеплоди, овочі, Кі/кг .	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
Хліб, крупи, цукор, Кі/кг .	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
Гриби, ягоди, чай, Кі/кг	$2,0 \cdot 10^{-7}$	-
Дитяче харчування, Кі/кг .	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$

14. Граничні допустимі дози опромінення, схвалені комісією ядерного регулювання США (мЗв/рік)

Загальна ефективна еквівалентна доза опромінення персоналу (сумарна доза внутрішнього й зовнішнього опромінення)	5
Загальна ефективна еквівалентна доза опромінення населення (сумарна доза внутрішнього й зовнішнього опромінення)	1
Доза опромінення населення (в окремих випадках за спеціальним дозволом NRC) .	5
Доза опромінення вагітних жінок, плода (протягом всього періоду вагітності)	5
Доза опромінення шахтарів	5
Спеціальні дози опромінення персоналу (понад звичайні дози опромінення; 0,25 Зв - за все життя)	5
Доза опромінення хрусталика ока	150
Доза опромінення шкіряного покриву і кінцівок	500
П'ятидесятирічна доза внутрішнього опромінення окремих органів (для кожного органа)	500

ЗАКОН УКРАЇНИ

Про охорону навколишнього природного середовища

Охорона навколишнього природного середовища, національне використання природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки життєдіяльності людини - невід'ємна умова стійкого економічного й соціального розвитку України.

З цією метою Україна здійснює на своїй території екологічну політику, спрямовану на збереження безпечної для існування живої і неживої природи навколишнього середовища, захисту життя й здоров'я населення від негативного впливу, обумовленого забруднення навколишнього природного середовища, досягнення гармонічної взаємодії суспільства і природи, охорону, раціональне використання й відтворення природних ресурсів.

Дійсний Закон визначає правові, економічні і соціальні основи організації охорони навколишнього природного середовища в інтересах нинішнього і майбутнього поколінь.

Розділ I

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Стаття 1. Задачі законодавства про охорону навколишнього природного середовища

Завданням законодавства про охорону навколишнього природного середовища є регулювання відносин в області охорони, використання і відтворення природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки, попередження й ліквідації негативного впливу господарської й іншої діяльності на навколишнє природне середовище, збереження природних ресурсів, генетичного фонду живої природи, ландшафтів і інших природних комплексів, унікальних територій і природних об'єктів, пов'язаних із історико-культурною спадщиною.

Стаття 2. Законодавство України про охорону навколишнього природного середовища

Відносини в області охорони навколишнього природного середовища в Україні регулюються дійсним Законом, а також розробленими у відповідності з ним земельним, водним і лісовим законодавством, законодавством про надра, про охорону атмосферного повітря, про охорону і використання рослинного й тваринного світу й іншим спеціальним законодавством.

Стаття 3. Основні принципи охорони навколишнього природного середовища

Основними принципами, охорони навколишнього природного середовища є:

а) пріоритетність вимог екологічної безпеки, обов'язковість дотримання екологічних стандартів, нормативів і лімітів використання природних ресурсів при здійсненні господарської, управлінської й іншої діяльності;

б) гарантування екологічно безпечного середовища для життя і здоров'я людей;

в) упереджений характер заходів з охорони навколишнього природного середовища;

г) екологічний характер матеріального виробництва на основі комплексності рішень у питаннях охорони навколишнього природного середовища, використання й відтворення відновлюваних природних ресурсів, широкого впровадження новітніх технологій;

д) збереження просторової і видової розмаїтості й цілісності природних об'єктів і комплексів;

е) науково обґрунтоване узгодження екологічних, економічних і соціальних інтересів суспільства на основі поєднання міждисциплінарних знань екологічних, соціальних, природних і технічних наук і прогнозування стану навколишнього природного середовища;

є) обов'язковість екологічної експертизи;

ж) гласність і демократизм при прийнятті рішень, реалізація яких впливає на стан навколишнього природного середовища, формування в населення екологічного світогляду;

з) науково обґрунтоване нормування впливу господарської і іншої діяльності на навколишнє природне середовище;

и) безкоштовність загального і платність спеціального використання природних ресурсів для господарської діяльності;

і) стягування збору за забруднення навколишнього природного середовища й погіршення якості природних ресурсів, компенсація збитку, заподіяного порушенням законодавства про охорону навколишнього природного середовища;

ї) вирішування питань охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів з урахуванням ступеня антропогенних змін територій, сукупної дії факторів, негативно впливають на екологічну обстановку;

й) поєднання заходів заохочення й відповідальності в справі охорони навколишнього природного середовища;

к) вирішування проблем охорони навколишнього природного середовища на основі широкого міждержавного співробітництва.

Стаття 4. Право власності на природні ресурси

Природні ресурси України є власністю народу України, що має право на володіння, використання й розпорядження природними багатствами республіки.

У державній власності знаходяться всі землі України, за винятком земель, переданих у колективну й приватну власність.

Повновладдя народу України в області охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів реалізується на основі Конституції України як безпосередньо, шляхом проведення референдумів, так і через республіканські органи державної влади відповідно до законодавства України.

Від імені народу України право розпоряджатися природними ресурсами надано Верховній Раді України.

Стаття 5. Об'єкти правової охорони навколишнього природного середовища

Державній охороні й регулюванню використання на території України підлягають: навколишнє природне середовище як сукупність природних і природно-соціальних умов і процесів, природні ресурси як введені в господарський оборот, так і не використовувані в народному господарстві в даний період (земля, надра, вода, атмосферне повітря,

ліс і інша рослинність, тваринний світ), ландшафти й інші природні комплекси.

Особливій державній охороні підлягають території й об'єкти природно-заповідного фонду України й інші території й об'єкти, визначені відповідно до законодавства України.

Державній охороні від негативного впливу несприятливої екологічної обстановки підлягають також здоров'я й життя людей.

Стаття 6. Державні екологічні програми

З метою проведення ефективної і цілеспрямованої діяльності України з організації і координації заходів щодо охорони навколишнього природного середовища, забезпечення екологічної безпеки, раціонального використання і відтворення природних ресурсів на перспективу розробляються й приймаються державні, республіканські, міждержавні, регіональні, місцеві й інші територіальні програми.

Порядок розробки державних екологічних програм визначається Кабінетом Міністрів України.

Стаття 7. Утворення й виховання в області охорони навколишнього природного середовища

Підвищення екологічної культури суспільства і професійна підготовка фахівців забезпечуються загальним обов'язковим комплексним підходом і вихованням в області охорони навколишнього природного середовища, у тому числі в дошкільних дитячих установах, у системі загальної середньої, професійної і вищої освіти, підвищення кваліфікації й перепідготовки кадрів.

Екологічні знання є обов'язковою кваліфікаційною вимогою для всіх посадових осіб, діяльність яких пов'язана з використанням природних ресурсів і приводить до впливу на стан навколишнього природного середовища.

Спеціально визначені вищі і професійні навчальні заклади здійснюють підготовку фахівців в області охорони навколишнього природного середовища і використання природних ресурсів із врахуванням суспільних потреб.

Стаття 8. Наукові дослідження

В Україні проводяться систематичні комплексні наукові дослідження навколишнього природного середовища і природних ресурсів у цілях розробки наукових основ їхньої охорони і раціонального використання, забезпечення екологічної безпеки.

Координацію й узагальнення результатів цих досліджень здійснюють Академія наук України й Міністерство охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України.

Р о з д і л І І

ЕКОЛОГІЧНІ ПРАВА Й ОБОВ'ЯЗКИ ГРОМАДЯН

Стаття 9. Екологічні права громадян України

Кожен громадянин України має право на:

- а) безпечне для його життя й здоров'я навколишнє природне середовище;
- б) участь в обговоренні проектів законодавчих актів, матеріалів з розміщення, будівництва й реконструкції об'єктів, які можуть негативно впливати на стан навколишнього природного середовища, і внесення пропозицій у державні й господарські органи, установи й організації з цих питань;
- в) участь у розробці і здійсненні заходів щодо охорони навколишнього природного середовища, раціонального й комплексного використання природних ресурсів;
- г) здійснення загального й спеціального використання природних ресурсів;
- д) об'єднання в суспільні природоохоронні формування;
- е) одержання у встановленому порядку повної й достовірної інформації про стан навколишнього природного середовища і його вплив на здоров'я населення;
- є) участь у проведенні суспільної екологічної експертизи;
- ж) одержання екологічної освіти;
- з) подання в суд позовів до державних органів, підприємства, установи, організації й громадян про відшкодування збитку, заподіяного

їхньому здоров'ю і майну внаслідок негативного впливу на навколишнє природне середовище.

Законодавством України можуть бути визначені й інші екологічні права громадян.

Стаття 10. Гарантії екологічних прав громадян

Екологічні права громадян забезпечуються:

а) проведенням широкомасштабних державних заходів з підтримки, відновлення й поліпшення стану навколишнього природного середовища;

б) обов'язком міністерств, відомств, підприємств, установ організацій здійснювати технічні й інші заходи для запобігання шкідливому впливу господарської й іншої діяльності на навколишнє природне середовище, виконувати екологічні вимоги при плануванні, розміщенні продуктивних сил, будівництві й експлуатації народногосподарських об'єктів;

в) участю суспільних об'єднань і громадян у діяльності з охорони навколишнього природного середовища;

г) здійсненням державного й суспільного контролю за дотриманням законодавства про охорону навколишнього природного середовища;

д) компенсацією у встановленому порядку збитку, заподіяного здоров'ю і майну громадян унаслідок порушення законодавства про охорону навколишнього природного середовища;

е) невідворотністю відповідальності за порушення законодавства про охорону навколишнього природного середовища.

Діяльність, що порушує права громадян на безпечне навколишнє природне середовище й інші їх екологічні права, підлягає припиненню в порядку, установленому цим Законом і іншим законодавством України.

Стаття 11. Захист прав громадян України в області охорони навколишнього природного середовища

Україна гарантує своїм громадянам реалізацію екологічних прав, наданих їм законодавством.

Ради, спеціально уповноважені державні органи керування в області охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів, зобов'язані здійснювати всебічну допомогу громадя-

нам у здійсненні природоохоронної діяльності, враховувати їхні пропозиції із поліпшення стану навколишнього природного середовища і раціонального використанню природних ресурсів, залучати громадян до участі у рішенні питань охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів.

Порушені права громадян в області охорони навколишнього природного середовища повинні бути відновлені, а їхній захист здійснюється у судовому порядку відповідно до законодавства України.

Стаття 12. Обов'язки громадян в області охорони навколишнього природного середовища

Громадяни України зобов'язані:

а) берегти природу, охороняти, раціонально використовувати її багатства відповідно до вимог законодавства про охорону навколишнього природного середовища;

б) здійснювати діяльність із дотриманням вимог екологічної безпеки, інших екологічних нормативів і лімітів використання природних ресурсів;

в) не порушувати екологічні права і законні інтереси інших суб'єктів;

г) вносити плату за спеціальне використання природних ресурсів і штрафи за екологічні правопорушення;

д) компенсувати збиток, заподіяний забрудненням і іншими негативними впливами на навколишнє природне середовище.

Громадяни України зобов'язані виконувати й інші обов'язки в області охорони навколишнього природного середовища відповідно до законодавства України.

Розділ III

ПОВНОВАЖЕННЯ РАД В ОБЛАСТІ ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Стаття 13. Компетенція Верховної Ради України в області охорони навколишнього природного середовища

До виняткової компетенції Верховної Ради України в області регулювання відносин по охороні навколишнього природного середовища відповідно до Конституції України відносяться:

а) визначення основних напрямків державної політики в області охорони навколишнього природного середовища;

б) затвердження державних екологічних програм;

в) визначення правових основ регулювання відносин в області охорони навколишнього природного середовища, у тому числі із прийняття рішень про обмеження, призупинення (тимчасово), або припинення діяльності підприємств і об'єктів у випадку порушення ними законодавства про охорону навколишнього природного середовища;

г) визначення повноважень Рад, порядку організації й діяльності органів керування в області охорони навколишнього природного середовища, використання природних ресурсів і забезпечення екологічної безпеки;

д) установлення правового режиму зон надзвичайної екологічної ситуації, статусу постраждалих громадян і оголошення таких зон на території держави.

Верховна Рада України відповідно до Конституції України може приймати до свого розгляду й інші питання охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки.

Стаття 14. Компетенція Верховної Ради Автономної Республіки Крим

Верховна Рада Автономної Республіки Крим в області регулювання відносин з охорони навколишнього природного середовища:

а) визначає порядок організації і діяльності органів керування в області охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів;

б) визначає повноваження Рад в області охорони навколишнього природного середовища і раціонального використання природних ресурсів;

в) забезпечує реалізацію екологічної політики України, екологічних прав громадян;

г) затверджує екологічні програми;

д) організовує вивчення навколишнього природного середовища;

е) створює й визначає статус резервних, у тому числі і валютних, фондів для фінансування програм і інших заходів з охорони навколишнього природного середовища;

є) приймає рішення про організацію територій і об'єктів природно-заповідного фонду місцевого значення й інших територій і об'єктів, які підлягають особливій охороні, установлює додаткові їх категорії;

ж) припиняє господарську діяльність підприємств, установ і організацій, що знаходяться в підпорядкуванні Автономної Республіки Крим, а також обмежує або припиняє (тимчасово) діяльність підприємств, установ і організацій, не підлеглих органам влади Автономної Республіки Крим, у випадку порушення ними законодавства про охорону навколишнього природного середовища;

з) установлює у разі потреби нормативи екологічної безпеки більш суворі, ніж діючі в цілому на території України.

Верховна Рада Автономної Республіки Крим здійснює й інші повноваження, не віднесені законодавством України до компетенції республіканських органів державної влади України.

Стаття 15. Повноваження місцевих Рад в області охорони навколишнього природного середовища

Місцеві Ради несуть відповідальність за стан навколишнього природного середовища на своїй території й у межах своєї компетенції:

а) забезпечують реалізацію екологічної політики України, екологічних прав громадян;

б) дають згоду на розміщення на своїй території підприємств, установ і організацій;

в) затверджують з урахуванням екологічних вимог проекти

планування і забудови населених пунктів, їх генеральні плани й схеми промислових вузлів;

г) видають і скасовують дозвіл на відособлене спеціальне використання природних ресурсів місцевого значення;

д) затверджують місцеві екологічні програми;

е) організовують вивчення навколишнього природного середовища;

є) створюють і визначають статус резервних, у тому числі і валютних, фондів для фінансування програм і інших заходів з охорони навколишнього природного середовища;

ж) організовують у разі потреби проведення екологічної експертизи;

з) забезпечують інформування населення про стан навколишнього природного середовища;

и) організовують роботу з ліквідації екологічних наслідків аварій, залучають до цих робіт підприємства, установи і організації, незалежно від їхнього підпорядкування й форм власності, і громадян;

і) приймають рішення про організацію територій і об'єктів природно-заповідного фонду місцевого значення й інших територій, які підлягають особливій охороні;

ї) здійснюють контроль за дотриманням законодавства про охорону навколишнього природного середовища;

й) припиняють господарську діяльність підприємств, установ і організацій місцевого підпорядкування, а також обмежують або припиняють (тимчасово) діяльність не підлеглих Раді підприємств, установ і організацій у випадку порушення ними законодавства про охорону навколишнього природного середовища;

к) координують діяльність відповідних спеціально уповноважених державних органів керування в області охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів на території місцевої Ради.

Місцеві Ради можуть здійснювати й інші повноваження у відповідності із законодавством України.

Р о з д і л IV

ПОВНОВАЖЕННЯ ОРГАНІВ УПРАВЛІННЯ В ОБЛАСТІ ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Стаття 16. Управління в області охорони навколишнього природного середовища

Управління охороною навколишнього природного середовища полягає в здійсненні в цій галузі функцій спостереження, дослідження, екологічної експертизи, контролю, прогнозування, програмування, інформування й іншої виконавчо - розпорядницької діяльності.

Державне управління в області охорони навколишнього природного середовища здійснюють Кабінет Міністрів України, Ради і їхні виконавчі і розпорядчі органи, а також спеціально уповноважені на те державні органи з охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів і інші державні органи відповідно до законодавства України.

Спеціально уповноваженими державними органами управління в області охорони навколишнього природного середовища і використання природних ресурсів у країні є Міністерство охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України, його органи на місцях і інші державні органи, до компетенції яких законодавством України й Автономної Республіки Крим віднесено здійснення зазначених функцій.

Суспільне управління в області охорони навколишнього природного середовища здійснюється суспільними об'єднаннями й організаціями, якщо така діяльність передбачена їхніми статутами, зареєстрованими відповідно до законодавства України.

Метою керування в області охорони навколишнього природного середовища є реалізація законодавства, контроль за дотриманням вимог екологічної безпеки, забезпечення проведення ефективних і комплексних заходів щодо охорони навколишнього природного середовища, раціональне використання природних ресурсів, досягнення погодженості дій державних і суспільних органів в області охорони навколишнього природного середовища.

Стаття 17. Компетенція Кабінету Міністрів України в області охорони навколишнього природного середовища

Кабінет Міністрів України в області охорони навколишнього природного середовища:

а) здійснює реалізацію визначеної Верховною Радою України екологічної політики;

б) забезпечує розробку державних республіканських, міждержавних і регіональних екологічних програм;

в) координує діяльність міністерств, відомств, інших установ і організацій України в питаннях охорони навколишнього природного середовища;

г) установлює порядок утворення й використання Державного фонду охорони навколишнього природного середовища в складі Державного бюджету України і затверджує перелік природоохоронних заходів;

д) установлює порядок розробки й затвердження екологічних нормативів, лімітів використання природних ресурсів, викидів і скидань забруднюючих речовин в навколишнє природне середовище, розміщення відходів;

е) установлює порядок визначення зборів і їх граничних розмірів за:

- користування природними ресурсами;
- забруднення навколишнього природного середовища;
- розміщення відходів;
- інші види шкідливого впливу на неї.

є) приймає рішення про організацію територій і об'єктів природно-заповідного фонду загальнодержавного значення;

ж) організовує екологічне виховання й екологічне навчання громадян;

з) приймає рішення про призупинення (тимчасово) або припинення діяльності підприємств, установ і організацій, незалежно від форм власності й підпорядкування, у випадку порушення ними законодавства про охорону навколишнього природного середовища;

и) керує зовнішніми зв'язками України в області охорони навколишнього природного середовища.

Кабінет Міністрів України може здійснювати й інші повноваження відповідно до законодавства України.

Стаття 18. Компетенція Уряду Автономної Республіки Крим в області охорони навколишнього природного середовища

Уряд Автономної Республіки Крим в області охорони навколишнього природного середовища на своїй території:

а) здійснює реалізацію законодавства України й Автономної Республіки Крим в області охорони навколишнього природного середовища;

б) організовує розробку екологічних програм;

в) координує діяльність міністерств, відомств, а також підприємств, установ і організацій в Автономній Республіці Крим у питаннях охорони навколишнього природного середовища, незалежно від форм власності й підпорядкування;

г) установлює порядок утворення й використання республіканського фонду охорони навколишнього природного середовища в складі республіканського бюджету Автономної Республіки Крим;

д) погоджує розміщення підприємств, установ і організацій;

е) організовує керування й контроль в області охорони навколишнього природного середовища;

є) визначає у встановленому порядку нормативи збору і розміри зборів за забруднення навколишнього природного середовища, розміщення відходів;

ж) затверджує за поданням Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України для підприємств, установ і організацій ліміти використання природних ресурсів, за винятком природних ресурсів загальнодержавного значення, викидів і скидань забруднювальних речовин у навколишнє природне середовище, за винятком викидів і скидань, які приводять до забруднення природних ресурсів загальнодержавного значення навколишнього природного середовища за межами території Автономної Республіки Крим, і ліміти на утворення й розміщення відходів;

з) організовує проведення державної екологічної експертизи об'єктів, створюваних або функціонуючих на території Автономної Республіки Крим;

и) погоджує поточні і перспективні плани роботи підприємств, установ і організацій з питань охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів;

і) організовує ліквідацію екологічних наслідків аварій, залучає до її проведення підприємства, установи, організації, незалежно від підпорядкування й форм власності, і громадян;

ї) забезпечує систематичне й оперативне інформування населення, підприємств, установ і організацій про стан навколишнього природного середовища;

й) організовує екологічне навчання й екологічне виховання громадян.

Уряд Автономної Республіки Крим може здійснювати і інші повноваження, що не входять у компетенцію республіканських органів державного керування України.

Стаття 19. Компетенція виконавчих і розпорядчих органів місцевих Рад в області охорони навколишнього природного середовища

Виконавчі і розпорядчі органи місцевих Рад в області охорони навколишнього природного середовища в межах своєї компетенції:

а) здійснюють реалізацію рішень відповідних Рад;

б) координують діяльність місцевих органів керування, підприємств, установ і організацій, розташованих на території місцевої Ради, незалежно від форм власності й підпорядкування;

в) організовують розробку місцевих екологічних програм;

г) визначають у встановленому порядку нормативи збору і розміри зборів за забруднення навколишнього природного середовища й розміщення відходів;

д) затверджують за поданням Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України для підприємств, установ і організацій ліміти використання природних ресурсів, за винятком ресурсів загальнодержавного значення, ліміти викидів і скидань забруднювальних речовин у навколишнє природне середовище, за винятком викидів і скидань, що приводять до забруднення природних ресурсів загальнодержавного значення або навколишнього природного середовища за межами території цієї Ради, і ліміти на утворення й розміщення відходів;

е) організовують збір, переробку, утилізацію й поховання відходів на своїй території;

є) формують і використовують місцеві фонди охорони навколишнього природного середовища в складі місцевих бюджетів;

ж) погоджують поточні і перспективні плани роботи підприємств, установ і організацій з питань охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів;

з) забезпечують систематичне й оперативне інформування населення, підприємств, установ, організацій і громадян про стан навколишнього природного середовища, захворюваності населення;

и) організовують екологічне навчання й екологічне виховання громадян;

і) приймають рішення про організацію територій і об'єктів природно-заповідного фонду місцевого значення.

Виконавчі й розпорядчі органи Рад можуть здійснювати й інші повноваження відповідно до законодавства України.

Стаття 20. Компетенція спеціально уповноважених органів державного керування в області охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів

До компетенції Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України і його органів на місцях відносяться:

а) здійснення комплексного керування в області охорони навколишнього природного середовища в республіці, проведення єдиної науково-технічної політики з питань охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів, координація діяльності міністерств, відомств, підприємств, установ і організацій у цій області;

б) державний контроль за використанням і охороною земель, надр, поверхневих і підземних вод, атмосферного повітря, лісів і іншої рослинності, тваринного світу, морського середовища і природних ресурсів територіальних вод, континентального шельфу і виняткової (морської) економічної зони республіки, а також за дотриманням норм екологічної безпеки;

в) організація моніторингу навколишнього природного середовища, створення й забезпечення роботи республіканської екологічної інформаційної системи;

г) затвердження нормативів, правил, участь у розробці стандартів з регулювання використання природних ресурсів і охорони навколишнього природного середовища від забруднення й інших шкідливих впливів;

- д) здійснення державної екологічної експертизи;
- е) безкоштовне одержання від міністерств, відомств, підприємств установ і організацій інформації, необхідної для виконання покладених на нього задач;
- є) видача дозволів на поховання (складування) відходів, викиди шкідливих речовин у навколишнє природне середовище, на спеціальне використання природних ресурсів відповідно до законодавства України;
- ж) обмеження або призупинення (тимчасово) діяльності підприємств і об'єктів, незалежно від їхнього підпорядкування й форм власності, якщо їхня експлуатація здійснюється з порушенням законодавства про охорону навколишнього природного середовища, вимог і дозволів на використання природних ресурсів, із перевищенням лімітів викидів і скидань забруднювальних речовин;
- з) пред'явлення позовів про відшкодування збитків і втрат, заподіяних у результаті порушення законодавства про охорону навколишнього природного середовища;
- и) складання протоколів і розгляд справ про адміністративні правопорушення в області охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів;
- і) керівництво заповідною справою, ведення Червоної книги України;
- ї) координація роботи інших спеціально уповноважених органів державного керування в області охорони навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів;
- й) здійснення міжнародного співробітництва з питань охорони навколишнього природного середовища, вивчення, узагальнення і поширення міжнародного досвіду в цій області, організація виконання зобов'язань України відповідно до міжнародних угод із питань охорони навколишнього природного середовища.

Міністерство охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України виконує й інші функції відповідно до положення, затвердженого Кабінетом Міністрів України.

У системі органів Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України можуть створюватися спеціальні підрозділи, працівники яких наділяються правом носіння форми установленого зразка і вогнепальної зброї.

Посадові особи спеціальних підрозділів Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України

підлягають обов'язковому державному особистому страхуванню за рахунок засобів державного бюджету у випадку загибелі на суму десятирічної заробітної плати за основною посадою, а у випадку поранення, контузії, травми або каліцтва, захворювання або інвалідності, що наступили у зв'язку з виконанням посадових обов'язків, - на суму від шестимісячної до п'ятирічної заробітної плати за основною посадою в залежності від ступеня втрати працездатності.

Перелік категорій посадових осіб спеціальних підрозділів Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України, що підлягають обов'язковому державному особистому страхуванню, а також порядок і умови цього страхування установлюються Кабінетом Міністрів України.

У випадку загибелі посадової особи спеціального підрозділу Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України у зв'язку з виконанням посадових обов'язків родині загиблого або його утриманцю виплачується по одноразова допомога в розмірі десятирічної заробітної плати загиблого по останній займаній ним посаді за рахунок державного бюджету з наступним стягненням цієї суми з винних осіб.

У випадку нанесення посадовій особі спеціального підрозділу Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України тілесних ушкоджень у зв'язку з виконанням нею посадових обов'язків, що перешкоджають у подальшому займатися професійною діяльністю, йому виплачується одноразова допомога в розмірі п'ятирічної заробітної плати по останній займаній ним посаді за рахунок державного бюджету з наступним стягненням цієї суми з винних осіб і у встановленому порядку призначається пенсія по інвалідності.

У випадку нанесення посадовій особі спеціального підрозділу Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України тілесних ушкоджень при виконанні нею посадових обов'язків, що не перешкоджають у подальшому займатися професійною діяльністю, йому виплачується одноразова допомога в розмірі річної заробітної плати за рахунок державного бюджету з наступним стягненням цієї суми з винних осіб.

Збиток, заподіяний майну посадової особи спеціального підрозділу Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України або членів його родини при виконанні ним

посадових обов'язків, відшкодовується в повному обсязі за рахунок коштів державного бюджету з наступним стягненням цієї суми з винних осіб.

Річна заробітна плата посадової особи спеціального підрозділу Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України, що береться для нарахування розміру одноразової допомоги, включає усі види грошових виплат, отриманих посадовою особою за час роботи в спеціальному підрозділі Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України за рік, що передував року загибелі або ушкодження здоров'я.

Законодавством України передбачається охорона честі, гідності, здоров'я й життя працівників спеціальних підрозділів Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України і його органів на місцях.

Рішення Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України з питань, віднесених до його компетенції, обов'язкові для всіх підприємств, установ і організацій і можуть бути оскаржені в судовому порядку.

Компетенція інших спеціально уповноважених державних органів керування в області охорони навколишнього природного середовища і раціонального використання природних ресурсів визначається законодавством України, а також положеннями про ці органи, затверджуваними у встановленому порядку.

Стаття 21. Повноваження суспільних об'єднань в області охорони навколишнього природного середовища

Суспільні природоохоронні об'єднання мають право:

- а) розробляти й пропагувати свої природоохоронні програми;
- б) утворювати суспільні фонди охорони природи; за узгодженням з місцевими Радами за рахунок власних коштів і добровільної трудової участі членів суспільних об'єднань виконувати роботи з охорони і відтворення природних ресурсів, збереження й поліпшення стану навколишнього природного середовища;
- в) брати участь у проведенні спеціально уповноваженими державними органами керування в області охорони навколишнього природного середовища перевірок виконання підприємствами, установами й організаціями природоохоронних планів і заходів;

г) проводити суспільну екологічну експертизу, обнародувати її результати і передавати їх органам, уповноваженим приймати рішення;

д) одержувати у встановленому порядку інформацію про стан навколишнього природного середовища, джерела його забруднення, програм і заходів щодо охорони навколишнього природного середовища;

е) виступати з ініціативою проведення республіканського і місцевих референдумів із питань, пов'язаних з охороною навколишнього природного середовища, використанням природних ресурсів і забезпеченням екологічної безпеки;

є) вносити у відповідні органи пропозиції про організацію територій і об'єктів природно-заповідного фонду;

ж) пред'являти в суд позови про відшкодування збитку, заподіяного унаслідок порушення законодавства про охорону навколишнього природного середовища, у тому числі здоров'ю громадян і майну громадських об'єднань;

з) брати участь у заходах міжнародних неурядових організацій з питань охорони навколишнього природного середовища.

Діяльність громадських об'єднань в області охорони навколишнього природного середовища здійснюється відповідно до законодавства України на основі їх статутів.

Р о з д і л V

СПОСТЕРЕЖЕННЯ, ПРОГНОЗУВАННЯ, ОБЛІК І ІНФОРМУВАННЯ В ОБЛАСТІ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Стаття 22. Моніторинг навколишнього природного середовища

З метою забезпечення збору, обробки, збереження й аналізу інформації про стан навколишнього природного середовища, прогнозування його змін і розробки науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття ефективних управлінських рішень в Україні створюється система державного моніторингу навколишнього природного середовища.

Спостереження за станом навколишнього природного середовища, рівнем його забруднення здійснюється Міністерством охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України, іншими спеціально уповноваженими державними органами, а також підприємствами, установами й організаціями, діяльність яких приводить або може призвести до погіршення стану навколишнього природного середовища.

Зазначені підприємства, установи, організації зобов'язані безкоштовно передавати відповідним державним органам аналітичні матеріали своїх спостережень.

Порядок здійснення державного моніторингу навколишнього природного середовища визначається Кабінетом Міністрів України.

Спеціально уповноважені державні органи разом з відповідними науковими установами забезпечують організацію короткострокового і довгострокового прогнозування змін навколишнього природного середовища, що повинні враховуватися при розробці і виконанні програм і заходів для економічного і соціального розвитку республіки, у тому числі з охорони навколишнього природного середовища, використання й відтворення природних ресурсів і забезпечення екологічної безпеки.

Стаття 23. Кадастри природних ресурсів

Для обліку кількісних, якісних і інших характеристик природних ресурсів, обсягу, характеру й режиму їхнього використання ведуться державні кадастри природних ресурсів.

Державні кадастри ведуться в порядку, обумовленому Кабінетом Міністрів України.

Стаття 24. Державний облік об'єктів, що шкідливо впливають на стан навколишнього природного середовища

Об'єкти, що шкідливо впливають або можуть вплинути на стан навколишнього природного середовища, види й кількість шкідливих речовин, що попадають у навколишнє природне середовище, види і розміри шкідливих фізичних впливів на нього підлягають державному й іншому обліку.

Підприємства, установи й організації проводять первинний облік в області охорони навколишнього природного середовища і безкоштовно надають відповідну інформацію органам, що ведуть державний облік у цій області.

Збір, обробка й надання відповідним державним органам зведеної статистичної звітності про обсяги викидів, скидань забруднювальних речовин, використання природних ресурсів, виконання завдань з охорони навколишнього природного середовища й іншої інформації, ведення екологічних паспортів здійснюється за єдиною для республіки системою в порядку, обумовленому Кабінетом Міністрів України.

Стаття 25. Інформування про стан навколишнього природного середовища

На Міністерство охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України, його органи на місцях і інші спеціально уповноважені державні органи покладається щорічна підготовка й подання Верховній Раді України підсумкової доповіді про стан навколишнього природного середовища в державі, а також забезпечення зацікавлених державних і суспільних органів, підприємств, установ, організацій і громадян інформацією про стан навколишнього природного середовища, випадки і причини його екстремального забруднення, рекомендації щодо заходів, спрямованих на зменшення негативного впливу на природні об'єкти і здоров'я населення, про наслідки й результати ліквідації цих явищ, екологічні прогнози, про залучення винних до відповідальності.

Порядок інформування про стан навколишнього природного середовища визначається Кабінетом Міністрів України.

Р о з д і л VI

ЕКОЛОГІЧНА ЕКСПЕРТИЗА

Стаття 26. Обов'язковість екологічної експертизи

В Україні здійснюється державна, суспільна і інші види екологічної експертизи.

Проведення екологічної експертизи є обов'язковим у процесі законотворчої, інвестиційної, управлінської, господарської й іншої діяльності, що впливає на стан навколишнього природного середовища.

Порядок проведення екологічної експертизи визначається законодавством України.

Стаття 27. Об'єкти екологічної експертизи

Екологічній експертизі підлягають:

а) проекти схем розвитку й розміщення продуктивних сил, розвитку галузей народного господарства, генеральних планів населених пунктів, схем районного планування й інша передпланова і передпроектна документація;

б) техніко-економічні обґрунтування й розрахунки, проекти на будівництво і реконструкцію (розширення, технічне переозброєння) підприємств і інших об'єктів, що можуть негативно впливати на стан навколишнього природного середовища, незалежно від форм власності й підпорядкування, у тому числі військового призначення;

в) проекти інструктивно-методичних і нормативно-технічних актів і документів, що регламентують господарську діяльність і негативно впливають на навколишнє природне середовище;

г) документація для створення нової техніки, технології, матеріалів і речовин, у тому числі купівлі за кордоном;

д) матеріали, речовини, продукція, господарські рішення, системи й об'єкти, впровадження або реалізація яких може призвести до порушення норм екологічної безпеки і негативного впливу на навколишнє природне середовище або створення небезпеки для здоров'я людей.

Екологічній експертизі можуть підлягати екологічно небезпечні діючі об'єкти й комплекси, у тому числі військового й оборонного призначення.

Стаття 28. Державна екологічна експертиза

Державна екологічна експертиза проводиться експертними підрозділами або спеціально створюваними комісіями Міністерства охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України і його органів на місцях на основі принципів законності, наукової обґрунтованості, комплексності, незалежності, гласності і довгострокового прогнозування.

Завданнями державної екологічної експертизи є:

а) визначення екологічної безпеки господарської й іншої діяльності, що може в сьогоденні або в майбутньому прямо або побічно негативно вплинути на стан навколишнього природного середовища;

б) установлення відповідності передпроектних, передпланових, проектних і інших рішень вимогам законодавства про охорону навколишнього природного середовища;

в) оцінювання повноти й обґрунтованості заходів, що передбачаються для охорони навколишнього природного середовища й здоров'я населення, здійснювана Міністерством охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України разом із Міністерством охорони здоров'я України.

Для участі в проведенні державної екологічної експертизи можуть залучатися відповідні органи державного керування України, представники науково-дослідних, проектно - конструкторських, інших установ і організацій, вищих навчальних закладів, громадськості, експерти міжнародних організацій.

Стаття 29. Обов'язковість виконання висновку державної екологічної експертизи

Висновок державної екологічної експертизи після затвердження Міністерством охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України є обов'язковим для виконання.

Позитивний висновок державної екологічної експертизи є підставою для відкриття фінансування всіх програм і проектів.

Реалізація програм, проектів і рішень без позитивного висновку державної екологічної експертизи забороняється.

Стаття 30. Суспільна екологічна експертиза

Суспільна екологічна експертиза здійснюється незалежними групами фахівців з ініціативи суспільних об'єднань, а також місцевих органів влади за рахунок їх власних засобів або на суспільних засадах.

Суспільна екологічна експертиза проводиться незалежно від державної екологічної експертизи.

Висновки суспільної екологічної експертизи можуть враховуватися органами, що здійснюють державну екологічну експертизу, а також органами, зацікавленими в реалізації проектних рішень або експлуатуючими відповідний об'єкт особами.

Р о з д і л V I I

СТАНДАРТИЗАЦІЯ І НОРМУВАННЯ В ОБЛАСТІ ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Стаття 31. Задачі стандартизації й нормування в області охорони навколишнього природного середовища

Екологічна стандартизація й нормування проводяться з метою встановлення комплексу обов'язкових норм, правил, вимог з охорони навколишнього природного середовища, використання природних ресурсів і забезпечення екологічної безпеки.

Стаття 32. Екологічні стандарти

Державні стандарти в області охорони навколишнього природного середовища обов'язкові для виконання і визначають поняття й терміни, режим використання й охорони природних ресурсів, методи контролю за станом навколишнього природного середовища, вимоги по запобіганню шкідливого впливу забруднення навколишнього природного середовища на здоров'я людей, інші питання, пов'язані з охороною навколишнього природного середовища й використання природних ресурсів.

Екологічні стандарти розробляються й уводяться в дію у порядку, установленому законодавством України.

Стаття 33. Екологічні нормативи

Система екологічних нормативів включає:

а) нормативи екологічної безпеки, гранично допустимі концентрації забруднювальних речовин у навколишньому природному середовищі, гранично допустимі рівні акустичного, електромагнітного, радіаційного й іншого шкідливого фізичного впливу на навколишнє природне середовище, гранично допустимий вміст шкідливих речовин у продуктах харчування);

б) гранично допустимі викиди і скиди в навколишнє природне середовище забруднювальних хімічних речовин, рівні шкідливого впливу фізичних і біологічних факторів.

Законодавством України можуть установлюватися нормативи використання природних ресурсів і інші екологічні нормативи.

Екологічні нормативи повинні відповідати вимогам охорони навколишнього природного середовища й здоров'я людей від негативного впливу його забруднення.

Нормативи гранично допустимих концентрацій забруднювальних речовин у навколишньому природному середовищі і рівні шкідливих фізичних впливів на нього єдині для всієї території України.

У разі потреби для курортних, лікувально-оздоровчих, рекреаційних і інших окремих районів можуть установлюватися більш жорсткі нормативи гранично допустимих концентрацій забруднювальних речовин і інших шкідливих впливів на навколишню природу.

Екологічні нормативи розробляються і вводяться в дію Міністерством охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України, Міністерством охорони здоров'я України і іншими уповноваженими на те державними органами у відповідності до законодавства України.

Розділ VIII

КОНТРОЛЬ І НАГЛЯД В ОБЛАСТІ ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Стаття 34. Задачі контролю в області охорони навколишнього природного середовища

Задачі контролю в області охорони навколишнього природного середовища полягають у забезпеченні дотримання вимог законодавства про охорону навколишнього природного середовища всіма державними органами, підприємствами, установами й організаціями, незалежно від форм власності й підпорядкування, а також громадянами.

Стаття 35. Державний контроль в області охорони навколишнього природного середовища

Державний контроль в області охорони навколишнього природного середовища здійснюється Радами і їх виконавчими і розпорядчими органами, Міністерством охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України, його органами на місцях і іншими спеціально уповноваженими державними органами.

Державному контролю підлягають використання й охорона земель, надр, поверхневих і підземних вод, атмосферного повітря, лісів і іншої рослинності, тваринного світу, морського середовища і природних ресурсів територіальних вод, континентального шельфу і виняткової (морської) економічної зони республіки, природних територій і об'єктів, що підлягають особливій охороні, стан навколишнього природного середовища.

Порядок здійснення державного контролю за охороною навколишнього природного середовища й використанням природних ресурсів визначається даним Законом та іншим законодавством України.

Стаття 36. Суспільний контроль в області охорони навколишнього природного середовища

Суспільний контроль в області охорони навколишнього природного середовища здійснюється суспільними інспекторами охорони навколиш-

нього природного середовища відповідно до положення, затвердженого Міністерством охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки України.

Суспільні інспектори охорони навколишнього природного середовища:

а) беруть участь у проведенні разом із працівниками органів державного контролю рейдів і перевірок дотримання підприємствами, установами, організаціями і громадянами законодавства про охорону навколишнього природного середовища, дотримання норм екологічної безпеки й використання природних ресурсів;

б) проводять перевірки і складають протоколи про порушення законодавства про охорону навколишнього природного середовища і надають їх органам державного контролю в області охорони навколишнього природного середовища і правоохоронних органів для притягнення винних до відповідальності;

в) надають допомогу органам державного контролю в області охорони навколишнього природного середовища в діяльності по запобігання екологічних правопорушень.

Органи суспільного контролю в області охорони навколишнього природного середовища можуть здійснювати й інші функції у відповідності до законодавства України.

Література

1. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения. Серия изданий по безопасности N 115.- Вена: МАГАТЭ, 1997.- 382 с.
2. Норми радіаційної безпеки України НРБУ – 97, Київ, 1998. – 127с.
3. Иванов В.И. Курс дозиметрии, -М.: Атомиздат, 1978, -392 с.
4. А.В.Носовский и др. Славутич: Вопросы радиационной экологии. Киев.: Высшая школа. 2001. – 263с.: ил.
5. Н.П.Мажренова, Радиационная экология, УМП, Алма-Ата, Каз.НУ, 1999,-67 с.
6. Справочник в формате WWW создан на основе справочного пособия, составленного Смоленской Государственной Медицинской Академией (СГМА) под редакцией Литвинова А.В.
7. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів Cs-137 і Sr-90 у продуктах харчування та питній воді (ДР – 97), -Київ, 1997.