

РОЗДІЛ III

ДОЗИМЕТРІЯ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1. Дозиметрія та дози

Дозиметрія – визначення кількості і якості іонізуючого випромінювання. **Доза** – енергія, яка передана іонізуючим випромінюванням елементарному об'єму або масі опромінюваної речовини. Розрізняють експозиційну та поглинуту дози.

Експозиційна доза. Для кількісної характеристики квантового випромінювання введена величина, названа експозиційною дозою (X) – доза, поглинута в повітрі. В одиницях СІ вимірюється в кулонах/кг. 1 кл/кг дорівнює експозиційній дозі рентгенівського або гамма-випромінювання, при якому сполучена корпускулярна емісія в 1 кг сухого атмосферного повітря виробляє іони, які несуть електричний заряд кожного знака, що дорівнює 1 кл. Позасистемна одиниця – 1 рентген, дорівнює дозі випромінювання, при якій сполучена з рентгенівським або гамма-випромінюванням корпускулярна емісія утворює на 0,001293 г (1 см^3) повітря іони, які несуть заряд в одну електростатичну одиницю кількості електричності кожного знака.

Поглинута доза. Дія іонізуючої радіації на речовину проявляється в іонізації та порушенні молекул, що входять до його складу. Мірою цього впливу служить поглинута доза. Поглинута доза – величина енергії, поглинута одиницею маси опромінюваної речовини. В одиницях СІ вимірюється у Грєях – $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$, тобто дорівнює дозі іонізуючого випромінювання, при якій речовині масою 1 кг передається енергія в 1 Дж. У позасистемних одиницях вимірюється в одиницях, які звуться РАД (Radiation Absorbed Dose). $1 \text{ рад} = 100 \text{ ерг/г}$ та дорівнює дозі, коли масі 1 кг передається 0,01 Дж енергії. Потужність дози Гр/с – для поглинутої дози, а А/кг – для експозиційної.

Поглинута доза визначається рівнянням – $D = f \cdot X$, де D – доза поглинання; f – коефіцієнт пропорційності, для рентгена $f = 0,873$; X – доза експозиційна.

Еквівалентна доза. Різні види іонізуючих випромінювань діють на тканини по-різному, оскільки ушкодження тканини іонізуючим випромінюванням пов'язане не тільки з кількістю поглинутої енергії, але й із просторовим розподілом дози. Останнє характеризується лінійною щільністю іонізації. Встановлено, що чим вища ця щільність, тим більший ступінь біологічного ушкодження. Для обліку

цього фактора введено поняття «еквівалентна доза». Еквівалентна доза випромінювання – це така поглинута доза будь-якого випромінювання, яка при опроміненні створює такий самий біологічний ефект, як і 1 Гр поглинутої дози рентгенівського або гамма-випромінювання. Еквівалентна доза визначається рівнянням $H = D \times G$, де D – поглинута доза, а G – безрозмірний коефіцієнт якості, призначений тільки для використання у сфері радіаційного захисту, що і характеризує біологічну ефективність іонізуючого випромінювання даного виду (табл. 3.1). Коефіцієнт якості показує, у скільки разів даний вид опромінення має сильнішу біологічну дію, ніж квантовий, при однаковій поглинутій дозі енергії в одиницях маси речовини. Еквівалентна доза в системі СІ вимірюється у Зівертах (Зв), а у поза-системних одиницях вимірюється у Берах.

Таблиця 3.1

Відносна біологічна ефективність (ББЕ) різних видів іонізуючих випромінювань – безрозмірний коефіцієнт якості

ББЕ – безрозмірний коефіцієнт якості	Вид випромінювання
1	Рентгенівське і гальмівне випромінювання
1	Гамма-випромінювання
1	Бета-частинки, електрони
10	Альфа-частинки
3	Повільні нейтрони
10	Швидкі нейтрони
10–20	Важкі іони, ядра віддачі

Ефективна еквівалентна доза. У зв'язку з тим, що опромінення тіла людини відбувається нерівномірно, в інтересах радіаційної безпеки потрібно оцінити можливий збиток здоров'ю людини від опромінення різних органів. І з цією метою вводиться поняття «ефективна еквівалентна доза» (H_E), величина якої визначається як

$$H_E = \sum_m \omega_m H_m,$$

де H_E – ефективна еквівалентна доза;

H_m – середнє значення еквівалентної дози в m -му органі або тканині;

ω_m – коефіцієнт, що відображає відношення шкоди опромінення органа або тканини (m) до шкоди від опромінення всього тіла при однакових еквівалентних дозах.

Ефективна еквівалентна доза – це доза, рівномірно поглинута всім тілом, що і створює такий самий ризик виникнення шкоди для здоров'я від окремих стохастичних ефектів, як і фактичні дози, поглинуті в окремих органах або тканинах. При переході від реально поглинутих доз в органах і тканинах до ефективної дози використовуються спеціальні коефіцієнти, представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Значення тканинних зважувальних факторів для різних органів і тканин людини

Орган і тканина	ω_m
Статеві залози	0,20
Молочна залоза	0,05
Червоний кістковий мозок	0,12
Легені	0,12
Щитоподібна залоза	0,05
Кістка (поверхня)	0,01
Ободова кишка	0,12
Шлунок	0,12
Сечовий міхур	0,05
Печінка	0,05
Стравохід	0,05
Шкіра	0,01
Інші органи (тканини)	0,025

Основні фізичні величини, що застосовуються в радіаційній біології, та їх одиниці представляє таблиця 3.3.

Таблиця 3.3

Основні фізичні величини, що застосовуються в радіаційній біології та їх одиниці

Фізична величина	Одиниця, її назва, позначення (міжнародне та українське)		Співвідношення між одиницями	
	позасистемна	СИ*	позасистемна і СИ	СИ і позасистемна
Активність нукліда в радіоактивному джерелі	Кюрі (Ci, Ki)	Беккерель (Бк, Bg)	1 Ki = $3,7 \times 10^{-11}$ Бк	1 Бк = $2,7 \times 10^{-11}$ Ki
Експозиційна доза випромінювання	Рентген (Р, R)	Кулон/кг (Кл/кг, C/Kg)	1 Р = $2,58 \times 10^{-4}$ Кл/кг	1 Кл/кг = 3876 Р
Потужність експозиційної дози випромінювання	Рентген за с (Р/с, R/c)	Ампер на кг (А/кг, A/kg)	1 Р/с = $2,58 \times 10^{-4}$ А/кг	1 А/кг = 3876 Р/с
Поглинута доза випромінювання	Рад (рад, rad)	Грей (Гр, Gy)	1 рад = 0,01 Гр	1 Гр = 100 рад
Потужність поглинutoї дози випромінювання	Рад за с (рад/с, rad/c)	Грей за с (Гр/с, Gy/c)	1 рад/с = 0,01 Гр/с	1 Гр/с = 100 рад/с
Інтегральна доза випромінювання	Рад-грам (рад-г)	Джоуль (Дж)	1 рад-г = 10^{-5} Дж	1 Дж = 105 рад-г
Еквівалентна доза випромінювання	Бер (бер, rem)	Зіверт (Зв, Sv)	1 Бер = 0,01 Зв	1 Зв = 100 Бер
Потужність еквівалентної дози випромінювання	Бер за с (бер/с, rem/c)	Зіверт за с (Зв/с, Sv/c)	1 Бер/с = 0,01 Зв/с	1 Зв/с = 100 Бер/с

Примітка. *СИ (фр. Le Système International d'Unités, SI) – міжнародна система одиниць фізичних величин.

Інтегральна доза – енергія іонізуючого випромінювання, поглинута у всьому організмі хворого, пов'язана в основному із розсіяним випромінюванням, що виникає від первинного пучка, за межами робочого пучка випромінювань. Величина цієї дози пов'язана зі ступенем загальної реакції на опромінення і залежить від величини опромінюваного об'єму, тобто від розмірів полів опромінення і товщини

тіла хворого. Великою мірою величина інтегральної дози залежить від енергії випромінювання: у міру збільшення останньої величина інтегральної дози зменшується.

Реєструючий випромінювання прилад, зазвичай, складається з трьох основних частин:

1) детектора, датчика – чутливого елемента, що сприймає випромінювання, в який надходять частки або кванти і за допомогою перетворювача ефекту взаємодії перетворюються в електричні імпульси;

2) джерела електричного живлення;

3) лічильника електричних імпульсів, амперметра, інтенсиметра – вимірювального пристрою, що враховує ступінь змін в середовищі, що опромінюється.

Детектори розрізняють:

1. За принципом дії, тобто за ефектом, що застосовується для перетворення енергії випромінювання. Детектори поділяються на іонізаційні і сцинтиляційні. Іонізаційні детектори засновані на іонізуючій здатності випромінювання. Сцинтиляційні детектори засновані на перетворенні фотоелектричним помножувачем світлових спалахів (сцинтиляцій), що виникають в люмінофорах від впливу випромінювання, в електричні сигнали.

2. За станом середовища, в якому відбувається ефект від дії випромінювання. За цією ознакою сцинтиляційні детектори відносяться до твердотілих (хоча використовуються і рідкі сцинтилятори). За станом середовища іонізаційні детектори поділяються на газові (лічильники Гейгера-Мюллера, пропорційні лічильники та ін.), рідинні (деякі типи іонізаційних камер) і твердотільні (напівпровідникові детектори).

3. За можливістю реєструвати енергетичний розподіл випромінювання детектори поділяються на інтегральні та спектрометричні. Для спектрометричних детекторів характерна прямо пропорційна залежність вихідного сигналу від енергії реєстрованого випромінювання. Для інтегральних детекторів, незалежно від енергії випромінювання, вихідний сигнал залишається постійним. Прикладом інтегрального детектора може служити газорозрядний лічильник Гейгера-Мюллера, у якого вихідний сигнал не залежить від енергії реєстрованого випромінювання. Спектрометричні детектори: сцинтиляційні, напівпровідникові, пропорційні.

Крім того, за типом датчиків можна розрізнити прилади із застосуванням лічильників на фотоопорі, радіолюмінесцентних (фотолюмінесцентних, термолюмінесцентних) та флуоресцентних, нейтронно-активаційних, калориметричних.

Майже всі сучасні дозиметричні прилади працюють на основі іонізаційного засобу.

В іонізаційній вимірювальній камері (рис. 3.1) стінка виготовляється з пластмаси, скла, фольги або слюди (в залежності від того, який вид випромінювання буде реєструватися), а з внутрішньої сторони покривається шаром електропровідного графіту. Вимірювальний електрод, що проходить всередині камери, з'єднується з електрометром – провідником. Обидві струмопровідні частини камери – корпус і вимірювальний електрод, розділяються високоякісним ізолятором – інертним газом. Для вимірювання дози до електричного ланцюга камери за допомогою вмикача приєднується конденсатор – джерело струму. Коли камера знаходиться поза сферою, де є радіоактивне випромінювання, струм через інертний газ між електродами не проходить, оскільки немає вільних електронів. Вони з'являються всередині камери тільки під дією іонізуючого випромінювання, тоді електрометр починає реєструвати випромінювання.

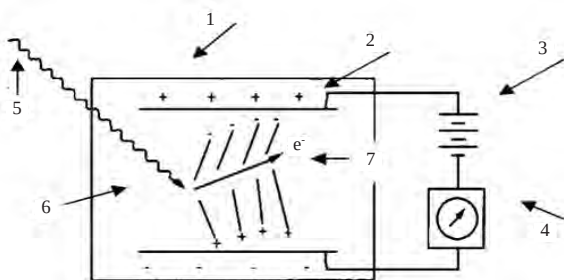


Рис. 3.1. Схема іонізаційної камери:

1 – іонізаційна камера; 2 – негативно і позитивно заряджені електроди;
3 – джерело струму – конденсатор; 4 – вимірювач; 5 – фотон; 6 – інертний газ; 7 – електрон, що утворився внаслідок іонізації молекул інертного газу.

В лічильнику частот Гейгера (рис. 3.2) застосовується детектор – скляна циліндрична трубка, наповнена інертним газом при тиску 100–200 мм рт. ст. По осі трубки закріплюється на ізоляторах анод у вигляді тонкої нитки. Другим електродом (катодом) служить корпус лічильника. Між катодом і анодом газорозрядної трубки створюється різниця потенціалів. При попаданні частки до детектора в газі утворюється певна кількість іонів. Під дією різниці потенціалів між катодом і анодом виникає імпульс струму, що протікає по опорі R . Амплітуда цього імпульсу пропорційна числу іонів, що беруть

участь в його утворенні, і залежить від напруги. За амплітудою електричного сигналу, що виникає в даному детекторі, можна судити про енергію іонізуючих часток, а за числом імпульсів – про їх кількість.

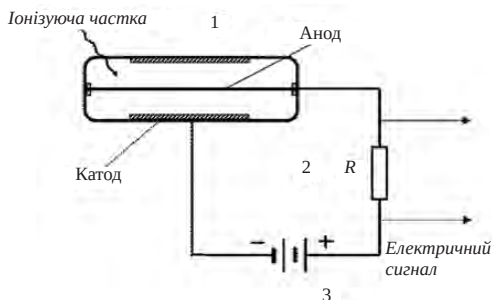


Рис. 3.2. Лічильник частинок Гейгера.

1 – скляна трубка, наповнена інертним газом; 2 – R – опір; 3 – конденсатор.

В сцинтиляційних лічильниках використовується здатність іонізуючого випромінювання утворювати при збудженні атома кванти світла. Заряджена частинка або квант рентгенівського або гамма-випромінювання, проходячи через прозорий кристал, пластмасу або рідину, викликає світловий спалах. Реєстрація світла здійснюється за допомогою так званого фотоелектричного помножувача, сполученого з підсилювачем і реєстратором імпульсів (рис. 3.3). Люмінесцентні лічильники, в порівнянні з іонізаційними камерами, мають вищу чутливість.

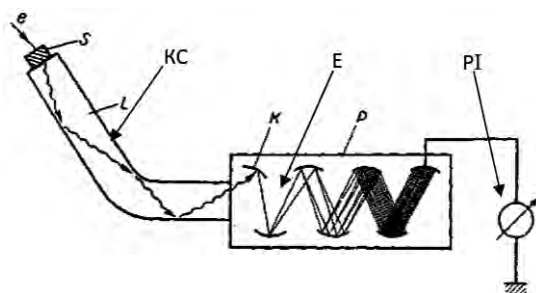


Рис. 3.3. Схема сцинтиляційного лічильника:

Е – випромінювання; S – сцинтилятор; L – світлопровід; КС – квант світла; К – фотокаатод (на якому квант світла перетворюється в електрон); Р – фотопомножувач; е – електрони, РІ – реєстратор імпульсів.

3.2. Методи та засоби вимірювання радіоактивності

Методи та засоби вимірювання радіоактивності представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Методи та засоби вимірювання радіоактивності

Методи	Засоби
Фізичний	Іонізаційний
	Сцинтиляційний
	Радіолюмінесцентний (фотолюмінесцентний, термолюмінесцентний)
	Нейтронно-активаційний
	Напівпровідниковий
	Калориметричний
Хімічний	Вимірювання кількості газу, що утворився, або інших речовин
	Колориметричний
	Тверді дозиметричні системи
	Фотографічний
Біологічний	Оцінка морфологічних змін, що відбуваються після опромінення певною дозою, наприклад кількість хромосомних аберацій
	Оцінка ступеня реакції на опромінення у вигляді лейкопенії, еритеми, строки та частота виникнення блювання і т. п.
	Оцінка рівня летальності експериментальних тварин після певної дози до певного часу
Розрахунковий (математичний) метод	Передбачає використання таблиць і номограм для розрахунку індивідуальних поглинутих доз

3.3. Фізичний метод дозиметрії, засоби та прилади

Засоби та прилади, що засновані на фізичному методі дозиметрії, представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Засоби та прилади, що засновані на фізичному методі дозиметрії

Метод	Засоби	Прилад
Фізичний	Іонізаційний	Індикатори, рентгенометри, дозиметри, радіометри
	Сцинтиляційний	Радіометри
	Радіолюмінесцентний (фотолюмінесцентний, термолюмінесцентний) Флуоресцентний	Детектори
	Нейтронноактиваційний	Детектори
	Напівпровідниковий	Детектори
	Калориметричний	Детектори
	Гамма-спектрометричний	Гамма-спектрометри

Індикатори – найпростіші прилади радіаційної розвідки; за їх допомогою вирішується завдання виявлення випромінювання та орієнтовної оцінки потужності дози головним чином β - і γ -випромінювань. За допомогою індикаторів можна встановити, зростає потужність дози чи зменшується. Ці прилади мають найпростіші електричні схеми зі світловою або звуковою сигналізацією, датчиком в них служать газорозрядні лічильники. До цієї групи приладів відносяться індикатори ДП-63, ДП-63А, ДП-64, детектори-індикатори радіоактивності «Берег» і «Quartex».

Рентгенометри призначені для вимірювань потужності дози рентгеновського або γ -випромінювання. Вони мають діапазон вимірювання від сотих часток рентгена до декількох сотень рентген на годину (Р/год). Як датчики в цих приладах застосовують іонізаційні камери або газорозрядні лічильники. Такими приладами є загальновійськовий рентгенометр ДП-2, бортові рентгенометри ДП-3, ДП-3Б, ІМД-21, ІМД-22, рентгенометр типу «Кактус», вимірювачі потужності дози ДП-5А, Б і В, ІМД-5, переносний мікрорентгенометр ПМР-1, лабораторний рентгенометр «Карагач-2», переносний рентгенометр РП-1, рентгенометр РУП-1 для визначення ступеня зараженості продуктів, прилади СІМ-5, АНРИ-01 («Сосна»), «Белла», призначені для вимірювання потужності дози γ -випромінювання в побути.

Дозиметри – прилади для вимірювання дози або потужності дози іонізуючих випромінювань. Вони призначені для визначення індивідуальних сумарних доз головним чином γ -випромінювання, яке отримує персонал, що працює з джерелами іонізуючих випромінювань, або особовий склад аварійно-рятувальних формувань (групові), за час перебування в районі забруднення, або населення, що дозволяє використовувати їх для непрямого підрахунку дози зовнішнього опромінення людини. Дозиметри застосовуються для оцінки ефективності захисних пристосувань контрольованих об'єктів або зон, а також вимірювання потужності доз від джерел випромінювання, що застосовуються для опромінення хворих. До них відносяться дозиметри ДП-22В, ДП-24, ДП-70МП, ДК-0,2, ВД-1, ІД-11, ДРГ 2-01, ДРГ 3-04, а також побутовий індивідуальний дозиметр «Майстер-1». Прилад ДКС-04 використовується для вимірювання γ - і β -випромінювання в енергетичному діапазоні 0,5–3,0 МеВ, а також нейтронного випромінювання.

Люмінесцентний лічильник: принцип роботи заснований на здатності деяких речовин до негайного світіння під впливом випромінювання або відстроченого світіння під впливом ультрафіолетового випромінювання.

Флуоресцентний лічильник: принцип роботи заснований на здатності деяких речовин (активоване срібло та ін.) накопичувати енергію від ядерних випромінювань. Згодом при освітленні ультрафіолетом енергія віддається у вигляді кванта світла і вимірюється за допомогою термолюмінесцентних дозиметрів.

Термолюмінесцентний лічильник: принцип роботи заснований на перетворенні поглинутої енергії іонізуючого випромінювання в датчику, зробленому із LiF , CaF_2Mn , $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ та ін., в люмінесценцію під дією тепла. Кількість світла, що утворюється, пропорційна дозі випромінювання. Для реєстрації термолюмінесцентного світіння використовують такі прилади: ДТУ-01М (Рига); КДТ-02М (СНІІП); Victoreen (США) DTU-2 та ін.

Калориметричний лічильник: принцип роботи заснований на вимірюванні тепла, що виділяється в речовині при поглинанні випромінювання. У медичній практиці не застосовується через незначну частину рівня тепловиділення і складності його реєстрації при дозах опромінення, що мають практичне клінічне значення.

Нейтрон-активаційний (активаційний) лічильник застосовується в дозиметрії нейтронів. Дозу визначають за кількістю радіо-

активних атомів, що утворилися в речовині детектора під дією нейтронів у камері поділу. Камера поділу – це спеціальна модифікація іонізаційної або сцинтиляційної камери, що призначена для реєстрації нейтронів. У камерах поділу використовується реакція поділу. Для реєстрації теплових і надтеплових нейтронів внутрішню поверхню такої іонізаційної камери покривають тонким шаром твердої речовини, у вигляді трифториду бору BF_3 або B_4C , де використовується високоефективний ^{10}B , що ділиться за типом ^{10}B (n, α). В результаті сцинтиляційний лічильник фіксує імпульс від альфа-частинки, яка утворилася в результаті взаємодії теплового нейтрона з бором. Крім того, для покриття внутрішньої поверхні камери використовуються ^{235}U , ^{239}U , та LiF (Eu) стільбену і антрацену та ін. Нейтрони можна зареєструвати наступними приладами: УИМ-2-2; ДКС-04; ДЭС-04; РУП-1; МКС-01 р; МКС-03 23.

Напівпровідниковий лічильник (твердотільна іонізаційна камера на основі кремнію, германію, легованого літієм та ін.) – пристрій, схожий на іонізаційну камеру, але роль газу відіграє чутлива ділянка, в якій у звичайному стані немає вільних носіїв заряду. Потрапивши в цю ділянку, заряджена частка викликає іонізацію, відповідно в зоні провідності з'являються електрони, а у валентній зоні – дірки. Під дією прикладеного до наплення на поверхні чутливої зони електродів напруги, виникає рух електронів і дірок, формується імпульс струму. Заряд імпульсу струму несе інформацію про кількість електронів і дірок і, відповідно, про енергію, яку заряджена частка втратила у цій чутливій ділянці. Якщо частка повністю втратила енергію в чутливій ділянці, проінтегрувавши струмовий імпульс, отримують інформацію про енергію частинки. Напівпровідникові детектори відрізняються економічністю живлення, компактністю, нечутливістю (на відміну від ФЕУ) до магнітного поля, а також енергетичним розрізненням в 20–30 разів кращим, ніж у сцинтиляційних лічильників. Однак їх широке застосування обмежується необхідністю їх охолодження рідким азотом ($T=770\text{ K}$). При кімнатній температурі власний (темновий) струм детекторів настільки великий, що реєстрація на його тлі імпульсів від ядерних частинок неможлива.

Радіометри використовують, насамперед, для контролю доз внутрішнього опромінення людини. Прямі радіометри призначені для визначення вмісту і кількості (активність) радіонуклідів в тілі людини з подальшим підрахунком дози внутрішнього опромінення.