

## Лекція 1. Основні поняття та одиниці дозиметрії іонізуючих випромінювань.

**Радіаційна безпека** — стан захищеності теперішнього і майбутнього поколінь людей від шкідливого для їх здоров'я впливу іонізуючого випромінювання.

Радіоактивні речовини та джерела іонізуючого випромінювання широко використовуються у виробництві, наукових дослідженнях, медицині та, на жаль, при створенні зброї. Близько 3 тис. підприємств на території України використовують радіоактивні речовини.

Катастрофи, пов'язані з радіоактивними речовинами та застосування ядерної зброї, є найбільш небезпечними надзвичайними ситуаціями. Адже їх наслідки мають найважчий і найдовший негативний вплив на людей.

Радіоактивні речовини та джерела іонізуючих випромінювань широко використовуються у виробництві, наукових дослідженнях, медицині та, на жаль, при створенні зброї. Статистика свідчить, що близько 3 тис. підприємств на території України використовують радіоактивні речовини.

Катастрофи, пов'язані з радіоактивними речовинами та застосування ядерної зброї, є найбільш небезпечними надзвичайними ситуаціями. Адже їх наслідки мають найважчий і найдовший негативний вплив на людей.

**Іонізуючі випромінювання** - квантове (електромагнітне та корпускулярне) випромінювання, під дією якого із нейтральних атомів утворюються іони (рис 2.1.)



Рис. 2.1. Іонізуючі випромінювання

Іонізація живої тканини призводить до розриву молекулярних зв'язків і зміни хімічної структури різних сполук. Зміни в хімічному складі значної кількості молекул спричиняють загибель клітин.

### Природа іонізуючого випромінювання

Термін "іонізуюче випромінювання" об'єднує різні за своєю фізичною природою види випромінювань, що мають здатність іонізувати речовину. Людський організм не має органу, який міг би сприймати іонізуюче випромінювання.

Електромагнітне випромінювання включає частину спектра, що починається з жорсткого ультрафіолету, переходить у рентгенівське випромінювання і закінчується гамма-випромінюванням. У практиці для позначення всіх видів електромагнітного іонізуючого випромінювання користуються терміном гамма-випромінювання, тому що як

найчастіше його частка у загальному потоці найбільша. Жорстке ультрафіолетове випромінювання - це найбільша короткохвильова частина ультрафіолетового випромінювання, воно, як і рентгенівське, генерується атомами чи молекулами внаслідок зміни стану електронів на зовнішніх оболонках.

**Альфа-випромінювання ( $\alpha$ )** - потік позитивно заряджених частинок, що складаються з двох протонів та двох нейтронів і за структурою відповідають ядрам атомів гелію, які називаються  $\alpha$ -частинками та мають високу іонізуючу і малу проникаючу здатність. Відомо близько 40 природних та понад 200 штучних альфа-активних ізотопів. У повітрі альфа-частинки пролітають кілька сантиметрів, добре затримуються речовинами, в шкіру проникають на глибину до 0,1 мм. Найбільшу небезпеку  $\alpha$ -випромінювання становить при внутрішньому опроміненні організму та аплікації на шкіру.

**Бета-випромінювання ( $\beta$ )** - потік електронів або позитронів, що називаються  $\beta$ -частинками. Випромінюються атомними ядрами при бета-розпаді радіоактивних ізотопів. При взаємодії  $\beta$ -частинок з речовиною утворюється рентгенівське випромінювання. Іонізуюча здатність бета-випромінювання менша, ніж у альфа-випромінювання, а проникаюча здатність вища. Найбільш енергетичні  $\beta$ -частинки можуть проникнути через шар алюмінію до 5 см.

**Гама-випромінювання ( $\gamma$ )** - електромагнітні хвилі з частотою  $3 \cdot 10^{19}$  Гц і більше, що мають високу проникаючу здатність. Гама-випромінювання виникає при ядерних вибухах, розпадах радіоактивних ядер, елементарних часток, а також при проходженні швидких заряджених часток крізь речовину. Використовується у медицині (променева терапія), для стерилізації приміщень, апаратури, ліків, продуктів харчування. Найбільш ефективно ослаблюється матеріалами з високою щільністю.

Потоки нейтронів, протонів виникають при ядерних реакціях їх дія залежить від енергії часток. Зазвичай, потоки нейтронів поділяють на повільні (холодні), швидкі та надшвидкі.

Для вимірювання радіоактивності використовується цілий ряд одиниць. У практиці радіаційних досліджень дотепер використовуються старі позасистемні одиниці (система СГС) та одиниці системи СІ, що ускладнює сприйняття інформації. У таблиці 3.1 приведено одиниці радіоактивності в обох системах та переведення їх з однієї системи у іншу.

Таблиця 3.1

**Одиниці вимірювання радіоактивності, переведення одиниць системи СГС у систему СІ**

Позначення	Назва та визначення одиниць
<b>X</b>	<b>Експозиційна доза</b> характеризує іонізуючу здатність випромінювання
Кл/кг (система СІ)	<b>Кулон на кілограм</b> - експозиційна доза фотонного випромінювання, при якій корпускулярна емісія в сухому атмосферному повітрі масою 1 кг створює іони, що несуть заряд кожного знаку, рівний 1 Кл
Р, (система СГС)	<b>Рентген</b> - доза фотонного випромінювання (87,3 ергів енергії), при якому корпускулярна емісія, що виникає в 1 см <sup>3</sup> повітря, створює 1 СГСЕ кількості електрики кожного знаку (виникає 2,08 млрд. пар іонів)
Співвідношення	1 Кл/кг = 3,88 · 10 <sup>3</sup> Р 1 Р = 2,58 · 10 <sup>-4</sup> Кл/кг
<b>D</b>	<b>Поглинута доза</b> характеризує енергію, яка поглинута одиницею маси речовини
Гр (система СІ)	<b>Грей</b> - поглинута доза випромінювання, що відповідає поглинанню 1 Дж випромінювання на 1 кг маси

Рад (система СГС)	Рад відповідає поглинутій енергії 100 ерг на 1 г речовини
Співвідношення	1Гр=100рад; 1рад=110 <sup>-2</sup> Гр
<b>Н</b>	Еквівалентна доза характеризує біологічний вплив випромінювання
Зв (система СІ)	<b>Зіверт</b> - еквівалентна доза будь-якого виду випромінювання, поглинута 1 кг біологічної тканини, що створює такий самий ефект, як і поглинута доза в 1 Гр фотонного випромінювання
Бер (система СГС)	<b>Бер</b> - еквівалентна доза будь-якого виду випромінювання, поглинута 1 г біологічної тканини, що створює такий самий ефект, як і поглинута доза в 1 рад фотонного випромінювання
Співвідношення	1 Зв=100 бер
<b>Співвідношення доз</b>	
Співвідношення	1рад = 1бер = 113Р; 1Р = 0,87рад = 0,87бер
<b>А</b>	<b>Активність</b>
Бк (система СІ)	1Беккерель = 1 розпад за секунду
Кі (система СГС)	1 Кюрі = 3,710 <sup>10</sup> розпадів за секунду
Співвідношення	1Бк=2,703 10 <sup>-11</sup> Кі 1Кі=3,710 <sup>10</sup> Бк

Кількісною характеристикою джерела випромінювання є активність. Для вимірювання активності (міра кількості радіоактивної речовини, виражена числом радіоактивних розпадів за одиницю часу) застосовується одиниця беккерель (Бк) (фр. *becquerel* - за ім'ям фр. фізика А. Беккереля (А. Becquerel), яка чисельно дорівнює одному ядерному перетворенню за секунду (розпад/с). Позасистемною одиницею активності є Кюрі (Кі), що відповідає активності 1 г радію або 3,7·10<sup>10</sup> розпадам за секунду.

**Експозиційна доза** характеризує іонізуючу здатність випромінювання у повітрі, тобто потенційні можливості іонізуючого випромінювання. За одиницю дози у системі СІ прийнятий Кулон поділений на кілограм (Кл/кг) - це така доза випромінювання, при якій в 1 кг сухого повітря виникає така кількість іонів, що мають заряд 1 кулон електрики кожного знаку. Позасистемною одиницею експозиційної дози є рентген (Р) - одна з найпоширеніших одиниць вимірювання радіоактивності.

**Поглинута доза** характеризує енергію іонізуючого випромінювання (незалежно від виду випромінювання), яка поглинута одиницею маси опроміненого середовища. Одиниця вимірювання поглинутої дози в системі СІ - грей (Гр), позасистемна одиниця - рад. При підрахунках експозиційну дозу прирівнюють до поглинутої 1Р=1рад, проте для точних розрахунків необхідно враховувати, що 1 Р відповідає поглинутій дозі у повітрі - 0,87 рад, у воді та живій тканині - 0,93 рад.

**Біологічний ефект** іонізуючого випромінювання надзвичайно сильний і не може бути порівняним з дією будь-якого іншого виду енергії. Однократна смертельна доза іонізуючого випромінювання для людини становить 5 Гр, тобто відповідає поглиненій енергії випромінювання 5 Дж/кг. Така кількість теплової енергії витрачається на нагрівання склянки води до 100<sup>0</sup>С або на нагрівання тіла людини не більше, ніж на 0,001<sup>0</sup>С.

Поглинута доза не відображає біологічну дію радіації, а тільки свідчить про кількість поглинутої енергії. Для оцінки біологічного впливу різних видів іонізуючих

випромінювань на організм людини використовується еквівалентна доза, що у системі СІ вимірюється у зівертах (Зв), у системі СГС - берах (біологічний еквівалент рентгена, БЕР). Еквівалентна доза служить для оцінки радіаційної небезпеки різних видів випромінювань.

**Еквівалентна доза** характеризує біологічний ефект будь-якого іонізуючого випромінювання, що приведений до впливу, який викликають гама-промені:

$$D = K \cdot D_p$$

де: D - еквівалентна доза; D<sub>p</sub> - поглинута доза; K - коефіцієнт якості випромінювання, який вказує, у скільки разів біологічний ефект даного виду випромінювання відрізняється від такої ж дії гама-випромінювання. Для рентгенівського випромінювання K = 1, для нейтронів - K=10, для альфа-випромінювання - K=20.

При наближених розрахунках, пов'язаних тільки з у-випромінюванням (для випадків зовнішнього опромінення людини без забруднення радіоактивним пилом) можна вважати, що експозиційна, поглинута та еквівалентна дози практично рівні: 1 бер = 1 рад = 1 рентген.

Плануючи заходи цивільного захисту, користуються показником колективної еквівалентної дози, тобто дози, яка отримана групою людей (вимірюється у людино-зівертах). Колективну ефективну еквівалентну дозу, яку отримують багато поколінь людей від будь-якого радіоактивного джерела за час його існування, називають очікуваною (повною) колективною ефективною еквівалентною дозою.

Поглинута та експозиційна дози випромінювання, віднесені до одиниці часу, визначають потужність дози (рівень радіації).

Рівень радіації характеризує, наприклад, ступінь забруднення місцевості та вказує, яку дозу може одержати людина, знаходячись на забрудненій місцевості, за певний час. Рівень радіації вимірюється у рентген/годинах, рад/годинах, бер/ годинах.

Рівень радіації зменшується у геометричній прогресії через розпад радіоактивних елементів. Швидкість зменшення залежить від періоду напіврозпаду ізоотопів, що забруднили територію.

Період напіврозпаду - час, за який розпадається половина атомів радіоактивного елемента (T<sub>1/2</sub>).

Так, якщо зараження відбулося радіоактивним йодом з періодом напіврозпаду 8 діб, зменшення рівня радіації на місцевості буде йти швидко, а при зараженні цезієм та стронцієм з періодами напіврозпаду 28 і 30 років - довго.

**Приклад задачі.** В результаті аварії виникло забруднення місцевості I<sup>131</sup>. Природний фон місцевості до забруднення становив 15 мкР/год, а в результаті забруднення зріс до 115 мкР/год. Скласти графік зниження радіаційного фону на місцевості.

Кількість радіоактивного йоду, що забезпечують рівень випромінювання на рівні 100 мкР/год, приймаємо за 100%. Знаючи період напіврозпаду радіоактивного йоду, можна вирахувати його кількість на будь-який момент часу за формулою

$$M_k = \frac{M_n}{2^n}$$

де M<sub>k</sub> - маса кінцева, M<sub>n</sub> - маса початкова, n - кількість періодів напіврозпаду, що вираховується діленням заданого часу на період напіврозпаду ізотопа.

Результати розрахунків показують, що рівень радіації при забрудненні радіоактивним йодом зменшується практично до природного фонового рівня приблизно через 50 діб.

При забрудненні місцевості кількома ізоотопами з різними періодами напіврозпаду необхідно провести розрахунки окремо по кожному з них та визначити середні значення з врахуванням їх питомого вмісту у загальному забрудненні.

Під час Чорнобильської катастрофи основними радіоактивними елементами, що призвели до забруднення були, йод-131 (<sup>31</sup>I), цезій-137 (<sup>137</sup>Cs) та стронцій-90 (<sup>90</sup>Str) з

періодами напіврозпаду відповідно 8 діб, 29,7 роки та 28 років, які є найбільш небезпечними для організму людини.

Питання захисту людини від негативного впливу іонізуючого випромінювання постали майже одночасно з відкриттям рентгенівського випромінювання і радіо-активного розпаду. Це зумовлено такими факторами: по-перше, надзвичайно швидким розвитком застосування відкритих випромінювань в науці та на практиці, і, по-друге, виявленням негативного впливу випромінювання на організм.

Заходи радіаційної безпеки використовуються на підприємствах і, як правило, потребують проведення цілого комплексу різноманітних захисних заходів, що залежать від конкретних умов роботи з джерелами іонізуючих випромінювань і, передусім, від типу джерела випромінювання.

### **Забезпечення радіаційної безпеки**

**1. Закритими** називаються будь-які джерела іонізуючого випромінювання, устрій яких виключає проникнення радіоактивних речовин у навколишнє середовище при передбачених умовах їхньої експлуатації і зносу.

Це — гамма-установки різноманітного призначення; нейтронні, бета- і гамма-випромінювачі; рентгенівські апарати і прискорювачі заряджену часток. При роботі з закритими джерелами іонізуючого випромінювання персонал може зазнавати тільки зовнішнього опромінення.

Захисні заходи, що дозволяють забезпечити умови радіаційної безпеки при застосуванні закритих джерел, ґрунтуються на знанні законів поширення іонізуючих випромінювань і характеру їхньої взаємодії з речовиною. Головні з них такі:

- *доза зовнішнього опромінення пропорційна інтенсивності випромінювання і часу впливу;*
  - *інтенсивність випромінювання від точкового джерела пропорційне кількості квантів або часток, що виникають у ньому за одиницю часу і обернено пропорційна квадрату відстані;*
- інтенсивність випромінювання може бути зменшена за допомогою екранів.*

З цих закономірностей випливають основні принципи забезпечення радіаційної безпеки:

1. Зменшення потужності джерел до мінімальних розмірів («захист кількістю»);
2. Скорочення часу роботи з джерелом («захист часом»);
3. Збільшення відстані від джерел до людей («захист відстанню»);
4. Екранування джерел випромінювання матеріалами, що поглинають іонізуюче випромінювання («захист екраном»).

Найкращими для захисту від рентгенівського і гамма-випромінювання є свинець і уран. Проте, з огляду на високу вартість свинцю й урану, можуть застосовуватися екрани з більш легких матеріалів — просвинцьованого скла, заліза, бетону, залізобетону і навіть води. У цьому випадку, природно, еквівалентна товща екрану значно збільшується.

Для захисту від бета-потоків доцільно застосовувати екрани, які виготовлені з матеріалів з малим атомним числом. У цьому випадку вихід гальмівного випромінювання невеликий. Звичайно як екрани для захисту від бета-випромінювань використовують органічне скло, пластмасу, алюміній.

**Відкритими** називаються такі джерела іонізуючого випромінювання, при використанні яких можливе потрапляння радіоактивних речовин у навколишнє середовище.

При цьому може відбуватися не тільки зовнішнє, але і додаткове внутрішнє опромінення персоналу. Це може відбутися при надходженні радіоактивних ізотопів у навколишнє робоче середовище у вигляді газів, аерозолів, а також твердих і рідких радіоактивних відходів. Джерелами аерозолів можуть бути не тільки виконувані

виробничі операції, але і забруднені радіоактивними речовинами робочі поверхні, спецодяг і взуття.

**Основні принципи захисту:**

- використання принципів захисту, що застосовуються при роботі з джерелами випромінювання у закритому виді;
- герметизація виробничого устаткування з метою ізоляції процесів, що можуть стати джерелами надходження радіоактивних речовин у зовнішнє середовище;
- заходи планувального характеру;
- застосування санітарно-технічних засобів і устаткування, використання спеціальних захисних матеріалів;
- використання засобів індивідуального захисту і санітарної обробки персонажу;
- дотримання правил особистої гігієни;
- очищення від радіоактивних забруднень поверхонь будівельних конструкцій, апаратури і засобів індивідуального захисту;
- використання радіопротекторів (біологічний захист).

Радіоактивне забруднення спецодягу, засобів індивідуального захисту та шкіри персоналу не повинно перевищувати припустимих рівнів, передбачених Нормами радіаційної безпеки НРБУ-97.

**Рентгенорадіологічні процедури** належать до найбільш ефективних методів діагностики захворювань людини. Це визначає подальше зростання застосування рентгено- і радіологічних процедур або використання їх у ширших масштабах. Проте інтереси безпеки пацієнтів зобов'язують прагнути до максимально можливого зниження рівнів опромінення, оскільки вплив іонізуючого випромінювання в будь-якій дозі поєднаний з додатковим, відмінним від нуля ризиком виникнення віддалених стохастичних ефектів. Уданий час з метою зниження індивідуальних і колективних доз опромінення населення за рахунок діагностики широко застосовуються організаційні і технічні заходи:

- як виняток необґрунтовані (тобто без доведень) дослідження;
- зміна структури досліджень на користь тих, що дають менше дозове навантаження;
  - впровадження нової апаратури, оснащеної сучасною електронною технікою посиленого візуального зображення;
  - застосування екранів для захисту ділянок тіла, що підлягають дослідженню, тощо.

Ці заходи, проте, не вичерпують проблеми забезпечення максимальної безпеки пацієнтів і оптимального використання цих діагностичних методів. Система забезпечення радіаційної безпеки пацієнтів може бути повною й ефективною, якщо вона буде доповнена гігієнічними регламентами припустимих доз опромінення.

**2. Види, фізичний зміст і одиниці вимірювання доз опромінення.**

Атом схожий на сонячну систему в мініатюрі: навколо ядра рухаються по орбітах електрони. Розміри ядра в сто тисяч разів менше самого атома.

Деякі нукліди стабільні, тобто під час відсутності зовнішнього впливу ніколи не перетерплюють ніяких перетворень.

Значна кількість нуклідів нестабільні, тобто без якого-небудь зовнішнього впливу вони увесь час перетворюються в інші нукліди. 99 % від загальної кількості урану, який міститься в земній корі, займає уран-238.

Основною характеристикою іонізуючого випромінювання є доза випромінювання.

**Доза випромінювання** – це кількість енергії іонізуючого випромінювання, поглиненої одиницею маси середовища, що опромінюється. Розрізняють експозиційну, поглинену й еквівалентну дози випромінювання. Для визначення поглиненої енергії будь-якого виду випромінювання в середовищі прийняте поняття поглиненої дози випромінювання.

**Поглинена доза** випромінювання визначається як енергія, поглинена одиницею маси речовини, що опромінюється. За одиницю поглиненої дози випромінювання приймається джоуль на кілограм (Дж/кг).

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

Для оцінки біологічного впливу іонізуючого випромінювання використовується **еквівалентна доза**  $D_{екв}$ . Вона дорівнює добутку поглиненої дози  $D_{погл}$  на так названий коефіцієнт відносної біологічної ефективності даного виду випромінювання  $\eta$ .

$$D_{екв} = D_{погл} \cdot \eta$$

Для рентгенівського, гама-, бета-випромінювань  $\eta = 1$ ; для альфа-випромінювання  $\eta = 20$ ; для нейтронів з енергією менше 20 КеВ  $\eta = 3$ ; для нейтронів з енергією 0,1-10 МеВ  $\eta = 10$ .

Одиницею вимірювання еквівалентної дози в системі СІ використовується зіверт (Зв), несистемною одиницею є біологічний еквівалент рада (бер);

$$13в = 100 бер = 1 Гр\eta$$

Для характеристики джерела випромінювання по ефекту іонізації застосовується так названа **експозиційна дозарентгенівського і гамма-випромінювань**. Експозиційна доза виражає енергію випромінювання, перетворену в кінетичну енергію заряджених часток в одиниці маси атмосферного повітря.

За одиницю експозиційної дози рентгенівського і гамма-випромінювань приймається кулон на кілограм – 1 Кл/кг. Кулон на кілограм – експозиційна доза рентгенівського і гамма-випромінювань, при якій сполучена 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.) робить у повітрі іони, що несуть заряд в один кулон електрики кожного знаку.

Несистемною одиницею експозиційної дози рентгенівського і гамма-випромінювань є рентген.

**Рентген** – це доза гамма-випромінювання, під дією якої в  $1\text{см}^3$  сухого повітря при нормальних умовах ( $t = 0^\circ\text{C}$  і тиску 760 мм рт. ст.) створюються іони, що в одиниці об'єму несуть одну електростатичну одиницю електрики одного знака. Дозі в 1Р відповідає утворенню  $2,08 \cdot 10^9$  пар іонів у  $1\text{см}^3$  повітря.

Одиниця рентген може бути використана до значення 3 Мев енергії рентгенівського і гамма-випромінювань. Випромінювання може вимірятися в рентгенах - Р, мілірентгенах - мР чи мікрорентгенах - мкР ( $1\text{ Р} = 10^3\text{ мР} = 10^6\text{ мкР}$ ).

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

$$1\text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4}\text{ Кл/кг} \text{ або } 1\text{ Р} = 3,86 \cdot 10^{-3}\text{ Дж/кг}$$

Джерела іонізуючих випромінювань характеризуються **активністю**, що визначається кількістю ядерних розпадів  $dN$  за проміжок часу  $dt$ :

У системі СІ одиницею вимірювання активності є беккерель (Бк).

$1\text{ Бк}$  – це один розпад за секунду. Несистемною одиницею є кюри (Ки).

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

Поглинена доза випромінювання й експозиційна доза рентгенівського і гамма-випромінювань, поділені на одиниці часу, називаються відповідно **потужністю**

**поглиненої дози** випромінювання і **потужністю експозиційної дози** рентгенівського і гамма-випромінювань ( $P_{\text{погл}}$  і  $P_{\text{експ}}$ ).

За одиницю потужності поглиненої дози випромінювання і потужності експозиційної дози прийнятий відповідно ват на кілограм (Вт/кг) і ампер на кілограм (А/кг).

Несистемними одиницями потужності поглиненої дози випромінювання і потужності експозиційної дози рентгенівського і гамма-випромінювань відповідно є рад в секунду і рентген в секунду (рад/сек и р/сек).

Ступінь забруднення навколишнього середовища радіоактивними речовинами характеризується густиною забруднення, що вимірюється кількістю радіоактивних розпадів атомів в одиницю часу на одиницю поверхні, або в одиниці маси, або в об'ємі (Ки/кг, Бк/кг, Ки/л, Бк/л, Ки/км<sup>2</sup>, Бк/км<sup>2</sup>).