

МІНІСТЕРСТВО НАУКИ І ОСВІТИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

В. Л. Клеєвська, В. В. Кручина, О. О. Поліщук

РАДІАЦІЙНА ЕКОЛОГІЯ

Навчальний посібник

Харків "ХАІ" 2016

УДК 504.5 (075.8)
ББК 20.1 я 73
К 48

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. С. М. Логвінков,
канд. техн. наук, доц. Є. О. Семенов

Клеєвська, В. Л.
К 48 Радіаційна екологія [Текст] : навч. посіб. /
В. Л. Клеєвська, В. В. Кручина, О. О. Поліщук. – Х. :
Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т»,
2016. – 80 с.

ISBN 978-966-662-477-5

Висвітлено питання радіоактивних перетворень речовини, впливу іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти, нормування радіаційної безпеки та захисту людини від впливу радіації.

Для студентів вищих навчальних закладів напрямку підготовки «Екологія, охорона навколишнього середовища і природокористування».

Іл. 8. Табл. 14. Бібліогр. : 4 назви

УДК 504.5 (075.8)
ББК 20.1 я 73

© Клеєвська В. Л., Кручина В. В.,
Поліщук О. О., 2016
© Национальный аерокосмический
университет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2016

ISBN 978-966-662-477-5

1 ПРЕДМЕТ РАДІАЦІЙНОЇ ЕКОЛОГІЇ І ЇЇ ЗАВДАННЯ

Радіаційна екологія — це наука, що вивчає закономірності накопичення і міграції радіонуклідів у біосфері та екосистемі, а також вплив радіонуклідів на біоценози.

Радіаційна екологія обґрунтовує принципи ефективного радіаційного та екологічно безпечного здійснення життєдіяльності людини на територіях, що піддаються радіаційному забрудненню.

Розвиток радіаційної екології пов'язано:

- з проведенням ядерних випробувань, які супроводжуються випадінням продуктів миттєвого розпаду, що включаються в біологічний кругообіг за участю тварин, рослин і людини;
- інтенсивним розвитком ядерної енергетики;
- використанням радіаційних технологій в різноманітних галузях промисловості;
- наслідками радіаційних аварій і глобальних катастроф (на прикладі Чорнобильської АЕС).

З усіх видів антропогенного забруднення навколишнього середовища (НС) — хімічного, біологічного, електромагнітного та інфразвукового, вібраційного, шумового, теплового забруднення синтетичними речовинами тощо — радіаційне залишається найзагадковішим і складним для сприйняття і розуміння через:

- 1) складні фізичні і хімічні процеси, що відбуваються на рівні атома або молекули;
- 2) своєрідні численні одиниці вимірювання радіоактивності;
- 3) несталі критерії і норми впливу на населення і навколишнє середовище;
- 4) невизначеність наслідків опромінення організму малими дозами радіації тощо.

Радіаційне забруднення біосфери є одним з тяжких видів впливу людини на навколишнє середовище. Воно може бути пов'язане з випробуванням ядерної зброї — ядерними вибухами; витоком радіації в результаті аварій на підприємствах з виробництва та збагачення ядерного палива; при транспортуванні ядерних матеріалів; на підприємствах з поховання ядерних відходів; при видобутку радіоактивних руд.

Швидкий розвиток ядерної енергетики і широке впровадження джерел іонізуючого випромінювання (ІВ) у різних галузях науки, техніки і народного господарства створили потенційну загрозу радіоактивної небезпеки для людини і забруднення НС радіоактивними речовинами. Для проведення оцінки цієї небезпеки необхідне чітке уявлення про масштаби забруднень НС, реальні механізми дії радіації, наслідки та ефективні заходи захисту.

Тому основними завданнями радіоекології є:

- дослідження шляхів розповсюдження радіоактивних ізотопів в екосистемі;
- вплив радіації на біосистему;
- дослідження тривалого впливу на живі організми малих доз радіації і прогнозування віддалених наслідків;
- вивчення виживання і адаптації біоценозу в умовах хронічного опромінення радіацією;
- радіоекологічний моніторинг — спостереження за зміною стану навколишнього середовища під впливом радіації;
- вирішення проблем з похованням, транспортуванням та утилізацією радіоактивних відходів;
- питання захисту від іонізуючих випромінювань, контролю об'єктів та оповіщення населення про підвищення радіаційної небезпеки територій, що піддалися зараженню;
- вирішення екологічних проблем ядерної енергетики та зняття АЕС з експлуатації.

Відкриття Вільгельмом Конрадом Рентгеном у 1895 році Х-променів, які згодом було названо рентгенівськими (рентгеновими), і повідомлення 24 лютого 1896 на засіданні Французької академії наук професора Анрі Беккереля про те, що сполуки урану випускають промені, що мають властивість іонізувати повітря, яке потім було названо природною радіоактивністю, стало початком розвитку ядерної фізики, радіаційної біології, екології.

Відкриттям А. Беккереля зацікавилися найвидатніші вчені того часу, серед яких в першу чергу — Марія і П'єр Кюрі, Е. Резерфорд і Ф. Содді. Згодом було відкрито багато інших радіоактивних елементів, але увагу дослідники зосередили навколо трьох з них — урану, торію і радію. Усе це привело до зародження абсолютно нової науки — ядерної фізики, бурхливий розвиток якої почався уже в новому ХХ столітті і привів зрештою до створення керованих ядерних реакторів і атомної зброї. Це сталося в сорокових роках минулого століття спочатку в США, а потім — у Радянському Союзі. Таким чином, 40-ві роки ХХ століття можна вважати початком вступу людства в атомну еру.

Інтенсивні випробування супердержавами ядерної та термоядерної зброї в 50 — 60-х роках і швидкий розвиток атомної енергетики призвів до викидів у біосферу величезних мас радіоактивних речовин. Крім цього забруднення навколишнього середовища радіонуклідами є наслідком проведення вибухів атомних зарядів у мирних цілях.

До інших джерел радіоактивного забруднення, які порушують радіаційний фон, що склався на нашій планеті за мільйони років, слід віднести видобування і перероблення уранових і торієвих руд, виробництво ядерної зброї, експлуатацію ядерних реакторів на судах,

дослідницькі роботи в галузі ядерної фізики, а також застосування радіоізотопів у науці, промисловості, сільському господарстві та медицині.

Перелічені фактори свідчать про те, що мільйони людей у світі перебувають зараз у несприятливій радіаційній обстановці, що стало особливо відчутно після аварії на Чорнобильській АЕС у середині вісімдесятих років, коли значно збільшився глобальний радіаційний фон.

У зв'язку з цим вивчення процесів накопичення радіоактивних речовин організмами, їхньої міграції у біосфері, взаємодії живих організмів один з одним і з середовищем існування в умовах радіоактивного забруднення набуває все більшої актуальності. Ці питання вже протягом півстоліття вивчає одна з галузей екології — радіаційна екологія. Найбільш відомими вченими, що вивчали проблеми впливу радіоактивних речовин на популяції живих організмів та екосистеми в цілому, були М. В. Тимофєєв-Ресовський, Д. О. Криволуцький, В. Є. Соколов, М. В. Куліков, І. В. Молчанова та ін.

2 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ БІОЛОГІЧНОЇ ДІЇ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

2.1 Будова атома. Поняття радіоактивності

АТОМ — найменша частинка хімічного елемента, яка зберігає усі його властивості, його розміри — 10^{-8} см. Він складається з позитивно зарядженого ядра і негативно заряджених електронів, що рухаються у вигляді електронної хмари електронними орбіталями. Атом у цілому є електронейтральним.

ЕЛЕКТРОН - стійка елементарна частинка з масою спокою, що дорівнює 0,000548 атомної одиниці маси (а.о.м.) або $9,1 \cdot 10^{-28}$ грам. Електрон несе один елементарний негативний електричний заряд, що становить $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, який в ядерній фізиці прийнятий за одиницю.

Електрони переміщуються по еліптичних орбітах, утворюючи електронну оболонку атома у вигляді хмарки, вони групуються на тій чи іншій електронній орбіті залежно від енергії. Кількість електронних орбіталей коливається від однієї до семи відповідно до груп хімічних елементів Періодичної системи Д. І. Менделєєва, позначаються вони буквами латинського алфавіту.

Ядра атомів складаються з позитивно заряджених частинок — п р о т о н і в і нейтральних в електричному відношенні часток — н е й т р о н і в, які в цілому називаються н у к л о н а м и. Вони знаходяться у постійному русі і між ними діють внутрішньоядерні сили тяжіння. Кількість протонів у ядрі дорівнює порядковому номеру елемента в Періодичній системі Д. І. Менделєєва і позначається в лівому нижньому кутку символу елемента буквою Z, а сумарна кількість протонів і нейтронів

- у лівому верхньому кутку і позначається буквою М. Вона відповідає атомній масі хімічного елемента. Наприклад: ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Протон (p) — стійка елементарна частинка з масою спокою, що дорівнює 1,00758 а.о.м. ($1,6725 \cdot 10^{-24}$ г) (це приблизно в 1840 разів більше маси спокою електрона), має один елементарний заряд, що дорівнює заряду електрона.

Нейтрон (n) — електрично нейтральна частинка, маса спокою якої дорівнює масі спокою протона (1 а.о.м). Унаслідок своєї електричної нейтральності нейтрон не відхиляється під впливом магнітного поля, не відштовхується атомним ядром, має велику проникну здатність і біологічну ефективність.

Таким чином, атоми хімічних елементів є електронейтральними. При додаванні електронам ззовні додаткової енергії вони можуть переходити з одного енергетичного рівня (орбіти) на інший або навіть покидати межі даного атома. Атоми, що мають надлишок енергії, називаються збудженими. Перехід електронів із зовнішніх орбіт на внутрішні супроводжується рентгенівським випромінюванням. При сильних електричних впливах електрони вириваються з атома, вилітають за його межі, атом перетворюється в позитивний іон, а атом, що приєднав один або кілька електронів, — у негативний. Процес утворення іонів з нейтральних атомів називається іонізацією.

У природі більшість хімічних елементів складається із суміші атомів з різною кількістю нейтронів, але з постійною кількістю протонів - такі атоми називаються ізотопами. Атоми хімічного елемента з однаковим масовим числом, але ядра яких знаходяться в різному енергетичному стані, називаються ізомерами. Ядра всіх ізотопів хімічних елементів прийнято називати нуклідами. Наприклад: елемент урану складається з ізотопів ${}^{238}\text{U}$ — 98,5% і ${}^{235}\text{U}$ — 1,5%. Ізотопи розділяються на дві групи: стабільні та радіоактивні. Радіонукліди — це радіоактивні атоми з даним масовим числом (сумарною кількістю протонів і нейтронів) і атомним номером або з даним енергетичним станом атомного ядра (для ізомерів).

РАДІОАКТИВНІСТЬ — перетворення атомних ядер одних хімічних елементів в ядра інших хімічних елементів з виділенням енергії у вигляді електромагнітного випромінювання (гамма- і рентгенівське випромінювання) і корпускулярних частинок (альфа-, бета-, нейтронне, позитронне випромінювання).

Радіоактивні випромінювання, що відбуваються в природі без зовнішнього впливу, називаються природною радіоактивністю, а в речовинах, які отримані штучно під впливом альфа-, нейтронного випромінювань (через ядерні реакції), — штучною або наведеною радіоактивністю. Наразі відомі три природних радіоактивних ряди:

1. Урану-радію — ${}_{92}^{238}\text{U}$ і ${}_{88}^{226}\text{Ra}$, які після восьми альфа- і шести бета-розпадів перетворюються в стабільний ізотоп свинцю — ${}_{82}^{208}\text{Pb}$.

2. Торію — ^{232}Th , який після шести альфа- і чотирьох бета-розпадів перетворюється в стабільний ізотоп свинцю.

3. Актинію-урану — $^{235}_{92}\text{U}$ і $^{235}_{89}\text{Ac}$, які в результаті семи альфа- і чотирьох бета-розпадів також перетворюються в стабільний ізотоп свинцю.

2.2 Одиниці радіоактивності

Швидкість ядерних перетворень характеризується активністю — кількістю ядерних перетворень в одиницю часу. У системі СІ за одиницю активності радіонуклідів приймається одиниця бекерель (Бк), що дорівнює одному ядерному перетворенню за 1 секунду:

$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ розп./с.}$$

Застосовуються також кратні величини:

$$\text{МБк} = 10^6 \text{ Бк};$$

$$\text{ГБк} = 10^9 \text{ Бк};$$

$$\text{ТБк} = 10^{12} \text{ Бк};$$

$$\text{ПБк} = 10^{15} \text{ Бк.}$$

Позасистемною одиницею активності радіонуклідів є одиниця Кюрі (Кі) — це така кількість радіоактивних речовин (РР), у якій кількість радіоактивних перетворень за 1 секунду дорівнює $3,7 \cdot 10^{10}$. Ця величина відповідає радіоактивності 1 г радію.

$$1 \text{ Кі} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ розп./с} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк.}$$

Застосовуються також частинні величини:

$$\text{мКі} = 10^{-3} \text{ Кі};$$

$$\text{мкКі} = 10^{-6} \text{ Кі};$$

$$\text{нКі} = 10^{-9} \text{ Кі};$$

$$\text{пКі} = 10^{-12} \text{ Кі.}$$

Одиницями питомої активності або концентрації, тобто активності на одиницю маси або об'єму є такі величини: Кі/мл, Кі/г, Бк/г, Бк/мл та ін.

Одиницею гамма-активності радіоактивних джерел є еквівалент 1 мг радію. Міліграм еквівалент радію (мг-екв. радію) дорівнює активності будь-якого радіоактивного препарату, гамма-випромінювання якого створює за однакових умов таку ж потужність експозиційної дози, як гамма-випромінювання 1 мг радію Державного еталона при застосуванні платинового фільтра товщиною 0,5 см на відстані 1 см від джерела. Точкове джерело в 1 мг (1 мКі) радію створює потужність експозиційної дози 8,4 Р/год. Цю величину називають іонізаційною гамма-сталого радію і позначають символом K_γ .

Наприклад, гамма-стала для Со-60 дорівнює 13,5 Р/год. Це означає, що активність Со-60 у 1,6 раза вище, ніж 1 мг (1 мКі) радію. Гамма-еквівалент будь-якого ізотопу М пов'язаний з його активністю А (мКі) через іонізаційну гамма-сталу радію співвідношеннями

$$M = A \cdot K_{\gamma} / 8,4; M = M \cdot 8,4 / K_{\gamma}.$$

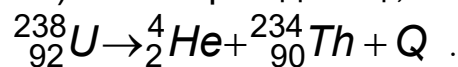
Ці співвідношення дозволяють зробити перехід від активності РР, вираженої в мг-екв. радію, до активності, вираженої в мКі, і навпаки.

2.3 Типи ядерних перетворень. Взаємодія випромінювання з речовиною

Ядра атомів у стабільному стані стійкі, але можуть змінювати свій стан при порушенні певного співвідношення протонів і нейтронів. Якщо в ядрі занадто багато протонів або нейтронів, то такі ядра нестійкі і зазнають радіоактивних перетворень, унаслідок яких змінюється склад ядра, тобто ядро атома одного хімічного елемента перетворюється в ядро атома іншого хімічного елемента. Це явище називається радіоактивністю, а сам процес — ядерним (радіоактивним) розпадом, або ядерним перетворенням.

2.3.1 Альфа-розпад

Цей вид ядерних перетворень супроводжується випусканням з ядра альфа-частинки, що являє собою ядро атома гелію, це призводить до зменшення порядкового номера нового хімічного елемента на дві одиниці і масового числа (атомної маси) на чотири одиниці, наприклад:



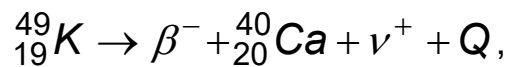
Такий вид ядерних перетворень характерний для природних радіоактивних елементів з великими порядковими номерами: ядра з порядковими номерами більше 82, за рідкісним винятком, альфа-активні (${}^{60}\text{Co}$). Перетворення їхніх ядер супроводжуються випусканням альфа-частинок, що являють собою ядра атомів гелію ${}_2^4\text{He}$, при цьому ядро радіоактивного елемента втрачає два протони і два нейтрони, таким чином, елемент, що утворюється, зсувається вліво відносно вихідного на дві клітинки Періодичної системи Д. І. Менделєєва.

Альфа-частинки мають позитивний заряд, швидкість їх поширення — 20000 км/с, мають велику масу — 4,003 а.о.м., велику енергію — 2...11 МеВ (мегаелектронвольт), проникна здатність у повітрі становить 2...10 см, у біологічних тканинах — кілька десятків мікрометрів.

Проходячи крізь речовину, альфа-частинка, що має позитивний заряд, поступово втрачає свою енергію через взаємодію з електронами атомів або інших негативно заряджених частинок, спричиняючи їхню іонізацію, частина енергії втрачається на збудження атомів і молекул. У повітрі на 1 см шляху альфа-частинка утворює 100 — 250 тис. пар іонів, при потраплянні в організм людини і тварин вони є вкрай небезпечними для них (щільноіонізуюче радіоактивне випромінювання).

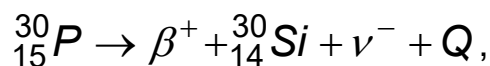
2.3.2 Бета-розпад

Деякі природні та штучні радіоактивні елементи розпадаються з випусканням електронів і позитронів. Електрони і позитрони, що випускаються ядрами, називаються бета-частинками або бета-випромінюванням, а самі ядра — бета-активними. Якщо в ядрі є надлишок нейтронів, то відбувається електронний бета-розпад. При цьому виді ядерних перетворень один з нейтронів перетворюється в протон, а ядро випускає електрон і антинейтрино і виникає ядро нового елемента при незмінному масовому числі. Виліт електронів супроводжується викидом антинейтрино — елементарної частинки з масою менше 1/2000 маси спокою електрона, дочірній елемент зсувається в таблиці Д. І. Менделєєва на одне поле. Наприклад:



де ν^{+} — антинейтрино.

При надлишку протонів відбувається позитронний (β^{+}) бета-розпад. Він супроводжується утворенням нового елемента, розташованого в Періодичній таблиці Д. І. Менделєєва на одну позицію вліво від материнського; протон перетворюється в нейтрон, енергія виділяється також у вигляді елементарної частинки — нейтрино. Позитрон зриває з електронної оболонки електрон, утворює пару позитрон — електрон, при взаємодії яких утворюються два гамма-кванти (процес анігіляції). Наприклад:



де Q — енергія двох гамма-квантів. Взаємодія між електронами і речовиною також приводить до процесів іонізації і збудження атомів і молекул. При взаємодії з орбітальними електронами бета-частинка відхиляється від початкового шляху (однойменні заряди відштовхуються), тому глибина проникнення бета-частинок у речовину менша, ніж довжина пробігу.

Бета-частинки (бета-випромінювання) поширюються зі швидкістю світла, проникна здатність у повітрі становить приблизно 25 метрів, а в біологічних тканинах — близько 1 см, у повітрі на 1 см пробігу утворює 50 —100 пар іонів (рідкоіонізуюче випромінювання).

2.3.3 Гамма- і рентгенівське випромінювання

Випромінювання, що виникає при перебудові ядер атомів радіоактивних елементів, є також моноенергетичним (тобто має лінійний спектр) або характеризується обмеженим числом фіксованих енергій (до декількох МеВ).

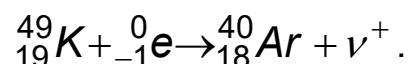
Гальмівне і характеристичне випромінювання зазвичай належать до рентгенівських променів, а випромінювання, що утворюється при ядерних перебудовах, — до гамма-випромінювання. При такому розподілі спектри рентгенівських і γ -променів перекриваються. Немає принципових відмінностей між ними і за фізичними властивостями. Часто, незалежно від походження, випромінювання з енергією фотонів до 250 кеВ відносять до рентгенівського випромінювання, а вище 250 кеВ — до гамма-випромінювання. За довжиною хвилі ця межа відповідає приблизно 0,05 Å.

Гамма-випромінювання — це короткохвильове електромагнітне випромінювання, що поширюється прямолінійно зі швидкістю світла, енергія цього випромінювання коливається від 0,01 до 3 МеВ. Гамма-кванти можуть випускатися при альфа- і бета-розпадах ядра природних і штучних радіонуклідів. Гамма-кванти не мають маси спокою, не несуть заряду, тому їхня проникна здатність у повітрі становить 150 метрів, у біологічних тканинах — десятки сантиметрів.

Рентгенівське випромінювання також є електромагнітним випромінюванням, воно виникає при гальмуванні електронів в електричному полі ядра атомів (гальмівне рентгенівське випромінювання) або при перебудові електронних оболонок атомів при іонізації і збудженні атомів і молекул (характеристичне рентгенівське випромінювання).

2.3.4 К-захват електронів ядром

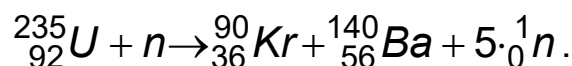
При цьому процесі протон ядра атома захоплює електрон з найближчої до ядра К-орбіталі або рідше — з L-орбіталі. У цьому випадку має місце перетворення ядра, подібне до позитронного розпаду, наприклад:



При К-захваті єдиною частинкою, що вилітає, є антинейтрино, також виникає характеристичне рентгенівське випромінювання.

2.3.5 Мимовільне ділення ядер

Цей процес спостерігається у радіоактивних елементів з великими атомними номерами — ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$ та ін. при захопленні їхніми ядрами повільних нейтронів:



Одні й ті ж ядра при діленні утворюють різну кількість осколків і надмірну кількість нейтронів.

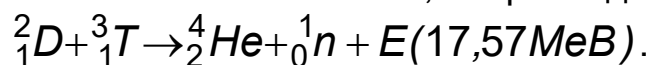
Нейтрони не несуть заряду (електронейтральні), їхня проникна здатність у повітрі та в біологічних тканинах дуже велика, вони є щільно іонізуючими, атомні ядра при поглинанні нейтронів стають нестійкими,

розпадаються з випусканням протонів, альфа-частинок, фотонів гамма-випромінювання, осколків ядра.

У результаті взаємодії з речовинами повільні нейтрони (0,025...0,1 MeV) проникають в ядро атома, де вони «захоплюються» або утримуються. Швидкі нейтрони (з енергією понад 0,1 MeV) взаємодіють шляхом пружного зіткнення з ядром.

2.3.6 Термоядерні реакції

Термоядерні реакції проходять при температурах, що досягають декількох мільйонів градусів. У цих умовах ядра легких елементів, рухаючись з великими кінетичними енергіями, будуть зближуватися і об'єднуватися в ядра більш важких елементів, наприклад:



На цьому принципі основана дія термоядерних зарядів, що складаються з плутонієвого запалу (він призначений для створення високої температури), і суміші ізотопів водню — дейтерію і тритію.

т-мезони — це негативно заряджені елементарні частинки, маса яких в 273 рази більше маси електрона, енергія становить 25...100 MeV, при взаємодії з речовинами вони спричиняють руйнування ядер з вильотом нейтронів, альфа-частинок, іонів літію, берилію та ін. (мікроривбух ядер).

Швидкістю втрати енергії визначається ще одна важлива властивість іонізуючих випромінювань — проникна здатність. Глибина проникнення іонізуючих випромінювань залежить, з одного боку, від складу і щільності об'єкта, що опромінюється, а з іншого — від природи і властивостей випромінювання. Чим більша величина лінійної передачі енергії (ЛПЕ), тим менше проникна здатність випромінювання в даній речовині.

За міру проникної здатності для прискорених заряджених частинок приймають відстань, на якій частинка сповільнюється до енергії, близької до середньої енергії теплового руху. Для квантів рентгенівських і гамма-променів як міру проникної здатності приймають відстань, на якій потужність випромінювання падає в e раз (e — основа натуральних логарифмів).

Випромінювання з високою проникною здатністю називаються жорсткими. Якщо ж проникна здатність мала, то таке випромінювання називають м'яким. Однак ці терміни досить відносні, оскільки, наприклад, бета-випромінювання порівняно з альфа-частинками буде жорстким, а порівняно з гамма-променями — м'яким.

Усі види іонізуючих випромінювань прямо або побічно спричиняють іонізацію або збудження атомів речовини, і тому первинні зміни, що виникають, якісно не залежать від виду випромінювання. Однак при опроміненні в однакових дозах (тобто при одній і тій ж кількості поглиненої

одиноцею маси речовини енергії) виникають кількісно різні біологічні ефекти, що пов'язано з ЛПЕ.

Залежно від величини ЛПЕ всі іонізуючі випромінювання ділять на рідко- і щільноіонізуючі. До рідкоіонізуючих належать усі види випромінювання, що мають ЛПЕ менше 10 кеВ/мкм. Це в основному електрони, а також гамма- і рентгенівські промені, іонізуюча дія яких також здійснюється електронами. До щільноіонізуючого (ЛПЕ>10 кеВ/мкм) відносять протони, α -частинки та інші важкі частинки, а також нейтрони, біологічна дія яких реалізується за рахунок вторинних прискорених заряджених частинок. Рідкоіонізуючі види випромінювань характеризуються порівняно високою проникною здатністю, а щільноіонізуюче (за винятком нейтронів) проникає у тканини на невелику глибину. Так, альфа-частинки мають дуже низьку проникну здатність. Навіть у повітрі їхній пробіг дорівнює декільком сантиметрам, а більш щільні речовини (наприклад, тканина або папір) непроникні для альфа-частинок при її товщині в долі міліметра. Потік альфа-частинок, що падає на тіло людини, через малу проникну здатність цілком поглинається у верхніх шарах шкіри. Унаслідок цього альфа-випромінювання при зовнішньому радіаційному впливі абсолютно безпечно для людини. Однак якщо альфа-активний ізотоп потрапить з їжею, водою або повітрям усередину організму, то небезпека буде дуже велика, оскільки альфа-частинки, що випускаються ізотопом усередині тканин, спричинять дуже сильну іонізацію атомів і молекул, а отже, і сильне пошкодження біологічних субстратів, у яких безпосередньо поглинається енергія.

Проникна здатність бета-частинок приблизно в сто разів більше, ніж альфа-частинок. У повітрі вони проходять кілька метрів, у твердих середовищах — кілька міліметрів. У зв'язку з цим бета-частинки становлять певну небезпеку для життя і здоров'я людей не тільки при попаданні всередину організму, але і при аплікації на шкірні покриви і слизові оболонки, унаслідок чого можуть розвинутися серйозні місцеві променеві ураження.

Проникна здатність рентгенівських променів і гамма-квантів дуже велика. Вони глибоко проникають навіть у щільні середовища, а тіло людини «пронизують» наскрізь. Наприклад, гамма-кванти з високою енергією можуть проходити через шар землі або бетону, що має товщину кілька метрів. Дуже велика проникна здатність, порівнянна з проникною здатністю гамма-променів, виявляється у нейтронів. Випромінювання з високою проникною здатністю становлять небезпеку для людини при зовнішньому опроміненні.

3 ПОНЯТТЯ ДОЗИМЕТРІЇ

Ступінь радіаційного ураження біологічних об'єктів визначається дозою опромінення. Тому основним завданням дозиметрії є визначення доз опромінення живих організмів.

Для визначення кількості рентгенівського і гамма-випромінювання вимірюють експозиційну дозу ІВ.

3.1 Експозиційна доза випромінювання

Вона характеризує іонізаційну здатність цих видів ІВ у повітрі. Практично найчастіше застосовується позасистемна одиниця — рентген (Р). Рентген — така кількість енергії рентгенівського або гамма-випромінювання, яке в 1 см³ повітря при атмосферному тиску 760 мм рт. ст. і температурі 0 °С утворює 2,08·10⁹ пар іонів. Рентген має похідні одиниці — мР, мкР, кР, МР та ін.

У Міжнародній системі одиниць (СІ) за одиницю експозиційної дози прийнятий кулон на кілограм (Кл/кг), тобто така кількість енергії рентгенівського і гамма-випромінювання, яка в 1 кг сухого повітря утворює іони, що несуть сумарний заряд в один кулон електрики кожного знака:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}; 1 \text{ Кл/Кг} = 3876 \text{ Р.}$$

3.2 Поглинена доза випромінювання

Для визначення ефекту впливу ІВ у біологічних тканинах, який залежить від величини поглиненої енергії, застосовується позасистемна одиниця рад (rad — radiation absorbent dose) — це така доза, при якій в 1 г маси речовини, що опромінюється, поглинається енергія будь-якого виду ІВ, яка дорівнює 100 ерг (1 рад = 100 ерг/г). Рад має похідні одиниці — частинні та кратні: мрад, мкрад, крад, Мрад та ін.

У Міжнародній системі одиниць СІ за одиницю поглиненої дози прийнято величину грей — Гр, тобто таку поглинену дозу, при якій в 1 кг маси речовини поглинається енергія випромінювання, що дорівнює 1 джоулю (Дж):

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг.}$$

Грей має також частинні та кратні величини: мГр, мкГр, кГр, МГр.

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}; 1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр.}$$

Поглинену дозу в радах визначають розрахунковим шляхом за формулою

$$D_{\text{погл}} = D_{\text{експ}} \cdot K,$$

де K — коефіцієнт поглинання, для повітря $K = 0,88$, для кісткової тканини $K = 2 - 5$, для жирової тканини $K = 0,6$, для живого організму в цілому $K = 0,93$.

3.3 Відносна біологічна ефективність ІВ

Однакові дози різних видів іонізуючого випромінювання по-різному впливають на організми, це зумовлено неоднаковою густиною іонізації — питомою іонізацією. Чим вище питома іонізація, тим більший ефект біологічної дії опромінення. Тому одна і та ж поглинена доза різних видів ІВ призводить до різного ступеня ураження організму. У зв'язку з цим у радіобіології введено поняття відносної біологічної ефективності (ВБЕ), або коефіцієнта якості (КЯ), або вагових коефіцієнтів (згідно з НРБУ-97) іонізуючих випромінювань. Середні значення їх такі:

- фотони будь-яких енергій — 1;
- електрони і мюони будь-яких енергій — 1;
- протони з енергією понад 2 МеВ — 5;
- нейтрони з енергією:
 - менше 10 кеВ (повільні, теплові та проміжні) — 5;
 - від 10 до 100 кеВ — 10;
 - від 100 кеВ до 2 МеВ (швидкі) — 20;
 - від 2 МеВ до 20 МеВ (швидкі) — 10;
 - понад 20 МеВ (швидкі) — 5;
- альфа-частинки, осколки поділу, важкі ядра — 20.

Примітка: мюони — елементарні заряджені частинки з масою близько 207 електронних мас (μ — мю + мезони). Швидкі нейтрони — з енергією більше 100 кеВ, проміжні — від 100 до 1 кеВ, повільні — менше 1 кеВ, теплові — близько 0,025 еВ.

Для оцінювання біологічної ефективності різних видів випромінювання введено поняття еквівалентної або біологічної дози ($D_{\text{екв}}$ або $D_{\text{біол}}$):

$$D_{\text{екв(біол)}} = D_{\text{погл}} \cdot \text{ВБЕ(КЯ)}.$$

Позасистемна одиниця еквівалентної дози - біологічний еквівалент рентгена — бер (1 бер = $1 \cdot 10^{-2}$ Дж/кг). Одиниця бер — це така доза будь-якого виду іонізуючого випромінювання, при якій в біологічному середовищі створюється біологічний ефект, подібний до ефекту при дозі рентгенівського або гамма-випромінювання в 1 рад. Дана одиниця має частинні та кратні величини — мбер, мкбер, кбер, Мбер.

У системі СІ одиниця еквівалентної дози — зіверт (Зв). 1 Зв = 100 бер.

Якщо біологічний об'єкт опромінюється різними видами випромінювання одночасно (змішане джерело ІВ), то еквівалентна доза опромінення дорівнює сумі поглинених доз від кожного виду випромінювання, помноженої на середній коефіцієнт якості (КЯ або ВБЕ).

Різні органи і тканини мають різну чутливість до випромінювання. Для випадків нерівномірного опромінення різних органів або тканин людини введено поняття ефективно еквівалентної дози ($D_{\text{еф}}$):

$$D_{\text{еф}} = \sum W \cdot D_{\text{екв}},$$

де $D_{\text{еф}}$ — ефективна еквівалентна доза;

W — коефіцієнт радіаційного ризику (таблиця 3.1);

$D_{\text{екв}}$ — середня еквівалентна доза в органі чи тканині.

Одиницею ефективної еквівалентної дози є бер і Зв (зіверт).

Таблиця 3.1 — Коефіцієнти радіаційного ризику w для різних органів і тканин людини

Орган або тканина	w
Гонади	0,25
Молочна залоза	0,15
Червоний кістковий мозок	0,12
Легені	0,12
Щитовидна залоза	0,03
Поверхня кістки	0,03
Усі інші органи	0,30
Увесь організм у цілому	1,0

Крім перелічених понять, у радіаційній безпеці широко використовуються терміни річної і колективної ефективної або еквівалентної дози.

Річна ефективна (еквівалентна) доза — це сума ефективної (еквівалентної) дози зовнішнього опромінення, отриманої за календарний рік, і очікуваної дози внутрішнього опромінення, зумовленої надходженням за цей же рік в організм радіонуклідів. Колективна ефективна доза — це міра колективного ризику виникнення стохастичних ефектів опромінення, що дорівнює сумі індивідуальних колективних доз; вона вимірюється в людино-зіверт (люд.·Зв).

3.4 Потужність дози і одиниці її вимірювання

У біологічному відношенні важливо знати не тільки дозу випромінювання, яку отримав опромінюваний об'єкт, а й дозу, отриману в одиницю часу. Сумарна доза, що значно перевищує летальну, але отримана протягом тривалого періоду часу, не призводить до загибелі тварини, а доза, менша за смертельну, але отримана в короткий період часу, може спричинити променеву хворобу різного ступеня тяжкості.

Потужність дози (P) — це доза випромінювання (D) віднесена до одиниці часу t :

$$P = D/t.$$

Потужність експозиційної дози в системі СІ вимірюється в амперах на кілограм (А/кг), позасистемна одиниця — рентген на годину (Р/год) або в інших частинних і кратних величинах:

$$1 \text{ А/кг} = 3876 \text{ Р/с}, \quad 1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}.$$

Потужність поглиненої дози опромінення в системі СІ вимірюється в Вт/кг, Гр/с або в інших кратних і частинних величинах. Позасистемною одиницею поглиненої дози є рад/с, а також інші кратні і частинні величини. Для вимірювання потужності дози випромінювання використовують ретгенометри типу ДП-5, УСІТ, ДРГЗ, СРП 68-01 та ін.

Під радіаційним фоном розуміють саме потужність експозиційної дози іонізуючих випромінювань у повітрі, рівень його для території України становить 4...40 мкР/год (мікрорентген на годину).

Згідно з рекомендаціями Міжнародної комісії з радіаційного захисту (МКЗР) і Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) радіаційний рівень, що відповідає природному фону 0,1...0,2 мкЗв/год (10...20 мкР/год), вважають нормальним рівнем, рівень 0,2...0,6 мкЗв/год (20...60 мкР/год) — допустимим, а рівень понад 0,6...1,2 мкЗв/год (60...120 мкР/год) з урахуванням ефекту екранування — підвищеним.

Якщо говорити про життєво необхідну радіацію, проведені останнім часом експерименти з рослинами і тваринами показали, що ізоляція організму від природної радіації спричинює в ньому уповільнення найфундаментальніших життєвих процесів, у тому числі — поділ клітин і зменшення міжклітинного інформаційного об'єму.

Іонізуюче випромінювання спричинює не тільки іонізацію, а й певні порушення, енергія збудження від однієї молекули передається іншій молекулі у вигляді вторинного біогенного випромінювання в області ультрафіолетового випромінювання (УФВ). Це випромінювання має дивовижні властивості — удвічі збільшується схожість насіння, розпускаються пуп'янки дерев, що перебувають у сплячці, стимулюється розвиток зародків у яйцях та ін.

Існують й інші дослідження. Уважають, що спадкові порушення, спричинені малими дозами радіації, не підпорядковуються лінійній залежності «доза-ефект». Нобелівський висуванець, канадський учений А. Петкау, у своїх дослідженнях показав, що опромінення при низькій потужності дози може спричинити той самий руйнівний ефект у мембранах живої клітини, який виникає при інтенсивному опроміненні дозою в десятки і сотні разів більшою.

Визначення межі життєво необхідною радіації є предметом додаткових досліджень з радіаційної біології.

3.5 Закон радіоактивного розпаду

Кількість будь-якого радіоактивного ізотопу з часом зменшується внаслідок радіоактивного розпаду (перетворення ядер). Для кожного

радіоактивного ізотопу середня швидкість розпаду його атомів постійна. Стала радіоактивного розпаду — λ для певного ізотопу показує, яка частина ядер розпадається в одиницю часу.

Розмірність сталої розпаду виражають у зворотних одиницях часу: с^{-1} , хв^{-1} , год^{-1} та ін., щоб показати, що кількість радіоактивних ядер зменшується. Основний закон радіоактивного розпаду встановлює, що за одиницю часу розпадається завжди одна й та ж частина наявних ядер. Математично цей закон виражається рівнянням

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

де N_t — кількість радіоактивних ядер, що залишилися після часу t ;

N_0 — вихідне кількість радіоактивних ядер в момент часу $t = 0$;

e — основа натуральних логарифмів ($e = 2,72$);

λ — стала радіоактивного розпаду;

t — проміжок часу, що дорівнює $t - t_0$.

Для характеристики швидкості розпаду радіоактивних речовин (РР) на практиці користуються періодом фізичного напіврозпаду.

Період фізичного напіврозпаду ($T_{\text{фіз}}$) — це час, протягом якого розпадається половина вихідної кількості радіоактивних ядер.

Між постійною розпаду і періодом напіврозпаду є зворотна залежність, що виражається рівняннями

$$\lambda = 0,693/T, T = 0,693/\lambda.$$

Виходячи з даних рівнянь закон радіоактивного розпаду буде мати такий вигляд в математичному вираженні:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-0,693t/T}.$$

Таким чином, кількість ядер РР зменшується з часом за експоненціальним законом і графічно виражається експоненційною кривою. Із закону радіоактивного розпаду виведено важливе правило: кожне десятикратне зниження активності осколків і потужності дози гамма-випромінювання відбувається в результаті збільшення їх віку в 7 разів.

4 МЕТОДИ РЕЄСТРАЦІЇ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

4.1 Принцип дії радіометричної апаратури

Основною частиною будь-якого радіометричного приладу є детектор (лічильник), що подає в підсилювально-вимірювальну схему сигнали про надходження іонізуючих частинок або гамма-квантів. Існують іонізаційні, напівпровідникові, сцинтиляційні детектори.

4.1.1 Іонізаційні детектори

Найпростішим пристроєм цього типу є іонізаційна камера. Вона являє собою повітряний конденсатор, що складається з двох металевих пластин, розташованих на деякій відстані одна від одної, до яких прикладена різниця потенціалів (рисунок 4.1). У мережу включений гальванометр (вольтметр). За відсутності радіації струму в ланцюзі не буде, оскільки повітря є ізолятором. Радіоактивні частинки, потрапивши всередину конденсатора, іонізують повітря, перетворюючи його в провідник електрики. Сила струму вимірюється гальванометром. Між силою струму (J) і кількістю пар іонів (N), що утворилися, існує пряма залежність:

$$J = N \cdot e,$$

де e – заряд іона.

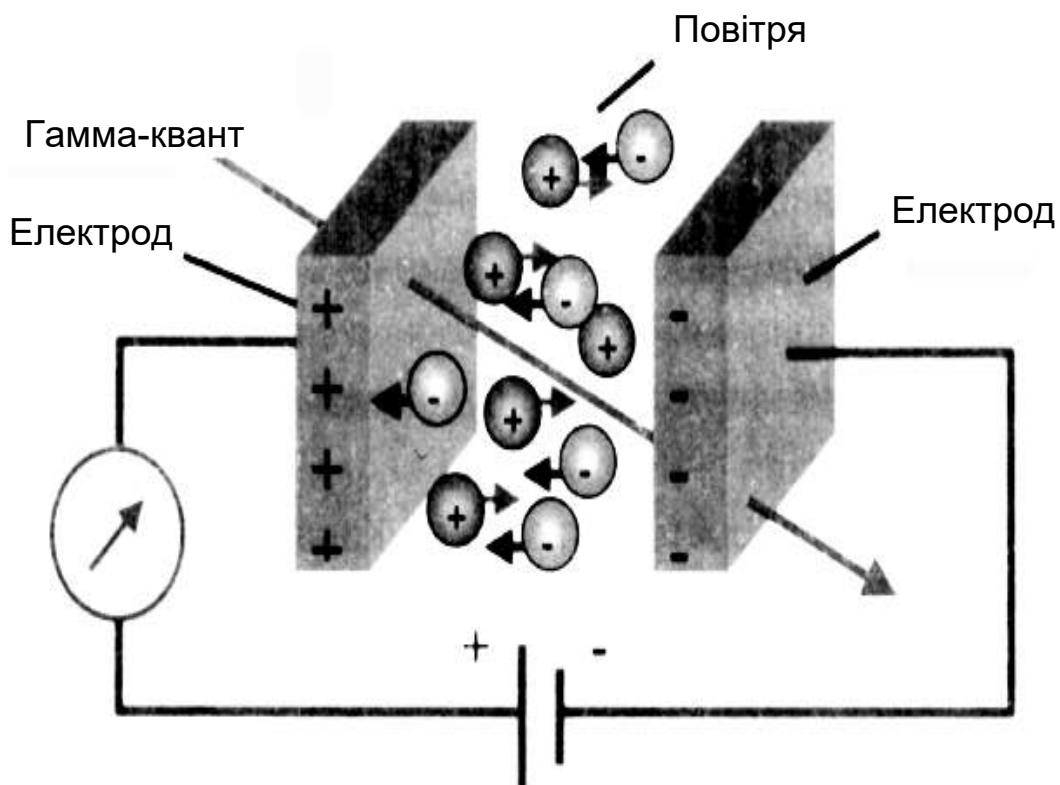


Рисунок 4.1 – Схема дії іонізаційної камери

За силою струму визначається інтенсивність випромінювання. Залежно від типу випромінювання іонізаційні камери мають ті чи інші особливості.

Лічильник Гейгера – Мюллера являє собою герметичний балон (трубку), заповнений газовою сумішшю з аргону і спирту з добавкою галоїдів. По осі трубки натягнута нитка, яка виконує функцію анода.

Катодом є внутрішнє металеве покриття балона. На електроди подається висока напруга постійного струму (400...1000 В). При попаданні всередину балона бета-частинок або електронів, вибитих зі стінок лічильника гамма-променями, відбувається іонізація газу. У результаті цього між електродами виникає лавина іонів і відбувається короточасний електричний розряд. У ланцюзі лічильника реєструється імпульс напруги (рисунок 4.2). Чутливість лічильників залежить в першу чергу від матеріалу катода, з якого гамма-промені вибивають електрони.

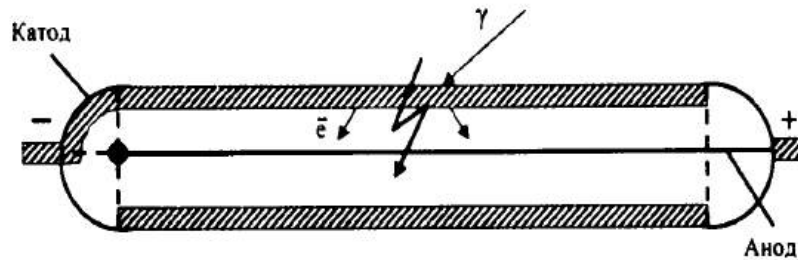


Рисунок 4.2 — Лічильник Гейгера – Мюллера

Лічильник Гейгера — Мюллера — дуже чутливий пристрій, що дозволяє реєструвати кожну заряджену частинку або гамма-квант.

4.1.2 Напівпровідникові детектори

Ці детектори схожі з іонізаційними, але роль іонізаційної камери в цьому випадку виконують тверді напівпровідники.

Напівпровідники — це кристалічні речовини, електропровідність яких при звичайній температурі має проміжне значення між електропровідністю металів ($10^6 \dots 10^4 \text{ Ом}^{-1}/\text{см}^{-1}$) і діелектриків ($10^{-10} \dots 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}/\text{см}^{-1}$). Під дією радіоактивних частинок у напівпровідникових детекторах відбувається перехід електронів з валентної зони в зону провідності. У результаті цього утворюються вільні носії зарядів: електрони (n-провідність) і дірки (p-провідність). Під дією зовнішнього електричного поля, яку прикладено до напівпровідника, електрони і дірки притягуються до відповідних електродів, зумовлюючи накопичення заряду. Останній дає імпульс напруги, який подається в підсилювально-вимірювальну схему приладу.

Як напівпровідник у радіометричних приладах найчастіше застосовують монокристали германію. З його допомогою реєструють високоенергетичні гамма- і бета-промені. Для реєстрації альфа-частинок, низькоенергетичних гамма-квантів і рентгенівських променів використовують кремнієві детектори (монокристали кремнію).

На противагу металам, у яких електропровідність зменшується із зростанням температури, у напівпровідників зі збільшенням цього параметра електропровідність різко зростає. Тому багато з напівпровідникових матеріалів потребують сильного охолодження при

роботі, що ускладнює будову приладів, їхню експлуатацію і здорожчує їхню вартість. У даний час триває постійний пошук нових напівпровідників, які можуть працювати при звичайних температурах. До таких матеріалів належать телурид кадмію, арсенід галію і йодид ртуті, які вже використовуються в найсучасніших радіометрах і спектрометрах. Оскільки щільність напівпровідникових матеріалів набагато вище густини газів, то енергія частинок, що поглинаються, у них використовується повніше, ніж у іонізаційних камерах. Тому напівпровідникові детектори характеризуються дуже високою роздільною здатністю.

4.1.3 Сцинтиляційні детектори

Сутність роботи сцинтиляційного лічильника полягає в реєстрації спалахів люмінесценції, що виникають у деяких кристалах, органічних рідинах або пластмасах при попаданні в них заряджених частинок або гамма-квантів. Спалахи в кристалі фіксуються фотокатодом і в ланцюзі з'являється імпульс електричного струму.

Однак самі собою спалахи можуть бути дуже слабкими. Для їхньої фіксації застосовуються фотоелектронні помножувачі (ФЕП).

Вони являють собою вакуумні електронні прилади з системою множення електронів, які вибиваються світловим спалахом з поверхні фотокатода (рисунок 4.3).

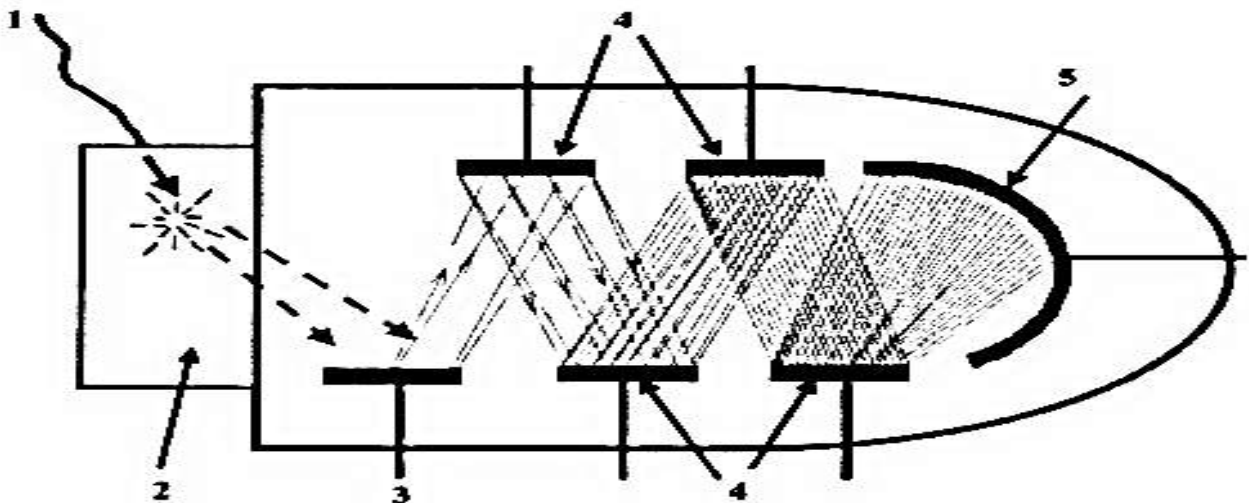


Рисунок 4.3 — Схема фотоелектронного помножувача:
1 — гамма-квант; 2 — кристал-люмінофор; 3 — фотокатод;
4 — емітери (діоди); 5 — колектор

Помножувальна система складається з декількох послідовно розташованих діодів (емітерів), що вкриті спеціальним шаром. Електрони, які бомбардують діоди, вибивають з них вторинні електрони, кількість яких

мінімум у два рази перевищує кількість первинних електронів. Таким чином, кожний наступний діод збільшує кількість електронів. З останнього діода в підсилювально-вимірювальну схему приладу надходить лавина електронів. Завдяки ФЕП сцинтиляційні лічильники мають набагато більшу чутливість порівняно з газонаповненими лічильниками.

Для реєстрації альфа-частинок як сцинтилятори (люмінофори) застосовують тонкий шар сірчистого цинку, а реєстрація бета-частинок здійснюється за допомогою кристалів антрацену, стильбену, а також сцинтилюючих пластмас. При реєстрації гамма-квантів у вітчизняних приладах успішно використовуються монокристали йодистого натрію і йодистого цезію, активовані талієм.

4.2 Завдання дозиметрії

Основне завдання дозиметрії — виявлення та оцінка ступеня небезпеки ІВ для населення, військ, невоєнізованих формувань цивільного захисту з метою забезпечення їхніх дій в різних умовах радіаційної обстановки. За допомогою дозиметрії здійснюються:

- виявлення і вимірювання експозиційної поглиненої дози опромінення для забезпечення життєздатності населення та успішного проведення рятувальних, аварійно-відновлювальних робіт в осередках уражень;
- вимірювання активності радіоактивних речовин, щільності потоку ІВ, питомої об'ємної, поверхневої активності різних об'єктів для визначення необхідності і повноти проведення дезактивації і санітарної обробки, а також для встановлення норм споживання заражених продуктів харчування;
- вимірювання експозиційної і поглиненої доз опромінення з метою визначення робото- і життєздатності населення та окремих людей у радіаційному відношенні;
- лабораторне вимірювання ступеня зараженості радіоактивними речовинами продуктів харчування, води, фуражу.

4.3 Класифікація і загальні принципи дії дозиметричних приладів

Дозиметричні прилади можна класифікувати за призначенням, типом датчиків, видом випромінювання, що вимірюється, характером електричних сигналів, які перетворюються схемою приладу.

За призначенням усі прилади поділяють на такі групи.

Індикатори — найпростіші прилади радіаційної розвідки; за їх допомогою вирішується завдання виявлення випромінювання і орієнтовної оцінки потужності дози, головним чином β - і γ -випромінювань. Такі

прилади мають найпростіші електричні схеми зі світловою та звуковою сигналізацією. Це дозиметри МКС-05, ДКГ-07 та інші.

Рентгенметри призначені для вимірювання потужності дози рентгенівського і γ -випромінювання. Вони мають діапазон вимірювання від сотих часток рентгена до декількох сот рентген на годину (Р/год). Такими приладами є ДКГ-03Д, ДКГ-07Д, МКС-05, ДКГ-02У та ін.

Радіометри застосовують для виявлення і визначення ступеня радіоактивного зараження поверхонь обладнання, зброї, обмундирування, об'ємів повітря головним чином альфа- і бета-частинками. Радіометрами можна виміряти невеликі рівні гамма-випромінювання. Такими приладами є РМ-1203, ДКГ-02У, МКГ-01-0.2, РМ-1402, МКС-3 710 та ін.

Дозиметри призначені для визначення сумарної дози опромінення, яку отримує особовий склад за час знаходження в районі дії ІВ (головним чином, гамма-випромінювання). Це дозиметри РД-1503, ДКГ-03Д та ін.

4.3.1 Дозиметр побутовий «Терра П» МКС-05

Прилад (рисунок 4.4) призначений для вимірювання: потужності еквівалентної дози (ПЕД) гамма- і рентгенівського випромінювань; еквівалентної дози (ЕД) гамма- і рентгенівського випромінювань; поверхневої густини потоку бета-частинок; часу накопичення еквівалентної дози; реального часу (таблиця 4.1).



Рисунок 4.4 — Побутовий дозиметр «Терра П» МКС-05

Таблиця 4.1 — Діапазони вимірювання та відносні основні похибки дозиметра побутового «Терра П» МКС-05

Технічні характеристики	Значення
Потужності еквівалентної дози гамма- і рентгенівського випромінювань (^{137}Cs), мкЗв/год	0,1 - 9999
Еквівалентна доза гамма- і рентгенівського випромінювань (^{137}Cs), мЗв	0,001 - 9999
Густина потоку бета-частинок ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$), 1 / (см ² /хв)	10 - 100000
Час накопичення еквівалентної дози і точність вимірювань	Від 0,1 с за 24 год
Енергетичний діапазон реєстрованого гамма- і рентгенівського випромінювань і енергетична залежність, МеВ	0,05 – 3,0
Дискретність програмування порогових рівнів:	
- за потужністю дози, мкЗв/год	0,01
- дозою, мЗв	0,01
- густиною потоку, 10 ³ см ² /хв	0,01
Часові інтервали вимірювань, с	1 - 70
Час безперервної роботи від свіжих елементів живлення, год	2000
Діапазон робочих температур, ° С	Від –20 до +50
Маса, кг	0,15
Габарити, мм	120×52×26

4.3.2 Дозиметр-радіометр пошуковий альфа-, бета-, гамма- і нейтронного, фотонного випромінювання з блоками детектування БД-1, БД-5

Призначення. Пошук джерел іонізуючого випромінювання. Радіаційна безпека і радіаційний контроль. Дозиметрія гамма- і нейтронного випромінювання.

Застосування. Акредитовані випробувальні лабораторії, спецслужби, галузеві і виробничі лабораторії радіаційного контролю.

Основні технічні характеристики приладу наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики пристрою

Характеристики	Значення
Вид випромінювання, що контролюється	Альфа-, бета-, гамма-, нейтронне
Енергетичний діапазон, меВ: - альфа-частинки - бета-частинки - гамма-частинки - нейтрони	Pu-239 0,15 — 3,5 0,02 — 3,0 теплове —14,0
Діапазон вимірювання потужності еквівалентної дози, мкЗв/год	0,05 — 10 ⁵
Діапазон вимірювання густини потоку, см·хв - альфа-частинки - бета-частинки - нейтрони, імп./с	1 — 5·10 ⁵ 10 — 10 ⁶ 0,001 — 999
Чутливість за Cs-137, імп/с на мкР/год	2,7
Склад: БД-01	Пошуковий дозиметр гамма-випромінювання на основі CsI (Тl) з фотодіодом
БД-02	Спектрометричний детектор гамма-випромінювання на основі CsI (Тl) з фотодіодом
БД-03	Детектор гамма-випромінювання на основі лічильника Гейгера - Мюллера
БД-04	Детектор нейтронів на основі лічильника ³ He (зі сповільнювачем для вимірювання дози)
БД-05	Детектор альфа- і бета-випромінювання на основі пропорційного лічильника
Діапазон робочих температур, ° С	Від –30 до +50
Живлення	Акумулятор
Маса блока обробки, г	330
Габаритні розміри блока обробки, мм	106×82×32

4.4 Вимірювання проб, заражених радіоактивними речовинами

Робота з радіометричного аналізу, що проводиться в лабораторії, складається з таких етапів:

- взяття проб і доставка їх до лабораторії;
- приготування препаратів із взятих проб;
- вимірювання активності препаратів;

- розрахунок питомої зараженості досліджуваних проб.

4.4.1 Відбирання проб для радіометричного вимірювання

Для радіометричних досліджень відбирають проби заражених середовищ (продовольства, води та ін.) у місцях найбільшого зараження, які виявляють за допомогою приладів.

При відбиранні проб необхідно пронумерувати їх, проставивши номер на банці або поліетиленовому мішку; на пробі вказують вид проби, місце її взяття, дату, години, хвилини зараження й вилучання, прізвище особи, що взяла пробу, тобто заповнюють спеціальну форму (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 — Інформація про відібрані проби (форма)

№ п/п	Вид проби	Місце відбору	Дата, число, хвилини зараження	Дата, число, хвилини відбору	П.І.Б.	Примітка
1	М'ясо	Продовольчий склад				

Відбирання проб води з водойми або водостоку проводиться в об'ємі 0,5 л водозабірником з поверхневого і донного шарів у місцях зі скаламученим донним ґрунтом.

Проби снігу беруть на рівній ділянці на всю глибину снігового покриву. Місце відбирання проб має бути на недоторканому сніговому покриві. Пробу поміщують у скляну банку, що щільно закривається (0,5 л).

Відбирання проб хліба, свіжих овочів, фруктів проводять поштучно з верхнього ряду або з поверхні шару і кладуть у поліетиленові мішечки, до яких прикріплюють етикетки (овочі, фрукти — не менше 0,5 кг, одна буханка хліба).

Сипучі продукти, що знаходяться в м'якій тарі, відбирають за допомогою металевого щупа. Проби беруть з поверхні шару, який знаходиться безпосередньо під мішковиною (0,3 кг). Оскільки об'єм проби, взятий за один прийом, недостатній для проведення аналізу, то необхідно зробити відбирання продукту 3 — 4 рази в різних місцях тари.

Відбирання проб м'яса, риби, твердих жирів та інших продуктів проводять шляхом зрізання ножем поверхневого шару завтовшки 10 мм (маса 0,4 кг).

Рідкі продукти відбирають за допомогою підсобних засобів (банка, ложка та ін.). Перед відбиранням проби вміст тари перемішують. Проби кладуть у скляну банку і маркують (0,5 кг).

Відбір сушених овочів, фруктів, галет, печива, сухарів проводять з поверхневого шару. З брикетованих продуктів фуражу зрізають поверхневий шар завтовшки 10 мм.

Проби щільноконсистентних квашених маркованих продуктів відбирають з поверхневого шару без перемішування (0,5 кг кожного продукту).

4.4.2 Методи вимірювання радіоактивного зараження, що використовуються в радіометричній лабораторії

Залежності від товщини шару відібраного продукту, що наноситься на підкладку, розрізняють препарати товстошарові і тонкошарові.

Товстошаровим називається препарат такої товщини, подальше збільшення якої не приводить до підвищення виходу β -частинок, що надходять з нижніх шарів цього препарату. Експериментально встановлено, що практично зростання виходу β -частинок припиняється при товщині шару, яка дорівнює потроєному значенню шару половинного ослаблення речовини препарату. Для продовольства і води, заражених продуктами ядерного вибуху, така товщина становить 10 мм.

Незалежно від виду препарату, що використовується, в основу вимірювання його активності покладена пропорційна залежність між частотою проходження імпульсів напруги N (1/с), що знімаються з виходу детектора випромінювань, і активністю препарату — a . Ці величини пов'язані між собою співвідношенням

$$N = \eta \cdot a,$$

де η — ефективність лічби імпульсів.

Питома активність препарату A , мкКі/г, визначається за формулою

$$A = \frac{a}{S \cdot d} = \frac{N}{\eta \cdot S \cdot d},$$

де a — активність препарату, мкКі; S — площа препарату, см²;

d — товщина препарату, г / см²;

η — ефективність лічби, що залежить від багатьох факторів, для яких вводять поправки.

4.4.3 Відносний метод вимірювань питомої активності товстошарових препаратів

Даний метод вимірювання питомої активності товстошарового препарату $A_{пр}$ оснований на порівнянні швидкості лічби від даного препарату $N_{пр}$ зі швидкістю лічби від еталонного товстошарового

препарату N_{em} , питома активність якого відома (A_{em}) і визначається за формулою

$$A_{пр} = \frac{(N_{пр} \cdot \rho_{пр} - N_{фон})}{(N_{em} \cdot \rho_{em} - N_{фон})} \cdot A_{em}.$$

З цього виразу випливає, що для визначення $A_{пр}$ за відомим значенням A_{em} необхідно провести лише три вимірювання: $N_{пр}$, N_{em} і $N_{фон}$.

4.4.4 Визначення зараженості води, продовольства та інших матеріалів, що містять β -активні речовини

У лабораторії від доставленої проби відбирається так звана середня лабораторна проба — така кількість речовини, яка необхідна для проведення радіометричного аналізу.

Середня лабораторна проба має якомога повніше відображувати середню зараженість усього зразка. Усі операції з відбору середньої проби і приготування препаратів проводять у витяжній шафі. Приготування препаратів складається з таких операцій:

- відбирання середньої лабораторної проби і доведення її до порошкоподібного стану;
- перенесення певної частини подрібненої проби на підкладку і закріплення її там за допомогою спеціальних розчинів.

Для проведення аналізу виготовляють препарати двох видів:

- тонкошарові (з нанесенням матеріалу проби зі щільністю не більше 20 мг/см^2 на ванночку);
- товстошарові (тільки на круглих ванночках).

Товстошарові препарати готують двома способами:

- 1) заповненням ванночки (товщиною 5 мм) частиною середньої лабораторної проби після її подрібнення;
- 2) заповненням ванночки золою, отриманою спалюванням певної кількості проби, що аналізується.

У разі застосування другого способу в спеціальну перехідну картку заносять значення коефіцієнта концентрації проби B , який визначається за формулою

$$B = \frac{П}{З},$$

де $П$ — наважка проби до спалювання, г; $З$ — наважка проби (зола) після спалювання, г.

Перший спосіб приготування товстошарових препаратів рекомендується використовувати для визначення зараженості ґрунту і продовольства (орієнтовно).

Приготування препарату з ґрунту. Якщо потрібно визначити поверхнєве зараження ґрунту, то спочатку встановлюють масу доставленої проби, після чого від неї відбирають середню лабораторну пробу масою 10...15 г.

Для відбирання середньої лабораторної проби методом вичерпування ґрунт обережно висипають на лист кальки і розрівнюють шаром товщиною 5 мм, потім ділять його на ряд рівних квадратиків (3×3 см). З центру кожного квадратика ложкою береться невелика кількість зразка. Загальна кількість відібраної проби має бути не менше 10 г; її перемішують, розрівнюють тонким шаром, і операцію знову повторюють. Відібрану пробу зважують, сушать при температурі 105...110 °С до сухого стану; після чого зважують і знаходять відсоток вологи за формулою

$$X = \frac{(A - B) \cdot 100}{A},$$

де A — маса наважки до висушування; B — маса наважки після висушування; X — відсоток вологи.

Приготування препаратів з проби води. Препарати з проби води виготовляють випаровуванням певної кількості води, взятої у ванні. Перед внесенням у ванночку воду ретельно перемішують. При випаровуванні 1 мл води можна визначити її зараженість до $2 \cdot 10^{-7}$ Кі/л, а при випаровуванні 10, 100, 500 мл – зараженість відповідно $2 \cdot 10^{-8}$, $2 \cdot 10^{-9}$, $5 \cdot 10^{-10}$ Кі/л.

Випарювання проводять при горизонтальному положенні ванночки і температурі 85...90 °С. Заморожену воду перед приготуванням повністю відтають і ретельно перемішують. Випарюють проби води до 10 мл повільно у ванні. Якщо води більше 10 мл, спочатку її випарюють у склянці до 10 мл, потім - у ванні. Стакан обливають декількома мілілітрами HNO_3 і отримують шар випарювання. За наявності залишку понад 500 мг/л вода має бути профільтррована. У даному випадку проби готують з фільтру і залишку.

Приготування препарату з проби борошна, крупи та інших сипучих речовин. Відбирання середньої лабораторної проби (зазначених продуктів) проводять таким же чином, як це робиться з пробєю ґрунту. Від середньої проби беруть наважку 25 г і переносять у низький фарфоровий тигель, який закривають кришкою і спалюють протягом 30 хвилин. Після спалювання тигель з пробєю прожарюють при температурі 600...700 °С протягом 30 хвилин. Утворену золу зважують, розтирають в тиглі склянкою паличкою, з нього беруть наважку, вносять у ванночку і закріплюють. Потім розраховують масу речовини за формулою

$$m = \frac{П \cdot \mu}{С},$$

де m — розрахункова маса, г; P — наважка проби до спалювання, г; C — наважка проби після спалювання, г; μ — коефіцієнт.

Приготування препаратів із проб хліба. Для визначення зараження хліба з буханки зрізають поверхневий шар масою 30 г. Для цього вимірюють площу знятого шару (подальший процес такий, як із пробую ґрунту).

Приготування препаратів з проб м'яса, риби і жирів. Ці проби зважують, потім відбирають середню лабораторну пробу. При цьому з м'яса і риби видаляють кістки, потім м'якоть подрібнюють за допомогою ножа, отриманий фарш перемішують і від нього беруть наважку масою 30 г.

Відбирання середньої лабораторної проби жиру такий: скляну банку з пробую підігрівають на водяній бані або в сушильній шафі до розм'якшення жиру і ретельно перемішують, після цього беруть наважку 30 г. Відібрану середню лабораторну пробу кладуть у тигель і нагрівають на плитці. Розплавлений жир занурюють у ковпачок із знезоленого фільтра. Ковпачок, що просочився жиром, підпалюють. Після згоряння жиру тигель з пробую пропікають у печі протягом 30 хвилин. Отриману золу зважують і готують препарат, як із проб зерна, борошна та інших сипучих матеріалів. З кісток тварин препарати готують окремо: від кісток відпилюють шматочки масою до 30 г, які потім спалюють і озолюють.

Приготування препаратів із проб молока. Для приготування препарату беруть 500 мл молока, ретельно перемішують, переливають у фарфоровий стакан і обережно випарюють. Отриманий залишок переносять у тигель і прожарюють. Утворену золу вносять у ванночку, як при приготуванні препаратів з проб сипучих матеріалів.

Приготування препаратів із проб готових страв. При дослідженні рідкої їжі проби зважують, переливають у фарфоровий стакан, випарюють до отримання в'язкої консистенції (без підгоряння). Далі проби зважують і розтирають у ступці до однорідного стану, потім відбирають пробу 30 г.

При дослідженні других страв неїстівну частину (наприклад, кістки) видаляють. Пробу розтирають у ступці або подрібнюють ножем. Після перемішування відбирають середню лабораторну пробу масою 30 г. Подальше приготування препарату проводять так само, як з проб сипучих матеріалів.

Приготування препаратів з овочів, фруктів, ягід. Для приготування препарату з овочів і фруктів зрізають поверхневий шар. Для подальшого розрахунку шар зважують і визначають його площу. Потім усе подрібнюють ножем і перемішують. Як середню лабораторну пробу беруть наважку 100 г, висушують при температурі 105...110 °С, потім спалюють і озолюють, далі все роблять так, як із сипучими продуктами.

Приготування проби з трав і кормових культур. Пробу подрібнюють ножем і добре перемішують. Методом квартування

відбирають наважку 10...20 г, розташовують у фарфоровій чашці, висушують при температурі 105...110 °С, спалюють і озолують. Потім виконують ті ж самі операції, як і з сипучими матеріалами.

Далі вимірюють β-активність препарату і розраховують активність радіонукліда. Вимірювання препаратів з об'ємним зараженням проводять у такому порядку. На поличку для препарату встановлюють ванночку з чистою водою. Поличку всувають у паз столика для торцевих лічильників, вимірюють швидкість лічби фону $N_{фон}$.

Швидкість лічби від препарату N_0 визначають за формулою

$$N_0 = N_0(\text{імп./хв}) - N_{фон}(\text{імп./хв}).$$

Розрахунок наближеного значення об'ємної зараженості проб виконують за формулою

$$A_{об} = K_1 \cdot N_0,$$

де K_1 — коефіцієнт пропорційності (таблиця 4.4); N_0 — кількість імпульсів, яку показує прилад.

Таблиця 4.4 — Значення коефіцієнта пропорційності

Вид проби	K_1
Свіжі овочі, вода, рідини, хліб, м'ясо, риба, а також сіно	60
Сипучі речовини, крупи, цукровий пісок, сіль	40
Зернисті речовини	25
Квасоля, сушені овочі, макарони	15

Для розрахунку значення питомої зараженості поверхневого шару $A_{пов}$, розп/(хв·г), продуктів товщиною 10 мм використовують формулу

$$A_{пов} = K_2(N_{пов} - N_0) + A_{об},$$

де $N_{пов}$ — швидкість лічби від препарату, поверхня якого заражена; $K_2 = 5$ для хліба і $K_2 = 2$ для інших продуктів.

5 РАДІОЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

Радіоекологічний моніторинг — це комплексна інформаційно-технічна система спостережень, оцінювання й прогнозування радіаційного стану біосфери.

Головними завданнями радіоекологічного моніторингу є такі:

- спостереження та контроль за станом забрудненої радіонуклідами зони і її окремих особливо шкідливих ділянок;

- моніторинг стану об'єктів природного середовища як у зоні забруднення, так і за її межами;
- виявлення тенденцій до зміни природного середовища, стану здоров'я населення на забруднених територіях;
- інформаційне забезпечення прогнозування радіоекологічної ситуації в забрудненій зоні і країні загалом.

Розрізняють: базовий (стандартний), кризовий (оперативний), науковий (фоновий) радіоекологічний моніторинг.

Базовий радіоекологічний моніторинг здійснюють за допомогою мережі пунктів спостережень, яка охоплює всю територію країни, включаючи служби радіаційного контролю на ядерному виробництві.

Кризовий радіологічний моніторинг здійснюють територіальні служби спостереження і контролю радіоекологічних параметрів навколишнього середовища на територіях, де виникли несприятливі радіологічні ситуації.

Науковий радіоекологічний моніторинг виконують координуючі структури на базі науково-дослідних інститутів (підрозділів НАН України), які забезпечують методологічне забезпечення радіологічних досліджень.

Радіоекологічний моніторинг передбачає спостереження і контроль за гамма-фоном на радіаційно небезпечних об'єктах господарської діяльності.

В Україні після катастрофи на ЧАЕС здійснюють радіоекологічний моніторинг у таких напрямках: моніторинг ландшафтно-геологічного середовища; моніторинг поверхневих і підземних водних систем; моніторинг природоохоронних заходів і споруд; моніторинг локальних довгочасних джерел реального і потенційного забруднення (об'єкт "Укриття", ставок-охолоджувач, пункти захоронення радіоактивних відходів, пункти тимчасової локалізації радіоактивних відходів); моніторинг біоценозів і заходів щодо використання природних угідь; медичний і санітарно-гігієнічний моніторинги.

Комплексний радіоекологічний моніторинг ґрунтується на інформації, отриманій унаслідок здійснення базових видів радіаційного моніторингу.

Радіаційний моніторинг оснований на радіометричних спостереженнях, які здійснюють гідрометеорологічна і санітарно-епідеміологічна служби.

Гідрометеорологічна служба виконує:

- щоденні вимірювання рівнів гамма-випромінювань (на 182 станціях);
- щоденні відбори проб радіоактивних опадів (на 968 станціях);
- щоденні визначення вмісту радіоактивних аерозолів у атмосферному повітрі (усі станції);
- періодичні відбори проб для визначення вмісту тритію і стронцію-90 у поверхневих та уморських водах (на п'яти станціях);
- щомісячні аналізи опадів на вміст тритію (на 36 станціях).

Крім того, гідрометеорологічною службою здійснюються періодичні спостереження радіоактивного забруднення малих річок басейнів Прип'яті та Дніпра, водних об'єктів і ґрунтів у районах розташування АЕС та ґрунтів на всій території України.

Санітарно-епідеміологічна служба (СЕС) здійснює радіологічні дослідження на територіях міських і сільських населених пунктів у зонах радіоактивного забруднення, у 30-кілометрових зонах АЕС, на підприємствах, комунальних об'єктах, у дитячих та освітніх закладах. СЕС також контролює радіаційно небезпечні об'єкти на промислових підприємствах, у медичних установах і науково-дослідних інститутах.

Основними складовими радіоекологічного моніторингу є ядерно-радіаційний моніторинг, радіогеохімічний моніторинг, моніторинг поверхневих водних систем, радіогідрогеологічний моніторинг.

Ядерно-радіаційний моніторинг. Основними існуючими і потенційними джерелами радіаційного забруднення в мирний час є атомні електростанції, підприємства з виробництва ядерного палива, склади ядерної зброї, підприємства з переробки ядерних відходів, місця захоронення відходів тощо.

Зараз в Україні функціонують 15 ядерно-енергетичних реакторів. У медицині, промисловості, наукових закладах використовуються декілька десятків тисяч радіоактивних джерел. Значна кількість радіонуклідів знаходиться в об'єкті "Укриття" Чорнобильської зони відчуження.

Незважаючи на великі зусилля з підвищення безпеки експлуатації ядерних реакторів та інших ядерних об'єктів, усі вони є джерелами ядерної небезпеки і потенційними джерелами радіаційного забруднення навколишнього середовища.

В Україні в рамках програми технічної допомоги Європейського Союзу "TACIS" з 1994 року функціонує система радіаційного моніторингу "Гамма". Реалізація першої стадії цього проекту передбачає створення мережі трьох постів радіаційного моніторингу на територіях навколо Рівненської, Запорізької та Інчалінської (Білорусь) АЕС.

Основними завданнями системи «Гамма» є:

- виявлення значних перевищень рівнів радіаційного фону на підконтрольних територіях;
- оповіщення відповідальних осіб про такі перевищення і забезпечення цих осіб інформацією, необхідною для проведення захисних заходів.

Складовими системи «Гамма—1» на території України є національний центр (інформаційно-кризовий центр ІКЦ), розташований в м. Києві і два локальних центри (у містах Рівне і Запоріжжя). Окрім того, до складу системи входять:

- 27 постів контролю потужності дози випромінювання, установлених в зоні Рівненської АЕС;

- 11 постів контролю потужності дози випромінювання, установлених у зоні Запорізької АЕС;
- 1 пост автоматичного контролю активності аерозолів, розташований на відстані 5 км від Рівненської АЕС;
- 1 автоматичний пост контролю активності води на Рівненській АЕС;
- 2 автоматичні пости метеоконтролю (на Рівненській та Запорізькій АЕС).

Інформація про виміряні дози від відповідних датчиків по радіоканалах надходить до локальних центрів, а далі за допомогою спеціально виділених телефонних каналів передається в національний центр. Державна служба з надзвичайних ситуацій України та обласні підрозділи ДСНС у містах Рівне та Запоріжжя також мають доступ до інформації системи «Гамма—1» у режимі реального часу (режим on-line).

Радіогеохімічний моніторинг дає змогу отримувати регулярну і систематизовану інформацію щодо просторового розподілу радіоактивних, зокрема техногенних елементів або їх ізотопів і закономірності їх мобілізації, транзиту, локалізації та фіксації. За допомогою гамма-зйомки території оцінюють радіоекологічний стан природно-техногенних систем різних рівнів: на національному рівні (масштаб 1:1000000...1:500000), оцінюють радіоекологічну ситуацію загалом по країні; регіональний рівень (масштаб 1:200000...1:100000) охоплює великі природно-територіальні комплекси або їх частини в природних адміністративних межах; на локальному рівні (масштаб 1:5000 ...1:25000) вивчають міські агломерації особливо забруднених районів; на детальному рівні (масштаб 1:1000... 1:2000) виконують аналіз окремих районів міських агломерацій та інших природно–техногенних комплексів вищих порядків. Для цього формують регулярну мережу точок спостережень, які дають змогу достатньо повно охарактеризувати елементи довкілля.

За результатами моніторингу складають карти щільності поверхневого забруднення ґрунтів цезієм-137, стронцієм-90, а також отримують окремі дані про забруднення однорічної та багаторічної рослинності.

Завдяки моніторингу однорічної рослинності встановлюють сезонні коливання концентрацій радіоактивного вуглецю. Це дозволяє відповідно реагувати на зміну радіоекологічної ситуації в районах діючих атомних станцій.

Моніторинг поверхневих вод зумовлений попаданням великої кількості радіоактивних опадів у водозбори рік Прип'ять, Десна, Дніпро, водосховищ Дніпровського каскаду.

Установи НАНУ, Міністерства охорони здоров'я, гідромету відповідно до програми радіологічного моніторингу гідросфери басейну Дніпра виконують спостереження вздовж усього каскаду Дніпровського водосховища, на узбережжі Чорного моря та усіх основних рік України:

Дніпра, Прип'яті, Південного Бугу, Десни, Тетерева, Ужа, а також у місцях водозаборів з підземних джерел.

Радіогідрогеологічний моніторинг. У межах цього виду моніторингу здійснюють аналіз забруднення радіонуклідами підземних вод. У 30-кілометровій зоні Чорнобильської АЕС проводять режимні спостереження на гідрогеологічних постах, дренажних та осушувальних системах, на певних ділянках ґрунту, свердловинах.

6 БІОЛОГІЧНА ДІЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

У процесі ураження біологічних систем унаслідок дії іонізуючих випромінювань виділяють декілька стадій: фізичну, фізико-хімічну, хімічну і біологічну (таблиця 6.1).

Таблиця 6.1 — Основні стадії дії іонізуючих випромінювань на біологічні системи

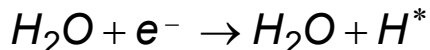
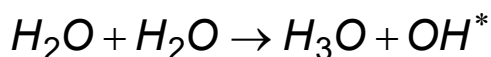
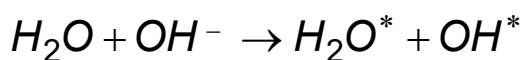
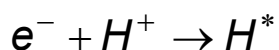
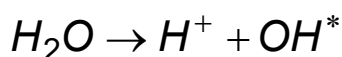
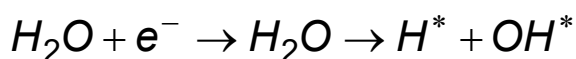
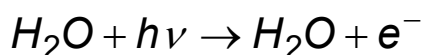
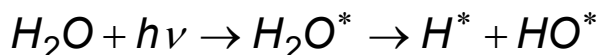
Стадія	Процеси	Тривалість
Фізична	Поглинання енергії випромінювання; утворення іонізованих і збуджених атомів і молекул	10^{-16} - 10^{-15} с
Фізико-хімічна	Перерозподіл поглиненої енергії всередині молекул і між ними, утворення вільних радикалів	10^{-14} - 10^{-11} с
Хімічна	Реакції між вільними радикалами і інтактними молекулами. Утворення широкого спектра молекул зі зміненими структурами і функціональними властивостями	10^{-6} - 10^{-3} с
Біологічна	Послідовний розвиток ураження на всіх рівнях біологічної організації	Секунди – роки

6.1 Фізична стадія

Зміст фізичної стадії становлять процеси поглинання енергії і утворення іонізованих і збуджених молекул. У опроміненій клітині збудженими і іонізованими можуть однаковою мірою виявитися білки і вуглеводи, нуклеїнові кислоти і ліпіди, молекули води і різних низькомолекулярних органічних і неорганічних сполук. У живих клітинах органічними і неорганічними молекулами (окрім води) поглинається близько 25 % енергії, а водою – 75 %. Процеси, які відбуваються під час фізичної стадії, здійснюються впродовж короткого часу – 10^{-16} ... 10^{-15} с. Вони завершуються утворенням збуджених і іонізованих молекул.

6.2 Фізико-хімічна стадія

Упродовж фізико-хімічної стадії поглинена молекулами енергія реалізується розривами хімічних зв'язків і утворенням вільних радикалів. Ці радикали характеризуються наявністю неспареного електрона, що спричинює їх надзвичайно високу хімічну активність. У живих системах близько 75 % енергії випромінювання поглинається водою. У результаті цього процесу утворюються продукти радіолізу води: гідратовані електрони, радикали H, OH і O, іони гідроксонію і молекулярний водень, тобто



Продукти радіолізу води можуть існувати у воді не більше 10^{-5} с. За цей час вони або рекомбінують один з одним або вступають у хімічні реакції з іншими молекулами, які знаходяться в системі. Етапами фізико-хімічної стадії дії випромінювання на біологічний об'єкт є: перерозподіл збудженими молекулами надмірної енергії, їх дисоціація і утворення іонів і радикалів, що мають дуже високу хімічну активність. Тривалість цієї стадії становить близько $10^{-14} \dots 10^{-11}$ с.

6.3 Хімічна стадія. Пряма і непряма дії радіації

Під час хімічної стадії високоактивні вільні радикали, що утворилися раніше, вступають в реакцію між собою і з інтактними молекулами, це спричинює виникнення різноманітних ушкоджень молекул. Процес ушкодження біомолекул, що відбувається у результаті безпосереднього поглинання ними енергії випромінювання, називають прямою дією радіації. Якщо ж біомолекули ушкоджуються в результаті їх хімічної взаємодії з продуктами радіолізу води — це непряма дія радіації. До хімічно високореактивних продуктів, що утворилися під час фізико-хімічної стадії, належать насамперед радикали OH^* і H^* і гідратований електрон. При

взаємодії первинних продуктів радіолізу води з киснем утворюються нові продукти: іони H_3O^+ , пероксид водню H_2O_2 , супероксидний аніон-радикал O_2^- і гідрпероксид HO_2^* . Ці продукти мають більш високу реакційну здатність порівняно з первинними радикалами. Гідроксильний радикал HO^* , що утворився в результаті радіолізу води, є сильним окислювачем, радикал водню H^* і $e_{\text{гідр}}^-$ – сильні відновники, пероксид водню – слабкий окислювач. Утворені при радіолізі води радикали OH^* і H^* можуть вступати у реакцію один з одним, у результаті якої утворюються молекулярний водень H_2 і пероксид водню H_2O_2 .

Продукти радіолізу води можуть спричиняти майже усі типи структурних ушкоджень біологічного об'єкта, які спостерігаються при прямій дії радіації. Непряма дія радіації визначається вмістом у макромолекулах структурованої води, коли поглинена при радіолізі води енергія може спричинити зміни у важливих надмолекулярних структурах клітини. Серед органічних речовин найбільша радіочутливість властива фосфоліпідам, які є структурною основою клітинних мембран. Вплив продуктів радіолізу води на амінокислоти, білки, вуглеводи, нуклеотіди, ДНК, фосфоліпіди спричиняє утворення радикалів розчинних речовин. Тривалість хімічної стадії становить $10^{-6} \dots 10^{-3}$ с.

6.4 Молекулярні пошкодження, що виникають в клітинах

Процеси, що відбуваються на первинних стадіях дії випромінювань, спричиняють зміни в будь-яких молекулярних структурах, які входять до складу живої клітини. Найбільш біологічно значущим пошкодженням клітини є порушення структури ДНК. Це призводить до руйнування структури білка.

Утворені радикали дають поштовх до розвитку ланцюгових реакцій окислення. При опроміненні великими дозами радіації відбувається розпад жирних кислот. Також серйозним наслідком променевих ушкоджень є порушення будови клітинних мембран.

Клітини і тканини за ступенем прояву морфологічних змін у них, тобто за ознакою зростання радіочутливості, можна розташувати в такому порядку: нервова тканина, хрящова і кісткова тканина, м'язова тканина, сполучна тканина, щитоподібна залоза, травні залози, легені, шкіра, слизові оболонки, статеві залози, лімфоїдна тканина, кістковий мозок.

Іонізуючі випромінювання здатні спричинити усі види спадкових змін — генні, хромосомні, геномні. Ці зміни мають залежний від дози опромінення характер. Згідно з сучасними уявленнями, вважається, що будь-яка доза іонізуючого випромінювання, яка перевищує природний радіаційний фон (ПРФ), незалежно від величини і потужності призводить до небезпеки кумулятивного генетичного ефекту і здатна спричинити генетичні зміни, оскільки біологічна репарація мутації неможлива. Таким чином, пряма і непряма дія іонізуючого випромінювання на біологічні

молекули призводить до того, що в живому організмі виникає багато різних біологічних ефектів, що спостерігаються після опромінення (таблиця 6.2).

Таблиця 6.2 — Типи радіологічних ушкоджень

Тип біологічної організації	Найважливіші радіаційні ефекти
Молекулярний	Пошкодження макромолекул — ферментів, РНК, ДНК, вплив на обмінні процеси
Субклітинний	Пошкодження клітинних мембран, ядер, хромосом мітохондрій і лізосом, вивільнення їхніх ферментів
Клітинний	Порушення поділу клітин, їх загибель і трансформація, у тому числі злаякісна
Тканини, органи	Порушення в червоному кістковому мозку, шлунково-кишковому тракту, центральній нервовій системі можуть призвести до радіаційних пошкоджень і загибелі, віддалених наслідків
Організм	Різні види радіаційних наслідків, навіть — летальний результат
Популяції	Зміна генетичних характеристик унаслідок генних, хромосомних мутацій у індивідуумів

6.5 Радіаційні ураження людини

Залежно від виду випромінювання, дози опромінення та його умов можливе виникнення різних видів променевого ураження: гостра променева хвороба від зовнішнього опромінення; гостра променева хвороба від внутрішнього опромінення; хронічна променева хвороба; різні клінічні форми переважно з локальним ураженням окремих органів (променеві пневмоніти, дерматити, ентерити), які можуть характеризуватися гострим, підгострим або хронічним перебігом; віддалені наслідки, з яких найбільш істотні — бластоматозні процеси (катаракта, стерильність, склеротичні зміни). Сюди ж слід віднести і наслідки опромінення ембріона в утробі матері, тератогенні ефекти та генетичні наслідки, що спостерігаються у нащадків опромінених батьків.

6.5.1 Гостра променева хвороба від зовнішнього рівномірного опромінення

Гостра променева хвороба (ГПХ) характеризується сукупністю ряду уражень органів і тканин, у результаті чого формуються основні клінічні синдроми захворювання — кістково-мозковий, кишковий або церебральний, а також перехідні форми або їх поєднання (таблиця 6.3). ГПХ від зовнішнього опромінення виникає внаслідок короткочасного (миттєвого або протягом декількох годин, діб) впливу на всі органи і тканини організму або більшу їх частину гамма і/або нейтронного випромінювання в дозі, що перевищує один Гр.

Таблиця 6.3 — Клінічні форми і ступені тяжкості гострої променевої хвороби, спричиненої зовнішнім відносно рівномірним опроміненням

Доза, Гр	Клінічна форма	Ступінь тяжкості	Прогноз для життя	Смертність, %	Строки загибелі ураженого, діб
1-2	Кістково-мозкова	I (легка)	Абсолютно сприятливий	0	-
2-4	Те саме	II (середня)	Відносно сприятливий	5	40-60
4-6	Те саме	III (тяжка)	сумнівний	50	30-40
6-10	Те саме	IV (вкрай тяжка)	Несприятливий	95	11-20
10-20	Кишкова	Те саме	Абсолютно несприятливий	100	8-16
20-50	Токсемічна (судинна)	Те саме	Те саме	100	4-7
Понад 50	Церебральна	Те саме	Те саме	100	1-3

Після опромінення дозою 1 Гр спостерігаються незначні клінічні та гематологічні прояви, які визначають як гостру променеву реакцію. Зокрема, у осіб, які були опромінені дозами 0,5...0,75 Гр, у ранній період можуть спостерігатися слабкість, прояви нейроциркуляторної дистонії, іноді нудота, а при тривалому і ретельному спостереженні через 6—7 тижнів після гострого опромінення може бути виявлено невелике (до нижньої межі норми) зниження кількості нейтрофілів і тромбоцитів. При опроміненні дозами від 1 до 10 Гр формується кістково-мозкова форма ГПХ. Цю форму також називають типовою, оскільки саме при ній найбільш яскраво проявляються особливості патогенезу та перебігу ГПХ, що характеризує її клінічна симптоматика. Цьому значною мірою сприяє досить велика тривалість життя при кістково-мозковій формі, навіть якщо хвороба закінчується смертельним результатом. Виходячи з назви,

розвиток патологічного процесу в даному випадку визначається насамперед ураженням кровотворної тканини. Це проявляється інфекційними ускладненнями, кровотечами, анемією. При опроміненні дозами від 10 до 20 Гр наслідки ураження визначають процеси, що відбуваються в епітелії тонкої кишки (кишкова форма ГПХ). Радіаційний вплив дозами від 20 до 50 Гр характеризується масивним ураженням практично усіх паренхіматозних органів. При опроміненні організму дозами понад 50 Гр найважливішими стають ураження центральної нервової системи, що і стало підставою того, щоб назвати цей варіант променевої патології церебральною формою ГПХ.

6.5.2 Кістково-мозкова форма гострої променевої хвороби

Протягом ГПХ може бути виділено кілька періодів:

- початковий період або період первинної реакції на опромінення (ПРО);
- прихований період (період уявного благополуччя, латентний);
- період розпалу та період відновлення.

Основний клінічний прояв початкового періоду ГПХ — синдром первинної реакції на опромінення (ПРО). Синдром ПРО характеризується комплексом диспептичних (анорексія, нудота, блювання, діарея, дискінезія кишечника), нейромоторних (швидка втомлюваність, апатія, загальна слабкість) і нейросудинних (пітливість, гіпертермія, гіпотензія, запаморочення, головний біль) проявів, а також місцевими реакціями шкіри і слизових оболонок (гіперемія, свербіж, печіння тощо).

При об'єктивному дослідженні в цей період зазвичай виявляються тремор пальців рук, тахікардія, при великих дозах — підвищена температура тіла. До кінця початкового періоду токсичні продукти значною мірою руйнуються або виводяться з організму. Високі компенсаторні можливості нервової системи забезпечують відновлення її функцій, можуть відзначатися симптоми астенизації і вегетативно-судинної нестійкості (підвищена стомлюваність, пітливість, періодичний головний біль, розлади сну тощо).

Виявлення і характер гематологічних зрушень, а також тривалість прихованого періоду залежать від ступеня важкості променевого ураження: чим вище доза опромінення, тим він коротший, а при вкрай важких формах ГПХ початковий період може безпосередньо перейти в період розпалу захворювання.

Джерелом інфекційних ускладнень при променевих ураженнях найчастіше є власна мікрофлора шлунково-кишкового тракту, дихальних шляхів, шкіри і слизових оболонок: стафілококи, кишкова паличка, рідше — синьогнійна паличка та ін. В опроміненому організмі знижується опірність і до інфекції. Інфекційний синдром ГПХ починається з різкого погіршення самопочуття, з'являються загальна слабкість, запаморочення, головний

біль. Підвищується температура тіла, з'являються озноб і проливні поти, частішає пульс, порушуються сон і апетит. До найбільш розповсюджених типів інфекційних ускладнень ГПХ відносяться: бронхіт, пневмонія, виразково-некротичні ураження шкіри і слизових оболонок. У важких випадках — вірусна інфекція, грибкові ураження. Тяжкими проявами інфекційного синдрому кістково-мозкової форми ГПХ є ураження слизової оболонки. Провідну роль у виникненні ускладнень відіграє пригнічення імунітету.

При менш тяжких варіантах перебігу період розпалу ГПХ переходить у період відновлення, початок якого характеризується поліпшенням стану здоров'я: з'являється апетит, нормалізуються температура тіла та функції шлунково-кишкового тракту, підвищується маса тіла, зникають симптоми кровоточивості. Відзначаються ознаки регенерації гемопоезу: у крові з'являються ретикулоцити, юні і паличкоядерні нейтрофіли. Проте в цей же час продовжує прогресувати (до 5-6 міс. після опромінення) анемія. Тривалий час (іноді протягом декількох років) у хворих зберігаються психічні і вегетативно-судинні розлади неврастенічного, іпохондричного і астенодепресивного характеру. Можливий розвиток гастриту, гепатиту. При променевому ураженні шкіри період одужання протікає хвилеподібно, з рецидивами еритеми шкіри, набряком підшкірної клітковини.

Після опромінення дозами понад 3 Гр у період відновлення можуть формуватися катаракти, можливе ураження сітківки очей, зниження гостроти зору. Середня тривалість періоду відновлення становить від трьох до шести місяців. Віддалені наслідки — нові патологічні процеси, які через досить тривалий прихований період, у періоді розпалу ГПХ не проявлялися: катаракти, склеротичні зміни, дистрофічні процеси, новоутворення; скорочення тривалості життя. Вираженість різних синдромів ГПХ, терміни початку і тривалість різних періодів її перебігу залежать від ступеня тяжкості захворювання.

6.5.3 Кишкова форма гострої променевої хвороби

Унаслідок загального опромінення дозами 10...20 Гр розвивається кишкова форма ГПХ, при якій зазвичай також можна виділити окремі періоди, що відповідають тим, які описувалися при кістково-мозковій формі. Початковий період відрізняється більшою тяжкістю проявів і більшою тривалістю тих симптомів, які переважають і при кістково-мозковій формі: нудота, блювання, анорексія, прогресуюча загальна слабкість, яку іноді характеризують як наростаючу летаргію, гіподинамія. Настання періоду розпалу кишкової форми ГПХ проявляється різким погіршенням загального стану, розвитком діареї, підвищенням температури тіла до 39...40 °С.

6.5.4 Токсемічна форма гострої променевої хвороби

Токсемічна форма розвивається після опромінення дозами в діапазоні 20...50 Гр. Для цієї форми характерні важкі гемодинамічні розлади, пов'язані з парезом і підвищенням проникності судин, прояви загальної інтоксикації, як наслідок проникнення у внутрішнє середовище організму продуктів розпаду тканин, первинних і вторинних радіотоксинів, ендотоксинів кишкової мікрофлори.

6.5.5 Церебральна форма гострої променевої хвороби

Основою церебральної форми ГПХ, що розвивається у людини після опромінення дозами 50 Гр і вище, є синдром ураження центральної нервової системи. За такого рівня доз кількість пошкоджень у нервових клітинах унеможлиблює їх нормальне функціонування. Смерть потерпілих зазвичай настає протягом не більше 48 год після опромінення від паралічу дихального центру.

6.6 Шляхи надходження радіоактивних речовин в організм

У внутрішнє середовище організму РР можуть потрапити інгаляційно, через стінки шлунково-кишкового тракту, через травматичні та опікові ушкодження, через неушкоджену шкіру. Для багатьох РР характер всмоктування, розподіл їх по органах і тканинах, виведення з організму та біологічна дія істотно залежать від шляху надходження.

Інгаляційне надходження радіоактивних речовин. Загальна поверхня альвеол легенів становить близько 100 м², що приблизно в 50 разів перевищує поверхню шкіри, і при контакті (особливо професійному) з аерозолями РР, радіоактивними газами і парами інгаляційний шлях зараження є основним. Радіонукліди, що потрапили в органи дихання, різною мірою можуть затримуватися в легенях і верхніх дихальних шляхах. У легенях переважно відкладаються частинки діаметром від 0,01 до 1 мкм.

Надходження радіоактивних речовин через шлунково-кишковий тракт. Шлунково-кишковий тракт — другий основний шлях надходження РР в організм. Таке надходження може виникнути як безпосередньо після їх потрапляння у навколишнє середовище, так і після проходження по біологічних ланцюжках. Уражальна дія при такому типі надходження радіоактивних речовин пов'язана як з променевим навантаженням на стінку травного тракту, так і зі всмоктуванням РР у кров і лімфу. Просування радіонуклідів шлунково-кишковим трактом не має особливостей порівняно з нерадіоактивними речовинами, що містяться в їжі. Резорбція РР залежить від її хімічних властивостей (головним чином — розчинності), фізіологічного стану шлунково-кишкового тракту (рН середовища, моторної функції, складу харчового раціону. Молоко,

наприклад, сприяє посиленню всмоктування радіоактивного стронцію. Переважно через ШКТ надходять і всмоктуються лужні елементи – К, Са, Na, Rb, Cs, І і меншою мірою – лужноземельні елементи – Sr (40...60 %), Со (30 %), Mg (10 %), Zn (10 %), Ва (5 %). Трансуранові елементи та рідкісноземельні метали в шлунково-кишковому тракті утворюють важкорозчинні сполуки і тому ступінь їх усмоктування дуже низька – Рo – 6 %, Ru – 3 %, U – 3...6 %, Pu – 0,01 %, Zr – 0,01 %. Усмоктування швидко розчинних радіонуклідів відбувається в основному в тонкій кишці. Значно менше РР усмоктується в шлунку. Усмоктування в товстій кишці практичного значення не має.

Надходження радіоактивних речовин через непошкоджені шкірні покриви, рани та опікові поверхні. Більшість радіоактивних речовин практично не проникають через неушкоджену шкіру. Винятком є окис тритію, йод, нітрат і фторид уранилу, а також полоній. Коефіцієнти резорбції в цих випадках становлять соті й тисячні частки одиниці. Проникнення РР через шкіру залежить від площі забрудненої ділянки, від фізико-хімічних властивостей сполуки, до складу якого вони входять, розчинності у воді і ліпідах, рН середовища, від фізіологічного стану шкіри. Усмоктування радіонуклідів пришвидшується при підвищенні температури середовища внаслідок розширення кровоносних і лімфатичних судин, розкриття сальних і потових залоз. Особливу увагу слід приділити радіоактивному забрудненню ран у виробничих і лабораторних умовах. Основну небезпеку в разі виробничого зараження становить резорбція високотоксичних радіонуклідів (наприклад, полонію), яка у розчинних РР може досягати десятків відсотків від загальної кількості, що надійшла у рану. Великі кількості РР можуть потрапити в організм не тільки через колоті або різані рани, але й через невеликі подряпини і садна. У ранах часто розвиваються гнійні, іноді анаеробні процеси.

6.7 Метаболізм радіоактивних речовин

У крові радіонукліди можуть перебувати у вільному стані чи в складі різного роду хімічних сполук і комплексів. Значна частина радіонуклідів зв'язується протеїнами, частина радіонуклідів, які потрапили в кров, виводиться з організму, інша частина проникає в органи і депонується в них. Знання характеру розподілу, особливостей обміну і депонування РР, можливого їхнього перерозподілу з часом необхідне для передбачення переважного ураження того чи іншого органу, дози опромінення цього критичного органу, клінічних проявів і результату ураження. Поняття концентрація та вміст радіонукліда в органі не є синонімами. Під концентрацією розуміють питому активність радіонукліда, виражену в Бк/г, а вміст – це абсолютне значення активності в цілому органі.

Сумарна константа зменшення концентрації ізотопу в органі ($K_{\text{еф}}$) є сумою констант радіоактивного розпаду і біологічного виведення. При

розрахунках частіше користуються поняттям ефективного періоду напіввиведення — $T_{\text{еф}}$. Він пов'язаний з періодом напіврозпаду та періодом біологічного напіввиведення:

$$T_{\text{еф}} = \frac{(T_{\text{фіз}} \cdot T_{\text{біол}})}{(T_{\text{фіз}} + T_{\text{біол}})}$$

6.8 Виведення радіоактивних речовин з організму

РР, що потрапили в організм, можуть виводитися через нирки, шлунково-кишковий тракт (у тому числі з жовчю), легені, а також зі слиною, потом. Виведення з повітрям, яке видихається, характерне для тритію, парів оксиду тритію, радону і торону, що утворюються при розпаді радію і торію. За вмістом РР у виділеннях можна судити про кількість їх в організмі як на момент визначення, так і на момент надходження.

6.9 Біологічна дія радіоактивних речовин

При внутрішньому радіоактивному зараженні кількість радіонуклідів, що потрапили в організм, найчастіше не може створити протягом короткого часу дози, достатньо високої для розвитку гострого променевого ураження. У цих випадках більш характерним є розвиток хронічної променевої хвороби. При внутрішньому радіоактивному зараженні концепція критичного органу є складнішою, ніж при загальному зовнішньому опроміненні. У цьому випадку насамперед мають значення особливості розподілу радіонуклідів по органах і тканинах. Важливим фактором є значення порогових доз ушкодження для різних тканин. За здатністю накопичуватися переважно в тих чи інших органах виділяють такі основні групи радіоактивних елементів (таблиця 6.4).

Таблиця 6.4 — Типи розподілу радіоактивних елементів в організмі

Тип розподілу	Елементи
Рівномірний (дифузний)	Елементи I групи періодичної системи: H, Li, Na, K, Rb, Cs, Ru, Cl, Br та ін.
Скелетний (остеотропний)	Лужноземельні елементи: Be, Ca, Sr, Ra, Zr, Ir, F та ін.
Печінковий	La, Ce, Pm, Pu, Th, Mn та ін.
Нирковий	Bi, Sr, As, U, Se та ін.
Тиреотропний	I, Br, As

Орган, у якому відбувається вибіркоче накопичення радіонуклідів і внаслідок чого він піддається найбільшому опроміненню та пошкодженню, називається критичним. Радіонукліди, які вибірково відкладаються в кістках, — остеотропні. Це лужноземельні елементи: радій, стронцій, барій, кальцій. Ураження, що розвиваються при надходженні в організм остеотропних радіонуклідів, насамперед характеризуються змінами у кровотворній та кістковій системах. Радіонукліди, що вибірково накопичуються в органах, — ізотопи рідкоземельних елементів (лантан, церій, прометій, празеодім), а також актиній, торій і деякі сполуки плутонію. При їх надходженні спостерігаються ураження печінки. У більш пізні терміни спостерігаються цирози, пухлини печінки.

Радіонукліди, що рівномірно розподіляються по організму, — це ізотопи лужних металів (цезію, калію, натрію, рубідію), водню, вуглецю, азоту, а також ізотопи деяких інших елементів, зокрема полонію. При їх надходженні ураження мають дифузний характер: розвивається атрофія лімфоїдної тканини, у тому числі селезінки, порушення функції м'язів (при потраплянні радіоактивного цезію). У пізні терміни спостерігаються пухлини м'яких тканин: молочних залоз, кишківника, нирок тощо. В окрему групу виділяють радіоактивні ізотопи йоду, які вибірково накопичуються в щитоподібній залозі.

При надходженні радіонуклідів в організм у кількостях, що забезпечують накопичення протягом короткого терміну (кілька днів) середньотканевої дози, яка еквівалентна 1 Гр гамма-опромінення і вище, розвивається гостре променеве ураження. Загально відоме професійне виникнення кісткових сарком у робітниць, які займалися нанесенням світлової сполуки, що містить радій, на циферблати. Альфа-випромінювання торію стало у ряді випадків причиною виникнення сарком, карцином, лейкемій. Слід також згадати високу частоту виникнення раку легенів у шахтарів уранових рудників. Серед віддалених наслідків внутрішнього радіоактивного зараження не менше значення, ніж при зовнішньому опроміненні, мають генетичні наслідки.

7 НОРМУВАННЯ ОПРОМІНЕННЯ. ІНДИВІДУАЛЬНІ Й КОЛЕКТИВНІ ДОЗОВІ МЕЖІ ОПРОМІНЕННЯ. РОЗРАХУНОК ІНДИВІДУАЛЬНИХ ДОЗ ОПРОМІНЕННЯ

7.1 Доза випромінювання. Одиниці вимірювання радіоактивності

Доза випромінювання — енергія іонізуючого випромінювання (ІВ), поглинена об'ємною речовиною і розрахована на одиницю маси. Дія ІВ є складним процесом. Ефект опромінення залежить від величини поглиненої дози, її потужності, виду випромінювання, обсягу опромінення тканин і органів. Для кількісної оцінки ефекту опромінення введено

спеціальні одиниці — позасистемні і одиниці в системі СІ. Доза є мірою радіаційного впливу на організми.

Першою було прийнято одиницю вимірювання радіоактивності 1 г Ra, яка була названа 1 Кюрі [1 г Ra = 1 Кюрі (Ки)]. Пізніше було введено одиницю Бк (Беккерель) — одиницю вимірювання, яка характеризує один розпад будь-якого радіонукліда за 1 с. Масу радіонукліда розраховують за формулою

$$m = 2,4 \cdot 10^{-24} AT_{1/2} a,$$

де A — масове число певного радіонукліда; a — активність, Бк.

Для кількісного оцінювання впливу радіації на речовину використовують поняття дози ІВ або опромінення. Пошкодження, які спричинює випромінювання в живому організмі, збільшуються залежно від кількості енергії, яку це випромінювання передає тканинам.

Кількість енергії, яку отримує організм від опромінення, називають дозою. Оскільки поглинена енергія витрачається на іонізацію середовища, то для її вимірювання необхідно підрахувати число пар іонів, що утворюються при випромінюванні. Для кількісної характеристики рентгенівського й γ -випромінювань, що діють на об'єкт, визначають експозиційну дозу (ЕД), яка характеризує іонізуючу здатність рентгенівського і γ -променів у повітрі. Одиницею вимірювання ЕД є Кл/кг, тобто така ЕД рентгенівського і γ -випромінювань, при якій в 1 кг сухого повітря (dm) утворюються іони з величиною сумарного електричного заряду (dq) в 1 Кулон, тобто

$$X = \frac{dq}{dm}.$$

Позасистемною одиницею, прийнятою в 1928 році, є рентген (Р). Рентген — це ЕД рентгенівського і γ -випромінювання, що створює в 1 см³ повітря при 0 °С і тиску 760 мм рт. ст. сумарний заряд іонів одного знака в одну електростатичну одиницю кількості заряду. При цьому утворюються $2 \cdot 10^9$ пар іонів. Одиниця вимірювання рентген застосовується тільки для рентгенівського та γ -випромінювання і характеризує ступінь іонізації повітря.

Одиниця Р не може забезпечити вирішення всіх метрологічних і практичних завдань у радіології. Крім неї потрібна універсальна одиниця, що дає уявлення про фізичний ефект опромінення в будь-якому середовищі, зокрема — у твердих тілах і біологічних тканинах. Такою одиницею вимірювання став рад — позасистемна Міжнародна одиниця поглиненої дози.

Поглинена доза (D) (ПД) — це кількість енергії (dE) випромінювання, поглинена одиницею маси (dm) опромінюваного об'єкта, тобто

$$D = \frac{dE}{dm}.$$

Рад (rad) — це поглинена доза будь-якого виду іонізуючого випромінювання, при якій 1 г маси речовини поглинає 100 ерг енергії випромінювання (1 рад = 100 ерг/г = 10^{-2} Дж/кг). У системі СІ D вимірюється в Греях (Гр). 1 Гр — це така поглинена доза, при якій 1 кг маси опроміненої речовини поглинає 1 Дж енергії випромінювання: 1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад, 1 Р = 0,88 рад для повітря. В інших речовинах ПД може бути іншою, але близькою до одиниці (наприклад, у біологічній м'якій тканині і у воді 1 Р = 0,93 рад = 0,0093 Гр). Тому експозиційна доза рентгенівського і γ -випромінювання в 1 Р чисельно буде близька до поглиненої дози в 1 рад, тобто 1 Р \approx 1 рад \approx 0,01 Гр. Суто фізичний вплив радіації необов'язково відповідає біологічному впливу. Різні типи випромінювання можуть спричиняти різну біологічну при однаковій фізичній дозі. Тому для розрахунку уражальної дії іонізуючого випромінювання введено поняття **еквівалентної дози** (ЕД) (H) — поглиненої дози, помноженої на коефіцієнт, який відображає здатність даного виду випромінювання пошкоджувати тканини організму:

$$H = \sum K_i D_i.$$

Альфа-частинка є приблизно в 20 разів біологічно ефективнішою, ніж рентгенівське і γ -випромінювання. Для рентгенівського і γ -випромінювання фізичний вплив приблизно дорівнює біологічному. Відповідно, якщо коефіцієнт якості (K) γ -випромінювання прийняти за одиницю, то для β -випромінювання він буде становити одиницю, для α -частинки — 20.

Наразі одиницею вимірювання еквівалентної дози є зіверт (Зв). Зв — доза будь-якого виду випромінювання, поглинена 1 кг біологічної тканини, створює такий саме біологічний ефект, як і поглинена доза в 1 Гр (1 Дж/кг) фотонного випромінювання ($K = 1$). Позасистемна одиниця вимірювання еквівалентної дози — бер (біологічний еквівалент рентгена). При дозі 1 бер будь-якого випромінювання виникає такий саме біологічний ефект, як і при поглиненій дозі в 1 рад рентгенівського випромінювання: 1 бер = 1 рад = 0,01 Гр = 0,01 Дж/кг = 0,01 Зв при $K = 1$. Еквівалентна доза є основною величиною для нормування впливу радіації, оскільки вона дозволяє оцінити ризик від шкідливих біологічних наслідків опромінення біологічної тканини різними видами випромінювання.

Різні органи і тканини тіла людини мають не однакову радіочутливість. Наприклад, при однаковій еквівалентній дозі виникнення раку легенів або молочної залози більш ймовірно, ніж раку щитоподібної залози. Тому дози опромінення органів і тканин також розглядають з різними коефіцієнтами. Це дозволяє визначити небезпеку однієї і тієї ж дози, а також дози при нерівномірному опроміненні організму. Для оцінювання шкоди здоров'ю людини, спричиненої різними характерами

впливу опромінення на різні органи (в умовах рівномірного опромінення всього тіла) введено поняття ефективної еквівалентної дози.

Ефективна еквівалентна доза дорівнює сумі зважених еквівалентних доз у тканинах і органах:

$$K_i = \sum K_i H_i,$$

де K_i — тканинний ваговий множник (таблиця 7.1); H_i — еквівалентна доза, що поглинена i -ю тканиною. Одиниці вимірювання ефективної еквівалентної дози — зіверт (Зв) або бер. Для оцінювання шкоди здоров'ю персоналу і населення від динамічних ефектів, спричинених дією іонізуючих випромінювань, використовують **колективну ефективну еквівалентну дозу** S , яку визначають за формулою

$$S = \int_0^{\infty} K_{\text{эф}} \frac{dN}{dK_{\text{эф}}} dK_{\text{эф}},$$

де $N(K_{\text{эф}})$ — кількість осіб, які отримали індивідуальну ефективну еквівалентну дозу $K_{\text{эф}}$.

Таблиця 7.1 — Значення тканинних вагових множників K_i для різних органів і тканин

Тканина або орган	K_i
Статеві залози	0,2
Червоний кістковий мозок, товстий кишківник, легені, шлунок	0,12
Сечовий міхур, молочні залози, печінка, стравохід, щитоподібна залоза	0,05
Шкіра, поверхня кісток	0,01
Інші	0,05

7.2 Норми радіаційної безпеки

Норми радіаційної безпеки (НРБ) — це ті межі, які суспільство ставить перед атомною індустрією виходячи з наявних знань. Перше радіаційне ураження від рентгенівського випромінювання отримав у 1895 р. Грауббе, а в 1896 р. — французький фізик А. Беккерель. Перша спроба виявити безпечні межі опромінення була зроблена П'єром Кюрі у 1911 р. Він виявив «порогову еритемну дозу», за яку приймалася вагова кількість радіоактивної речовини в поєднанні з часом його дії при безпосередньому контакті з нею. Доза, яка вела до безпечної реакції (еритеми), дорівнювала 340 Р. Пізніше, у 1925 році, американський радіолог Матчелюр запропонував знизити цю дозу у 100 разів. У 1928 році в Женеві

було створено Міжнародну комісію із захисту від рентгенівських променів і радію (Ra), що стала згодом найбільш авторитетною Міжнародною комісією з радіаційного захисту (МКРЗ). Вона ввела в практику першу одиницю вимірювання радіації — рентген. Через п'ять років на підставі накопиченого в світовій практиці матеріалу, узагальненого Зівертом, Барклеєм та іншими, як переносиму (толерантну) було рекомендовано дозу 200 мР/добу, або 35 Р/рік. Зміни НРБ для персоналу, що працює з радіоактивними речовинами у різні роки, відбувалися таким чином: 1925 рік — 1560 мЗв/рік; 1934 рік — 300 мЗв/рік; 1958 рік — 50 мЗв/рік; 1990 рік — 20 мЗв/рік. Таким чином, з моменту початку офіційного регулювання (1925 р.) ця доза зменшилася в 78 разів. Наступним кроком МКРЗ стали відмова від толерантної дози та введення сучасної гранично допустимої дози (ГДД), тобто такої дози, яка не повинна спричиняти значного пошкодження людського організму в будь-який момент часу від початку радіаційних впливів протягом його життя. Комісія також уперше ввела поняття критичних органів, тобто органів, опромінення яких даною дозою завдає найбільшої шкоди опроміненному організму. Розрахунки і узагальнення генетичних досліджень показали: доза, що подвоює частоту спонтанних мутацій у людини, знаходиться в межах 0,1...1 Зв (10...100 бер). Це привело до висновку про необхідність обмеження променевих навантажень як на осіб, зайнятих у радіаційній практиці, так і на населення в цілому. У 1948 році МКРЗ запропонувала знизити сумарне променеве навантаження для професійних працівників до 200 бер (5 бер на рік), заборонити роботу з джерелами ІВ особам, молодшим 18 років, вагітним жінкам, обмеживши сумарне променеве навантаження в дітородному віці (до 30 років) до 60 бер. У 1953 році з'явилися «Санітарні норми і правила при роботі з радіоактивними ізотопами» (СНіП). У документі регламентувалася допустима доза γ -опромінення для професійних працівників — 0,3 Р на тиждень (15 Р/рік). Потім були внесені зміни до СНіП. Завдяки комісії під керівництвом академіка А. А. Летавета, було введено Міжнародні норми радіаційної безпеки (НРБ).

Норми радіаційної безпеки застосовуються для забезпечення безпеки людини в усіх випадках впливу на нього іонізуючого випромінювання штучного або природного походження. Вимоги та нормативи, установлені нормами, є обов'язковими для всіх юридичних і фізичних осіб, незалежно від їх підпорядкованості та форм власності, у результаті діяльності яких можливе опромінення людей. "Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)" установлюють основні межі доз, допустимі рівнем впливу іонізуючого випромінювання щодо обмеження опромінення населення відповідно до закону "Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку" від 03.02.2004. У них передбачені такі основні принципи радіаційної безпеки:

- принцип нормування — неперевикнення допустимих меж індивідуальних доз опромінення громадян від усіх джерел ІВ;

- принцип обґрунтування — заборона всіх видів діяльності з використання джерел ІВ, при яких отримана для людини і суспільства користь не перевищує ризик можливої шкоди, заподіяної додатково до природного радіаційного фону опромінення;

- принцип оптимізації — підтримання на можливо низькому і досяжному рівні індивідуальних доз опромінення і кількості опромінюваних осіб при використанні будь-якого джерела ІВ.

Головною метою радіаційної безпеки є охорона здоров'я населення, включаючи персонал, від шкідливого впливу іонізуючого випромінювання шляхом дотримання основних принципів і норм радіаційної безпеки без необґрунтованих обмежень корисної діяльності при використанні випромінювання в різних галузях господарства, у науці й медицині. Норми поширюються на такі джерела іонізуючого випромінювання:

- техногенні — за рахунок нормальної експлуатації техногенних джерел випромінювання;

- техногенні — внаслідок радіаційної аварії;
- природні;
- медичні.

Вимоги щодо забезпечення радіаційної безпеки сформульовані для кожного виду опромінення. Сумарна доза від усіх видів опромінення застосовується тільки для оцінювання радіаційної обстановки та медичних наслідків.

У нормах регламентуються вимоги щодо обмеження техногенного опромінення в нормальних умовах експлуатації. Категорії опромінюваних осіб: персонал (групи А і Б); все населення. Для категорій опромінюваних осіб установлюються три класи нормативів:

- 1) основні межі доз (ПД);
 - 2) допустимі рівні багатofакторного впливу;
 - 3) контрольні рівні (дозы, рівні активності, щільності потоків та ін).
- Основні ПД наведено у таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 — Основні дозові межі (ПД), (НРБУ-97)

Нормовані величини	Дозові межі (ПД)	
	Група А	Група Б
Ефективна доза (на рік)	20 мЗв у середньому за 5 років, але не більше 50 мЗв	1 мЗв у середньому за 5 років, але не більше 5 мЗв
Еквівалентна доза (на рік)		
Кришталіки	150 мЗв	15 мЗв
Шкіра	500 мЗв	50 мЗв
Кістки стопи	500 мЗв	50 мЗв

7.3 Гранично допустимі дози опромінення (ГДД)

Щодо опромінення населення поділяється на три категорії:

- категорія А — опромінені особи або персонал (працівники) — особи, які постійно чи тимчасово працюють безпосередньо з джерелами ІВ;
- категорія Б — опромінені особи або обмежена частина населення — особи, які не працюють безпосередньо з джерелами ІВ, але за умовами проживання або розміщення робочих місць можуть піддаватися впливу ІВ;
- категорія В — опромінені особи або населення — населення країни, республіки, краю та області.

Для категорії А вводяться ГДД — найбільше значення індивідуальної еквівалентної дози за календарний рік, при якій рівномірне опромінення протягом 50 років не може спричинити несприятливих змін у стані здоров'я, що виявляються з часом. Законом встановлено три групи критичних органів для визначення ГДД:

- 1) усе тіло, червоний кістковий мозок;
- 2) м'язи, щитоподібна залоза, жирова тканина, печінка, нирки, селезінка, шлунок, легені, кришталики очей;
- 3) шкірний покрив, кісткова тканина, кисті, передпліччя, гомілки та стопи.

8 РАДІАЦІЙНИЙ ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ

Джерела іонізуючого випромінювання (ДІВ) використовують у багатьох галузях промисловості:

- для радіографічного та технологічного контролю вимірювань;
- у медицині — для діагностики та лікування онкологічних захворювань, стерилізації продукції;
- у наукових дослідженнях;
- у сільському господарстві тощо.

Зараз в Україні функціонує близько 10 тисяч підприємств установ та організацій, які в своїй діяльності використовують потенційно радіаційно небезпечні технології та ДІВ.

На чотирьох атомних електростанціях (Запорізькій, Хмельницькій, Рівненській та Південно-Українській) експлуатується 15 енергоблоків з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР). На етапі зняття з експлуатації перебувають три енергоблоки Чорнобильської АЕС, перший з яких після повного вивантаження ядерного палива у діюче сховище «мокрого типу» уже визнано об'єктом, призначеним для поводження з радіоактивними відходами (РАВ). Продовжується здійснення заходів з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, зокрема, спорудження нового безпечного конфайнменту.

У м. Києві експлуатується дослідницький ядерний реактор, а на Запорізький АЕС — сховище відпрацьованого ядерного палива «сухого типу».

У складі Державної корпорації УкрДО «Радон» функціонує шість регіональних спеціалізованих підприємств з поводження з радіоактивними відходами (РАВ).

У Дніпропетровській та Кіровоградській областях ведуться видобування та перероблення уранових руд.

Територією України, відповідно до міжнародних договорів, здійснюється транзитне перевезення ядерного палива для атомних станцій деяких країн Європейського союзу.

У лікувально-профілактичних закладах України експлуатується рентгенівське та радіологічне обладнання, заміна якого відбувається після вичерпання техніко-експлуатаційного ресурсу.

Унаслідок аварії на Чорнобильській АЕС утворилася велика кількість радіоактивних відходів, що за об'ємом і сумарною активністю суттєво перевищують обсяги інших РАВ, накопичених унаслідок здійснення діяльності у сфері використання ядерної енергії. РАВ аварійного походження локалізовано переважно в зоні відчуження.

Функціонування великої кількості техногенно-підсилених джерел іонізуючого випромінювання спричиняє необхідність забезпечення радіаційного захисту персоналу підприємств, що здійснюють діяльність з ДІВ, і населення.

У нашій державі захист працюючих від впливу радіаційного випромінювання забезпечується системою загальнодержавних заходів. Ці заходи поділяються на організаційні та технічні. Вибір певного комплексу заходів залежить від конкретних умов роботи з джерелами іонізуючого випромінювання та від типу джерела випромінювання.

Для захисту від зовнішнього випромінювання, яке має місце при роботі з закритими ДІВ, основні заходи мають бути спрямовані на запобігання переопроміненню персоналу шляхом:

- збільшення відстані між джерелом випромінювання і людиною (захист відстанню);
- зменшення тривалості роботи в зоні випромінювання (захист часом);
- екранування джерела випромінювання (захист екранами).

Під закритими джерелами радіаційного випромінювання розуміють такі, які виключають можливість потрапляння радіоактивних речовин в навколишнє природне середовище. У виробничих і лабораторних умовах необхідно якомога швидше застосовувати дистанційне управління роботою обладнання, яке дає можливість виконувати операції з радіоактивними речовинами на відстані.

Захист від внутрішнього опромінення потребує виключення безпосереднього контакту з радіоактивними речовинами у відкритому вигляді та попередження потрапляння їх у повітря робочого простору.

Під внутрішнім опроміненням розуміють вплив на організм людини випромінювань радіоактивних речовин, що потрапляють усередину організму. На дверях приміщень, у яких проводиться робота з відкритими джерелами радіоактивного випромінювання, повинен знаходитися знак радіаційної небезпеки (на жовтому фоні три чорні пелюстки). Особливе значення при роботі з відкритими джерелами радіоактивного випромінювання мають особиста гігієна та засоби індивідуального захисту працюючого. Залежно від виду виконуваних робіт і ступеня небезпечності цих робіт застосовують спецодяг (комбінезони або костюми), спецбілизну, шкарпетки, спецвзуття, рукавиці та респіратори.

Радіоактивні речовини мають знаходитися в спеціальних приміщеннях. У кожному з них необхідно проводити суворий облік надходжень і витрат, щоб виключити можливість їхнього безконтрольного використання. Порядок транспортування радіоактивних речовин регламентується спеціальними правилами. Радіоактивні речовини перевозять у спеціальних контейнерах і спеціально обладнаним транспортом. До організацій і установ, у яких постійно виконуються роботи з радіоактивними речовинами, підвищені вимоги з охорони праці. Керівництво цих організацій зобов'язане розробити детальні інструкції, в яких має бути викладено порядок проведення робіт, облік збереження та використання джерел випромінювання, збір і знешкодження відходів, порядок проведення дозиметричного контролю.

Система радіаційного захисту населення в Україні побудована на результатах медико-біологічних досліджень, які стисло формулюються таким висновком: мірою можливого негативного впливу опромінення на здоров'я людини є величина сумарної дози незалежно від того, яким джерелом іонізуючого випромінювання вона сформована — природним чи штучним. З усіх джерел випромінювання найбільші дози опромінення сьогодні створюють техногенно-підсилені джерела природного походження. Середня доза опромінення населення України від цих джерел становить 6,15 мЗв на рік. При цьому більше 75 % цієї дози формується за рахунок природного радіоактивного газу - радону.

Радон-222 — це газ, який утворюється під час радіоактивного розпаду природних радіонуклідів уранового ряду. Розпадаючись, радон-222 утворює короткоіснуючі дочірні продукти розпаду (ДПР) — полоній, свинець, вісмут, які, приєднуючись до часток пилу чи вологи, утворюють радіоактивний аерозоль. Потрапляючи у легені, радіоактивний аерозоль (через малий період напіврозпаду ДПР радону-222) опромінює бронхіальний епітелій, що призводить до відносно високих доз опромінення, які можуть стати причиною додаткового ризику захворювань на рак легенів.

Радон у повітрі приміщень є компонентою дози опромінення, яку можна контролювати. На території, наприклад, Кіровоградської області в 90 % випадків він надходить у повітря приміщень з ґрунтів. Тому більше за все він концентрується на перших поверхах багатопверхових будинків, в одноповерхових будинках, підвальних і напівпідвальних приміщеннях. Вміст радону у повітрі можна легко знизити, якщо збільшити вентилявання приміщення або обмежити надходження газу герметизацією підвального простору і, отже, зберегти багато життів людей.

У Кіровоградській області, де здійснюється видобуток уранової руди, населення отримує опромінення вище допустимих рівнів від техногенно-підсилених джерел природного походження, а також під час медичних обстежень, досліджень чи лікуванні та ліквідації наслідків радіаційних аварій.

Таким чином, питання обмеження опромінення населення радоном-222 та опромінення під час проведення профілактичних досліджень сьогодні є головними у протирадіаційному захисті населення.

У системі заходів радіаційної безпеки населення велике значення має забезпечення протипроменевого захисту у разі медичного опромінення, тобто опромінення людини внаслідок медичного обстеження або лікування. Медичне опромінення може спричинятися діагностичними рентгенологічними дослідженнями, діагностичними дослідженнями з використанням радіонуклідів, променевою терапією за допомогою зовнішніх або внутрішніх джерел іонізуючого випромінювання тощо.

Під час проведення радіологічних процедур потужність дози гамма-випромінювання на відстані 0,1 м від пацієнта має бути не вищою за 10 мЗв за 1 рік. Особи, які добровільно надають допомогу пацієнтам під час проведення медичних процедур, не повинні отримувати опромінення у дозах понад 5 мЗв за рік.

Медичне опромінення добровольців з метою отримання науково-медичної інформації допускається тільки з дозволу Міністерства охорони здоров'я України за наявності письмової згоди добровольця, проінформованого про ступінь радіаційного ризику, і за умови неперевищення встановлених для добровольців рівнів опромінення.

З метою контролю за медичним опроміненням людини потрібно проводити облік індивідуальних дозових навантажень. Для цього встановлено спеціальну форму обліку дозових навантажень, яка містить такі відомості:

- номер процедури (обстеження);
- дату процедури (обстеження);
- вид обстеження;
- ефективну дозу за одне обстеження, мЗв;
- медичну установу, у якій проведено обстеження;
- посаду лікаря;

- підпис лікаря і його прізвище;
- сумарну ефективну дозу опромінення за рік;
- підпис головного лікаря медичної установи.

Ліміти доз для обмеження медичного опромінення не встановлюються, а необхідність проведення певної рентгенологічної чи радіологічної процедури обґрунтовується лікарем на підставі медичних показань.

Повторення однотипних рентгенологічних і радіологічних діагностичних процедур допускається за необхідності і можливості отримання нової чи розширеної інформації. Необґрунтоване дублювання однотипних діагностичних процедур забороняється.

Під час проведення профілактичного обстеження населення річна ефективна доза не має перевищувати 1 мЗв. Перевищення цього рівня допускається лише в умовах несприятливої епідемічної ситуації за узгодженням з органами Державної санітарно-епідеміологічної служби МОЗ України.

Необхідно уникати призначення радіологічних і рентгенологічних процедур (за винятком ургентних випадків) жінкам репродуктивного віку (до 45 років) з діагностованою чи можливою вагітністю, а також у період годування дитини груддю.

8.1 Протирадіаційний захист населення на заражених територіях

Протирадіаційний захист населення заражених територій ґрунтується на трьох основних принципах: введення конкурентів, введення мішеней, йонний захист.

Уведення конкурентів і попередження накопичення радіонуклідів в організмі при неминучому ризику їхнього проникнення з водою, їжею, повітрям здійснюється через корекцію харчування. В основу покладено властивість конкурентності обміну радіоактивних речовин та їхніх хімічних нерадіоактивних аналогів. Ці та інші речовини здатні включатися в одні й ті ж метаболічні процеси до точки насичення реакцій. Після насичення атоми (іони) будь-якої з конкуруючих речовин не включаються в обмін, біохімічні структури клітин. Якщо насичення буде здійснено за рахунок стабільних речовин, то радіоактивні елементи до складу клітин тканин органів не включаються.

Так, для захисту щитоподібної залози від ^{131}I необхідно насичення організму звичайним нерадіоактивним йодом, який, конкуруючи зі своїм радіоактивним аналогом і перебуваючи в більш вигідному (кількісному) положенні, блокує «вакантні» місця надходження ^{131}I . У результаті конкурентної блокади радіонуклід, що мігрує тільки в щитоподібну залозу, виводиться з організму.

Конкурентами цезію є калій, меншою мірою — натрій. Конкурентами стронцію — кальцій, меншою мірою — магній, мідь. Надходження конкурентів ^{137}Cs і ^{90}Sr має здійснюватися через дієту з постійним переважанням в асортименті продуктів, що містять такі речовини. Додатково можуть застосовуватися настої трав (уживані замість чаю), а також неспецифічні фармакологічні препарати, такі, як оротат калію, аспаркам, панангін, що є у будь-якій аптеці, а також мінеральні води з вмістом калію та магнію.

Обираючи або рекомендуючи як радіозахисні препарати (радіопротектори) ті чи інші продукти, слід пам'ятати, що якщо вони будуть вирощені на радіоактивному ґрунті, то відіграють абсолютно протилежну роль, бо саме вони будуть вибірково накопичувати зазначені радіонукліди.

З рослин, які також мають бути зібрані на нерадіоактивних територіях, властивості радіопротекторів мають лопух (кореневище), м'ята перцева (листя), солодка гола (кореневище). Відвари або настої цих висушених рослин можна вживати як чаї.

Уведення мішеней, або принцип внутрішньоклітинного гасіння енергії фотонів (часток) і відповідно придушення біологічної агресивності фактора, реалізується за рахунок введення в організм клітини металів-«мішеней» вибіркового захоплення (поглинання) енергії випромінювань. Закономірний зсув реакцій внутрішньоклітинної взаємодії в бік фотоефекту (до 50...100 кеВ) приводить, як показує аналіз накопичених матеріалів, не тільки до достовірного захисту, але і до ефекту стимулювання загальних біологічних, імунних процесів клітини, організму.

Так, експериментальне введення в організм дрібнодисперсного порошку заліза до опромінення абсолютно летальною дозою значно підвищує стійкість лабораторних тварин до радіаційного фактора (середня тривалість життя зростає не менше, ніж у два рази). Більш ефективні в експерименті напівсинтетичні казеїнові сполуки полівалентних металів. Їхнє включення в метаболізм до введення ^{137}Cs сприяє значному зниженню виходу вільних радикалів і тим самим зменшує руйнування ліпідного шару мембран, блокаду типових ферментів та інші радіаційні поломки. Не менше значення в радіаційному ефекті мають донорські добавки (іонметалли) до цитохромної системи, що приводить до гасіння реакцій. Підтвердженням може служити введення в раціон експериментальних тварин солей кобальту з зеленою капустою, яка містить цей мікроелемент.

Наступне опромінення абсолютно летальною дозою приводить, тим не менше, до виживання 15...60 % кількості піддослідних тварин.

Закономірним ефектом внутрішньоклітинної фільтрації і зниження енергії випромінювань буде придушення ефектів двохниткових (необоротних) розривів ДНК з подальшим незворотним генним дефектом, що завершується формуванням радіаційно індицированого раку. До таких ефектів, які достовірно реєструються в експерименті, веде включення в харчування селену (та, безумовно, інших металів). На тлі «мішеней»

ефекти від модельованого впливу факторів, характерних для наслідків радіаційних аварій, значно знижуються. Аналогічні реакції відбуваються і при введенні в організм природних металовмісних біологічних субстратів, кобальт-, нікель-, залізо-, кремнійвмісних сполук (таблиця 8.1). При побудові експериментальних мікроелементовмісних дієт і особливо при їхньому додатковому вітамінному забезпеченні середня тривалість життя опромінюваних тварин значно зростає. Розрахункове збільшення середньої тривалості життя людини досягає при таких дієтах 6,5 – 7 років.

Таблиця 8.1 – Вміст основних хімічних елементів у продуктах харчування

Назва продукту	Вміст, мкг на 100 г продукту		
	Fe	Co	Cu
Ячмінь	7400	7,9	470
Овес	5530	8,0	600
Гречка	8270	3,6	660
Сочевиця	11770	11,6	660
Квасоля	5940	18,7	580
Горох	7000	8,6	590
Мак	26000	18,0	1771
Халва	26000	-	-
Печінка свиняча	20200	12,0	3000
Тетерев'ятина	6700	32,0	230
Печінка курчат	1300	15,0	404
Печінка куряча	1750	15,0	386

Достовірні реакції захисту простежуються не тільки в гострих, але і в хронічних випадках захворювань (експериментах), про що наочно свідчить введення «аеросилу» - кремнійвмісного препарату мишам, уведеним у середовище з різко підвищеним вмістом ^{137}Cs і ^{90}Sr . Внутрішньоклітинний метаболізм препарату протягом 7 діб приводить до відновлення імунної та сумарної резистентності тварин до нормальних значень. До аналогічних наслідків приводять і включені в метаболізм металовмісні флавопротеїди (у тому числі і пігменти).

Не менш ілюстративні протилежні реакції. Штучне вирощування штамів мікрофлори при різко обмеженому надходженні в клітину залізовмісних компонентів харчування приводить до значного підвищення чутливості до радіаційного впливу. Хронічний дефіцит надходження заліза в організм спричиняє підвищену чутливість населення до відносно низьких доз радіаційних впливів. Пробна корекція харчування дітей на радіоактивних територіях шляхом уведення в раціон залізовмісних продуктів (гречана каша) на тлі контрольного харчування з банальної

залізодефіцитної дієти показує достовірні відмінності в сумарних показниках здоров'я досліджуваних груп дітей.

До заходів радіаційного захисту також належить застосування фармакологічних препаратів, таких, як зоотоксини, трэфони, кортикостероїди, екстрогени, алкалоїди. Використовувати їх можна за певних умов (при хронічному професійному опроміненні), не пов'язаних зі значною площею радіоактивно забрудненого середовища.

У ряді випадків при масивній надфоновій токсичності середовища, стресових психоемоційних навантаженнях, частій зміні складу середовища необхідно використовувати препарати, які піддаються самостійному домашньому приготуванню, наприклад різні трави.

9 ЯДЕРНИЙ ПАЛИВНИЙ ЦИКЛ

9.1 Ланцюгова реакція. Коефіцієнт розмноження нейтронів

Та обставина, при якій внаслідок поділу ядер виникає велика кількість вторинних нейтронів, дозволяє здійснити ланцюгову реакцію і зробити можливим практичне використання ядерної енергії.

Розглянемо ідеалізовану схему ланцюгової реакції (рисунок 9.1). Так, в необмеженому середовищі, що містить U_{235} , під дією бомбардування первинного нейтрона ядро урану ділиться на два нових ядра і при цьому в середньому вилітає два вторинних нейтрони (I покоління). Ці нейтрони вступають у нову реакцію і спричиняють поділ двох нових ядер урану, у результаті чого у другому поколінні утворюється чотири нейтрони. Вони в наступному — III поколінні спричиняють ділення ядер урану і утворення восьми нейтронів. У IV поколінні утворюється вже 16 нейтронів. У ході реакції кількість нейтронів безперервно зростає.

Нехай k — кількість поколінь нейтронів, тоді кількість нейтронів, що утворилися в k -поколінні, дорівнюватиме $N = 2^k$. Оцінимо, яка енергія виділяється при ідеалізованій ланцюговій реакції.

Відомо, що час життя одного покоління нейтронів становить $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с. Тому, наприклад, на 80-те покоління буде потрібно усього лише $10^{-5} \dots 10^{-6}$ с. За цей час в урановому середовищі утворюється приблизно тисяча двадцять чотири вторинних нейтрони, які спричиняють поділ 1024 ядер U_{235} (це приблизно 140 г маси ^{235}U), при цьому вивільняється енергія, яка дорівнює $3 \cdot 10^{13}$ Вт·с. Така енергія відповідає спалюванню 1000 тонн нафти. Якщо відсутні перешкоди для подальшого розвитку реакції, то кількість нейтронів через 10^{-3} с становитиме 10^{72} .

У ідеалізованій схемі ланцюгової реакції прийнято, що всі вторинні нейтрони знову вступають в реакцію, утворюючи наступне покоління нейтронів. Насправді це не так. Не всі вторинні нейтрони потрапляють в ядра речовини, що ділиться.

У реальних умовах ланцюгова реакція відбувається в обмеженому просторі, тобто в пристроях, де крім речовини, що ділиться, є інші речовини: теплоносії, сповільнювачі нейтронів, захисні оболонки і покриття, поглиначі нейтронів та інші.

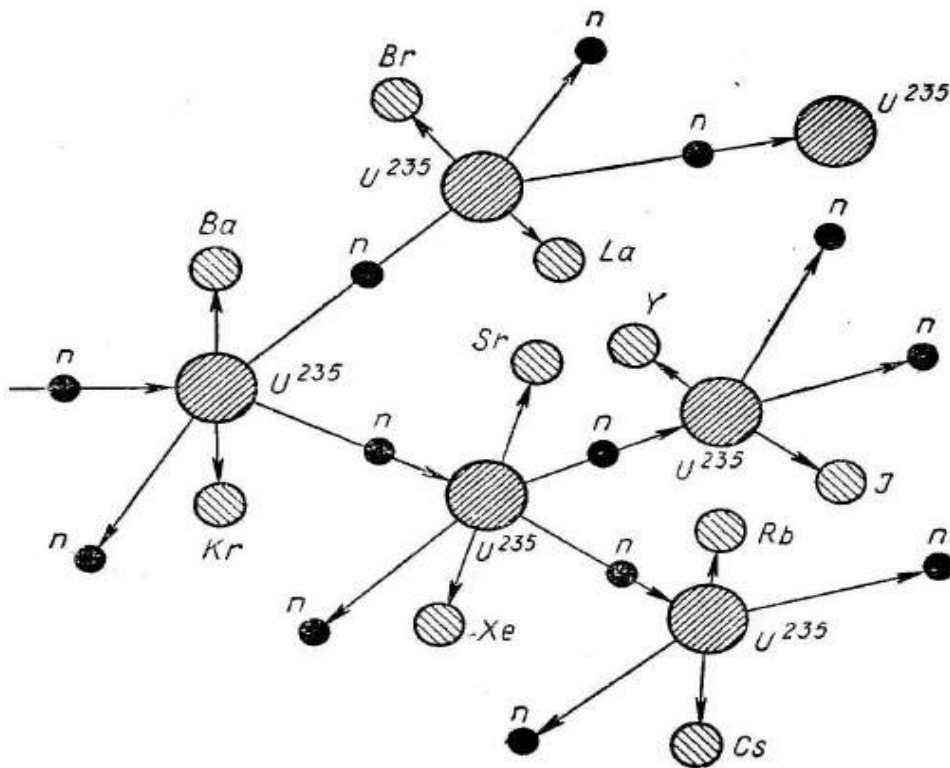


Рисунок 9.1 — Ідеальна схема ланцюгової реакції

Тому частина вторинних нейтронів поглинається вказаними вище речовинами. Крім того, деяка частина нейтронів покидає межі зони реакції. Отже, тільки частина вторинних нейтронів бере участь у вторинній реакції. Не всі нейтрони, що проникають в ядра речовини, що ділиться, спричиняють поділ, а лише їхня частина. З метою управління ланцюговою реакцією зазвичай використовують теплові нейтрони. Для цього швидкі нейтрони уповільнюють речовиною-сповільнювачем (важка вода, графіт). Досвід і теорія показують, що частина теплових нейтронів (K — коефіцієнт розмноження нейтронів), що спричиняють поділ ядер, визначається за формулою

$$K = p \cdot f \cdot \eta \cdot \varepsilon,$$

де p — частина вторинних нейтронів, які стають тепловими; f — частина теплових нейтронів, які захоплюються ядрами речовини, що ділиться; η — середня кількість вторинних нейтронів, що припадає на один тепловий нейтрон, який потрапляє в ядро речовини, що ділиться; ε — частина швидких нейтронів, які спричиняють ділення ядер до сповільнення.

Якщо $K > 1$, то таку ланцюгову реакцію називають **прискореною**.

Якщо $K < 1$ — *затухаючою*.

Якщо $K = 1$ (критична умова, при якій відбувається ланцюгова реакція) — реакція є такою, що *сама підтримується*.

Для досягнення $K = 1$ необхідно вибрати відповідні розміри реактора, деталей, маси речовини, що ділиться. Розміри реактора при досягненні умови $K = 1$, називають *критичними*, а масу речовини — *критичною*.

9.2 Будова і типи ядерних реакторів

Ланцюгова реакція відбувається в ядерних реакторах. Реактором називається пристрій, в якому підтримується керована ланцюгова реакція. Відповідно до типу ланцюгової реакції розрізняють реактори на повільних, проміжних і швидких нейтронах. Складові частини будь-якого реактора — це:

- 1) активна зона;
- 2) теплоносій;
- 3) система регулювання;
- 4) радіаційний захист;
- 5) пульт дистанційного керування;
- 6) інші конструктивні елементи.

Під час роботи реактора відбуваються такі процеси:

- виділення тепла за рахунок реакції поділу;
- вигорання і відтворення пального;
- отруєння активної зони осколками розпаду;
- отруєння захисту та конструктивних матеріалів нейтронами.

Основною характеристикою реактора є його потужність, тобто кількість виділеної енергії за одиницю часу. Потужність в 1 МВт відповідає ланцюговій реакції, в якій відбувається $3 \cdot 10^6$ актів поділу ядер за 1 с. Головна частина будь-якого реактора — активна зона. У теплових реакторах і реакторах на промислових нейтронах активна зона складається з горючого, як правило, змішаного з ізотопом ^{238}U , який не ділиться, і з сповільнювача (рисунок 9.2).

В активній зоні реакторів на швидких нейтронах сповільнювача немає. Залежно від взаємного розташування пального і сповільнювача розрізняють *гомогенні* і *гетерогенні* реактори. З них найбільш поширені гетерогенні. У гетерогенних реакторах активна зона складається із сповільнювача, в який поміщаються касети з ядерним паливом. Вони називаються *тепловиділяючими елементами* або *ТВЕЛами*. Активна зона з відбивачем розташовується в сталевому кожусі. Першу АЕС з графітовим сповільнювачем було побудовано в 1954 році в місті Обнінську. У її реактори було введено 128 ТВЕЛів, що містять 550 кг збагаченого до 5 % урану. Потужність станції — 5 МВт.

Відведення тепла реакції з активної зони здійснюється теплоносієм. До теплоносія висуваються такі вимоги:

- велика теплоємність;
- слабе поглинання нейтронів;
- слабка хімічна активність.

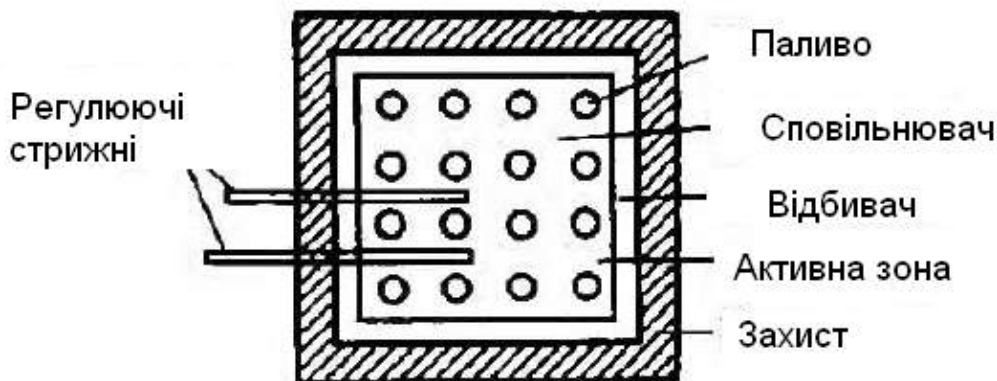


Рисунок 9.2 — Схематичний розріз гетерогенного реактора

Теплоносіями є: вода, повітря, азот, вуглекислий газ, рідкий натрій тощо. Вода має гарну теплопровідність і велику теплоємність, слабо поглинає нейтрони.

У потужних реакторах, що мають температуру активної зони приблизно 400 °С, використання води утруднюється її закипанням. Щоб уникнути кипіння води, необхідний високий тиск, що потребує використання великої кількості нержавіючої сталі, яка сильно поглинає нейтрони. Крім того, при високих температурах вода є хімічно активною.

Перший атомний реактор потужністю близько 2 кВт з керованою ланцюговою реакцією був побудований в 1942 році в Чикаго під керівництвом Е. Фермі. У наступні роки в США, Канаді, Англії, СРСР, Франції та в інших країнах були побудовані численні реактори, різноманітні за своїм призначенням і потужністю, структурою активної зони, «пальним», яке використовується, способом тепловідведення і видом використовуваного сповільнювача. Існуючі реактори можуть бути класифіковані:

1) за енергією нейтронів, під дією яких відбувається поділ ядер пального:

- реактори на теплових нейтронах;
- реактори на проміжних нейтронах;
- реактори на швидких нейтронах;

2) за видом пального, що використовується:

- реактори з використанням природного урану (0,71 % ^{235}U);
- реактори на слабкозбагаченому урані (1...2 % ^{235}U);
- реактори на високозбагаченому урані (90 % ^{235}U);
- реактори на плутонії;

- реактори на торії;
- 3) за структурою активної зони:
 - гетерогенні реактори, в яких ядерне паливо і сповільнювач розміщені у вигляді окремих блоків і являють собою неоднорідне середовище для нейтронів;
 - гомогенні реактори, в яких ядерне паливо і сповільнювач знаходяться в суміші і являють собою однорідну середу для нейтронів;
- 4) за видом сповільнювача:
 - реактори із звичайною і важкою водою;
 - графітові реактори, наприклад уран-графітовий реактор;
 - реактори з берилієм і окисом берилію;
- 5) за видом тепловідведення:
 - тільки теплоносій;
 - паливо, змішане з теплоносієм;
- 6) за видом теплоносія:
 - реактори із звичайною і важкою водою;
 - реактори з рідкими металами;
 - реактори з органічними рідинами;
 - реактори з газовим теплоносієм;
- 7) за призначенням:
 - дослідницькі реактори, в яких отримують потужні пучки нейтронів, що використовують для різних фізичних досліджень;
 - енергетичні реактори, які призначаються для отримання електричної енергії в промислових або опалювальних цілях;
 - реактори для промислового отримання штучних радіоактивних ізотопів;
 - теплофікаційні реактори, за допомогою яких виробляється тепло;
 - бриднерні (відтворюючі) реактори, що використовують для відтворення з ^{238}U і ^{232}Th матеріалів поділу ^{239}Pu і ^{233}U , які за своїми властивостями подібні до ізотопу ^{235}U ;
 - транспортні реактори, які призначаються для використання на великих кораблях, підводних човнах, на великих літаках.

9.3 Побудова атомної електростанції і ядерна енергетика

Друге місце за штучним радіоактивним забрудненням середовища займають атомні електростанції (АЕС), які виробляють до 30 % електроенергії світу. Зараз у світі функціонує понад 500 ядерно-енергетичних блоків АЕС потужністю 400 ГВт, з яких 163 — у країнах Західної Європи, 121 — у США, 15 — в Україні, 45 — у Росії, 60 — у Південно-Східній Азії.

Перевага АЕС полягає в тому, що вона потребує меншої кількості вихідної сировини і земельних площ (таблиця 9.1), ніж теплові станції, не забруднює атмосферу димом і сажею. Небезпека АЕС полягає в

можливості виникнення катастрофічних аварій реактора, а також в реально невирішеній проблемі утилізації радіоактивних відходів (РАВ) і витоку в навколишнє середовище невеликої кількості радіонуклідів.

Таблиця 9.1 — Витрати природних ресурсів для вироблення 1 ГВт/рік електроенергії у вугільному і ядерному паливному циклах

Ресурс	Ядерний паливний цикл	Вугільний паливний цикл
Земля, га	20 - 60	100 - 400
Вода, млн м ³	32	21
Матеріали (без урахування палива), тис. т	16	12
Кисень, млн т	-	8

На рисунку 9.3 зображено принципову схему атомної електростанції, де 1 означає бетонний захист атомного реактора; 2 — циліндри; 3 — стрижні з ураном усередині них. Уранові стрижні-блоки 2, 3 занурені у воду 5, яка одночасно є і сповільнювачем, і теплоносієм. Вода перебуває під великим тиском і тому може бути нагріта до високої температури — приблизно 300 ° С.

Така гаряча вода з верхньої частини активної зони реактора надходить через трубопровід 6 у парогенератор 8 (де випаровується вода 9), охолоджується і повертається через трубопровід 7 у реактор. Насичений пар 10 через трубопровід 11 надходить у парову турбіну 12 і після відпрацювання повертається в парогенератор через трубопровід 13. Турбіна обертає електричний генератор 14, струм від якого надходить у розподільний пристрій і потім — у зовнішню електричну мережу. У реакторі є аварійні стрижні 4, виготовлені з поглиначів нейтронів. При аварії ці стрижні опускають у реактор, і таким чином припиняється ланцюгова реакція.

Виробництво електроенергії на АЕС є однією з ланок ядерного паливного циклу, виробничу дозову структуру якого наведено в таблиці 9.2.

У процесі роботи в ядерних реакторах накопичується величезна кількість продуктів поділу і трансуранових елементів. В умовах нормальної експлуатації АЕС викиди продуктів поділу в зовнішнє середовище незначні і складаються в основному з радіонуклідів I₁₃₁ та інертних радіоактивних газів (Xe, ⁸⁵Kr) (ІРГ), періоди напіврозпаду яких (крім ⁸⁵Kr) не перевищують кількох діб. Ці нукліди утворюються в процесі розпаду урану і можуть просочуватися крізь мікротріщини в оболонках ТВЕЛів. Так, протягом 1992 року максимальні середньодобові радіоактивні викиди на АЕС у відсотках від допустимої норми становили:

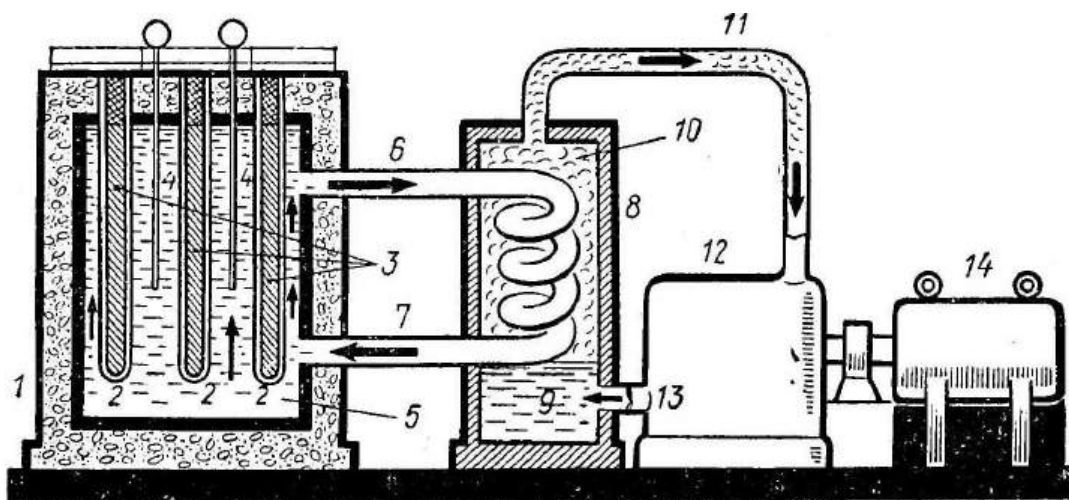


Рисунок 9.3 – Схема АЕС

Таблиця 9.2 – Ядерний паливний цикл

Основні етапи	Оцінки очікуваної колективної ефективної еквівалентної дози (люд.·Зв) на 1 ГВт електроенергії	
	Персонал	Населення
Видобуток палива	0,9	0,5
Збагачення	0,1	0,04
Виготовлення ТВЕЛів	1	0,0002
Реактори	10	4
Регенерація	10	1
Захоронення відходів	-	-

- на АЕС з ВВЕР (водо-водяний енергетичний реактор) йоду – від 0,02 до 54 %, ІРГ – від 0,15 до 10 %;

- на АЕС з РВПК (реактор з великою потужністю - каналний) йоду – від 0,02 до 24%, ІРГ – від 0,02 до 5 5%.

Середньодобовий допустимий викид становить:

- за йодом 0,01 Ки/доб – 1000 МВт;

- за ІРГ 500 Ки/доб – 1 000 МВт.

Причому 90 % усієї дози опромінення, яку можливо отримати внаслідок викиду на АЕС і зумовленої короткоживучими ізотопами, населення отримує протягом року після викиду; 98 % – протягом п'яти років. Майже вся доза припадає на людей, що живуть поблизу АЕС.

Довгоживучі продукти викиду (^{137}Cs , ^{85}Kr , ^{141}Ce та ін.) поширюються по всьому світу. Прогноз очікуваної колективної еквівалентної дози опромінення такими ізотопами становить 670 люд·Зв на кожен 1 ГВт електроенергії, що виробляється. Відомо, що за період 1971 - 1984 рр. у 14 країнах світу сталася 151 аварія на АЕС.

9.4 Структура ядерного паливного циклу

Створення ядерного арсеналу було б неможливим без організації розгалуженої інфраструктури підприємств ядерного паливного циклу (ЯПЦ), що забезпечує виробництво і оброблення матеріалів, які зазнають ядерний розподіл (рисунок 9.4). Пік у розвитку комплексу підприємств ядерного паливного циклу припав на початок і середину 1980-х років.

Велика частина урану, що видобувалася, використовувалася для виробництва палива промислових реакторів, а інша його частина надходила на збагачувальні заводи, складувалася в державних сховищах і спрямовувалася на експорт. З гірничодобувних комбінатів уран у вигляді закису-окису (U_3O_8) відправлявся на механічний завод для додаткового очищення та перероблення в металеві злитки. Злитки слугували сировиною для заводу хімконцентратів, що займався виробництвом металевих блочків паливних елементів промислових реакторів.

Після опромінення в реакторах відпрацьоване паливо промислових реакторів перероблялося на радіохімічних заводах, а виділений плутоній використовувався для виробництва ядерної зброї. Регенований, тобто зібраний з відпрацьованого палива в процесі виділення плутонію, уран збагачувався. Цей уран слугував сировиною для виробництва практично всього збройового урану.

Для виробництва палива реакторів АЕС використовувався як регенований, так і природний уран. Отриманий на збагачувальних заводах гексафторид низькозбагаченого урану спрямовувався на машинобудівний завод в Електросталі, де вироблялось паливо для реакторів ВВЕР-440, і Ульяновський металургійний завод, де вироблялось паливо для реакторів ВВЕР-440/1000 і РБМК, для перероблення в двоокис урану і виробництва керамічних таблеток реакторного палива. Паливні таблетки використовувалися для виробництва тепловиділяючих елементів (ТВЕЛ) і тепловиділяючих збірок (ТВЕЗ) на машинобудівному заводі в Електросталі (РБМК і ВВЕР-440) і заводі хімконцентратів у Новосибірську (ВВЕР-1000).

Після видалення з реакторів АЕС відпрацьоване паливо розташовувалося для проміжного зберігання на майданчиках станції. Відпрацьоване паливо реакторів ВВЕР-1000, починаючи з другої половини 1980-х рр., знаходилося в централізованому сховищі в Красноярську-26, де зберігалось до початку роботи створеного там крупного радіохімічного заводу РТ-2. Паливо реакторів ВВЕР-440 перероблялося на заводі РТ-1 у Челябінську-65. Виділений при переробленні цього палива енергетичний плутоній розміщували в сховище, а регенований уран відправляли на Ульяновський металургійний завод для виробництва палива для реакторів РБМК.

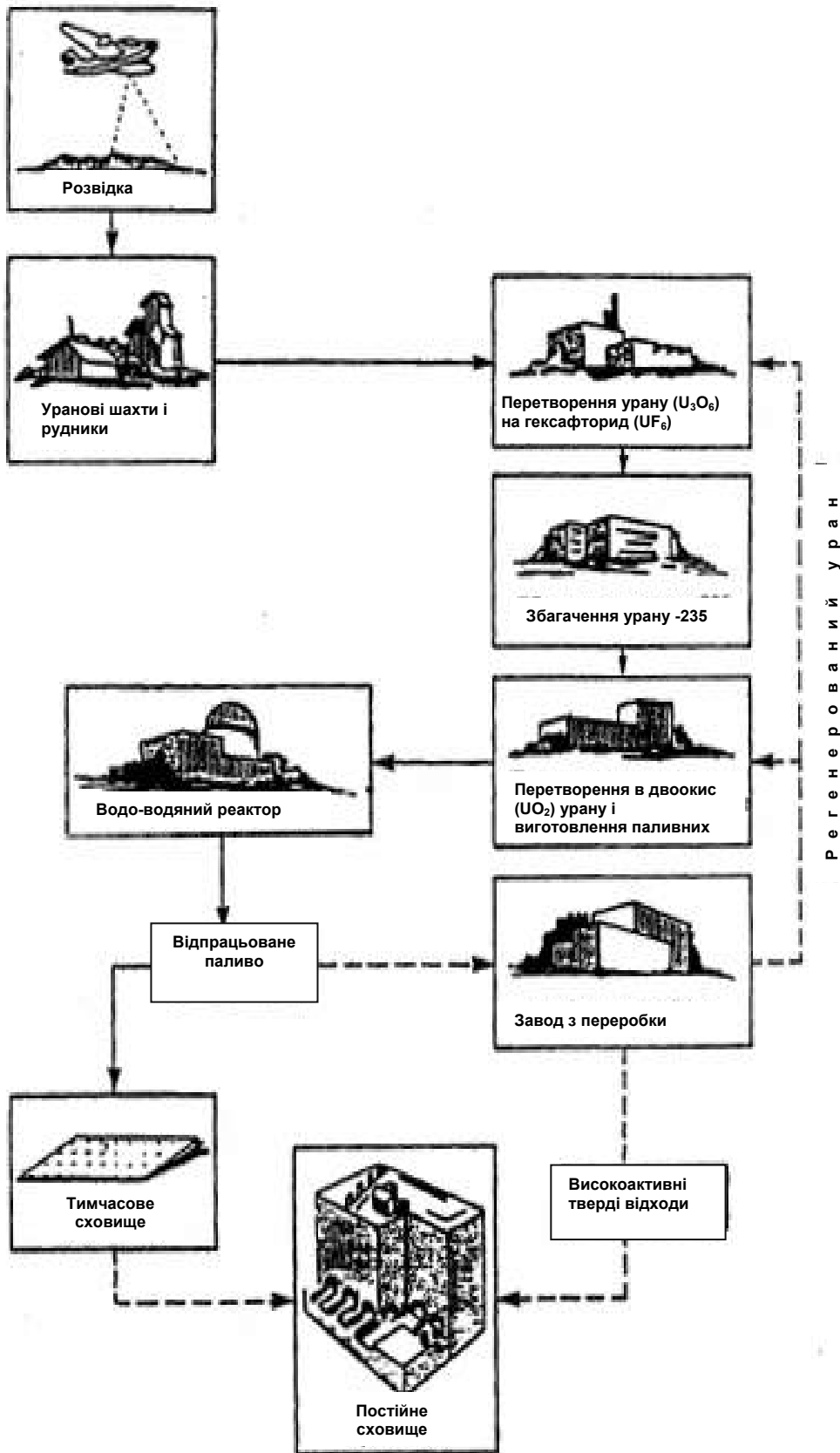


Рисунок 9.4 – Ядерний паливний цикл

Високозбагачений уран також проходив кілька стадій перероблення. Уран, збагачений до 90 % ^{235}U , використовувався в промислових, дослідницьких реакторах, а також в реакторах, що працюють на морських судах. Відпрацьоване паливо перероблялося на заводі РТ-1 (Челябінськ-65), а регенований уран використовувався для виробництва палива для реакторів підводних човнів (збагачення 20...45 % ^{235}U).

Основним завданням підприємств ядерного паливного циклу на даний час є виробництво палива для реакторів АЕС і діяльність щодо поводження з відпрацьованим ядерним паливом та радіоактивними відходами.

9.5 Видобуток природного урану

Уран є досить поширеним у природі металом. Незважаючи на це, родовища з високим вмістом урану зустрічаються відносно рідко. Цілеспрямовані масштабні роботи з розвідки уранових родовищ були організовані з середини 1940-х рр. У 1950-60-ті роки були відкриті найбільші родовища урану на території колишнього СРСР.

У 1960-70-ті рр. на основі цих родовищ були введені в експлуатацію найбільші урановидобувні комплекси: Цілинний (Степногірськ) і Прикаспійський (Актау, колишній Шевченко), комбінати в Казахстані, Навоїський комбінат в Узбекистані і Приаргунський комбінат у Росії. Значна кількість урану імпортувалося зі Східної Німеччини, Чехословаччини, Болгарії та Угорщини. У 1980-ті роки рівень виробництва та імпорту урану досяг 30000 тонн на рік.

Скорочення оборонних замовлень у другій половині 1980-х років і помітне зниження темпів розвитку атомної енергетики після чорнобильської катастрофи призвели до надвиробництва урану і зниження рівня його видобутку. У 1991 р. рівень видобутку знизився до 40 % продуктивності комплексу. Розпад СРСР значно змінив структуру уранового комплексу і привів до утворення індивідуальних виробників урану, орієнтованих на продаж продукції на світовому ринку.

Усього до початку 1990-х років у СРСР було вироблено або імпортовано зі Східної Європи приблизно 660000 тонн урану, з яких приблизно 460 000 тонн були використані для виробництва збройового плутонію або урану.

Природний уран складається з двох ізотопів: урану, який ділиться (дає ланцюгову реакцію поділу), або збройового урану-235 (його вміст – 7 кг у тонні руди, тобто 0,711 %) і урану-238, що не ділиться (993 кг у тонні). У реакторах воєнного призначення (промислові реактори) для напрацювання плутонію використовується природний уран у вигляді циліндричних металевих блоків, що знаходяться в герметичних алюмінієвих пеналах. Процес розпаду урану-235 (керована ланцюгова реакція) триває 3 – 6 місяців, при цьому у кожній тонні урану утворюється

менше кілограма «осколків» і напрацьовується в основному один ізотоп плутонію — плутоній-239, збройовий (500...700 г). У паливі для атомних електростанцій урану-235 набагато більше (45 — 46 кг на тонну — низькозбагачений уран), воно знаходиться у вигляді гранул оксиду урану в герметичних цирконієвих трубках, які зібрані в пакети — тепловиділяючі збірки (ТВЗ). Процес триває довше (близько трьох років), у результаті чого утворюється значно (у 60 — 80 разів) більше «осколків» і напрацьовується в 20 разів більше плутонію, причому не збройового, а енергетичного, тобто суміші ізотопів плутонію. Ці «осколки» і плутоній, уран-235, що залишився (не вигорів), і майже весь уран-238, що не ділиться, знаходяться у відпрацьованому ядерному паливі в тих же трубках (збірках), які тепер називаються відпрацьованими тепловиділяючими збірками. Процеси перероблення опроміненого урану з реакторів воєнного призначення (промислові реактори) і процес перероблення відпрацьованого палива з атомних електростанцій є однотипними.

9.6 Виготовлення гексафториду урану

Важливе місце в ланцюжку ЯПЦ займає виробництво гексафториду урану (UF₆), який є сировиною для збагачувальних заводів.

Зараз гексафторид урану виробляється за допомогою спалювання сполук урану в одноступеневому плазмовому реакторі. При цьому як сировина можуть використовуватися різні сполуки урану. Відповідна технологія була розроблена в 1960-ті і освоєна в 1970-ті роки.

Перед тим як перетворити уран в гексафторид урану, необхідно провести операцію доочищення урану для перетворення його в ядерно-чистий матеріал (така операція називається афінажем).

Особлива увага приділяється очищенню урану від бору, кадмію, гафнію, які є нейтронопоглинаючими елементами, а також від рідкоземельних елементів (гадоліній, європій і самарій). Технологічно афінаж полягає в екстракційному очищенні урану трибутилфосфатом після розчинення уранового концентрату в азотній кислоті.

Ця технологія містить виробництво чистого фтору, подрібнення тетрафториду урану або оксиду урану до порошкоподібного стану з наступним спалюванням у факелі фтору. Потім проводяться фільтрація гексафториду урану і його конденсація в системі холодних пасток.

9.7 Небезпечні відходи і викиди підприємств, що збагачують уран

У процесі виробництва ядерного палива утворюються тверді і рідкі радіоактивні відходи. Усі вони відносяться до категорії низькоактивних.

Відходом виробництва електролізного заводу є відвальний (збіднений) гексафторид урану, велика кількість якого зберігається в

ємностях об'ємом 2,5 м³ на відкритих майданчиках, складах. Це становить небезпеку для навколишнього середовища у випадку непередбаченої розгерметизації таких ємностей.

Гексафторид урану належить не до радіоактивних відходів (РАВ), а до ядерних матеріалів (ЯМ), оскільки підлягає подальшому переробленню за трьома основними напрямками:

- довиділення урану-235;
- перероблення з метою добування фтору;
- перероблення з метою застосування в реакторах на швидких нейтронах.

У світовій атомній індустрії тільки Франція використовує технологію з переведення відвального UF₆ в інші форми, які більш безпечні для зберігання (наприклад, у закис-окис – тверда речовина). Але при цьому залишається дуже багато фтористого водню, який не використовується в промисловості, і зберігання його в тисячу разів небезпечніше порівняно з хвостовими залишками.

Транспортування ядерних матеріалів, виробів здійснюється на основі ліцензії Держатомнагляду на поводження з ядерними матеріалами (ЯМ) при їх транспортуванні. Розроблено заходи щодо ліквідації аварій на шляху прямування. До робіт з транспортування ЯМ допускаються особи, які пройшли навчання і перевірку знань, мають посвідчення встановленого зразка і вміють користуватися дозиметричними приладами.

9.8 Проблема поховання радіоактивних відходів

Радіоактивні відходи (РАВ) утворюються на всіх етапах ядерного паливного циклу (ЯПЦ). Склад і кількість РАВ на кожному з етапів циклу специфічні. Найбільша кількість небезпечних для біосфери техногенних радіонуклідів, у тому числі і довгоживучих альфа-випромінювачів (плутоній, америцій та ін.), утворюється і міститься у відпрацьованому ядерному паливі (ВЯП) з атомних електростанцій і на радіохімічних виробництвах, на яких здійснюється виділення плутонію, невиворілого урану-235 та інших радіонуклідів.

На перших етапах рідкі високо- і середньоактивні РАВ зберігалися в природних або штучних ставках-відстійниках, у спеціальних інженерних спорудах - ємностях з бетону і (або) сталі (баки, танки), а низькоактивні відходи, як правило, розбавлялися і розсіювалися шляхом скидання по системах трубопроводів, каналів у води Світового океану, відкриті водні системи, де відбувалося їхнє природне розбавлення до рівнів прийнятної безпеки.

У міру накопичення інформації про поведінку техногенних радіонуклідів ставало зрозумілим, що такий спосіб позбавлення від відходів не зовсім придатний, оскільки створюється загроза існуванню біологічних видів і самій людині. Для зменшення небезпеки в багатьох

країнах рідкі відходи стали зв'язувати будь-яким матеріалом (цементом, бітумом, полімером, бетоном тощо) у тяжкорозчинну форму, установлювати в металеві контейнери і захоронювати.

За всю історію розвитку атомної промисловості були апробовані такі методи поховання РАВ:

- поховання відходів на дні Світового океану;
- зберігання в сухих приповерхневих або підземних спеціально споруджених сховищах;
- зберігання у водних приреакторних басейнах або в автономних водних сховищах (підземне водне сховище);
- поховання в порожнини скельних порід; закачування рідких РАВ у підземні горизонти.

Одна зі специфічних особливостей зберігання ВАО та ВЯП, що належить до категорії спеціальних ВАО, полягає в такому. Ці продукти через присутність матеріалів, що діляться (урану, плутонію та ін.) мають здатність до розігрівання до високих температур (сотні градусів). Висока радіоактивність сприяє радіолізу (розпаду під впливом радіоактивного випромінювання) води та інших хімічних компонентів з утворенням високовибухових азотистих, водневих та інших з'єднань. Неврахування цього чинника може призводити до дуже складних аварійних ситуацій з викидами радіонуклідів у навколишнє середовище.

При зберіганні та захороненні РАВ використовується принцип багато-бар'єрного захисту, що містить штучні інженерні (оболонка контейнера, стінки будівельної споруди) і природні бар'єри фізичного та хімічного захисту (гірські породи, ґрунт, товща води). У кожному конкретному випадку залежно від типу відходів, їх обсягів тощо використовуються або плануються для використання ті або інші способи поховання. Головною проблемою, яку необхідно вирішити при цьому, є ізоляція радіоактивних матеріалів від можливості виникнення контакту РАВ з водою, яка є головним транспортним середовищем з перенесення радіонуклідів у місця проживання людини.

Видалення радіоактивних відходів, переведених у твердий стан і упакованих у контейнери з хімічно стійких матеріалів, на дно Світового океану здійснювалося тривалий час, починаючи з 1946 р., у різних точках земної кулі.

Відходи скидають у море багато держав, їхній загальний обсяг становить більше 200 тис. Кі. Основними критеріями при виборі майданчиків для захоронення були: глибина, віддаленість від основних морських шляхів, відсутність районів промислового вилову риби, велика відстань від континентів і островів. Згідно з Лондонською конвенцією 1972 р. були виділені дві категорії високоактивних матеріалів: заборонені та дозволені для захоронення на морські глибини. Так, ВЯП, рідкі РАВ, що утворюються в процесі перероблення ВЯП, і тверді форми таких відходів були віднесені до категорії заборонених матеріалів. З 1993 р. цей спосіб

захоронення РАВ був припинений. Був оголошений мораторій, який діє і зараз.

Практично всі фахівці, що займаються проблемами поводження з РАВ, вважають найбільш прийнятною концепцію захоронення радіоактивних відходів у глибоких геологічних формаціях.

При цьому для обґрунтування безпеки використовується метод аналогій з існуванням уранових родовищ у надрах планети. Визначення терміну «глибинна геологічна формація» у літературі відсутнє. Мабуть під цим розуміють такі глибини поховання в геологічні надра і такі гірничо-геологічні умови поховання, які забезпечують зберігання РАВ на багато тисячоліть без впливу на природне середовище.

Прийнятні глибини поховання визначаються, насамперед, фактором економічності будівництва такого роду споруд. Реалізація даної концепції в практичному плані дуже відповідальна, затратна і тривала в часі справа.

Вибір майданчика під будівництво сховища високоактивних РАВ залежить від багатьох факторів. Так, у США згідно з вимогами закону і федеральними правилами з'ясовуються 117 факторів за оцінкою майданчика, на якому буде вестися будівництво такої споруди. Серед них:

- сейсмічна активність і тектонічна стабільність;
- хімічний склад вод, інтенсивність водообміну, швидкість руху водного потоку, відстань до зони розвантаження підземних вод і ряд інших гідрогеохімічних показників;
- наявність типів порід, придатних для будівництва постійної споруди, з урахуванням їх екрануючих властивостей;
- близькість водних і мінеральних ресурсів, які можуть залучатися в експлуатацію і стати причиною ненавмисного проникнення людини в могильник в майбутньому;
- близькість до системи національних парків, населених пунктів тощо.

Тривалість вибору і обґрунтування безпеки місця закладення таких майданчиків і подальшого будівництва становлять кілька десятків років, а вартість витрат може становити сотні мільйонів доларів тільки на стадії інженерно-геологічного пошуку. Звертає на себе увагу той факт, що навіть добре спроектовані спеціальні інженерні споруди, в яких РАВ зберігаються в осклованих масі, упакованій в контейнери, розміщуються на значній глибині від земної поверхні. Наприклад, у районі Селлафілде (Великобританія) сховище планується розташувати на глибині близько 800 м або на ще більшій глибині (2000...4000 м) у спеціальні пробурені свердловини великого діаметра або шахти.

В жодних варіантах проектів поводження з РАВ для тривалого їх зберігання не розглядається можливість їх закачування у вигляді рідких РАВ у проникні горизонти геологічних надр, тоді як у Росії — зараз це один з найпоширеніших способів поводження з радіоактивними відходами (Дмитрівград, Сіверськ, Железногірськ). Привабливість даного способу зрозуміла: він дозволяє зняти величезні проблеми, пов'язані з утилізацією

радіоактивних та інших токсичних відходів. Але ця російська практика поводження з РАВ, реалізована на ряді підприємств Мінатома, є абсолютно неприйнятною і викликає стурбованість за безпечний стан природного середовища.

Радіоактивні відходи є неодмінною завершальною ланкою будь-якої ядерної та радіаційної технології.

За останні півстоліття на Землі утворилися десятки мільярдів Кюрі штучної радіоактивності. І ці дані збільшуються з кожним роком, що створює потенційну загрозу для життя і здоров'я людей і негативно впливає на всю біосферу.

Стратегія поводження з РАВ полягає в їх ізоляції. Але якщо з короткоживущими і низькорадіоактивними РАВ таке поводження прийнятно, то щодо довгоживучих і високоактивних РАВ прийнятного екологічного та економічного рішення поки що не знайдено.

10 ЗАСТОСУВАННЯ РАДІАЦІЇ В МЕДИЦИНІ, ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ, СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Крім енергетики радіація зараз широко використовується в інших сферах людської діяльності.

Наприклад, гамма-випромінювання застосовується в техніці для виявлення дефектів у металевих деталях — гамма-дефектоскопія. За допомогою γ -дефектоскопів перевіряють якість зварних з'єднань різноманітних елементів конструкцій (мости, ядерні реактори тощо). За рахунок різного поглинання γ -випромінювання сталлю і порожнечами в ній дефектоскоп «знаходить» тріщини всередині металу й виявляє брак на стадії виготовлення. Гамма- і рентгенівське випромінювання використовується в харчовій промисловості для стерилізації, пастеризації, дезінсекції продуктів харчування та харчової сировини, для затримання проростання картоплі при її тривалому зберіганні.

10.1 Радіація в медицині

На даний час існує три самостійних напрямки застосування радіації в медицині, які базуються на певних властивостях випромінювань і призначені для досягнення конкретної мети: використання радіації для діагностування захворювань (рентгенологічне та радіоізотопне діагностування); використання радіації для лікування (радіоізотопна та радіаційна терапія); радіаційна стерилізація.

Зараз з метою рентгенодіагностики, тобто діагностики, що основана на властивості рентгенівських променів просвічувати речовини, використовуються понад 150 видів діагностичних досліджень: рентгеноскопія і рентгенографія органів грудної клітки, сечової системи, ангіографія, у тому числі, комп'ютерна томографія (рисунок 10.1).

Поява у розпорядженні медиків радіоактивно мічених атомів відкрило новий розділ медицини — радіоізотопну медицину. Ізотопи деяких речовин є радіоактивними, тобто випускають випромінювання, яке можна виявити за допомогою чутливого лічильника. Існують ізотопи, які можна використовувати в медичних цілях. Радіоактивний ізотоп вводять в організм людини, за допомогою лічильника вимірюють його випромінювання і визначають локалізацію, кількість і характер розподілу введеного ізотопу. Подібна інформація неоціненна для діагностики. Завдяки високій чутливості лічильників, що визначають випромінювання, в організм людини вводиться дуже невелика кількість радіоактивних речовин.



Рисунок 10.1 — Ядерний паливний цикл

Радіоізотопний метод використовують при проведенні медичних і біологічних досліджень, зокрема радіоімунного аналізу. Це — надчутливий метод вимірювання нікчемних кількостей гормонів, які не можна визначити будь-яким іншим методом. Радіоімунний метод застосовують для вимірювання концентрації безлічі різноманітних гормонів, включаючи гормони гіпофізу, підшлункової залози, шлунково-кишкового тракту і щитоподібної залози, а також негормональних речовин, таких, як білки сироватки крові, ферменти і пухлинні антигени. Однією з переваг даного методу обстеження є те, що радіоактивну речовину можна і не вводити в організм людини, а додавати до зразка біологічного матеріалу для дослідження (кров). Таким чином, хворий не піддається ризику,

пов'язаному з опроміненням організму. Тест може бути повторений багато разів з метою спостереження за ефективністю лікування.

У ряді методів радіоактивної діагностики ізотопи вводять всередину організму людини. Одним з перших методів обстеження за допомогою ізотопів було оцінювання функції щитоподібної залози. Йод, що застосовується у ізотопній медицині, містить незначну кількість ізотопу — радіоактивного йоду. Велика частина ізотопу надходить з кровотоком у щитоподібну залозу, а потім виділяється з організму з сечею. Кількість йоду, який накопичився в щитоподібній залозі, вимірюють по створюваному ними рівню радіації. Низький рівень радіації вказує на недостатню функцію залози, високий — свідчить про надлишкову її функцію.

За допомогою методів ізотопної медицини виявляють патологічні, у тому числі й онкологічні процеси в печінці, нирках, порушення діяльності серцево-судинної системи. Радіоізотопи можна використовувати для вимірювання об'єму біологічної рідини, коли цього не можна зробити шляхом прямого вимірювання. Спосіб дає можливість виміряти в діагностичних цілях обсяг плазми, еритроцитарної маси.

Для діагностики захворювань щитоподібної залози використовують натрію йодид у вигляді розчину для перорального застосування, розчину для ін'єкцій або в желатинових капсулах. Для діагностики захворювань шлунково-кишкового тракту застосовують розчин йоду на соняшниковій, кукурудзяній і оливковій олії, олеїнову кислоту з ізотопом, триолеат гліцерину. Захворювання нирок діагностують за допомогою натрію йодгіппурата - розчину для ін'єкцій, захворювання печінки — за допомогою розчину натрію бенгальської троянди для ін'єкцій. Для діагностики захворювань серцево-судинної системи застосовують йодований людський сироватковий альбумін для ін'єкцій, для визначення обсягу еритроцитарної маси — препарат еритроцитів людини, мічених радіоактивним хромом.

Променева терапія здатна гальмувати або повністю припиняти поділ пухлинних клітин. Успішність радіаційного лікування залежить від багатьох умов, найбільш важливі з яких — точне спрямування променя і забезпечення суворого режиму опромінення дозами, розподіленими в межах значного часового періоду.

В основі лікування із застосуванням радіації — використання потоку нейтронів. Попередньо в пухлину вводять елементи, ядра яких під дією нейтронів спричиняють реакцію з утворенням альфа-частинок. Після цього хворий орган опромінюють потоком нейтронів, внаслідок чого альфа-частинки утворюються прямо всередині органу, який піддається руйнівній дії. Можна ввести радіоактивний препарат безпосередньо в хворий орган.

Через низьку проникну здатність альфа-частинок використання їх в терапії (альфа-терапії) можливе лише при контакті джерела частинок з

організмом або при введенні всередину організму. Характерний приклад застосування цього способу - радонова терапія: мінеральні води, що містять радон, використовуються для дії на шкіру (ванна), органи травлення (пиття), органи дихання (інгаляція).

Механізм ізотопної терапії багато в чому подібний до механізму ізотопної діагностики: і той, і інший базуються на накопиченні ізотопів у хворому органі.

У медичній практиці застосовують такі радіоактивні лікувальні препарати: ціанкобаламін - при злоякісній анемії; золотий колоїдний розчин для ін'єкцій - при гемобластозах; натрію фосфату розчин для ін'єкцій - для лікування еритремії.

Радіаційній (холодній) стерилізації піддають матеріали і препарати для медичного застосування, що не витримують термічної або хімічної обробки або втрачають при цьому свої лікувальні властивості.

Широке використання сульфаніламідів та антибіотиків у медицині зумовлює особливий інтерес до стерильності цих препаратів і способів їхньої стерилізації. Сульфаніламіди, маючи високу радіорезистентність, без особливих труднощів піддаються радіаційній стерилізації. Антибіотики, простерилізовані радіаційним способом у сухому вигляді, за терапевтичною ефективністю та основними фізико-хімічними показниками відповідають вимогам, що ставляться до опромінених препаратів.

При випробуванні можливості стерилізації радіаційним способом гормонів, ферментів, вітамінів виявлено, що гормони мають вищу радіорезистентність порівняно з вітамінами. Опромінення гормонів (кортизону, преднізолону, прогестерону, АКТГ та ін.) навіть у дозах, які значно перевищують стерилізуючі, не спричинило змін їхніх хімічних і біологічних властивостей. З ферментів найбільш радіорезистентними виявилися протеолітичні — трипсин, пепсин, інвертаза та ін.

Високу радіочутливість мають вітаміни групи В, особливо якщо їх опромінюють у розчинах. Опромінення розчину знижує біологічну активність і змінює колір препарату. Однак опромінення таблеток полівітамінних препаратів, що містять фолієву, нікотинову кислоти, тіамін, рибофлавін, пантотенат кальцію, не змінювало властивостей препарату і не знижувало його активності.

Вивчається можливість радіаційної стерилізації крові і препаратів, виготовлених з неї. Отримано обнадійливі результати, які дозволяють застосувати іонізуюче випромінювання для стерилізації крові і білкових розчинів. Незважаючи на відносно високу радіорезистентність мікроорганізмів, виявилось можливим використовувати іонізуюче випромінювання для отримання принципово нових препаратів - радіовакцин і радіоантигенів, а також для променевої стерилізації готових вакцин, бактеріальних антигенів і поживних середовищ.

Медичні інструменти, шовний і перев'язувальний матеріал і особливо пластикові предмети одноразового використання, такі, як шприци, набори

для переливання крові, також стерилізують за допомогою радіації. Складні апарати - «серце - легені», «штучна нирка» - перед використанням часто стерилізують опроміненням.

10.2 Радіація в сільському господарстві

Дослідження дії іонізуючої радіації на біологічні об'єкти залежно від дози, потужності опромінення і стану об'єкта, що опромінюється, стало основою розроблення і впровадження в сільське господарство радіаційно-біологічної технології (РБТ). Як джерела випромінювання використовують гамма-установки з радіонуклідами ^{60}Co і ^{137}Cs , прискорювачі електронів з енергією до 10 МеВ, а також джерела випромінювання, пов'язані з ядерними реакторами (радіаційні контури, частково або повністю відпрацьовані ТВЕЛ - радіоактивні відходи атомної енергетики). Найбільш широке застосування в РБТ отримали джерела нуклідів ^{60}Co і ^{137}Cs . Вони мають тривалий період напіврозпаду (^{60}Co — 5,27 року, ^{137}Cs — 29,6 року), порівняно високу проникну здатність гамма-випромінювання, яка не спричиняє наведеної радіоактивності в опромінюваних об'єктах. Фізико-механічні властивості джерел цих нуклідів дозволяють тривало експлуатувати елементи в радіаційно-біологічних установках. У нашій країні для потреб сільського господарства та наукових досліджень у галузі радіаційно-біологічної технології створено цілий ряд пересувної та стаціонарної техніки. Пересувні гамма-установки типу «Колос», «Стебло», «Гамма-панорама» змонтовані на автомобілях або автопричепках. Джерелом випромінювання у них є ^{137}Cs , запаяний у подвійну ампулу з нержавіючої сталі, і знаходиться за захисним екраном в неробочому положенні установки. «Колос» і «Стебло» призначені для передпосівного опромінення насіння зернових, зернобобових, технічних та інших культур в умовах господарств, а «Гамма-панорама» — для опромінення сільськогосподарських рослин і тварин з метою селекції та стимуляції їх росту та розвитку. Стаціонарні установки типу «Гамма-поле» і «Стерилізатор» з джерелом ^{60}Co призначені відповідно для тривалого і разового опромінення сільськогосподарських рослин у селекційній роботі і для стерилізації в промислових масштабах ветеринарних і медичних матеріалів та інструментів. На основі радіаційного мутагенезу в рослинництві успішно вирішуються питання отримання високоврожайних, стійких до несприятливих умов середовища і дії патогенних шкідників нових сортів сільськогосподарських рослин. Селекціонери майже в п'ять разів скоротили термін виведення нових сортів ячменю і пшениці, використовуючи мутагенний ефект гамма-опромінення. За допомогою експериментального мутагенезу в нашій країні виведено 45 сортів пшениці, п'ять з яких районовані, наприклад сорт пшениці Новосибірська 67, сорт ячменю Обський. У країнах різних континентів зареєстровано 412 сортів мутаційної селекції, що надійшли у

виробництво, у їх числі — 28 сортів пшениці з покращеною продуктивністю, зимостійкістю, ранньостиглою, великим умістом білка, стійкістю до вилягання, борошнистої роси, бурі і стеблової іржі, з високими хлібопекарськими та іншими якостями. Частка сортів найважливіших сільськогосподарських культур становить понад 50 %, з них отримано з використанням радіації 93 % мутантів, а за допомогою хімічного мутагенезу — 7 %. У США впроваджено стійкий до хвороб сорт арахісу, в Японії - скоростиглий сорт сої (Райден) і високоврожайний сорт рису (Рей-Мей), в Аргентині - великоплідний сорт персиків, в Індії та Швеції — сорти пшениці з підвищеним вмістом протеїнів, в Угорщині — скоростиглий мутант рису. За допомогою радіомутації вдалося вивести новий різновид шовковичного шовкопряда з більш високою продукцією шовкового волокна (за рахунок відбору самців), виведена нова порода норки з оригінальним сріблястим кольором хутра. У певному діапазоні доз ядерні випромінювання мають стимулюючу дію. Така стимуляція виявляється в усіх біологічних об'єктах, починаючи з одноклітинних і закінчуючи високоорганізованими рослинами і тваринами. Уперше ефект радіаційної стимуляції було отримано на рослинах і описано М. Мальдінеєм і К. Тувінею у 1899 р., тобто всього лише через три роки після відкриття рентгенівських променів. Опромінення насіння в стимулюючих дозах перед їх посівом приводить не тільки до прискорення проростання насіння, а й до збільшення врожаю та покращення його якості. Поряд зі збільшенням врожаю в результаті передпосівного оброблення в рослинах активізується накопичення органічних речовин, які виробилися в процесі еволюції рослин даного виду: білка для пшениці, сахарози для цукрового буряка. Посилюється мінеральне живлення. Слід зазначити, що рослини, вирощені з опроміненого насіння за інтенсивною технологією, повніше використовують мінеральні добрива. Також іонізуючі випромінювання застосовують для підвищення господарських якостей сільськогосподарських птахів і тварин.

Бібліографічний список

1. Александров, Ю. А. Основы радиационной экологии [Текст] : учеб. пособие / Ю. А. Александров. – Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2007. – 267 с.
2. Ким, Д. Радиационная экология [Текст] : учеб. пособие / Д. Ким, Л. А. Геращенко. – Братск : ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 213 с.
3. Бутомо, Н. В. Основы медицинской радиобиологии [Текст] / Н. В. Бутомо, А. Н. Гребенюк, В. И. Легеза; под ред. И. Б. Ушакова. – СПб. : ООО «Изд-во Фолиант» , 2004. – 384 с.
4. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні в 2014 році / Український науково-дослідний інститут цивільного захисту ДСНС України. – К., 2015. – 365 с.

ЗМІСТ

1	Предмет радіаційної екології та її завдання.....	3
2	Фізичні основи біологічної дії іонізуючих випромінювань....	5
	2.1 Будова атома. Поняття радіоактивності.....	5
	2.2 Одиниці радіоактивності.....	7
	2.3 Типи ядерних перетворень. Взаємодія випромінювання з речовиною.....	8
	2.3.1 Альфа-розпад.....	8
	2.3.2 Бета-розпад.....	9
	2.3.3 Гамма- і рентгенівське випромінювання.....	9
	2.3.4 К-захват електронів ядром.....	10
	2.3.5 Мимовільне ділення ядер.....	10
	2.3.6 Термоядерні реакції.....	11
3	Поняття дозиметрії.....	13
	3.1 Експозиційна доза випромінювання.....	13
	3.2 Поглинена доза випромінювання.....	13
	3.3 Відносна біологічна ефективність ІВ.....	14
	3.4 Потужність дози та одиниці її вимірювання.....	15
	3.5 Закон радіоактивного розпаду.....	16
4	Методи реєстрації іонізуючих випромінювань.....	17
	4.1 Принцип дії радіометричної апаратури.....	17
	4.1.1 Іонізаційні детектори.....	18
	4.1.2 Напівпровідникові детектори.....	19
	4.1.3 Сцинтиляційні детектори.....	20
	4.2 Завдання дозиметрії.....	21
	4.3 Класифікація і загальні принципи дії дозиметричних приладів.....	21
	4.3.1 Дозиметр побутовий «Терра П» МКС-05.....	22
	4.3.2 Дозиметр-радіометр пошуковий альфа-, бета-, гамма- і нейтронного, фотонного випромінювання з блоками детектування БД-1, БД-5.....	23
	4.4 Вимірювання проб, заражених радіоактивними речовинами.....	24
	4.4.1 Відбирання проб для радіометричного вимірювання.....	25
	4.4.2 Методи вимірювання радіоактивного зараження, що використовуються в радіометричній лабораторії.....	26
	4.4.3 Відносний метод вимірювань питомої активності товстошарових препаратів.....	26
	4.4.4 Визначення зараженості води, продовольства та інших матеріалів, що містять в-активні речовини.....	27
5	Радіоекологічний моніторинг.....	30
6	Біологічна дія іонізуючих випромінювань.....	34

	6.1 Фізична стадія.....	34
	6.2 Фізико-хімічна стадія.....	35
	6.3 Хімічна стадія. Пряма і непряма дія радіації.....	35
	6.4 Молекулярні пошкодження, що виникають у клітинах...	36
	6.5 Радіаційні ураження людини.....	37
	6.5.1 Гостра променева хвороба від зовнішнього рівномірного опромінення.....	38
	6.5.2 Кістково-мозкова форма гострої променевої хвороби.....	39
	6.5.3 Кишкова форма гострої променевої хвороби.....	40
	6.5.4 Токсемічна форма гострої променевої хвороби....	41
	6.5.5 Церебральна форма гострої променевої хвороби.	41
	6.6 Шляхи надходження радіоактивних речовин в організм	41
	6.7 Метаболізм радіоактивних речовин	42
	6.8 Виведення радіоактивних речовин з організму.....	43
	6.9 Біологічна дія радіоактивних речовин.....	43
7	Нормування опромінення. Індивідуальні та колективні дозові границі опромінення. Розрахунок індивідуальних доз опромінення.....	44
	7.1 Доза випромінювання. Одиниці вимірювання радіоактивності.....	44
	7.2 Норми радіаційної безпеки.....	47
	7.3 Гранично допустимі дози опромінення.....	50
8	Радіаційний захист населення.....	50
	8.1 Протирадіаційний захист населення на заражених територіях.....	54
9	Ядерний паливний цикл.....	57
	9.1 Ланцюгова реакція. Коефіцієнт розмноження нейтронів	57
	9.2 Будова і типи ядерних реакторів.....	59
	9.3 Побудова атомної електростанції і ядерна енергетика..	61
	9.4 Структура ядерного паливного циклу.....	64
	9.5 Видобуток природного урану.....	66
	9.6 Виготовлення гексафториду урану.....	67
	9.7 Небезпечні відходи та викиди підприємств, що збагачують уран.....	67
	9.8 Проблема поховання радіоактивних відходів.....	68
10	Застосування радіації в медицині, сільському господарстві, харчовій промисловості.....	71
	10.1 Радіація в медицині.....	71
	10.2 Радіація в сільському господарстві.....	74
	Бібліографічний список	77

Навчальне видання

**Клеєвська Валерія Леонідівна
Кручина Вікторія Віталіївна
Поліщук Олена Олексіївна**

РАДІАЦІЙНА ЕКОЛОГІЯ

Редактор С. П. Гевло

Зв. план, 2016

Підписано до друку 24.05.2016

Формат 60×84 ¹/₁₆. Папір офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 4,4. Обл.-вид. арк. 5. Наклад 50 пр.

Замовлення 189. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр "ХАІ"
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001