

Міністерство освіти і науки України  
Інженерний навчально-науковий інститут  
Запорізького національного університету

В.Г. Рижков  
О.О. Троїцька  
О.В. Новокщона  
І.О. Ткаліч

## **РАДІАЦІЙНА БЕЗПЕКА**

Навчально-методичний посібник

для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 263 «Цивільна безпека» освітньо-професійної програми «Охорона праці», спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища» освітньо-професійної програми «Технології захисту навколишнього середовища»

Затверджено  
вченою радою ЗНУ  
Протокол № від 2020

Запоріжжя, ІННІ ЗНУ

2020

УДК 621.039(075)

Р 153

Рижков В.Г., Троїцька О.О., Новокщона О.В., Ткаліч І.О. Радіаційна безпека : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Цивільна безпека» освітньо-професійної програми «Охорона праці», спеціальності «Технології захисту навколишнього середовища» освітньо-професійної програми «Технології захисту навколишнього середовища». Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 149 с.

У навчально-методичному посібнику подані відомості з фізичних і фізіологічних основ радіаційної безпеки, розкриті основні положення Норм радіаційної безпеки України. Надані заходи і засоби захисту від іонізуючого випромінювання, правила поводження з радіоактивними речовинами і відходами.

У посібнику наведені практичні завдання з різних тем курсу.

Рецензенти :

*Є.О. Тулушев* - завідувач відділенням ДУ «Запорізький ОЛЦ» МОЗ України,

*О.Г. Добровольська* — кандидат технічних наук, доцент кафедри міського будівництва та господарства Інженерного інституту Запорізького національного університету

Відповідальний за випуск

*Г.Б. Кожемякін* — кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної екології та охорони праці

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ЗМІСТ ЛЕКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ	
1 ІОНІЗУЮЧЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	6
Поняття про іонізуюче випромінювання .....	6
Основні визначення.....	6
Види радіоактивного розпаду .....	7
Види іонізуючих випромінювань .....	14
Наведена радіоактивність .....	24
Атомні електростанції.....	26
Устрої, що генерують іонізуючі випромінювання .....	35
Фізичні величини, що характеризують іонізуюче випромінювання .....	41
Прилади для вимірювання параметрів іонізуючого випромінювання .....	49
2 ВПЛИВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОРГАНІЗМ .....	54
Біологічна дія іонізуючого випромінювання.....	54
Детерміновані ефекти .....	56
Променева хвороба.....	56
Локальні променеві ураження шкіри.....	75
Променеві ураження очей.....	79
3 ПРАВОВІ ОСНОВИ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ, РЕГЛАМЕНТИ 1 ТА 2 ГРУП.....	81
. Норми радіаційної безпеки України; регламенти 1 групи .....	81
НРБУ–97 : терміни і визначення.....	81
Основні регламентовані величини НРБУ–97.....	85
Регламенти 1 групи.....	86
Ліміти доз і допустимі рівні .....	86
Опромінення персоналу (категорія А).....	88
Опромінення персоналу (категорія Б) .....	90
Опромінення населення (категорія В) .....	90
Регламенти 2 групи .....	91
4 РЕГЛАМЕНТИ 3 ТА 4 ГРУП.....	93
Регламенти 3 групи .....	93
Регламенти 4 групи .....	95
5 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ВІД ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	98
Захист відстанню і часом .....	98
Екранування.....	99
6 ПОВОДЖЕННЯ З ДЖЕРЕЛАМИ ВИПРОМІНЮВАННЯ І РАДІАЦІЙНИМИ ВІДХОДАМИ .....	102
Організація робіт з джерелами іонізуючого випромінювання .....	102
Радіаційний моніторинг .....	102
Вимоги до організації робіт з джерелами ІВ .....	103
Вимоги до приміщень .....	103

Організація робіт . . . . .	104
Одержання, облік і зберігання джерел радіоактивних випромінювань . . . . .	106
Транспортування радіоактивних речовин . . . . .	107
Видалення радіаційних відходів . . . . .	108
Класифікація радіоактивних відходів . . . . .	108
Поводження з радіоактивними відходами . . . . .	110
Вимоги до безпеки упаковок РАВ . . . . .	115
<b>7 ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ . . . . .</b>	<b>123</b>
Фізичні величини, що характеризують іонізуюче випромінювання, одиниці їх виміру . . . . .	123
Біологічна дія іонізуючого випромінювання . . . . .	126
Норми радіаційної безпеки України; регламенти 1 групи . . . . .	127
Норми радіаційної безпеки України; регламенти 2 групи . . . . .	129
Норми радіаційної безпеки України; регламенти 3 групи . . . . .	129
Норми радіаційної безпеки України; регламенти 4 групи . . . . .	130
Захист відстанню та часом . . . . .	132
7.8 Екранування . . . . .	133
Організація робіт з джерелами іонізуючого випромінювання . . . . .	135
Видалення радіаційних відходів . . . . .	135
<b>8 САМОСТІЙНА РОБОТА СТУДЕНТА . . . . .</b>	<b>137</b>
Теми для самостійного опрацювання . . . . .	137
Тести для самоконтролю . . . . .	137
ДОДАТОК А . . . . .	139
ДОДАТОК Б . . . . .	140
ДОДАТОК В . . . . .	142
ДОДАТОК Г . . . . .	142
ДОДАТОК Д . . . . .	142
ДОДАТОК Ж . . . . .	143
ДОДАТОК К . . . . .	143
ДОДАТОК Л . . . . .	144
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА . . . . .	146
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА . . . . .	147

## ВСТУП

Сучасна людина часто має справу з джерелами іонізуючого випромінювання: у промисловості (дефектоскопія, КВП), наукових дослідженнях, медицині (терапія і діагностика), мистецтвознавстві (аналіз живописних полотен) тощо. Деякі люди безпосередньо працюють з радіаційними матеріалами та спеціальними пристроями для генерації випромінювань (персонал атомних електростанцій, рентгенологи, робітники, зайняті розробкою родовищ матеріалів, що діляться). Інші робітники не контактують з джерелами іонізуючих випромінювань, але по розташуванню робочих місць, або за умовами проживання можуть підпасти під випромінювання. З розвитком ядерних технологій зростає ризик опромінювання і інших категорій населення.

З іншого боку, іонізуюче випромінювання має велику біологічну активність, що обумовлена його високою енергією. Радіація викликає різноманітні ураження організму — гостру та хронічну променеву хворобу, променеві опіки, підвищує ризик виникнення злоякісних новоутворень. Тому люди повинні знати як захиститися від іонізуючого випромінювання, як вести себе в умовах радіаційної аварії, медичного втручання, які є техногенно-підсилені джерела випромінювання природного походження тощо.

**Метою** даного посібника є надання допомоги студентам у засвоєнні окремих тем дисципліни „Радіаційна безпека”, у розв’язанні найпростіших інженерних задач за цими темами. Навчально-методичний посібник є додатковим засобом до підручників та конспекту лекцій і не замінює їх.

Основними **завданнями** вивчення дисципліни «Радіаційна безпека» є: дати поняття про фізичні основи радіаційної безпеки, основні положення Норм радіаційної безпеки України, заходи і засоби захисту від іонізуючого випромінювання, навчити студентів основним розрахункам стосовно радіаційної безпеки.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен **знати:** основні фізичні величини, що характеризують іонізуюче випромінювання, одиниці їх виміру; дію іонізуючого випромінювання на організм; регламенти 1 – 4 груп згідно Норм радіаційної безпеки України; заходи і засоби захисту від іонізуючого випромінювання:

**вміти:** поводитися з джерелами іонізуючого випромінювання; користуватися приборами для заміру фізичних величин, що характеризують іонізуюче випромінювання (експозиційна доза, поглинена доза тощо); користуватися засобами захисту від іонізуючого випромінювання.

## ЗМІСТ ЛЕКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

### 1 ІОНІЗУЮЧЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

#### Поняття про іонізуюче випромінювання

#### Основні визначення

Радіаційна безпека — дисципліна, що займається захистом людей і навколишнього середовища від іонізуючого випромінювання.

Іонізуючим називається випромінювання, здатне у достатній мірі іонізувати середовище, крізь котре воно проходить. Тобто, при проходженні іонізуючого випромінювання (ІВ) через будь яку речовину або матеріал, в останньому утворюються заряджені частки — іони. Міра іонізації, яке визначає ІВ залежить від мети дослідження.

Зазвичай до ІВ не відносять ультрафіолетове випромінювання, однак воно (особливо жорстке) має істотний вплив на організм людини, тому розглядається у цьому посібнику.

Під терміном ІВ об'єднані різні за фізичною природою явища. Загальне у них — висока енергія. Саме висока енергія випромінювання обумовлює його іонізуючу здатність, а також біологічну активність.

Всі ІВ поділяються на електромагнітні (квантові, фотонні) та корпускулярні. Перші є потоком електромагнітних хвиль, другі — потоком часток або ядер чи їх фрагментів. До електромагнітних відносяться рентгенівське і гамма-випромінювання, до корпускулярних — альфа і бета-проміні, нейтронне, протонне випромінювання, важкі ядра віддачі.

Всі джерела ІВ можна поділити на дві групи. До першої відносяться спеціальні пристрої, при роботі яких виникає іонізуюче випромінювання. Є два принципово різних види таких пристроїв :

- пристрої, спеціально створені для генерації випромінювання, такі як рентгенівська трубка, прискорювачі часток;
- пристрої, основне призначення яких не стосується генерації випромінювання, а воно виникає як побічний, небажаний ефект (електронно-променева трубка, кенотрони, клістриони).

До другої групи джерел відносяться радіоактивні речовини.

Радіоактивність — здатність атомів деяких елементів спонтанно перетворюватись на атоми іншого елементу, випускаючи елементарні частки, фрагменти ядер, гамма-кванти.

Радіоактивність відкрив у 1896 р. Антуан Анрі Беккерель. Беккерель досліджував люмінесценцію солей урану, і, закінчивши роботу, загорнув зразок — мереживну металеву платівку, вкриту урановою сіллю — в чорний, щільний, непрозорий папір і, поклавши її на коробку з фотопластинками, помістив все це в щільно закритий ящик столу. Вийнявши пізніше коробку з фотопластинками, він проявив їх і був спантеличений, виявивши, що вони з якоїсь причини виявилися засвіченими — на фотопластинці проявилось зображення візерункової металеві пластинки. Але чому? Потрапити на пластинки світло

свідомо не могло, значить, зрозумів Беккерель, дії були зумовлені якимись іншими променями.

Про те, що існують невидимі для ока, але що викликають почорніння фотопластинки промені, фізики вже знали. За півроку до цього відбулося сенсаційне відкриття Рентгена. Рентгенівські промені стали визначною подією у фізиці. Може бути і з цієї причини доповідь Беккереля 2 березня 1896 року в Паризькій АН була зустрінута з великим інтересом. 12 травня він розповів про зроблене їм відкриття перед ширшою аудиторією, в Музеї природної історії, а потім, в серпні 1900 і на Міжнародному фізичному конгресі, який зібрався в Парижі, щоб обговорити основні підсумки фізики 19 століття. На той час Беккерель вже встиг зрозуміти, що випромінювання не є ні люмінесценцією, ні чим-небудь іншим, уже знайомим фізікам. Воно не змінювалося ні при фізичних (нагрівання, тиск тощо), ні при хімічних впливах, помітити зменшення його інтенсивності не вдавалося і, здавалося, його енергія черпається з невичерпного джерела.

Вже було встановлено, що невідомі промені не тільки викликають почорніння фотопластинок, але і виробляють різноманітні інші дії (включаючи біологічні: на тілі самого Беккереля від препарату, що знаходився в його кишені утворилися виразки, що довго не загоювалися; з тих пір препарати стали поміщатися в свинцеві коробочки).

Було встановлено, що, крім урану, радіоактивність (сам цей термін був введений Марією Кюрі) властива - хоча і в різному ступені — і ряду інших хімічних елементів. Почалися інтенсивні дослідження фізичної природи променів Беккереля, був виявлений (дуже важливий для подальшого) ефект енерговиділення при радіоактивних розпадах, відкрита наведена радіоактивність тощо.

У 1898 р. Гергард Шмідт та П'єр Кюрі і Марія Склодовська-Кюрі відкрили випромінювання торію. Пізніше Кюрі відкрили полоній та радій — теж радіоактивні елементи.

У 1903 році подружжю Кюрі було присуджено Нобелівську премію. На сьогодні відомо близько 40 природних елементів, яким властива радіоактивність.

Всі хімічні елементи з атомним номером, більшим за 83 — радіоактивні.

Природна радіоактивність — спонтанний розпад ядер елементів, що зустрічаються в природі.

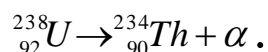
Штучна радіоактивність — спонтанний розпад ядер елементів, отриманих штучним шляхом, через відповідні ядерні реакції.

### **Види радіоактивного розпаду**

Є декілька типів радіоактивного розпаду.

**Альфа-розпад ( $\alpha$ -розпад).** Це вид радіоактивного розпаду ядра, при якому випромінюються альфа-частки ( $\alpha$ ) — ядра  ${}^4_2\text{He}$ . При цьому масове число ядра зменшується на 4, а атомний номер на 2.

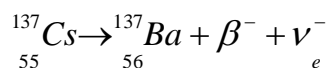
Приклад альфа-розпаду для ізотопу  $^{238}\text{U}$  :



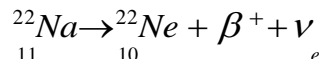
Альфа-розпад з основного стану спостерігається тільки у достатньо важких ядер. Альфа-радіоактивні ядра в таблиці ізотопів з'являються починаючи з атомного номера 52 (телур) і масового числа 106–110, а при атомному номері більше 82 і масовому числі більше 200 практично всі нукліди альфа-радіоактивні, хоча альфа-розпад у них може бути і не домінуючим шляхом розпаду.

**Бета-розпад ( $\beta$ -розпад)** супроводжується випромінюванням електронів  $e^-$  ( $\beta^-$ -розпад) або позитронів  $e^+$  ( $\beta^+$ -розпад). При цьому масове число ядра остається незмінним, а атомний номер збільшується на 1 ( $\beta^-$ -розпад), або зменшується на 1 ( $\beta^+$ -розпад).

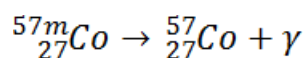
При  $\beta^-$ -розпаді один нейтрон у складі ядра перетворюється в протон, при цьому вивільняється електрон і електронне антинейтрино:



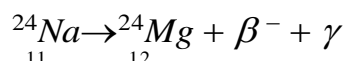
При  $\beta^+$ -розпаді один протон у складі ядра перетворюється в нейтрон, вивільняючи позитрон та електронне нейтрино:



**Гамма-розпад ( $\gamma$ -розпад).** Гамма-розпад — це випромінювання гамма-квантів ядрами в збудженому стані, при якому вони володіють великою в порівнянні з незбудженим станом енергією. У збуджений стан ядра можуть переходити при ядерних реакціях або при радіоактивних розпадах інших ядер. Збуджений стан ядра позначається буквою  $m$ :

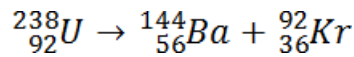


Гамма-випромінювання найчастіше супроводжує явища альфа- або бета-розпаду. При цьому нове ядро, що виникло у результаті розпаду, спочатку знаходиться в збудженому стані і, коли воно переходить в нормальний стан, то випускає гамма-кванти:

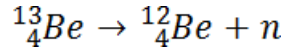


**Спонтанний поділ** — різновид радіоактивного розпаду важких атомних ядер. Спонтанний поділ є поділом ядра, який відбувається без зовнішнього збудження (вимушеного поділу), і дає такі ж самі продукти, як і вимушений поділ: осколки (ядра легших елементів) і декілька нейтронів:



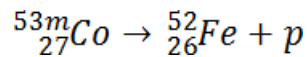


**Нейтронний розпад** — тип радіоактивного розпаду, властивий нейтронно–надлишковим ядрам:



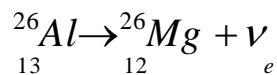
Цей вид розпаду зустрічається рідко. Заряд ядра залишається незмінним, масове число зменшується на 1.

**Протонний розпад** — один з видів радіоактивного розпаду, при якому атомне ядро випускає протон. Протонний розпад може відбуватися з високих збуджених станів в ядрі слідом за бета–розпадом (в цьому випадку процес називається бета–затриманим протонним розпадом) або з основного стану дуже багатих протонами ядер. Приклад:



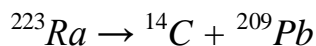
Заряд ядра і масове число зменшуються на 1. Це також рідкий тип розпаду.

**Електронне захоплення (захоплення електрону)** — ядерна реакція, під час якої один із протонів ядра об'єднується з електроном внутрішньої оболонки атома, утворюючи нейтрон. Ця реакція супроводжується випромінюванням нейтрино. Внаслідок цієї реакції зарядове число зменшується на 1, й утворюється ізотоп іншого хімічного елемента:



**ла стерний ро знад** — вид радіоактивного розпаду, який являє собою явище самовільного випромінювання важкими атомними ядрами ядерних фрагментів (кластерів), важчих ніж  $\alpha$ -частинка.

Експериментально виявлено 25 ядер від  ${}^{114}\text{Ba}$  до  ${}^{241}\text{Am}$ , що випромінюють з основних станів кластери типу  ${}^{14}\text{C}$ ,  ${}^{20}\text{O}$ ,  ${}^{24}\text{Ne}$ ,  ${}^{26}\text{Ne}$ ,  ${}^{28}\text{Mg}$ ,  ${}^{30}\text{Mg}$ ,  ${}^{32}\text{Si}$  і  ${}^{34}\text{Si}$ . Наприклад :



**Радіоактивні ряди.** Радіоактивні ряди, радіоактивні родини — групи радіонуклідів (радіоактивних ізотопів), в яких кожний наступний ізотоп виникає внаслідок  $\alpha$ - або  $\beta$ -розпаду попереднього. Відомі чотири радіоактивні ряди:

- ряд торію —  ${}^{232}\text{Th} \rightarrow {}^{208}\text{Pb}$ ;
- ряд радію (ряд урану) —  ${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{206}\text{Pb}$ ;
- ряд актинію —  ${}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{207}\text{Pb}$ ;
- ряд нептунію —  ${}^{237}\text{Np} \rightarrow {}^{205}\text{Tl}$ .

Кожний ряд має свого родоначальника — радіоактивний нуклід і завершується стабільним нуклідом. Перші три ряди існують у природі, останній одержаний штучно.

З отриманням штучних ізотопів ряди були продовжені у напрямку важких ядер, але традиційні назви збереглися. У таблицях 1.1–1.4 надані відповідні радіоактивні ряди.

Радіоактивний ряд нуклідів з масовим числом, яке можна подати у вигляді  $4n$ , називається рядом торію. Природний ряд починається з торію–232, що зустрічається у природі, і завершується утворенням стабільного свинцю–208. Штучний додаток починається з ейнштейнію–254.

Таблиця 1.1 — Ряд торію

Нуклід	Вид розпаду	Період напіврозпаду	Енергія, що виділяється, МеВ
1	2	3	4
$^{254}_{99}\text{Es}$	$\beta^-$	275,7 діб	0,084
$^{254}_{100}\text{Fm}$	$\alpha$	3,24 год.	
$^{252}_{98}\text{Cf}$	$\alpha$	2,645 року	6,1181
$^{248}_{96}\text{Cm}$	$\alpha$	$3,4 \times 10^5$ років	6,260
$^{244}_{94}\text{Pu}$	$\alpha$	$8 \times 10^7$ років	4,589
$^{240}_{92}\text{U}$	$\beta^-$	14,1 год	0,39
$^{240}_{93}\text{Np}$	$\beta^-$	1,032 год	2,2
$^{240}_{94}\text{Pu}$	$\alpha$	6561 рік	5,1683
$^{236}_{92}\text{U}$	$\alpha$	$2,3 \times 10^7$ років	4,494
$^{232}_{90}\text{Th}$	$\alpha$	$1,405 \times 10^{10}$ років	4,081
$^{228}_{88}\text{Ra}$	$\beta^-$	5,75 років	0,046
$^{228}_{89}\text{Ac}$	$\beta^-$	6,15 год	2,124
$^{228}_{90}\text{Th}$	$\alpha$	1,9116 роки	5,520
$^{224}_{88}\text{Ra}$	$\alpha$	3,66 дня	5,789
$^{220}_{86}\text{Rn}$	$\alpha$	55,6 с	6,404
$^{216}_{84}\text{Po}$	$\alpha$	0,145 с	6,906
$^{212}_{82}\text{Pb}$	$\beta^-$	10,64 год	0,570
$^{212}_{83}\text{Bi}$	$\beta^-$ 64,06 % $\alpha$ 35,94 %	60,55 хв	2,252 6,208

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4
$^{212}_{84}\text{Po}$	$\alpha$	299 нс	8,955
$^{208}_{81}\text{Tl}$	$\beta^-$	3,053 хв	4,999
$^{208}_{82}\text{Pb}$	стабільний		

Радіоактивний ряд нуклідів з масовим числом, яке можна подати у вигляді  $4n + 2$ , називається рядом радію (іноді називають рядом урану або урану–радію). Природний ряд починається з урану–238 (зустрічається в природі) і завершується утворенням стабільного свинцю–206. У результаті штучних ядерних реакцій було отримано декілька побічних рядів, що зливаються з головними родинами. Головна і побічна родина мають різних родоначальників, але співпадають, починаючи з деякого загального члена. Наприклад, для ряду урану є побічний ряд, що починається з протактинію–230 і зливається з основним рядом на бісмуті–210.

Таблиця 1.2 — Ряд урану (радію)

Нуклід	Вид розпаду	Період напіврозпаду	Енергія, що виділяється, МеВ
1	2	3	4
$^{238}_{92}\text{U}$	$\alpha$	$4,468 \times 10^9$ років	4,270
$^{234}_{90}\text{Th}$	$\beta^-$	24,10 діб	0,273
$^{234}\text{Pa}^m$	$\beta^-$ 99,84 % ізомерний перехід 0,16 %	1,16 хв	2,271 0,074
$^{234}_{91}\text{Pa}$	$\beta^-$	6,70 год	2,197
$^{234}_{92}\text{U}$	$\alpha$	245500 років	4,859
$^{230}_{90}\text{Th}$	$\alpha$	75380 років	4,770
$^{226}_{88}\text{Ra}$	$\alpha$	1602 роки	4,871
$^{222}_{86}\text{Rn}$	$\alpha$	3,8235 д	5,590
$^{218}_{84}\text{Po}$	$\alpha$ 99,98 % $\beta^-$ 0,02 %	3,10 хв	6,115 0,265
$^{218}_{85}\text{At}$	$\alpha$ 99,90 % $\beta^-$ 0,10 %	1,5 с	6,874 2,883
$^{218}_{86}\text{Rn}$	$\alpha$	35 мс	7,263
$^{214}_{82}\text{Pb}$	$\beta^-$	26,8 хв	1,024

Продовження табл. 1.2

1	2	3	4
$^{214}_{83}\text{Bi}$	$\beta^-$ 99,98 % $\alpha$ 0,02 %	19,9 хв	3,272 5,617
$^{214}_{84}\text{Po}$	$\alpha$	0,1643 мс	7,883
$^{210}_{81}\text{Tl}$	$\beta^-$	1,30 хв	5,484
$^{210}_{82}\text{Pb}$	$\beta^-$	22,3 роки	0,064
$^{210}_{83}\text{Bi}$	$\beta^-$ 99,99987 % $\alpha$ 0,00013 %	5,013 діб	1,426 5,982
$^{210}_{84}\text{Po}$	$\alpha$	138,376 діб	5,407
$^{206}_{81}\text{Tl}$	$\beta^-$	4,199 хв	1,533
$^{206}_{82}\text{Pb}$	—	стабільний	—

Радіоактивний ряд нуклідів з масовим числом, яке можна подати у вигляді  $4n + 3$ , називається рядом актинію або урану–актинію. Природний ряд починається з урану–235 і завершується утворенням стабільного свинцю–207. Штучний ряд починається з урану–239.

Таблиця 1.3 – Ряд актинію

Нуклід	Вид розпаду	Період напіврозпаду	Енергія, що виділяється, МеВ
1	2	3	4
$^{239}_{92}\text{U}$	$\beta^-$	23,5 хв.	
$^{239}_{93}\text{Np}$	$\beta^-$	2,36 діб.	
$^{239}_{94}\text{Pu}$	$\alpha$	$2,41 \times 10^4$ років	5,244
$^{235}_{92}\text{U}$	$\alpha$	$7,04 \times 10^8$ років	4,678
$^{231}_{90}\text{Th}$	$\beta^-$	25,52 год	0,391
$^{231}_{91}\text{Pa}$	$\alpha$	32760 років	5,150
$^{227}_{89}\text{Ac}$	$\beta^-$ 98,62 % $\alpha$ 1,38 %	21,772 роки	0,045 5,042
$^{227}_{90}\text{Th}$	$\alpha$	18,68 діб	6,147
$^{223}_{87}\text{Fr}$	$\beta^-$ 99,994 % $\alpha$ 0,006 %	22,00 хв	1,149 5,340
$^{223}_{88}\text{Ra}$	$\alpha$	11,43 діб	5,979

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4
$^{219}_{85}\text{At}$	$\alpha$ 97,00 % $\beta^-$ 3,00 %	56 с	6,275 1,700
$^{219}_{86}\text{Rn}$	$\alpha$	3,96 с	6,946
$^{215}_{83}\text{Bi}$	$\beta^-$	7,6 хв	2,250
$^{215}_{84}\text{Po}$	$\alpha$ 99,99977 % $\beta^-$ 0,00023 %	1,781 мс	7,527 0,715
$^{215}_{85}\text{At}$	$\alpha$	0,1 мс	8,178
$^{211}_{82}\text{Pb}$	$\beta^-$	36,1 хв	1,367
$^{211}_{83}\text{Bi}$	$\alpha$ 99,724 % $\beta^-$ 0,276 %	2,14 хв	6,751 0,575
$^{211}_{84}\text{Po}$	$\alpha$	516 мс	7,595
$^{207}_{81}\text{Tl}$	$\beta^-$	4,77 хв	1,418
$^{207}_{82}\text{Pb}$		стабільний	

Радіоактивний ряд нуклідів з масовим числом, яке можна подати у вигляді  $4n + 1$ , називається рядом нептунію. Ряд починається з нептунію–237 і завершується утворенням стабільного талію–205. В цій серії в природі зустрічається тільки бісмут–209. Однак з розвитком ядерних технологій в результаті ядерних досліджень і радіаційних аварій в навколишнє середовище потрапили радіонукліди, такі як плутоній–241 та америцій–241, які також можуть бути віднесені за масовим числом до початку ряду нептунію. Слабка  $\alpha$ -активність вісмуту–209 була виявлена лише в 2003 році, тому в більш ранніх роботах він називається кінцевим (і єдиним з тих, що збереглися в природі) нуклідом ряду.

Таблиця 1.4 — Ряд нептунію

Нуклід	Вид розпаду	Період напіврозпаду	Енергія, що виділяється, MeV
1	2	3	4
$^{249}_{98}\text{Cf}$	$\alpha$	351 рік	5,813 + 0,388
$^{245}_{96}\text{Cm}$	$\alpha$	8500 років	5,362 + 0,175
$^{241}_{94}\text{Pu}$	$\beta^-$	14,4 років	0,021
$^{241}_{95}\text{Am}$	$\alpha$	432,7 роки	5,638
$^{237}_{93}\text{Np}$	$\alpha$	$2,14 \times 10^6$ років	4,959

Продовження табл. 1.4

1	2	3	4
$^{233}_{91}\text{Pa}$	$\beta^-$	27,0 д	0,571
$^{233}_{92}\text{U}$	$\alpha$	$1,592 \times 10^5$ років	4,909
$^{229}_{90}\text{Th}$	$\alpha$	7340 років	5,168
$^{225}_{88}\text{Ra}$	$\beta^-$	14,9 д	0,36
$^{225}_{89}\text{Ac}$	$\alpha$	10,0 д	5,935
$^{221}_{87}\text{Fr}$	$\alpha$	4,8 хв	6,3
$^{217}_{85}\text{At}$	$\alpha$	32 мс	7,0
$^{213}_{83}\text{Bi}$	$\beta^-$ 97,80 % $\alpha$ 2,20 %	46,5 хв	1,423 5,87
$^{213}_{84}\text{Po}$	$\alpha$	3,72 мкс	8,536
$^{209}_{81}\text{Tl}$	$\beta^-$	2,2 хв	3,99
$^{209}_{82}\text{Pb}$	$\beta^-$	3,25 роки	0,644
$^{209}_{83}\text{Bi}$	$\alpha$	$1,9 \times 10^{19}$ років	3,14
$^{205}_{81}\text{Tl}$		стабільний	

### Види іонізуючих випромінювань

#### Електромагнітні випромінювання

Іонізуюча здатність електромагнітного випромінювання залежить від його енергії, яка однозначно визначається довжиною хвилі  $\lambda$ :

$$E = hc/\lambda,$$

де  $h$  — постійна Планка,  $h = 6,226 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Чим менше довжина хвилі, тим більше енергія кванта випромінювання. Цю енергію можна також виразити через частоту, яка пов'язана з довжиною хвилі співвідношенням:

$$\nu = c/\lambda,$$

де  $c$  — швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі,  $c = 299\,792\,458$  м/с. Тоді маємо:

$$E = h\nu.$$

Одна з класифікацій електромагнітного випромінювання за частотами надана у табл. 1.5.

Стандарт, прийнятий у США, наданий у табл. 1.6.

Радіохвилі та інфрачервоне випромінювання не іонізують середовище, крізь яке вони проходять. Видиме світло може дуже у незначному ступеню іонізувати повітря. Ультрафіолетове випромінювання (УФВ), особливо жорстке, помітно іонізує повітря. Після роботи кварцових ламп відчувається запах озону – наслідок іонізації повітря. Проте іонізуюча здатність ультрафіолетового випромінювання ще не достатня, щоб його вважати повноцінним ІВ. Воно не викликає таких біологічних ефектів, як рентгенівське і гамма-випромінювання (променева хвороба, променеві дерматити), хоча біологічна дія УФВ може бути суттєвою.

Приклади електромагнітних випромінювань:

- змінний струм промислової частоти –  $\nu = 50 \text{ Гц}$ ,  $\lambda = 6000 \text{ км}$ ;
- мобільний зв'язок –  $\nu = 1 \dots 4 \text{ ГГц}$ ,  $\lambda = 7,5 \dots 30 \text{ см}$ ;
- мікрохвильова піч –  $\nu = 2,45 \text{ ГГц}$ ,  $\lambda = 122 \text{ мм}$ ;
- пульт телевізора –  $\nu = 214 \dots 400 \text{ ТГц}$ ,  $\lambda = 0,75 \dots 1,4 \text{ мкм}$ ;
- проміні зеленого світла –  $\nu = 545 \dots 588 \text{ ТГц}$ ,  $\lambda = 510 \dots 550 \text{ нм}$ .

Таблиця 1.5 — Класифікація електромагнітних хвиль за частотами

Частотні діапазони	частота	Хвильові діапазони	Довжина хвилі	Енергія
1	2	3	4	5
Радіохвилі				
Вкрай низькі частоти, ВНЧ	3 – 30 Гц	Декамегаметрові	$10^5 - 10^4$ км	12,4–124 феВ
Наднизькі , ННЧ	30 – 300 Гц	Мегаметрові	$10^4 - 10^3$ км	0,124–1,24 пеВ
Інфранизькі, ІНЧ	0,3 – 3 кГц	Гектокілометрові	1000 – 100 км	1,24–12,4 пеВ
Дуже низькі, ДНЧ	3 – 30 кГц	Міриаметрові (наддовгі)	100 – 10 км	12,4–124 пеВ
Низькі , НЧ	30 – 300 кГц	Кілометрові (довгі)	10 – 1 км	0,124–1,24 неВ
Середні, СЧ	0,3 – 3 МГц	Гектометрові (середні)	1 – 0,1 км	1,24–12,4 неВ

Продовження табл. 1.5

1	2	3		4	5	
Високі, ВЧ	3 – 30 МГц	Декаметрові (короткі)		100 – 10 м	12,4–124 неВ	
Дуже високі, ДВЧ	30 – 300 МГц	Метрові		10 – 1 м	0,124– 1,24 мкеВ	
Ультрависокі, УВЧ	0,3 – 3 ГГц	Мікрохвильове випромінювання	Дециметрові	Ультра- короткі	1 – 0,1 м	1,24–12,4 мкеВ
Надвисокі, НВЧ	3 – 30 ГГц		Сантиметрові		10 – 1 см	12,4–124 мкеВ
Вкрай високі, ВВЧ	30 – 300 ГГц		Міліметрові		10 – 1 мм	0,124– 1,24 меВ
Гіпервисокі, ГВЧ	300 – 3000 ГГц	Дециміліметрові (субміліметрові)		1 – 0,1 мм	1,24–12,4 меВ	
Оптичний діапазон						
Інфрачервоні, ІЧВ: далекі	0,3 – 6 ТГц	Далекий інфрачервоний		0,05 – 1 мм	1,24 – 23 меВ	
середні	6 – 100 ТГц	Середній інфрачервоний		3 – 50 мкм	23 – 400 меВ	
ближні	100 – 340 ТГц	Ближній інфрачервоний		0,78 – 3 мкм	0,4–1,59 еВ	
Видиме світло	384 – 789 ТГц	Видимий		380 – 780 нм	1,59 – 3,26 еВ	
Ультрафіолетові, УФВ : ближні	0,79 – 1 ПГц	Довгохвильовий		300– 380 нм	3,26–4,13 еВ	
середні	1–1,5 ПГц	Середньохвильовий		200 –300 нм	4,13–6,2 еВ	
далекі	1,5–2,46 ПГц	Короткохвильовий		122– 200 нм	6,2–10,2 еВ	
Екстремальні	2,48–30 ПГц	Екстремальний (вакуумний)		10 – 121 нм	10,2–124 еВ	
Іонізуючі електромагнітні випромінювання						
Рентгенівські, РВ : м'які	30 – 100 ПГц	Рентгенівський м'який		3 – 10 нм	0,12– 0,36 кеВ	
Жорсткі	0,1 – 3000 ЕГц	Рентгенівський жорсткий		1 пм – 3 нм	0,36 кеВ– 1,24 МеВ	
Гамма–промені	1,5ЕГц– 20 ЙГц	Гамма–діапазон		10 зм –0,2 нм –	6,2 кеВ– 100 ТеВ	



Таблиця 1.6 — Шкала електромагнітних випромінювань, прийнята у США

Клас	Частота	Довжина хв.	Енергія фотону
$\gamma$	300 EHz	1 pm	1.24 MeV
HX	30 EHz	10 pm	124 keV
SX	3 EHz	100 pm	12.4 keV
EUV	300 PHz	1 nm	1.24 keV
NUV	30 PHz	10 nm	124 eV
	3 PHz	100 nm	12.4 eV
NIR	300 THz	1 $\mu$ m	1.24 eV
MIR	30 THz	10 $\mu$ m	124 meV
FIR	3 THz	100 $\mu$ m	12.4 meV
EHF	300 GHz	1 mm	1.24 meV
SHF	30 GHz	1 cm	124 $\mu$ eV
UHF	3 GHz	1 dm	12.4 $\mu$ eV
VHF	300 MHz	1 m	1.24 $\mu$ eV
HF	30 MHz	10 m	124 neV
MF	3 MHz	100 m	12.4 neV
LF	300 kHz	1 km	1.24 neV
VLF	30 kHz	10 km	124 peV
VF/ULF	3 kHz	100 km	12.4 peV
SLF	300 Hz	1 Mm	1.24 peV
ELF	30 Hz	10 Mm	124 feV
	3 Hz	100 Mm	12.4 feV

**Ультрафіолетове випромінювання (УФВ)** частіше не відносять до ІВ. Іноді до іонізуючих відносять жорстке УФВ, а м'яке — не відносять.

УФ–промені випускаються збудженими атомами при переході у не збуджений стан, а також це складова частина теплового випромінювання тіл, що нагріті до високої температури.

Енергія УФВ складає 3 ... 120 eV, розподіл на діапазони згідно енергії і довжини хвилі наданий у табл. 1.7.

Часто УФВ з довжиною хвилі більше 200 нм називають м'яким, а з меншою довжиною — жорстким.

Проникаюча здатність в повітрі зменшується із зменшенням довжини хвилі. Вакуумні промені взагалі не розповсюджуються в повітрі. В твердих тілах проникаюча здатність УФВ мала — скло затримує промені з  $\lambda < 350$  нм, кварц —  $\lambda < 180$  нм, флюорит —  $\lambda < 120$  нм.

Таблиця 1.7 — Діапазони ультрафіолетового випромінювання

Найменування	Абревіатура	Довжина хвилі, нм	Енергія фотону, еВ
<b>Стандарт ISO</b>			
Близький	NUV	400 — 300	3.10 — 4.13
Середній	MUV	300 — 200	4.13 — 6.20
Далекий	FUV	200 — 122	6.20 — 10.2
Екстремальний (вакуумний)	EUV, XUV	121 — 10	10.2 — 124
<b>Розподіл у біології</b>			
Ультрафіолет А, довгохвильовий	UVA	400 — 315	3.10 — 3.94
Ультрафіолет В, середньохвильовий	UVB	315 — 280	3.94 — 4.43
Ультрафіолет С, короткохвильовий	UVC	280 — 100	4.43 — 12.4

Природне джерело УФВ — Сонце. Довгохвильова частина випромінювання досягає Землі майже повністю. Короткохвильове значною мірою поглинається атмосферою, в основному озоновим шаром.

Штучні джерела м'якого УФВ — електрична дуга, кварцові лампи, бактерицидні лампи, еритемні лампи (для засмаги). Жорстке УФВ генерується ексилампами (ексиплексними лампами), ртутними лампами низького тиску.

**Рентгенівське випромінювання**, або X–промені (англ. X-ray emission, roentgen radiation, нім. Röntgenstrahlung f) — короткохвильове електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі від 10 нм до 1 пм. Відповідна енергія квантів – 120 еВ ...1,2 МеВ. В електромагнітному спектрі діапазон частот рентгенівського випромінювання лежить між ультрафіолетом та гамма–променями.

Рентгенівське випромінювання виникає від різкого гальмування руху швидких електронів у речовині, при енергетичних переходах внутрішніх електронів атома. Воно використовується у науці, техніці, медицині. Рентгенівське випромінювання змінює деякі характеристики гірських порід, наприклад, підвищує їх електропровідність. Короткочасне опромінення кристалів кам'яної солі знижує їхнє внутрішнє тертя.

Назва рентгенівське випромінювання походить від прізвища німецького фізика Вільгельма Конрада Рентгена.

Рентгенівське випромінювання використовуються для флюорографії, рентгеноскопії, рентгенофлюоресцентного аналізу, для визначення атомної структури кристалів, при аналізі живописних полотен. Методи дослідження речовини за допомогою рентгенівських променів об'єднують термін рентгенівська спектроскопія.

Рентгенівське випромінювання одержують за допомогою спеціальних електродних (рентгенівських) ламп, на які подається висока напруга, порядку

50—200 кВ. Електрони, що випускаються розжареним катодом рентгенівської трубки, прискорюються сильним електричним полем в просторі між анодом і катодом і з великою швидкістю ударяються об анод. При цьому з поверхні анода випускається рентгенівське випромінювання, що виходить крізь скло трубки назовні. Якщо енергія електронів менша за енергію іонізації атома катоду, отримуємо гальмівне рентгенівське випромінювання, що має суцільний спектр (рис. 1.1).

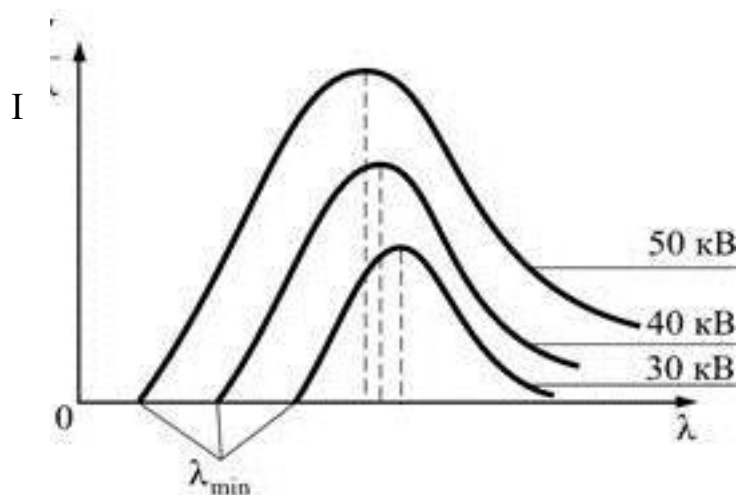


Рисунок 1.1 – Спектр гальмівного рентгенівського випромінювання

Рентгенівські трубки з розжареним катодом самі є випрямлячами, і їх можна живити змінним струмом.

Якщо електрони в електричному полі набувають достатньо високу швидкість, щоб проникнути всередину атома анода і вибити один з електронів його внутрішнього шару, то на його місце переходить електрон з більш видаленого шару з випромінюванням кванта великої енергії. Таке рентгенівське випромінювання має строго певні піки довжини хвиль, характерні тільки для даного хімічного елемента, тому воно називається характеристичним (рис. 1.2).

Проникаюча здібність рентгенівських променів росте зі зменшенням довжини хвилі (відповідно зі збільшенням енергії кванту). Рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі більше 3 нм вважається м'яким, з меншою довжиною хвилі – жорстким.

**Гамма-промені ( $\gamma$ -промені).** — електромагнітне випромінювання найвищої енергії з довжиною хвилі меншою за 0,1 нм (10 кеВ). Утворюється в реакціях за участю атомних ядер і елементарних частинок у процесах розпаду, синтезу, анігіляції, під час гальмування заряджених частинок великої енергії.

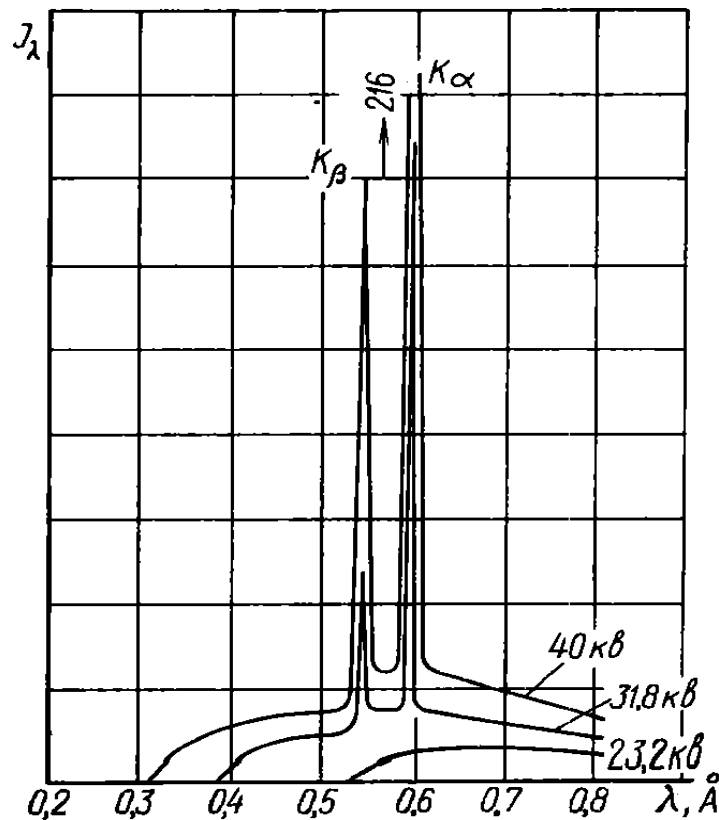


Рисунок 1.2 – Спектр характеристичного рентгенівського випромінювання

Гамма-промені мають найбільшу проникність з усіх видів ІВ. Відповідно, від них найважче захиститися. Взаємодія фотонів великих енергій з речовиною слабка. Поглинаючись чи розсіюючись у речовині, гамма-промені передають велику енергію зарядженим частинкам, які відповідають за народження великого числа радіаційних дефектів. Існує три види взаємодії гамма-квантів з речовиною: фотоэффект, комптонівське розсіювання і народження електрон-позитронних пар.

Явище фотоэффекту залежить від взаємодії електромагнітної хвилі з електронами в складі атомів. Велика енергія, а, отже і частота гамма-квантів призводить до зменшення ефективності такої взаємодії, оскільки електрони стають надто інертними, щоб реагувати на швидкі зміни напруженості електричного поля хвилі. Тому зі збільшенням енергії гамма-квантів фотоэффект, який є основним типом взаємодії гамма-квантів малих енергій з речовиною, дає дедалі менший внесок у процес їхнього поглинання.

За великих енергій гамма-квантів основним каналом поглинання стає народження електрон-позитронних пар. Гамма-квант може утворити електрон-позитронну пару, якщо його енергія принаймні вдвічі перевищує масу спокою електрона. В порожньому просторі утворення електрон-позитронної пари неможливо через вимогу одночасного виконання законів збереження енергії та імпульсу. Для утворення електрон-позитронної пари потрібне ще одне тіло, яке могло б взяти на себе частину імпульсу, тому народження пар відбувається лише в речовині.

За проміжних енергій гамма-квантів основним шляхом їхньої взаємодії з речовиною є комптонівське розсіювання. Воно відрізняється від інших типів взаємодії тим, що розсіюючись на заряджених частинках, гамма-квант не зникає, а віддає лише частину енергії.

Гамма-випромінювання (як і рентгенівське) добре затримується матеріалами з великою густиною (свинець, вольфрам). Проникаюча здатність росте зі збільшенням енергії до визначеної межі, потім починає падати. Максимум проникаючої здатності різний для різних речовин. Наприклад, для свинцю  $E_{\max} = 5$  МеВ, для повітря – 50 МеВ.

Максимальна енергія (і відповідна мінімальна довжина хвилі) гамма-квантів точно не визначена. У результаті ядерних реакцій утворюються гамма-кванти з енергією до 20 МеВ ( $\lambda = 5,9 \cdot 10^{-14}$  м = 59 фм), спеціальними методами на прискорювачах досягають енергії 2,4 ГеВ ( $\lambda = 4,9 \cdot 10^{-16}$  м = 0,49 фм), у космічних променях завдяки сплохам наднових зірок і випромінюванню нейтронних зірок іноді (досить рідко) зустрічаються кванти з енергією 1 ЗеВ =  $10^{21}$  еВ ( $\lambda = 10^{-27}$  м = 0,001 ім).

Гамма-промені застосовуються в медицині для терапії і діагностики, для стерилізації харчових продуктів, у контрольній-вимірювальних приладах. Висока проникаюча здатність гамма-випромінювання використовується у гамма-дефектоскопії. В астрономії вивчають космічні об'єкти та процеси за їх гамма-випромінюванням.

### **Корпускулярні випромінювання**

Корпускулярне випромінювання — це потік частинок, які мають ненульове значення маси спокою. До цього типу випромінювання відносять потоки елементарних частинок – електронів, протонів, нейтронів, позитронів, ядер різних хімічних елементів (гелію, кисню тощо), а також важких ядер віддачі.

**Альфа-промені (α-промені)** — потік позитивно заряджених ядер атомів гелію – альфа-часток. Кожна альфа-частинка складається з 2 нейтронів і 2 протонів.

Альфа-частинки є одним з продуктів спонтанного розпаду радіоактивних ізотопів, таких як радій чи торій. Процес емісії, альфа-розпад, трансформує один хімічний елемент на інший, знижуючи атомне число (заряд ядра) на два та атомну масу на чотири. При зіткненнях з атомами середовища новоутворена альфа-частинка сповільнюється, і, врешті-решт, приєднує до себе два електрони, перетворюючись на нейтральний атом гелію.

Енергія альфа-часток, що утворилися у результаті радіоактивного розпаду лежить у межах 2...9 МеВ. Альфа-промені високих енергій отримують на прискорювачах.

Завдяки значній кінетичній енергії альфа-частинки дуже інтенсивно взаємодіють з атомами середовища. Довжина їх пробігу у повітрі — декілька сантиметрів, у живих тканинах — декілька десятків мікрометрів.

Пробіг альфа-часток в повітрі при температурі 15°C і тиску 101,3 кПа можна розрахувати за формулою, м:

$$d = 4,76 \cdot 10^{-3} \sqrt{E^3},$$

де  $E$  – енергія часток у МеВ.

Іонізуюча здатність альфа–променів дуже висока — одна альфа частинка утворює декілька десятків тисяч пар іонів на шляху в 1 см у повітрі.

Застосування: медицина (променева терапія, радонові ванни), ізотопні іонізатори, радіонуклідні батареї, детектори диму.

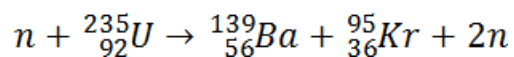
**Бета–промені** ( $\beta$ –промені). Під цією назвою об'єднані два виду випромінювань :  $\beta^-$ –промені — потік негативно заряджених часток — електронів і  $\beta^+$ –промені — потік позитивно заряджених часток — позитронів, які випромінюються при розпаді відповідно бета–мінус або бета–плюс радіоактивних атомних ядер.

Енергії бета–частинок розподілені безперервно від нуля до деякої максимальної енергії, що залежить від виду ізоотопу; ця максимальна енергія лежить в діапазоні від 2,5 кеВ (для ренію–187) до десятків МеВ (для короткоживучих ядер).

Джерелами бета–променів можуть також служити спеціальні прилади — електронно–променева трубка, бетатрон (прискорювач електронів до енергії 300 МеВ).

Проникаюча здатність бета–частинок: в повітрі до 18 м, в алюмінії і пластмасі до 7 мм, в біологічних тканинах до 2,5 см. Питома іонізуюча здатність  $\beta$ –частинок менше, ніж  $\alpha$ –частинок, але вище, ніж у  $\gamma$ –випромінювання. На шляху 1 см у повітрі електрон або позитрон утворюють декілька десятків пар іонів.

**Нейтронне випромінювання** — це потік нейтральних частинок, що вилітають з ядер атомів при деяких ядерних реакціях, зокрема при реакціях ділення ядер урану і плутонію. Нейтронне випромінювання виникає при роботі прискорювачів заряджених частинок і атомних реакторів, при ядерних вибухах, що утворюють потужні потоки нейтронів. Один з шляхів вимушеного ділення урану при протіканні ланцюгової ядерної реакції:



Також нейтронне випромінювання виникає при спонтанному поділі і нейтронному розпаді деяких ізоотопів.

Нейтрони, що утворюються при ядерних реакціях, мають велику енергію (1 МеВ і більше) і називаються швидкими. Після проходження крізь шар речовини нейтрони гальмуються, їх енергія знижується до середньої кінетичної енергії атомів речовини (приблизно 0,025 еВ). Такі нейтрони називаються тепловими.

Нейтрони можна класифікувати за енергією більш детально:

Холодні — 0,025 еВ;

Теплові — 0,025 еВ...0,03 еВ

Повільні —  $<1$  еВ,  
Резонансні —  $1$  еВ... $10$  кеВ,  
Проміжні —  $10$  кеВ... $1$  МеВ,  
Швидкі —  $1$  МеВ... $100$  МеВ,  
Релятивістські —  $> 100$  МеВ.

Внаслідок того що нейтрони не мають електричного заряду, нейтронне випромінювання володіє великою проникаючою здатністю. Відмінною особливістю нейтронного випромінювання є здатність перетворювати атоми стабільних елементів у їх радіоактивні ізотопи, що різко підвищує небезпеку нейтронного опромінення.

**Протонне випромінювання** — потік позитивно заряджених ядерних часток — протонів. Вперше протонне випромінювання виявлено в 1886 р у вигляді так званих каналних променів в розрядних трубках. Німецький фізик Гольдштейн за допомогою катодної трубки з перфорованим катодом виявив новий вид випромінювання, яке проникало через отвори в катоді в напрямку, протилежному потоку самих катодних променів. Тому він назвав їх каналними променями. Пізніше Резерфорд ідентифікував цю позитивно заряджену частинку, що входить до складу атома і назвав протоном.

Джерелами інтенсивного протонного випромінювання є прискорювачі заряджених частинок. За допомогою прискорювачів отримані пучки ПВ з енергією в десятки ГеВ. Ще більші енергії ПВ трапляються в космічному просторі. ПВ є основним компонентом галактичного і сонячного космічних випромінювань. Інтенсивні потоки ПВ виявлені у навколосемному просторі – в так званих радіаційних поясах Землі.

Здатність ПВ проникати через шари речовини залежить від енергії пучка протонів і властивостей речовини. ПВ з енергією  $10$  МеВ здатне пройти шар повітря (при нормальній температурі і тиску) близько  $1$  м. При збільшенні енергії до  $1000$  МеВ товщина шару зростає майже до  $3$  км.

У важких речовинах ПВ затримується більш тонкими шарами. Так, усвинці ПВ з енергією  $10$  МеВ проходить близько  $1/3$  мм, а з енергією  $1000$  МеВ — дещо менш  $60$  см. Протонне випромінювання із енергією вище  $100$  МеВ здатне проникати в тіло на глибину до  $10$  см і більше.

Щільність іонізації протонами різко зростає в кінці пробігу частинок. Завдяки цій властивості протони зручно використовувати в променевої терапії (див. Протонна терапія) для виборчого опромінення глибоко залягають пухлин (наприклад, гіпофіза). Протони високих енергій мають малий кут розсіювання, що також сприяє локалізації дози в одному місці. Протони високих енергій, котрі долають кулонівське відштовхування, потрапляють в ядро і викликають різні ядерні реакції, в результаті яких утворюються вторинні випромінювання — нейтронне, гамма-випромінювання і ін. В зв'язку з цим при опроміненні речовини протонами високих енергій іонізація середовища відбувається не тільки за рахунок первинних протонів; але і за рахунок вторинних випромінювань. Цю обставину необхідно враховувати при розрахунку доз, створюваних протонним випромінюванням.

При порівняно невеликих енергіях біологічна ефективність протонного випромінювання вище, ніж рентгенівського і гамма-випромінювань. Це пов'язано з більш високою іонізуючою здатністю таких протонів. На відміну від рентгенівського і гамма-випромінювань, протони, проходячи через біологічну тканину, здатні збуджувати ядерні реакції. В результаті ядерних реакцій утворюються вторинні частки, що володіють високою іонізуючою здатністю, що призводить до поглинання в малому обсязі тканини великої кількості енергії і до відповідних локальних уражень тканини. Цією обставиною може бути обумовлено більша антиканцерогенна дія протонного випромінювання в порівнянні з рентгенівськими і гамма-випромінюваннями.

### **Наведена радіоактивність**

Наведена радіоактивність — це радіоактивність речовин, що виникає внаслідок опромінення їх іонізуючим випромінюванням, зазвичай нейтронами.

При опроміненні частинками стабільні ядра можуть перетворюватися на радіоактивні ядра з різним періодом напіврозпаду. Особливо сильна радіоактивність, наведена нейтронним опроміненням. Це можна пояснити властивостями цих частинок: для того, щоб викликати ядерну реакцію з утворенням радіоактивних ядер, гамма-промені та заряджені частинки повинні мати велику енергію (не менш ніж кілька МеВ). Однак вони взаємодіють з електронними оболонками атомів набагато інтенсивніше, ніж з ядрами, і швидко втрачають при цьому енергію. Крім того, позитивно заряджені частинки (протони, альфа-частинки) швидко втрачають енергію, пружно розсіюючись на ядрах. Тому ймовірність, що гамма-квант чи заряджена частинка викликає ядерну реакцію, мізерно мала. Наприклад, при бомбардуванні берилію альфа-частками лише одна з кількох тисяч або десятків тисяч (залежно від енергії альфа-частинок) викликає ядерну реакцію, а для інших сполук ця ймовірність ще менша.

Нейтрони ж, навпаки, захоплюються ядрами при будь-якій енергії, понад те, максимальною є ймовірність захоплення саме нейтронів з низькою енергією. Тому, поширюючись у речовині, нейтрон може потрапляти до безлічі ядер послідовно, поки не буде захоплений черговим ядром, і ймовірність захоплення нейтрона практично дорівнює одиниці.

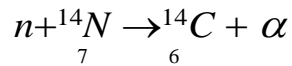
Слід зауважити, що поглинання нейтронів не обов'язково веде до появи наведеної радіоактивності. Багато ядер можуть захоплювати нейтрон з утворенням стабільних ядер, наприклад бор-10 може перетворитися на стабільний бор-11 (якщо захоплення нейтрона ядром не призведе до утворення літію та альфа-частинки), легкий водень (протій) — на стабільний дейтерій. У таких випадках наведена радіоактивність не виникає.

Таким чином, найнебезпечніше у відношенні наведеної радіоактивності — нейтронне випромінювання. Альфа-промені, навіть потужні, можуть викликати слабку, нетривалу наведену радіоактивність.

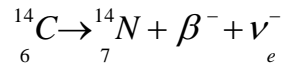
Процес перетворення стабільних ядер в радіоактивні під дією опромінення називається активацією.



При ядерних вибухах, аваріях на АЕС, особливо велике значення має реакція нейтронів з атмосферним азотом–14:



Вуглець–14 зазнає  $\beta^-$ -розпад, в результаті якого утворюється стабільний нуклід  ${}^{14}\text{N}$ :



Період напіврозпаду цього ізотопу вуглецю — 5700 років.

При випробуваннях ядерної і особливо термоядерної зброї в атмосфері в 1940–1960-х роках вуглець–14 інтенсивно утворювався в результаті опромінення атмосферного азоту тепловими нейтронами від ядерних і термоядерних вибухів. В результаті вміст вуглецю–14 в атмосфері сильно зріс (так званий «бомбовий пік», див. рис. 1.3), однак згодом, із заборонаю ядерних випробувань, став поступово повертатися до колишніх значень через розчинення у світовому океані.

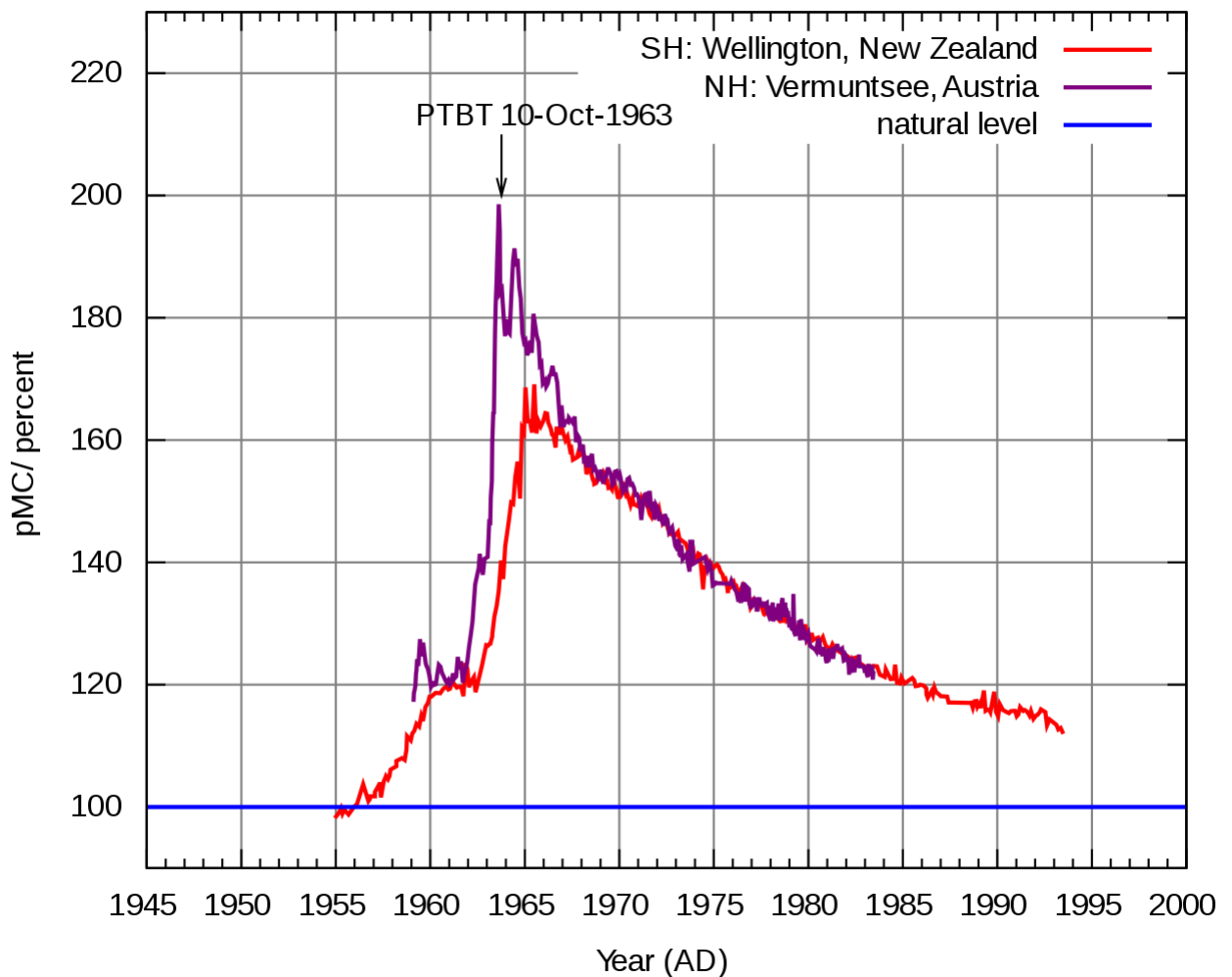


Рисунок 1.3 – Зміна концентрації вуглецю–14 в атмосфері

## Атомні електростанції

Найпотужнішими джерелами ІВ є атомні електричні станції — АЕС. Основний агрегат станції — ядерний реактор — пристрій, призначений для організації та підтримки керованої ланцюгової реакції ділення деяких важких ядер, у результаті якої вивільняється ядерна енергія, що перетворюється в ньому на теплову з подальшим використанням її зовнішнім споживачем.

В основі роботи реактора лежить розмноження частинок — нейтронів. При поглинанні нейтрону такі ізотопи як  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  діляться з випусканням 2 чи більше цих частинок. Наприклад, для  $^{235}\text{U}$  число нейтронів, що народилися в одному акті поділу, в середньому дорівнює від 2 до 3. При кожному акті ділення виділяється енергія.

Якщо в кожному акті реакції або в деяких ланках ланцюга з'являється більше однієї частинки, то виникає розгалужена ланцюгова реакція. Якщо число обривів ланцюгів більше, ніж число нових ланцюгів, що з'являються, то самопідтримуюча ланцюгова реакція (СЛР) виявляється неможливою. Якщо ж число утворюваних нових ланцюгів перевершує число обривів, ланцюгова реакція швидко поширюється по всьому об'єму речовини при появі хоча б однієї початкової частки.

Область станів речовини з розвитком СЛР відділена від області, де ланцюгова реакція взагалі неможлива, критичним станом. Критичний стан характеризується рівністю між числом нових ланцюгів і числом обривів.

Досягнення критичного стану визначається цілою низкою чинників. Розподіл важкого ядра збуджується одним нейтроном, а в результаті акту поділу з'являється більше одного нейтрона. Якщо швидкість втрат нейтронів (захоплення без поділу, вилетів з реакційного обсягу тощо) компенсує швидкість розмноження нейтронів таким чином, що ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів в точності дорівнює одиниці, то ланцюгова реакція йде в стаціонарному режимі. Коефіцієнт розмноження нейтронів  $k$  — відношення числа нейтронів наступного покоління до числа нейтронів в попередньому поколінні в повному обсязі середовища, де розмножуються нейтрони (активної зони ядерного реактора).

Введення негативних зворотних зв'язків між ефективним коефіцієнтом розмноження і швидкістю енерговиділення дозволяє здійснити керовану ланцюгову реакцію, яка використовується в ядерній енергетиці. Якщо коефіцієнт розмноження більше одиниці, ланцюгова реакція розвивається експоненціально; некерована ланцюгова реакція поділу використовується в ядерній зброї.

Крім коефіцієнту розмноження нейтронів застосовують поняття реактивності. Реактивність визначається, як:

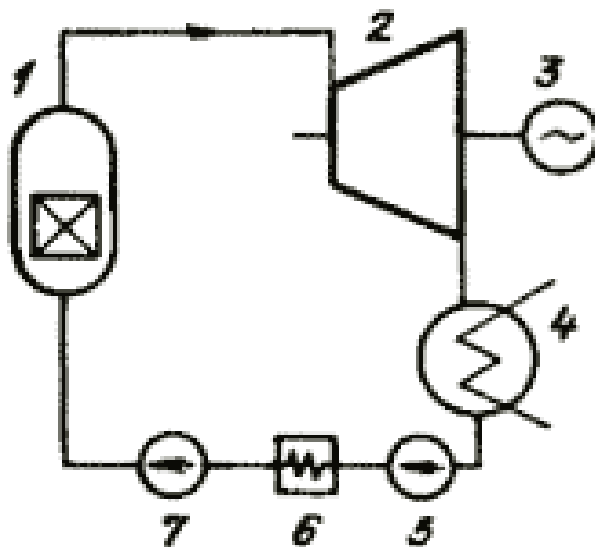
$$\rho = \frac{k-1}{k}.$$

Для стабільної роботи ядерного реактора необхідно, щоб його реактивність дорівнювала нулю, тобто, щоб коефіцієнт розмноження нейтронів дорівнював одиниці. При додатній реактивності — реактор розганяється, виділення енергії в ньому збільшується. При від'ємній реактивності реакція поділу згасає.

В системі будь-якої АЕС є теплоносії і робоче тіло. Робочим тілом, яке вчиняє роботу з перетворенням теплової енергії в механічну, є водяна пара. Вимоги до чистоти пара, що надходить на турбіну, настільки високі, що економічно прийнятні показники можуть бути досягнуті при конденсації всього пара і повернення конденсату в цикл. Тому контур робочого тіла в АЕС завжди замкнений і додаткова вода надходить лише в невеликих кількостях для заповнення витоків та інших втрат конденсату.

Теплоносієм, відводить теплоту з активної зони в енергетичних ядерних реакторах ВВЕР і PWR, є вода. Для запобігання відкладень на тепловиділяючих елементах активної зони реактора необхідна висока чистота теплоносія. Тому для теплоносія існує замкнений контур, який одночасно ізолює радіоактивні речовини, утворені в воді випромінюваннями в активній зоні.

Контур теплоносія і робочого тіла можуть бути суміщені, така АЕС називається одноконтурною (наприклад Чорнобильська з ядерним реактором РБМК–1000). За такою схемою працюють усі киплячі ядерні реактори типу РБМК (за кордоном BWR — Boiler Water Reactor). Спрощена схема одноконтурної АЕС надана на рис. 1.4.



1 — ядерний реактор; 2 — парова турбіна; 3 — електрогенератор; 5 — конденсаторний насос; 6 — система підігріву живильної води; 7 — насос живильної води

Рисунок 1.4 – Принципова схема одноконтурної АЕС

Вода в каналах реактора 1 нагрівається до температури кипіння, збирається в колектори і направляється в сепаратори пара (на схемі не вказані). Після відділення пари вода повертається циркуляційними насосами в реактор, а насичений пар під тиском 6,5 МПа з вологістю 0,1–0,2% подається на п'ятициліндрові турбіну 2 з одним циліндром високого (ЦВД) і чотирма циліндрами низького (ЦНТ) тиску. Між ЦВД і ЦНД встановлено сепаратори пара і проміжні пароперегрівачі. Турбіна приводить в дію генератор 3, що виробляє електроенергію.

Відпрацьована пара з турбоагрегатів потрапляє в конденсатор 4, потім конденсат проходить систему очищення і далі за допомогою конденсаторного насоса 5 прямує до системи підігріву 6, а потім живильним насосом 7 повертається до реактора. Перетворення води в пар в ядерному реакторі одноконтурної АЕС відбувається при температурі 285 °С.

В одноконтурних системах все обладнання працює в радіоактивних умовах, що ускладнює експлуатацію і потребує додаткових заходів захисту. Великою перевагою таких систем є простота і економічність.

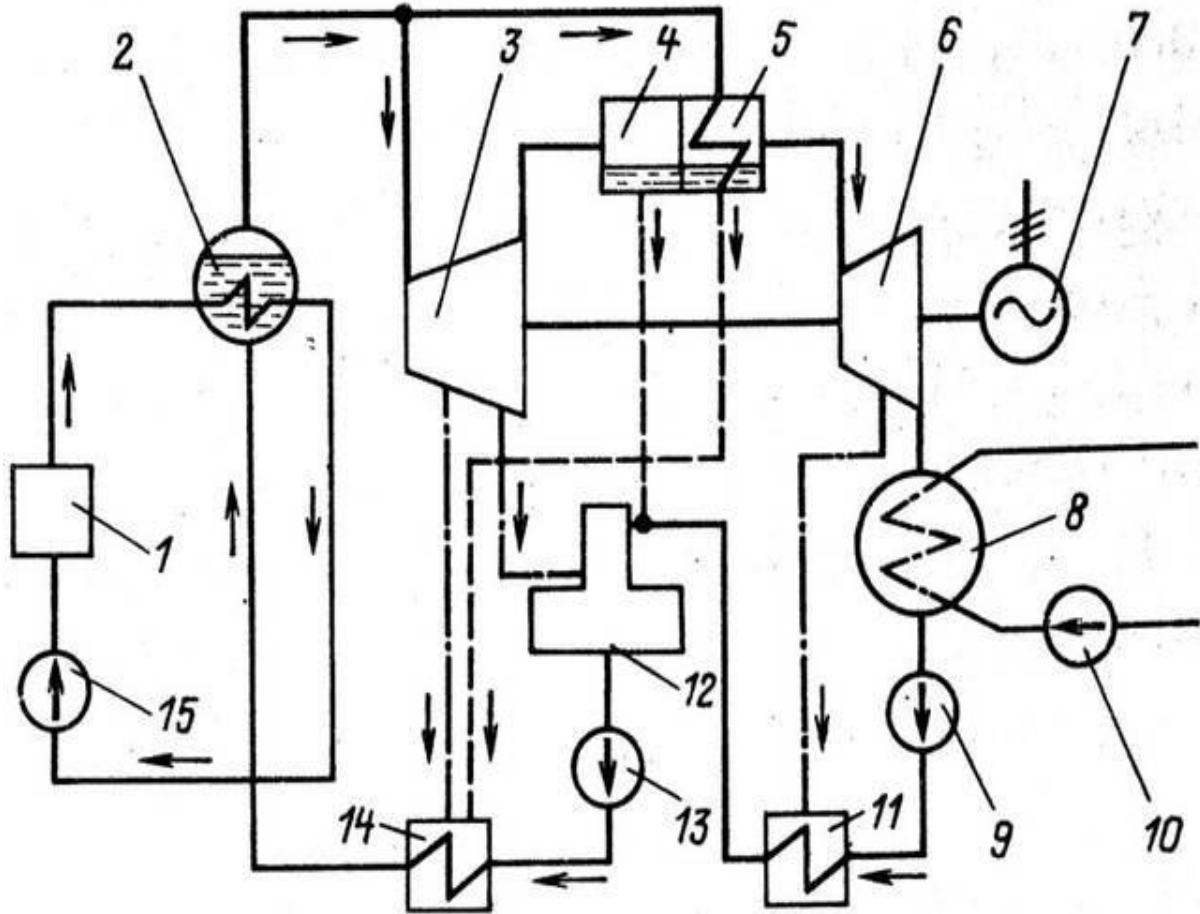
Якщо контур теплоносія відділений від контуру робочого тіла, то АЕС називають двоконтурною. Контур теплоносія реактору називають першим, контур робочого тіла — другим.

Розглянемо принцип роботи двоконтурної АЕС (рис.1.5). Теплова енергія із зони реактора відводиться теплоносієм трубопроводами першого контуру до парогенератора, де через поверхню нагріву тепло передається робочому тілу другого контуру.

Охолоджений теплоносій першого контуру за допомогою головного циркуляційного насоса (ГЦН) знову спрямовується до реактора, і контур замикається. Робочим тілом другого контуру служить звичайна вода, що генерується в пару. Пара по трубопроводам робочого контуру направляється до турбогенератора, в якому послідовно теплова енергія перетворюється на механічну, а механічна – в електричну.

Відпрацьована пара конденсується в конденсаторі та прокачується конденсаторними насосами через регенеративну систему низького тиску. Далі за допомогою живильних насосів вода, пройшовши через регенеративну систему високого тиску, знову надходить до парогенератора.

Така принципова схема так званих двоконтурних АЕС, найбільш поширених у даний час. За двоконтурною схемою працюють всі АЕС України, основу яких складають ядерні енергетичні реактори з водою під тиском ВВЕР–1000.



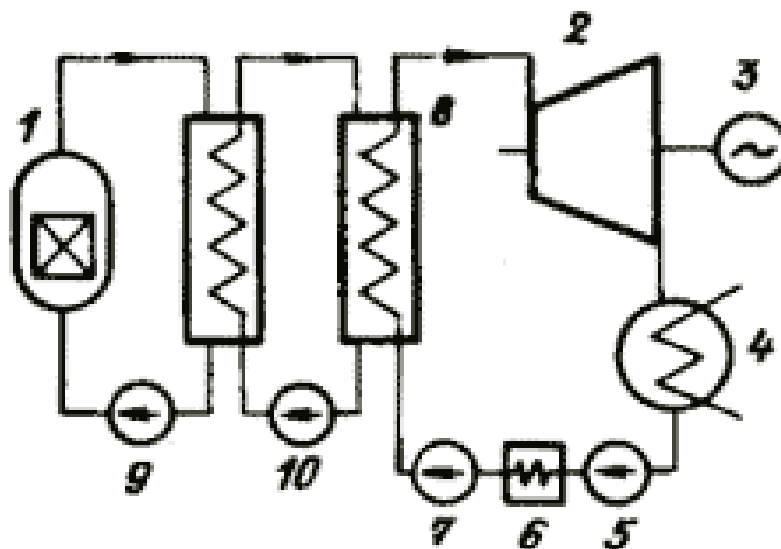
1 – реактор; 2 – парогенератор; 3, 6 – частини високого та низького тиску турбіни; 4 – сепаратор; 5 – пароперегрівач; 7 – генератор; 8 – конденсатор; 9 – конденсатний насос; 10 – циркуляційний насос; 11 – підігрівач низького тиску; 12 – деаератор; 13 – живильний насос; 14 – підігрівач високого тиску; 15 – головний циркуляційний насос

Рисунок 1.5 — Принципова схема двоконтурної АЕС

Можливі також трьохконтурні ядерні енергетичні установки (рис. 1.6). В цьому разі між контуром теплоносія реактора і контуром робочого тіла турбіни розташовується проміжний контур. У таких системах забезпечується додатковий захист робочого тіла від опромінювання, але схема становиться складною і дорогою.

На АЕС з трьохконтурними схемами встановлюються реактори на швидких нейтронах, що працюють на збагаченому паливі (зазвичай на суміші урану і плутонію).

У реакторів на швидких нейтронах теплоносієм першого і другого контурів є натрій, тим самим виключається можливість контакту радіоактивного металу з водою.



1 – ядерний реактор; 2 – парова турбіна; 3 – електрогенератор; 4 – конденсатор; 5 – насос конденсату; 6 – система підігріву води; 7 – насос живильної води; 8 – теплообмінник; 9 – насос теплоносія першого контуру; 10 – насос теплоносія проміжного контуру

Рисунок 1.6 — Принципова схема трьохконтурної АЕС

За призначенням ядерні реактори поділяються на енергетичні, транспортні (атомні підводні човни, криголами), експериментальні, промислові, багатоцільові. Ми розглянемо лише енергетичні реактори, що використовують на АЕС для вироблення електроенергії.

За спектром нейтронів реактори класифікуються на типи:

- Реактор на теплових (повільних) нейтронах («тепловий реактор»);
- Реактор на швидких нейтронах («швидкий реактор»);
- Реактор на проміжних нейтронах;
- Реактор зі змішаним спектром.

За розміщенням палива розрізняють гетерогенні реактори, де паливо розміщується в активній зоні дискретно у вигляді блоків, між якими знаходиться сповільнювач і гомогенні реактори, де паливо і сповільнювач представляють однорідну суміш (гомогенну систему).

У гетерогенному реакторі паливо і сповільнювач можуть бути просторово рознесені, зокрема, в порожнинному реакторі сповільнювач-відбивач оточує порожнину з паливом, що не містить сповільнювача. З ядерно-фізичної точки зору критерієм гомогенності/гетерогенності є не конструктивне виконання, а розміщення блоків палива на відстані, що перевищує довжину уповільнення нейтронів в даному уповільнювачі. Так, реактори з так званими «тісними ґратами» розраховуються як гомогенні, хоча в них паливо зазвичай відокремлене від сповільнювача.

Блоки ядерного палива в гетерогенному реакторі називаються тепловидільними збірками (ТВЗ), які розміщуються в активній зоні у вузлах правильної решітки, утворюючи осередки. ТВЗ — це набір тепловидільних елементів (ТВЕЛ), зібраних в організовані пучки для спрощення обліку та

переміщення ядерного палива в реакторі. В одній тепловидільній збірці знаходиться 150—350 ТВЕЛів (рис. 1.7).

Паливо, що використовується у реакторах:

- ізотопи урану  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ;
- ізотоп плутонію  $^{239}\text{Pu}$ , також ізотопи  $^{239-242}\text{Pu}$  у вигляді суміші з  $^{238}\text{U}$  (МОХ-паливо);
- ізотоп торію  $^{232}\text{Th}$  (за допомогою перетворення в  $^{233}\text{U}$ ).

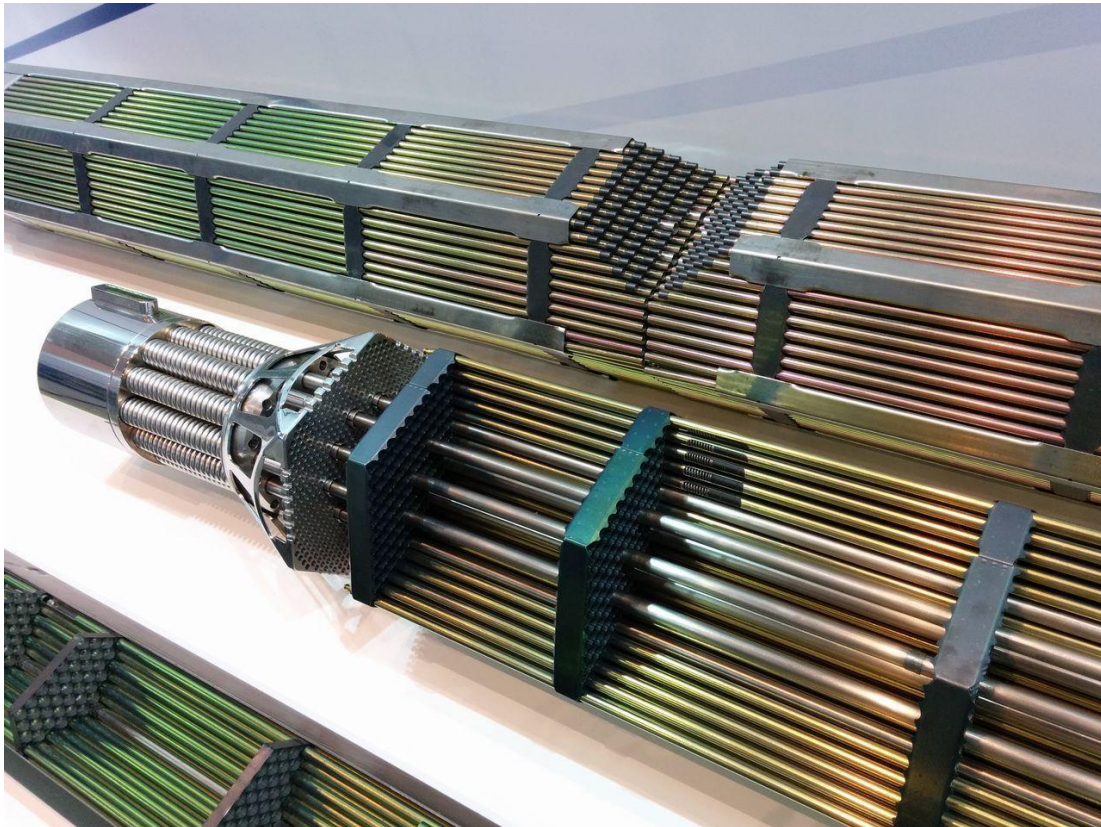


Рисунок 1.7 — Тепловидільні збірки (ТВЗ), набрані з ТВЕЛів

За ступеню збагачення розділяють природний уран, слабо збагачений уран, високо збагачений уран.

За хімічним складом: металевий U,  $\text{UO}_2$  (діоксид урану), UC (карбід урану) тощо.

Теплоносії, що використовують у реакторах:

- $\text{H}_2\text{O}$  (вода, водо-водяний реактор);
- газ (графіто-газовий реактор);
- $\text{D}_2\text{O}$  (важка вода, ядерний реактор на важкій воді, CANDU);
- реактор з органічним теплоносієм;
- реактор з теплоносієм рідкометалевим;
- реактор на розплавах солей;

- реактор з твердим теплоносієм.

Сповільнювачі нейтронів що використовують у реакторах:

- С (графіт, графіто–газовий реактор, графіто–водяний реактор).
- $H_2O$  (вода, легководний реактор, водо–водяний реактор, ВВЕР);
- $D_2O$  (важка вода, важководний ядерний реактор, CANDU);
- Be, BeO (берилій, оксид берилію);
- гідриди металів;
- без сповільнювача ( реактор на швидких нейтронах).

За конструкцією бувають реактори корпусні і каналні. За способом генерації пара реактори з зовнішнім парогенератором (ВВЕР) і киплячі.

В Україні зараз використовують як енергетичні тільки реактори ВВЕР — водо–водяні енергетичні реактори. Розглянемо їх конструкцію і небезпеку.

Після закриття Чорнобильської АЕС в Україні залишились в експлуатації 4 атомні електростанції з реакторами типу ВВЕР: Запорізька, Рівненська, Хмельницька та Південно–Українська, на яких працює 15 ядерних енергетичних установок із загальною встановленою потужністю 13835 МВт: 13 реакторів ВВЕР–1000 і 2 реактори ВВЕР–440.

Реактори типу ВВЕР – реактори з водою під тиском (рис.1.8). Сучасні реактори такого типу (PWR), що споруджуються в різних країнах, мало відрізняються один від одного, оскільки засновані на однакових технічних принципах. Такі реактори — основа світової атомної енергетики.

Корпус реактора має два ряди по чотири патрубкі діаметром 850 мм, на рівні верхнього і нижнього рядів цих патрубків знаходяться два патрубкі діаметром 300 мм для приєднання трубопроводів системи аварійного охолодження активної зони (САОЗ). Корпус реактора, виготовлений з перлітової сталі 15Х2НМФА, зсередини плакований шаром іржостійкої сталі.

В активній зоні ВВЕР–1000 діаметром 3,16 м і заввишки 3,56 м розміщуються 163 шестигранних тепловиділяючих збірок з розміром «під ключ» 234 мм.

ТВЗ містить 331 стрижень, з них 312 тепловиділяючих паливних елементів стрижньового типу (ТВЕЛів), 18 направляючих трубок для пучка регулюючих стрижнів системи управління і захисту (СУЗ) і центральної трубки для кріплення дистанціонуючих решіток. ТВЕЛи в збірці розташовуються по трикутній решітці з кроком 12,75 мм, висота касети твелів 4,66 м. В активній зоні ВВЕР1000 ТВЗ розташовані по трикутній решітці з кроком 241 мм. Вага ТВЗ – 735 кг, маса ядерного палива  $UO_2$  в ТВЗ – 488 кг. Механізм СУЗ має 61 привід, які об'єднуються в групи. Приводи СУЗ переміщують пучки (кластери) з 18 стрижнів–поглиначів нейтронів з карбиду бору  $B_4C$  всередині ТВЗ в спеціальних направляючих трубках.

Повільне регулювання реактивності в активній зоні реактора здійснюється введенням борної кислоти  $H_3BO_3$  в теплоносії в кількості до 13,5 г  $H_3BO_3$ /кг  $H_2O$ .



Основна небезпека експлуатації реактора — небезпека радіаційної аварії. Такі аварії є найнебезпечнішими зі всіх аварій на радіаційно–небезпечних об'єктах, і можливі як на АЕС як України, так і сусідніх держав.

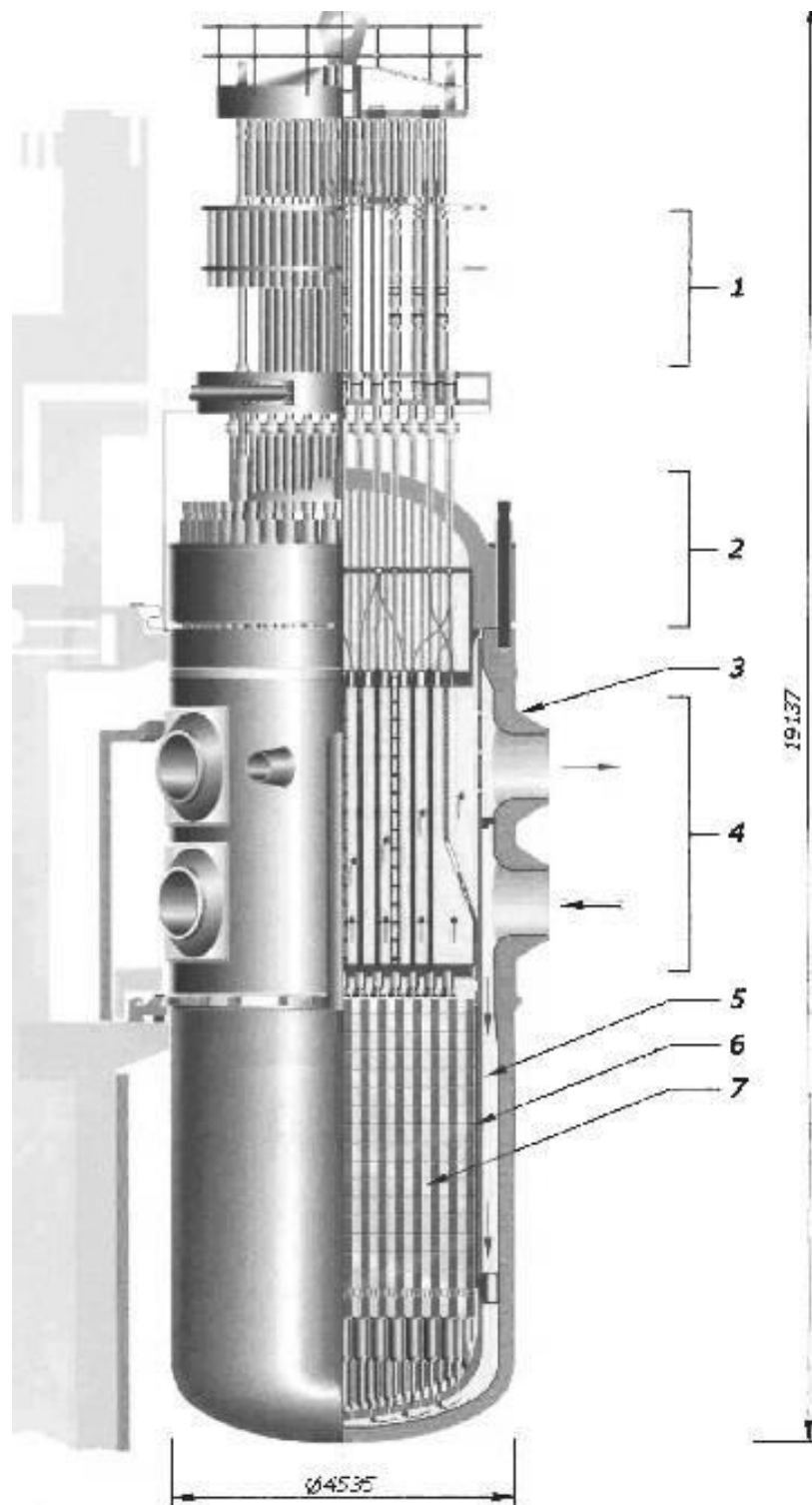
При аваріях на АЕС можуть бути пошкодження конструкцій, технологічних ліній, пожежі, викиди в навколишнє середовище радіаційних речовин (РР). Аварія з повним руйнуванням ядерного реактора може відбутися в результаті стихійного лиха, вибуху боєприпасів, масштабних терористичних актів, падіння повітряного транспорту на споруди АЕС та ін. Аварія може бути з розривом трубопроводів із теплоносієм, ушкодженням реактора і герметичних зон, виходом з ладу систем керування і захисту, що може призвести до миттєвої втрати герметичності конструкцій реактора, сплавлення твелів і викиду РР з парою в навколишнє середовище, можливе розкидання радіоактивних осколків, уламків конструкцій паливних елементів.

При аварії на АЕС відбувається викид РР в атмосферу, гідросферу і літосферу, що обумовлює ураження біосфери. Характер і масштаби радіоактивного забруднення місцевості при аварії на АЕС залежать від характеру вибуху (тепловий чи ядерний), типу реактора, ступеня його руйнування, кількості викинутих РР, метеоумов і рельєфу місцевості.

Деякі фахівці вважають, що неможливо зробити абсолютно безпечний атомний реактор — будь-який реактор може вибухнути за певних обставин. Але ж можна звести ризик аварії до прийнятної, мізерно малої величини,  $\leq 10^{-6}$ . Інші автори вважають, що це цілком можливо на реакторах типу ВВЕР.

Реактор ВВЕР більш безпечніший у порівнянні з РБМК і DWR (киплячі реактори) завдяки двоконтурній схемі і має 4 бар'єри безпеки: паливна таблетка, оболонка ТВЕЛ, границі першого контуру, герметичне огороження реакторного відділення.

З іншого боку, є необхідність підтримання високого тиску для запобігання скипанню води при температурах 300–360°C і, як наслідок, більша небезпека при аварії у порівнянні з реакторами з меншим тиском (рідкометалевими).



1 – кришка корпусу; 2 – ущільнення даху; 3 – привід кластера; 4 – ущільнені шахти; 5 – привід; 6 – тепловий екран; 7 – шахта кластера; 8 – гранований пояс; 9 – активна зона

Рисунок 1.8 — Реактор ВВЕР 1000

## Устрої, що генерують іонізуючі випромінювання

**Рентгенівська трубка** являє собою певний тип електровакуумної лампи для генерації рентгенівських променів. Назва трубки походить від імені німецького фізика Вільгельма Конрада Рентгена. Випромінюючий елемент являє собою вакуумну посудину з двома електродами (рис. 1.9, 1.10).

Основними конструктивними елементами рентгенівської трубки є металеві катод і анод (раніше називався також антикатод). Катод при нагріванні випромінює електрони (відбувається термоелектронна емісія). Далі через велику різниці потенціалів між катодом і анодом (десятки–сотні кіловольт) потік електронів прискорюється і набуває велику енергію. Отриманий прискорений пучок електронів потрапляє на позитивно заряджений анод. Досягаючи анода, електрони різко гальмуються, моментально втрачаючи більшу частину придбанної енергії. При цьому виникає гальмівне випромінювання рентгенівського діапазону. У процесі гальмування лише близько 1% кінетичної енергії електрона йде на рентгенівське випромінювання, 99% енергії перетворюється в тепло. Щоб запобігти перегріву анода, в потужних рентгенівських трубках застосовують водне або масляне охолодження і анод, що обертається (рис. 1.11).

Для регулювання струму через трубку управляють кількістю електронів, що випускаються, тобто змінюючи напругу розжарення.

Типові значення анодної напруги в медичних трубках для рентгенографії — 60 ... 80 кВ, струму — десятки мА, таким чином імпульсна потужність становить кілька кВт. При рентгеноскопії використовується безперервний режим роботи при струмі кілька мА. Для рентгенотерапії застосовуються трубки з анодною напругою понад 100 кВ для отримання більш жорсткого випромінювання. Для отримання характеристичного випромінювання застосовують напругу 120 кВ і більше.

Рентгенівські промені виникають при сильному прискоренні заряджених частинок (гальмівне випромінювання), або при високоенергетичних переходах в електронних оболонках атомів (характеристичне випромінювання). Обидва ефекти використовуються в рентгенівських трубках.

При збільшенні струму через рентгенівську трубку інтенсивність випромінювання зростає прямо пропорційно току, характер гальмівного спектра при цьому не змінюється.

Матеріал анода не впливає на довжину хвиль спектра гальмівного випромінювання (на жорсткість випромінювання), але впливає на загальну інтенсивність випромінювання, яка росте прямо пропорційно порядковому номеру хімічного елемента, з якого зроблено дзеркало анода.

Крім гальмування (розсіювання) електронів в електричному полі атомних ядер, одночасно вибиваються електрони з внутрішніх електронних оболонок атомів анода. Порожні місця в оболонках займаються іншими електронами атома. При цьому випускається рентгенівське випромінювання з характерним для матеріалу анода спектром енергій (характеристичне випромінювання).

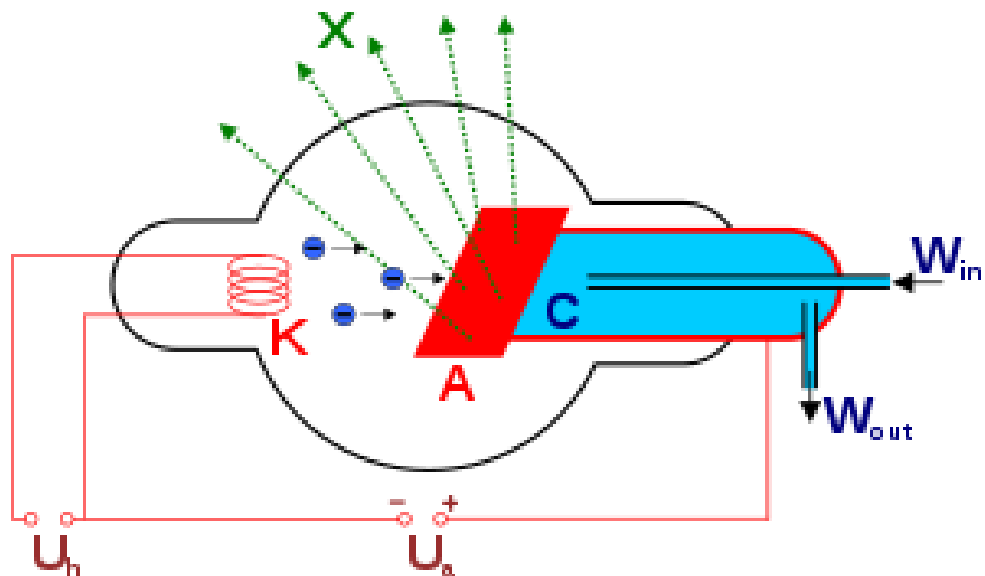
Специфічні властивості характеристичного спектра використовуються при деяких методах рентгеноструктурного аналізу.



Рисунок 1.9 — Рентгенівська трубка



Рисунок 1.10 — Сучасна рентгенівська трубка для рентгеноструктурних досліджень



X – рентгенівські промені; К – катод; А – анод; С – тепловідвід;  $U_h$  – напруга розжарювання катоду;  $U_a$  – прискорююча напруга;  $W_{in}$  – впуск водяного охолодження;  $W_{out}$  – випуск водяного охолодження

Рисунок 1.11 – Схема рентгенівської трубки

**Прискорювач заряджених частинок** — пристрій для отримання заряджених частинок (електронів, протонів, позитронів,  $\alpha$ -частинок, ядер атомів різних елементів) великих енергій. Прискорення досягається за допомогою електричного поля, здатного змінювати енергію частинок, котрі мають електричний заряд. Водночас, магнітне поле може лише змінити напрям руху заряджених частинок, не змінюючи величини їх швидкості, тому в прискорювачах воно застосовується для керування рухом частинок.

Сучасні прискорювачі сягають величезних розмірів. Шлях який проходять частинки, що розганяються, може перевищувати десятків кілометрів.

Найпростіший прискорювач складається з джерела заряджених частинок, які рухаються в полі, створеному двома електродами. Енергія, якої набувають частинки в проміжку між електродами, визначається різницею потенціалів електродів. Таким чином, для того, щоб надати частинкам якомога більшої енергії, необхідно створити велику постійну різницю потенціалів між електродами. Це складне завдання, оскільки потенціали електродів обмежені їхньою ємністю та виникненням різноманітних газових розрядів (коронного, іскрового тощо). Найбільші значення різниці потенціалів, які можна досягнути в такому простому прискорювачі не перевищують кількох мегавольт (електростатичний генератор ван де Граафа).

Головними характеристиками прискорювача є енергія частинок і інтенсивність, тобто кількість частинок, що вилітають за одну секунду. Інтенсивність часто характеризують повним електричним струмом, який утворюється пучком. Для одержання струму слід помножити число частинок, що вилітають за одну секунду, на заряд окремої частинки.

За принципом конструкції та траєкторією руху частинок всі прискорювачі заряджених частинок можна розподілити на дві категорії: лінійні прискорювачі та циклічні прискорювачі. Різниця полягає у тому, що в циклічних прискорювачах частинка, рухаючись по колу завдяки сильному магнітному полю, може проходити ті самі ділянки прискорення кілька разів, в той час як у лінійних прискорювачах, в яких області прискорення розташовані одна за іншою, цей процес відбувається лише один раз. Так можна провести аналогію між замкнутим циклом та прямою лінією.

В лінійному прискорювачі використовують змінну напругу, яка генерується потужним радіочастотним генератором. Заряджені частинки прискорюються на одному з півперіодів змінного поля, а впродовж іншого рухаються в металічних циліндрах, що екранують поле. Довжина циліндрів підбирається таким чином, щоб час прольоту частинки збігався із півперіодом змінного поля. Чим більша швидкість зарядженої частинки, тим довгими повинні бути циліндри. Коли швидкість зарядженої частинки наближається до швидкості світла, довжина циліндрів повинна дорівнювати  $cT/2$ , де  $c$  — швидкість світла, а  $T$  — період змінної напруги. В інших конструкціях замість змінної напруги використовується електромагнітна хвиля, що рухається вздовж циліндра разом із частинками.

Недоліком лінійних прискорювачів є значна довжина. Стенфордський прискорювач має довжину 3,5 км при енергії 20 Гев.

Циклічні прискорювачі дозволяють зменшити довжину, змушуючи заряджені частинки багаторазово пробігати один і той же шлях, щоразу прискорюючись. Для цього використовується сильне магнітне поле, в якому траєкторії частинок закручуються.

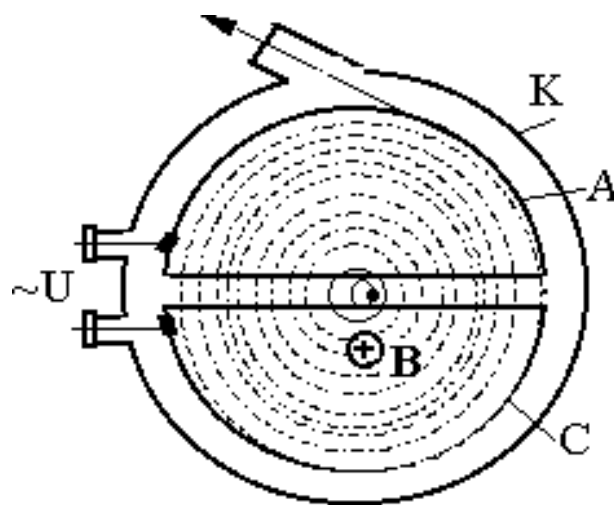
Сучасні типи конструкцій прискорювачів:

- циклотрон (рис. 1.12) — циклічний прискорювач нерелятивістських важких заряджених частинок (протонів, іонів), в якому частинки рухаються в постійному і однорідному магнітному полі, а для їх прискорення використовується високочастотне електричне поле незмінної частоти;
- ізохронний циклотрон — прискорювач заряджених частинок розроблений на основі принципу жорсткого фокусування;
- фазотрон (синхроциклотрон) — прискорювач заряджених частинок у якому використовується спосіб зміни частоти електричного поля;
- мікротрон — прискорювач зі змінною кратністю;
- синхротрон — кільцевий циклічний прискорювач заряджених частинок, в якому частинки рухаються по орбіті незмінного радіусу за рахунок того, що темп наростання їх енергії в прискорюючих проміжках синхронізований із швидкістю наростання магнітного поля на орбіті. Він дозволяє прискорювати як легкі заряджені частинки (електрони, позитрони), так і важкі (протони, антипротони, іони) до найбільших енергій. В наш час всі циклічні прискорювачі на максимальні енергії – це прискорювачі синхротронного типу;
- бетатрон — індукційний прискорювач;

- синхрофазотрон — прискорювач заряджених частинок, що поєднує в собі функціональні риси синхротрона та фазотрона;
- колайдер — прискорювач на зустрічних пучках, створений в експериментальних цілях для вивчення процесів зіткнення частинок з високими енергіями.

За типом частинок, що прискорюються, прискорювачі поділяються на:

- прискорювачі легких частинок (електронів, позитронів);
- прискорювачі проміжних частинок (мезонів);
- прискорювачі важких частинок (протонів);
- прискорювачі іонів;
- прискорювачі античастинок (антипротонів).



К – камера; А, С – дуанти – дві половинки тонкостінної металічної циліндричної коробки, розділеної вузькою щілиною; В – магнітне поле

Рисунок 1.12 — Принципова схема циклотрона

Сучасний розвиток прискорювачів йде як по шляху збільшення енергії прискорених частинок, так і по шляху нарощування інтенсивності (сили струму) і тривалості імпульсу прискореного пучка, поліпшення якості пучка (зменшення розкиду по енергії, поперечним координатам і швидкостям).

Паралельно з розробкою нових методів прискорення удосконалюються традиційні методи: досліджуються можливості застосування надпровідних матеріалів (і відповідної ним техніки низьких температур) в її системах прискорення, що дозволяють різко скоротити розміри систем і енергетичні витрати; розширюється область застосування методів автоматичного керування в прискорювачах; прискорювачі доповнюються нагромаджувальними кільцями, що дозволяє досліджувати елементарні взаємодії в зустрічних пучках. При цьому особлива увага приділяється зменшенню вартості установок.

Наразі найпотужнішою установкою прискорення частинок є Великий адронний колайдер, однак вчені вже працюють над розробкою ще більш потужнішого прискорювача — Майбутнього кільцевого колайдера.

Застосування прискорювачів заряджених частинок:

- 1) медицина: радіодіагностика, лікування онкологічних захворювань за допомогою опромінення (зокрема циклотрони медичного призначення), стерилізація медичних інструментів;
- 2) біологія;
- 3) промисловість:
  - стерилізація продуктів харчування;
  - радіаційна обробка матеріалів;
  - радіаційна дефектоскопія;
  - радіаційне зшивання полімерів;
  - штучна полімеризація лаків;
  - виготовлення напівпровідникових приладів;
  - виготовлення елементів мікроелектроніки;
  - модифікація властивостей матеріалів (напр. гуми);
  - електронно–променеє зварювання;
  - імплантація іонів;
- 4) наукові дослідження: елементарні частинки, ядерна фізика, фізика твердого тіла, отримання нуклідів, що не зустрічаються в природі;
- 5) прикладні дослідження.

### ? Питання для самоконтролю:

1. Що таке іонізуюче випромінювання (ІВ)?
2. Яке ІВ має найбільшу іонізуючу здібність?
3. Яке ІВ має найбільшу проникаючу здібність?
4. Які ІВ відносяться до електромагнітних?
5. Які ІВ відносяться до корпускулярних?
6. Які бувають види радіоактивного розпаду?
7. Що таке кластерний розпад?
8. Які існують радіоактивні ряди, що це таке?
9. Принцип роботи одноконтурної АЕС.
10. Принцип роботи двоконтурної АЕС.
11. Як працює рентгенівська трубка?



## Фізичні величини, що характеризують іонізуюче випромінювання

**Активність** радіоактивного ізотопу – число розпадів (перетворень,  $n$ ) за одиницю часу ( $\tau$ ):

$$A = n/\tau$$

Якщо активність суттєво змінюється з часом :

$$A = dn/d\tau.$$

В Міжнародній системі одиниць (СІ) одиницею активності є бекерель (Бк, Вq);  $1 \text{ Бк} = \text{с}^{-1}$ . 1 Бк відповідає 1 розпаду за секунду. Позасистемна одиниця – кюрі (Кі, Сі);  $1 \text{ Кі} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ . За кюрі взята активність 1 г природного радію.

**Питома активність** — активність одиниці маси речовини (матеріалу):

$$a = A/m,$$

де  $m$  – маса, кг.

Питома активність у системі СІ вимірюється у Бк/кг. Позасистемні одиниці – Кі/кг, Кі/г тощо.

**Об'ємна активність** використовується для характеристики радіоактивних газів, або повітряного середовища з наявністю останніх (наприклад, радону):

$$a_V = A/V,$$

де  $V$  — об'єм,  $\text{м}^3$ .

Об'ємна активність у системі СІ вимірюється у Бк/ $\text{м}^3$ . Позасистемні одиниці – Кі/ $\text{м}^3$ , Кі/л тощо.

**Поверхнева активність** характеризує радіаційну забрудненість який-небудь поверхні:

$$a_S = A/S,$$

де  $S$  — площа поверхні,  $\text{м}^2$ .

Поверхнева активність у системі СІ вимірюється у Бк/ $\text{м}^2$ . Позасистемні одиниці – Кі/ $\text{м}^2$ , Кі/ $\text{км}^2$  тощо.

**Період напіврозпаду**  $T$  – час, на протязі якого кількість атомів елемента (а також його маса і активність) зменшується в 2 рази. У табл. 1.8 надані значення періоду напіврозпаду для деяких ізотопів.

Зв'язок між питомою активністю  $a$ , періодом напіврозпаду  $T$  і масовим числом  $M$  :

$$a = \frac{N_A \ln 2}{TM} = \frac{4,17 \cdot 10^{23}}{TM},$$

де  $N_A$  – число Авогадро ( $6,02 \cdot 10^{23}$ ).

Таблиця 1.8 – Період напіврозпаду деяких ізотопів

Ізотоп	Період напіврозпаду
$^8\text{Be}$	$8,2 \cdot 10^{-17}$ с
$^{294}\text{Og}$ (оганесон)	0,9 мс
$^{282}\text{Rg}$ (рентгеній)	0,5 с.
$^{289}\text{Fl}$ (Флеровій)	2,7 с.
$^{128}\text{Cs}$	3,9 хв.
$^{81}\text{Sr}$	25,5 хв.
$^{24}\text{Na}$	15 годин
$^{58}\text{Co}$	70,8 діб
$^3\text{H}$	12,35 року
$^{226}\text{Ra}$	1600 років
$^{14}\text{C}$	5730 років
$^{129}\text{I}$	15 млн. років
$^{235}\text{U}$	700 млн. років
$^{238}\text{U}$	4,5 млрд. років
$^{232}\text{Th}$	14 млрд. років
$^{209}\text{Bi}$	$1,9 \cdot 10^{19}$ років

Кількість атомів елемента змінюється у часі (маса також) за залежністю:

$$N = N_0 e^{-\tau/T}$$

Середній час життя атому:  $\tau_{\text{ж}} = T/\ln 2 = 1,44 T$

**Експозиційна доза.** Експозиційна доза  $X$  визначає величину заряду іонів одного знаку, що виникає в одиниці маси сухого повітря під дією електромагнітного (рентгенівського, гамма тощо) випромінювання:

$$X = \frac{q}{m_{\text{п}}},$$

де  $q$  – заряд іонів одного знаку Кл,  $m_{\text{п}}$  – маса повітря, кг.

Таким чином, у системі СІ експозиційна доза вимірюється у Кл/кг. Більш поширеною одиницею експозиційної дози є рентген (Р, R). Зв'язок між одиницями експозиційної дози подається таким співвідношенням:

$$1 \text{ P} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$$

$$1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ P}$$

Рентген дорівнює експозиційній дозі фотонного випромінювання, при якій в  $1 \text{ см}^3$  повітря, що знаходиться при нормальному атмосферному тиску і  $0^\circ\text{C}$ , утворюються іони, що несуть заряд, рівний 1 одиниці заряду СГСЕ ( $\approx 3,33564 \cdot 10^{-10}$  Кл) кожного знака. При дозі рентгенівського або гамма-випромінювання, що дорівнює 1 P, в  $1 \text{ см}^3$  повітря утворюється  $2,082 \cdot 10^9$  пар іонів.

**Потужність експозиційної дози** – відношення експозиційної дози до часу експонування:

$$W = \frac{X}{\tau}$$

Якщо доза змінюється у часі, застосовується формула:

$$W = \frac{dX}{dt}$$

Одиниця виміру потужності експозиційної дози у системі СІ –  $1 \text{ Кл/кг} \cdot \text{с} = 1 \text{ А/кг}$ . Часто застосовують позасистемні одиниці – P/год., мP/год., мкP/год.  $1 \text{ P/год.} = 7,17 \cdot 10^{-8} \text{ А/кг}$ .  $1 \text{ А/кг} = 1,39 \cdot 10^7 \text{ P/год.}$

**Поглинена доза.** Експозиційна доза характеризує іонізуючу здібність рентгенівського та гамма-випромінювання у повітрі. Коли ми маємо справу із взаємодією випромінювання (не тільки електромагнітного) з будь-якою речовиною, об'єктивним показником є поглинена доза випромінювання.  $D$

Вона дорівнює енергії випромінювання, поглиненій одиницею маси речовини.

$$D = \frac{E_{\text{п}}}{m},$$

де  $E_{\text{п}}$  – поглинена енергія випромінювання, Дж,  $m$  – маса речовини, кг.

У випадку змінної у просторі дози, вона визначається за формулою :

$$D = \frac{dE_{\text{п}}}{dm}$$

Одиниця виміру поглиненої дози у системі СІ – грей (Гр, Gy).  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ . Ще застосовується стара одиниця – рад (від англ. скорочення Radiation absorbed dose).  $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$ .

**Потужність поглиненої дози.** За аналогією з експозиційною дозою потужність поглиненої дози – відношення самої дози до часу, коли вона мала місце:

$$P = \frac{D}{\tau}; P = \frac{dD}{d\tau}$$

Одиниця виміру у системі СІ – 1 Гр/с = 1 Дж/кг·с = 1 А/кг. Тобто 1 Гр/с відповідає 1 Вт потужності випромінювання, поглиненого речовиною.

**ерма** – сума початкових кінетичних енергій всіх заряджених частинок, звільнених незарядженим іонізуючим випромінюванням (таким як фотони або нейтрони) у зразку речовини, віднесена до маси зразка. Визначається за формулами:

$$K = \frac{E_{tr}}{m}, K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

де  $E_{tr}$  — передана енергія заряджених частинок.

Керма в загальному випадку відрізняється від поглиненої дози. При низьких енергіях первинного випромінювання керма приблизно дорівнює поглиненої дози, тоді як при високих енергіях вона набагато вище поглиненої дози, оскільки частина енергії виноситься з об'єму в формі рентгенівського гальмівного випромінювання або швидких електронів.

Одиниця керми, як і поглиненої дози – джоуль на кілограм, або грей, Гр (англ. gray, Gy); 1 Гр = 1 Дж/кг.

Слово «керма» (англ. kerma) є акронімом від англійського «kinetic energy released in material» или «...in matter» (кінетична енергія, звільнена у речовині).

**Потужність керми :**

$$K_{п} = \frac{K}{\tau}, K_{п} = \frac{dK}{d\tau}$$

**Щільність потоку** частинок (квантів) або потужність флюенса частинок  $\Phi$  – відношення числа частинок, що перетинають в одиницю часу малу сферу, до площі поперечного перерізу цієї сфери. Мала сфера означає, що вона не вносить спотворень в поле випромінювання. В окремому випадку паралельного пучка частинок щільність потоку дорівнює числу частинок, що перетинають в одиницю часу майданчик одиничної площі, розташований перпендикулярно до напрямку поширення випромінювання,  $c^{-1}m^{-2}$ :

$$\Phi = n/St$$

**Флюенс** – фізична величина, інтеграл за часом від щільності потоку частинок або енергії. Іноді використовується синонімічний термін «перенесення».

Флюенсом частинок у разі пучка частинок називають відношення числа частинок  $dN$ , перетнувших перпендикулярну пучку елементарну площадку  $dS$  за даний проміжок часу, до площі цієї площадки. У разі дифузного поля частинок, флюенс в точці визначається як відношення числа частинок, які

проникли в елементарну сферу з центром в цій точці, до площі поперечного перерізу цієї сфери:

$$\Phi_N = \frac{dN}{dS}.$$

Одиниці виміру —  $\text{м}^{-2}$  (СІ),  $\text{см}^{-2}$  (СГС).  $1 \text{ м}^{-2}$  — такий флюенс, при якому в об'єм сфери з площею поперечного перерізу  $1 \text{ м}^2$  потрапляє одна частинка.

**керма–постійна.** При роботі з радіонуклідами необхідно пам'ятати, що число розпадів джерела ІВ не визначає ступінь його іонізуючого впливу. Воно також залежить від схеми розпаду, тобто кількості фотонів, що припадають на один розпад, і енергії фотонів. Тому вводять величини, що однозначно характеризують даний радіонуклід як І–випромінювач. Такими характеристиками є керма–постійна і керма–еквівалент. Керма–постійна (постійна потужності повітряної керма радіонукліда)  $\Gamma$  визначається як відношення потужності повітряної керми  $K_n$ , створюваної фотонами з енергією більше заданого порогового значення від точкового ізотропно–випромінюючого джерела даного радіонукліда, що знаходиться у вакуумі на відстані  $R$  від джерела, помноженої на квадрат цієї відстані до активності  $A$  джерела:

$$\Gamma = K_n R^2/A.$$

Одиниця керма–постійній у СІ —  $[\text{Гр} \cdot \text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{Бк})]$ .

Більш краща одиниця виміру —  $[\text{аГр} \cdot \text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{Бк})]$ .

Фізичний сенс керма–постійної – потужність повітряної керми, створюваній у вакуумі іонізуючим випромінювачем точкового ізотропного джерела з енергією більше заданого порогового значення  $d$  активністю  $A$  Бк на відстані  $R$ , м.

**керма–еквівалент** :  $\Gamma_e = \Gamma A$ .

**Еквівалентна доза.** При однакових поглинених дозах різні види випромінювання здійснюють різний біологічний вплив на організм. Це зумовлено тим, що важка частинка (наприклад, протон) створює на одиниці довжини пробігу в тканині більше іонів, ніж легка (наприклад, електрон). За однакової поглиненій дозі радіобіологічний руйнівний ефект тим більший, чим вища іонізація, що створюється випромінюванням. Щоб врахувати цей ефект, а також стохастичні наслідки опромінення для здоров'я (наприклад, довгострокова ймовірність виникнення раку і генетичних захворювань) введено поняття еквівалентної дози іонізуючого випромінювання  $H$ :

$$H = \sum_{i=1}^n Q_i D_i$$

де  $D$  – поглинена доза  $i$ -го випромінювання;  $Q$  – радіаційний зважуючий фактор (коефіцієнт біологічної активності, коефіцієнт якості) – коефіцієнт, що враховує відносну біологічну ефективність різних видів іонізуючого випромінювання. Значення коефіцієнтів  $Q$  надані у табл. 1.9.

Одиниця еквівалентної дози у системі СІ – зіверт (Зв, Sv). Зіверт – це кількість енергії, поглиненої кілограмом біологічної тканини, що дорівнює по впливу поглиненій дозі фотонного (рентгенівського або гамма) випромінювання в 1 Гр. Як зразкове джерело випромінювання приймають рентгенівське випромінювання з граничною енергією 180 кеВ.

Позасистемна одиниця – бер (біологічний еквівалент рада), 1 бер = 0,01 Зв.

**Потужність еквівалентної дози** – відношення еквівалентної дози до часу, коли вона мала місце, або (якщо доза не є постійною у часі) – похідна від еквівалентної дози:

$$H_{\text{п}} = H/\tau; H_{\text{п}} = dH/d\tau.$$

Одиниця виміру у системі СІ – 1 Зв/с.

Таблиця 1.9 – Значення радіаційних зважуючих факторів  $Q$

Вид випромінювання	$Q$
Фотони, всі енергії	1
Електрони і мюони, всі енергії	1
Протони з енергією > 2 МеВ	5
Нейтрони з енергією < 10 кеВ	5
–з енергією 10–100 кеВ	10
–з енергією від 100 кеВ до 2 МеВ	20
–з енергією 2–20 МеВ	10
–з енергією > 20 МеВ	5
Альфа–опромінення, важкі ядра віддачі	20

**Ефективна доза** – величина, яка використовується в радіаційній безпеці як міра ризику виникнення віддалених наслідків опромінення (стохастичних ефектів) всього тіла людини та окремих його органів і тканин з урахуванням їх радіочутливості.

Різні частини тіла (органи, тканини) мають різну чутливість до радіаційного впливу. Ефективна доза розраховується як сума еквівалентних доз  $H$  по всім органам і тканинам, на які впливало випромінювання, помножених на зважуючі коефіцієнти  $T$  для цих органів, і відображає сумарний ефект опромінювання для організму:

$$E = \sum T_k H_k.$$

Значення коефіцієнтів  $T$  надані у табл. 1.10.

**Потужність ефективної дози** – відношення ефективної дози до часу, коли вона мала місце, або (якщо доза не є постійною у часі) – похідна від ефективної дози:

$$E_{\text{п}} = E/\tau; T_{\text{п}} = dE/d\tau$$

Одиниця виміру у системі СІ – 1 Зв/с.

**Колективна ефективна доза** — сума індивідуальних ефективних доз опромінення в конкретній групі населення за певний період часу: Колективну дозу можна підрахувати для населення окремого села, міста, адміністративно-територіальної одиниці, держави тощо. Її отримують шляхом множення середньої ефективної дози на загальну кількість людей, які перебували під впливом випромінювання. Одиницею виміру колективної дози є людино-зіверт.

Таблиця 1.10 – Значення тканинних зважуючих факторів  $T$

Тканина або орган	$T$
Гонади	0.20
Кістковий мозок (червоний )	0.12
Товста кишка	0.12
Легені	0.12
Шлунок	0.12
Сечовий міхур	0.05
Молочна залоза	0.05
Печінка	0.05
Стравохід	0.05
Щитовидна залоза	0.05
Шкіра	0.01
Поверхня кістки	0.01
Інші органи	0.05

**Інтегральна доза** іонізуючого випромінювання, сумарна доза,  $U$  – фізична величина, що застосовується в УФ терапії і фотобіології і дорівнює енергії, поглиненої всім опроміненим об'єктом:

$$U = Dm,$$

де  $D$  – поглинена доза іонізуючого випромінювання,  $m$  – маса об'єкта. Одиниця виміру (в СІ) – Дж (Гр·кг).

**Лінійна передача енергії** (ЛПЕ) – енергія, яка втрачається частинкою на одиниці довжини її пробігу в речовині середовища. ЛПЕ визначається як

відношення повної енергії  $dE$ , переданої речовині часткою внаслідок зіткнень на шляху  $dl$ , до довжини цього шляху:

$$L = \frac{dE}{dl}$$

Одиниця виміру у системі СІ – Дж/м. На практиці використовують еВ/нм, МеВ/см, кеВ/мкм тощо.

**Енергія** частинки або кванта часто вимірюється в електрон-вольтах,  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,16 \text{ аДж}$ .

Енергія одного кванта випромінювання:

$$E = h\nu = hc/\lambda,$$

де  $h$  – постійна Планка,  $6,226 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ ,  $3,89 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{с}$ ,  $\nu$  – частота, Гц.

Частота і довжина хвилі зв'язані співвідношенням:

$$\lambda = c/\nu,$$

де  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

Маса кванта  $M_{\text{кв}} = h\nu/c^2 = h/c\lambda$

**Відвернута доза** – доза, яка запобігається внаслідок застосування конкретного контрзаходу і вираховується як різниця між дозою без застосування контрзаходу і дозою після припинення дії введеного контрзаходу.

**Доза на одиницю концентрації** (об'ємної),  $g_{\tau}$ , в повітрі чи питній воді – ефективна доза внутрішнього опромінення, розрахована за формулою:

$$g_{\tau} = e_{\tau} \cdot V_{\tau},$$

де  $V_{\tau}$  – референтний об'єм повітря, що вдихається на протязі одного року або референтний об'єм споживання питної води для індивідуумів з референтним віком  $\tau$ .

**Доза на одиницю перорального/інгалаційного надходження** ( $e_{\tau}$ ) – річна ефективна доза, розрахована при одиничному (1 Бк) пероральному або інгалаційному надходженні для одного з шести референтних віків  $\tau$ .

**Доза питома максимальна еквівалентна** – відношення потужності максимальної еквівалентної дози  $H_m$  в органі (в усьому тілі) до щільності потоку часток або фотонів  $\Phi$ :

$$h_m = H_m / \Phi.$$

**Доза в органі** ( $D_T$ ) – середня в органі чи тканині поглинена доза, розрахована за формулою:

$$D_T = \varepsilon_T / m_T$$



де  $E_T$  — сумарна енергія, що виділилася в органі чи тканині  $T$ ,  $m_T$  — маса органа чи тканини.

### ? Питання для самоконтролю:

1. Що називається активністю радіонукліду?
2. Одиниця виміру активності та питомої активності.
3. Що таке експозиційна доза?
4. Що таке поглинена доза?
5. Що таке еквівалентна доза?
6. Що таке ефективна доза?
7. Дати визначення радіаційному зважуючому фактору.
8. Дати визначення тканинному зважуючому фактору.
9. Як зміниться маса ізотопу після трьох періодів напіврозпаду?
10. Одиницею виміру якої величини є електрон-вольт?

### **Прилади для вимірювання параметрів іонізуючого випромінювання**

Потужності дози фотонного випромінювання в робочих приміщеннях вимірюється різними дозиметричними приладами стаціонарного і переносного типу. Всі вживані для цих цілей дозиметричні прилади принципово мало відрізняються один від одного. Вони складаються з наступних складових частин: датчика з першим каскадом посилення і вимірювального блоку, що складається з підсилювача постійного струму, блоку живлення і вимірювального приладу. Наявність кабелів дозволяє виносити вимірювальний блок від місця розташування датчика на деяку відстань, що забезпечує безпеку персоналу при проведенні вимірювань.

Дозиметр КДГ-1 (рис. 1.13) призначений для вимірювання потужності експозиційної дози гамма-випромінювання і індикації наявності бета-випромінювання при проведенні дозиметричного контролю.

Дозиметр забезпечує вимірювання потужності експозиційної дози гамма-випромінювання в діапазоні від 0,1 мР / год. до 1000 Р / год. (7,17 пА/кг ... 71,7 мкА/кг). Діапазон вимірювання розбитий на 7 піддіапазонів. Дозиметр забезпечує індикацію наявності жорсткого (більше 0,4 МеВ)  $\beta$ -випромінювання, починаючи від щільності потоку частинок 600 част. / хв.см<sup>2</sup> ( $10^5 \text{ с}^{-1}\text{м}^{-2}$ ) при вимірюванні на чутливому піддіапазоні – 1 мР / год.

Принцип дії дозиметра заснований на вимірюванні середньої частоти проходження електричних імпульсів, які виникають в блоці детектування в результаті впливу гамма-квантів на лічильники Гейгера-Мюллера, використовувані в приладі в якості детекторів випромінювання.

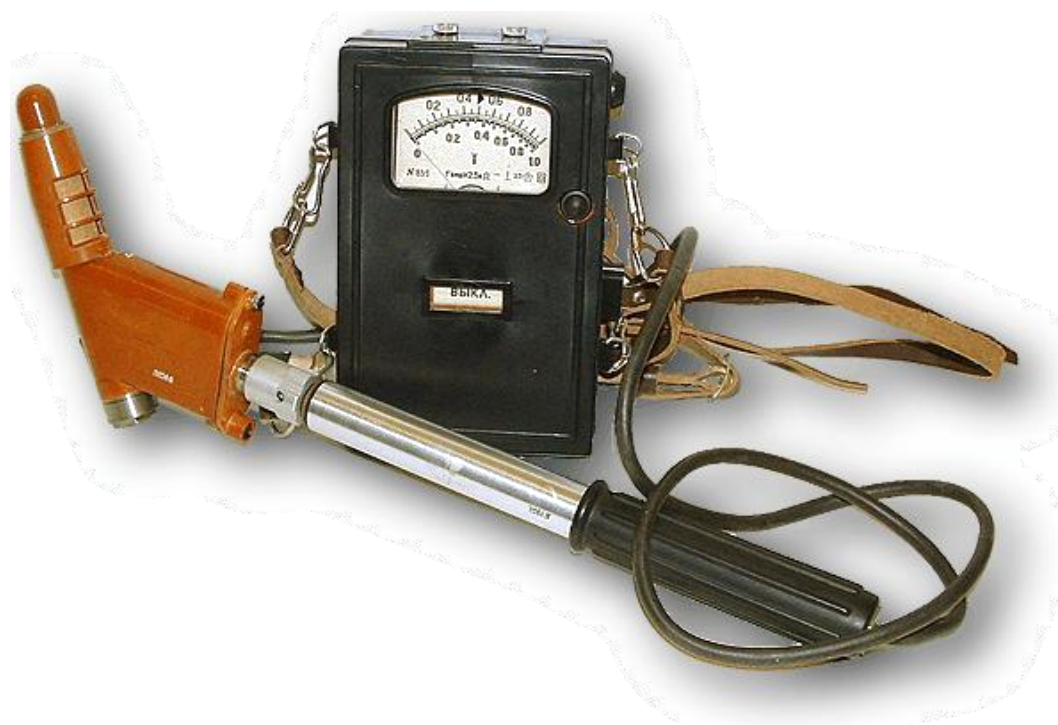


Рисунок 1.13 — Дозиметр КДГ–1

Електричні імпульси від блоку детектування, швидкість проходження яких пропорційна величині зовнішнього випромінювання, надходять по кабелю на вимірювальний пульт, де вони нормалізуються по амплітуді і реєструються вимірювачем швидкості рахунку.

Напруга на інтегруючому конденсаторі, пропорційна середній частоті надходження вхідних імпульсів, вимірюється вольтметром з великим вхідним опором. Відлік проводиться по стрілочному приладу, шкала якого відградуєвана у відповідних одиницях виміру.

Дозиметр ДРГ–01–Т призначений для вимірювання потужності експозиційної дози на робочих місцях, на території підприємств, що використовують радіоактивні речовини та інші джерела іонізуючих випромінювань, в санітарно–захисній зоні та зоні спостереження. Крім того, дозиметр може бути використаний для контролю ефективності біологічного захисту, радіаційних упаковок і радіоактивних відходів, а також виміру потужності експозиційної дози в період виникнення, протікання і ліквідації наслідків аварійних ситуацій.

Вимірювання потужності експозиційної дози здійснюється в двох режимах роботи:

- в режимі "ПОШУК"; забезпечує вимірювання потужності експозиційної дози в діапазоні від 0,10 мР / год. до 99,99 Р / год.
- в режимі "ВИМІР" забезпечує вимірювання потужності експозиційної дози в діапазоні від 0,010 мР / год. до 9,999 Р / год.

Як детектори випромінювання використані чотири газорозрядних лічильника СБМ–20 і два лічильника СІ34Г (СІ40Г) з коригуючими свинцевими фільтрами для вирівнювання енергетичної залежності чутливості.

Для вимірювання потужності дози або щільності потоку бета-випромінювання зазвичай використовують ті ж прилади, що і для вимірювання фотонного випромінювання, але відградувані відповідними бета-випромінювачами. Найбільш широко для цих цілей застосовують прилади з газорозрядними лічильниками. У змішаних полях випромінювання внесок бета-випромінювання визначається різницею між показаннями приладу при впливі на датчик всіх видів випромінювання і його показанням при повному екрануванні датчика від бета-випромінювання.

Для вимірювання потужності еквівалентної дози нейтронів використовують як стаціонарні, так і переносні радіометри зі спеціальними датчиками. Як правило, при нормальному режимі роботи реакторної установки в ряді випадків досить встановити співвідношення між дозою нейтронів і дозою, створюваної гамма-випромінюванням в різних приміщеннях, а потім обмежитися тільки контролем рівнів гамма-випромінювання.

Вимірювач потужності еквівалентної дози нейтронів КДН-2 призначений для вимірювання потужності еквівалентної дози нейтронів при проведенні дозиметричного контролю. До складу приладу входять – пульт вимірювальний, блок детектування БДМН-01, кабель довжиною 1,5 метри. Діапазон вимірювання – від 0,05 до 5000 мкбер / с (0,5 нЗв ... 50 мкЗв).

Принцип дії вимірювача заснований на вимірюванні середньої швидкості підрахунку імпульсів, що надходять з блоку детектування при опроміненні детектора нейтронами. Електричні імпульси від блоку детектування, швидкість проходження яких пропорційна величині зовнішнього випромінювання, надходять по кабелю на вимірювальний пульт, де вони нормуються по амплітуді і реєструються вимірювачем швидкості рахунку. Відлік проводиться по стрілочному приладу, шкала якого відградувана у відповідних одиницях вимірювання.

Конструктивно вимірник виконаний у вигляді вимірювального пульта і виносних блоків детектування. В якості детектора в блоці детектування використовується детектор теплових нейтронів БДМН-01, оточений сповільнювачем з поліетилену.

Реєстрація сцинтиляцій, що відбуваються в детекторі, при опроміненні його нейтронами, здійснюється фотопомножувачем.

Поверхні при забрудненні їх радіоактивними речовинами стають джерелами зовнішнього іонізуючого випромінювання, а контакт з ними призводить до забруднення працюючих. У зв'язку з цим повинен проводитися систематичний контроль за рівнем забруднення поверхонь.

При проведенні контролю зручно розглядати два види забруднення поверхонь: нефіксоване (знімається) і фіксоване (не знімається).

Нефіксована забрудненість є джерелом забруднення повітря, води та інших предметів; поверхні з фіксованим забрудненням є джерелом тільки зовнішнього випромінювання.

З метою контролю радіоактивного забруднення робочих поверхонь плани всіх таких поверхонь наносять на спеціальні картограми. На картограмах

вказуються контрольні точки. Кожна точка періодично за графіком перевіряється на забруднення.

Вимірювання поверхонь слід починати з вимірювання гамма-фону. При наявності останнього слід переконатися, що він створюється саме досліджуваною поверхнею, а не відбитим або розсіяним випромінюванням. Для цього користуються щілинним детектором. Потім визначається нефіксоване забруднення поверхні методом мазків. Метод дозволяє визначити лише порядок величини забруднення, а не його точне значення.

Радіаційний контроль за нерозповсюдженням радіоактивних забруднень включає в себе контроль стаціонарними і переносними приладами, а також контроль забрудненості поверхонь методом мазків.

Наведемо приклад стаціонарного приладу.

Багатоканальна установка для контролю і сигналізації про забруднення одягу і ділянок тіла людини бета-активними речовинами РЗБ-04-04 (рис. 1.14) призначена для сигналізації перевищення порогового рівня забрудненості бета-активними радіонуклідами основного спецодягу (на виході з гермооб'єму, на входах в гардероби спецодягу) або шкірних покривів персоналу (на виході з душових в зону вільного режиму і в машзалі).

Установка оснащена 12-16 блоками детектування бета-частинок.

Компенсація фону до 0,4 мкР / с здійснюється автоматично. Час вимірювання фіксований і не перевищує 4 с. Є плавне регулювання порога спрацьовування сигналізації, який встановлюється по зразковим джерелам бета-випромінювання ( $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ) з площею активної поверхні до 160 см<sup>2</sup>.

Установка виконана у вигляді двох стійок і підстави з блоками детектування і блоку обробки інформації, змонтованого в типовому кожусі.

Установка забезпечує примусовий контроль забрудненості, а також світлову і звукову сигналізацію про перевищення заданого порогу.



Рисунок 1.14 — Багатоканальна установка РЗБ-04-04

**?** Питання для самоконтролю:

1. Основні складові частини дозиметричного приладу.
2. Для чого призначений дозиметр КДГ-1?
3. Принцип дії дозиметра КДГ-1.
4. Призначення дозиметру ДРГ-01-Т.
5. Які детектори застосовуються у дозиметрі ДРГ-01-Т?
6. Який прилад застосовують для вимірювання потужності еквівалентної дози нейтронного випромінювання?
7. Яка установка застосовується для контролю забруднення спецодягу?

## 2 ВПЛИВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОРГАНІЗМ

### Біологічна дія іонізуючого випромінювання

Під біологічною дією ІВ розуміють різноманітні реакції, що виникають в біологічному об'єкті, що опромінюється, починаючи від первинних процесів впливу енергії випромінювання до ефектів, що проявляються через тривалий час після дії ІВ.

Для іонізації більшості елементів, що входять до складу організму, необхідна відповідна кількість енергії – 10...15 еВ – потенціал іонізації. Оскільки частки і фотони ІВ мають енергію від десятків до мільйонів, а іноді мільярдів еВ, що набагато перевищує енергію внутрішньо- і міжмолекулярних зв'язків о молекул і речовин організму, то вражаючому впливу ІВ схильне все живе.

Якщо говорити спрощено, біологічна дія ІВ обумовлена їх здатністю розривати хімічні зв'язки у молекулах речовин і збуджувати тривалі хімічні реакції, що чужі організму. Руйнуються молекули білків, ДНК, ферментів тощо. Вода розкладається на іони  $H^+$  і  $OH^-$ . Утворюється перекис водню  $H_2O_2$  – активний окислювач. У хімічні реакції залучаються молекули, на які безпосередньо не діяло випромінювання. Утворюються токсини, пригнічується діяльність систем організму.

Розрізняють зовнішнє і внутрішнє опромінення. При зовнішньому опроміненні джерело ІВ розташовується поза організмом, а при внутрішньому (інкорпорованому) воно здійснюється радіонуклідами, що потрапили в організм через дихальну систему, шлунково-кишковий тракт або через шкіру (пошкоджену чи ні).

Біологічна дія ІВ в значній мірі залежить від його виду і енергії і в основному визначається лінійною передачею енергії (ЛПЕ) – енергією, яка втрачається частинкою на одиниці довжини її пробігу в речовині середовища. Залежно від значення ЛПЕ всі ІВ ділять на рідкоіонізуючі (ЛПЕ менше 10 кеВ/мкм) і щільноіонізуючі (ЛПЕ більше 10 кеВ/мкм). Вплив різних видів випромінювання в рівних поглинених дозах призводить до різних за величиною ефектів. Це враховано у понятті еквівалентної дози (см. п. 1.2).

На якому б рівні – тканинному, органному, системному або на рівні організму не розглядалася біологічна дія ІВ, її ефект завжди визначається дією на рівні клітини. Детальне вивчення реакцій, ініційованих в клітці випромінювання, становить предмет фундаментальних досліджень радіобіології.

Радіочутливість тканини пропорційна її проліферативної активності (швидкості ділення клітин) та обернено пропорційна ступеню диференційованості складових її клітин. Тому найбільш радіочутливими є органи і системи з активним діленням клітин – система кровотворення, слизова оболонка кишечника, статеві органи. Масова загибель клітин кісткового мозку, яка відбувається при загальному опроміненні організму, призводить до

несумісного з життям ураження системи кровотворення. Тому кістковий мозок відносять до основних критичних органів.

Радіаційні біологічні ефекти опромінювання можна поділити на стохастичні і детерміновані (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Біологічні ефекти опромінювання

Стохастичні ефекти	Канцерогенні	Лейкози
		Злоякісні новоутворення
	Зниження імунітету	
	Генетичні наслідки	
Детерміновані ефекти	Гостра променева хвороба	
	Хронічна променева хвороба	
	Катаракта	
	Локальні променеві ушкодження	

Інший розподіл – на соматичні і генетичні наслідки опромінювання. Перші стосуються безпосередньо людини, що зазнала опромінювання, другі – потомства.

**Стохастичні** (імовірнісні) ефекти, такі як злоякісні новоутворення, генетичні порушення, можуть виникати при будь-яких дозах опромінення. Зі збільшенням дози підвищується не важкість цих ефектів, а ймовірність (ризик) їх появи. Зараз прийнята гіпотеза про лінійну безпорогову залежність імовірності віддалених наслідків від дози опромінення.

Основними стохастичними ефектами є канцерогенні і генетичні. Оскільки ці ефекти мають імовірнісний характер і тривалий латентний (прихований) період, вимірюваний роками і десятками років після опромінення, вони важко піддаються виявленню. До канцерогенних ефектів належать ураження крові, кровотворних органів, новоутворення та пухлини.

Генетичні ефекти – вроджені фізичні і психічні каліцтва і ряд інших важких захворювань – виникають в результаті мутацій і інших порушень в статевих клітинних структурах, що відають спадковістю. Вихід обох ефектів мало залежить від потужності дози, а визначається сумарною накопиченою дозою, тобто він буде вище навіть в місцевостях з природним підвищеним радіаційним фоном. Виявлення і тим більше прогноз появи стохастичного ефекту у окремої людини практично непередбачуваний.

**Детерміновані** ефекти виникають коли число клітин, які загинули в результаті опромінення, які втратили здатність відтворення або нормального функціонування, досягає критичного значення, при якому помітно порушуються функції уражених органів.

Ці ефекти проявляються лише при інтенсивному одноразовому або багаторазовому опроміненні, що перевищує певний поріг. При цьому виникають незлоякісні локальні пошкодження шкіри – променевий опік (дерматоз), катаракта очей, пошкодження статевих клітин (короткочасна або постійна стерилізація) тощо. Найнебезпечніший детермінований ефект –

променева хвороба, гостра або хронічна. Важкість детермінованих ефектів зростає із збільшенням дози. Час появи максимального ефекту так само залежить від дози: після більш високих доз він настає раніше.

### **?** Питання для самоконтролю:

1. Чим обумовлена біологічна дія ІВ?
2. Від чого залежить біологічна дія ІВ?
3. Дайте визначення стохастичним ефектам дії ІВ.
4. Які існують стохастичні ефекти дії ІВ?
5. Від чого залежить імовірність і тяжкість стохастичних ефектів?
6. Дайте визначення соматичним і генетичним наслідкам дії ІВ.
7. Опишіть основні соматичні стохастичні ефекти.
8. Які канцерогенні захворювання найбільш імовірні при дії ІВ?

### **Детерміновані ефекти Променева хвороба**

**Гостра променева хвороба (ГПХ)** розвивається при одноразовому, повторному або тривалому (від кількох годин до 1–3 діб) зовнішньому іонізуючому опроміненні всього тіла або більшої частини його в дозі, яка перевищує 1 грей (100 рад).

Це захворювання характеризується періодичністю перебігу і полісиндромністю клінічних проявів, серед яких головними є симптоми ураження системи кровотворення, кишечника, серцево–судинної і нервової систем.

При вивченні дії на організм людини іонізуючого випромінювання були виявлені такі особливості:

- висока руйнівна ефективність поглинутої енергії іонізуючого випромінювання, навіть дуже мала його кількість може спричинити глибокі біологічні зміни в організмі;
- присутність прихованого періоду негативних змін в організмі, він може бути досить довгим при опроміненнях у малих дозах;
- малі дози можуть підсумовуватися чи накопичуватися;
- випромінювання може впливати не тільки на даний живий організм, а й на його нащадків (генетичний ефект);
- різні органи живого організму мають певну чутливість до опромінення. Найбільш чутливими є: кришталик ока, червоний кістковий мозок, щитовидна залоза, внутрішні (особливо кровотворні) органи, молочні залози, статеві органи;
- різні організми мають істотні відмінні особливості реакції на малі дози опромінення, при високих дозах відмінності нівелюються;



– ефект опромінення залежить від частоти впливу іонізуючого випромінювання. Одноразове опромінення у великій дозі спричиняє більш важкі наслідки, ніж розподілене у часі.

При одноразовому опроміненні всього тіла людини можливі такі біологічні порушення в залежності від сумарної поглинутої дози випромінювання:

- до 0,25 Гр (25 рад) – видимих порушень немає;
- 0,25 ... 0,5 Гр (25 ... 50 рад) – можливі зміни в складі крові;
- 0,5... 1,0 Гр (50... 100 рад) – зміни в складі крові, нормальний стан працездатності порушується;
- 1,0... 2,0 Гр (100... 200 рад) – порушується нормальний стан, можлива втрата працездатності;
- 2,0... 4,0 Гр (200... 400 рад) – втрата працездатності, можливі смертельні наслідки;
- 4,0... 5,0 Гр (400 ... 500 рад) – смертельні наслідки складають 50% від загальної кількості потерпілих;
- 6 Гр і більше (понад 600 рад) – смертельні випадки досягають 100% загальної кількості потерпілих;
- 10... 50 Гр (1000... 5000 рад) – опромінена людина помирає через 1–2 тижні від крововиливу в шлунково–кишковий тракт.

Доза 60 Гр (6000 рад) призводить до того, що смерть, як правило, настає протягом декількох годин або діб. Якщо доза опромінення перевищує 120 Гр, людина може загинути під час опромінення ("смерть під променем").

Особливості клінічних проявів і ступінь тяжкості ГПХ визначаються багатьма факторами: сумарною дозою опромінення, потужністю, видом випромінювання, рівномірністю опромінення тіла та індивідуальними особливостями організму [18].

Виділяють 5 клінічних форм ОЛБ в залежності від дози опромінення:

- 1) кістковомозкова (1–10 Зв);
- 2) кишкова (10–20 Зв);
- 3) токсемічна (судинна) (20–80 Зв);
- 4) церебральна (80–120 Зв);
- 5) смерть під променем (більше 120 Зв).

Доза опромінення в 1–10 Зв спричиняє ураження кровотворних тканин, тому ця форма названа кістковомозковою.

**кістковомозкова форма** ГПХ (КМ ГПХ) – єдина форма, що піддається лікуванню. Вона має періоди і ступеня тяжкості. Ступеня тяжкості КМ ГПХ (в залежності від дози опромінення):

- 1) легкий (1–2 Зв);
- 2) середньотяжкий (2–4 Зв);
- 3) важкий (4–6 Зв);
- 4) вкрай важкий (більше 6 Зв).

Періоди (фази) КМ ГПХ:

- 1) початковий (первинної реакції) ;

- 2) уявного благополуччя (латентний) ;
- 3) розпалу ;
- 4) виходів (відновлення);
- 5) віддалених наслідків.

Початковий період (період первинної реакції) КМ ГПХ починається з моменту дії радіації і триває від 1 до 5 днів, тривалість залежить від дози і приблизно вираховується за формулою:

$$n \text{ діб} = \text{ступінь тяжкості} + (1)$$

Основний клінічний прояв – інтоксикація. Виділяють 5 опорних симптомів початкового періоду (табл. 2.2), що є клінічними критеріями визначення ступеня тяжкості (так як вони корелюють з дозою).

Таблиця 2.2 – Симптоми початкового періоду КМ ГПХ

Симптом	I ступінь	II ступінь	III ступінь	IV ступінь
Блювота	Нема або через 3 і більше год. одноразово	ч/з 1,5–3 год. 2 і більше разів	ч/з 0,5–1,5 год. багаторазово	ч/з < 0,5 год. неприборкана
Головний біль	Тимчасовий помірний	Постійний помірний	Тимчасовий сильний	Постійний сильний, сплутаність свідомості
Слабкість	Нема	нестійка хода	Потребують підтримки	носилкові
Температура	Нормальна	Субфебрильна (ближче до 37 °С)	Субфебрильна (ближче до 38 °С)	Вище 38 °С
Гіперемія шкіри	Рум'янець щік	«Засмага в травневий день»	Явна гіперемія	інтенсивна гіперемія

II фаза – фаза уявного клінічного благополуччя, так звана прихована, або латентна, фаза, відзначається після зникнення ознак первинної реакції через 3–4 дня після опромінення і триває протягом 14–32 днів. Самопочуття хворих в цьому періоді поліпшується, зберігається лише деяка лабільність частоти пульсу і рівня артеріального тиску. Якщо доза опромінення перевищує 10 Зв, перша фаза гострої променевої хвороби безпосередньо переходить в третю.

З 12–17-го дня у хворих, які зазнали опромінення в дозі, що перевищує 3 Зв, виявляється і прогресує облісіння. У ці терміни виникають і інші шкірні ураження, часом є прогностично несприятливими і свідчать про високу дозу опромінення.

У III фазі, що протікає з вираженою клінічною симптоматикою, терміни настання і ступінь інтенсивності окремих клінічних синдромів залежать від дози іонізуючого випромінювання; тривалість фази коливається від 7 до 20 днів. Домінуючим в цій фазі хвороби є ураження системи крові. Поряд з цим мають місце пригнічення імунітету, геморагічний синдром, розвиток інфекцій та аутоінтоксикації.

До кінця прихованої фази захворювання стан хворих дуже погіршується, нагадуючи собою септичний стан з характерними симптомами: наростаюча загальна слабкість, частий пульс, лихоманка, зниження артеріального тиску. Виражені набряклість і кровоточивість ясен. Крім того, уражаються слизові оболонки порожнини рота і шлунково–кишкового тракту, що проявляється в появі великої кількості виразок некротичного характеру.

При ГПХ легкого (I) ступеня інфекційні ускладнення виникають рідко. Кровоточивості не спостерігається. Відновлення повільне, але повне.

При II ступені характерні інфекційні ускладнення, зміни слизової оболонки рота і глотки, виявляються незначні ознаки кровоточивості – петехії в шкірі. Можливі летальні випадки, особливо при запізнілому і неадекватному лікуванні.

У розпалі хвороби III ступеню відзначаються виражена лихоманка, ураження слизової оболонки рота і носоглотки, інфекційні ускладнення різної етіології (бактеріальної, вірусної, грибової) і локалізації (легені, кишечник тощо), помірна кровоточивість. Зростає частота летальних випадків (в перші 4 – 6 тижнів).

Зі збільшенням дози (IV ступінь) усі прояви стають все більш важкими, скорочується тривалість прихованої фази, набувають першорядного значення ураження інших органів (кишечника, шкіри, головного мозку) і загальна інтоксикація. Кровотечі з ясен, носу, внутрішні. Летальні результати практично неминучі.

На фазі виходів з відновленням функції кісткового мозку відбувається нормалізація температури тіла, поліпшення самопочуття, зникнення ознак кровоточивості. Повільно нормалізується функція нервової системи. Протягом тривалого часу зберігається астенія, дратівливість. У деяких випадках спостерігаються вегето–судинні пароксизми, діенцефальний синдром, вестибулярні розлади. Період одужання у більшості хворих з кістково–мозковою формою ГПХ I–II ступеня завершується до 3–4 міс. Тривалішого лікування потребують пацієнти з важкими променевими опіками й ознаками ГПХ III–IV ступеня.

До періоду віддалених наслідків відносять залишкові явища або соматичні і генетичні зміни. Протягом багатьох років виявляються неврологічні синдроми, розвиток катаракти, виникнення лейкозів, новоутворень. Скорочується тривалість і погіршується якість життя. Генетичні наслідки, звичайно, не виявляються у самого постраждалого, а у його нащадків. Вони проявляються підвищенням кількості новонароджених з вадами розвитку, збільшенням дитячої смертності, кількості викиднів і мертвонароджених. Кількість соматичних і генетичних наслідків збільшується в міру зростання дози радіаційного ураження.

**ишкова форма** ГПХ розвивається після опромінення в дозі 10–20 Зв і проявляється раннім порушенням функції шлунково–кишкового тракту. Реакція на опромінення виникає в перші хвилини, перебігає вкрай тяжко, триває 4–5 днів. З самого початку переважають безперервна блювота, пронос, болі в животі. Турбують прогресуюча загальна слабкість, головний біль, біль у

м'язах і суглобах, лихоманка. Об'єктивно: гіподинамія, гіперемія шкіри обличчя і слизових, істеричність склер, сухий обкладений язик, тахікардія, артеріальна гіпотензія, болючість при глибокій пальпації живота. Латентний період практично відсутній і відразу переходить в період розпалу. З'являється виразковий стоматит. Зростає загальна інтоксикація внаслідок загибелі клітин кишечника. Лихоманка і ентерит ведуть до зневоднення організму. Виражена кровоточивість. Психомоторні розлади змінюються загальмованістю, сопором, комою. Летальний наслідок звичайно припадає на 8–16 добу [19].

**Судинно–токсемічна** форма ГПХ розвивається після опромінення в дозі 20–80 Зв. Реакція на опромінення настає в перші 10–20 хвилин: запаморочення, адинамія, можлива втрата свідомості. З'являється безперервна блювота, пронос, біль у суглобах, підвищення температури. Надалі розвиваються тяжкі порушення з різко вираженою тахікардією, артеріальною гіпотонією (низьким тиском) та колаптоїдним станом. Рано виявляється автоінтоксикація внаслідок глибоких порушень обмінних процесів і розпаду тканин кишечника. Порушується функція нирок, характерна виражена первинна еритема. При явищах тяжкої токсемії, енцефалопатії, гострої серцево–судинної недостатності летальний наслідок настає на 4–7 добу.

**Церебральна форма** ГПХ. В момент опромінення – колапс з втратою свідомості. Після повернення до свідомості – виснажлива блювота та діарея. Надалі – апатія, зміна свідомості, набряк головного мозку, прогресуюча гіпотонія, анурія. Смерть настає на 1–3 добу від розладу дихання, серцево–судинної діяльності.

Ураження ІВ в дозі понад 120 Зв викликає смерть в момент опромінення – так звану "**смерть під променем**". У її патогенезі провідне місце належить ураженню клітин головного мозку і мозкових судин з розвитком важких порушень життєвих функцій.

**Лікування ГПХ.** У фазі первинної реакції при нудоті та блюванні застосовують протиблювотні засоби (метоклопрамиду гідрохлорид, атропіну оксид, хлорпромазин). У тяжких випадках при невпинному блюванні та пов'язаній з ним гіпохлоремії потрібне внутрішньовенне введення розчину натрію хлориду, повторні ін'єкції інших протиблювотних засобів, а при зниженні артеріального тиску— введення реополіглюкіну або гемодезу в поєднанні з мезатоном або норадреналіном.

При розвитку серцевої недостатності застосовують корглікон, строфантин. У прихований період при ГПХ І–ІІ ступеня тяжкості хворий повинен знаходитися в стаціонарі. У період розпалу хвороби необхідні постільний режим та максимальний захист від екзогенної інфекції. Проводять антибактеріальну терапію до розвитку агранулоцитозу, а при його виникненні встановлюють суворий асептичний режим.

Для профілактики інфекційних ускладнень призначають антибактеріальні препарати (оксацилін, ампіцилін, бісептол, ністатин). Виникнення інфекційних ускладнень, які супроводжуються гарячкою, утворення вогнищ запалення вимагає призначення максимальних терапевтичних доз антибіотиків широкого

спектра дії (напівсинтетичні пеніциліни, цефалоспорини, аміноглікозиди). Для профілактики грибкової інфекції призначають протигрибкові препарати. При тяжких стафілококових ураженнях порожнини рота і глотки, пневмонії, септицемії поряд з антибіотиками показане застосування антистафілокової плазми.

При ГПХ I–III ступеня призначають протівірусні препарати. При геморагічному синдромі застосовують препарати, що поповнюють дефіцит тромбоцитів, покращують коагуляційні властивості крові (дицинон, амінокапронова кислота, амбен), а також засоби місцевої дії (гемостатична губка, сухий тромбін, фібринна плівка). При розвитку анемії показані трансфузії крові та еритроцитарної маси. Для боротьби з токсемією використовують в/в введення розчинів хлориду натрію, глюкози, гемодезу, поліглюкіну в поєднанні з діуретиками (фуросемідом, манітолом), особливо при загрозі набряку головного мозку. Успішно застосовують плазмаферез. При тяжкому ураженні ШКТ призначають парентеральне харчування з використанням білкових гідролізатів жирових емульсій. У перші дні після опромінення вводять антипротеолітичні препарати (трасилол, контрикал). Для нормалізації регіонарної гемодинаміки, поліпшення мікроциркуляції призначають трентал, венорутон із солкосерилом. Застосовують гормональні мазі та мазі на основі метилурацилу. При появі гіперемії та набряку рекомендують холод, примочки з розчином риванолу.

**Хронічна променева хвороба (ХПХ).** Досвід, отриманий сучасною радіаційною медициною, дозволяє констатувати, що *хронічна променева хвороба* (ХПХ) спостерігається у людей, які повторно і систематично протягом тривалого часу піддавалися дії іонізуючому випромінюванню в порівняно малих дозах, що перевищували гранично допустимі. При тривалому опроміненні відносно малими дозами (1–3 мЗв на добу) може розвинути хронічна променева хвороба (ХПХ), якщо сумарна доза опромінення сягне 0,7–1 Зв. Формування і прояви клінічної картини можуть тривати 1–3 роки. Клінічна картина хвороби залежить від величини поглиненої дози і способу опромінення (загальне, місцеве, зовнішнє, внутрішнє). Вона може бути легкого, середнього, тяжкого і вкрай тяжкого ступеня захворювання.

Хронічна променева хвороба – це складний клінічний синдром.

Характерними ознаками ХПХ є:

- тривалість і хвилеподібність перебігу;
- наявність у клінічній картині як ознак ураження організму від дії опромінення, так і проявів відбудовних і пристосувальних реакцій.

Відповідно до існуючої класифікації у розвитку хронічної променевої хвороби виділяють три стадії:

- 1 стадія — період формування, або власне хронічна променева хвороба;
- 2 стадія — період відновлення;
- 3 стадія — період наслідків променевої хвороби.

У залежності від шляху надходження можливий розвиток хронічної променевої хвороби:

— викликаної впливом загального зовнішнього випромінювання або радіоактивних ізотопів з рівномірним розподілом їх в організмі ( $^4\text{H}$ ,  $^{37}\text{Cs}$ ,  $^{24}\text{Na}$  та ін.);

— викликаної впливом ізотопів із вибіркоvim депонуванням ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{210}\text{Po}$  та ін.) або місцевим зовнішнім опроміненням.

Хронічна променева хвороба, викликана загальним опроміненням, зустрічається в осіб, які зазнали впливу іонізуючої радіації протягом трьох – п'яти років і отримали одноразову та сумарні дози, що перевищують допустимі.

Це захворювання може бути зумовлене й постійним впливом радіоактивних речовин, які потрапивши в організм людини через дихальні шляхи, ушкоджену шкіру або шлунково–кишковий тракт, відкладаються в тканинах на довгий час залежно від тривалості періодів їх напіврозпаду й виведення з організму. Це захворювання може виникати також в результаті змішаного впливу іонізуючого випромінювання – зовнішнього й внутрішнього.

Розвиток клінічного синдрому захворювання можна спостерігати у осіб, пов'язаних з певними виробничими умовами: у лікарів–рентгенологів, радіологів, біологів; техніків, фізиків, що працюють із радіоактивними ізотопами, дозиметристів, робітників, що займаються дефектогаммаскопією, а також у фахівців інших професій, що не дотримуються встановлених заходів профілактики й захисту при роботі з радіоактивними речовинами й іншими джерелами іонізуючих випромінювань, тобто при порушенні санітарно–гігієнічних правил використання радіоактивних речовин і утилізації їхніх відходів.

Тривале надходження радіоактивних речовин в організм або систематична робота в умовах зовнішнього опромінення, що перевищує гранично допустимі дози, а також поєднання того й іншого можуть призвести до розвитку порушень у здоров'ї. ХПХ по суті є професійним захворюванням, але може з'явитися і як ускладнення в результаті лікувального застосування іонізуючого випромінювання. Залежно від розвитку й важкості захворювання одні автори розрізняють три, інші – чотири ступеня ХПХ. Кожен з них являє собою певну стадію в розвитку патологічного процесу, однак чіткий поділ захворювання за ступенями є умовним.

ХПХ являє собою загальне захворювання організму, при якому значно знижуються його імунобіологічні сили. У клінічній картині цього захворювання переважають зміни з боку нервової, кровотворної, серцево–судинної систем, шлунково–кишкового тракту, печінки, нирок, порушення процесів обміну й ендокринних функцій.

Інші ознаки мають місце при діагностиці променевої хвороби, зумовленою дією радіоактивних ізотопів із чітко вираженою органотропністю й при місцевому зовнішньому опроміненні. При цьому переважає пошкоджуюча дія, що носить місцевий характер і переважає над загальними реакціями. Таким чином, клінічний перебіг ХПХ залежить від індивідуальних особливостей організму, хімічних властивостей шкідливого фактора, його дози й шляхів впливу. Тому при розпізнаванні ХПХ необхідно враховувати деякі

закономірності біологічної дії різних випромінювань і характер розподілу в організмі ізотопів, що потрапили в нього.

При цьому враховують дію рівномірного загального опромінення на організм або накопичення в організмі ізотопів з вибіркоvim розподілом або тільки місцевим зовнішнім опроміненням. Діагностичне значення мають окремі ознаки з боку основних органів, які вражаються певним видом випромінювань.

Залежно від причин виникнення розрізняють:

- професійну ХПХ;
- після перенесеної гострої променевої хвороби (ГПХ);
- після випадіння радіоактивного сліду;
- після променевої терапії.

Захворювання характеризується повільним розвитком; провідними симптомами є зміни в нервовій, серцево–судинній і ендокринній системах, кровотворному апараті, шлунково–кишковому тракті, печінці, нирках; виникає порушення обмінних процесів.

Власне хронічна променева хвороба не представляє безпосередньої небезпеки для життя хворих, її симптоми не мають схильності до прогресування, разом з тим повного одужання, зазвичай, не наступає. Хронічна променева хвороба не є продовженням гострої, хоча залишкові явища гострої форми і нагадують почасти форму хронічну. При хронічній променевої хвороби дуже часто виникають пухлини – гемобластози і рак. При добре поставленій диспансеризації, ретельному огляді онкологічному 1 раз на рік і дослідженні крові 2 рази на рік вдається попередити розвиток запущених форм раку, і тривалість життя таких хворих наближається до нормальної. Поряд з гострою та хронічною променевою хворобою можна виділити підгостру форму, що виникає в результаті багаторазових повторних опромінь в середніх дозах протягом декількох місяців, коли сумарна доза за порівняно короткий термін досягає більше 5–6 Зв. По клінічній картині це захворювання нагадує гостру променево хворобу. Лікування підгострій форми не розроблено, тому що подібні випадки не зустрічаються в даний час. Основну роль відіграють, мабуть, замісна терапія компонентами крові при важкій аплазії і антибактеріальна терапія при інфекційних хворобах.

До віддалених наслідків перенесеної гострої і хронічної променевої хвороби, які можуть проявлятися і через 10–20 років, слід віднести: злоякісні пухлини, захворювання крові (лейкози), скорочення тривалості життя (100 рад забирає 1 рік життя), прискорене старіння, порушення функцій нервової системи, схильність до психічних захворювань, захворювань, пов'язаних зі змінами генетичного апарату (самоаборти, мертвонародження, лейкемії і злоякісні пухлини у дітей, природжені вродливості, патологія органів зору).

До генетичних наслідків опромінення слід віднести і порушення репродуктивної функції. Так, опромінення дозою 1–2 Зв спричинює тимчасову безплідність, а 4 Зв – постійну, причому чоловіки більш чутливі до дії радіації.

**Вплив хронічної променевої хвороби на організм.** Джерело іонізуючих випромінювань діє на організм при зовнішньому або внутрішньому опромінюванні (попаданні всередину організму з їжею, палінням і т. ін.). Під

дією іонізуючих випромінювань в організмі людини відбувається іонізація молекул і атомів тканини, порушується хімічна структура сполук, утворюються сполуки, не властиві живій клітині, що в свою чергу призводить до її відмирання. Зміни фізичних і біологічних процесів в організмі залежно від дози опромінювання, тобто функції окремих органів і всього організму людини можуть відновлюватись повністю або вести до функціональних порушень організму і виникненню променевої хвороби.

Ураження може викликати гостру і хронічну форми променевої хвороби. Гостра форма хвороби виникає при дії великих доз опромінювання за короткий період часу, хронічна — розвивається в результаті тривалої дії малих доз при зовнішньому опромінюванні або при попаданні всередину організму під час приймання їжі, палінні, вдиханні невеликих кількостей радіоактивних речовин.

При патології, розрізняють три фази єдиного процесу і, якщо промені не безперервно діють далі, вони змінюють один одного. Для клініки при хронічному перебігу типові не загальні, а регіонарні дисфункції периферичної циркуляції крові в шкірних покривах і кінцівках, мозку. Зміни тягнуть за собою: біль голови; ломота в ногах і верхніх кінцівках; мерзлякуватість; занепад сил; неврології; дистрофія серцевого м'яза; збій дихання; переднепритомний стан; спазми в грудині. Вплив 0,7 – 1,5 Зв, призводить до патологічних порушень в травному апараті. Сумарна доза опромінювання, що перевищує 1,5 – 4 Зв – знижує функцію вироблення секрету в ротовій порожнині, шлунку. Загальний рівень доз, в діапазоні 0,15 – 0,7 Зв, викликає зрушення в роботі нервової, ендокринної, серцево-судинної системи. При астеничному синдромі (1,5 – 4 Зв): в'ялість м'язових тканин; порушення координації; фізіологічна дисфункція тонуусу; пригнічення шкірних рефлексів; генералізовані реакції на несподіваний біль. При синдромі органічного ураження ( $\geq 4$  Зв): порушення кровопостачання; кровотечі; новоутворення; некроз. Люди, які отримали граничну дозу опромінювання і отримують періодично сумарну норму, зазнають деяких змін в структурі крові. Це проявляється: лейкопенією; тромбоцитопенією; ретикулоцитозом. Анемія – несприятливий симптом, який трапляється при прийнятті великих доз.

Період формування хронічної променевої хвороби проходить у вигляді послідовних фаз, які відображаються поняттям ступеня тяжкості. Розрізняють три (іноді чотири) ступеня тяжкості хронічної променевої хвороби.

**Перший ступінь тяжкості** хронічної променевої хвороби характеризується різноманітністю скарг, пов'язаних з функціональними порушеннями центральної нервової системи й внутрішніх органів.

При надходженні до організму радіоактивних речовин із тривалим періодом напіврозпаду, які повільно виводяться з організму, симптоми впливу на радіочутливі органи, за наявності депо радіоактивних речовин, можуть тривати протягом довгого часу. Необхідно враховувати, що формування клінічного синдрому ХПХ відбувається повільно (роки, рідше місяці).

Клінічна картина першого ступеня ХПХ складається з вегетативно-вісцеральних, головним чином вегетативно-судинних порушень, початкових астеничних проявів і помірних, нестійких змін клітинного складу периферичної



крові. У хворих порушується самопочуття, сон, вони скаржаться на загальну слабкість, підвищену стомлюваність, зниження працездатності, головний біль, погіршення апетиту. У окремих хворих порушується ритм сну (сонливість вдень, безсоння вночі). При обстеженні виявляються лабільність пульсу, підвищена гра вазомоторів, стійкий дермографізм, пітливість, лабільність АТ з коливаннями від понижених до помірно підвищених показників, а іноді є тенденція до стійкого його зниження. На ЕКГ проявляються ознаки порушення вегетативної іннервації серця, тахікардія, синусова аритмія, зміна вольтажу зубців.

Поряд із цим мають місце симптоми загальної збудливості, нервозності, посилені сухожильні й періостальні рефлекси, тремтіння вік і пальців витягнутих рук. Створюється враження деякого порушення функції щитовидної залози без видимого збільшення. Основний обмін нерідко підвищений. З'являються функціональні порушення з боку шлунково–кишкового тракту – диспепсичні явища, дискінезія кишечника й жовчних шляхів, в окремих хворих кислотність шлункового соку знижена або є ахілія, зазвичай функціонального характеру. У цьому періоді захворювання ахілія, як правило, компенсована; гастрогенні поноси зазвичай не спостерігаються, а частіше виникає спастичний стан кишечника. Явища вегетативно–судинної нестабільності й функціональні порушення внутрішніх органів у поєднанні із симптомами початкової астенизації організму призводять до розвитку так званого астено–вегетативного синдрому. Надалі астеничні явища можуть прогресувати, підсилюється головний біль, зростає загальна слабкість, знижується пам'ять, часом з'являються запаморочення й нудота.

При першому ступені важкості захворювання кровоточивість зазвичай відсутня, але мають місце ознаки підвищеної проникності й ламкості капілярів – позитивний симптом Кончаловського, симптом "щипка", позитивна проба Нестерова.

Зміни периферичної крові на початку бувають незначні й нестійкі, і надавати їм значення можна лише в порівнянні з показниками попередніх аналізів. У периферичній крові підвищується кількість ретикулоцитів, з'являється помірний лейкоцитоз із лімфоцитозом і зрушенням нейтрофілів вліво, може з'явитися помірна (до  $4-3,5 \times 10^9/\text{л}$ ), але нестійка лейкопенія з коливаннями числа лейкоцитів в межах норми. Поряд із цим зустрічають токсичну зернистість нейтрофілів і початкові дегенеративні зміни в них: пікноз ядра, фрагментація, цитоліз. Можуть з'явитися так звані гіперсегментовані форми нейтрофілів, помірна й нестійка тромбоцитопенія.

При дослідженні пунктату кісткового мозку виявляються ознаки подразнення червоного (ретикулоцитоз, підвищене вміст еритроцитів) і білого (збільшення кількості незрілих клітин мієлоїдного ряду) паростка кровотворення, а також збільшення вмісту плазматичних клітин. Можливі прояви ознак зниження функції білого паростку – зменшення кількості зрілих форм мієлоїдного ряду.

Залежно від характеру клінічних проявів розрізняють ХПХ із переважним ураженням кровотворної системи, нервової системи, ШКТ, серцево–судинної й ендокринної систем.

Після виведення хворого зі зони контакту з іонізуючою радіацією початкові симптоми захворювання звичайно зникають.

Лікування хронічної променевої хвороби може бути успішним при дотриманні двох умов:

- 1) припинення контакту із джерелом випромінювання;
- 2) усестороннє обстеження хворого для визначення характеру й ступеня важкості захворювання.

Так як при I ступені важкості порушення носять функціональний характер, органічні зміни відсутні, обстеження й лікування проводять у стаціонарі протягом місяця, потім протягом місяця в умовах будинку відпочинку. Корисна фізкультура й спорт. Всім хворим призначають лікувальне харчування: висококалорійне їжа, багата на білки, жири, вуглеводи й вітаміни, які легко засвоюються.

**Другий ступінь тяжкості** хронічної променевої хвороби характеризується подальшим розвитком астено–вегетативних порушень. Як і при першому ступені захворювання, велике значення для діагностики мають функціональні порушення, але в цей період уже виявляються окремі зміни в найбільш радіочутливих тканинах і структурах; поступово прогресує астенізація організму, підсилюються головний біль, запаморочення.

В окремих хворих на тлі вираженої астенізації можлива поява початкових симптомів органічних уражень центральної нервової системи. Змінюються сухожильні рефлексії, як убік посилення, так і убік послаблення, з'являються анізорефлексія сухожильних, періостальних і черевних рефлексів, легка атаксія при пробі Ромберга, легкі оптико–вестибулярні розлади, горизонтальний ністагм. Іноді зміни нервової системи проявляються вираженими судинними розладами по типу своєрідних вазопатій з періодичними кризами. Іноді стає можливим виявити так званий діенцефальний синдром, що характеризується порушеннями нервово–судинної регуляції, нападами пароксизмальної тахікардії, що супроводжуються ознобом, холодними кінцівками, субфебрильною або субнормальною температурою, а також порушенням різних видів обміну речовин. Проявляються й ознаки порушення периферичних нервових утворень у вигляді соляриту з його симптоматикою, гангліонітів.

Виражені зміни можуть бути і з боку серцево–судинної системи: розширення меж серця, приглушення серцевих тонів, іноді систолічний шум на верхівці; на ЕКГ з'являються ознаки дистрофічних змін у міокарді – зниження вольтажу зубців Р і Т. У більшості хворих спостерігається стійке зниження АТ (переважно мінімального), розвивається серцево–судинна гіпотонія, тиск у скроневій і центральній артерії сітківки ока знижений. При капіляроскопії можна виявити картину атонії капілярів, уповільнення кровообігу. Кровообіг у ниркових судинах порушений – знижена величина клубочкової фільтрації й уповільнений нирковий кровообіг.

Особливо характерне ураження гемопоетичної системи. З боку кровотворного апарату спостерігається гіпопластичний стан кровотворення. Число лейкоцитів у периферичній крові знижується до  $2-3 \times 10^9/\text{л}$  і менше, причому лейкопенія носить стійкий характер і супроводжується абсолютної нейтропенією і лімфоцитопенією. При дослідженні пунктату кісткового мозку іноді можна виявити гіпопластичний стан.

З боку шлунково–кишкового тракту в результаті зниження секреції й кислотності шлункового вмісту й активності деяких травних ферментів, порушення моторики кишечника, можливі диспепсичні розлади.

В окремих хворих можуть з'явитися ознаки хронічного токсичного гепатиту, трофічні порушення шкіри і її придатків.

При біохімічних дослідженнях крові виявляються зміни різних показників, що вказують на порушення процесів обміну: білкового, у тому числі й нуклеопротейного, вуглеводного й холестеринного.

Іноді порушується функція ендокринних залоз. Зниження функції наднирників проявляється стійкою артеріальною гіпотонією, млявістю, адинамією, а іноді й появою бурої пігментації шкіри лица, коричневих плям на тулубі, інтенсивної пігментації навколо сосків. Дослідження сечі на вміст 17–кетостероїдів і 17–оксикортикостероїдів також вказують на зниження функції кори наднирників. У жінок іноді можливі виражені порушення менструального циклу.

Для ХПХ, викликаного нагромадженням радіоактивних речовин у кістковій тканині, характерний розвиток так званого остеоальгійного синдрому. Хворі скаржаться на стійкі болі в кістках, переважно в дистальних відділах кінцівок. Болі ці не стихають у стані спокою, а також від застосування тепла. Вони погано піддаються лікуванню.

Інфекційні захворювання й запальні процеси в осіб, що страждають на ХПХ, перебігають досить своєрідно. При цьому найчастіше відзначається ареактивність перебігу захворювання, наприклад, при гострому апендициті – відсутність або слабка виразність лейкоцитарної реакції.

Через наявність, як функціональних так і органічних змін, лікування повинне бути загальнозміцнюючим й замісним: 1–2 місяця в умовах стаціонару й 1 місяць амбулаторно. Використовують шлунковий сік, гормональні препарати, переливання цільної крові, лейкоцитарної або еритроцитарної маси, снодійні перед сном, а ранком – збудливі препарати (китайський лимонник, жень–шень, чай, кава, кофеїн і ін.). Через 3–4 місяця хворий вертається до праці, а в окремих випадках – інвалідність на 6 місяців для долікування.

**Третій ступінь тяжкості** хронічної променевої хвороби – характеризується більш важкими й незворотними змінами – втрата регенераторної здатності тканин, вираженою дистрофією органів і систем, різким пригніченням кровотворення. Сильно виражена кровоточивість (шкірні петехії, носові кровотечі, кровоточивість ясен і ін.). Зміни крові стійкі й більш виражені, різко пригнічений гранулоцитопоез; знижена стійкість еритроцитів. У червоній крові з'являються ретикулоцитопенія, гіпохромія й різкий анізоцитоз.

У кістковому мозку виявляються виражена затримка дозрівання мієлоїдних елементів і порушення еритропоезу за мегалобластичним типом.

Погіршення загального стану хворого прогресує, розвиваються різка слабкість, адинамія й стійка артеріальна гіпотонія. У картині захворювання з'являються важкі зміни з боку нервової системи, патологічна проникність капілярів і значне погіршення кровотворення. Розвивається токсична енцефалопатія або ураження нервової системи, яке протікає по типу демієлінізуючого енцефаломієлозу. Для таких хворих характерне прогресування процесу навіть після того, як припиняється вплив іонізуючого випромінювання. При несприятливому перебігу хвороби глибоке пригнічення кровотворення веде до різкого послаблення опірності організму. Різко виражені трофічні зміни шкіри, випадання волосся, ламкість нігтів. Можуть з'явитися дистрофічні зміни з боку ряду внутрішніх органів.

Завдяки проведенню профілактичних заходів важкі форми ХПХ практично малоймовірні. Летальний результат може бути викликаний або порушенням діяльності важливих для життя органів і систем, або розвитком сепсису. Труднощі диференціальної діагностики в цій стадії хвороби полягає в тому, що жоден із симптомів, що спостерігаються при цьому, не є чітко специфічним для променевої хвороби. Симптоми вегетативно–судинної лабільності, астеничні явища, помірна лейкопенія, артеріальна гіпотонія, зниження шлункової секреції – все це може бути зумовлено різними причинами, що не мають ніякого відношення до впливу іонізуючої радіації. Радіаційний вплив на організм можна достовірно встановити лише на основі сукупності клінічних і лабораторних даних з урахуванням наявності тривалого контакту з радіоактивними речовинами в дозах, що перевищують гранично допустимі. Варто враховувати індивідуальну чутливість організму до впливу іонізуючої радіації.

Лікування хворих із третім ступенем важкості ХПХ повинне проводитися в стаціонарі в повному обсязі за схемою лікування гострої променевої хвороби, з подальшим встановленням групи інвалідності.

**Четвертий ступінь тяжкості** хронічної променевої хвороби (термінальний період) виділяють не завжди. Він характеризується гіпоплазією або аплазією кісткового мозку, наростанням геморагічного синдрому, сепсисом. Хворий сильно виснажений. Нерідко з'являються пролежні, крововиливи, тривалі виразково–некротичні зміни слизової оболонки порожнини рота й травного тракту. При наростанні симптомів ураження нервової системи, органів кровотворення й септичних ускладнень настає летальний результат. Лікування – симптоматичне.

У результаті дії іонізуючого випромінювання на організм людини в тканинах можуть виникати складні фізичні, хімічні та біологічні процеси. При цьому порушується нормальне протікання біохімічних реакцій та обмін речовин в організмі.

В залежності від поглинутої дози випромінювання та індивідуальних особливостей організму викликані зміни можуть носити зворотний або незворотний характер. При незначних дозах опромінення уражені тканини

відновлюються. Тривалий вплив доз, які перевищують гранично допустимі межі, може викликати незворотні зміни в окремих органах або у всьому організмі й виразитися в хронічній формі променевої хвороби. Віддаленими наслідками променевого ураження можуть бути променеві катаракти, злоякісні пухлини.

Поставити діагноз хронічної променевої хвороби важко, особливо в початковій стадії, бо жоден із наявних симптомів не має специфічних рис. При постановці діагнозу ХПХ велике значення мають детальні відомості про умови роботи хворого й акт санітарно-гігієнічного обстеження, що підтверджує можливість впливу іонізуючої радіації на організм працюючих.

Професійний анамнез рекомендується збирати за наступним планом:

- загальний виробничий стаж і основні етапи трудової діяльності (врахувати роботу, пов'язану із впливом різних шкідливих факторів);
- спеціальність;
- стаж роботи із проникаючим випромінюванням;
- з якими джерелами випромінювання обстежуваний має справу (закриті або відкриті джерела або ті й інші);
- вид випромінювання;
- основні принципи будови апаратури, що використовується;
- інтенсивність і доза випромінювання на робочому місці (скільки часу за робочий день перебуває в зоні опромінення, піддається впливу прямого пучка чи розсіяного випромінювання, на якій відстані працює від джерела, які дані дозиметричних вимірювань);
- наявність і використання засобів захисту на робочому місці, їхня справність (ширма, витяжні шафи, дистанційний інструментарій і т.п.);
- наявність і використання засобів індивідуального захисту (костюми, респіратори, окуляри, фартухи, рукавички й т.д.);
- чи користується індивідуальним дозиметром;
- тривалість робочого дня;
- тривалість чергової відпустки й регулярність його використання;
- проходження попереднього і періодичного медичних оглядів і їхні результати;
- чи спостерігалися випадки ХПХ в інших співробітників даної установи або підприємства;
- наявність або відсутність контакту з хімічними токсичними речовинами (ртуть, бензол, свинець і ін.).

Велике значення мають тривалість роботи з радіоактивними речовинами, її характер, забруднення робочих приміщень і т.п.; біофізичні дослідження, кількісні визначення радіоактивних речовин у виділеннях хворого. При попаданні в організму радіоактивні речовини можуть виділятися із сечею, калом і іншими екскретамі.

Найчастіше обмежуються визначенням радіоактивних речовин у добових порціях сечі й калу, але в окремих осіб можна рекомендувати біофізичні дослідження слини, мокротиння, шлункового соку й дуоденального вмісту. При

певній клінічній симптоматиці позитивний результат біофізичних досліджень підтверджує діагноз ХПХ.

Враховуючи, що прояви при першому ступені ХПХ неспецифічні, необхідно проводити диференціальну діагностику з рядом інших захворювань. Симптоми вегетативно–судинної дисфункції, які часто спостерігаються при першому ступені ХПХ, так само, як і астеничний стан, можуть бути зумовлені іншими причинами (перевтома, хвилювання, психічні травми), а тому необхідно враховувати перенесені інфекційні захворювання, нейроінфекції або травматичні ураження нервової системи в минулому.

В етіології астеничних станів певну роль відіграють неповноцінне харчування, різні сімейні й побутові обставини, зловживання палінням і алкоголем. Варто пам'ятати, що й у виробничих умовах, крім впливу іонізуючої радіації, можуть мати місце різні впливи, що призводять до астеничного стану (вплив хімічних речовин, високої температури, шуму, підвищеної вологості й т.п.).

**Клініка хронічної променевої хвороби, спричиненої надходженням радіоіотопів в організм.** Небезпека радіоактивних елементів для людини визначається здатністю організму поглинати та накопичувати ці елементи. Тому при потраплянні радіоактивних речовин усередину організму уражаються ті органи та тканини, у яких відкладаються ті чи інші ізотопи: йод – у щитовидній залозі; стронцій – у кістках; уран і плутоній – у нирках, товстому кишечнику, печінці; цезій – у м'язовій тканині; натрій поширюється по всьому організму. Ступінь небезпеки залежить від швидкості виведення радіоактивних речовин з організму людини. Більша частина людських органів є мало чутливою до дії радіації. Так, нирки витримують сумарну дозу приблизно 23 Гр (2300 рад), отриману протягом п'яти тижнів, сечовий міхур – 55 Гр (5500 рад) за один місяць, печінка – 40 Гр (4000 рад) за місяць.

При наявності в організмі інкорпорованих речовин першочергово в клінічній картині виступають симптоми астенизації, а також ознаки геморагічного діатезу і зміни в системі кровотворення. Взагалі клінічна симптоматика цієї форми променевої хвороби відрізняється своєрідністю вегетативно–судинних порушень на фоні астенизації організму, артеріальної гіпотонії та помірної лейкопенії.

Сьогодні велике значення набуло вивчення впливу на організм людини *малих доз радіації*. Актуальність цього питання пояснюється тим, що внаслідок дії малих доз виникає певна група захворювань, які потребують спрямованих медичних заходів, а також це дає змогу оцінити ступінь безпеки медичних опромінювань — діагностичних і лікувальних. Адже згідно з результатами наукових досліджень радіація уражає більше тканин, ніж про те можна зробити висновок на підставі клінічної картини гострої променевої хвороби. Про радіочутливість деяких із тканин свідчить розвиток у них пухлин лише через багато років після променевого впливу.

**Лікування хронічної променевої хвороби** повинно бути комплексним, раннім і проводитися в залежності від ступеня захворювання, важкості перебігу, наявності клінічних проявів, функціонального стану органів і систем

та індивідуальних особливостей ураженого. Безумовною вимогою є припинення контакту з джерелами випромінювань. Всі хворі на ХПХ (навіть з підозрою на захворювання) підлягають стаціонарному обстеженню і лікуванню.

На рис. 2.1 наведена характеристика лікувальних заходів при ХПХ.

Крім загальміцнюючих симптоматичних засобів, застосовують стимулятори лейкопоезу (вітамін В<sub>12</sub>, пентоксил, натрію нуклеїнат), антигеморагічні препарати (аскорбінова кислота у високих дозах, вітаміни В<sub>6</sub>, Р, препарати кальцію), антиоксиданти (токоферол), анаболічні препарати (рибоксин, неробол), антибіотики (при інфекційних ускладненнях). Хворі з важкими формами променевої хвороби потребують тривалого лікування. Головну увагу приділяють боротьбі з гіпопластичним станом кровотворення (багаторазові гемотрансфузії, трансплантація кісткового мозку), інфекційними ускладненнями, трофічними і обмінними порушеннями (гормональні препарати, вітаміни, кровозамінники).



Рисунок 2.1 – Характеристика лікувальних заходів при ХПХ

Надзвичайно складне завдання – виведення з організму радіоактивних інкорпорованих речовин. Так, за наявності в організмі залишків урану використовують сечогінні і адсорбуючі препарати. Рекомендуються також спеціальні дієти: лужна – при інкорпорації урану, магнеєва – при інкорпорації стронцію. Для зв'язування і прискорення виведення ізотопів призначають комплекси (тетрацилін–кальцій, пентацилін).

При *атрофічному гастриті* призначають плантаглюцид (0,5 г 3 рази на день до їжі) чи бальзам Панкова–Дегтярьової (по 1 ч. л. 3 рази на день до їжі), чи альтан (по 1 таблетці 3 рази на день за 30 хвилин до їжі) впродовж 1 місяця; ферментні препарати (панкреатин, абомін) по 1–2 таблетки 3 рази на день на початку їжі; біогенні стимулятори: екстракт чи сок алое (по 1 ч. л. 3 рази на день за 30 хв до їжі), чи метилурацил (0,25–0,5 г 3 рази на день після їжі); рибоксин (0,2–0,4 г 3 рази на день до їжі) впродовж 1 місяця. При передракових станах – екстракт березового гриба (бефунгін, розчинивши 2 ч.л. в 150 мл теплої води, приймати по 1 ст.л. 3 рази на день за 30 хв до їжі) впродовж 3–5 місяців. Рибоксин володіє радіопротекторними властивостями.

Прискорюють виведення радіонуклідів з організму жовчогінні, проносні препарати, альгірати і сорбенти, які використовуються при наявності асоційованих захворювань органів травлення. При кишковому дисбіозі показані пребіотики (хілак–форте, лактувіт, біонорм) й пробіотики (лактіале, біфі–форм, лінекс, лаціум, окарин) залежно від змін бактеріограми калу.

Додатково рекомендоване курсове призначення адаптогенів: екстракту елеутерокока, ехінацеї, золотого кореня, настоянки лимонника китайського, аралії маньчжурської, женьшеню, прополісу, пантокрину по 20–30 крапель за 30 хв до їжі 2–3 рази на добу впродовж 14–21 дня з переривами на 2–3 тижні.

Лікування *токсичного (радіаційного) гепатиту* залежить від стадії та ступеня активності і передбачає застосування есенціальних фосфоліпідів, силімариновмістких препаратів, аргініну глютамату, тіотриазоліну, вітамінних комплексів; при холестатичному синдромі показане застосування урсодезоксихолевої кислоти; при супутній біліарній патології – комбіновані гепатопротектори–холеретики.

Рекомендоване застосування наступних препаратів. Внутрішньовенне введення 5–10 мл есенціале Н, л'есфаль (на аутокрові) 10 днів з переходом на есенціале форте Н, чи енерлів, чи ліволін (1–2 капсули 3 рази на день). При застосуванні ліволіну форте, що містить вітаміни групи В, Е, нікотинамід в лікувальній дозі, додатково вітамінні препарати не використовуються. Загальний курс лікування фосфатидилхоліном (есенціале форте Н, енерлів) 1–6 місяців; при застосуванні ліволіну–форте 1–3 місяці.

Внутрішньовенне краплинне введення аргініну глютамату (глутаргіну) 2 г за добу 5–10 днів з переходом на таблетований прийом глутаргіну по 2–3 таблетки 3 рази на день до 3–х тижнів.

Введення тіотриазоліну 2,5% по 2 мл 2–3 рази на день в/м чи в/в, з переходом на таблетований прийом тіотриазоліну по 1 таблетці 3 рази на день. Загальний курс лікування 1–2 місяці.



Вітамінні препарати\*: 50–100 мг піридоксину в/в чи в/м 1 раз на день, через день, № 10, чергувати з 25–50 мг тіаміну хлориду в/в чи в/м 1 раз на день, через день, № 10; цианкоболамін 100–200 мкг в/м, через день № 10; фолієва кислота 1 мг по 2 таблетки 3 рази на день після їжі, 20–30 днів; аскорбінова кислота 500 мг по 1 таблетці під час їжі впродовж 10–20 днів; вікасол по 10 мг на день в/м впродовж 3–х днів.

\* При амбулаторному лікуванні можуть використовуватись пероральні полівітамінні комплекси (квадевіт, комплевіт, вітам) до 1 місяця.

\* При застосуванні ліволіну–форте чи симепару додатково вітамінні комплекси не призначаються.

Рослинні гепатопротектори: силімариновмісткі – легалон, силімарол, карсил, дарсил, гепарсил, симепар (містить вітаміни групи В) та інші аналоги по 1–2 капсули 3 рази на день; препарати на основі артишоку (хофітол, артишок, артіхол, циннарікс) (1–2 таблетки 3 рази на день до їжі); за показами (при поєднанні з біліарною патологією) комбіновані гепатопротектори–холеретики: гепабене, холівер, холоплант та ін. по 1–2 капсули 3 рази на день. Загальний курс лікування рослинними гепатопротекторами 1–2 місяці.

При холестатичному синдромі – урсодезоксихолева кислота (урсолів, урсосан, урсохол) 250 мг по 1 капсулі 3 рази на день. Загальний курс лікування 1–6 місяців.

Препарати лактулози (лактувіт та ін.) в дозі до 1 г/кг маси тіла за добу, розділивши добову дозу на 3 прийоми упродовж 2–4–х тижнів.

Поліферментні препарати (панкреатин та ін.) по 1–2 дози 3 рази на день на початку прийому їжі, при зниженому харчуванні, супутньому хронічному панкреатиті з екзокринною недостатністю.

Для корекції обміну речовин та для лікувального харчування рекомендований мультинутрієнтний функціонально–пептидний комплекс грінізація (грінізація мікс, грінізація про) курсом 1–6 місяців.

У комплексному лікуванні *невиразкового коліту* використовують пребіотики – лактулозу (дуфалак, нормазе, лактувіт) 10 мл 2–3 рази на день (при запорах) або хілак чи хілак–форте 40 крапель 3 рази на день (при проносах), або комбінований препарат біонорм по 2–3 таблетки 3 рази на день. Для підвищення ефективності лікування додатково на фоні пребіотиків рекомендоване застосування пробіотичних засобів. Вибір пробіотика залежить від змін бактеріограми калу: при зниженні лакто– та біфідобактерій можна рекомендувати біфіформ по 1–2 капсули 2 рази на день за 30–40 хв до їжі, лінекс, лактіале по 1–2 капсули 3 рази на день за 30–40 хв до їжі, загальним курсом 2–4–6 тижнів у залежності від ступеня дисбактеріозу. При зниженні вмісту нормальної кишкової палички і/чи наявності лактозонегативної та гемолітичної E.соїї у підвищених титрах призначають окарин по 1 капсулі 2–3 рази на день за 30–40 хв до їжі 2–4 тижні. При ізольованому зниженні лактобактерій показаний лацидофіл по 1–2 капсули 3 рази на день 2–4 тижні.

При обстипаційному синдромі перевагу слід віддавати пребіотику з послаблюючим ефектом лактулозі (дуфалак, нормазе, лактувіт), а за відсутності ефекту і непереносимості лактулози призначити інші послаблюючі засоби

(мукофальк, дефенорм, піколакс, форлакс) та про-кінетики, що проявляють активність на рівні кишечника – мосаприд (мосід) чи ітоприду гідрохлорид (ітомед, ганатон).

З метою корекції процесів травлення та всмоктування у кишечнику використовують поліферментні препарати (панкреатин, креазим, ензістал) по 1 дозі 3 рази на день під час прийому їжі впродовж 2–4 тижнів. Для усунення метеоризму призначають препарати симетикону (еспумізан, дисфлатил), сорбенти. Для усунення больового синдрому використовують спазмолітики – меверин 200 мг по 1 капе. 2 рази на добу впродовж 2–4 тижнів. За необхідності проводиться протизапальна терапія месалазином (салофальк, пентаса), стимуляція реактивності організму (гербіон ехінацея, імунал, Т-активін, тималін, тимоген), вітамінотерапія (дуовіт, вітакап, квадевіт).

У разі наявності ранніх ознак хвороби призначають перебування на повітрі, лікувальну гімнастику, повноцінне харчування, вітамінізацію. Головну увагу приділяють боротьбі з гіпопластичними станами кровотворення (багатократні гемотрансфузії, трансплантація кісткового мозку), інфекційними ускладненнями, трофічними і обмінними порушеннями (гормональні препарати, вітаміни, кровозамінники).

**Експертиза працездатності.** При початкових проявах захворювання показано тимчасове усунення від роботи, пов'язаної з впливом іонізуючої радіації, терміном до року. У разі наявності більш виражених проявів хвороби показано направлення хворого на лікарсько-експертну комісію для встановлення ступеня втрати професійної працездатності і трудових рекомендацій. Подальша трудова діяльність в контакт з цим фактором протипоказана.

**Профілактика.** Для попередження шкідливої дії іонізуючих випромінювань необхідно усувати всяку можливість опромінювання організму дозами, які перевищують гранично допустимі. Ступінь ураження радіоактивними речовинами організму людини залежить від ряду чинників: виду випромінювання (альфа-, бета-, гамма-промені і т. ін.); кількості ізотопу (активності); його властивостей (енергії частинок в період піврозпаду та ін.); шляхів попадання в організм людини та його індивідуальної чутливості.

Необхідна раціональна організація праці, дотримання норм радіаційної безпеки. Всі види робіт повинні мати ефективну екранізацію. При роботах із закритими джерелами випромінювання слід дотримуватись правил схову і переносу ампул з використанням контейнерів, маніпуляторів. Велике значення має дозиметричний контроль, проведення попередніх і періодичних медичних оглядів, а також дотримування медичних протипоказань щодо осіб, які приймаються на роботу з радіоактивними речовинами.

Своєчасне лікування, усунення дії шкідливих чинників, відпочинок, переведення на іншу роботу дозволяють запобігти подальшому розвитку захворювання і забезпечити повне відновлення здоров'я і працездатності.

## Локальні променеві ураження шкіри

Однією з найбільш поширених форм місцевих радіаційних уражень при зовнішньому опроміненні є променеві дерматити (опіки). Вони розвиваються в результаті : – нерівномірного радіаційного впливу при вибухах ядерних боєприпасів, при аваріях на атомних енергетичних установках, можуть бути наслідком рентгено– або гамма–терапії захворювань, необережного поводження із джерелами ІВ.

Найбільш частою локалізацією місцевих променевих уражень шкіри є обличчя, кисті рук, передня поверхня стегон. Променеві дерматити можуть бути ранніми і пізніми. Ранні променеві дерматити – це променеві опіки шкіри, що проявляються в перші кілька днів після опромінення у вигляді так званої первинної еритеми, що змінюється після латентного періоду дерматитом.

Пізні променеві дерматити розвиваються через кілька місяців після опромінення як наслідок ураження судин шкіри і сполучної тканини. Для них найбільш характерно порушення трофіки шкіри, дермофіброз, виразково–некротичні процеси, симптоми атрофічного або гіпертрофічного дерматиту

Говорячи про фактори, що впливають на ступінь тяжкості місцевого променевого ураження, слід зазначити, що променевої опік протікає тим важче, чим вище поглинена доза і її потужність, чим більше площа і глибина опромінених тканин.

Визначальний вплив на глибину і ступінь тяжкості променевого опіку надає проникаюча здатність іонізуючого випромінювання. Альфа–частинки проникають в шкіру на кілька десятків мікрометрів і майже повністю поглинаються в роговому шарі. Бета–випромінювання проникає в тканину набагато глибше – до 25 мм, в результаті чого значна частка енергії бета–частинок поглинається в базальному шарі епідермісу, сальними і потовими залозами, кровоносними судинами і іншими утвореннями поверхневого шару дерми. Гамма, рентгенівське і нейтронне випромінювання, що мають високу проникаючу здатність, вражають шкіру на всю її глибину, а також підшкірні тканини.

Відповідно до сучасної класифікації променеві опіки шкіри (дерматити) поділяються на 4 ступені тяжкості. Опіки I, II і III–A ступеня є поверхневими і зазвичай гояться самостійно при консервативному лікуванні. Опіки III–B і IV ступеня відносяться до глибоких і вимагають оперативного відновлення шкірного покриву. У клінічному перебігу місцевих променевих уражень простежується певна фазність, що дозволяє виділити наступні стадії ураження: первинна еритема, скритий період, період розпалу, період виходу процесу, період наслідків опіку.

Гострий променевий дерматит I ступеня тяжкості (*еритематозний дерматит*, рис. 2.2) – розвивається після гамма–опромінення в дозах 8–12 Гр. – первинна еритема триває кілька годин, виражена слабо. Латентний період становить 2–3 тижні. Гострий період проявляється розвитком вторинної еритеми, що має темно–червоний або рожево–ліловий колір, набряком шкіри, відчуттям жару, свербіння, больовими відчуттями в ураженій області . Еритема

проходить через 1–2 тижні, лущення і депігментація шкіри зберігається досить тривалий час.

Променевої опік II ступеня тяжкості (ексудативна або **бульозна** форма дерматиту, вологий епідерміт) – опромінення в дозах 12–30 Гр. – первинна еритема зберігається від декількох годин до 2–3 діб, прихований період становить 10–15 діб, період розпалу починається з появи вторинної еритеми, набряку шкіри і підшкірної клітковини, відчуття печіння, свербіння, болю, ознак загальної інтоксикації, лихоманки. В набряклій шкірі з'являються пухирі, після розкриття яких утворюються ерозії і поверхневі виразки, що загоюються протягом 2–3 тижнів. Тривалість захворювання складає 1–2 місяці, великі опіки (понад 20–40% площі шкіри), як правило, несумісні з життям.



Рисунок 2.2 – Гострий променеви́й дерматит I ступеня тяжкості

Променевий опік III ступеня тяжкості (**виразковий** дерматит, рис. 2.3) викликає іонізуюче випромінювання в дозах 30–50 Гр. Первинна еритема виникає в найближчі години після опромінення і триває від 3 до 6 діб, супроводжується набряком шкіри та підшкірної клітковини, почуттям напруги і оніміння в ураженій області, ознаками загальної інтоксикації (слабкість, анорексія, сухість в роті, нудота, головний біль). Прихований період короткий (1–2 тижні) або зовсім відсутній. Період розпалу починається з гіперемії, спочатку яскравою, потім багряно–синюшного кольору. Розвивається набряк уражених ділянок шкіри, утворюються міхури, потім ерозії і виразки, що швидко ускладнюються гнійними процесами. Відзначається лихоманка, регіональний лімфаденіт, виражений больовий синдром. Загоєння затягується на кілька місяців, характеризується рецидивуючим перебігом (вторинними виразками), трофічними дегенеративними і склеротичними змінами шкіри.

Променеві опіки IV ступеня (*некротичний* дерматит) утворюються при опроміненні в дозах 50 Гр. і вище. Яскраво виражена первинна еритема без прихованого періоду переходить в розпал захворювання, що виявляється набряком шкіри, крововиливами і осередками некрозу в уражених ділянках, розвитком вираженого больового синдрому, швидким приєднанням вторинної інфекції, наростанням загальної інтоксикації організму. При дуже важких гамма-ураженнях шкіри (50–100 Гр. і вище) вже з кінця 1 доби розвивається так звана "парадоксальна ішемія": шкіра, підшкірно-жирова клітковина, м'язи утворюють єдиний щільний конгломерат, знекровлена шкіра стає білою. Через 3–4 діб шкіра над осередком ураження стає чорною – розвивається сухий коагуляційний некроз.



Рисунок 2.3 – Гострий променевий дерматит III ступеня тяжкості від рентгенівського випромінювання

У всіх випадках важких і вкрай важких місцевих поразок відзначаються супутні симптоми опікової хвороби (інтоксикація, втрата білків і електролітів, дегідратація, зниження кількості тромбоцитів і анемія, інші інфекційні ускладнення). Гарячково-токсичний синдром часто ускладнюється нирково-печінковою недостатністю і комою, що приводять до загибелі, і лише вчасна радикальна операція може врятувати постраждалого.

**Ураження шкіри при хронічній променевій хворобі.** При ХПХ зміни нервового апарата носять такий же характер, що й при ГПХ. Однак розвиток цих змін спостерігається протягом багатьох років.

При ХПХ регенераторні процеси виражені більш слабо, ніж при гострій формі захворювання. При обстеженні хворих на ХПХ варто звернути увагу на стан тургору шкіри, її вологість або сухість, стан волосся (тонке, посічене, сухе) і порушення больової й тактильної чутливості. Розвиток телеангіоектазій вказує на зміни сітки капілярів шкіри.

Ураження шкіри при зовнішньому опроміненні окремих сегментів тіла.

Шкіра є одним з об'єктів, який використовується у якості своєрідного біологічного дозиметра. Можливість її опромінення виникає у всіх випадках зовнішнього опромінення й особливо при безпосередньому контакті із джерелами високопроникного випромінювання (нейтрони, гама- і рентгенівські

промені з різною енергією). Вибірковому чи переважаючому опроміненню піддається шкіра при зовнішнім опроміненні бета-частинками або рентгенівськими променями з енергією не менше 100 Кев. Окремі структури шкіри володіють різною радіочутливістю, особливо в діапазоні доз, що викликають глибокі ушкодження. Так, ефект епіляції різної стійкості вдається отримати при рентгенівському опроміненні в дозах 3,5–7 Гр, у той час як глибокі ураження потових залоз настає тільки при поглинутій дозі 12–25 Гр.

Гранична величина дози для еритемного ефекту сильно варіює для випромінювань з різною енергією і залежить ще від площі опромінення, але при обліку величин поглинутих доз розбіжності стають не настільки відчутними. Безпосередній і віддалений результат ураження шкіри багато в чому залежить від величини дози, поглинутої певними структурами, зокрема, її гермінативним шаром.

Променеві зміни шкіри можна розділити на дві основні групи. У першу групу входять зміни, які є проявом важких загальних порушень в організмі, що розвиваються при ГПХ і ХПХ. До другої групи належать зміни, що виникають у результаті місцевого впливу опромінення.

Розрізняють наступні ступені важкості уражень шкірних, що виникають у результаті гострого місцевого опромінення:

I ступінь (легка) – через кілька годин після дії граничної дози в 8–12 Гр розвивається еритема. Суха десквамація може розвинути після латентного періоду через 15–20 днів після дії граничної дози приблизно в 10 Гр.

II ступінь (помірна) – ураження розвиваються після дії дози 12–20 Гр. Може спостерігатися характерна волога десквамація, що являє собою більш серйозні ураження клітин базального шару епідермісу.

III ступінь (важка) – характеризується ерозіями й утворенням виразок на шкірі й викликається опроміненням з поглиненою дозою 20–25 Гр.

IV ступінь (українська важка) – характеризується виразково-некротичною формою гострого променевого ураження, що розвивається після впливу поглиненої дози більше 26 Гр.

Зафіксовано, що у випадках дії дози більше 20 Гр (ураження III–IV ступеня) існує ймовірність розвитку пізніх променевих виразок навіть при первинному загоєнні гострих уражень. Це підтверджується аналізом типових випадків місцевих променевих уражень I, II або III ступеня. У пацієнтів з ураженнями I ступеня спостерігається повна реепітелізація, у найгіршому випадку рубцювання шкіри або атрофія. З іншого боку, у більшості пацієнтів з ураженнями III ступеня розвивається пізнє утворення виразок. Цим підтверджується необхідність раннього (20–30 днів) хірургічного втручання після місцевого опромінення дозами вище 20 Гр. Після таких доз важливо зробити пересадження шкіри в період утворення виразок і некрозу, щоб зменшити ризик розвитку анатомічних відхилень і дефектів уражених тканин.

## Променеві ураження очей

На особливу увагу заслуговують зміни органа зору під дією різних видів променистої енергії (інфрачервоні, ультрафіолетові, ультразвукові, рентгенівські промені, радіо – та мікрохвилі, альфа–, бета–, гамма–промені, випромінювання оптичних квантових генераторів тощо).

Очі мають особливо високу чутливість до опромінення. Очі людини уражаються при дозах 2...5 Гр (200...500 рад). Встановлено, що професійне опромінення із сумарною дозою 0.5...2 Гр (50...200 рад), отримане протягом 10–20 років, призводить до помутніння кришталика. Через властивості кришталика поглинати інфрачервоні невидимі промені, може виникнути *променева катаракта*. Її поява зумовлена дозою впливу на очі більше 300 рад. При дозі близько 700 рад розвиваються важке ураження сітківки, крововиливи на очному дні, підвищення внутрішньоочного тиску, можливо, з наступною втратою зору в ураженому оці.

Променева катаракта виникає внаслідок променевого ушкодження кришталика. Віддавна відома катарактогенна дія інфрачервоних променів. Катаракту складувів, змушених дивитися на розплавлене скло, що випромінює ці промені, вважають професійним захворюванням.

Катарактогенну дію справляє короткохвильове випромінювання: рентгенівські промені, альфа–, бета–, гамма–випромінювання. Крайні дози, що спричинюють катаракту, індивідуальні.

Симптоми катаракти:

- контури зображень розпливаються або двояться;
- очі швидко втомлюються;
- виявляється світлочутливість;
- відзначається зниження гостроти зору у вечірній час або в умовах недостатнього освітлення;
- поява відблисків, спалахів, плям, ореолів перед очима;
- відчуття, що дивитися крізь запітніле скло або плівку, зниження відчуття кольору;
- зіниця стає молочно–білою.

Крім загальних симптомів є і характерні прояви: радіаційний вплив проявляється у специфічній формі помутніння – у вигляді кільця або диска; додатково виявляються кольорові плями на сірому тлі.

Ультрафіолетове випромінювання спричинює так звану *електроофтальмію*, що її часто спостерігають після дії на очі випромінювання при електрозварюванні. Запалення розвивається після прихованого періоду, котрий триває 4–10 годин. Симптоми такі: світлобоязнь, сльозотеча, гіперемія кон'юнктиви. Рогівка при цьому прозора, блискуча, проте іноді спостерігаються дрібні пухирцеподібні здуття епітелію.

Схожа клінічна картина розвивається в разі *снігової сліпоти* або *снігової офтальмії*, що виникає у полярників, альпіністів, гірських туристів унаслідок відбиття від снігу ультрафіолетових променів, котрі досягають крізь чисте повітря поверхні Землі.

Інфрачервоне випромінювання діє на око, спричинюючи розвиток *ускладненої катаракти*, яка спостерігається у робітників гарячих цехів – плавильників, металургів, сталеварів, склодувів. Патогенез такої катаракти залежить від дії, з одного боку, короткохвильової частини інфрачервоних променів на кришталік, з іншого – високої температури на передній відділ очного яблука.

Надмірна дія інфрачервоних променів може спричинити *набряк сітківки*, подеколи – *крововилив у склисте тіло і сітківку*.

Рентгенівське випромінювання здатне призвести до розвитку *ускладненої катаракти* у вигляді дископодібного помутніння в задніх шарах кришталіка. Чутливість кришталіка до рентгенівського випромінювання зменшується з віком, уражуваність його залежить від дози опромінення. Катаракта розвивається після тривалого прихованого періоду (від 2 до 17 років) і зрідка досягає цілковитого визрівання.

Помутніння кришталіка виникає також під дією нейтронного, мікрохвильового і жорсткого гамма-випромінювання (часта діатермія з лікувальною метою, недотримання норм роботи з радарними установками).

Профілактика професійних уражень органа зору полягає передусім у суворому дотриманні правил техніки безпеки, нормативів крайніх припустимих концентрацій отруйних газів, пару і пилу в повітрі робочих приміщень; використанні засобів захисту очей (захисні окуляри, ручні щити з кольоровим склом, захисні стекла і стінки, що містять до 30 % свинцю, тощо).

### **?** Питання для самоконтролю:

1. Дайте визначення детермінованим ефектам дії ІВ.
2. Особливості дії ІВ на організм.
3. Коли розвивається гостра променева хвороба (ГПХ)?
4. Клінічні форми ГПХ.
5. Ступені тяжкості кістково-мозкової ГПХ.
6. Фази кістково-мозкової ГПХ.
7. Симптоми початкового періоду кістково-мозкової ГПХ
8. Стадії хронічної променевої хвороби.
9. Опишіть ступені тяжкості променевих дерматитів.
10. Опишіть променеві ураження очей.



### 3 ПРАВОВІ ОСНОВИ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ, РЕГЛАМЕНТИ 1 ТА 2 ГРУП

#### . Норми радіаційної безпеки України; регламенти 1 групи НРБУ–97: терміни і визначення

Основним державним документом, що встановлює систему радіаційно–гігієнічних регламентів для забезпечення прийнятних рівнів опромінення як для окремої людини, так і суспільства взагалі є НРБУ–97 (Норми радіаційної безпеки України). Метою НРБУ–97 є визначення основних вимог до:

- охорони здоров'я людини від можливої шкоди, що пов'язана з опромінюванням від джерел іонізуючого випромінювання;
- безпечної експлуатації джерел випромінювання;
- охорони навколишнього середовища.

Зазначена мета НРБУ–97 досягається шляхом введення таких гігієнічних регламентів, які забезпечують:

- запобігання виникнення *детерміністичних ефектів* у осіб, що зазнали опромінення;
- обмеження на прийнятному рівні імовірності виникнення *стохастичних ефектів*.

Встановлюються два принципово відмінні підходи до забезпечення протирадіаційного захисту:

- при всіх видах практичної діяльності в умовах нормальної експлуатації індустриальних та медичних джерел випромінювання;
- втручання при опроміненні населення в умовах *аварійного опромінення*, а також при хронічному опромінюванні за рахунок *техногенно–підсиленних джерел природного походження*.

При практичної діяльності людини може збільшуватися доза, імовірність опромінювання, або кількість опромінюваних людей. До такої практичної діяльності відносяться:

- виробництво джерел випромінювання;
- використання джерел випромінювання і радіоактивних речовин в медицині, дослідженнях, промисловості, сільському господарстві, освіті, тощо;
- виробництво ядерної енергії, включаючи всі елементи паливно–енергетичного циклу;
- зберігання та транспортування джерел іонізуючого випромінювання;
- поводження з радіоактивними відходами.

Радіаційна безпека та протирадіаційний захист стосовно практичної діяльності будуються з використанням наступних основних принципів:

- будь–яка практична діяльність, що супроводжується опромінюванням людей, не повинна здійснюватися, якщо вона не приносить більшої користі окремим особам або суспільству в цілому у порівнянні зі шкодою, яку вона завдає (*принцип виправданості*);
- рівні опромінення від усіх значимих видів практичної діяльності не повинні перевищувати встановлені ліміти доз (*принцип неперевищення*);

– рівні індивідуальних доз та (або) кількість опромінюваних осіб по відношенню до кожного джерела випромінювання повинні бути настільки низькими, наскільки це може бути досягнуто з врахуванням економічних та соціальних факторів **{принцип оптимізації}**.

Радіаційна безпека та протирадіаційний захист в ситуаціях втручань будуються на наступних основних принципах:

– будь-який контрзахід повинен бути виправданим, тобто отримана користь (для суспільства та особи) від відвернутої цим контрзаходом дози повинна бути більше ніж сумарний збиток (медичний, економічний, соціально-психологічний тощо) від втручання, пов'язаного з його проведенням **(принцип виправданості)**;

– повинні бути застосовані всі можливі заходи (втручання) для обмеження індивідуальних доз опромінення на рівні нижчому за поріг детерміністичних радіаційних ефектів, особливо порогів гострих клінічних радіаційних проявів **(принцип неперевищення)**;

– необхідно вибирати такий контрзахід (або комбінацію декількох контрзаходів), щоб різниця між сумарною користю та сумарним збитком була не тільки додатною, але і максимальною (у порівнянні з іншими можливими рішеннями) **(принцип оптимізації)**.

НРБУ–97 не поширюються на:

– опромінювання від природного радіаційного фону;

– опромінювання в умовах звільнення практичної діяльності чи джерел іонізуючого випромінювання в рамках практичної діяльності від регулюючого контролю.

Загальними принципами звільнення *практичної діяльності* чи *джерел іонізуючого випромінювання* в рамках практичної діяльності від регулюючого контролю є:

а) радіаційні ризики для осіб, що викликані звільненою діяльністю чи джерелами повинні бути достатньо низькими, щоб не знаходитися у сфері інтересів *регулюючого органу*;

б) колективний ризик від звільненої *практичної діяльності* або джерела повинен бути достатньо низьким, щоб не вимагати регулюючого контролю за більшістю обставин;

в) звільнені види *практичної діяльності* та джерела повинні бути безпечні, тобто з низькою імовірністю несприятливого розвитку подій, які зможуть призвести до порушення вимог пунктів а) та б).

*Звільнення практичної діяльності чи джерел іонізуючого випромінювання в рамках практичної діяльності від регулюючого контролю може бути як повним, так і обмеженим.*

**Повне звільнення.** Практична діяльність чи джерела іонізуючого випромінювання в рамках практичної діяльності можуть бути звільнені регулюючим органом від вимог НРБУ–97 без подальшого розгляду (повне звільнення), якщо вони відповідають за всіх можливих обставин наступним критеріям звільнення :

а) очікувана ефективна доза від усіх шляхів опромінення для будь-якої людини за рахунок звільненої практичної діяльності чи джерела не перевищує 10 мкЗв/рік-1;

б) очікувана річна *колективна ефективна доза* від усіх шляхів опромінення за рахунок звільненої практичної діяльності чи джерела не повинна перевищувати 1 люд.-Зв, або внаслідок оптимізації протирадіаційного захисту доведено, що звільнення є найкращим вибором.

Згідно з викладеними критеріями, наступні джерела в рамках *практичної діяльності* автоматично звільнюються без подальшого розгляду від вимог НРБУ-97:

а) радіоактивні речовини, що використовуються для практичної діяльності, для яких або активність даного радіонукліду в них у будь-який момент часу, або його питома активність не перевищують рівнів звільнення, які визначаються ОСПУ-97 (за виключенням деяких випадків);

б) пристрої для генерування іонізуючого випромінювання, які схвалені регулюючим органом для використання без регулюючого контролю, якщо:

- в умовах нормальної експлуатації потужність *еквівалентної дози* в будь-якій точці на відстані 0.1 м від будь-якої доступної поверхні пристрою не перевищує 1 мкЗв/год.; чи
- максимальна енергія випромінювання не перевищує 5 кеВ.

**Обмежене звільнення** (звільнення від певних видів регулюючого контролю) практичної діяльності чи джерел в рамках практичної діяльності дозволяється *регулюючим органом* за умов, які визначаються *регулюючим органом* та пов'язані з фізичною чи хімічною формами радіоактивних матеріалів, їх використанням чи захороненням.

Зокрема, обмежене звільнення може дозволятися для пристроїв, що містять радіоактивні речовини, але не можуть бути звільнені за попередніх умов, якщо:

- пристрій схвалений для використання *регулюючим органом*; та
- радіоактивні речовини присутні в пристрої у герметичній формі, що може ефективно перешкоджати будь-якому контакту з радіоактивною речовиною та її витоку; та

– в умовах нормальної експлуатації ці пристрої не призведуть до перевищення потужності *еквівалентної дози* в 1 мкЗв/год. на відстані 0.1 м від будь-якої доступної поверхні пристрою; та

– *регулюючим органом* визначено необхідні умови для виведення пристрою з експлуатації.

Для позначення небезпеки радіаційного ураження застосовується спеціальний знак (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Знак радіаційної небезпеки

Міжнародний умовний знак радіаційної небезпеки («трилисник», «вентилятор») має форму трьох секторів шириною  $60^\circ$ , розставлених на  $120^\circ$  один відносно одного, з невеликим кругом в центрі. Виконується чорним кольором на жовтому фоні. У таблиці символів Юнікод є символ знаку радіаційної небезпеки — ☸ (U+0x2622).

У 2007 році був прийнятий новий знак радіаційної небезпеки (рис. 3.2), в якому «трилисник» доповнений знаками «випромінювання» (звивисті лінії зі стрілками), «смертельно» («череп з кістками») і «вирушай!» (силует чоловічка, що біжить, і вказуюча стрілка). Новий знак покликаний стати зрозумілішим для тих, хто не знайомий із значенням традиційного «трилисника».



Рисунок 3.2 – Новий знак радіаційної небезпеки

## Основні регламентовані величини НРБУ–97

НРБУ–97 поширюються на ситуації опромінювання людини джерелами іонізуючого випромінювання в умовах:

- нормальної експлуатації індустриальних джерел іонізуючого випромінювання;
- медичної практики;
- радіаційних аварій;
- опромінювання техногенно підсиленими джерелами природного походження.

НРБУ–97 включають чотири групи радіаційно–гігієнічних регламентованих величин.

**Перша група** – регламенти, для контролю за практичною діяльністю. Метою яких є забезпечення опромінювання персоналу та населення на прийнятному для індивідууму та суспільства рівні, а також підтримання радіаційно–прийнятного стану навколишнього середовища та технологій радіаційно–ядерних об'єктів як з позицій обмеження опромінення персоналу та населення, так і з позицій зниження імовірності виникнення аварій на них.

До цієї групи входять:

- ліміти доз;
- похідні рівні;
- допустимі рівні;
- контрольні рівні.

**Друга група** – регламенти, що мають за мету обмеження опромінення людини від медичних джерел.

До цієї групи входять:

- рекомендовані рівні;
- рекомендовані величини.

**Третя група** – регламенти, щодо відвернутої внаслідок втручання дози опромінення населення в умовах радіаційної аварії.

До цієї групи входять:

- рівні втручання; рівні дії.

**Четверта група** – регламенти, населення від техногенно підсилених

До цієї групи входять:

- рівні втручання;
- рівні дії.

Нормами радіаційної безпеки встановлюються такі категорії опромінених осіб:

**категорія А (персонал)** – особи, які постійно чи тимчасово працюють безпосередньо з джерелами іонізуючих випромінювань.

**категорія Б (персонал)** – особи, які безпосередньо не зайняті роботою з джерелами іонізуючих випромінювань, але у зв'язку з розташуванням робочих місць в приміщеннях та на промислових майданчиках об'єктів з радіаційно–ядерними технологіями можуть отримувати додаткове опромінювання.

**категорія В** – все населення.

## Регламенти 1 групи

### Ліміти доз і допустимі рівні

Числові значення лімітів доз встановлюються на рівнях, що виключають можливість виникнення детерміністичних ефектів опромінення і, одночасно, гарантують настільки низьку імовірність виникнення стохастичних ефектів опромінення, що вона є прийнятною як для окремих осіб, так і для суспільства в цілому.

Для осіб категорій А і Б ліміти доз встановлюються в термінах індивідуальної річної ефективної та еквівалентних доз зовнішнього опромінення (ліміти річної ефективної та еквівалентної доз). Обмеження опромінення осіб категорії В (населення) здійснюється введенням лімітів річної ефективної та еквівалентної доз для критичних груп. Останнє означає, що значення річної дози опромінення осіб, які входять в критичну групу, не повинно перевищувати ліміту дози, встановленого для категорії В.

З лімітом дози порівнюється сума ефективних доз опромінення від усіх індустриальних джерел випромінювання. До цієї суми не включають:

- дозу, яку одержують при медичному обстеженні або лікуванні;
- дозу опромінення від природних джерел випромінювання;
- дозу, що пов'язана з аварійним опроміненням населення;
- дозу опромінення від техногенно–підсилених джерел природного походження.

Додатково до ліміту річної ефективної дози встановлюються ліміти річної еквівалентної дози зовнішнього опромінення окремих органів і тканин (табл 3.1):

- кришталика ока;
- шкіри;
- кистей та стіп.

Таблиця 3.1 – Ліміти дози опромінення ( $\text{мЗв}\cdot\text{рік}^{-1}$ ),

Ліміт дози	Категорія осіб		
	А*	Б**	В**
Річна ефективна доза	20***	2	1
Річна еквівалентна доза в: – кришталику ока	150	15	15
– шкірі	500	50	50
– кістях та стопах	500	50	–

Примітки:

\* – потужність дози опромінення протягом календарного року не регламентується; для жінок дитородного віку (до 45 років) доза за які–небудь два послідовні місяці не повинна перевищувати 1,5 мЗв; для вагітних жінок діють обмеження.

\*\* – для вагітних жінок категорії Б та В норми встановлюються на рівні в 2 рази меншому, ніж відповідні начення.

\*\*\* – в середньому за будь-які послідовні 5 років, але не більше 50 мЗв за окремий рік.

Встановлюється такий перелік допустимих рівнів (ДР), які відносяться до радіаційно-гігієнічних регламентів першої групи.

Для категорії А:

- допустиме надходження ( $ДН_A^{inhal}$ ) радіонукліду через органи дихання;
- допустима концентрація ( $ДК_A^{inhal}$ ) радіонукліду в повітрі робочої зони;
- допустима щільність потоку частинок ( $ДЩП_A$ );
- допустима потужність дози зовнішнього опромінення ( $ДПД_A$ );
- допустиме радіоактивне забруднення ( $ДЗ_A$ ) шкіри, спецодягу та робочих поверхонь.

Для категорії Б:

- допустиме надходження ( $ДН_B^{inhal}$ ) радіонукліду через органи дихання;
- допустима концентрація ( $ДК_B^{inhal}$ ) радіонукліду в повітрі робочої зони.

Для категорії В:

- допустиме надходження радіонукліду через органи дихання ( $ДН_B^{inhal}$ ) і травлення ( $ДН^{ingest}$ );
- допустимі концентрації радіонукліду в повітрі ( $ДК_B^{inhal}$ ) та питній воді ( $ДК^{ingest}$ );

Числові значення допустимих рівнів (ДН, ДК) розраховані для умов впливу одного радіонукліду та одного шляху надходження при референтних умовах опромінення подані у Додатку 1. Ці числові значення є радіаційно-гігієнічними регламентами.

При контролі річного надходження радіонуклідів і дози зовнішнього опромінення ЛД не буде перевищено, якщо одночасно виконуються наступні нерівності:

$$\frac{E_{ext}}{ЛД_E} + \sum_i \frac{I_i^{inhal}}{ДН_i^{inhal}} + \sum_i \frac{I_i^{ingest}}{ДН_i^{ingest}} \leq 1 \quad (a)$$

$$\frac{H_{lens}}{ЛД_{lens}} \leq 1 \quad (b) \quad (3.1)$$

$$\frac{H_{skin}}{ЛД_{skin}} \leq 1 \quad (c)$$

$$\frac{H_{extrim}}{ЛД_{extrim}} \leq 1, \quad (d)$$

де  $E_{ext}$  – ефективна доза зовнішнього опромінення;

–  $ЛД_E$  – ліміт ефективної дози для категорії, що розглядається;

–  $I_i^{inhal}$  – річне інгаляційне надходження і-го радіонукліду;

$ДН_i^{inhal}$  – допустиме надходження через органи дихання для і-го радіонукліду та категорії, що розглядається;

$I_i^{ingest}$  – річне пероральне надходження і-го радіонукліду;

$ДН_i^{ingest}$  – допустиме надходження через органи травлення для  $i$ -го радіонукліду та категорії що розглядається;

$H_{lens}$  – річна еквівалентна доза в кришталику ока;

$ЛД_{lens}$  – ліміт еквівалентної дози зовнішнього опромінення кришталика ока;

$H_{skin}$  – річна еквівалентна доза зовнішнього опромінення шкіри;

$ЛД_{skin}$  – ліміт еквівалентної дози зовнішнього опромінення шкіри;

$H_{extrim}$  – річна еквівалентна доза зовнішнього опромінення кистей та стіп;

$ЛД_{extrim}$  – ліміт еквівалентної дози зовнішнього опромінення кистей та стіп.

При контролі середньорічної об'ємної концентрації радіонуклідів в повітрі і питній воді (продуктах харчування) і дози зовнішнього опромінення ЛД не буде перевищено, якщо одночасно виконуються наступні нерівності:

$$\frac{E_{ext}}{ЛД_E} + \sum_i \frac{C_i^{inhal}}{ДК_i^{inhal}} + \sum_i \frac{C_i^{ingest}}{ДК_i^{ingest}} \leq 1 \quad (a)$$

$$\frac{H_{lens}}{ЛД_{lens}} \leq 1 \quad (b) \quad (3.2)$$

$$\frac{H_{skin}}{ЛД_{skin}} \leq 1 \quad (c)$$

$$\frac{H_{extrim}}{ЛД_{extrim}} \leq 1, \quad (d)$$

де  $C_i^{inhal}$  – середньорічна об'ємна концентрація  $i$ -го радіонукліду в повітрі;

$ДК_i^{inhal}$  – допустима концентрація  $i$ -го радіонукліду в повітрі для категорії що розглядається

$C_i^{ingest}$  – середньорічна об'ємна концентрація  $i$ -го радіонукліду в воді,

$ДК_i^{ingest}$  – допустима концентрація  $i$ -го радіонукліду в питній воді.

Для категорії А, Б в нерівності (а) систем (3.1), (3.2) останній член суми (пероральне надходження) не розглядається. Для категорії В нерівність (d) в системах (3.1), (3.2) не застосовується.

Якщо є данні, які дозволяють здійснювати контроль за обома системами нерівностей, приймається, що ЛД не перевищується за одночасного виконання умов (3.1) і (3.2).

### Опромінення персоналу (категорія А)

Особи, молодші за 18 років, не допускаються до роботи з джерелами іонізуючого випромінювання.

Для вагітних вводиться додаткове обмеження опромінювання: середня еквівалентна доза локального опромінювання (зародка і плоду) за будь які 2 послідовні місяця не повинна перевищувати 1 мЗв. При тому за весь період вагітності ця доза не повинна перевищувати 2 мЗв, а ліміт річного надходження для вагітних встановлюється на рівні  $1/20 ДН_A$ .



Радіоактивне забруднення шкіри, спецодягу та робочих поверхонь не повинно перевищувати норм, що надані у НРБУ.

Індивідуальний дозиметричний контроль, у конкретних для кожного випадку обсягах є обов'язковим для осіб, у яких річна ефективна доза опромінення може перевищувати 0,5 ЛД<sub>а</sub>.

**Підвищене опромінювання персоналу, що планується** – це опромінення персоналу (категорія А) вище встановлених лімітів доз в непередбачуваних ситуаціях при практичній діяльності.

Непередбачувані ситуації, при яких допускається планувати підвищене опромінення персоналу, характеризуються наступними умовами:

- не можуть бути усунені без проведення технологічних операцій, що передбачають перевищення лімітів доз;
- потребують термінового усунення;
- можуть призвести до розвитку радіаційної аварії або значних соціально–економічних збитків.

Обґрунтування підвищеного опромінення персоналу полягає в тому, що шкода від перевищення лімітів доз у окремих осіб з персоналу буде значно меншою, ніж можлива шкода у випадку розвитку радіаційної аварії.

При плануванні підвищеного опромінення персоналу використовується максимальне значення ЛД за один окремий рік – 50 мЗв.

Опромінення персоналу, що планується, в дозах від 1 до 2 ЛД за календарний рік, дозволяється місцевими органами Державного санітарно–епідеміологічного нагляду. Порядок

допуску персоналу до таких робіт розглянуто у відповідному розділі Основних санітарних правил України (ОСПУ).

Опромінення персоналу при дозі не більше за 2 ЛД повинно бути скомпенсовано так, щоб після п'ятирічного періоду ефективна доза за цей час (разом з дозою від виконання спеціальних робіт), не перевищувала 100 мЗв.

Опромінення персоналу, що планується, в дозах від 2 до 5 ЛД може бути дозволено у виняткових випадках Міністерством охорони здоров'я України один раз протягом всієї трудової

діяльності працівника. Опромінення персоналу при дозі більше за 2 ЛД повинно бути скомпенсовано так, щоб після десятирічного періоду ефективна доза за цей час (разом з дозою від виконання спеціальних робіт), не перевищувала 200 мЗв.

Особи, які зазнали одноразового опромінення в дозі 5 ЛД і більше, мають бути виведені з зони опромінювання і направлені на медичне обстеження. Подальша робота з джерелами випромінювання цим особам дозволяється в індивідуальному порядку у відповідності до вимог ОСПУ за умови інформування про ризики для їх здоров'я та отримання письмової згоди від них.

Забороняється повторне підвищене опромінювання, що планується, до повної компенсації попереднього.

Планування підвищеного опромінення жінок у віці до 45 років та чоловіків молодших 30 років забороняється.

Особи, які залучаються до проведення аварійних та рятувальних робіт, на цей період прирівнюються до персоналу (категорія А).

### **Опромінення персоналу (категорія Б)**

Для персоналу (категорія Б) індивідуальна річна ефективна доза не повинна перевищувати значення ЛД для даної категорії (таблиця 4.1). Річне надходження радіонуклідів через органи дихання, концентрація у повітрі та потужність дози не повинні перевищувати відповідні допустимі норми для категорії Б.

Для осіб категорії Б не допускається будь-яке радіоактивне забруднення шкіри, особистого одягу та робочих поверхонь.

### **Опромінення населення (категорія В)**

Регламентація і контроль опромінення населення здійснюється на основі розрахунків річних ефективних та еквівалентних доз опромінення критичних груп. Структура, обсяг,

методи і засоби цього контролю регламентуються відповідними розділами ОСПУ, а також, при необхідності, спеціальними нормативними актами Міністерства охорони здоров'я України.

Обмеження опромінення населення здійснюється шляхом регламентації та контролю:

– газоаерозольних викидів і рідинних скидів у процесі роботи радіаційно-ядерних об'єктів;

– вмісту радіонуклідів в окремих об'єктах навколишнього середовища (воді, продуктах харчування, повітрі і т.і.).

Крім того, для відповідних об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями встановлюється санітарно-захисна зона, де регламентується спеціальний режим використання її території та спеціальні вимоги до радіаційного контролю.

Для осіб категорії В не допускається будь-яке радіоактивне забруднення житлових робочих приміщень, одягу і тіла.

### **? Питання для самоконтролю:**

1. Що таке рівень втручання?
2. Що таке рівень дій?
3. Охарактеризувати регламенти першої групи.
4. Що таке ліміт дози?
5. Контроль річного надходження радіонуклідів і дози зовнішнього опромінення.
6. Категорії опромінених осіб.
7. Захист вагітних.
8. Назвіть ліміти ефективної дози для категорії А.

9. Назвіть ліміти ефективної дози для категорії В.  
10. Вимоги до опромінення персоналу, що планується.

### Регламенти другої групи

Медичне опромінення — це опромінення людини: пацієнтів, внаслідок медичних обстежень чи лікування та добровольців. Медичне опромінення спрямовано тільки на досягнення очевидної користі для конкретної людини (пацієнта), або суспільства у вигляді отримання необхідної діагностичної чи наукової інформації або терапевтичного ефекту.

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

Рекомендовані рівні медичного опромінення та детальні вимоги до обмеження та контролю за опроміненням пацієнтів регламентуються окремими спеціальними документами Міністерства охорони здоров'я України.

Виділяють такі категорії пацієнтів:

#### **Категорія АД**

- хворі на онкологічні захворювання або з підозрою на них;
- хворі, дослідження яких проводиться з метою діагностики вродженої серцево-судинної паталогії;
- хворі, яким проводять інтервенційні методи;
- особи, досліджувані за життєвими показами (у тому числі з травмами).

Рекомендовані граничні рівні (ефективна доза) – 100 мЗв·рік<sup>-1</sup>.

#### **Категорія БД**

- хворі, дослідження у яких проводять за клінічними показами пр неонкологічних захворюваннях;

Рекомендовані граничні рівні (ефективна доза) – 20 мЗв·рік<sup>-1</sup>.

#### **Категорія ВД**

- особи з груп ризику, у тому числі працюючі на підприємствах із шкідливими факторами та ті, яких приймають на роботу до цих підприємств;
- хворі, що зняті з обліку після радикального лікування онкологічних захворювань, при періодичних обстеженнях.

Рекомендовані граничні рівні (ефективна доза) – 2 мЗв·рік<sup>-1</sup>.

#### **Категорія ГД**

- особи, у яких проводять всі види профілактичного обстеження;
- особи, яким проводять обстеження у медичних програмах.

Рекомендовані граничні рівні (ефективна доза) – 1 мЗв·рік<sup>-1</sup>.

При проведенні профілактичного обстеження населення річна ефективна доза не повинна перевищувати 1 мЗв. Перевищення цього рівня допускається лише в умовах несприятливої епідемічної ситуації за

узгодженням з органами Державної санітарної епідеміологічної служби МОЗ України.

Особи, які добровільно надають допомогу пацієнтам при проведенні діагностичних та терапевтичних процедур, не повинні зазнавати опромінення у дозах більше  $5 \text{ мЗв} \cdot \text{рік}^{-1}$ .

Для жінок репродуктивного віку (до 45 років) з діагностованою чи можливою вагітністю, а також у період грудного годування дитини необхідно уникати проведення радіологічних та рентгенологічних процедур, за винятком ургентних випадків.

Медичне опромінення добровольців, які беруть участь в медико-біологічних дослідженнях, повинно проводитись з дозволу Міністерства охорони здоров'я України при умовах:

– неперевищення рекомендованих Міністерством охорони здоров'я рівнів опромінення;

– письмової згоди добровольця;

– інформування добровольця про можливі наслідки та ризики, пов'язані з опроміненням.

При проведенні радіологічних процедур (введення радіофармацевтичних препаратів) потужність дози гамма-випромінювання на відстані 0,1 м від пацієнта не повинна перевищувати  $10 \text{ мкЗв/год}^{-1}$  (при виході з радіологічного відділення).

### ? Питання для самоконтролю:

1. Охарактеризувати регламенти другої групи.
2. Категорії пацієнтів при застосуванні іонізуючого випромінювання у медицині.
3. Що таке рекомендовані рівні медичного опромінення?
4. Які пацієнти відносяться до категорії АД? Які рекомендовані граничні рівні?
5. Які пацієнти відносяться до категорії БД? Які рекомендовані граничні рівні?
6. Які пацієнти відносяться до категорії ГД? Які рекомендовані граничні рівні?
7. Вимоги до медичного опромінення добровольців.

## 4 РЕГЛАМЕНТИ 3 ТА 4 ГРУП

### Регламенти 3 групи

#### *Населення в умовах радіаційної аварії*

При виникненні комунальної радіаційної аварії окрім термінових робіт щодо стабілізації радіаційного стану (включаючи відновлення контролю над джерелом) мають бути одночасно здійснені заходи, спрямовані на:

- 1) зведення до мінімуму кількості осіб з населення, які зазнають аварійного опромінення;
- 2) запобігання чи зниження індивідуальних і колективних доз опромінення населення;
- 3) запобігання чи зниження рівнів радіоактивного забруднення продуктів харчування, питної води, сільськогосподарської сировини і сільгоспугідь, об'єктів довкілля (повітря, води, ґрунту, рослин тощо), а також будівель і споруд.

Протирадіаційний захист населення в умовах радіаційної аварії базується на системі протирадіаційних заходів (контрзаходів), які практично завжди є втручанням в нормальну життєдіяльність людей, а також у сферу нормального соціально-побутового, господарського і культурного функціонування територій.

#### *Види контрзаходів*

Усі захисні контрзаходи, які застосовуються в умовах радіаційної аварії поділяються на прямі і непрямі. До прямих відносяться контрзаходи, реалізація яких призводить до запобігання чи зниження індивідуальних і/або колективних доз аварійного опромінення населення. До непрямих відносяться усі види контрзаходів, які не призводять до запобігання індивідуальних і колективних доз опромінення населення, але зменшують (компенсують) величину збитку для здоров'я, пов'язаного з цим аварійним опроміненням (медичне обслуговування, введення соціально-економічних і медичних пільг і грошових компенсацій, покращення якості харчування та ін.).

У залежності від масштабів і фаз радіаційної аварії, а також від рівнів прогнозних аварійних доз опромінення прямі контрзаходи умовно поділяються на екстрені, невідкладні і довгострокові.

До **екстрених** відносяться такі контрзаходи, проведення яких має за мету відвернення таких рівнів доз гострого та/або хронічного опромінення осіб з населення, які створюють загрозу виникнення радіаційних ефектів, що виявляються клінічно.

Контрзаходи кваліфікуються як **невідкладні**, якщо їх реалізація спрямована на відвернення детерміністичних ефектів.

До **довгострокових** належать контрзаходи, спрямовані на відвернення доз короткочасного або хронічного опромінення, значення яких, як правило, нижче порогів індукування детерміністичних ефектів.

У НРБУ подано розподіл різних видів контрзаходів за фазами радіаційної аварії.

### *Рівні втручання та рівні дії для контрзаходів*

До екстрених і невідкладних протирадіаційних захисних заходів гострої фази аварії належать:

- укриття населення;
- обмеження у режимі поведінки (обмеження часу перебування на відкритому повітрі);
- евакуація;
- фармакологічна профілактика опромінення щитовидної залози радіоактивними ізотопами йоду з допомогою препаратів стабільного йоду (йодна профілактика);
- тимчасова заборона вживання окремих продуктів харчування місцевого виробництва і використання води з місцевих джерел.

До довгострокових контрзаходів, які можуть здійснюватися і на ранній, і на пізній фазах аварії, належать:

- тимчасове відселення;
- переселення (на постійне місце проживання);
- обмеження вживання радіоактивно забруднених води і продуктів харчування;
- дезактивація територій;
- різноманітні сільськогосподарські контрзаходи;
- інші контрзаходи (гідрологічні, включаючи протиповеневі, обмеження, пов'язані з лісокористуванням, полюванням, рибною ловлею та ін.).

Припинення втручання має бути, коли оцінки доз показують, що подальше його продовження не виправдане, оскільки величина невідвернутого залишкового рівня дози виявляється нижче прийнятної. НРБУ–97 встановлює наступний залишковий прийнятний сумарний рівень зовнішнього і внутрішнього опромінення:

- 1) 1 мЗв за рік для хронічного опромінення тривалістю більше 10 років;
- 2) 5 мЗв сумарно за перші два роки;
- 3) 15 мЗв сумарно за перші 10 років.

Ці значення повинні враховуватись при визначенні розмірів (границь) зони аварії.

### **?** Питання для самоконтролю:

1. Охарактеризувати регламенти третьої групи.
2. Класифікація радіаційних аварій.
3. Фази радіаційної аварії.
4. Які аварії відносять до комунальних?
5. Екстрені контрзаходи.
6. Невідкладні контрзаходи.
7. Довгострокові контрзаходи.
8. Коли припиняється втручання при радіаційній аварії?

## Регламенти 4 групи

Регламенти цієї групи спрямовані на зменшення доз хронічного опромінення людини від техногенно–підсилених джерел природного походження в умовах житлових та громадських споруд.

Величина ефективної питомої активності природних радіонуклідів у будівельних матеріалах та мінеральній сировині визначається як зважена сума питомих активностей радію–226 ( $A_{Ra}$ ), торію–232 ( $A_{Th}$ ) і калію–40 ( $A_K$ ) за формулою:

$$A_{ef} = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085A_K, \quad (4.1)$$

де 1,31 і 0,085 – зважуючі коефіцієнти для торію–232 і калію–40 відповідно по відношенню до радію–226.

Коли величина  $A_{ef}$  в будівельних матеріалах та мінеральній сировині нижче або дорівнює 370 Бк/кг (I клас), то вони можуть використовуватись для всіх видів будівництва без обмежень.

Будівельні матеріали та мінеральна сировина, в яких  $370 < A_{ef} \leq 740$  Бк/кг (II клас), можуть бути використані:

- для промислового будівництва;
- для будівництва шляхів.

Будівельні матеріали та мінеральна сировина, в яких  $740 < A_{ef} \leq 1350$  Бк/кг (III клас), можуть бути використані наступним чином:

*в межах населених пунктів:*

– для будівництва підземних споруд, покритих шаром ґрунту товщиною понад 0,5 м, де виключено тривале перебування людей (тобто з часом перебування більше 0,5 тривалості робочого дня);

- *поза межами населених пунктів:*
- для будівництва шляхів;
- для спорудження гребель;
- для спорудження інших об'єктів з малим часом перебування людей.

Для матеріалів, що мають естетичну цінність величина  $A_{ef}$  не повинна перевищувати 3700 Бк/кг. Вони використовуються для внутрішнього та зовнішнього оздоблення об'єктів громадського призначення, за виключенням дитячих закладів, та для зовнішнього оздоблення цокольних частин житлових будинків.

Потужність поглиненої в повітрі дози (ППД) гамма–випромінювання всередині приміщень будівель та споруд, які проектуються, будуються та реконструюються для експлуатації з постійним перебуванням людей не повинна перевищувати 4365 пГр/с (30 мкР/год.) , включаючи компоненту від природного фонового опромінення.

ППД всередині приміщень будівель та споруд, які експлуатуються з постійним перебуванням людей, не повинна перевищувати становить 7275 пГр/с (50 мкР/год), включаючи компоненту від природного радіаційного фону.

Середньорічна еквівалентна рівноважна об'ємна активність (ЕРОА) ізотопу радону-222 в повітрі будівель та споруд, які будуються та реконструюються для експлуатації з постійним перебуванням людей, не повинна перевищувати 50 Бк/м<sup>3</sup>, середньорічна ЕРОА радону-220 – 3Бк/м<sup>3</sup>.

ЕРОА радону-222 в зоні дихання в повітрі приміщень, які експлуатуються з постійним перебуванням людей не повинна перевищувати 100 Бк/м<sup>3</sup>, радону-220 (торону) – 6 Бк/м<sup>3</sup>.

Вміст природних радіонуклідів у питній воді не повинен перевищувати:  
Rn- 222 –100 Бк/кг;

Уран (сумарна активність природної суміші ізотопів) –0,7 Бк/кг;

Ra-226 – 0,7 Бк/кг;

Ra-2268 – 0,7 Бк/кг.

Величина ефективної питомої активності природних радіонуклідів у готовому виробі з фарфору, порцеляни, скла, визначається за формулою (4.1) і не повинна перевищувати 370 Бк/кг.

Рівні дій для окремих радіонуклідів природного походження в повітрі виробничих-приміщень складають:

– ППД на робочому місці – 7275 пГр/с (50 мкР/год.);

– середньорічна ЕРОА радону-222 в повітрі приміщення – 330Бк/м<sup>3</sup>;

– середньорічна ЕРОА радону-220 (торону) в повітрі приміщення – 18 Бк/м<sup>3</sup>;

– активність урану-238 та торію-232 в рівновазі з дочірніми продуктами розпаду у виробничому пилу повинні відповідати формулам, кБк/кг:

$$A_U \leq 28/f$$

$$A_{Th} \leq 24/f,$$

де f – безрозмірний коефіцієнт, що чисельно дорівнює середньорічній загальній запиленості повітря в зоні дихання, мг/м<sup>3</sup>.

Рівні дій не будуть перевищуватися, якщо виконуються нерівності:

$$\frac{E_{ext}}{РД_E} + \sum_i \frac{I_i^{inhalt}}{ДН_i^{inhalt}} \leq 1,$$

або

$$\frac{E_{ext}}{РД_E} + \sum_i \frac{C_i^{inhal}}{ДК_i^{inhal}} \leq 1,$$

де РД<sub>Е</sub> – рівень дій по величині ефективної дози.



**? Питання для самоконтролю:**

1. Охарактеризувати регламенти четвертої групи.
2. Як визначається величина ефективної питомої активності природних радіонуклідів у будівельних матеріалах?
3. Обмеження активності природних радіонуклідів у будівельних матеріалах.
4. Коли будівельні матеріали можуть використовуватися без обмежень?
5. Вимоги до потужності поглиненої в повітрі дози гамма-випромінювання всередині приміщень будівель та споруд.
6. Обмеження активності природних радіонуклідів у питній воді.
7. Що таке ЕРОА?
8. Вимоги до концентрації радону у приміщеннях.

## 5 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ВІД ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

### Захист відстанню і часом

Включають організаційні, гігієнічні, технічні і лікувально–профілактичні заходи, а саме:

- збільшення відстані між оператором і джерелом;
- скорочення тривалості роботи в полі випромінювання;
- екранування джерела випромінювання;
- дистанційне керування;
- використання маніпуляторів і роботів;
- повна автоматизація технологічного процесу;
- використання засобів індивідуального захисту і попередження

знаком радіаційної небезпеки;

– постійний контроль за рівнем випромінювання і за дозами опромінення персоналу.

Захист від внутрішнього опромінення полягає в усуненні безпосереднього контакту працюючих з радіоактивними речовинами і запобіганні попаданню їх в повітря робочої зони.

*Захист часом* досягається в результаті відповідної підготовки і організації робіт, складанням і дотриманням графіків, при яких час контакту з джерелами випромінювання мінімальний.

*Захист відстанню* при роботі з радіоактивними речовинами незначної активності передбачає використання ручних захватів і дистанційних універсальних маніпуляторів. Ручні маніпуляційні захвати передають рух і зусилля рук оператора на деяку відстань з відповідним збільшенням цих зусиль. Видалені універсальні маніпулятори дозволяють виконувати різні операції по захвату і переміщенню предметів, орієнтації їх під будь–яким кутом і т. ін. Вони мають декілька мір свободи, ними можна управляти з великої відстані. Спостереження за роботою маніпуляторів здійснюють за допомогою телевізійних систем, систем дзеркал і перископів.

Для роботи з радіоактивними речовинами великої активності застосовують автоматизоване обладнання і системи дистанційного керування. Ефективним способом захисту є екранування, яке дозволяє знижувати дозу опромінення на робочому місці до гранично допустимого рівня.

#### **?** Питання для самоконтролю:

1. Класифікація заходів захисту від ІВ.
2. Що таке захист відстанню? Наведіть приклади.
3. Що таке захист часом? Наведіть приклади.
4. Для якого виду ІВ найефективніший захист відстанню?
5. Коли застосовують ручні захвати для роботи з джерелами ІВ?

6. Коли застосовують дистанційні маніпулятори для роботи з джерелами ІВ?
7. Як здійснюється спостереження за роботою дистанційних маніпуляторів?

### Екранування

Захисні екрани від альфа–випромінювання, як правило, не застосовують, оскільки воно має малу проникність. Шар повітря в декілька сантиметрів або матеріалу в декілька міліметрів (скло, картон, фольга, одяг, гумові рукавички і та ін.) забезпечують досить повне поглинання випромінювання.

Для захисту від рентгенівського та гамма–випромінювання використовують матеріали з великою густиною: свинець, вольфрам, сталь. Чим більше густина, тим більш ефективність екрану. Закон поглинання рентгенівського або гамма–випромінювання речовиною має вид:

$$I = I_0 \exp(-\mu d),$$

де  $\mu$  – лінійний коефіцієнт ослаблення випромінювання,  $m^{-1}$  (додаток 4);  $d$  – товщина поглинаючого шару, м.

Якщо замість інтенсивності у наведену формулу підставити потужність поглиненої або експозиційної дози, втд залежності не зміниться.

Товщину екрану  $d$  (м) у випадку вузького монохромного (що має одну довжину хвилі) пучка променів розраховують за формулою:

$$d = \ln N/\mu,$$

де  $N$  – коефіцієнт, що показує, у скільки разів треба зменшити потужність випромінювання. Захисні властивості різних матеріалів для квантів енергією 1 МеВ надані у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Захисні властивості різних матеріалів від фотонів 1 МеВ

Матеріал	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Шар напівослаблення, см
1	2	3
Алюміній	2820	4,3
Бетон	1,5–3,5	3,8–6,9
Вода	1000	~10
Повітря	1,29	~8500
Вольфрам	19300	0,33
Збіднений уран	19500	0,28
Свинець	11350	0,8
Сталь	7,5–8,05	1,27

У разі широкого пучка випромінювання, або якщо має місце діапазон довжин хвиль, застосовують номограми або таблиці. Наприклад, товщину екрану з свинця або сталі для захисту від прямого гамма-випромінювання можна визначити за рис. (Додаток 6).

Пряме і розсіяне рентгенівське випромінювання. При напрузі на аноді рентгенівської трубки 75 ...300 кВ товщина захисного екрану зі свинцю, бетону визначається за даними додатку 6 залежно від коефіцієнта  $k_2 = 2 I / R^2$  (категорія А) і  $k_2 = I / 10 R^2$  (категорія Б), де  $I$  – сила струму в трубці, мА;  $R$  – відстань між трубкою і робітником.

Для захисних екранів від бета-часток малих енергій застосовують алюміній, скло, плексиглас, інший облицювальний матеріал з малою атомною масою. У випадку екранування бета-часток високих енергій в матеріалі екрану виникає гальмівне рентгенівське або гамма-випромінювання, яке враховують при виготовленні екранів. При цьому застосовуються подвійні екрани. Другий шар виготовляють з матеріалів з великою атомною масою і великою щільністю (свинець, вольфрам). Для стаціонарних споруд застосовують бетон, баритобетон, чавун, сталь, які одночасно є елементами будівельних конструкцій.

Захист від нейтронного випромінювання. Шар половинного ослаблення легких матеріалів для нейтронного випромінювання в кілька разів менше, ніж для важких. І навпаки, важкі матеріали, наприклад метали, гірше послаблюють нейтронне випромінювання, ніж гамма-випромінювання.

Кращими для захисту від нейтронного випромінювання є графіт і матеріали, що мають у своїй будові атоми водню. Зазвичай застосовують воду, парафін, поліетилен. Крім того, теплове нейтронне випромінювання добре поглинається бором, берилієм, кадмієм. Оскільки нейтронні випромінювання супроводжуються гамма-випромінюваннями, необхідно застосовувати багат шарові екрани з різних матеріалів: свинець–поліетилен, сталь – вода тощо. У ряді випадків для одночасного поглинання нейтронного і гамма-випромінювань застосовують водні розчини гідроксидів важких металів, наприклад, гідроксид заліза  $Fe(OH)_3$ .

Застосовують захисні екрани різних конструкцій: стаціонарні, пересувні, розбірні, настільні.

Всякі роботи з радіоактивними ізотопами, а також технічне обслуговування приладів і установок, в яких використовуються ізотопи, необхідно виконувати в спеціально обладнаних окремих приміщеннях з санітарно-технічним устаткуванням і системою вентиляції. Роботу на установках з радіоактивними ізотопами слід виконувати особам не молодше 18 років, що пройшли спеціальне навчання, у тому числі і безпечним методам роботи на установці. Всім працівникам необхідно знаходитися під постійним медичним спостереженням, їм регламентується тривалість робочого дня, видають спецодяг, прилади індивідуального дозиметричного контролю.

Безпека при роботі з радіоактивними речовинами залежить багато в чому від своєчасного виявлення і виміру рівня випромінювання, яке виконують спеціальними приладами, що використовують різні методи: іонізаційний,

сцинтиляційний, фотографічний, хімічний і люмінесцентний. Для виміру альфа-, бета-, гамма-випромінювання і рентгенівського, а також теплових нейтронів застосовують універсальні радіометри. При роботі з радіоактивними речовинами велике значення має також застосування засобів індивідуального захисту. Вони призначені для оберігання шкіри від забруднень радіоактивними речовинами і запобіганню попадання їх всередину організму. Одночасно вони забезпечують захист від альфа-випромінювання і частково від бета-випромінювання. Засобами індивідуального захисту є: спецодяг, рукавички, респіратори, що ізолюють пневмокостюми, чоботи .

**? Питання для самоконтролю:**

1. Які екрани застосовуються для захисту від рентгенівського і гамма-випромінювання?
2. Які екрани застосовуються для захисту від нейтронного випромінювання?
3. Які екрани застосовуються для захисту від бета-променів?
4. Коли можна не застосовувати захисні екрани?
5. Напишіть формулу для закону поглинання речовиною рентгенівського і гамма-випромінювання.
6. Що таке лінійний коефіцієнт ослаблення?
7. Як захист від якого випромінювання застосовують водні розчини гідроксидів важких металів?
8. Що таке шар напівослаблення?

## **6 ПОВОДЖЕННЯ З ДЖЕРЕЛАМИ ВИПРОМІНЮВАННЯ І РАДІАЦІЙНИМИ ВІДХОДАМИ**

### **Організація робіт з джерелами іонізуючого випромінювання Радіаційний моніторинг**

Моніторинг радіаційний — система постійного спостереження і контролю наявності і міри радіоактивного забруднення місцевості, повітря, води, їжі, техніки і людей в певному районі; оцінка вихідного стану радіаційного забруднення довкілля, виявлення тенденцій до його зміни і попередження про критичні ситуації, що створюються, шкідливі або небезпечні наслідки. Моніторинг радіаційний організується і проводиться за спеціальною програмою на глобальному, національному (державному), регіональному і локальному рівнях. Він включає збір первинної інформації (вимір потужності поглиненої в повітрі дози, визначення вмісту радіонуклідів – наприклад цезій–137 і стронцій–90, в об'єктах довкілля, продуктах харчування, воді і ін.) з метою подальшого використання цієї інформації для контролю радіаційно–гігієнічного і контролю дозиметричного.

Радіаційний моніторинг включає систему стеження за тимчасовою і просторовою динамікою радіаційного фону у фіксованих об'єктах спостереження. Можна виділити два види радіаційних спостережень: фоновий і імпактний моніторинг. Фоновий здійснює стеження за зміною радіаційних параметрів, які можуть бути викликані трансграничними перенесеннями радіоактивного забруднення (продукти ядерних вибухів, ядерних аварій, космогенні ізотопи). Імпактний моніторинг здійснює стеження за зміною радіаційних параметрів від локальних джерел радіоактивного забруднення (підприємства ядерного паливного циклу).

Кожна точка на Землі має свій радіаційний фон, який здебільше є природним фоном для даної місцевості. Зміна фону в даній конкретній точці у бік його підвищення може свідчити лише про одне: техногенне радіоактивне забруднення. Основне завдання радіаційного моніторингу зводиться до оперативного виявлення надфонових рівнів радіаційного фону, які є симптомами виникнення надзвичайних ситуацій.

Ґрунт є акумулятором всього забруднення, що випадало будь–коли на поверхню землі. По аналізу ґрунтових проб судять про сумарне радіоактивне забруднення даної місцевості.

Атмосферне повітря є найбільш мобільним природним середовищем, в яке здійснюються викиди підприємств, у тому числі і аварійні. Тому для найбільш оперативного виявлення підвищень радіаційного фону здійснюється моніторинг саме цього середовища. Радіаційний моніторинг поверхневих вод здійснюється на тих водних об'єктах, в які здійснюється або здійснювалося скидання або відбувалося осідання радіоактивних речовин з атмосфери.

Ядерна ера людства почалася після другої світової війни створенням підприємств по напрацюванню збройового плутонію, ядерними випробуваннями атомних бомб в атмосфері і інших природних середовищах, ядерних бомбардувань японських міст Хіросіми і Нагасакі. З метою підтримки

ядерного паритету в 40–50-і роки ХХ століття спостерігалася гонка ядерних озброєнь. Це зрештою привело до того, що в довкіллі з'явилися такі радіоактивні елементи, яких не спостерігалось раніше (продукти ділення ядер атомів). Радіаційний глобальний фон поступово підвищувався і досяг свого максимуму в 1963 році. Після підписання московського договору в 1963 році про заборону надземних ядерних випробувань, інжектування радіоактивних речовин в атмосферу практично припинилося. Максимальна щільність глобальних випадань радіонуклідів цезію–137 досягала в 1963 році 450 Бк/м<sup>2</sup> в рік, стронцію–90– 280 Бк/м<sup>2</sup> в рік. В даний час ці величини знаходяться на рівні одиниць Бк/м<sup>2</sup> в рік.

В даний час значимішими в плані радіоактивного забруднення природного довкілля є підприємства ядерного паливного циклу: підприємства по видобутку і збагаченню урану, виробництву ядерного палива, атомні електростанції, підприємства по переробці відпрацьованого ядерного палива. Газоаерозольні викиди підприємств, що розсіюються з врахуванням метеорологічних умов, а також вторинні процеси перенесення радіоактивних речовин із забрудненіших територій є основними фізичними процесами, що впливають на динаміку розподілу техногенної радіоактивності в довкіллі.

### **Вимоги до організації робіт з джерелами ІВ**

Усі роботи з радіоактивними речовинами (РР) та іншими джерелами ІВ мають бути організовані таким чином, щоб забезпечувалася радіаційна безпека персоналу і населення, а також охорона навколишнього середовища від радіоактивного забруднення. Вимоги, що забезпечують радіаційну безпеку таких робіт, викладені в "Основних санітарних правилах роботи з радіоактивними речовинами й іншими джерелами РВ ОСП–72/87". Це вимоги до розміщення установок; організації робіт і робочих місць; одержання, обліку, зберігання і перевезення джерел РВ; вентиляції, пилогазоочищення, опалення, водопостачання і каналізації; зберігання, видалення і знешкодження радіоактивних відходів. В ОСП сформульовані положення щодо вмісту РР і дезактивації робочих приміщень та устаткування; про заходи індивідуального захисту й особистої гігієни; з організації радіаційного дозиметричного контролю; з попередження радіаційних аварій і ліквідації їх наслідків.

Виробництво, обробка, застосування, зберігання, транспортування джерел РВ, переробка і знешкодження радіоактивних відходів здійснюється з дозволу і під контролем органів та установ Держсаннагляду, яким надається вся інформація, необхідна для оцінки можливої радіаційної небезпеки відповідної установи.

### **Вимоги до приміщень**

Місця для розміщення установ, призначених для роботи з джерелами ІВ, мають відповідати вимогам "Санітарних норм проектування промислових підприємств СН245–71\*" та ОСП.

Забороняється розміщення таких установ у житлових будинках, громадських і дитячих закладах. Місця для будівництва установ, призначених для роботи з відкритими джерелами, слід вибирати з підвітряної сторони щодо житлових будинків, дитячих, громадських закладів, зон відпочинку.

Навколо установ із джерелами РВ у разі потреби встановлюється санітарно–захисна зона (СЗЗ) і зона спостереження (ЗС). У СЗЗ при нормальній роботі установи рівень опромінення людей може перевищити ГД, тому тут забороняється будівництво житлових будинків, а також будинків і споруд, що не стосуються роботи цієї установи. У зоні спостереження опромінення може досягати ГД, але у ній проводиться радіаційний контроль.

Розміри зон визначаються на основі розрахунку дози зовнішнього опромінення, поширення радіоактивних викидів у атмосферу і скидів у водоймища й у кожному конкретному випадку встановлюються за узгодженням із органами Держсаннагляду. Розміри ЗС звичайно в кілька разів більші, ніж СЗЗ. Наприклад, СЗЗ АБС має радіус 3–5 км, а ЗС може простягатися на відстань 20–30 км від АЕС.

Устаткування, контейнери, упаковка, транспортні засоби, приміщення, призначені для робіт із джерелами РВ, повинні мати попереджувальний знак радіаційної небезпеки.

### **Організація робіт**

Установи, приміщення й установки для роботи з джерелами РВ до початку їх експлуатації мають бути прийняті компетентною комісією на підставі акта приймання. Місцеві органи Держсаннагляду оформляють на термін до трьох років санітарний паспорт установи, що дає право зберігання і проведення робіт із джерелами РВ. Адміністрація установи:

- визначає перелік осіб для роботи з джерелами РВ;
- розробляє правила внутрішнього розпорядку, інструкцію з радіаційної безпеки, інструкцію з попередження і ліквідації аварій;
- навчає й інструктує працівників;
- періодично перевіряє знання правил ведення робіт і чинних інструкцій;
- призначає відповідальних за радіаційний контроль і безпеку;
- організовує обов'язковий медичний контроль при прийнятті на роботу і періодичні медогляди.

В інструкції з радіаційної безпеки викладаються порядок проведення робіт; облік зберігання і видачі джерел РВ; скидання і видалення радіоактивних відходів; стан приміщень; заходи особистої профілактики; організація проведення радіаційного контролю.

Найбільш складний комплекс захисних заходів передбачається при роботі з РР у відкритому вигляді, оскільки необхідно забезпечити захист людей не тільки від зовнішнього, а й від внутрішнього опромінення і запобігти забрудненню навколишнього середовища. Така небезпека існує при роботі



ядерних реакторів, у радіохімічному виробництві, особливо при проведенні ремонтів.

До основних захисних заходів належать: вибір устаткування, технологічних режимів, планування й обробка приміщень; раціональне планування робочих місць, режиму вентиляції, захисту від зовнішнього і внутрішнього опромінення, збирання й утилізації радіоактивних відходів; дотримання заходів особистої гігієни і використання засобів індивідуального захисту.

За ступенем радіаційної небезпеки РР поділяються на чотири групи в міру зменшення небезпеки: А, Б, В, Г (табл. 6.1). Залежно від групи РР і фактичної активності їх на робочому місці встановлюється три класи робіт (табл. 6.2).

Таблиця 6.1— Групи радіаційної небезпеки радіоактивних речовин

Група РР	Найменування радіонуклідів	Мінімально значима активність на робочому місці, Бк
група А	уран-232; торій-228, 230; радій-226, 228; кюрій-242, 248; свинець-210.	1000
група Б	уран-230, 233, 236; торій-227; плутоній-241, 243; радій-223, 224; йод-125,126,129,131 та ін.	Від $10^4$ до $10^5$
група В	йод-132, 135; фосфор-32; натрій-23, 24; марганець-52, 54, 56; кобальт-56, 58, 60 та ін.	Від $10^6$ до $10^7$
група Г	йод-123; торій-232, 234; фосфор-33; вуглець-14; кремній-31; тритій-3 та ін.	Більше $10^8$

**Примітка.** Мінімально значима активність - це активність відкритого джерела іонізуючого випромінювання в приміщенні або на робочому місці, при перевищенні якої потрібен дозвіл органів державної санітарно-епідеміологічної служби на використання цих джерел.

Приміщення для робіт класів I і II ізолюють від інших та обладнують санпропускником, душовою і пунктом радіаційного контролю. Приміщення для робіт класу I розділяються на три зони:

перша зона — приміщення, що не обслуговуються, де розміщуються основні джерела ІВ і радіоактивного забруднення;

друга зона - завантаження, що обслуговується періодично під час ремонту і вивантаження РР, тимчасового зберігання і видалення радіоактивних відходів;

третья зона - приміщення постійного перебування персоналу. Для виключення можливості винесення забруднень між приміщеннями другої і третьої зони обладнується спеціальний шлюз. Стіни, підлоги, стелі,

устаткування і робочі меблі в приміщеннях для робіт класів II і I мають мати гладку поверхню і слабо сорбуючі покриття, що полегшують видалення радіоактивних забруднень. Краї покриття підлоги повинні бути закріплені й забиті врівень зі стінами. Вентиляційні й повітроочисні пристрої мають забезпечити захист від забруднення повітря всередині приміщень та зовнішнього повітря.

Таблиця 6.2 — Класи робіт з радіоактивними речовинами

Група небезпеки РР	МЗА, кБк	Активність на робочому місці, кБк		
		Клас робіт		
		I	II	III
A	1	$\geq 10^5$	Від $10^2$ до $10^5$	Від 1 до $10^2$
B	10	$\geq 10^6$	Від $10^3$ до $10^6$	Від 10 до $10^3$
B	100	$\geq 10^7$	Від $10^4$ до $10^7$	Від 100 до $10^4$
Г	1000	$\geq 10^8$	Від $10^5$ до $10^8$	Від $10^3$ до $10^5$

На етапах одержання, транспортування і зберігання джерел РВ передбачається виконання комплексу організаційних, технічних та інших заходів, що запобігають їх уособлюванню і потраплянню в навколишнє середовище. Тут важливі дисциплінованість і відповідальне ставлення до виконання посадових обов'язків. Негативні приклади, що характеризують можливість радіоактивного забруднення НС і навіть безконтрольного поширення компонентів ядерної зброї, неодноразово наводилися в засобах масової інформації.

### **Одержання, облік і зберігання джерел радіоактивних випромінювань**

Постачання установі джерел РВ проводять за заявкою, погодженою з органами Держсаннагляду і внутрішніх справ. Адміністрація установи несе відповідальність за збереження джерел РВ і має забезпечити такі умови зберігання, надходження, одержання, використання, витрати і списання з обліку всіх джерел РВ, за яких виключається можливість їх втрати чи безконтрольного використання. Джерела РВ мають приймати відповідальні особи, які призначені наказом керівника установи і ведуть систематичний облік наявності і руху джерел РВ в установі, у підзвітних осіб, у сховищах і відходах.

Виконавці робіт одержують джерела РВ тільки за письмовим дозволом керівника, від ним уповноваженої особи, несуть відповідальність за збереження джерел з моменту одержання до їх повернення чи списання.

## Транспортування радіоактивних речовин

Умови безпеки транспортування РР регламентуються "Правилами безпеки при транспортуванні РР" й основними правилами безпеки і фізичного захисту під час перевезення ядерних матеріалів (ОПБЗ–83).

РР транспортуються як безпечні вантажі, якщо їх активність є меншою за встановлену межу (для різних радіонуклідів від  $10^6$  до  $10^2$  Кі) при потужності еквівалентної дози на поверхні упаковки не більше 3 мкЗв/годину. Транспортування радіоактивних вантажів здійснюється в транспортних пакувальних комплектах, що можуть складатися з кількох елементів, вкладених один в іншій.

За матеріалом, із якого виготовлені захисні протирадіаційні пристрої (ПРП), пакувальні комплекти поділяються на три види:

I – для перевезення у та інших видів РВ, крім нейтронного. Захисні ПРП роблять зі свинцю, чавуна, сталі чи інших важких матеріалів;

II – для перевезення джерел нейтронних випромінювань. Захисні ПРП роблять із матеріалів, що містять водень, із додаванням бору і кадмію;

III – для джерел  $\beta$ -випромінювання; захисні ПРП виготовляють із легких матеріалів (алюмінію, пластмас).

За здатністю зберігати захисні і герметичні властивості при зовнішніх впливах пакувальні комплекти поділяють на два типи:

A – витримують впливи, що трапляються у звичайній практиці транспортування (падіння з невеликої висоти, удар сусіднього вантажу, стискання, злива);

B – витримують аварійні умови без зміни захисних властивостей. Установлено чотири транспортні категорії радіаційної упаковки (I, II, III, IV), що визначаються рівнем радіації в будь-якій точці на зовнішній поверхні упаковки та на відстані 1 м від неї.

### ? Питання для самоконтролю:

1. Що таке радіаційний моніторинг?
2. Як змінювався на протязі 20-21 століть глобальний радіаційний фон?
3. Де забороняється розміщення установ, призначених для роботи з джерелами ІВ?
4. Вимоги до санітарно-захисної зони.
5. Групи радіоактивних речовин за ступенем радіаційної небезпеки.
6. Класи робіт з радіоактивними речовинами.
7. Вимоги до приміщень для робіт I і II класів.
8. Вимоги до транспортування радіоактивних речовин.

## Видалення радіаційних відходів Класифікація радіоактивних відходів

Нижче наведена класифікація рідких та твердих радіоактивних відходів (РАВ) відповідно до «Основних санітарних правил забезпечення радіаційної безпеки» (ОСПЗРБ 99/2010) (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 — Класифікація рідких та твердих радіоактивних відходів (РАВ) відповідно до «Основних санітарних правил забезпечення радіаційної безпеки»

Категорія відходів	Питома активність, кБк/кг			
	третій	бета– випромінюючі радіонукліди (виключаючи третій)	альфа– випромінюючі радіонукліди (виключаючи трансуранові)	трансуранові радіонукліди
<i>Тверді відходи</i>				
Дуже низькоактивні	до $10^7$	до $10^3$	до $10^2$	до $10^1$
Низькоактивні	від $10^7$ до $10^8$	від $10^3$ до $10^4$	від $10^2$ до $10^3$	від $10^1$ до $10^2$
Середньоактивні	від $10^8$ до $10^{11}$	від $10^4$ до $10^7$	від $10^3$ до $10^6$	від $10^2$ до $10^5$
Високоактивні	понад $10^{11}$	понад $10^7$	понад $10^6$	понад $10^5$
<i>Рідкі відходи</i>				
Низькоактивні	до $10^4$	до $10^3$	до $10^2$	до $10^1$
Середньоактивні	від $10^4$ до $10^8$	від $10^3$ до $10^7$	від $10^2$ до $10^6$	від $10^1$ до $10^5$
Високоактивні	понад $10^8$	понад $10^7$	понад $10^6$	понад $10^5$

Одним із критеріїв такої класифікації є тепловиділення. У низькоактивних РАВ тепловиділення надзвичайно мале. У середньоактивних воно істотно, але активний відвід тепла не потрібен. У високоактивних РАВ тепловиділення настільки велике, що вони вимагають активного охолодження.

Для поділу РАВ на типи використовується критерій, що враховує допустимість їх захоронення у поверхневих (приповерхневих) сховищах, альтернативою якому є захоронення РАВ у стабільних геологічних формаціях. За цим критерієм РАВ поділяють на два типи: короткоіснуючі, довгоіснуючі (табл. 6.4).

Довгоіснуючі РАВ — відходи, рівень звільнення яких від контролю з боку органу державного регулювання досягається через триста років і більше після їхнього захоронення.

Короткоіснуючі РАВ — відходи, рівень звільнення яких від контролю з боку органу державного регулювання досягається раніше, ніж через триста років після їхнього захоронення.

Таблиця 6.4 — Класифікація РАВ, заснована на критерії допустимості (недопустимості) їх захоронення у сховищах різних типів

Тип РАВ	Дози потенційного опромінення через 300 років після захоронення	Тип можливого звільнення в період до 300 років після захоронення	Тип захоронення РАВ
Короткоіснуючі	Нижче рівня Б	Повне, обмежене	Поверхнєве або приповерхнєве
Довгоіснуючі	Вище рівня А	Не розглядається	У стабільних геологічних формаціях

За показником «рівень вилучення» (звільнення), який встановлено для різних груп радіонуклідів, усі РАВ поділяються на чотири групи (табл. 6.5).

Таблиця 6.5 — Класифікація твердих радіоактивних відходів за критерієм «рівень вилучення»

Група РАВ	Тверді РАВ	Рівень вилучення кБк·кг <sup>-1</sup>
1	Трансуранові α-випромінюючі радіонукліди	0,1
2	α-випромінюючі радіонукліди (за винятком трансуранових)	1
3	β-, γ-випромінюючі радіонукліди (за винятком віднесених до групи 4)	10
4	3H, 14C, 36Cl, 45Ca, 53Mn, 59Fe, 63Ni, 93mNb, 99Tc, 109Cd, 135Cs, 147Pm, 151Sm, 171Tm, 204Tl	100

Примітка: При наявності у складі радіоактивних відходів кількох радіонуклідів, які належать до однієї групи, їх питома активність додаються.

### **Поводження з радіоактивними відходами**

Спочатку вважалося, що достатньою мірою є розсіювання радіоактивних ізотопів у навколишнє середовище, за аналогією з відходами виробництва в інших галузях промисловості.

Пізніше з'ясувалося, що за рахунок природних і біологічних процесів радіоактивні ізотопи концентруються у тих чи інших підсистемах біосфери (в основному у тварин, в їх органах і тканинах), що підвищує ризики опромінення населення (за рахунок переміщення великих концентрацій радіоактивних елементів і можливого потрапляння їх з їжею в організм людини). Тому ставлення до радіоактивних відходів було змінено.

На даний момент МАГАТЕ сформульовано ряд принципів, націлених на таке поведження з радіоактивними відходами, яке забезпечить захист здоров'я людини та охорону навколишнього середовища зараз і в майбутньому, не накладаючи надмірного тягаря на майбутні покоління:

1) Захист здоров'я людини. Поводження з радіоактивними відходами здійснюється таким чином, щоб забезпечити прийнятний рівень захисту здоров'я людини.

2) Охорона навколишнього середовища. Поводження з радіоактивними відходами здійснюється таким чином, щоб забезпечити прийнятний рівень охорони навколишнього середовища.

3) Захист за межами національних кордонів. Поводження з радіоактивними відходами здійснюється таким чином, щоб враховувалися можливі наслідки для здоров'я людини і навколишнього середовища за межами національних кордонів.

4) Захист майбутніх поколінь. Поводження з радіоактивними відходами здійснюється таким чином, щоб передбачені наслідки для здоров'я майбутніх поколінь не перевищували відповідні рівні наслідків, які прийнятні в наші дні.

5) Тягар для майбутніх поколінь. Поводження з радіоактивними відходами здійснюється таким чином, щоб не накладати надмірного тягаря на майбутні покоління.

6) Національна правова структура. Поводження з радіоактивними відходами здійснюється в межах відповідної національної правової структури, яка передбачає чіткий розподіл обов'язків і забезпечення незалежних регулюючих функцій.

7) Контроль за утворенням радіоактивних відходів. Утворення радіоактивних відходів утримується на мінімальному практично здійсненому рівні.

8) Взаємозалежності утворення радіоактивних відходів і поведження з ними. Належним чином враховуються взаємозалежності між усіма стадіями утворення радіоактивних відходів і поведження з ними.

9) Безпека установок. Безпека установок для поводження з радіоактивними відходами належним чином забезпечується протягом всього терміну їх служби.

Основні стадії поводження з радіоактивними відходами наведено на рис.6.1.

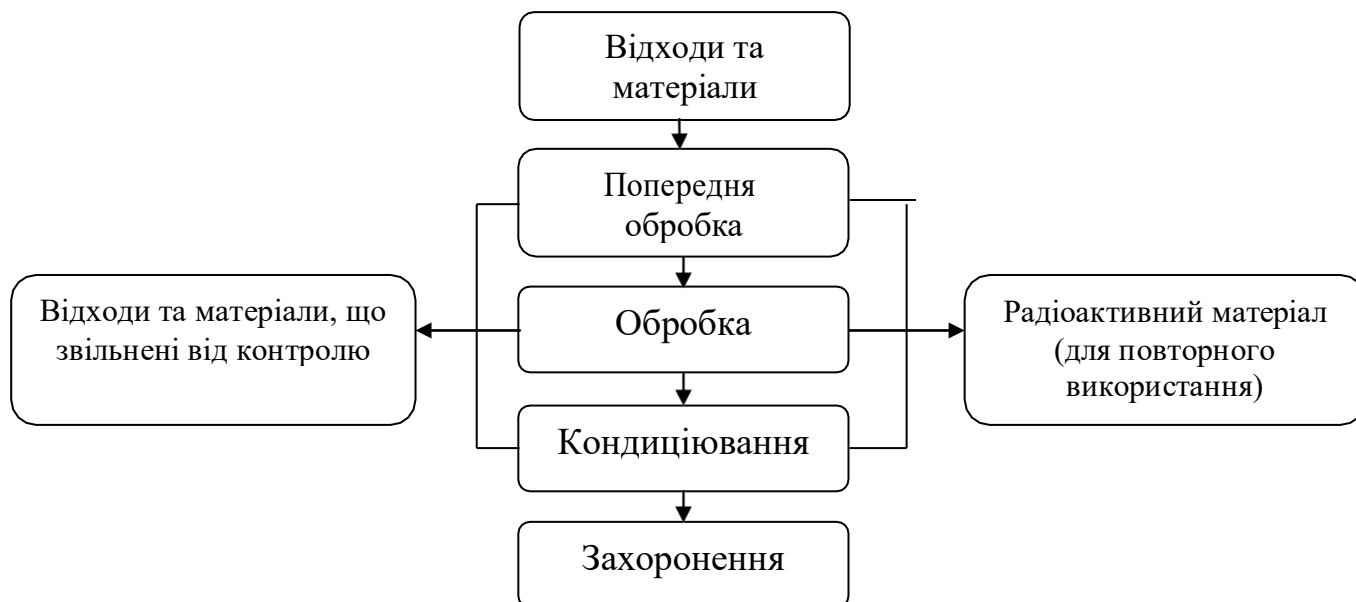


Рисунок 6.1 — Основні стадії поводження з радіоактивними відходами

Обробка радіоактивних відходів включає операції, мета яких полягає у підвищенні безпеки або економічності шляхом зміни характеристик радіоактивних відходів. Основні концепції обробки: зменшення обсягу, видалення радіонуклідів і зміна складу. Приклади:

- спалювання горючих відходів або ущільнення сухих твердих відходів;
- випарювання, фільтрування або іонний обмін потоків рідких відходів;
- осадження або флокуляція хімічних речовин.

Кондиціонування радіоактивних відходів складається з таких операцій, у процесі яких радіоактивним відходам надають форму, прийнятну для переміщення, перевезення, зберігання та захоронення. Ці операції можуть включати іммобілізацію радіоактивних відходів, розміщення відходів у контейнери і забезпечення додаткової упаковки. Загальноприйнятні методи іммобілізації включають затвердіння рідких радіоактивних відходів низького і середнього рівнів активності шляхом їх включення в цемент (цементування) або бітум (бітумування), а також осклування рідких радіоактивних відходів. Іммобілізовані відходи у свою чергу залежно від характеру та їх концентрації можуть упаковуватися в різні контейнери, починаючи від звичайних 200–літрових бочок до контейнерів з товстими стінками, що мають складну

конструкцію. У багатьох випадках обробка і кондиціонування проводяться в тісному зв'язку один з одним.

Захоронення головним чином полягає в тому, що радіоактивні відходи містяться в установку для захоронення при відповідному забезпеченні безпеки без наміру їх вилучення і без забезпечення довгострокового спостереження за сховищем і технічного обслуговування. Безпека в основному досягається за допомогою концентрації і утримання, що передбачає ізоляцію належним чином концентрованих радіоактивних відходів в установці для захоронення.

Довготривале зберігання РАВ вимагає консервації відходів у формі, яка не буде вступати в реакції і руйнуватися на протязі довгого часу. Одним із способів досягнення такого стану є витрифікація (або оскліювання). В даний час в Селлафілд (Великобританія) високоактивні РАВ (очищені продукти першої стадії пурекс–процесу) змішують з цукром і потім кальцинують. Кальціювання передбачає проходження відходів через нагріту обертову трубу і ставить метою випаровування води і деазотування продуктів ділення, щоб підвищити стабільність одержуваної склоподібної маси.

В отриману речовину, що знаходиться в індукційній печі, постійно додають подрібнене скло. У результаті виходить нова субстанція, в якій при затвердінні відходи зв'язуються зі скляною матрицею. Це речовина в розплавленому стані вливається в циліндри з легованої сталі. Охолоджуючись, рідина твердне, перетворюючись на скло, яке є вкрай стійким до впливу води.

Після заповнення циліндр заварюють, потім миють. Після обстеження на предмет зовнішнього забруднення сталеві циліндри відправляють в підземні сховища. Такий стан відходів залишається незмінним протягом багатьох тисяч років.

Скло усередині циліндра має гладеньку чорну поверхню. У Великобританії вся робота виконується з використанням камер для роботи з високоактивними речовинами. Цукор додається для запобігання утворення летючих речовин  $\text{RuO}_4$ , що містить радіоактивний рутеній.

Пошуки підходящих місць для глибокого остаточного захоронення відходів в даний час ведуться у декількох країнах. Очікувалося, що перші подібні сховища вступлять в експлуатацію після 2010 року. Міжнародна дослідницька лабораторія в швейцарському Гримзеле займається проблемами захоронення РАВ.

Швеція говорить про свої плани по прямому захороненню використаного ядерного палива з використанням технології KBS-3, після того, як шведський парламент визнав її досить безпечною. У Німеччині в даний час ведуться дискусії про пошуки місця для постійного зберігання РАВ, але активні протести заявляють мешканці села Горлебен у Нижній Саксонії. Зараз РАВ знаходяться в Горлебені на тимчасовому зберіганні, рішення про місце їх остаточного захоронення поки не прийнято. Влада США обрала місцем поховання Юкка–Маунтін (штат Невада), однак цей проект зустрів сильну протидію і став темою палких дебатів. У Фінляндії почалося будівництво глибокого геологічного захоронення Onkalo.



Існує проект створення міжнародного сховища високоактивних РАВ. В якості можливих місць захоронення пропонуються місцевості в Австралії і Росії. Однак влада Австралії виступає проти такої пропозиції.

Існують проекти захоронення РАВ в океанах, серед яких — захоронення під абисальною зоною морського дна, захоронення в зоні субдукції (протяжна зона, уздовж якої відбувається занурення одних блоків земної кори під інші. Найчастіше в них океанічна кора підсувається під острівну дугу або активну континентальну окраїну, і занурюється в мантію), в результаті чого відходи будуть повільно опускатися до земної мантії, а також поховання під природним або штучним островом. Дані проекти мають очевидні переваги і дозволять вирішити на міжнародному рівні неприємну проблему захоронення РАВ, але, незважаючи на це, в даний час вони заморожені через заборону положень морського права. Інша причина полягає в тому, що в Європі і Північній Америці серйозно побоюються витоків з подібного сховища, що призведе до екологічної катастрофи. Реальна можливість такої небезпеки не доведена, але, тим не менш, заборони були посилені після скидання РАВ з кораблів. Проте, в майбутньому про створення океанських сховищ РАВ здатні серйозно задуматися країни, які не зможуть інакше вирішити дану проблему.

Більш реальним виглядає проект під назвою «Remix & Return» (Переміщення і повернення), суть якого полягає в тому, що високоактивні РАВ, змішані з відходами з уранових рудників і збагачувальних фабрик до початкового рівня радіоактивності уранової руди, потім будуть поміщені в порожні уранові рудники. Переваги даного проекту: зникнення проблеми високоактивних РАВ, повернення речовини на місце, призначене йому природою, забезпечення роботою гірників, та забезпечення циклу видалення і знешкодження для всіх радіоактивних матеріалів.

*Трансмутація.* Існують розробки реакторів, що використовують в якості палива РАВ, перетворюючи їх на менш шкідливі відходи, зокрема, інтегральний ядерний реактор на швидких нейтронах, не виробляє трансуранові відходи, а, по суті, споживає їх. Проект був заморожений урядом США на стадії великомасштабних випробувань. Іншою пропозицією, більш безпечною, але яка вимагає додаткових досліджень, є переробка підкритичними реакторами трансуранових РАВ.

Існують також теоретичні дослідження, присвячені використанню термоядерних реакторів в якості «актиноїдних печей». В такому комбінованому реакторі швидкі нейтрони термоядерної реакції ділять важкі елементи (з виробленням енергії) або поглинаються довгоживучими ізотопами з утворенням короткоживучих. В результаті досліджень, нещодавно проведених Массачусетським технологічним інститутом, було виявлено, що всього 2-3 термоядерних реактора, схожих за параметрами з міжнародним експериментальним термоядерним реактором ІТЕР, здатні переробити кількість актиноїдів, що виробляється всіма ядерними реакторами на легкій воді. Крім цього, кожен такий термоядерний реактор буде виробляти близько 1 гігават енергії.

*Повторне використання РАВ.* Ще одним застосуванням ізотопів, що містяться в РАВ, є їх повторне використання. Вже зараз цезій–137, стронцій–90, технецій–99 та деякі інші ізотопи використовуються для опромінення харчових продуктів і забезпечують роботу радіоізотопних термоелектричних генераторів.

*Вилучення РАВ у космос.* Відправка РАВ у космос є привабливою ідеєю, оскільки РАВ назавжди видаляються з навколишнього середовища. Однак у подібних проєктів є значні недоліки, один з найважливіших — можливість аварії ракети–носія. Крім того, значне число запусків і велика їх вартість робить цю пропозицію непрактичною. Справа також ускладнюється тим, що досі не досягнуто міжнародної угоди з приводу даної проблеми.

*Могильники.* Могильники призначені для захоронення твердих і короткоживучих відходів (з обмеженим вмістом довгоіснуючих радіонуклідів), термін потенційної небезпеки яких порівнянний з тривалістю функціонування інженерних бар'єрів системи захоронення.

Площадка повинна мати топографію, яка не сприяє затопленню, і не повинна бути розташована в прибережній зоні, в заплавах річок і болотистій місцевості. Місце розташування повинно бути з низьким рівнем розташування ґрунтових вод. Могильник повинен бути розташований в сухій зоні: нижче або вище горизонту ґрунтових вод. Не допускається будувати могильники в місцях, схильних до коливань рівня ґрунтових вод. Необхідно уникати зон верхового дренажу для виключення стоків, які можуть розмити або затопити могильник. Не допускається використовувати місця з активними тектонічними процесами, з високою сейсмічною та вулканічною активністю. Слід уникати районів з явними ознаками поверхневих геологічних процесів (ерозія, осідання, зсуви, вивітрювання). Не допускається використання місць, в яких ведуть або будуть вести видобуток корисних копалин. Не допускається розміщувати могильники на водозбірних площах підземних водних об'єктів, які використовують або можуть бути використані для питного або господарсько–побутового водопостачання.

Місця розміщення могильників повинні бути віддалені від населених районів, місць відпочинку населення, відкритих водойм і водопровідних магістралей. Не рекомендується використовувати місця, де можливі демографічні зміни, пов'язані з збільшенням чисельності населення, чи є перспектива їх використання.

По конструкції могильники, облаштовані системою інженерних бар'єрів, підрозділяють на:

- кургани з огорожувальних залізобетонних конструкцій з упаковками РАВ;
- слабкозаглиблені залізобетонні споруди: траншеї, котловани, стовбури;
- геологічні утворення і порожнини природного і штучного походження.

До складу захисних бар'єрів конструкції курганного могильника або слабкозаглибленої залізобетонної споруди рекомендується включати:

- а) покривний екран — для забезпечення відсутності вологи при захороненні, що містить:

- протиінфільтраційний (гідроізолюючий) елемент для виключення проникнення до відходів атмосферних опадів і поверхневих вод;
  - дренажний елемент (шар), що запобігає надходженню води до гідроізолюючого елементу;
  - елементи, що перешкоджають проникненню людини, підземних тварин і коренів рослин і, відповідно, захищають гідроізолюючий елемент від руйнування;
- б) підстильний екран — для запобігання міграції вилужених з відходів радіонуклідів за межі конструкції споруди; екран складається з основи, сприйнятливої до механічних навантажень і сорбційного бар'єру, який утримує радіонукліди (при необхідності).

### **Вимоги до безпеки упаковок РАВ**

Вимоги до упаковок для довгострокового зберігання та захоронення високоактивних радіоактивних відходів від переробки відпрацьованого ядерного палива регламентуються.

З метою забезпечення захисту персоналу і населення від зовнішнього опромінювання при зберіганні упаковок РАВ, а також у процесі поводження з упаковками РАВ до їх захоронення значення потужності дози іонізуючого випромінювання на поверхні упаковки мають:

- бути такими, щоб забезпечувалось виконання принципів неперевищення та оптимізації;
- відповідати вимогам щодо забезпечення безпеки персоналу та навколишнього природного середовища при поводженні з упаковками РАВ у період експлуатації сховища для зберігання та захоронення високоактивних РАВ (далі – сховища).

Рівні нефіксованого забруднення на зовнішній поверхні упаковок РАВ не повинні перевищувати допустимих рівнів загального радіоактивного забруднення, встановлених чинними нормативними документами щодо забруднення робочих поверхонь приміщень періодичного перебування персоналу та розміщеного в них обладнання.

Необхідність введення обмежень щодо рівнів фіксованого забруднення зовнішньої поверхні упаковки РАВ визначається результатами оцінки безпеки сховища, в якому ці упаковки будуть розміщені на зберігання або захоронення.

Упаковка РАВ забезпечує надійну ізоляцію вміщених у неї високоактивних РАВ від довкілля та запобігає міграції радіонуклідів у навколишнє природне середовище за умов нормальної експлуатації сховища і обмежує радіоактивні викиди при аварійних ситуаціях та аваріях.

Захисні властивості упаковки РАВ мають відповідати таким вимогам:

– стійкість до фізичних, хімічних, радіаційних, біологічних впливів (природних та техногенних);

– стабільність характеристик протягом визначеного проектом сховища строку;

– сумісність упаковок РАВ з інженерними і природними бар'єрами сховища.

Вміст ядерних матеріалів, конструкція та геометричні розміри упаковки РАВ, а також порядок проведення робіт з ними повинні бути такими, що виключають можливість виникнення самопідтримуючої ланцюгової реакції.

Упаковка РАВ не повинна містити:

– вільної рідини;

– сильних окислювачів;

– хімічно нестійких речовин;

– корозійно активних речовин;

– органічних та біологічно активних речовин;

– легкозаймистих і вибухо– та пожежонебезпечних речовин і предметів;

– речовин, здатних до детонації або розкладу через вибух;

– речовин, екзотермічна взаємодія яких з водою супроводжується вибухом;

– речовин, які містять газоподібні продукти або здатні генерувати токсичні гази, пари та продукти їх мінералізації.

Рівень тепловиділення упаковки РАВ обмежується таким чином, щоб забезпечувалась стабільність фізичних, хімічних і механічних характеристик упаковки РАВ протягом визначеного проектом сховища строку.

Упаковки РАВ мають бути стійкими до зовнішньої пожежі. РАВ мають упаковуватися у такий спосіб, щоб ризик загоряння та розповсюдження пожежі у разі її виникнення був мінімальним навіть за умови механічного пошкодження упаковки РАВ. Допустимий вихід радіонуклідів з упаковок РАВ у результаті зовнішньої пожежі не повинен призводити до опромінення персоналу, що перевищує встановлені ліміти доз у відповідності з референтними ймовірностями виникнення критичних подій для потенційного опромінення.

Можливі зміни характеристик упаковки РАВ в умовах зберігання та/або захоронення (наприклад, за рахунок процесів розбухання форми високоактивних РАВ при підвищенні тиску чи за рахунок зменшення механічної міцності при зміні температури тощо) не повинні призводити до виходу радіонуклідів за межі упаковки РАВ протягом встановленого проектом сховища строку.

Об'єм порожнин в упаковці РАВ має бути мінімальним настільки, щоб не впливати на міцність та проникність упаковки РАВ.

#### *Вимоги до конструкції упаковок РАВ*

Конструкція, основні параметри та розміри упаковки РАВ встановлюються з урахуванням фізико-хімічних, якісних та кількісних характеристик високоактивних РАВ.

Конструкція упаковки РАВ повинна бути технологічною, забезпечувати безпеку при виготовленні та експлуатації, передбачати можливість дезактивації її зовнішньої поверхні.

Конструкція упаковки РАВ забезпечує міцність та збереження форми з урахуванням як параметрів середовища усередині упаковки РАВ, так і зовнішніх впливів протягом строку служби упаковки РАВ, що визначаються проектом сховища для зберігання та/або захоронення.

Біологічний захист упаковки РАВ визначається розрахунковим шляхом та підтверджується експериментально з урахуванням перелічених вимог та властивостей матеріалів, які забезпечуватимуть біологічний захист.

Конструкція упаковки РАВ повинна мати елементи кріплення для опломбування заповнених упаковок.

Конструкція упаковки РАВ повинна забезпечувати збереження її форми і міцності на випадок штабелювання упаковок у сховищах (якщо таке штабелювання передбачено проектом сховища).

Конструкція упаковки РАВ повинна мати надійні кріплення строповочних пристроїв (захватних пристосувань) для переміщення упаковки РАВ. У випадку виходу з ладу строповочних пристроїв (захватних пристосувань) та падіння упаковки РАВ її конструкція повинна забезпечувати збереження захисних властивостей.

Визначення надійності кріплення строповочних пристроїв (захватних пристосувань) здійснюється на стадії проектування контейнера як складової упаковки РАВ.

Захисні властивості упаковки РАВ мають зберігатися в умовах навколишнього природного середовища у діапазоні температур від  $-40$  град.С до  $+70$  град.С, зменшення зовнішнього тиску до 60 кПа, вологості повітря до 100%.

Оператор сховища здійснює приймання упаковок РАВ відповідно до встановленої системи управління якістю.

#### *Вимоги до конструкційних матеріалів упаковок РАВ*

Матеріали для виготовлення упаковки РАВ повинні вибиратися так, щоб забезпечити збереження необхідних фізико-механічних характеристик та захисних властивостей упаковки

в умовах її експлуатації протягом усього строку служби, що визначається проектом сховища для зберігання та/або захоронення.

Якість та характеристики матеріалів для виготовлення упаковки РАВ підтверджуються відповідними сертифікатами або процедурою підтвердження відповідності.

#### *Вимоги щодо стійкості упаковок РАВ до зовнішніх впливів*

Міцність упаковок РАВ має бути такою, щоб при усіх можливих зовнішніх впливах (тиск, вигин, удар, пожежа тощо) під час зберігання та/або захоронення упаковок РАВ не відбувався вихід радіонуклідів за межі упаковки РАВ протягом встановленого проектом сховища строку.

Упаковки РАВ повинні зберігати захисні властивості від іонізуючого випромінювання, форму, міцність та герметичність за умов нормальної експлуатації сховища і обмежувати радіоактивні викиди при аварійних ситуаціях та аваріях.

Спроможність упаковки РАВ витримувати умови можливих аварійних ситуацій та проектних аварій на сховищі має бути продемонстрована методами тестування, узгодженими з Держатомрегулюванням.

#### *Вимоги до маркування упаковок РАВ*

Ідентифікація упаковок РАВ забезпечується їх паспортизацією і нанесенням на упаковки стійкого маркування.

На зовнішню поверхню кожної упаковки РАВ наноситься чітке маркування, що не змивається протягом строку служби упаковки РАВ, що визначається проектом сховища для зберігання та/або захоронення (методом карбування, штамповки, гравірування або іншим способом), яке містить такі відомості:

- знак радіаційної небезпеки;
- стисле найменування виробника упаковки РАВ;
- індивідуальний номер упаковки РАВ;
- дата завантаження високоактивних РАВ;
- маса бруто упаковки РАВ;
- сумарна активність високоактивних РАВ в упаковці;
- питома тепловиділення (кВт/куб.м).

Розмір шрифту, місце та спосіб нанесення маркування встановлюють у технічній документації на упаковку РАВ залежно від її розмірів.

#### *Вимоги до документації на упаковки РАВ*

На кожну упаковку (партію упаковок) РАВ при надходженні до сховища має бути надана документація, яка містить таку інформацію:

- стисле найменування виробника упаковок РАВ;
- кількість упаковок РАВ (для партії упаковок);
- індивідуальний номер упаковки (номери упаковок) РАВ;
- дата заповнення упаковки (упаковок) РАВ (день, місяць, рік);
- дата надходження упаковки (упаковок) РАВ на довгострокове зберігання та/або захоронення (день, місяць, рік);
- характеристики високоактивних РАВ (джерело утворення, форма, хімічний склад, величина сумарної активності (Бк), радіонуклідний склад, величина питомої активності радіонуклідів (Бк/куб.м або Бк/кг), дата їх визначення і опис атестованих методів, що використовувались;
  - методи кондиціонування високоактивних РАВ;
  - питома тепловиділення (кВт/куб.м);
  - потужність дози гамма-випромінювання на зовнішній поверхні контейнера;
  - рівень нефіксованого поверхневого забруднення контейнера;
  - тип та параметри упаковки РАВ (геометричні розміри упаковки, об'єм та маса РАВ в упаковці, маса брутто упаковки РАВ, тип контейнера, дані про сертифікацію контейнера);
  - відомості щодо періодичності проведення контролю показників якості упаковки (упаковок) РАВ.

Виробник упаковок РАВ та оператор сховища передбачають системи ведення реєстрації і обліку упаковок РАВ, які мають бути сумісними.

### ***Вимоги до контейнерів як складової упаковки РАВ***

#### ***Вимоги безпеки до контейнерів***

Контейнер забезпечує надійну ізоляцію розміщених в ньому високоактивних РАВ від навколишнього природного середовища та запобігає проникненню радіонуклідів в навколишнє природне середовище за умов нормальної експлуатації сховища і обмежує радіоактивні викиди при аварійних ситуаціях та аваріях.

Контейнер має зберігати захисні властивості від іонізуючого випромінювання високоактивних РАВ, форму, міцність та герметичність протягом усього строку служби.

Контейнер повинен забезпечувати можливість вилучення зі сховища для зберігання, перепакування РАВ в інші контейнери, дезактивації зовнішньої поверхні.

Строк служби контейнера для зберігання високоактивних РАВ визначається проектним терміном зберігання упаковки РАВ у сховищі для зберігання до часу остаточного захоронення.

Строк служби контейнера для захоронення високоактивних РАВ встановлюється з урахуванням характеристик високоактивних РАВ, сукупності захисних властивостей контейнера, інженерних споруд та

вміщуючих геологічних порід відповідно до проекту сховища для захоронення.

Контейнер подвійного призначення додатково виконує функції елемента транспортного пакувального комплексу.

*Вимоги до конструкції та конструкційних матеріалів контейнерів*

Вибір конструкції контейнера та конструкційних матеріалів ґрунтується на якісних та кількісних фізико–хімічних характеристиках форми високоактивних РАВ та способах подальшого поводження з упаковкою РАВ.

Товщина стінок контейнера визначається розрахунковим шляхом з урахуванням допусків на геометричні розміри і щільність захисних матеріалів, що технологічно можуть бути досягнуті при виготовленні контейнера.

У конструкції контейнера передбачається кришка та запірний пристрій, який виключає самочинне відкриття. Запірний пристрій контейнера має забезпечувати його герметичність, що визначено у технічній документації на контейнер, зокрема у технічних умовах.

На випадок нерівномірного розподілу навантажень між захватними пристосуваннями контейнер повинен мати мінімум чотири піднімальні точки.

Під час розрахунку строповочних пристроїв (захватних пристосувань) контейнера та призначених для його строповки конструктивних елементів має розглядатися найбільш несприятливий варіант навантаження, а також враховуються:

– асиметричність навантаження через невідповідність розташування центра ваги з центром контейнера;

– властивості матеріалу і геометричні властивості конструкцій, що несуть навантаження, з урахуванням старіння у часі.

Загальні вимоги до конструкційних матеріалів, що використовуються для виготовлення контейнерів, визначені у пунктах 16 і 17 Технічного регламенту ( 939–2007–п ).

Якість та характеристики матеріалів для виготовлення контейнера підтверджуються відповідними сертифікатами або процедурою підтвердження відповідності.

Виробник контейнерів здійснює вхідний контроль якості матеріалів та деталей контейнерів відповідно до діючої системи управління якістю.

Здатність конструкції контейнера забезпечувати збереження захисних властивостей упаковки РАВ підтверджується розрахунковими методами, висновками незалежних експертиз та шляхом проведення випробувань. Види випробувань (випробування захисних властивостей, герметичності, термостійкості, надійності



строповочних пристроїв, відповідності контейнера умовам нормальної експлуатації), обсяги, послідовність, кількість зразків для випробування та методи контролю встановлюються у технічній документації на контейнер, зокрема у технічних умовах. Програма та методика проведення випробувань погоджуються з Держатомрегулюванням.

Рекомендовані методи випробування контейнерів для високоактивних радіоактивних відходів наведені у додатку до цих Вимог.

#### *Вимоги до маркування контейнерів*

На зовнішній поверхні контейнера наноситься чітке маркування у такий спосіб, що протягом усього строку служби забезпечується ідентифікація контейнерів.

Вимоги до змісту маркування контейнера встановлені у пункті 20 Технічного регламенту ( 939–2007–п ).

Підтвердження відповідності є обов'язковим для виробника контейнера. Процедуру оцінки відповідності, маркування національним знаком відповідності та введення контейнерів в експлуатацію визначено у розділі "Процедура оцінки відповідності" Технічного регламенту ( 939–2007–п ).

#### *Вимоги до технічної документації на контейнер та комплектності постачання контейнерів*

На контейнер має бути надана відповідна технічна документація.

Вимоги до складу та строку збереження технічної документації на контейнер встановлені у пунктах 37, 38 Технічного регламенту ( 939–2007–п ).

Технічна документація повинна бути вкладена у вологонепроникний пакет та вміщатися в пакувальну тару контейнера або прикріплюватися до однієї із зовнішніх сторін контейнера.

У випадку постачання однотипових контейнерів одному замовнику дозволяється прикладати один комплект технічної документації на цю партію контейнерів.

Виробник контейнерів постачає виробнику упаковок РАВ контейнери у зібраному або частково зібраному вигляді у комплектації та упаковці, що визначені у технічній документації на контейнер, зокрема у технічних умовах.

#### *Вимоги до форми високоактивних РАВ*

Радіонуклідний склад форми високоактивних РАВ (перелік радіонуклідів та їх питомі активності) має бути чітко визначеним та задокументованим.

**? Питання для самоконтролю:**

1. Класифікація радіоактивних відходів (РАВ).
2. Які радіаційні відходи відносяться до довго живучих?
3. Групи радіонуклідів по показнику «рівень вилучення».
4. Принципи МАГАТЕ щодо поводження з РАВ.
5. Основні стадії поводження з РАВ.
6. Кондиціювання РАВ.
7. Довгострокове зберігання РАВ.
8. Трансмутація РАВ.
9. Вимоги до могильників РАВ.

## ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

**Фізичні величини, що характеризують іонізуюче випромінювання, одиниці їх виміру**

### Задача 1

У приміщенні має місце потужність експозиційної дози  $W$ . Знайти експозиційну дозу за час  $\tau$  у Кл/кг і поглинену дозу, що отримав за цей час працівник у греях.

*Примітка.* 1Р у повітрі відповідає 9,3 мГр у тканинах і органах тіла людини.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W$ , мР/год.	40	120	70	85	90	540	65	45	220	400
$\tau$ , год.	8	4,5	5	4	3,5	1,5	5,5	7,5	2,5	2

### Задача 2

Працівник отримав за зміну (8 годин) поглинену дозу  $D$ . Знайдіть середню потужність експозиційної дози у мР/год.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D$ , Гр	0,07	0,15	0,71	0,02	0,32	0,09	0,44	1,04	0,63	$10^{-4}$

### Задача 3

Енергія електромагнітного випромінювання знаходиться за формулою:

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda},$$

де  $\nu$  - частота, Гц,  $\lambda$  - довжина хвилі, м,  $c$  – швидкість світла у вакуумі, м/с,  $h$  - стала Планка,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж · с =  $4,136 \cdot 10^{-15}$  еВ · с

За заданою енергією квантів знайдіть довжину хвилі і частоту випромінювання, охарактеризуйте його.

Таблиця 7.1 – Границі різних видів електромагнітних випромінювань

Вид випромінювання	$\lambda$
М'яке ультрафіолетове	400 – 200 нм
Жорстке ультрафіолетове	200 – 10 нм
М'яке рентгенівське	80 – 3 нм
Жорстке рентгенівське	3 нм – 1 пм
Гамма-промені	$\leq 0,1$ нм

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E$ , МеВ	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	0,003	0,02	0,32	0,78	1,6	13	56	103

#### Задача 4

За даними табл. 7.1 знайдіть для кожного виду випромінювань границі по енергії і частоті.

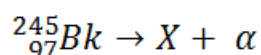
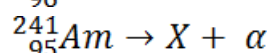
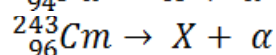
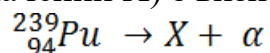
#### Задача 5

Куля діаметром  $D$  з радіоактивного матеріалу має активність  $A$ . Знайдіть питому і поверхневу активності.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D$ , см	12	14	3	34	75	0,8	4,4	6,7	2,7	1,4
$A$ , Бк	230000	$4 \cdot 10^{16}$	23400	$2 \cdot 10^9$	$10^{22}$	47000	$1,2 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^8$	$10^6$	$3 \cdot 10^6$
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	12000	11000	4500	10400	7600	8900	9100	11000	3980	6700

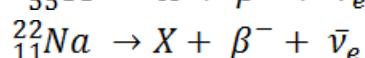
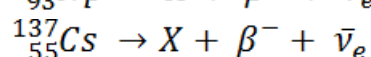
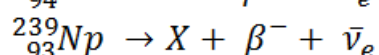
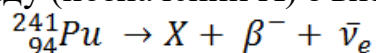
#### Задача 6

При альфа-розпаді масове число ізоотопу зменшується на 4, а заряд ядра і порядковий номер – на 2 одиниці. Знайдіть ізоотоп після радіоактивного розпаду (позначений  $X$ ) з визначенням його масового числа і заряду ядра.



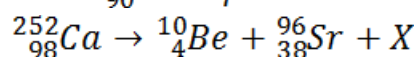
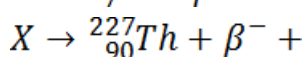
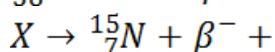
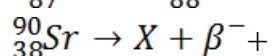
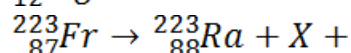
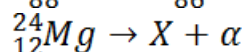
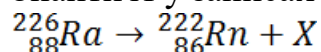
#### Задача 7

При  $\beta^-$ -розпаді масове число ізоотопу не зменшується, а заряд ядра і порядковий номер зменшуються на 1. Знайдіть ізоотоп після радіоактивного розпаду (позначений  $X$ ) з визначенням його масового числа і заряду ядра.



#### Задача 8

Знайти  $X$  у записах реакцій радіоактивного розпаду:



### Задача 9

Перевести значення наданих величин у систему СІ із застосуванням префіксів.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Величина	0,3	12	31	126	550	1,8	0,06	4300	1,45	0,18
Розмірність	мР/год	мкКі/г	Мрад	мкбер	мкР	мКі/л	мрад	кбер	Дж/мм <sup>2</sup>	см <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>

### Задача 10

Є радіонуклід масою  $m$ . Визначити його кількість через  $\tau$  років.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ізотоп	<sup>226</sup> Ra	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>137</sup> Cs	<sup>14</sup> C	<sup>133</sup> Ba	<sup>210</sup> Po	<sup>43</sup> K	<sup>59</sup> Ni	<sup>235</sup> U
$m$ , кг	0,5	1,5	0,7	3	12	3	0,2	0,35	0,42	40
$\tau$ , років	400	10 <sup>5</sup>	10 <sup>7</sup>	200	5000	25	4	1	10 <sup>5</sup>	10 <sup>7</sup>

### Задача 11

Є радіонуклід масою  $m$ . Визначити, яка була його маса  $\tau$  років тому.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ізотоп	<sup>226</sup> Ra	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>137</sup> Cs	<sup>14</sup> C	<sup>133</sup> Ba	<sup>210</sup> Po	<sup>43</sup> K	<sup>59</sup> Ni	<sup>235</sup> U
$m$ , кг	0,5	1,5	0,7	3	12	3	0,2	0,35	0,42	40
$\tau$ , років	2000	2·10 <sup>5</sup>	10 <sup>8</sup>	1200	15000	125	14	2	3·10 <sup>5</sup>	10 <sup>9</sup>

### Задача 12

Зразок матеріалу містить  $p\%$  <sup>238</sup>U і  $q\%$  <sup>235</sup>U. Знайдіть вміст цих ізотопів через мільярд років.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p$ , %	10	15	18	25	4	33	50	40	12	6
$q$ , %	30	35	41	38	15	33	30	22	60	18

### Задача 13

Визначити енергію альфа-часток у одиницях системи СІ, якщо пробіг у повітрі складає  $d$ .

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d$ , мм	44	65	85	95	54	105	68	112	72	79

### Задача 14

Знайти повну та питому активність радіонукліду.

№ вар.	радіонуклід	Маса, г
1	$^{226}\text{Ra}$	10
2	$^{232}\text{Th}$	200
3	$^{14}\text{C}$	150
4	$^{59}\text{Ni}$	80
5	$^{129}\text{I}$	350
6	$^{133}\text{Ba}$	5
7	$^{235}\text{U}$	80
8	$^{238}\text{Pu}$	50
9	$^{137}\text{Cs}$	12
10	$^{210}\text{Po}$	2

**Приклад.** Знайти масу урану-238, якщо його активність складає 10 000 Бк. Активність ізотопу А можна знайти за формулою, Кі:

$$A = 1,12 \cdot 10^{16} \frac{m}{MT},$$

де  $m$  – маса ізотопу, кг;  $M$  – масове число;  $T$  – період напіврозпаду, с.

З додатку А маємо  $T = 4,468 \cdot 10^9$  років  $= 1,41 \cdot 10^{17}$  с. 10 000 Бк складає  $10^4/3,7 \cdot 10^{10} = 2,7 \cdot 10^{-7}$  Кі. Маса ізотопу:

$$m = AMT/1,12 \cdot 10^{16} = 2,7 \cdot 10^{-7} \cdot 238 \cdot 1,41 \cdot 10^{17} / 1,12 \cdot 10^{16} = 0,809 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 0,809 \text{ г}$$

### Біологічна дія іонізуючого випромінювання

#### Задача 15

Визначити форму променевої хвороби, якщо на людину на протязі  $\tau$  годин впливало гамма-випромінювання з потужністю поглиненої дози  $P$ .

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tau$ , год.	10	15	18	25	4	33	5	40	12	6
$P$ , мкГр/с	30	70	230	340	2000	17	5000	100	93	28

#### Задача 16

Розв'язати задачу 15 за умов дії випромінювання :

- протонного з енергією  $> 2$  МеВ;
- нейтронного з енергією 20 кеВ;
- нейтронного з енергією 1 МеВ.

### Задача 17

Визначити ступінь тяжкості ГПХ, якщо на людину на протязі  $\tau$  хвилин впливало рентгенівське випромінювання з потужністю поглиненої дози  $P$ .

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tau$ , год.	10	15	20	25	4	30	5	40	12	6
$P$ , мГр/с	2,5	3,3	4,2	5,3	31	2,8	8,7	3	6,3	3,4

### Задача 18

Визначити потужність поглиненої дози за якої можливий розвиток гострої променевої хвороби, якщо гамма-випромінювання діє на людину  $\tau$  годин.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tau$ , год.	10	15	2	1	4	3	5	24	8	19

### Задача 19

Визначити час впливу на людину нейтронного випромінювання з енергією 20 кеВ, за якого можливий розвиток гострої променевої хвороби.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P$ , мГр/с	2,5	3,3	4,2	5,3	31	2,8	8,7	3	6,3	3,4

### Задача 20

За умов задачі 19 визначити час впливу бета-випромінювання, за якого розвивається :

- а) кістково-мозкова ГПХ важкого ступеню;
- б) кістково-мозкова ГПХ вкрай важкого ступеню;
- в) кишкова форма ГПХ;
- г) токсемічна форма ГПХ.

## Норми радіаційної безпеки України; регламенти 1 групи

### Задача 21

На персонал підприємства протягом  $t$  годин в рік впливає гамма-випромінювання з потужністю експозиційної дози  $W$  і нейтронне (теплове) випромінювання з потужністю поглиненої дози  $P$ . Поглинена доза альфа-випромінювання за місяць –  $D$ . Визначити річну еквівалентну дозу і порівняти з допустимою.

№ вар.	T, год.	W, мкР/год.	P, мкВт/кг	D, рад
1	1000	200	0,01	0.02
2	800	500	0,02	0.015
3	1200	700	0,015	0,035
4	500	1000	0.007	0,012
5	2000	800	0,012	0,004
6	750	300	0,013	0,022
7	900	750	0,014	0,006
8	1100	2500	0,009	0,01
9	1250	100	0,05	0,001
10	400	330	0,002	0,06

### Задача 22

Визначити безпечну відстань від альфа-джерела з енергією часток E.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E, пДж	0,3	0,7	0,85	1,06	0,54	1,3	0,68	1,23	1,45	1,8

**Приклад.** Пробіг альфа-часток у повітрі при температурі 15°C і тиску 101,3 кПа можна розрахувати за формулою, м:

$$d = 4,76 \cdot 10^{-3} \sqrt{E^3}, \quad (7.1)$$

де E – енергія часток у MeV.

Визначити енергію альфа-часток, якщо пробіг у повітрі складає 10 см. З формули (7.1) маємо:

$$E = \sqrt[3]{\left(\frac{d}{4,76 \cdot 10^{-3}}\right)^2}$$

$$E = \sqrt[3]{\left(\frac{0,1}{4,76 \cdot 10^{-3}}\right)^2} = 7,61 \text{ MeV}$$

### Задача 23

Визначити відповідність умов праці нормам радіаційної безпеки для персоналу, якщо знаходження робітників у робочій зоні складає 1700 годин на протязі року.

№ вар.	E <sub>ext</sub> , мкЗв/год.	H <sub>lens</sub> , мкЗв/год.	H <sub>skin</sub> , мкЗв/год.	H <sub>extrim</sub> , мкЗв/год.	I <sup>inhal</sup> , Бк/год.			
					<sup>127</sup> I	<sup>226</sup> Ra	<sup>235</sup> U	<sup>232</sup> Th
1	8	80	250	280	30	-	0,1	0,01
2	3,2	76	120	140	5	0,01	0,02	0,005
3	2	54	300	310	6	0,015	0,01	0,004
4	3	75	260	320	4,5	0,01	0,025	0,0043
5	7	60	200	240	15	0,03	0,12	0,03
6	4,5	90	120	170	4	0,012	0,03	0,003
7	6	56	114	220	10	0,001	0,001	0,001
8	3,4	84	240	255	3,5	0,005	0,01	-
9	6,5	42	95	115	14	0,002	0,003	0,001
10	2,4	71	210	250	2	0,04	0,05	0,002



## Норми радіаційної безпеки України; регламенти 2 групи

### Задача 24

Пацієнт категорії АД на протязі 2 років отримав  $n$  курсів гамма-терапії. Поглинена доза кожного курсу –  $D$ . Чи відповідає лікування рекомендованому рівню?

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n$	10	6	4	2	4	8	6	4	10	6
$D$ , мГр	10	26	45	80	60	25	22	30	13	14

### Задача 25

Яка максимальна потужність поглиненої дози рентгенівського випромінювання що відповідає рекомендованому рівню, при обстеженні осіб з груп ризику? Обстеження проводиться  $n$  разів на рік, тривалість опромінення –  $\tau$ .

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n$	2	3	4	2	4	5	3	2	3	5
$\tau$ , с	10	30	60	20	15	25	10	30	15	10

### Задача 26

Пацієнт, що отримав важку травму, протягом року тричі проходив рентгеноскопію з експозиційними дозами  $X_1$ ,  $X_2$  і  $X_3$ , а також комп'ютерну томографію експозиційною дозою  $X_{кт}$ . Чи відповідає отримана доза випромінювання рекомендованому рівню?

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$X_1$ , Р	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,5	0,1	0,1	0,9	0,2
$X_2$ , Р	0,3	0,4	0,3	0,1	0,05	0,1	0,07	0,09	1	0,2
$X_3$ , Р	0,35	0,35	0,5	0,14	0,22	0,25	0,11	0,18	0,25	0,18
$X_{кт}$ , Р	1+1,5	1,1×6	2,3×4	1+1,6	1,5+1,8	1,2×8	1,3+1	2+1,4	1×4	0,9×4

## Норми радіаційної безпеки України; регламенти 3 групи

### Задача 27

Визначити клас радіаційної аварії за масштабом, якщо площа ураження складає  $S$ , а середня щільність населення у зоні ураження –  $\rho$ .

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S$ , тис. га	150	140	220	270	750	200	130	1000	310	500
$\rho$ , люд./км <sup>2</sup>	700	600	500	400	120	550	800	90	340	180

### Задача 28

Яка повинна бути мінімальна площа ураження місцевості із щільністю населення  $\rho$ , щоб аварію можна було віднести до регіональної? Значення  $\rho$  взяти із задачі 27.

### Задача 29

Зона ураження має вигляд кола діаметром  $D$ . В центрі знаходиться населений пункт, що у плані має вигляд прямокутника розмірами  $A \times B$ . Щільність населення в ньому –  $\rho_1$ , поза населеного пункту –  $\rho_2$ . Визначити клас радіаційної аварії за масштабом.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D$ , км	10	14	22	27	100	20	13	80	200	150
$A \times B$ , км	3×4	3×6	4×5	6×7	3×12	6×6	2×3	7×12	13×14	1,2×3
$\rho_1$ , люд./км <sup>2</sup>	100	300	400	220	140	80	1100	230	15	2000
$\rho_2$ , люд./км <sup>2</sup>	10	21	5	15	32	19	70	120	0,1	0,05

### Норми радіаційної безпеки України; регламенти 4 групи

### Задача 30

Перевірити на відповідність радіаційним нормам виробів з порцеляни.

№ варіанту	Маса виробу, г	Вміст радіонуклідів, мкг		
		<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
1	2500	0,05	3700	1300
2	940	0,003	23000	4750
3	1560	0,01	12300	3800
4	35	10 <sup>-4</sup>	1000	200
5	15	5·10 <sup>-5</sup>	500	80
6	360	0,001	7200	1100
7	770	0,0025	15000	2500
8	430	0,0012	8100	1300
9	130	3·10 <sup>-4</sup>	2700	950
10	170	7·10 <sup>-4</sup>	3300	1000

### Задача 31

Перевірити будівельні матеріали на відповідність радіаційним нормам і визначити, як вони можуть застосовуватися.

№ вар.	Вміст радіонукліду, ppm		
	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
1	10 <sup>-5</sup>	10	1
2	5·10 <sup>-6</sup>	20	1,5
3	2·10 <sup>-5</sup>	25	5
4	7·10 <sup>-5</sup>	90	18
5	10 <sup>-4</sup>	120	40
6	3·10 <sup>-6</sup>	40	3
7	9·10 <sup>-6</sup>	80	4
8	1,5·10 <sup>-5</sup>	1,5	2,5
9	6·10 <sup>-5</sup>	110	24
10	8·10 <sup>-5</sup>	80	150

### Задача 32

Вміст радону-222 у питній воді складає А, Бк/кг. Через який час вміст радону буде відповідати вимогам радіаційній безпеки, якщо період напіврозпаду радону-222 – 3,8 діб?

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А, Бк/кг	430	500	1200	1350	4500	7000	9700	12000	15000	21000

**Приклад.** Активність радіонукліду складає 10<sup>18</sup> Бк. Знайти активність через  $\tau = 2$  роки, якщо період напіврозпаду  $T = 13$  діб. Активність змінюється з часом також, як і число атомів радіонукліду, у відповідності з законом радіоактивного розпаду:

$$A = A_0 2^{-\tau/T},$$

де  $A_0$  – початкова активність.

У нашому випадку  $\tau = 2$  р. = 730 діб,  $A_0 = 10^{18}$  Бк. Маємо:

$$A = 10^{18} \cdot 2^{-730/13} = 12,5 \text{ Бк}$$

### Задача 33

Природний гамма-фон складає 10 мкР/год. Добова поглинена доза гамма-випромінювання у повітрі у приміщенні, що експлуатується складає  $D$ . Розрахувати потужності експозиційної і поглиненої доз та визначити відповідність приміщення нормам щодо гамма-випромінювання.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D$ , нГр	400	200	250	350	450	370	270	120	150	380

**Примітка.** 1 Р експозиційної дози відповідає 8,7 мГр поглиненої дози у повітрі.

## Захист відстанню та часом

### Задача 34

У цеху підприємства розташовано джерело  $\gamma$ -випромінювання (рис. 7.1). Визначити відстані до стін, що виходять на територію підприємства і на територію житлової забудови, при яких потужність експозиційної дози на поверхні стенів буде рівною допустимію, для двох випадків:

- вузький пучок;
- джерело випромінює на всі боки рівномірно.

Лінійний коефіцієнт ослаблення для повітря  $\mu=0,02$  1/м. Норма потужності експозиційної дози для стіни, що виходить на територію підприємства 300 мкР/год, на житлову територію - 10 мкР/год.

Ослаблення потужності експозиційної дози від джерела, випромінюючого на всі боки рівномірно, приблизно виражається формулою:

$$W = (W_0/r^2) \exp(-\mu r),$$

де  $W_0$  – потужність дози джерела,  $r$  – відстань до джерела.

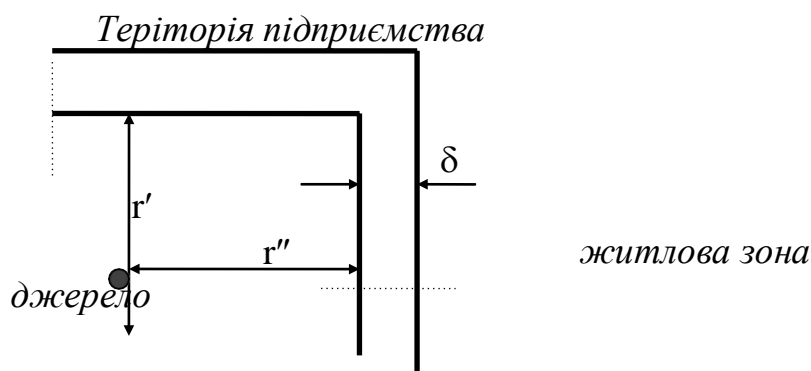


Рисунок 7.1 – Схема розташування джерела  $\gamma$ -випромінювання

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_0, P/\text{год}$	1	0,8	0,75	1,5	0,32	0,86	2	0,5	0,4	0,42
$\delta, \text{см}$	25	20	15	50	10	15	75	40	30	25
матеріал	бетон	бетон	бетон	цегла	цегла	бетон	бетон	цегла	цегла	цегла

### Задача 35

У приміщення розмірами  $a \times b$  і висотою 5 м виділяється радіоактивний газ або пара в кількості  $M$ . Визначити його концентрацію  $C$  через 12 годин після початку виділення. Розрахувати витрату вентиляційного повітря для зменшення

концентрації до допустимої  $C_d$  за  $\tau=0,5$  год. Об'єм приміщення -  $V$  м<sup>3</sup>. Витрата вентиляційного повітря, м<sup>3</sup>/год.:

$$G = M/C_d + (V/\tau)\ln C/C_d$$

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a$ , м	5	2	20	10	7,5	5	15	50	40	22
$b$ , м	10	5	20	10	10	15	30	68	40	34
Газ або пара	<sup>3</sup> H	<sup>36</sup> Cl	<sup>82</sup> Br	<sup>36</sup> Cl	<sup>129</sup> I	<sup>129</sup> I	<sup>82</sup> Br	<sup>3</sup> H	<sup>36</sup> Cl	<sup>3</sup> H
$M$ , мКі/год.	50	40	800	100	70	500	150	5000	1500	1000

### Задача 36

Визначити час, який робітник може працювати на протязі зміни з джерелом нейтронного випромінювання, якщо енергія нейтронів –  $E$ , а потужність поглиненої дози –  $P$ . Взяти за ліміт дози 20 мЗв/рік. Робітник працює 240 днів на рік.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E$ , кеВ	3	4	12	35	40	55	70	200	500	800
$P$ , нГр/с	5	3	2,5	6	1	1,5	0,75	4	0,3	0,9

## 7.8 Екранування

### Задача 37

Визначити товщину екрану для захисту від бета-випромінювання з максимальною енергією часток  $E_m$ .

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_m$ , пДж	0,032	0,5	0,31	0,1	0,6	0,4	0,09	1,0	0,25	0,75
матеріал екрану	алюміній	сталь	чавун	оргскло	свинець	алюміній	скло	свинець	алюміній	сталь

**Приклад.** Максимальна глибина проникнення бета-променів в матеріал  $d_m$ , м визначається наступними наближеними співвідношеннями:

для  $0,15 \text{ MeV} < E_m < 0,8 \text{ MeV}$

$$d_m = \frac{4,07E_m + 1,38}{\rho} \quad (7.2)$$

для  $0,8 \text{ MeV} < E_m < 3 \text{ MeV}$

$$d_m = \frac{5,42E_m - 1,33}{\rho}$$

для  $E_m > 3 \text{ MeV}$

$$d_m = 1,1 \frac{\sqrt{1 + 22,4 E_m^2 - 1}}{\rho},$$

де  $E_m$  - максимальна енергія бета-часток, MeV;  $\rho$  - густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>.

Визначити товщину екрану з алюмінію для захисту від бета-часток з енергією 500 кеВ. З формули (7.2) та додатку В маємо:

$$d_m = (4,07 \cdot 0,5 + 1,38) / 2710 = 0,0013 \text{ м} = 1,3 \text{ мм}$$

### Задача 38

Визначити товщину екрану для захисту від гамма-випромінювання персоналу, що працює з гамма-джерелом протягом  $t$  годин в рік. Потужність експозиційної дози на робочому місці без екрану -  $W$ . Енергія гамма-променів 1,9 MeV.

№вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t$ , год.	1000	2000	1500	500	800	1200	1300	700	1400	1100
$W$ , Р/год.	10	6	15	25	100	8,5	12	40	20	30
матеріал	бетон	цегла	чавун	сталь	свинець	бетон	чавун	свинець	сталь	свинець

**Примітка.** Використовувати формулу  $d = \ln N/\mu$

### Задача 39

Для захисту від вузького пучку гамма-променів з потужністю поглиненої дози  $P$  застосовується екран. Треба зменшити випромінювання так, щоб добова доза складала 80 мкГр. Знайти товщину екрану із алюмінію, сталі і свинцю для енергії випромінювання:

- а) 1,9 MeV;
- б) 4 MeV.

№вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P$ , нГр/с	2	7	15	50	120	300	1000	$10^4$	$2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$

## Організація робіт з джерелами іонізуючого випромінювання

### Задача 40

У приміщенні на робочому місці потужність поглиненої дози бета-випромінювання складає  $D$ . Кількість робочих днів у році – 240. Визначити максимально допустимий термін перебування робітника на цьому робочому місці протягом зміни.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D$ , нГр/с	4	5	3,5	8	11	6	7	15	20	30

### Задача 41

У приміщенні розташоване точкове ізотропне джерело гамма-випромінювання. Потужність поглиненої дози на відстані 3 м від джерела – 20 нГр/с. Визначити потужність дози на відстані  $L$  від джерела і максимально допустимий термін перебування робітника на такій відстані протягом зміни.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L$ , м	4	5	2	1,5	1	6	0,5	2,5	3,5	4,2

### Задача 42

За умовами задачі 40 визначити мінімальну відстань від джерела, на якій можна перебувати протягом зміни.

## Видалення радіаційних відходів

### Задача 43

У твердих радіоактивних відходах міститься  $m$  урану-235 і  $n$  урану-238. Тип розпаду –  $\alpha$ . Знайти питому активність відходів і класифікувати за ОСПЗРБ.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m$ , г/кг	0,5	0,01	$10^{-2}$	0,3	1,5	2	3	0,7	0,2	1,3
$n$ , г/кг	1	0,015	1,3	2	1,7	4	5	0,8	1,2	1,8

### Задача 44

У твердих радіоактивних відходах міститься  $m$  цезію-137 і  $n$  стронцію-90. Тип розпаду –  $\beta$ . Знайти питому активність відходів і класифікувати за ОСПЗРБ.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m$ , мг/кг	0,5	0,02	$10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	0,03	0,2	$10^{-5}$
$n$ , мг/кг	1	0,03	$2 \cdot 10^{-3}$	$10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$10^{-4}$	0,02	0,1	$10^{-6}$

### Задача 45

У рідких радіоактивних відходах міститься  $m$  радію-236. Тип розпаду –  $\alpha$ . Знайти питому активність відходів і класифікувати за ОСПЗРБ.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m$ , МГ/КГ	0,5	0,02	$10^{-3}$	1,5	55	0,002	42	15	0,2	24

### Задача 46

Який має бути вміст калію-40 ( $\beta$ -розпад) у твердих радіоактивних відходах, щоб їх віднести до :

- дуже низько активних;
- низько активних;
- середньо активних;
- високоактивних.

Розв'язати цю задачу також для урану-235 і радію-236 ( $\alpha$ -розпад).

### Задача 47

Визначити концентрацію радіонуклідів у твердих радіоактивних відходах, яка відповідає рівню вилучення :

- плутоній-239 ( $\alpha$ -розпад);
- уран-235;
- радій-236;
- стронцій-90.



## 8 САМОСТІЙНА РОБОТА СТУДЕНТА

### Теми для самостійного опрацювання

1. Протонне випромінювання, важкі ядра віддачі
2. Флюенс, щільність потоку частинок, потужність керми
3. Генетичні наслідки дії іонізуючого випромінювання
4. Променеві ураження шкіри
5. Джерела випромінювання, що звільнені від контролю
6. Опромінювання при медичних процедурах
7. Класифікація радіаційних аварій
8. Регламентація вмісту озону у приміщеннях
9. Застосування маніпуляторів
10. Герметизація джерел випромінювання
11. Вимоги до приміщень з джерелами іонізуючого випромінювання
12. Трансмутація радіаційних відходів

### Тести для самоконтролю

1. Міжнародний умовний знак радіаційної небезпеки:
  - а) стилізована блискавка;
  - б) трилисник;
  - в) червоний трикутник.
2. Аварія локальна – це комунальна радіаційна аварія, якщо в зоні аварії проживає населення загальною чисельністю до:
  - а) 10 000 чоловік; б) 1000 чоловік; в) 100 000 чоловік.
3. Активність радіонукліду:
  - а)  $A = dm/dt$ ; б)  $A = dQ/dt$  в)  $A = dN/dt$
4. Гамма–випромінювання має довжину хвилі:
  - а)  $< 10$  мм; б)  $< 0,1$  нм в)  $0,1 - 400$  нм
5. Значення радіаційного зважуючого фактору для альфа–випромінювання:
  - а) 1, б) 10, в) 20.
6. Значення тканинного зважуючого фактору для шкіри:
  - а) 0,01, б) 0,1 в) 0,2
7. Одиниця ативності у системі СІ:
  - а) Беккерель; б) Зіверт; в) Грей.

8. Одиниця еквівалентної дози у системі СІ:  
а) Беккерель; б) Зіверт; в) Грей.
9. Ліміт річної ефективної дози для категорії А, мЗв:  
а) 1; б) 2; в) 20
10. Ліміт річної ефективної дози для категорії Б, мЗв:  
а) 1; б) 2; в) 20

## ДОДАТОК А

Таблиця А.1 — Допустимі рівні надходження радіонуклідів через органи дихання та допустимі концентрації у повітрі для категорії А

Радіонуклід	Період напіврозпаду	$ДН_A^{inhal}$ Бк/рік	$ДК_A^{inhal}$ Бк/м <sup>3</sup>
Тритій <sup>3</sup> H	12,35 р.	$2 \cdot 10^7$	9000
Вуглець <sup>14</sup> C	5730 р.	$8 \cdot 10^5$	400
Хлор <sup>36</sup> Cl	301 000 р.	$7 \cdot 10^5$	300
Калій <sup>43</sup> K	22,6 год.	$6 \cdot 10^7$	30 000
Нікель <sup>59</sup> Ni	75 000 р.	$10^7$	500
Бром <sup>82</sup> Br	35,3 год.	$8 \cdot 10^6$	400
Стронцій <sup>90</sup> Sr	29,12 р.	$3 \cdot 10^4$	10
Іод <sup>129</sup> I	$1,57 \cdot 10^7$ р.	$7 \cdot 10^4$	30
Барій <sup>133</sup> Ba	10,74 р.	400 000	200
Цезій <sup>137</sup> Cs	30 р.	$10^5$	60
Полоній <sup>210</sup> Po	138,4 доби	600	0,3
Радій <sup>226</sup> Ra	1600 р.	100	0,06
Торій <sup>232</sup> Th	$1,405 \cdot 10^{10}$ р.	60	0,03
Уран <sup>235</sup> U	$7,04 \cdot 10^8$ р.	400	0,2
Уран <sup>238</sup> U	$4,47 \cdot 10^9$ р.	500	0,2

## ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 — Товщина захисного екрану, в мм, зі свинцю і бетону від прямого рентгенівського випромінювання

$k_2$	$U, \text{кВ}$											
	100		125		150		200		250		300	
	Сви- нец	Бетон	Сви- нец	Бетон	Сви- нец	Бетон	Сви- нец	Бетон	Сви- нец	Бетон	Сви- нец	Бетон
0,001	–		0,5		0,5		1		1,5		1,5	
0,002	0,5	–	0,5	–	1	–	1,2	–	2,2	–	3	–
0,003							1,5		2,5		4	
0,005							2		3		4,5	
0,01	1	70	1,3	100	1,5	140	2,3	180	3,5	200	6	260
0,02	1,3	85	1,5	140	1,8	150	2,5	200	4	230	7,2	290
0,03		100			2	170	2,8	220	4,5	240	8,3	310
0,05	1,5	120	1,7	150		2,3	180	3	240	5	270	10
0,1		130	1,8	160	200		3,5	270	5,8	300	11,5	370
0,2	1,8	140	2		2,5	220	3,8	300	6,5	340	13	400
0,3	2	160	2,3	180	2,8	230	4	310	7	350	13,5	410
0,5	2,2	170	2,5	200	3	250	4,5	320	7,5	370	14,5	430
1	2,5	180	2,8	220	3,2	270	5	350	8,5	400	16,5	460
2	2,8	200	3	240	3,5	290	5,5	380	9,5	430	18	490
3	2,9	210	3,3	260	4	310	5,8	390	10	440	19	500
5	3	220	3,5	300	4,3	340	6	400	10,5	460	20	520
10	3,3	240	3,8	320	4,5	360	6,5	430	11,5	490	21,5	560
20	3,4	250	4	340	4,8	400	7	460	12	520	23,5	600
30	3,5	260	4,2	350	5	410	7,5	470	13	540	24,5	610
50	3,8	270	4,5	360	5,3	420	7,8	480	13,5	570	25,5	620
100	4	300	4,8	380	5,5	430	8,2	500	14	580	27	650

Таблиця Б.2 — Товщина захисного екрану, в мм, зі свинцю і бетону від розсіяного рентгенівського випромінювання

$k_2$	$U$ , кВ									
	100		150		200		250		300	
	Свинець	Бетон	Свинець	Бетон	Свинець	Бетон	Свинець	Бетон	Свинець	Бетон
0,01	0,1	20	0,1	30	0,2	40	0,3	50	0,6	70
0,02	0,2	35	0,3	45	0,5	65	0,8	75	1,2	95
0,03	0,4	45	0,5	55	0,8	90	1,2	100	2,3	120
0,05	0,5	55	0,8	80	1	120	1,5	125	3	145
0,1	0,7	65	1	100	1,4	140	2	150	4	170
0,2	0,9	80	1,2	120	1,8	170	2,7	180	5	200
0,3	1	85	1,3	130	2	180	3	190	5,5	210
0,5	1,2	100	1,5	140	2,2	190	3,5	210	6,3	220
1	1,4	120	1,8	160	2,6	220	4,2	230	7,5	250
2	1,6	130	2	185	3	250	5	260	9	280
5	1,8	150	2,3	210	3,6	280	5,8	290	10,5	210
10	2,1	170	2,6	230	4,1	300	6,5	320	12	340
20	2,3	180	2,9	260	4,6	340	7,3	360	13,5	380
50	2,5	200	3,2	280	5,1	370	8	390	15	410
100	2,8	220	3,5	310	5,6	390	8,8	420	17	440

## ДОДАТОК В

Таблиця В.1 — Густина деяких матеріалів

Матеріал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Алюміній	2710
Бетон	2000
Оргскло	1180
Залізобетон	2200
Свинець	11 340
Сталь	7850
Цегла силікатна	1900
Цегла червона	1700

## ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1 — Лінійний коефіцієнт ослаблення гамма-випромінювання

Матеріал	Цегла	Бетон	Алюміній	Чавун	Сталь	Свинець
Енергія, МеВ	$\mu$ , м <sup>-1</sup>					
1,9	7	12	13	30	34	53
4,0	6	7,6	8,4	27	28	47

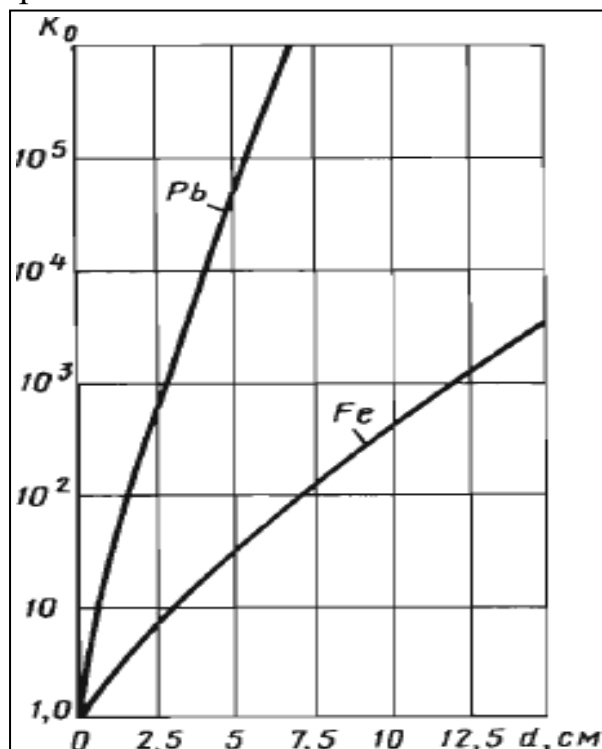
## ДОДАТОК Д

Таблиця Д.1 — Питома активність радіонуклідів

Радіонуклід	Активність, Кі/г	Бк/кг
<sup>87</sup> Rb	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$3,15 \cdot 10^6$
<sup>232</sup> Th	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^6$
<sup>238</sup> U	$3,3 \cdot 10^{-7}$	$1,23 \cdot 10^7$
<sup>235</sup> U	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$7,8 \cdot 10^7$
<sup>40</sup> K	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^8$
<sup>239</sup> Pu	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{12}$
<sup>226</sup> Ra	1	$3,7 \cdot 10^{13}$
<sup>14</sup> C	4,6	$1,7 \cdot 10^{14}$
<sup>137</sup> Cs	87	$3,2 \cdot 10^{15}$
<sup>90</sup> Sr	145	$5,4 \cdot 10^{15}$
<sup>60</sup> Co	$1,1 \cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^{16}$
<sup>137</sup> I	$1,2 \cdot 10^5$	$4,4 \cdot 10^{18}$

## ДОДАТОК Ж

Таблиця Ж.1 — Номограма для визначення товщини екрану для захисту від прямого гамма-випромінювання



$K_0$  – необхідне ослаблення потужності ефекивної дози випромінювання;  
 $d$  – товщина екрану

## ДОДАТОК К

Таблиця К.1 — Префікси системи СІ (кратні)

Кратність	Префікс		Позначення		Приклад
	україн.	міжнародний	українське	міжнародне	
$10^1$	дека	deca	да	da	дал — декалітр
$10^2$	гекто	hecto	г	h	га — гектар
$10^3$	кіло	kilo	к	k	кг — кілограм
$10^6$	мега	mega	М	M	МДж — мегаджоуль
$10^9$	гіга	giga	Г	G	ГГц — гігагерц
$10^{12}$	тера	tera	Т	T	ТВ — теравольт
$10^{15}$	пета	peta	П	P	Пм — петаметр
$10^{18}$	екса	exa	Е	E	
$10^{21}$	зета	zetta	З	Z	
$10^{24}$	йота	yotta	Й	Y	

Таблиця К.2 — Префікси системи СІ (Частинні)

Частка	Префікс		Позначення		Приклад
	укр.	міжнародний	українське	міжнародне	
$10^{-1}$	деци	deci	д	d	дм — дециметр
$10^{-2}$	санти	centi	с	c	см — сантиметр
$10^{-3}$	мілі	milli	м	m	мг — міліграм
$10^{-6}$	мікро	micro	мк	μ	мкм — мікромметр
$10^{-9}$	нано	nano	н	n	нм — наномметр
$10^{-12}$	піко	pico	п	p	пФ — пікофарада
$10^{-15}$	фемто	femto	ф	f	фс — фемтосекунда
$10^{-18}$	ато	atto	а	a	аг — атограм
$10^{-21}$	зепто	zepto	з	z	зДж — зептоджоуль
$10^{-24}$	йокто	yocto	й	y	

## ДОДАТОК Л

Таблиця Л.1 — Молекулярні маси хімічних елементів

Елемент	Символ	№	μ	Елемент	Символ	№	μ
1	2	3	4	5	6	7	8
Азот (нітроген)	N	7	14	Молібден	Mo	42	96
Актиній	Ac	89	227	Московій	Mc	115	288
Алюміній	Al	13	27	Натрій	Na	11	23
Америцій	Am	95	243	Неодим	Nd	60	144
Аргон	Ar	18	40	Неон	Ne	10	20
Астат	At	85	210	Нептуній	Np	93	237
Барій	Ba	56	137	Нікель	Ni	28	59
Берилій	Be	4	9	Ніобій	Nb	41	93
Берклій	Bk	97	247	Ніхоній	Nh	113	284
Бор	B	5	11	Нобелій	No	102	255
Борій	Bh	107	269	Оганесон	Og	118	294
Бром	Br	35	80	Олово (станум)	Sn	50	119
Ванадій	V	23	51	Осмій	Os	76	190
Вісмут (бісмут)	Bi	83	209	Палладій	Pd	46	106
Водень (гідроген)	H	1	1	Платина	Pt	78	195
Вольфрам	W	74	184	Плутоній	Pu	94	244
Вуглець (карбон)	C	6	12	Полоній	Po	84	210
Гадоліній	Gd	64	157	Празеодим	Pr	59	141
Галій	Ga	31	70	Протактиній	Pa	91	231
Гасій	Hs	108	269	Прометій	Pm	61	147
Гафній	Hf	72	178,5	Радій	Ra	88	226
Гелій	He	2	4	Радон	Rn	86	222



Продовження табл. Л.1

Германій	Ge	32	73	Резерфордій	Rf	104	261
Гольмій	Ho	67	165	Реній	Re	75	186
Дармштадтій	Ds	110	271	Рентгеній	Rg	111	272
Диспрозій	Dy	66	162,5	Родій	Rh	45	103
Дубній	Db	105	262	Ртуть (меркурій)	Hg	80	201
Ейнштейній	Es	99	254	Рубідій	Rb	37	85,5
Ербій	Er	68	167	Рутеній	Ru	44	101
Європій	Eu	63	152	Самарій	Sm	62	150
Залізо (ферум)	Fe	26	56	Свинець (плюмбум)	Pb	82	207
Золото (аурум)	Au	79	197	Селен	Se	34	79
Індій	In	49	115	Сіборгій	Sg	106	266
Іридій	Ir	77	192	Сірка (сульфур)	S	16	32
Ітербій	Yb	70	173	Скандій	Sc	21	45
Ітрій	Y	39	89	Срібло (аргентум)	Ag	47	108
Йод	I	53	127	Стронцій	Sr	38	88
Кадмій	Cd	48	112	Сурма (стибій)	Sb	51	122
Калій	K	19	39	Талій	Tl	81	204
Каліфорній	Cf	98	252	Тантал	Ta	73	181
Кальцій	Ca	20	40	Телур	Te	52	128
Кисень (оксиген)	O	8	16	Теннесси н	Ts	117	294
Кобальт	Co	27	59	Тербій	Tb	65	159
Коперницій	Cn	112	285	Технецій	Tc	43	99
Кремній (силіцій)	Si	14	28	Титан	Ti	22	48
Криптон	Kr	36	84	Торій	Th	90	232
Ксенон	Xe	54	131	Тулій	Tu	69	169
Кюрій	Cm	96	247	Уран	U	92	238
Лантан	La	57	139	Фермій	Fm	100	257
Ливерморій	Lv	116	293	Флеровій	Fl	114	289
Літій	Li	3	7	Фосфор	P	15	31
Лоуренсій	Lw	103	256	Францій	Fr	87	223
Лютецій	Lu	71	175	Фтор (флуор)	F	9	19
Магній	Mg	12	24	Хлор	Cl	17	35,5
Майтнерій	Mt	109	268	Хром	Cr	24	52
Марганець (манган)	Mn	25	55	Цезій	Cs	55	133
Миш'як (арсен)	As	33	75	Церій	Ce	58	140
Мідь (купрум)	Cu	29	64	Цинк	Zn	30	65
Менделевій	Md	101	257	Цирконій	Zr	40	91

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

### Основна

1. Норми радіаційної безпеки України. НРБУ-97 [Чинний від 01.01.1998]. Київ : МОЗ, 1997. 127с.
2. Рижков В. Г. Радіаційна безпека : навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА спеціальності 7. 04010602 «Прикладна екологія та збалансоване природокористування». Запоріжжя : ЗДІА, 2013. 52 с.
3. Батлук В.А. Радіаційна екологія: навчальний посібник. Київ : Знання, 2009. 309с.
4. Константінов М.П., Журбенко О.А. Радіаційна безпека. Суми : Унів. Книга, 2003. 150с. – 3 прим
5. Рижков В. Г. Охорона праці : методичні вказівки до проведення практичних занять та виконання контрольних робіт для студентів ЗДІА інженерних спеціальностей. Запоріжжя: ЗДІА, 2005. 43с.

### Додаткова:

1. Закон України «Про охорону праці» в редакції від 21 листопада 2002 року. Київ : Основа, 2005. 25с.
2. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения. Серия изданий по безопасности N 115. Вена : МАГАТЭ, 1997. 382с.
3. Гостра променева хвороба : навчально-методичний посібник до практичних занять з внутрішньої медицини / Візір В.А. та ін. Запоріжжя : ЗДМУ, 2017. 111 с.

### Інформаційні ресурси:

1. Державна служба України з питань праці. Травматизм на виробництві. URL : <http://dsp.gov.ua/category/diyalnist/travmatyzm-na-vyrobnytstvi/> (дата звернення 26.08.2019).
2. Державна інспекція ядерного регулювання України : офіційний веб-сайт URL : <https://www.facebook.com/171734492888296/posts/550321958362879/> (дата звернення 26.08.2019).

## ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Радіоактивність. URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/Радіоактивність>
2. Альфа-розпад. URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/Альфа-розпад>.
3. Бета-розпад. URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/Бета-розпад>.
4. Деление ядер. Ядерная физика в интернете. URL : <http://nuclphys.sinp.msu.ru/histan/histan12.htm>
5. Електронне захоплення. URL : [https://uk.wikipedia.org/wiki/Електронне\\_захоплення](https://uk.wikipedia.org/wiki/Електронне_захоплення)
6. Кластерний розпад. URL : [https://uk.wikipedia.org/wiki/Кластерний\\_розпад](https://uk.wikipedia.org/wiki/Кластерний_розпад).
7. Норми радіаційної безпеки України. НРБУ-97 [Чинний від 01.01.1998]. Київ : МОЗ, 1997. 127с.
8. Ультрафіолетове випромінювання URL : [https://uk.wikipedia.org/wiki/Ультрафіолетове\\_випромінювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/Ультрафіолетове_випромінювання).
9. Рентгенівське випромінювання URL : [https://uk.wikipedia.org/wiki/Рентгенівське\\_випромінювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/Рентгенівське_випромінювання).
10. Гамма-промені URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/Гамма-промені>.
11. Источники гамма-излучения. URL : <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/gamma/index.html>
12. Альфа-частинка URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/Альфа-частинка>.
13. Бета-випромінювання. Енциклопедія сучасної України URL : [http://esu.com.ua/search\\_articles.php?id=39561](http://esu.com.ua/search_articles.php?id=39561)
14. Іонізуюче випромінювання, характеристики, джерела впливу на організм, нормування URL : [tudme.com.ua/1597012213835/bzhd/ioniziruyuschee\\_izluchenie\\_harakteristiki\\_istochniki\\_vozdeystviya\\_organizm\\_normirovanie.htm](http://tudme.com.ua/1597012213835/bzhd/ioniziruyuschee_izluchenie_harakteristiki_istochniki_vozdeystviya_organizm_normirovanie.htm)
15. Наведена радіоактивність URL : [https://uk.wikipedia.org/wiki/Наведена\\_радіоактивність](https://uk.wikipedia.org/wiki/Наведена_радіоактивність).
16. Вуглець 14. URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/Вуглець-14>
17. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения. Серия изданий по безопасности N 115. Вена : МАГАТЭ, 1997. 382 с.
18. Гостра променева хвороба URL : <https://studfile.net/preview/5751324/page:6/>
19. Гостра променева хвороба : навчально-методичний посібник до практичних занять з внутрішньої медицини / Візір В.А. та ін. Запоріжжя : ЗДМУ, 2017. 111 с.
20. Местные лучевые поражения. URL : <https://studfile.net/preview/5767289/>
21. Цепная ядерна реакція. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Цепная\\_Ядерна\\_реакция](https://ru.wikipedia.org/wiki/Цепная_Ядерна_реакция).
22. Коэффициент размножения нейтронов. URL : [https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент\\_размножения\\_нейтронов](https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_размножения_нейтронов)
23. Реактивность ядерного реактора. URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/>

## Реактивність\_ядерного\_реактора

24. Розвиток атомної енергетики та об'єднаних енергосистем./ Денисевіч К.Б. та ін. URL:<http://energetika.in.ua/ua/books/book-4/part-1/section-2/2-1>
25. Ядерний реактор. URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki> (дата звернення 12.09.2019)
26. Типы АЭС и их технологические схемы. URL : <https://leg.co.ua/info/spravka/tipy-aes-i-ih-tehnologicheskie-shemy.html>
27. Энергетика. ТЭС и АЭС. Трехконтурные схемы АЭС. URL : <http://tesiaes.ru/?p=9895>
28. Принцип роботи АЕС. URL: <https://www.sunpp.mk.ua/uk/node/123>
29. Ткачук А. Вивчення техногенних небезпек, що пов'язані з аваріями на радіаційно-небезпечних об'єктах. *Наукові записки. Серія : Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти*. 2016. Випуск 10(III). С. 141-147.
30. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 / Андрушечко С.А. и др. Москва: Логос, 2010. 604 с.
31. Водородно-водяной энергетический реактор. URL: <ru.wikipedia.org/wiki> (дата звернення 13.09.2019)
32. Пістун І. П. Особливості різноманітних захворювань внаслідок радіаційних уражень. Суми : Університетська книга, 2010. 120 с.
33. Надеждіна Н.М. Форми гострої променевої хвороби // *Медична радіологія та радіаційна безпека*. 2009. Т. 48. № 3. с. 17-27.
34. Професійні хвороби: підручник / Капустник В. А. та ін.; за ред.: В. А. Капустника, І. Ф. Костюк. 4-те вид., перероблене та доповнене. Київ : Медицина, 2015. 535 с.
35. МКРЗ. Публикация 30. Пределы поступления радионуклидов для работающих с радиоактивными веществами в открытом виде. Москва : Энергоатомиздат, 1983. 60 с.
36. Рекомендації Міжнародної комісії з радіологічного захисту. New York : Pergamon Press, 1991. 197 p.
37. Схемы распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения. В 2 ч. Москва : Энергоатомиздат, 1987.
38. Вимоги до упаковок для довгострокового зберігання та захоронення високоактивних радіоактивних відходів від переробки відпрацьованого ядерного палива [Чинний від 22.03.2009]. *Офіційний вісник України*. 2009. № 21, С. 53.

Навчально-методичне видання  
(українською мовою)

Рижков Вадим Генієвич  
Троїцька Олена Олександрівна  
Новокцонова Оксана Володимирівна  
Ткаліч Інна Олександрівна

## **РАДІАЦІЙНА БЕЗПЕКА**

Навчально-методичний посібник

для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 263 «Цивільна безпека» освітньо–професійної програми «Охорона праці», спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища» освітньо–професійної програми «Технології захисту навколишнього середовища»

Рецензенти :

*Є.О. Тулушев, О.Г. Добровольська*  
Відповідальний за випуск *Г. Б. Кожемякін*  
Коректор *О.В. Новокцонова*