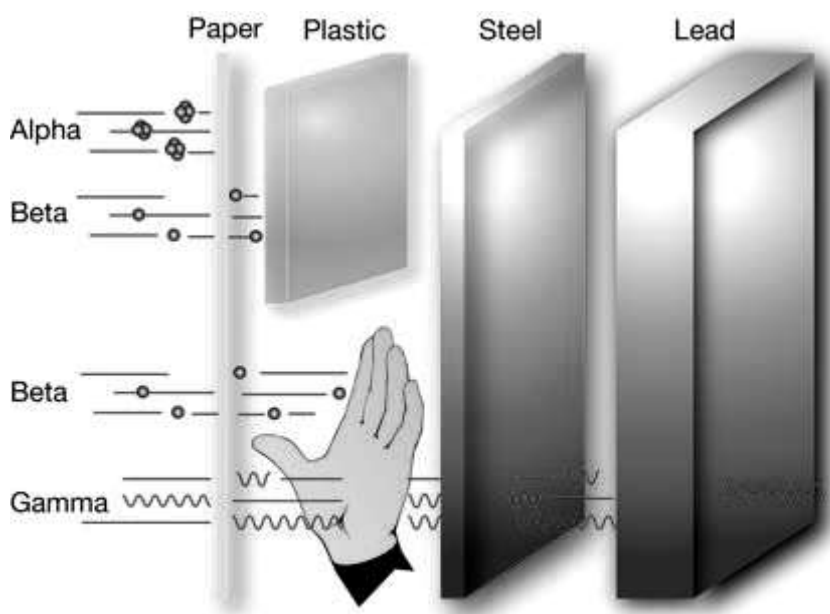


Міністерство освіти, науки молоді та спорту України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

Підлягає поверненню на кафедру

ОСНОВИ РАДІОХІМІЇ ТА РАДІОЕКОЛОГІЇ

ТЕОРЕТИЧНИЙ МІНІМУМ ТА МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ



Чернівці
2020

Основи радіохімії та радіоекології: теоретичний мінімум та методичні рекомендації до лабораторних робіт/ Укл.: Халавка Ю.Б., Копач О.В., Коров'янка О.О.– Чернівці, 2020. – 44 с.

Подано основі теоретичні відомості із радіохімії та радіоекології: положення про будову ядра, радіоактивність, закон радіоактивного розпаду, методи реєстрації йонізуючих частинок, основи ядерної енергетики, вплив йонізуючого випромінювання на організм. Наведено методичні вказівки до лабораторних робіт, перелік орієнтовних тем рефератів, список контрольних питань і банк розрахункових завдань.

Для студентів хімічних та екологічних спеціальностей університетів.

Зміст

Структура модулів навчальної дисципліни Радіохімія	4
Структура модулів навчальної дисципліни Радіоекологія.....	5
Робоча програма для студентів заочної форми навчання.....	6
Список рекомендованої літератури.....	6
Критерії оцінювання навчальних досягнень студентів.....	7
Порядок реєстрації студента в системі дистанційного навчання ЧНУ.....	7
ТЕОРЕТИЧНИЙ МІНІМУМ	8
1. Предмет і завдання радіохімії та радіоекології. Екологічна радіохімія.....	8
2. Атомне ядро	9
2.1. Склад і розміри атомних ядер	9
2.2. Енергія зв'язку ядер. Ядерні сили	9
3. Радіоактивність	10
4. Закон радіоактивного розпаду. Радіоактивні родини	11
5. Одиниці активності	12
6. Методи спостереження та реєстрації йонізуючих частинок та квантів випромінювання	13
7. Ядерні реакції	15
8. Основи ядерної енергетики. Застосування радіоактивних речовин	17
9. Властивості йонізуючого випромінювання та наслідки опромінення.....	20
10. Екологічна роль радіонуклідів	22
11. Хімія радіоактивних елементів.....	23
ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ	26
Лабораторна робота №1. Дозиметричний контроль радіаційного фону	26
Лабораторна робота №2. Радіоактивність. Радіоактивні ряди	27
Лабораторна робота №3. Визначення фонових характеристик і стабільності роботи приладів	27
Лабораторна робота №4. Практичне визначення активності β -випро- мінюючих препаратів	29
Лабораторна робота №5. Калібрування гамма-спектрометричної установки за енергією.....	30
Основний перелік контрольних питань	31
Завдання для самостійної роботи: теми рефератів та ІНДЗ.....	32
ДОДАТКИ	34
Додаток 1. Приклади розв'язування задач з радіохімії та радіоекології.....	34
Додаток 2. Задачі для самостійного розв'язування.....	37
Додаток 3. Приклад білета контрольної роботи	38
Додаток 4. Приклад залікового білета з	39
Додаток 5. Значення деяких фізичних констант	39
Додаток 6. Параметри стійкості деяких радіоактивних ізотопів.....	39
Додаток 7. Основні джерела випромінювання та їх властивості.....	40

Структура модулів навчальної дисципліни «Радіохімія»

№ п / п	Назва модуля	Теми, що входять до модуля		Вид зан. (к-сть годин)		К-сть балів	Разом балів
		лек.	лаб.	лк	лаб		
1.	Основні поняття та закономірності радіоактивних перетворень	1. Вступ. Моделі будови ядра. Види радіоактивного розпаду. 2. Стійкість ядра. Енергія зв'язку ядер 3. Закон радіоактивного розпаду. Природні радіоактивні родини. 4. Одиниці дозиметрії.	1. Дозиметричний контроль радіаційного фону. 2. Радіоактивність. Радіоактивні ряди. 3. Визначення фонових характеристик та стабільності роботи приладів. • Тести (лаб.р.1-3)	8	6	7×3=21	21
2.	Експериментальні дослідження впливу йонізуючих випромінювань	5. Взаємодія різних видів випромінювання з речовинами. 6. Основи ядерної енергетики. Принцип дії атомних електростанцій. 7. Застосування радіоізотопних методів у науці, медицині, техніці. 8. Основи хімії радіонуклідів. Контрольна робота.	4. Розв'язування задач. 5. Практичне визначення активності β-випромінюючих препаратів. 6. Калібрування гамма-спектрометричної установки. • Тести (лаб.р. 4-5) • КР • Реферат	8	6	14 15 20	49
3.	Залік			1		30	100

Структура модулів навчальної дисципліни «Радіоекологія»

№ п / п	Назва модуля	Теми, що входять до модуля		Вид зан. (к-сть годин)		К-сть балів	Разом балів
		лек.	лаб.	лк	лаб		
1.	Основні поняття та закономірності радіоактивних перетворень	1. Вступ. Моделі будови ядра. Види радіоактивного розпаду. 2. Закон радіоактивного розпаду. Природні радіоактивні родини. 3. Одиниці дозиметрії. Виявлення та ідентифікація радіоактивних речовин.	1. Дозиметричний контроль радіаційного фону. 2. Радіоактивність. Радіоактивні ряди. 3. Визначення фонових характеристик та стабільності роботи приладів. • Тести (лаб.р.1-3)	8	6	7×3=21	21
2.	Експериментальні дослідження впливу йонізуючих випромінювань	4. Взаємодія різних видів випромінювання з речовинами. 5. Вплив радіонуклідів на екосистеми. 6. Основи ядерної енергетики. Принцип дії атомних електростанцій 7. Застосування радіоізотопних методів у науці, медицині, сільському господарстві, техніці. 8. Контрольна робота.	4. Розв'язування задач. 5. Практичне визначення активності β-випромінюючих препаратів. 6. Калібрування гамма-спектрометричної установки. • Тести (лаб.р. 4-5) • КР • Реферат	8	6	14 15 20	49
3.	Залік			1		30	100

Робоча програма
лекційних і лабораторних занять з курсів «Радіоекологія» та «Радіохімія»
 (заочна форма навчання)

№	Лекції	Лабораторні роботи
1	Будова атома, α -, β -, γ -промені. Методи спостережень та реєстрації радіоактивних вимірювань.	Техніка безпеки. Дозиметричний контроль радіаційного фону.
2	Дози вимірювання і одиниці їх вимірювання. Застосування радіоактивних ізотопів. Дія опромінення на біологічні об'єкти.	Радіоактивність. Радіоактивні родини.

Список рекомендованої літератури

Основна

1. Гродзинський Д.М. Радіобіологія. – К.: Либідь, 2000. – 448с.
2. Гайнріх Дітер, Гергт Манфред. Екологія. dtv-Atlas. – К.: Знання-Прес, 2001. – 288 с.
3. Горбунов В.В., Товажнянський Л.Л., Омельченко Н.М., Масікесич Ю.Г., Гринь Г.І., Моїсеєв В.Ф., Шапорєв В.П., Байрачний В.Б. Радіоекологія. – Чернівці: Зелена Буковина, 2005. – 199 с.
4. Кутлахмедов Ю.О., Корогодін В.І., Кольтовер В.К. Основи радіоекології. – К.: Вища школа, 2003. – 319 с.

Додаткова

5. Кічно В.О. Поліщук С.В. Гудков І.М. Основи радіобіології та радіоекології. – К., 2009. – 320 с.
6. Краснопорова А.П. Хімія радіоактивних елементів. 1 і 2 ч. –Харків: Основа, 2011. – 80 с.
7. Сущенко С.С. Ядерна фізика для школярів у запитаннях і відповідях. – Харків: Основа, 2010. – 144 с.
8. Бережной Ю.А. Этот удивительный квантовый мир. – К.: Мастер-класс, 2007 – 240 с.
9. Combating illicit trafficking in nuclear and other radioactive material: technical guidance, reference manual. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2007. – 143 p.
10. Nuclear forensics support. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006. – 70 p.

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ДОСЯГНЕНЬ СТУДЕНТІВ (за ECTS)

За умови успішного виконання всіх завдань студент може отримати 100 балів. Із них 70 балів може бути нараховано за результатами проведення п'яти лабораторних занять (по 7 балів за кожну), підготовки та захисту реферату (20 балів) і за контрольну роботу (15 балів); 30 балів – за підсумковий модуль-контроль (залік).

Студент, який набрав 60 балів і більше, має право отримати залік автоматично за відсотком отриманих у семестрі балів.

Сума набраних балів за семестр (ECTS)	Оцінювання в системі ECTS	Оцінка (національна шкала)	Примітка
90–100	A	5 (зараховано)	
82–89	B	4 (зараховано)	
75–81	C	4 (зараховано)	
67–74	D	3 (зараховано)	
60–66	E	3 (зараховано)	
35–59	FX	2 (не зараховано)	з можливістю повторного складання
1–34	F	2 (не зараховано)	повторне вивчення курсу

Порядок реєстрації студента в системі дистанційного навчання ЧНУ

1.	. Зайти на сайт: https://moodle.chnu.edu.ua та обрати вхід через домен chnu.edu.ua
2.	На вашу університетську електронну пошту вам прийде посилання на яке треба клікнути, щоб активувати обліковий запис.
3.	Зайти на http://e-learning.chnu.edu.ua , ввести свій логін і пароль, Знайти курс Радіохімія в категорії ІБХБ https://moodle.chnu.edu.ua/course/view.php?id=791 або Радіоекологія https://moodle.chnu.edu.ua/course/view.php?id=792 Про підтвердження реєстрації вам прийде електронний лист на пошту

ТЕОРЕТИЧНИЙ МІНІМУМ

1. Предмет і завдання радіохімії та радіоекології. Екологічна радіохімія.

Радіохімія – це розділ хімії, що вивчає хімію радіоактивних ізотопів, елементів і речовин, закони їх фізико-хімічної поведінки, хімію ядерних перетворень та супутні фізико-хімічні процеси.

Предмет, методи і об'єкти дослідження радіохімії дозволяють виділити в ній наступні розділи: загальна радіохімія, хімія ядерних перетворень, хімія радіоактивних елементів і прикладна радіохімія.

Завдання радіохімії:

- дослідження хімічної природи радіоактивних речовин та продуктів їх перетворень;
- розробка методів виділення, очистки та концентрування радіоактивних речовин;
- створення екологічно безпечних технологічних процесів, пов'язаних з використанням джерел випромінювання та радіоактивних речовин.
- розробка методів дезактивації забруднених середовищ.

Радіоекологія – це розділ екології, що вивчає розподіл, міграцію та кругообіг радіонуклідів у біосфері та вплив йонізуючого випромінювання на екологічні системи (біогеоценози та популяції організмів).

Завдання радіоекології:

- дослідження якісних і кількісних змін у рослинних і тваринних організмах, в організмі людини під впливом зовнішнього та внутрішнього опромінення;
- вивчення процесів міграції та накопичення природних і штучних радіонуклідів у біосфері;
- дослідження екологічних ланцюжків радіоактивного живлення;
- вивчення індикаторних видів, що вказують на присутність значних покладів радіоактивних речовин і радіоактивних забруднень;
- створення екологічно безпечних технологічних процесів, пов'язаних з використанням джерел випромінювання та радіоактивних речовин.

Термін «радіоекологія» запропонований у 1956 р. незалежно один від одного радянськими вченими А.М.Куз'їним і А.А.Передельським і американським професором Ю.Одумом (Euegene Odum).

Радіаційна екологія – комбіноване відгалуження від таких наукових дисциплін, як загальна радіобіологія, радіохімія і екологія. Це досить «молодий» напрямок, який набув своєї актуальності в період масового випробування ядерної зброї та розвитку атомної енергетики. Тоді для вчених стало зрозумілим, що забруднення відбувається не лише на локальному рівні (ядерні полігони, промислові майданчики підприємств атомної промисловості), а призводить до наслідків планетарного масштабу. Цим і визначаються основні принципи цієї науки.

Розрізняють також *екологічну радіохімію*, яка вивчає роль радіонуклідів в еволюції середовища існування.

2. Атомне ядро

2.1. Склад і розміри атомних ядер

Усі атомні ядра складаються з нуклонів – протонів і нейтронів, які в свою чергу, складаються з кварків. *Протони* (1_1p) мають позитивний заряд, що дорівнює за абсолютною величиною заряду електрона, *нейтрони* (1_0n) – електрично нейтральні. Кількість протонів у ядрі визначає заряд даного ядра Z і приналежність атома до того чи іншого хімічного елемента. Заряд ядра дорівнює порядковому номеру відповідного хімічного елемента в періодичній системі Д. І. Менделєєва. Кількість нейтронів у ядрі позначається N . Для більшості ядер $N \geq Z$. Для легких ядер відношення $N/Z \approx 1$; для ядер, що відповідають елементам у кінці періодичної системи, $N/Z \approx 1,6$.

Повне число нуклонів у ядрі $A = N + Z$ називається масовим числом ядра. Ядра, що мають однаковий заряд ядра (Z) при різних масових числах (A), тобто відрізняються кількістю нейтронів (N), називаються *ізотопами* (наприклад, ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ і ${}^{37}_{17}\text{Cl}$). Ядра, що мають однакове масове число при різних значеннях зарядів ядер, називаються *ізобарами* (наприклад, ${}^{40}_{19}\text{K}$ і ${}^{40}_{20}\text{Ca}$). Конкретне ядро з певними A і Z називається *нуклідом*. Сьогодні відомо близько 300 стійких і понад 1000 нестійких (радіоактивних) ізотопів.

Ядра не мають чітко вираженої межі. Тому поняття «радіус ядра» є умовним. Густина ядерної речовини постійна для всіх ядер, її значення складає $\rho \sim 10^{14} \text{ г/см}^3 = 10^8 \text{ т/см}^3$, отже об'єм ядра пропорційний числу нуклонів у ньому. Радіус ядра можна визначити за формулою $r = R_0 \sqrt[3]{A}$ ($R_0 = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}$).

2.2. Енергія зв'язку ядер. Ядерні сили

Енергією зв'язку ядра (енергією зв'язку нуклонів у ядрі) називається різниця між енергією протонів і нейтронів у ядрі та їх енергією у вільному стані.

Питома енергією зв'язку ядра називається величина, що дорівнює середній енергії зв'язку, що припадає на один нуклон.

Дефектом маси (Δm) називають різницю між масою ядра й арифметичною сумою мас протонів і нейтронів, що входять до його складу. Дефект маси зв'язаний з енергією, що виділяється при утворенні ядра, співвідношенням Ейнштейна $E = \Delta m c^2 = 931 \Delta m (\text{MeV})$. Чим більше Δm , тим більша енергія зв'язку між частинками в ядрі й тим вища його стійкість. Завдяки великим значенням Δm для ядерних реакцій застосовується не закон збереження маси, а загальний закон збереження матерії: $\sum m + \sum E = \text{const}$.

З факту існування стійких ядер виходить, що між його нуклонами діють деякі сили, що зв'язують їх у ядро. Ці сили називаються *ядерними силами*. Енергія ядерних сил і «кулонівської» взаємодії протонів у ядрі дорівнює енергії зв'язку. Ядерні сили володіють такими властивостями:

а) властивість зарядної незалежності: ядерні сили, що діють між двома протонами або між двома нейтронами, або ж між протоном і нейтроном, однакові. Звідси випливає, що ядерні сили мають неелектричну природу;

- б) властивість насичення: кожний нуклон взаємодіє тільки з обмеженим числом найближчих до нього нуклонів;
- в) ядерні сили є силами притягання;
- г) ядерні сили короткодійчі, тобто виявляються на відстанях між нуклонами, порівняних за порядком величини з розмірами самих нуклонів. Ці відстані називаються радіусом R дії ядерних сил ($R \approx 2,2 \cdot 10^{-15}$ м);
- д) ядерні сили мають нецентральний характер, а їх потенціал позбавлений сферичної симетрії;
- е) ядерні сили залежать від орієнтації спінів взаємодіючих нуклонів.
- є) обмінна теорія ядерних сил передбачає, що взаємодія між нуклонами здійснюється шляхом обміну π -мезонами ($p \leftrightarrow \pi^+ + n$).

3. Радіоактивність

Радіоактивністю називається здатність нуклідів спонтанно перетворюватися в інші, із випромінюванням частинок та (або) електромагнітних хвиль.

Природною радіоактивністю називається радіоактивність, яка спостерігається в нестійких нуклідів, що існують у природі.

Штучною радіоактивністю називається радіоактивність нуклідів, одержаних у результаті ядерних реакцій.

Таблиця 1
Основні види радіоактивності

Вид радіоактивності	Зміна заряду ядра Z	Зміна масового числа A	Характер процесу
Альфа-розпад	$Z-2$	$A-4$	Виліт α -частинки, що є системою двох протонів (p) і двох нейтронів (n), зв'язаних воєдино
Бета-розпад	$Z \pm 1$	A	Взаємне перетворення в ядрі нейтрона (n) і протона (p):
β^- – розпад	$Z+1$	A	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
β^+ – розпад	$Z-1$	A	$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
Електронне захоплення (К-захоплення)	$Z-1$	A	$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ $\nu_e, \bar{\nu}_e$ – електронне нейтрино і анти-нейтрино, відповідно
Спонтанний поділ	$Z \rightarrow \frac{1}{2}Z$	$A \rightarrow \frac{1}{2}A$	Поділ ядра на два уламки, що мають приблизно рівні маси і заряди

У більшості випадків усі типи радіоактивності супроводжуються випуском *гамма-променів*, що є потоками фотонів жорстких електромагнітних випромінювань із довжиною хвилі порядку $10^{-9} - 10^{-11}$ см γ -промені є найпоширенішою формою зняття надлишкової енергії збуджених продуктів радіоактивного розпаду. Ядро, що піддається радіоактивному розпаду, називається материнським, ядро, що утворюється – дочірнім.

4. Закон радіоактивного розпаду. Радіоактивні родини

Розпад атомних ядер підкоряється закону

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

де N_0 – кількість ядер у даному об'ємі речовини в момент часу $t = 0$; N – кількість ядер у тому ж об'ємі до моменту часу t ; λ – стала розпаду.

Стала розпаду (λ) має зміст імовірності розпаду ядра за 1 с: вона дорівнює частці ядер, що розпадаються за 1 с. Обернена величина $1/\lambda$ називається *середньою тривалістю життя радіоактивного ізотопу*. Для характеристики стійкості ядер до розпаду користуються поняттям про *період напіврозпаду* $T_{1/2}$, що дорівнює часу, протягом якого розпадається половина початкової кількості ядер даної речовини. Зв'язок величин λ і $T_{1/2}$:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Число розпадів ядер даного препарату в одиницю часу називається активністю препарату; віднесене до одиниці маси препарату, це число називається питомою активністю речовини препарату:

$$A = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

Якщо в результаті розпаду початкового ядра нове ядро також радіоактивне і, внаслідок розпаду, дає стійке або знов радіоактивне ядро і т. д., то має місце ланцюжок радіоактивних перетворень. У цьому випадку сумарна активність ядер, що утворюються в ланцюжку, при вимірюванні її яким-небудь приладом залежить від часу за складнішим законом, оскільки сталі розпаду для різних ланок ланцюжка не дорівнюють один одному.

Стійкість ядер (у середньому) знижується зі зростанням їх масового числа. Природна радіоактивність легких і середніх ядер – рідкісне явище (спостерігається в ядер ${}_{19}^{40}\text{K}$, ${}_{37}^{87}\text{Rb}$, ${}_{49}^{115}\text{In}$, ${}_{57}^{138}\text{La}$, ${}_{62}^{147}\text{Sm}$, ${}_{71}^{176}\text{Lu}$ і ${}_{75}^{187}\text{Re}$). Серед важких атомів (починаючи від $A > 200$) природна радіоактивність – універсальне явище. Ці ядра утворюють 3 природнорадіоактивних і 1 штучнорадіоактивну родини (ряди), названих за довгоживучим «родоначальником» сімейства: родина урану (від ${}_{92}^{238}\text{U}$), родина торію (від ${}_{90}^{232}\text{Th}$), родина актинію (від ${}_{89}^{235}\text{Ac}$) і родина нептунію (від ${}_{93}^{237}\text{Np}$, одержують штучно). Масові числа членів кожної з радіоактивних родин характеризуються формулою:

$$A = 4n + a,$$

де n – ціле число, $a = 0$ для сімейства торію; $a = 1$ для сімейства нептунію; $a = 2$ для сімейства урану; $a = 3$ для сімейства актинію. Перехід від одного члена родини до іншого здійснюється ланцюжком послідовних альфа- і бета-розпадів і закінчується стійким ядром, яким для сімейства з $a = 0$ є ${}_{82}^{208}\text{Pb}$, для $a = 1$ – ${}_{83}^{209}\text{Bi}$, для $a = 2$ – ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ і для $a = 3$ – ${}_{82}^{207}\text{Pb}$.

Для послідовності перетворень в радіоактивних рядах справедливий закон зсуву Фаянса–Содді: *При альфа-розпаді заряд ядра зменшується на 2, а масове число на 4 одиниці. При бета-розпаді заряд ядра зростає на 1, а*

масове число не змінюється.

На сьогодні відомо більше шістнадцяти елементів з $Z > 92$, названих трансурановими. Усі вони у природних умовах, мабуть, не існують і одержані штучним шляхом. Усім трансурановим елементам властива радіоактивність з періодами напіврозпаду, що швидко зменшуються при зростанні Z . Основним видом радіоактивного перетворення трансуранових елементів є альфа-розпад. Ізотопи трансуранових елементів тим стійкіші, чим менше для них число нейтронів N при даному числі протонів Z .

5. Одиниці дозиметрії

Таблиця 2
Основні одиниці дозиметрії

Величина	Одиниця СІ	Визначення	Стара одиниця		Перерахунок
Активність	Бекерель (Бк) $1 \text{ Бк} = 1 \text{ с}^{-1}$	Число розпадів ядер за певний час	кюрі	Ки	$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$
Доза енергії	грей (Гр) $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$	Уся абсорбована в елементі маси енергія випромінювання на елемент маси	Рад	рад	$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$
Еквівалентна доза	зіверт (Зв) $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$	Добуток дози енергії на коефіцієнт відповідного типу випромінювання	рем	рем	$1 \text{ рем} = 10^{-2} \text{ Зв}$
Доза йонізації	кулон на кг (Кл/кг)	Електричний заряд одиниці об'єму, заповненого повітрям, що припадає на масу повітря, що міститься в ньому	рентген	Р	$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
Потужність дози енергії	грей за секунду або за годину (Гр/с або Гр/год)	Доза енергії накопичена за певний час	рад/с або рад/год	рад/с рад/год	$1 \text{ рад/с} = 10^{-2} \text{ Гр/с}$ $1 \text{ рад/год} = 10^{-2} \text{ Гр/год}$
Потужність еквівалентної дози	зіверт за секунду або за годину (Зв/с або Зв/год)	Еквівалентна доза накопичена за певний час	рем/с або рем/год	рем/с рем/год	$1 \text{ рем/с} = 10^{-2} \text{ Зв/с}$ $1 \text{ рем/год} = 10^{-2} \text{ Зв/год}$
Потужність дози йонізації	ампер на кг (А/кг)	Доза йонізації за певний час	рентген/с або рентген/год	Р/с Р/год	$1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$ $1 \text{ Р/год} = 7,17 \cdot 10^{-8} \text{ А/кг}$

6. Методи спостереження та реєстрації йонізуючих частинок і квантів випромінювання

Для спостереження слідів окремих йонізуючих частинок при різних їх взаємодіях з атомами і ядрами застосовуються камера Вільсона, метод ядерної фотографічної емульсії та бульбашкові камери.

У камері Вільсона знаходиться насичена пара якої-небудь рідини. Періодично, шляхом різкого розширення об'єму камери, пара робиться пересиченою. Якщо в момент розширення у камеру влітає йонізуюча частинка, то утворені нею йони стають центрами конденсації молекул пересиченої пари.

Помістивши камеру в магнітне поле (*метод Вільсона-Скобельцина*), можна з вивчення параметрів сліду зробити висновок про природу і властивості частинки. Так, кривизна трека частинки в магнітному полі визначає знак її заряду. Довжина і товщина трека, відхилення його від прямолінійності за рахунок багатократного розсіювання, кількість крапель на одиницю довжини трека дозволяють проводити ідентифікацію або ототожнення частинок.

Метод ядерної фотографічної емульсії (зокрема, товстошарових фотопластин) заснований на тому, що, проходячи через емульсію, заряджена частинка йонізує атоми і молекули середовища (емульсії). Зокрема, кристали хлориду срібла фотопластин руйнуються під дією йонізуючих частинок, що дає змогу „проявити” трек. Створене частинками приховане фотографічне зображення стає видимим після проявлення пластинок і вивчається стереографічно на пошарових зрізах фотоемульсії. Метод ядерної фотографічної емульсії має перевагу перед камерами Вільсона у великій затримуючій здатності, тобто в сильному гальмуванні частинок, дозволяючи вивчати взаємодії частинок дуже великих енергій.

Переваги отримання безпосередньо просторової картини треків частинок високих енергій реалізує в собі *бульбашкова камера*. Вона являє собою посудину, наповнену якою-небудь прозорою перегрітою рідиною. Іонізуюча частинка, потрапляючи в камеру, викликає різке скипання рідини у вузькому каналі уздовж треку. Ланцюжок пухирців пари фотографується, як у камері Вільсона. У камері з рідким воднем вивчаються ефекти зіткнень частинок високих енергій з ядрами водню (протонами). Крім чистих рідин застосовуються пересичені розчини газів у рідинах, а також суміші рідин, що дозволяють працювати при кімнатних температурах.

Для реєстрації та дослідження різних випромінювань (що викликають йонізацію та неіонізуючих) застосовується *йонізаційна камера*.

У разі неіонізуючих випромінювань йонізація є вторинним процесом, що відбувається за рахунок вторинних заряджених частинок, які виникають при взаємодії випромінювання з речовиною. Йонізаційна камера є замкнутим об'ємом з віконцем для впускання випромінювання, у яку введено два електроди. Під дією прикладеної напруги йони, створені випромінюванням у газі, рухаються до електродів. Напруга на електродах вибирається з таким

розрахунком, щоб камера працювала в режимі насичення своєї вольт-амперної характеристики.

Для реєстрації йонізуючих частинок при невисокій активності їх джерел застосовуються лічильники: пропорційний, Гейгера–Мюллера, іскровий і сцинтиляційний. Не дозволяючи безпосередньо ідентифікувати частинки, лічильники дають можливість визначити густину їх потоку і розподіл частинок за енергіями в потоці.

Пропорційний лічильник – циліндрична посудина, заповнена яким-небудь газом, з двома концентричними електродами, один з яких (анод) є дротом, натягнутим по осі циліндра, а інший (катод) утворює зовнішню металеву оболонку робочого об'єму лічильника. При попаданні йонізуючої частинки в лічильник, унаслідок того що він працює на лінійній частині вольт-амперної характеристики робочого газу, в лічильнику виникає несамостійний розряд. Біля анода через великий градієнт напруженості електричного поля виникає ударна йонізація молекул газу первинними йонами, і з'являється імпульс струму, величина якого пропорційна первинній йонізації, тобто енергії частинки, що влетіла в лічильник.

Лічильник Гейгера–Мюллера не відрізняється істотно за конструкцією та за принципом дії від пропорційного лічильника, але працює на ділянці насичення вольт-амперної характеристики газу, що його наповнює (так званому плато), унаслідок чого створює однакові імпульси струму незалежно від первинної йонізації, тобто безпосередньо рахує кількість йонізуючих частинок.

Робота *сцинтиляційного лічильника* заснована на явищі люмінесценції. Світловий спалах, що виникає при попаданні зарядженої частинки в сцинтилюючий кристал, сприймається фотопомножувачем і лічиться електронною схемою. Висота імпульсу залежить від інтенсивності спалаху, а остання визначається енергією частинки. Тому лічильник дозволяє визначати розподіл частинок за енергіями.

У випадках, коли йонізація, створювана частинками в робочому об'ємі лічильника або йонізаційної камери, незначна або ж зовсім відсутня (для нейтральних частинок), перед реєструючими приладами або всередині них встановлюються речовини, з яких первинні частинки вибивають заряджені частинки. Наприклад, для реєстрації гамма-променів, що створюють слабку йонізацію в газах і речовинах з малими атомними номерами, використовується тонка металева фольга, і лічильник реєструє вибиті з фольги фотоелектрони. Для реєстрації нейтронів використовуються речовини, що містять водень, причому лічильник реєструє протони, вибиті з них нейтронами.

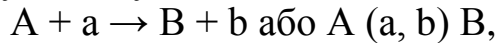
7. Ядерні реакції

Ядерними реакціями називаються перетворення атомних ядер, викликані їх взаємодією з елементарними частинками або один з одним.

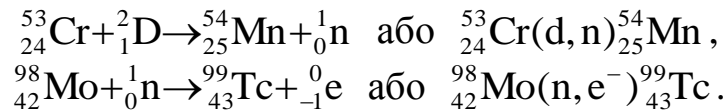
Для здійснення ядерної реакції під дією позитивно зарядженої частинки необхідно, щоб частинка володіла кінетичною енергією, якої б було достатньо для подолання сил кулонівського відштовхування. Для одержання пучків

заряджених частинок з енергіями, які б були достатні для проникнення в будь-яке атомне ядро, створені прискорювачі заряджених частинок, у яких за допомогою електричних і магнітних полів частинки розганяються до дуже великих енергій, одним із таких прискорювачів є Великий адронний колайдер.

У більшості ядерних реакцій беруть участь два ядра і дві частинки; одна пара ядро – частинка називається початковою, а інша – кінцевою. Ядерні реакції символічно записуються у вигляді



де A і B – початкове й кінцеве ядра, a і b – початкова й кінцева частинки в реакції. Наприклад:



Ядерна реакція характеризується енергією ядерної реакції. Вона дорівнює різниці кінетичних енергій кінцевої та початкової пари в реакції. При $Q < 0$ реакції йдуть з поглинанням енергії та називаються ендотермічними; при $Q > 0$ реакції йдуть з виділенням енергії і називаються екзотермічними.

Основні відмінності між ядерними й хімічними реакціями :

1. У хімічних реакціях розглядаються перетворення вагових кількостей речовин, у ядерних окремих атомів. Тому ядерні реакції завжди відносять до 1 атома, а хімічні - до 1 моль речовини. Відповідно до цього енергію, яка виділилася або поглинулася в ядерних реакціях, виражають в електронвольтах, у той час як у хімічних реакціях її вказують у джоулях на моль (96 кДж/моль відповідає 1 еВ/атом).
2. У хімічних реакціях не відбувається перетворення елементів. Вони супроводжуються зміною зв'язку між атомами. У ядерних реакціях утворюються нові нукліди, які можуть належати різним елементам.
3. У хімічних реакціях, як правило, виділяється значно менше енергії, ніж у ядерних реакціях, які супроводжуються перетворенням значної частини матерії на енергію. Наприклад, під час поділу 1 г ${}^{235}\text{U}$ виділяється $8,4 \cdot 10^7$ кДж порівняно із 33,9 кДж, які виділяються під час згоряння 1 г вугілля.

Під час ядерних реакцій справедливі наступні *закони збереження*:

- 1) *закон збереження електричного заряду*: сумарний електричний заряд ядер і частинок до реакції дорівнює сумарному електричному зарядові всіх продуктів ядерної реакції;
- 2) *закон збереження кількості нуклонів*: під час ядерних реакцій нуклони не знищуються й не виникають з нічого, відбувається лише їх перерозподіл (захоплення ядром, виліт з ядра, перехід до іншого ядра тощо).
- 3) *закон збереження й перетворення енергії*: повна енергія всіх частинок, які вступають у реакцію, дорівнює повній енергії всіх частинок, що виникають після реакції;
- 4) *закон збереження імпульсу*: сума імпульсів ядер і частинок до вступу в ядерну реакцію дорівнює сумі імпульсів усіх частинок, що виникли після реакції;
- 5) *закон збереження маси*: маса частинок, які вступили в реакцію, має

дорівнювати масі одержаних частинок речовини і фотонів випромінювання.

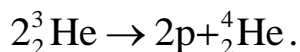
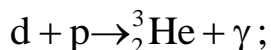
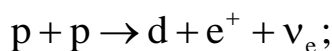
Ядерні реакції класифікуються: а) за енергією частинок, що викликають реакцію, б) за родом частинок, що беруть участь у них; в) за родом ядер, що беруть участь у них; г) за характером ядерних перетворень, що відбуваються.

За родом частинок, що беруть участь у ядерних реакціях, розрізняють: а) реакції під дією нейтронів; б) реакції під дією заряджених частинок – протонів, дейтронів (ядер важкого водню), альфа-частинок (ядер гелію) і багатозарядних йонів важких хімічних елементів (джерелами заряджених частинок є: природно-радіоактивні елементи, прискорювачі заряджених частинок, космічне проміння); в) реакції під дією гамма-квантів.

Ядерні реакції поділу (а також самовільний, або спонтанний, поділ ядер) можливі лише для дуже важких ядер елементів, розташованих у кінці періодичної системи. Нестійкість ядер до поділу пов'язана з великою кількістю в них протонів і пов'язаним з цим збільшенням кулонівських сил відштовхування, особливо поблизу меж ядра. Тому потенційний бар'єр для руйнування ядра на дві й більш крупні частини (уламки) виявляється невисоким і може бути подоланий вже при невеликих енергіях активації, що надається ядру попаданням у нього нейтронів навіть з малою кінетичною енергією. У результаті резонансного захоплення нейтрона ядром з утворенням складеного ядра супроводжується поділом останнього.

Особливим видом ядерних реакцій є екзотермічні реакції синтезу легких ядер, що ефективно протікають при надвисоких температурах (порядку 10^7 – 10^9 К) і самопродовжуються за рахунок значного виділення енергії. Такі реакції називаються *термоядерними*. Високі температури в них необхідні для того, щоб кінетична енергія теплового руху ядер виявилася достатньою для подолання кулонівського потенційного бар'єру ядер і подальшого збудження реакції синтезу.

Термоядерні реакції є основними джерелами енергії зірок. Відомо два термоядерні цикли, в яких енерговиділення відбувається за рахунок перетворення ядер водню в ядра гелію. В одному з варіантів протонно-протонного циклу:



Ядро гелію утворюється із 4 протонів з виділенням значної кількості енергії.

8. Основи ядерної енергетики. Застосування радіоактивних речовин

Використання ядерної енергії включає роботу кількох дуже різних промислових виробництв. Кожен із цих етапів характеризується певним ступенем ризику. Джерелами потенційного та реального дозового навантаження на персонал і населення можуть бути пил уранових шахт, нормальна робота та аварійні випадки на ядерних об'єктах, забруднення довкілля при транспортуванні та захороненні радіоактивних відходів.

Сукупність процесів добування, переробки, використання та утилізації

ядерного пального називається *циклом ядерного палива*.

Є два можливих варіанти поводження з ядерним паливом після його використання в атомному реакторі і необхідної витримки у сховищі. Перший - це приведення у належний вигляд (кондиціювання) і «пряме» остаточне захоронення (*розімкнений цикл*), другий - переробка із вилученням із нього радіонуклідів для подальшого використання (*замкнений цикл*).

Переробка включає виділення урану і напрацьованого плутонію із використаного палива, виробництво нових паливних елементів з цих матеріалів і їх нового використання в реакторі. Більшість країн, які використовують ядерну енергію, не переробляють своє використане паливо.

Пристрій, у якому може відбуватися ядерна ланцюгова реакція поділу ядер важких елементів, що самопідтримується, під дією нейтронів, називається ядерним реактором. Ядерні реактори складаються з п'яти основних елементів: речовини, що зазнає поділу, сповільнювача швидких нейтронів, відбивача нейтронів, системи охолодження, систем безпеки і регулювання.

Як речовину, що зазнає поділу, використовують звичайно ізомери урану ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ізомер торію ^{232}Th , а також ізомери плутонію ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu .

Як сповільнювач нейтронів застосовуються матеріали, що мають великий переріз для непружного розсіювання нейтронів і разом з тим малий переріз для захоплення нейтронів. Як сповільнювачі нейтронів звичайно застосовуються графіт, важка вода (D_2O), а також берилій, оксид берилію, гідриди металів, органічні рідини. Ядра вказаних речовин слабо поглинають нейтрони.

Як відбивачі нейтронів, що оточують активну зону реактора, у якій знаходяться речовина, що зазнає поділу, і сповільнювач, застосовуються ті ж речовини, що і для сповільнювача. Ефективність відбивача швидко зростає зі збільшенням його товщини й досягає межі, коли ця товщина в декілька разів перевищує середню довжину вільного пробігу нейтронів у ньому.

За розташуванням в активній зоні ядерного палива і сповільнювача ядерні реактори поділяються на гомогенні, у яких обидві речовини рівномірно змішані одна з одною, і гетерогенні, у яких обидві речовини розташовуються порізно у вигляді блоків. За областю енергій нейтронів розрізняють реактори теплові, проміжні та швидкі. В останніх використовуються безпосередньо нейтрони поділу і відсутній сповільнювач.

За призначенням ядерних реакторів їх поділяють на енергетичні, дослідницькі, випробувальні, реактори для виробництва нових матеріалів та інші види.

За сукупністю всіх перерахованих ознак розрізняють такі ядерні реактори: уран-графітові, водо-водняні, киплячі, реактори із газовим теплоносієм тощо.

У реакторі-розмножувачі ядра однієї речовини, що зазнає поділу, перетворюються в результаті ядерних реакцій у ядра іншої речовини, причому внаслідок різного ізотопного складу елементів, що зазнають поділу, кількість утвореного ізоотопу, що зазнає поділу, перевищує кількість первинного ізоотопу. У *бриддерних* реакторах утворена й первинна речовини є ізоотопами одного й того ж хімічного елемента (наприклад, „спалюється” ^{235}U , утворюється ^{233}U), у

реакторах-конверторах – ізомери різних хімічних елементів (наприклад, „спалюється” ^{235}U , утворюється ^{239}Pu).

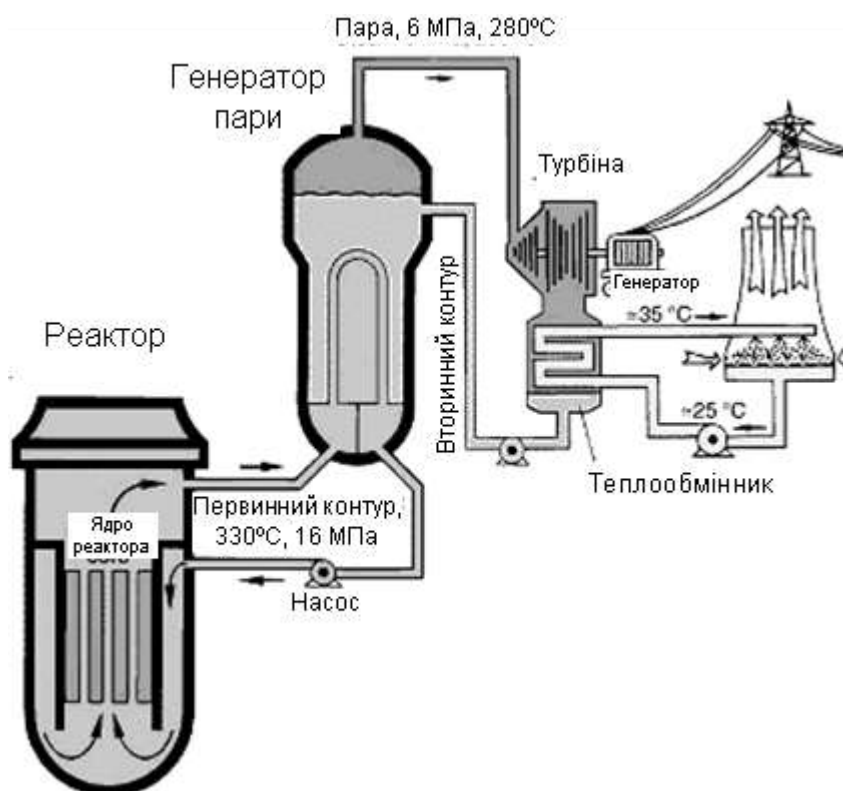


Схема 1. Принципова схема роботи атомної електростанції.

Система охолодження призначена для відведення з активної зони реактора енергії поділу (зазвичай у вигляді певної кількості теплоти), в яку переходить кінетична енергія уламків поділу при їх гальмуванні в речовині, що зазнає поділу, і сповільнювачі. Через активну зону реактора прокачується теплоносій (вода, водяна пара, He, CO_2 , повітря, деякі рідкі метали і сплави), який потім через теплообмінник передає тепло у вторинну теплову систему реактора.

Системи регулювання та безпеки забезпечують можливість управління ланцюговою реакцією, недопущення її мимовільного розгону, а також забезпечують захист оточуючого реактор простору від інтенсивних потоків нейтронів і гамма-променів, існуючих в активній зоні реактора. Для першої мети застосовуються стрижні з речовини з високим перерізом поглинання нейтронів, що всуваються в активну зону (бор, кадмій). Друга мета досягається оточенням реактора масивними шарами речовин, які сильно поглинають нейтрони і гамма-промені (наприклад, комбінацією бетону і свинцю), а також повною замкнутістю ланцюгів теплоносія та відсутністю витоків у них.

На відміну від ядерного реактора у атомній бомбі виникає некерована ядерна ланцюгова реакція на швидких нейтронах, що має, зважаючи на дуже швидке виділення великих кількостей енергії, характер вибуху. Її реалізація здійснюється перевищенням маси речовини, що зазнає поділу, над критичною шляхом швидкого з'єднання декількох частин бомби.

Для створення високої температури в некерованій термоядерній реакції

($T \sim 10^7$ K) застосовується атомна бомба, що дає таку температуру під час вибуху на вельми малий ($\sim 10^{-6}$ с) проміжок часу, за який, проте, встигає відбутися термоядерна реакція в масі ізотопів водню (воднева бомба).

Основою термоядерної енергетики є використання енергії екзотермічних реакцій синтезу легких ядер. Найдоступніша за областю необхідних температур – реакція між ядрами дейтерію і тритію: ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \text{n}$. Енерговиділення, розраховане на один нуклон у такій реакції, складає $\sim 3,5$ MeV/нуклон, тоді як при поділі ядра ${}^{238}_{92}\text{U}$ ця величина складає 0,85 MeV/нуклон.

Утворення збуджених ядер у реакціях із нейтронами приводить до розпаду ядер через значний час після закінчення реакції, викликаній нейтронним опромінюванням. Випромінювання таких ядер, що складається, як правило, з бета-часток і гамма-променів, є прикладом штучної радіоактивності. Періоди напіврозпаду штучно-радіоактивних ядер мають значення від часток секунди до тисяч років. Сьогодні можна одержувати штучно-радіоактивні ізотопи, які володіють високою питомою активністю, що дозволяє створювати компактні джерела радіоактивного випромінювання, широко вживані в різних галузях науки і техніки в методі, відомому під назвою методу мічених атомів або методу радіоактивних ізотопів.

Основою практичного використання радіоактивних ізотопів є такі їх властивості:

- будь-який радіоактивний ізотоп є міченим атомом відповідного хімічного елемента, тобто атомом, який за своїми фізичними і хімічними властивостями поводить себе так само, як і звичайний атом, але за поведінкою якого можна спостерігати за його радіоактивним промінням;
- будь-яке радіоактивне проміння має певну проникаючу здатність;
- радіоактивне проміння, проходячи крізь речовини, йонізує їх;
- під дією нейтронів та інших випромінювань великої енергії в речовині утворюється наведена радіоактивність.

Застосування радіоізотопних методів в науці, медицині, техніці включає такі основні напрямки:

- Метод мічених атомів
- Ізотопні джерела енергії
- Контроль та управління промисловими процесами
- Застосування радіонуклідів у біології та медицині
- Радіохімічні методи аналізу
- Ядерна хронометрія і метрологія

9. Властивості йонізуючого випромінювання та наслідки опромінення

Через невелику глибину проникнення α - та β -промені пошкоджують лише шкіру, γ -промені спричиняють опромінення всього тіла.

Густина йонізації α -, β - та γ -променів співвідноситься як 10000:100:1. Типи променів з високою густиною йонізації (α -промені, швидкі нейтрони) показують лінійний перебіг кривої впливу дози, який типами променів з нижчою густиною йонізації (β -, γ -промені) досягається лише після плавного початкового перебігу.

У вторинних реакціях повільні нейтрони та γ -, або рентгенівські, промені віддають енергію електронам. Останні вивільнюються з електронної оболонки атомів і можуть на своєму шляху через матерію зруйнувати тисячі зв'язків атомів.

Еквівалентна доза враховує, що різні промені під час проходження крізь організм залежно від типу тканини переносять різні кількості енергії; вони можуть перетворити атоми в йони (іонізація). Через різну кількість енергії променів густина йонізації та залежна від неї біологічна ефективність різні.

Для нормування впливу різних променів на організм застосовується поняття *відносної біологічної ефективності* (ВБЕ), яка для гамма- і бета-променів становить 1, а для нейтронів та альфа-променів сягає значення 20.

Наслідком первинної та вторинної дії є хімічні реакції в клітинах тіла та зародків, передусім генетичного матеріалу, порушується поділ клітин, можуть змінитись їх форма та величина.

Через резонансні коливання з багатими на енергію частинками як ДНК комплексні молекули розбиваються. Гострі соматичні пошкодження променями настають у людини за інтенсивного опромінення (опіки шкіри, випадання волосся, зміна складу крові).

На рівні органів руйнування поділу клітин призводить до процесів злякисного розростання (рак) та в перші місяці вагітності – до патологій ембріонального розвитку, передусім мозку (мікроцефалії). Через вищу частоту поділу клітин живі організми на ранніх стадіях розвитку зазнають більших ушкоджень, ніж дорослі. Пізнішими соматичними пошкодженнями є лейкемія та, із запізненням, інші види раку. Навіть точкові мутації на подвійних тяжках ДНК через базові пошкодження змінюють генетичний код і перешкоджають зчитуванню т-РНК.

Базові пошкодження та окремі розриви тяжів руйнують властиві клітинам репаративні системи. Розриви подвійних тяжів призводять до невиправних наслідків (втрати частин хромосом) і транслокацій (відкладень частин хромосом) і зазвичай до смерті живого організму.

Ступені опромінення людини

25 Зівертів – гарантована імовірність виникнення ракового захворювання

10 Зв – смертельна доза

4,5 Зв – важкий (ЛД 50)

1,0 Зв – променева хвороба середньої тяжкості

0,75 Зв – незначні зміни в кровоносній системі

0,25 Зв – допустиме разове аварійне опромінення персоналу на АЕС

0,10 Зв – допустиме разове аварійне опромінення населення

0,05 Зв – допустиме опромінення персоналу АЕС на рік

0,005 Зв – допустиме опромінення населення на рік

0,002 Зв – природне фонове опромінення на рік в Україні

0,002 Зв – штучне фонове опромінення на рік в Україні

0,0003 Зв – опромінення при рентгеноскопії шлунка

0,00003 Зв – опромінення при рентгені зубів

Залежно від часу прояву після опромінення радіобіологічні ефекти поділяють на близькі та віддалені. До близьких ефектів належать ті, які виявляються в перші години, дні, тижні, місяці після опромінення. Віддалені наслідки реєструються у більш пізні строки. До близьких наслідків радіаційного ураження відносять радіаційну стимуляцію, яка виявляється одразу після опромінення; більшість морфологічних змін у тканинах і окремих органах, що виникають протягом перших днів, тижнів післярадіаційного періоду; гостру променеву хворобу всіх ступенів тяжкості, що розвивається протягом 1-1,5 місяця, і загибель.

Віддаленими наслідками радіаційного ураження ссавців вважають злоякісні новоутворення: лейкози, ракові пухлини, променеву катаракту, нефросклероз (хворобу, що виникає внаслідок морфологічного переродження тканин і судин нирок при ураженні їх радіоактивними речовинами при їх виведенні з організму), а також скорочення тривалості життя і прискорення старіння, що реалізується в останні періоди життя.

До найвіддаленіших наслідків опромінення як у тварин так і в рослин належать генетичні ефекти.

Віддалені наслідки променевого ураження мають вірогідний, або випадковий, характер. Завбачити віддалені наслідки опромінення у якомусь конкретному організмі неможливо, їх можна передбачити на основі статистичного аналізу в опроміненій популяції організмів і виразити чисельність уражених осіб у процентах або визначити кількість уражених осіб на тисячу, мільйон. Згідно *лінійної гіпотези* імовірність прояву віддалених наслідків радіаційного ураження лінійно зростає із збільшенням дози опромінення.

Проте не тільки від дози опромінення залежить прояв радіобіологічних ефектів. Так, дози, що стимулюють ріст і розвиток рослин родини хрестоцвітних, згубні для рослин родини бобових. Дози, безпечні для комах, смертельні для всіх тварин класу ссавців. Тобто ефекти визначаються чутливістю організмів до йонізуючої радіації (радіочутливістю).

Основні методи зменшення впливу радіації на людину:

Специфічні – фізико-технічні (час, екранування, відстань), хімічні (радіопротектори, антиоксиданти, йодна профілактика), біологічні (радіозахисне харчування). Неспецифічні – фізична тренуваність, психологічна стійкість, гігієна житла та тіла.

10. Екологічна роль радіонуклідів

Нукліди можуть впливати на біоценоз на кожному трофічному рівні. Фізичним експозиційним шляхом радіонукліди виходять з промислового

устаткування через димові труби або стічні води і безпосередньо опромінюють живі організми.

Радіонукліди можуть потрапляти безпосередньо на поверхню тіла (зовнішнє забруднення).

Через вдихання (інгаляцію) газоподібних речовин, аерозолів, через приймання їжі радіонукліди потрапляють фізіологічним шляхом у тіло, там розподіляються й опромінюють організм зсередини (внутрішнє забруднення).

На шляху від джерела емісії через їжу до кінцевого споживача кількість радіоізопоів зростає специфічно для виду й органа. Так, ізопои Pu накопичуються в лімфовузлах без впливу, ізопои I збираються в щитоподібній залозі, що використовують під час радіологічного обстеження органу. Якщо накопичення відбувається в органах (напр., ^{90}Sr у кістках), які для живлення наступного консумента не відіграють жодної ролі, тоді воно екологічно малозначуще.

Високих значень накопичення досягають ізопои з хімічними властивостями, подібними до тих, що мають елементи, потрібні клітинам, з якими вони потім вступають у конкуренцію (напр.: ^{90}Sr із Ca у кістках та ^{134}Cs із K у нервових клітинах). Добре забезпечення Ca запобігає проникненню ^{90}Sr в структуру кісток. Якщо щитоподібна залоза достатньо забезпечена неактивним йодом, ^{131}I не накопичується.

Для моделювання переходу нуклідів із ґрунту в рослину і від рослин до консументів визначаються трансфер-фактори. Вони враховують активність продукту (напр., молока) порівняно з активністю корму.

Радіонукліди характеризуються активністю випромінювання, яка залежить від швидкості розпаду.

Біологічна активність радіонуклідів залежить від кількості енергії, яка переноситься на матерію організму (поглинута доза випромінювання).

До найбільш екологічно суттєвих ізопоів відносяться:

- ті, що є ізопоами “елементів життя”, з яких побудована жива речовина (в тому числі й тіло людини);
- продукти штучного поділу найважчих і нестійких ядер на дві частини близьких мас у процесі роботи всіх ядерних реакторів і під час випробування ядерної зброї;
- група радіоактивних інертних газів, які виділяють у повітря всі ядерні реактори у процесі їх нормальної роботи;
- група важких ретрорадіонуклідів та продуктів їх розпаду, яким належить невелика частка природного фону радіації.

Вирішальний фактор – тривалість перебування нукліду в організмі, біологічний період напіврозпаду, внаслідок якого половина нуклідів, що потрапили в організм, виділилась або розпалась.

У променево-біологічному ланцюгу дії розрізняють первинні та вторинні реакції, α - та β -промені реагують з атомами в первинних реакціях і за низької проникної здатності мають високу біологічну ефективність, оскільки всю свою енергію віддають клітинам.

Загроза організму є тоді, коли α - та β -випромінювачі вдихаються, вбираються з їжею або проникають через рани; газоподібні нукліди, такі як ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ (радон), особливо небезпечні з погляду радіоекології.

Використання ядерної енергії з урахуванням вимог безпеки не має створювати багато проблем. Біологи та медики вбачають проблему в неминучому зростанні променевого навантаження внаслідок використання ядерної енергії.

11. Хімія радіоактивних елементів

Хімія радіоактивних елементів відрізняється від хімії нерадіоактивних елементів низкою особливостей, що впливають із загальної властивості всіх об'єктів її вивчення — радіоактивності.

Найбільш важливі аспекти явища радіоактивності, що обумовлюють особливості вивчення хімії радіоактивних елементів:

1. Обмеженість часу існування переважної більшості радіоактивних елементів і радіоактивних нуклідів.
2. Принципово інша природа процесів, які відбуваються в радіоактивних нуклідах, і обумовлені цим величезні масштаби енергетичних змін.
3. Зміна хімічної природи елемента в результаті радіоактивних перетворень.

На відміну від об'єктів дослідження класичної хімії, частина об'єктів, досліджуваних у радіохімії, існує короткочасно. Тому під час радіохімічних досліджень винятково важливою стає роль фактора часу (необхідність ретельного планування експерименту й відпрацьовування всіх стадій дослідження, використанні експресних методик тощо). Із цією особливістю пов'язане також акцентування уваги на певних ізотопах досліджуваного елемента.

Обмеженість часу існування об'єктів радіохімії спричиняє необхідність проводити дослідження з винятково малими кількостями й концентраціями радіоактивних речовин.

Необхідність роботи з малими концентраціями продиктована не тільки неможливістю одержання ряду деяких радіоактивних елементів у значних кількостях, але й надзвичайно великими енергетичними ефектами, що супроводжують радіоактивні перетворення.

Фізико-хімічні процеси, які відбуваються в системах, що включають радіоактивні елементи, незрівнянно складніші, ніж у випадку стабільних елементів.

Можливість проведення радіохімічних досліджень існує завдяки дуже високій чутливості методів детектування радіоактивних нуклідів.

Радіоактивний ізотоп, який отримують різними способами, як правило, перебуває в суміші з іншими елементами. Тому після одержання завжди стоїть завдання виділення певного ізотопу із цієї суміші та подальше концентрування.

Так виділення радіоактивного ізотопу й очищення його від домішок часто необхідні, коли використовується ізотоп, отриманий опроміненням мішені або

в результаті ядерного розпаду.

Завдання «розділення» радіоактивних ізотопів доводиться вирішувати під час витягування їх із суміші ізотопів, які утворюються в результаті реакції поділу ядер Урану (продукти поділу) або коли в результаті ядерної реакції утворюється кілька різних ізотопів, під час радіохімічного аналізу природних об'єктів на вміст радіоактивних ізотопів.

Часто операції виділення (відділення) і розподілу поєднують із концентруванням, тобто одержують речовини з більшою питомою активністю, ніж вихідна. Наприклад, під час відділення радіоактивного ізотопу від матеріалу мішені або під час аналізу природних об'єктів на вміст радіоактивних ізотопів, обов'язковим етапом є концентрування радіонукліду.

Для виділення, концентрування й кількісного розподілу радіоактивних ізотопів застосовують як звичайні фізико-хімічні методи, так і специфічні методи, які використовують особливості поведінки радіоактивних речовин в ультрамікроконцентраціях.

Найбільше поширення для концентрування й виділення радіоактивних ізотопів одержали методи, засновані на відмінностях у розподілі елементів у гетерогенних системах, які складаються із двох фаз. Як фази, що становлять систему, частіше від інших використовують такі: рідина — рідина, рідина — тверде тіло, газ — тверде тіло, газ — рідина на носії.

Основними методами виділення, розділення, концентрування й очищення радіоактивних ізотопів є:

- співосадження;
- екстракція;
- хроматографія;
- електрохімічне виділення;
- метод Сцилларда — Чалмерса (Szilard–Chalmers) (метод віддачі);
- інші методи (наприклад метод відгону й вилуджування).

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторна робота №1 Дозиметричний контроль радіаційного фону

Доза випромінювання – величина, що характеризує кількість випромінювання в середовищі та вимірюється за його йонізуючою дією у повітрі. Доза випромінювання вимірюється в рентгенах (р). Доза випромінювання, віднесена до одиниці часу, називається потужністю дози і вимірюється в р/год та кратній одиниці мкр/год.

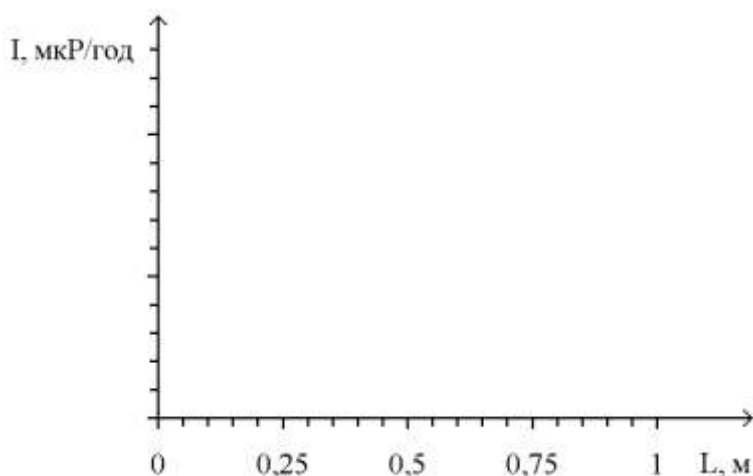
Метою лабораторної роботи є ознайомлення з методикою вимірювання потужності дози природного фону (космічні промені, радіоактивність навколишнього середовища, тіла людини тощо).

Викладачем буде вказано 3 – 4 об'єкти. Вимірювання проводиться приладом СРП-88 на відстані 5 см, 50 см та 1 м від об'єкта. На кожній відстані вимірювання необхідно проводити тричі. Дані з індикатора приладу записувати, не зважаючи на коми та нулі, що передують відмінним від нуля цифрам (наприклад, показ 0,047 потрібно записувати 47). Для **кожного об'єкта** усі дані звести у таблицю:

Об'єкт № _____

L, м	0,05	0,5	1
1 вимір (N_1)			
2 вимір (N_2)			
3 вимір (N_3)			
Середнє значення (\bar{N})			
Фон $I = \bar{N}/3,7$, мкр/год			

За отриманими даними побудувати залежність потужності дози від відстані до об'єкта.



Аналогічні таблицю та графік побудувати для всіх вказаних об'єктів. Зробити висновок з отриманих даних.

Лабораторна робота №2 Радіоактивність. Радіоактивні ряди

За допомогою програмного пакета „Radio” засвоїти принципи радіоактивних перетворень у радіоактивних рядах, вміти застосовувати правило зміщення Содді–Фаянса та записувати рівняння ядерних реакцій у повній і скороченій формі.

Студент виконує тренувальні вправи 1-4 та одну контрольну вправу, яка вказується викладачем. Рівняння ядерних реакцій із виконаної контрольної вправи записуються в протокол виконання роботи.

Лабораторна робота №3 Визначення фонових характеристик та стабільності роботи приладів

Теоретична частина

При визначенні радіоактивності препарату можна отримати помилковий результат внаслідок неконтрольованих змін у режимі роботи апаратури: зміна ефективності детектора, нестабільність порога дискримінації імпульсів тощо.

Для об'єктивної оцінки стабільності установки використовують статистичні характеристики, зокрема χ^2 -тест. Для цього проводять 10-20 вимірів препарату за рівні проміжки часу. Причому виміри проводять при великих швидкостях рахунку (вимір зразкового джерела) і при малій швидкості рахунку (вимірювання фону). Тривалість окремого виміру вибирають виходячи з необхідної точності результатів. При вимірюваннях зразкового джерела бажано, щоб статистична похибка кожного виміру не перевищувала 1% (число імпульсів у кожному вимірі повинно бути більше 1000), а при вимірюваннях фону – 10% (більше 10 імпульсів у кожному вимірі).

Отримані результати обробляють у такий спосіб. Знаходять величини середнього числа імпульсів для обох груп:

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (1),$$

де n-число вимірів, N-число імпульсів у кожному вимірі. Визначають експериментальне значення величини χ^2 .

$$\chi_{\text{експ}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{\bar{N}} \quad (2).$$

Цю величину порівнюють з теоретичним значенням χ^2 для 90% довірчого рівня:

$\chi_{\text{теор}}^2$	N
14,7	10
21,1	15
27,2	20

Якщо $\chi_{\text{експ}}^2 < \chi_{\text{теор}}^2$, то з ймовірністю 90% можна стверджувати, що установка працює стабільно.

Виконання роботи

Вимірювання проводяться на дозиметрі-радіометрі гамма-бетта-випроміненень МКС-07 „ПОШУК”. Для вимірювання щільності потоку бета-частинок (далі щільності потоку) в пошуковому та точному режимах необхідно до пульта дозиметра через роз’єм ХІ під’єднати виносний блок детектування бета-частинок БДИБ-07.

Для увімкнення дозиметра потрібно короткочасно натиснути кнопку УВМК. Про увімкнення дозиметра свідчить інформація, що висвічується на рідкокристалічному цифровому індикаторі та звукова сигналізація зареєстрованих бета-частинок.

Звукова сигналізація зареєстрованих гамма-квантів чи бета-частинок вмикається відразу після увімкнення дозиметра. Для вимкнення звукової сигналізації треба короткочасно натиснути кнопку „ЗВУК”, при цьому відключиться лише звукова сигналізація кожного зареєстрованого гамма-кванта чи бета-частинки, а сигналізація перевищення запрограмованого порогового рівня збережеться. Для увімкнення звукової сигналізації необхідно повторно короткочасно натиснути кнопку „ЗВУК”.

Вимірювання щільності потоку бета-частинок проводиться у точному режимі. Для зчитування результатів у режимі точного вимірювання необхідно натиснути й утримувати кнопку „ТОЧНО” протягом 4 с. Про перехід в режим точного вимірювання свідчить короткочасний двотональний мелодійний звуковий сигнал та поява на цифровому індикаторі символу «БЕ10», який буде висвічуватись протягом 0.5 с через кожні 2 с. У проміжках між висвітленням символу «БЕ10» буде висвітлюватися результат усереднення останніх десяти вимірювань, здійснюваних у пошуковому режимі за методом «пливучого вікна». Одиниці, в яких вимірюється щільність потоку – 10^3 част./($\text{см}^2 \cdot \text{хв}$).

При вимірюванні фону записати в таблицю 15 показів щільності потоку бета-частинок. Для вимірювання зразкового джерела встановити джерело біля вікна бета-детектора. Одразу ж увімкнеться звукова сигналізація перевищення порогового рівня. Для вимкнення звукової сигналізації потрібно натиснути і утримувати кнопку „ПОРІГ”. При цьому на цифровому індикаторі висвітлиться автоматично запрограмоване значення порогового рівня ($0,02 \times 10^3$ част./($\text{см}^2 \cdot \text{хв}$)). Після 2 с утримування кнопки в натиснутому стані розпочнеться процес програмування нового значення порогового рівня. При цьому з інтервалом в 1 с буде зростати значення, починаючи з молодшого розряду. При досягненні у програмованому розряді значення 9 відбудеться його обнулення та почне програмуватися наступний зліва розряд. Аналогічно відбувається програмування усіх старших розрядів з автоматичним пересуванням коми. Встановити нове значення порогового рівня $40,00 \times 10^3$ част./($\text{см}^2 \cdot \text{хв}$) Для фіксації запрограмованого рівня необхідно відпустити кнопку „ПОРІГ”. Занотувати 15 значень із рідкокристалічного індикатора приладу. Дані занести в таблицю

Для вимкнення дозиметра потрібно повторно натиснути й утримати в натиснутому стані протягом 3 с кнопку „УВМК”.

№ виміру	Кількість імпульсів, фон	Кількість імпульсів, джерело
1		
2		
3		
....		
...		
\bar{N}		
$\chi_{\text{експ}}^2$		

За формулою (1) визначити середнє число імпульсів при вимірюванні фону і при вимірюванні зразкового джерела. За формулою (2) визначити експериментальне значення $\chi_{\text{експ}}^2$. Порівняти експериментальне значення з його теоретичним значенням при даній кількості вимірів. Зробити висновки.

Лабораторна робота №4

Практичне визначення активності β -випромінюючих препаратів

Теоретична частина

Усі кількісні виміри радіоактивності можна виразити у вигляді формули:

$$A = K \cdot N, \quad (1)$$

де A – активність препарату, Бк; N – виміряна за допомогою приладу величина, як правило, швидкість розрахунку імпульсів, імп./сек; K – перерахунковий коефіцієнт, Бк/(част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$).

Головне завдання радіометрії – правильно і з достатньою точністю визначити коефіцієнт K . Перерахунковий коефіцієнт K можна визначити двома методами: абсолютним і відносним.

При абсолютному методі або детектор повинен реєструвати всі частини, які випромінюються зразком у тілесному куті 4π , або необхідно ввести набір поправок, які враховують частку частинок, що втрачаються за межами чутливого об'єму детектора.

Відносний метод полягає в тому, що активність невідомого зразка визначається в порівнянні зі зразковим джерелом, ідентичним заданому зразку (за товщиною шару, в $\text{мг}/\text{см}^2$, розмірами й енергетичним спектром). За такими зразковими джерелами граднують установку, тобто визначають коефіцієнт перерахунку K , який зв'язує активність препарату з даним спектром випромінювання зі швидкістю рахунку на перерахунковому пристрої.

Практична частина

1. Приготування калієвого зразкового джерела та розрахунок його активності.

β -активність КС1 обумовлена присутністю у природному калії радіоактивного ізотопу.

Період напіврозпаду ^{40}K $T_{1/2} = 1.28 \cdot 10^9$ років.

Вміст ^{40}K у природній суміші ізотопів калію 0.0119 %.

При розпаді ^{40}K тільки 89 % від загального числа розпадів супроводжуються випромінюванням β -частинки. Виходячи із цих даних, розрахувати активність 1 кг КС1.

Для приготування зразкових джерел використовують хімічно чистий хлорид калію. Сіль КС1 попередньо прожарюють при температурі 120-130°C протягом 2 годин, а потім розтирають у фарфоровій ступці. Приготувати серію зразкових калієвих джерел з масами приблизно 0.1, 0.2, 0.3, 1, 2, 3 грами. Точність зважування 0.001г.

Розрахувати активність отриманих джерел, результати занести в таблицю.

Маса джерела, г						
Активність, Бк						

2. Калібрування апаратури

Провести вимірювання фону N_{ϕ} (част./см²·хв.) установки (див. методику до лабораторної роботи №3). Для кожного з приготовлених зразкових джерел провести вимірювання кількості імпульсів $N_{\phi+d}$. Визначити кількість імпульсів для кожного джерела

$$N_d = N_{\phi+d} - N_{\phi}$$

Визначити перерахунковий коефіцієнт для кожного джерела.

Отримані результати занести в таблицю

m джерела , г						
$N_{\phi+d}$, част./см ² ·хв.						
N_{ϕ} , част./см ² ·хв.						
N_d , част./см ² ·хв.						
K, Бк/(част./см ² ·хв.)						

Побудувати графіки залежності $N(m)$, $K(m)$. З отриманих результатів зробити висновки.

Лабораторна робота №5

Калібрування гамма-спектрометричної установки за енергією

Зміст роботи полягає в калібруванні гамма-спектрометричної установки на базі АМА - 03Ф за допомогою джерел гамма-квантів із відомими енергіями.

Практична частина. Встановити у блок детектора джерело з набору зразкових спектрометричних джерел ^{137}Cs (енергія гамма-квантів 661,6 кеВ) та ^{60}Co (1773 кеВ, 1332,5 кеВ) на такій відстані, яка забезпечує завантаження спектрометра не більше як 1000 с^{-1} . Провести набір гамма-спектра цих джерел. Визначити положення кожного піка в отриманому спектрі. Побудувати по експериментальних точках графік залежності $E=V \cdot A$ в координатах $E - A$, де E – енергія гамма-квантів, кеВ, V – градувальний коефіцієнт, A – значення каналу вершини піка. Використовуючи отриманий графік, визначити величину градувального коефіцієнта.

Порядок виконання роботи на гамма-спектрометричній установці

I. Підготовка до роботи.

1. Увімкнути блоки низької напруги БНН-151.
2. Увімкнути стабілізатор напруги Б2-3.
3. Увімкнути блок високої напруги БНВ-30-01 та блок підсилення імпульсів БУИ
4. Увімкнути аналізатор АМА-03Ф
5. Увімкнути ЕОМ «ИСКРА-1030-М»
6. На ЕОМ «ИСКРА-1030-М» завантажити програму АК (файл *ak.bat*).

II. Проведення вимірювань.

1. Встановити джерело на детектор.
2. На клавіатурі АМА-03Ф натиснути сенсор «РЕЖИМ», із меню, що з'явилося, вибрати «ТЕ» (тобто натиснути сенсор «2» та «ВВОД ЧИСЛА»). Далі набрати число «900» (тобто $900\text{ с} = 15\text{ хв}$) і знову «ВВОД ЧИСЛА».
3. На клавіатурі АМА-03Ф натиснути сенсор «СБРОС», далі сенсор «ОБЩИЙ СПЕКТР».
4. Натиснути сенсор «СТАРТ», далі «НАБЛЮДЕНИЕ». Лічильник «ТЕ» на екрані почне зменшуватися від значення «900» до «0» із кроком 1 с. Після того, як лічильник досягне 0-го значення, проводиться обробка отриманого спектра.

III. Обробка отриманого спектра.

1. У програмі АК на ЕОМ «ИСКРА-1030-М» вибрати «Активность», «Управление АМА-03Ф», а потім «Счит.спектра».
2. Після того, як спектр буде зчитано із «АМА-03Ф» (висвітиться повідомлення на екрані), у меню «Активность» вибрати «Графика».
3. Рухаючи маркер клавішами управління курсором та використовуючи додаткові клавіші, вказані на екрані монітора, визначити положення

вершини піка(ів) отриманого спектра й занотувати значення параметра «Е».

4. Отримані експериментальні значення «Е» для джерел ^{137}Cs та ^{60}Co для звести в таблицю та побудувати графік залежності $E - f(A)$. З отриманого графіка визначити калібрувальний коефіцієнт.

Джерело	Е – Енергія гамма-кванта, кеВ	А – Значення вершини піка (експеримент)
^{137}Cs	661,6	
^{60}Co (I пік)	1173	
^{60}Co (II пік)	1332,5	

Основний перелік контрольних питань

1. Моделі будови ядра.
2. Радіоактивність. Види радіоактивного розпаду.
3. Явище ізоtopії. Ізотопія атомних ядер.
4. Модель Іваненко-Гейзенберга.
5. Закон радіоактивного розпаду. Закономірності радіоактивних родин.
6. Закон накопичення радіоактивних ізоtopів.
7. α -, β -, γ -промені. Порівняльна характеристика.
8. Методи спостережень та реєстрації радіоактивних вимірювань.
9. Лінійна передача енергії (ЛПЕ).
10. Поглинена доза. Одиниці вимірювання (СІ і позасистемні).
11. Потужність дози. Одиниці вимірювання (СІ і позасистемні).
12. Експозиційна доза. Енергетичний еквівалент експозиційної дози.
13. Еквівалентна доза. Одиниці вимірювання (СІ і позасистемні).
14. Відносна біологічна ефективність випромінювання. Колективна доза.
15. Принцип дії атомних електростанцій. Ядерні реактори.
16. Ядерне ділення, критична маса.
17. Ланцюгові реакції.
18. Ядерний синтез. Термоядерні реакції.
19. Дія опромінення на біологічні об'єкти.
20. Лінійна і порогова моделі опромінення. Порогова доза.
21. Критерії радіаційної безпеки
22. Гранична доза (ГД). Гранично допустима доза (ГДД)
23. Джерела опромінення людини.
24. Природні джерела опромінення.
25. Іонізуючі випромінювання в Космосі.
26. Антропогенні зміни радіоактивного фону.
27. Наслідки Чорнобильської катастрофи.
28. Біологічне значення природної радіоактивності довкілля.
29. Природна радіоактивність і життєдіяльність клітин.
30. Природна радіоактивність і еволюція видів.

Завдання для самостійної роботи: теми рефератів та ІНДЗ

(курсивом виділені теми, вибір яких повинен попередньо узгоджуватися з викладачем)

1. Використання радіоізотопних методів досліджень у науці та техніці.
2. Штучна радіоактивність.
3. Ядерний синтез.
4. Наслідки випробування ядерної зброї.
5. *Ядерна зима.*
6. Радіоактивність у медицині.
7. Радіоактивне забруднення водою.
8. Проблеми захоронення відходів ядерного палива.
9. Космічна радіоактивність.
10. Радіоактивне забруднення атмосфери.
11. Радіоактивне забруднення літосфери.
12. *Наслідки опромінення.*
13. Радіокундли в їжі, трансфер-фактор.
14. *Вплив радіонуклідів на живі організми.*
15. Шляхи регенерації відходів ядерного палива.
16. Видобуток та обробка уранової руди.
17. Вплив стронцію-90 на екосистеми.
18. Проблема радону, як джерела альфа-випромінювання.
19. Сповільнювачі для ядерних реакторів: природа та принцип дії.
20. Явища синергізму в дії йонізуючого випромінювання.
21. Природна радіоактивність та еволюція видів.
22. Генетичні зміни внаслідок дії йонізуючого випромінювання.
23. Інтегративність радіобіологічних реакцій.
24. Радіометричні ефекти.
25. Методи визначення коефіцієнту накопичення радіонуклідів у живих організмах.
26. Радіоємність міських екосистем. Характеристики.
27. Характеристики накопичення радіонуклідів у с/г продукції.
28. Накопичення радіонуклідів гідробіонтами.
29. Моделі визначення радіоємності екосистем.
30. Вплив радію-226 на екосистеми і життєдіяльність організмів.
31. Шляхи надходження радіонуклідів у екосистеми.
32. Космогенні радіонукліди.
33. Міграція радіонуклідів в екосистемах.
34. Принципи та мета радіологічної експертизи.
35. Радіочутливість живих організмів.
36. Джерела випромінювання в інтегрально-оптичних схемах.
37. Проблеми забруднення Світового океану радіоактивними відходами.
38. *Проблеми радіаційної стану після Чорнобильської трагедії.*
39. Радіація природна і штучна, основні джерела радіації.
40. Види електромагнітного випромінювання.
41. Одиниці випромінювання доз радіації.
42. Дозиметрія.

43. Біологічна дія йонізуючої радіації.
44. *Ядерна зброя, випробування, наслідки для довкілля.*
45. *Ядерна енергетика.*
46. *Стан і перспективи розвитку ядерної енергетики у світлі аварії на ЧАЕС.*
47. Методи захисту довкілля від радіації.
48. *Уроки Чорнобиля.*
49. Типи і методи моніторингу довкілля.
50. Організація національної та міжнародної мережі моніторингу природного середовища.
51. Детектори йонізуючого випромінювання.
52. Використання радіоактивних ізотопів у наукових дослідженнях.
53. Радіоактивність деяких морських організмів.
54. *Радіація та її вплив на живий організм.*
55. Захист від радіаційного впливу на живий організм.
56. Ядерні реактори.
57. Нейтрино.
58. Радіоактивне забруднення навколишнього середовища.
59. Радіаційно-хімічне перетворення неорганічних сполук.
60. Радіологічний контроль продуктів харчування.
61. Ядерні частинки.
62. Природні речовини, що зменшують наслідки радіоактивного опромінення людського організму.
63. *α -, β -, γ -промені.*
64. Вплив природнього радіоактивного фону на здоров'я людини.
65. Радіоактивність і еволюція видів.
66. Радіоактивне забруднення водних ресурсів та методи їх очистки.
67. *Озонова діра.*
68. Небезпечні та шкідливі фактори атомної енергетики.
69. Небезпечні та шкідливі фактори розробок руд урану.
70. Перспективи термоядерної енергетики.
71. Чи можливо відмовитись від атомної енергетики: думки експертів.
72. Аварія на японській АЕС Фукусіма-1.
73. Радонотерапія.
74. Сучасні прилади дозиметричного контролю та ідентифікації.
75. Цикл ядерного палива.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Приклади розв'язування задач з радіохімії та радіоекології

Приклад 1. Визначити питому енергію нуклонів в ядрі (міцність ядра) Урану-235.

Розв'язання

$m(^{235}\text{U}) = 235,04393$ а.о.м. $A = 235$, $Z = 92$

Питома енергія зв'язку визначається за формулою:

$$\varepsilon_{зв} = \frac{E_{зв}}{A}$$

Енергію зв'язку ядра Урану визначимо із співвідношення

$E_{зв} = 931\Delta m(\text{MeV})$, де Δm — дефект маси ядра Урану:

$E_{зв} = 931 [92 \cdot 1,00783 + (235-92) 1,00867 - 235,04393] \text{ MeV} = 1782,9581 \text{ MeV}$.

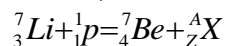
$$\varepsilon_{зв} = \frac{1782,9581}{235} = 7,59 \text{ MeV / нуклон}$$

Приклад 2. При бомбардуванні Літію-7 протонами певної енергії виникає Берилій-7. Яке проміжне ядро утворюється та яка частинка викидається у процесі цієї реакції?

Розв'язання

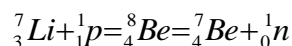
Задачі на визначення невідомої частинки чи ядра в ядерних реакціях розв'язуються шляхом застосування до ядерної реакції закону збереження масового числа A (нуклонного числа) і закону збереження заряду Z (протонного числа).

Запишемо схематично ядерну реакцію, яка відбувається в задачі:



Щоб визначити, що це за частинка X , необхідно знати її нуклонне число A і протонне число Z . Застосовуючи до реакції закон збереження нуклонного числа ($7 + 1 = 7 + A$), одержуємо, що $A = 1$. Застосовуючи до реакції закон збереження протонного числа ($3 + 1 = 4 + Z$), одержуємо, що $Z = 0$. Частинкою, яка має такі характеристики, є нейтрон ${}^1_0\text{n}$. Проміжне ядро — ${}^8\text{Be}$

Тоді реакцію можна записати так:



Приклад 3. Під час радіоактивного перетворення ядра Урану-238 відбулось 8 альфа-розпадів і 6 бета-розпадів. Який нуклід утворився в результаті?

Розв'язання

Спочатку визначимо, як змінюється протонне число Z . З правил Фаянса-Содді випливає, що втрата 8 альфа-частинок призводить до зменшення числа

протонів Z , на 2×8 одиниць, а втрата 6 бета-частинок — до збільшення числа Z на 6×1 одиниць. Таким чином,

$$Z = Z_0 - 16 + 6 = 92 - 10 = 82$$

Тепер визначимо, як змінюється нуклонне число A . З правил зміщення випливає, що на зміну нуклонного числа A , впливає тільки втрата альфа-частинок, кожна з яких має нуклонне число 4. Втрата 8-ми альфа-частинок призводить до зменшення нуклонного числа A , на 8×4 одиниць:

$$A = A_0 - 32 = 238 - 32 = 206.$$

З таблиці Менделєєва визначаємо невідомий нуклід.
Це буде нуклід ^{206}Pb .

Приклад 4. Скільки атомів Радону ^{226}Rn розпадається за добу з 1 млн атомів? ($T_{1/2} (^{226}\text{Rn}) = 3,82$ доби)

Розв'язання

Для знаходження числа атомів, що розпалися за 1 добу, скористаємося формулою закону радіоактивного розпаду:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

де N — число атомів, що не розпалися. Тоді число атомів, які розпалися, буде дорівнювати:

$$N_0 - N = N_0 - N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = 10^6 - 10^6 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{3,82}} = 167000 \text{ атомів}$$

Приклад 5. Визначити потужність дози поглинутого випромінювання, яку одержує онкохворий масою 70 кг при повному опроміненні тіла кобальтовим джерелом ^{60}Co активністю 1000 Ки, якщо на нього припадає 2 % випромінювання. Середня енергія гамма-квантів складає 1,25 МеВ. Приблизно 50 % гамма-випромінювання взаємодіє з тканинами тіла, а решта випромінювання проходить, не спричиняючи біологічної дії.

Розв'язання

Потужність дози поглинутого випромінювання визначимо за формулою:

$$P_D = \frac{D}{t}$$

де D — поглинута доза йонізуючого гамма-випромінювання, t — час.

$$D = \frac{E_{\text{поглинута}}}{m}$$

Оскільки поглинається та здійснює вплив лише частка енергії E , яку випромінює кобальтове джерело за час t . Тому

$$E_{\text{погл}} = \eta_1 \eta_2 E$$

Загальну енергію E яка випромінюється джерелом, визначимо зі співвідношення:

$$E = E_\gamma A t$$

де A — активність Кобальту-60 (кількість розпадів за 1 с).

Підсумувавши вирази отримаємо:

$$P_D = \frac{\eta_1 \eta_2 E_\gamma A t}{m t}$$

Підставивши числові дані, врахувавши, що $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$, а $1,25 \text{ МеВ} = 1,25 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ отримаємо:

$$P_D = 1,1 \cdot 10^{-13} \text{ (Гр/с)}$$

Приклад 6. Скільки грей при опроміненні повільними нейтронами еквівалентні за біологічною дією 0,5 Гр при опроміненні швидкими нейтронами?

Розв'язання

Визначимо еквівалентну дозу при опроміненні швидкими нейтронами:

$D_{\text{шв}} = D k_{\text{шв}}$, де $k_{\text{шв}}$ — КБЕ для швидких нейтронів $k = 10$.

Еквівалентна доза для повільних нейтронів:

$D_{\text{пов}} = D k_{\text{пов}}$, де $k_{\text{пов}}$ — КБЕ для повільних нейтронів $k = 3$.

Отже:

$$D_{\text{нов}} = \frac{0,5 \text{ Гр} \cdot 10}{3} = 1,7 \text{ Гр}$$

Приклад 7. Жива тканина масою $m = 5 \text{ г}$ поглинула 10^8 альфа-частинок з енергією 3 МеВ. Визначити біологічну дію поглинутого випромінювання (в Зв).

Розв'язання

Сумарна енергія, яка надійшла в тканину:

$$E = N_{\text{част}} \cdot E_{\text{частинки}} = 10^8 \cdot 3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$$

Еквівалентна доза з урахуванням КБЕ альфа-частинок ($k=20$) становить

$$D_{\text{екв}} = \frac{E k}{m} = \frac{4,8 \cdot 10^{-5} \cdot 20}{5 \cdot 10^{-3}} = 0,192 \text{ Зв}$$

Задачі для самостійного розв'язування

- Символ одного з ізотопів елемента ${}^{52}_{24}\text{E}$. Вкажіть назву елемента, кількість протонів і нейтронів у ядрі, кількість електронів в електронній оболонці.
- Природний магній складається з ізотопів ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{25}\text{Mg}$ і ${}^{26}\text{Mg}$. Підрахувати середню атомну масу природного магнію, якщо вміст окремих ізотопів у атомних відсотках відповідно дорівнюють 78.6, 10.1 і 11.3.
- При бомбардуванні ядер бору ${}^{10}_5\text{B}$ нейтронами був отриманий ізотоп літію ${}^7_3\text{Li}$. Визначити проміжне ядро і частинку, що вилітає.
- Яке проміжне ядро утворюється в реакції ${}^{32}_{16}\text{S}(\alpha, d){}^{34}_{17}\text{Cl}$?
- Скільки α -частинок втрачає ядро радону, якщо утворюється ізотоп свинцю ${}^{214}_{82}\text{Pb}$?
- Напишіть рівняння ядерних реакцій:
 - ${}^{238}_{92}\text{U} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow 5{}_0^1\text{n} + \dots$
 - ${}^{244}_{96}\text{Cm} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{245}_{97}\text{Bk} + {}^1_1\text{H} + \dots$
- Яке проміжне ядро та який кінцевий ізотоп утворюється, якщо при бомбардуванні ізотопу ${}^{34}\text{Cl}$ альфа-частинками збуджене ядро випромінює протон? Записати повне та скорочене рівняння ядерної реакції.
- Яке проміжне ядро та який кінцевий ізотоп утворюється, якщо при бомбардуванні ізотопу ${}^{60}\text{Co}$ протонами збуджене ядро випромінює альфа-частинку? Записати повне та скорочене рівняння ядерної реакції.
- Яке проміжне ядро та який кінцевий ізотоп утворюється, якщо при бомбардуванні ізотопу ${}^{230}\text{Th}$ ядрами ${}^{22}\text{Ne}$ збуджене ядро випромінює 4 нейтрони? Записати повне та скорочене рівняння ядерної реакції.
- Яке проміжне ядро та який кінцевий ізотоп утворюється, якщо при бомбардуванні ізотопу ${}^{81}\text{Br}$ альфа-частинками збуджене ядро випромінює дейтрон? Записати повне та скорочене рівняння ядерної реакції.
- Яке проміжне ядро та який кінцевий ізотоп утворюється, якщо при бомбардуванні ізотопу ${}^{177}\text{Hf}$ нейтронами збуджене ядро випромінює позитрон? Записати повне та скорочене рівняння ядерної реакції.
- Яке проміжне ядро та який кінцевий ізотоп утворюється, якщо при бомбардуванні ізотопу ${}^{243}\text{Am}$ ядрами ${}^{16}\text{O}$ збуджене ядро випромінює 2 протони? Записати повне та скорочене рівняння ядерної реакції.
- Яке проміжне ядро та який кінцевий ізотоп утворюється, якщо при бомбардуванні ізотопу ${}^{239}\text{U}$ ядрами ${}^{10}\text{B}$ збуджене ядро випромінює альфа-частинку? Записати повне та скорочене рівняння ядерної реакції.
- Чому дорівнює енергія зв'язку між протоном і нейтроном в ядрі дейтерію в кДж/моль, якщо $\Delta m(\text{D}) = 0,00185$ а.о.м.?
- Знайдіть точну масу ізотопу ${}^{200}_{80}\text{Hg}$, коли відомо, що енергія зв'язку в ядрі атома Гідраргіуму складає 7,91 МеВ/нуклон.
- Якщо з 10^{12} атомів радію щосекунди розпадається 14 атомів, то чому дорівнює для радію константа радіоактивного розпаду і з кількох атомів Ra

розпадається один атом за 1 с?

17. За допомогою ядерних реакцій був отриманий ізотоп масою 2 г з періодом напіврозпаду 12 год. Яка маса цього ізотопу залишиться через 2 доби?
18. Підрахувати період напіврозпаду ізотопу деякого елемента, якщо через 100 хв залишилося 10 % від початкової маси цього ізотопу.
19. Початкова активність ізотопу ^{57}Co складала 1200 Бк. Якою буде активність цього ізотопу через 1,48 року, якщо $T_{1/2}(^{57}\text{Co}) = 270$ днів?
20. Початкова активність ізотопу ^{234}U складала $1,4 \cdot 10^6$ Бк. Якою буде активність цього ізотопу через 10^6 років, якщо $T_{1/2}(^{234}\text{U}) = 2,5 \cdot 10^5$ років?
21. Початкова активність ізотопу ^{241}Am складала $6,8 \cdot 10^8$ Бк. Якою буде активність цього ізотопу через 115,5 років, якщо $T_{1/2}(^{241}\text{Am}) = 462$ роки?
22. Початкова активність ізотопу ^{85}Kr складала $1,8 \cdot 10^8$ Бк. Якою буде активність цього ізотопу через 103 роки, якщо $T_{1/2}(^{85}\text{Kr}) = 10,3$ роки?
23. Початкова активність ізотопу ^{220}Rn складала 2800 Бк. Якою буде активність цього ізотопу через 2,575 хвилин, якщо $T_{1/2}(^{220}\text{Rn}) = 51,5$ с?
24. Початкова активність ізотопу ^{241}Am складала $5,2 \cdot 10^5$ Бк. Якою буде активність цього ізотопу через 231 рік, якщо $T_{1/2}(^{241}\text{Am}) = 462$ роки?
25. Початкова активність ізотопу ^{85}Kr складала 1300 Бк. Якою буде активність цього ізотопу через 51,5 рік, якщо $T_{1/2}(^{85}\text{Kr}) = 10,3$ роки?
26. Вміст ізотопу ^{238}U у суміші ізотопів U у солі $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ складає 0,05 %. Підрахувати активність 100 г цієї солі, якщо $T_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4,5 \cdot 10^9$ років.
27. Вміст ізотопу ^{57}Co у солі $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{NH}_3)_2\text{Br}_2]\text{NO}_3$ складає 0,05 %. Підрахувати активність 2 г цієї солі, якщо $T_{1/2}(^{57}\text{Co}) = 270$ днів.
28. Вміст ізотопу ^{238}U у солі UO_2SO_4 складає $5 \cdot 10^{-4}$ %. Підрахувати активність 150 г цієї солі, якщо $T_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4,5 \cdot 10^9$ років.
29. Вміст ізотопу ^{239}Pu у солі PuOCl_2 складає 10,5 %. Підрахувати активність 4,5 кг цієї солі, якщо $T_{1/2}(^{239}\text{Pu}) = 2,4 \cdot 10^4$ років.
30. Вміст ізотопу ^{60}Co у солі CoCl_2 складає 5,5 %. Підрахувати активність 280 г цієї солі, якщо $T_{1/2}(^{60}\text{Co}) = 5,2$ роки.
31. Вміст ізотопу ^{57}Co у солі $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ складає 3,15 %. Підрахувати активність 20 г цієї солі, якщо $T_{1/2}(^{57}\text{Co}) = 270$ днів.
32. Вміст ізотопу ^{239}Pu у солі $(\text{PuO})_2\text{SO}_4$ складає 0,45 %. Підрахувати активність 0,05 г цієї солі, якщо $T_{1/2}(^{239}\text{Pu}) = 2,4 \cdot 10^4$ років.

Додаток 3

Приклад білета контрольної роботи

Контрольна робота. Білет №1

1. Радіоактивність. Види радіоактивного випромінювання.
2. Яке проміжне ядро та який кінцевий ізотоп утворюється, якщо при бомбардуванні ізотопу ^{114}Cd альфа-частинками збуджене ядро випромінює 2 протони? Записати повне та скорочене рівняння ядерної реакції.
3. Початкова активність ізотопу ^{241}Am складала $6,8 \cdot 10^8$ Бк. Якою буде активність цього ізотопу через 115,5 років, якщо $T_{1/2}(^{241}\text{Am}) = 462$ роки?
4. Вміст ізотопу ^{239}Pu у суміші ізотопів Pu у солі $(\text{PuO})_2\text{SO}_4$ складає 0,45%.

Підрахувати активність 0,05 г цієї солі, якщо $T_{1/2}(^{239}\text{Pu}) = 2,4 \cdot 10^4$ років.

Додаток 4

Приклад залікового білета

Заліковий білет – радіохімія (радіоекологія)

1. Будова атома та атомного ядра. Ізотопи.
2. Яке проміжне ядро та який кінцевий ізотоп утворюється, якщо при бомбардуванні ізотопу ^{79}Se альфа-частинками збуджене ядро випромінює протон? Записати повне та скорочене рівняння ядерної реакції.
3. Обчисліть енергію зв'язку в ядрі атома $^{120}_{50}\text{Sn}$, якщо точна маса цього ізотопу дорівнює 119,902 а.о.м.
4. Початкова маса ізотопу ^{234}U складала 160 г. Якою буде маса цього ізотопу через 10^6 років, якщо $T_{1/2}(^{234}\text{U}) = 2,5 \cdot 10^5$ років?

Додаток 5

Значення деяких фізичних констант

Елементарний заряд: $e = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ Кл;

Маса спокою протона: $m_p = 1,007276$ а.о.м. = $1,6725 \cdot 10^{-27}$ кг;

Маса спокою нейтрона: $m_n = 1,008665$ а.о.м. = $1,6748 \cdot 10^{-27}$ кг;

Маса спокою електрона: $m_e = 5,4860 \cdot 10^{-4}$ а.о.м. = $9,1091 \cdot 10^{-30}$ кг;

Постійна Планка: $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

Швидкість світла у вакуумі: $c = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с;

Число Авогадро: $N_A = 6,0225 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$;

Атомна одиниця маси: 1 а.о.м. = $1,6603 \cdot 10^{-27}$ кг;

Електронвольт: 1 еВ = $1,6021 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Додаток 6

Параметри стійкості деяких радіоактивних ізотопів

Ізотоп	Тип розпаду	Радіоактивна постійна λ , с $^{-1}$	Період напіврозпаду $T_{1/2}$
Co-57		$2,97 \cdot 10^{-8}$	270 днів
Co-60		$4,24 \cdot 10^{-9}$	5,2 року
Cs-137		$8,14 \cdot 10^{-10}$	27,0 років
Sr-90	β	$7,80 \cdot 10^{-10}$	28,2 року
Am-241	α	$4,76 \cdot 10^{-11}$	461,8 року
Pu-239	α	$9,11 \cdot 10^{-13}$	$2,41 \cdot 10^4$ років
Kr-85	β	$2,13 \cdot 10^{-9}$	10,3 року
U-234	α	$8,79 \cdot 10^{-14}$	$2,50 \cdot 10^5$ років
U-238	α	$4,88 \cdot 10^{-18}$	$4,50 \cdot 10^9$ років
Rn-210	α	$7,13 \cdot 10^{-5}$	2,7 години
Rn-220	α	$1,35 \cdot 10^{-2}$	51,5 с
Rn-222	α	$1,81 \cdot 10^{-1}$	3,825 с

Основні джерела випромінювання та їх властивості
(γ - роки, EC – захоплення електрона)

Нуклід	$T_{1/2}$, роки	Тип розпаду	Частинка		Фотон	
			Енергія, MeV	Імовірність	Енергія	Імовірність
$^{22}_{11}\text{Na}$	2.603 y	β^+ , EC	0.545	90%	0.511 1.275	Annih. 100%
$^{54}_{25}\text{Mn}$	0.855 y	EC			0.835 Cr K x rays	100% 26%
$^{55}_{26}\text{Fe}$	2.73 y	EC			Mn K x rays: 0.00590 0.00649	24.4% 2.86%
$^{57}_{27}\text{Co}$	0.744 y	EC			0.014 0.122 0.136	9% 86% 11%
						Fe K x rays 58%
$^{60}_{27}\text{Co}$	5.271 y	β^-	0.316	100%	1.173 1.333	100% 100%
$^{68}_{32}\text{Ge}$	0.742 y	EC				Ga K x rays 44%

$\rightarrow ^{68}_{31}\text{Ga}$		β^+ , EC	1.899	90%	0.511 1.077	Annih. 3%
$^{90}_{38}\text{Sr}$	28.5 y	β^-	0.546	100%		

$\rightarrow ^{90}_{39}\text{Y}$		β^-	2.283	100%		
$^{106}_{44}\text{Ru}$	1.020 y	β^-	0.039	100%		

$\rightarrow ^{106}_{45}\text{Rh}$		β^-	3.541	79%	0.512 0.622	21% 10%
$^{109}_{48}\text{Cd}$	1.267 y	EC	0.063 e^- 0.084 e^- 0.087 e^-	41% 45% 9%	0.088	3.6% Ag K x rays 100%
$^{113}_{50}\text{Sn}$	0.315 y	EC	0.364 e^- 0.388 e^-	29% 6%	0.392	65% In K x rays 97%

Нуклід	$T_{1/2}$	Тип розпаду	Частинка		Фотон	
			Енергія, MeV	Імовірність	Енергія	Імовірність
$^{137}_{55}\text{Cs}$	30.2 y	β^-	0.514 1.176	94% 6%	0.662	85%
$^{133}_{56}\text{Ba}$	10.54 y	EC	0.045 e^- 0.075 e^-	50% 6%	0.081 0.356	34% 62% Cs K x rays 121%
$^{207}_{83}\text{Bi}$	31.8 y	EC	0.481 e^- 0.975 e^- 1.047 e^-	2% 7% 2%	0.569 1.063 1.770	98% 75% 7% Pb K x rays 78%
$^{228}_{90}\text{Th}$	1.912 y	6α : $3\beta^-$:	5.341 to 8.785 0.334 to 2.246		0.239 0.583 2.614	44% 31% 36%
(→ $^{224}_{88}\text{Ra}$ → $^{220}_{86}\text{Rn}$ → $^{216}_{84}\text{Po}$ → $^{212}_{82}\text{Pb}$ → $^{212}_{83}\text{Bi}$ → $^{212}_{84}\text{Po}$)						
$^{241}_{95}\text{Am}$	432.7 y	α	5.443 5.486	13% 85%	0.060	36% Np L x rays 38%
$^{241}_{95}\text{Am}/\text{Be}$	432.2 y	6×10^{-5} neutrons (4–8 MeV) and 4×10^{-5} γ 's (4.43 MeV) per Am decay				
$^{244}_{96}\text{Cm}$	18.11 y	α	5.763 5.805	24% 76%	Pu L x rays ~ 9%	
$^{252}_{98}\text{Cf}$	2.645 y	α (97%)	6.076 6.118	15% 82%		
Fission (3.1%) ≈ 20 γ 's/fission; 80% < 1 MeV ≈ 4 neutrons/fission; $\langle E_n \rangle = 2.14$ MeV						

Half-lives, energies, and intensities are from E. Browne and R.B. Firestone, Table of Radioactive Isotopes (John Wiley & Sons, New York, 1986), recent Nuclear Data Sheets, and X-ray and Gamma-ray Standards for Detector Calibration, IAEA-TECDOC-619 (1991)

Навчальне видання

Основи радіохімії та радіоекології:
Теоретичний мінімум та методичні рекомендації до лабораторних робіт

Укладачі:

Халавка Юрій Богданович

Копач Олег Вадимович,

Коров'янка Олександра Олександрівна,

Рисунок на обкладинці:

Internet Science Room:

<http://crescentok.com/staff/jaskew/ISR/chemistry/class26.htm>

ПЕРІОДИЧНА СИСТЕМА ЕЛЕМЕНТІВ Д.І. Менделєєва

Групи елементів

		VIII																																																															
		VII																																																															
		VI																																																															
		V																																																															
		IV																																																															
		III																																																															
		II																																																															
		I																																																															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																						
1s ¹ H 1,008 Гідроген	[He]2s ¹ Li 6,941 Літій	[Ne]3s ¹ Na 22,99 Натрій	[Ar]4s ² K 39,098 Калій	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² Cu 63,546 Купрум	[Kr]5s ² Rb 85,468 Рубідій	[Xe]6s ² Cs 132,91 Цезій	[Rn]7s ¹ Fr [223] Францій	[He]2s ² Be 9,0122 Берилій	[Ne]3s ² Mg 24,305 Магній	[Ar]4s ² Ca 40,08 Кальцій	[Kr]5s ² Sr 87,62 Стронцій	[Xe]6s ² Ba 137,33 Барій	[Rn]7s ² Ra [226] Радій	[Ne]2s ² 2p ¹ B 10,811 Бор	[Ne]3s ² 3p ¹ Al 26,982 Алюміній	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² Sc 44,956 Скандій	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² Y 88,906 Ітрій	[Xe]6s ² La 138,91 Лантан	[Rn]7s ² Ac [227] Актиній	[He]2s ² 2p ² C 12,011 Карбон	[Ne]3s ² 3p ² Si 28,086 Силіцій	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² Ti 47,87 Титан	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² Zr 91,22 Цирконій	[Xe]6s ² Hf 178,49 Гафній	[Ne]2s ² 2p ³ N 14,007 Нітроген	[Ne]3s ² 3p ³ P 30,974 Фосфор	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² V 50,942 Ванадій	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² Nb 92,906 Ніобій	[Xe]6s ² Ta 180,95 Тантал	[He]2s ² 2p ⁴ O 15,999 Оксиген	[Ne]3s ² 3p ⁴ S 32,066 Сульфур	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² Cr 51,996 Хром	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² Mo 95,94 Молибден	[Xe]6s ² W 183,84 Вольфрам	[Ne]2s ² 2p ⁵ F 18,998 Флуор	[Ne]3s ² 3p ⁵ Cl 35,453 Хлор	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² Mn 54,938 Манган	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² Tc [98] Технецій	[Xe]6s ² Re 186,21 Реній	[He]2s ² 2p ⁶ Ne 20,179 Неон	[Ne]3s ² 3p ⁶ Ar 39,948 Аргон	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² Fe 55,845 Ферум	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² Ru 101,07 Рутеній	[Xe]6s ² Os 190,23 Осмій	[He]2s ² 2p ⁸ He 4,0026 Гелій	[He]2s ² 2p ⁸ Ne 20,179 Неон	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² Ar 39,948 Аргон	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² Co 58,93 Кобальт	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² Rh 106,42 Родій	[Xe]6s ² Ir 195,08 Ірідій	[He]2s ² 2p ⁸ He 4,0026 Гелій	[He]2s ² 2p ⁸ Ne 20,179 Неон	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² Ni 58,69 Нікель	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² Pd 106,42 Паладій	[Xe]6s ² Pt 195,08 Платина	[He]2s ² 2p ⁸ He 4,0026 Гелій	[He]2s ² 2p ⁸ Ne 20,179 Неон	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² Co 58,69 Кобальт	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² Rh 106,42 Родій	[Xe]6s ² Pt 195,08 Платина	[He]2s ² 2p ⁸ He 4,0026 Гелій	[He]2s ² 2p ⁸ Ne 20,179 Неон	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² Ni 58,69 Нікель	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² Pd 106,42 Паладій	[Xe]6s ² Pt 195,08 Платина

*Лантаніди

80 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Ce 140,12 Церій	81 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Pr 140,91 Прозаксим	82 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Nd 144,24 Неодим	83 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Pm [145] Прометій	84 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Sm 150,36 Самарій	85 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Eu 151,96 Європій	86 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Gd 157,25 Гадоліній	87 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Tb 158,93 Тербій	88 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Dy 162,50 Диспрозіт	89 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Ho 164,93 Гольмій	90 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Er 167,26 Ербій	91 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Tm 168,93 Тулій	92 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Yb 173,04 Йттербій	93 [Xe]6s ² 4f ¹⁴ Lu 174,97 Люцій
--	--	---	--	--	--	--	---	--	--	--	--	---	--

**Актиніди

90 [Rn]7s ² 5f ³ Th 232,038 Торій	91 [Rn]7s ² 5f ³ Pa 231,04 Протактиній	92 [Rn]7s ² 5f ⁴ U 238,03 Уран	93 [Rn]7s ² 5f ⁴ Np [237] Нептуній	94 [Rn]7s ² 5f ⁴ Pu [244] Плутоній	95 [Rn]7s ² 5f ⁵ Am [243] Америцій	96 [Rn]7s ² 5f ⁶ Cm [247] Курій	97 [Rn]7s ² 5f ⁷ Bk [247] Берклій	98 [Rn]7s ² 5f ⁸ Cf [251] Каліфорній	99 [Rn]7s ² 5f ⁹ Es [252] Ейнштейній	100 [Rn]7s ² 5f ¹⁰ Fm [257] Фермій	101 [Rn]7s ² 5f ¹¹ Md [268] Менделєєвський	102 [Rn]7s ² 5f ¹² No [259] Нобелій	103 [Rn]7s ² 5f ¹³ Lo [260] Лоренсій
--	---	---	---	---	---	--	--	---	---	---	---	--	---