

**МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Кафедра медичної фізики, біофізики і вищої математики**

**БІОФІЗИКА І ФІЗИЧНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ**  
навчальний посібник для студентів фармацевтичного факультету

Запоріжжя  
2018

**УДК 577.3 (075.8)**

**Б 63**

Затверджено на засіданні Центральної методичної ради ЗДМУ  
«24» травня 2018 р.

*и рекомендовано для використання в навчальному процесі*

**Автори:**

*Е.І. Сливко*, д.м.н., завідувач кафедри медичної фізики, біофізики і вищої математики, професор

*О.З. Мельнікова*, к.б.н., доцент кафедри медичної фізики, біофізики і вищої математики

*О.З. Іванченко*, к.б.н., доцент кафедри медичної фізики, біофізики і вищої математики

*Н.С. Біляк*, викладач кафедри медичної фізики, біофізики і вищої математики

*О.Є. Прокопченко*, к.б.н., доцент кафедри медичної фізики, біофізики і вищої математики

**Рецензенти:**

*В.К. Сирцов*, доктор медичних наук, професор

*О.Б. Приходько*, доктор біологічних наук, доцент

**Б 63. БІОФІЗИКА І ФІЗИЧНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ:** Навчальний посібник для студентів фармацевтичного факультету/ *Е.І. Сливко, О.З. Мельнікова, О.З.Іванченко, Н.С. Біляк, О.Є. Прокопченко.* - Запоріжжя, 2018.- 234 с.

У посібнику викладений зміст дисципліни «Біофізика і фізичні методи аналізу» згідно робочій програмі, тематичному плану лекцій і практичних занять. Посібник містить короткий конспективний виклад навчального матеріалу і значну кількість ілюстрацій, що може сприяти якісному засвоєнню студентами учбового курсу і формуванню вмінь, передбачених освітньо-кваліфікаційною характеристикою підготовки фармацевта за фахом.

**Навчальний посібник призначений для студентів фармацевтичного факультету.**

**УДК 577.3(075.8)**

## ЗМІСТ

	ПЕРЕДМОВА.....	5
1	ТЕРМОДИНАМІКА БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ.....	6
2	ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНОЇ БІОФІЗИКИ .....	18
3	БУДОВА І ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ МЕМБРАН..	28
4	ТРАНСПОРТ РЕЧОВИН У БІОЛОГІЧНИХ МЕМБРАНАХ.....	37
5	БІОЕЛЕКТРИЧНІ ПОТЕНЦІАЛИ КЛІТИНИ.....	46
6	БІОФІЗИКА М'ЯЗОВОГО СКОРОЧЕННЯ.....	60
7	ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЇ.....	72
8	РЕЦЕПТОРИ. БІОФІЗИКА РЕЦЕПТОРІВ СМАКУ, НЮХУ ДОТИКУ.....	82
9	ОСНОВИ БІОАКУСТИКИ. СЛУХОВІ РЕЦЕПТОРИ.....	91
10	ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ГЕМОДИНАМІКИ.....	102
11	ВПЛИВ ПОСТІЙНОГО І ЗМІННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА БІОЛОГІЧНІ ТКАНИНИ.....	114
12	МАГНІТНЕ ПОЛЕ І ЙОГО ВПЛИВ НА ОРГАНІЗМ ЛЮДИНИ...	127
13	ОСНОВИ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	139
14	БІОФІЗИКА ЗОРУ. ЗОРОВІ РЕЦЕПТОРИ.....	153
15	БУДОВА АТОМА. ОСНОВИ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ.....	164
16	ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ.....	171
17	ЛАЗЕРИ. РАДІОСПЕКТРОСКОПІЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНІТНОГО І ЯДЕРНОГО МАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ	185
18	ОСНОВИ РЕНТГЕНОДІАГНОСТИКИ І РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ .....	199
19	РАДІОАКТИВНІСТЬ. ІОНІЗУЮЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	213
20	ДОЗИМЕТРІЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ. ЇХ	223

БІОЛОГІЧНА ДІЯ.....

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРИ.....

234

## ***ПЕРЕДМОВА***

Біофізика - це наука про фізичні і фізико-хімічні основи процесів життєдіяльності, вплив на них зовнішніх фізичних факторів навколишнього середовища і їх застосування в медицині. Біофізика відноситься до числа фундаментальних біологічних наук, таких як молекулярна біологія, фізіологія, біохімія, генетика. Вивчення дисципліни надає студентам фундаментальні знання, необхідні для подальшого навчання фізіології людини і інших навчальних дисциплін природничо-наукової і фахової підготовки.

Біофізика вивчає живі системи на різних рівнях організації і в залежності від цього традиційно ділиться на такі розділи: біологічна термодинаміка, молекулярна біофізика, біофізика клітини і біофізика складних систем.

Біофізика є відносно молодою наукою, яка відокремилась від фізіології у середині 20 століття. Це було пов'язано зі значним науково-технічним прогресом, відкриттям нових фізичних методів і початком їх застосування для дослідження біологічних об'єктів. На теперішній час для цього використовуються методи радіоспектроскопії електронного парамагнітного і ядерного магнітного резонансу, люмінесцентний аналіз, електронна мікроскопія, методи дослідження біопотенціалів клітини і електрографії органів і тканин і т.п. Ці методи широко застосовуються у дослідженнях фармацевтичних препаратів і механізм їхньої дії на процеси життєдіяльності в організмі людини.

В кожному з таких методів використовуються певні фізичні фактори, які можуть впливати на організм людини безпосередньо в навколишньому середовищі. Тому важливе значення має питання щодо характеристик цих факторів, механізмів їх дії на живі об'єкти, зв'язків між її інтенсивністю і біологічними ефектами.

Вивчаючи біофізику, студенти можуть користуватися декількома сучасними підручниками з цієї дисципліни. Представлений посібник не покликаний замінити роботу з підручником, але має допомогти студентам в його засвоєнні. Для цього посібник містить короткий конспективний виклад навчального матеріалу і значну кількість ілюстрацій. Найбільшу увагу в посібнику приділено питанням, які пов'язані з вивченням наступних медико-біологічних і клінічних дисциплін.

# 1. ТЕРМОДИНАМІКА БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

*Термодинаміка* – розділ фізики, що вивчає різні форми *енергії*, засоби її передачі і перетворення з одних форм і видів в інші. Термодинаміка заснована на кількох загальних законах, які є універсальними для живої і неживої природи і базуються на досягненнях багатьох наук.

Термодинаміка використовує поняття *термодинамічної системи (ТДС)*, якою вважають будь-яке тіло або об'єднання декількох тіл, відокремлені реальними або уявними границями від навколишнього середовища. Прикладами живих ТДС можуть служити клітина, серце, організм, біосфера. Існує три типи термодинамічних систем, в залежності від типу взаємодії з навколишнім середовищем.

*Ізольована система* не обмінюється енергією або речовиною з навколишнім середовищем. Такі системи не існують в реальних умовах, але уявлення про них використовують для розуміння законів термодинаміки.

*Закрита система* може обмінюватися з зовнішнім середовищем енергією, але не речовиною. Приклади: закрита посудина з рідиною, батарея опалення.

*Відкрита система* обмінюється з зовнішнім середовищем як енергією, так і речовиною. Приклади: живі ТДС, відкрита посудина з рідиною.

## ***Параметри стану термодинамічних систем***

Термодинаміка описує стан ТДС за допомогою прямих вимірювань макроскопічних змінних величин, які називаються *параметрами стану*. Це температура, об'єм, тиск, хімічний склад, концентрація. Стан ізольованої системи в умовах, коли параметри її стану не змінюються, називається *термодинамічною рівновагою*. Він є абсолютно стабільним і може існувати протягом необмеженого періоду часу. При виведенні ізольованої системи із термодинамічної рівноваги, система самовільно повертається в цей стан.

## ***Поняття внутрішньої енергії, роботи і теплоти***

Важливими поняттями термодинаміки є *енергія, робота і теплота*.

Енергія, в широкому сенсі, визначає здатність термодинамічної системи здійснювати роботу. Кількість енергії вимірюється в *Джоулях* (системна одиниця). Часто використовують несистемну одиницю – *калорію*. Існують різні форми енергії: механічна, електрична, хімічна і т. п., а її видами є кінетична і потенціальна енергія.

*Внутрішня енергія системи* – це сумарна кінетична і потенціальна енергія всіх атомів молекул даної системи.

Загальна енергія системи представляє собою суму її внутрішньої енергії та кінетичної і потенціальної енергії системи як цілого.

Енергія може зберігатися і передаватися системою. Вона також може бути перетворена з однієї форми (виду) в іншу.

Існує два засоби передачі енергії: теплота і робота.

*Теплота* – енергія, що передається від системи або системі за рахунок різниці температур. Існує декілька засобів передачі теплоти: теплопровідність (кондукція), тепломасоперенос (конвекція) і теплове випромінювання.

*Теплопровідність* відбувається між об'єктами при їх безпосередньому контакті. Вона є результатом зіткнення молекул, протягом якого вони передають енергію одна одній.

*Конвекція* – перенесення теплоти від одного об'єкта до іншого за допомогою руху газу або рідини.

Теплопровідність і конвекція потребують присутності речовини між об'єктами, які передають теплоту один одному. Теплота також може переноситися через вакуум за допомогою *випромінювання*. В цьому випадку вона передається електромагнітними хвилями різної довжини.

*Робота*, яку здійснює система або яка вчиняється над системою – ще один засіб передачі енергії. Можна навести багато прикладів, коли в результаті роботи система отримує енергію. Так, енергія газу в циліндрі підвищується при стисканні його поршнем. Різні типи роботи здійснюються біологічними системами. М'язи виконують механічну роботу. Електрична робота в клітинах полягає в перенесенні заряджених частинок (іонів).

Закони термодинаміки є узагальненням досліджень багатьох природничих наук.

### ***Перший закон термодинаміки***

Перший закон термодинаміки виражає універсальний закон збереження енергії: загальна енергія в ізольованій системі залишається постійною в часі і зберігається при переході з однієї форми в іншу.

Цей закон виключає існування вічного двигуна першого роду, який міг би виконувати роботу, не споживаючи енергії.

Для неізольованої ТДС перший закон термодинаміки встановлює

зв'язок між змінами в системі кількості теплоти  $\Delta Q$ , роботи  $\Delta A$  і внутрішньої енергії системи  $\Delta U$ :

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta A$$

Зміни внутрішньої енергії системи дорівнюють сумі змін в ній кількості теплоти і роботи.

### ***Перший закон термодинаміки у біологічних системах***

В XIX столітті було доведено експериментальним шляхом, що енергетичні процеси, які відбуваються в біологічних системах, підпорядковані першому закону термодинаміки. Прийом їжі забезпечує біологічні системи енергією, яка використовується для виконання різних функцій організму і запасується для подальшого використання.

Енергія звільняється з поживних речовин в ході процесу біологічного окислення. Це складний і багатоступінчастий процес. Енергія поживних речовин використовується в клітинах – для синтезу *макроергічних сполук*, таких як *аденозінтрифосфат* (АТФ) та інші. Вони використовуються як джерело енергії для здійснення різноманітних функцій клітини.

Поживні речовини окислюються до кінцевих продуктів, які виводяться з організму. Наприклад, вуглеводи окислюються в організмі до діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) і води:



Енергія, що виділяється при спалюванні одного грама глюкози в цій реакції, дорівнює 4,1 кілокалорій. В організмі людини окислення характеризується таким самим тепловим ефектом, не зважаючи на те, що проходить в декілька етапів. Це пояснює принцип Гесса, який заснований на першому законі термодинаміки. Згідно з цим принципом, тепловий ефект багатоступеневих хімічних реакцій не залежить від їх проміжних ступенів, а визначається тільки ентальпією початкових і кінцевих речовин.

Однакові продукти окислення глюкози та інших споживних речовин в організмі і при спалюванні свідчать про те, що в обох випадках виділяється однакова кількість енергії. Це дає можливість визначати енергетичну цінність споживних речовин методом *калориметрії*.

*Калориметр* – прилад, який дозволяє виміряти кількість теплоти, що виділяється при їх спалюванні. За допомогою калориметрії встановлено, що при окисленні одного грама вуглеводів виділяється в середньому 4,1 ккал,



білків – 4,1 ккал, жирів – 9,3 ккал енергії.

Для визначення витрат енергії організмом у процесі життєдіяльності застосовується *біокалориметрія*. Кінцевим продуктом всіх перетворень енергії в біологічних системах є теплота. При окисленні поживних речовин в організмі не вся енергія акумулюється в АТФ. Частина її перетворюється в *первинно-розсіяну теплоту*. Енергія, акумульована в макроергічних зв'язках АТФ, у процесі використання її клітинами переходить у *вторинно-розсіяну теплоту*. У зв'язку з цим всі енергетичні витрати людини (якщо вона не виконує зовнішньої роботи) можна визначити, вимірявши загальну кількість теплоти, що виділяється.

Біокалориметрію в 19 столітті проводили за допомогою великих камер, обладнаних теплоізоляцією, де перебували люди або піддослідні тварини (рис. 1.1). Камери мали систему життєзабезпечення і містили прилади для вимірювання теплоти, що виділяється.

Експерименти, проведені методом *прямої біокалориметрії*, показали, що кількість енергії, яка надходить в організм з їжею, дорівнює кількості енергії, що виділяється у вигляді теплоти. Метод прямої біокалориметрії занадто складний і тому в даний час майже не застосовується.

На сьогоднішній день в разі необхідності визначити енерговитрати людини використовують *непряму біокалориметрію* (рис. 1.2). Для цього використовують прилади, які називаються *метаболіметрами*. Вони дозволяють вимірювати об'єм кисню, який споживає людина протягом дослідження. На підставі цього проводиться розрахунок витрат енергії, необхідної для забезпечення життєдіяльності.

Для діагностики захворювань щитоподібної залози та деяких інших органів має значення *основний обмін* – лабораторний показник, який відображає енергетичні витрати організму в умовах найбільш економного режиму життєдіяльності. Людина під час дослідження має знаходитись в положенні лежачи, бути в стані м'язового і психоемоційного спокою, через 12 годин після прийняття їжі, в умовах температурного комфорту.

Енергія основного обміну індивідуальна для людей і складає в середньому 1700 ккал для чоловіків і 1400 ккал для жінок. Проте її величина залежить не тільки від статі, а й від віку людини (у дітей на 15% більше, ніж у дорослих, а у людей похилого віку – приблизно на 15% нижчий), від ваги і стану здоров'я.

Повні енерговитрати організму людини включають також енергію, що

використовується на трудову діяльність (розумову і фізичну), заняття спортом та інші види людської активності.

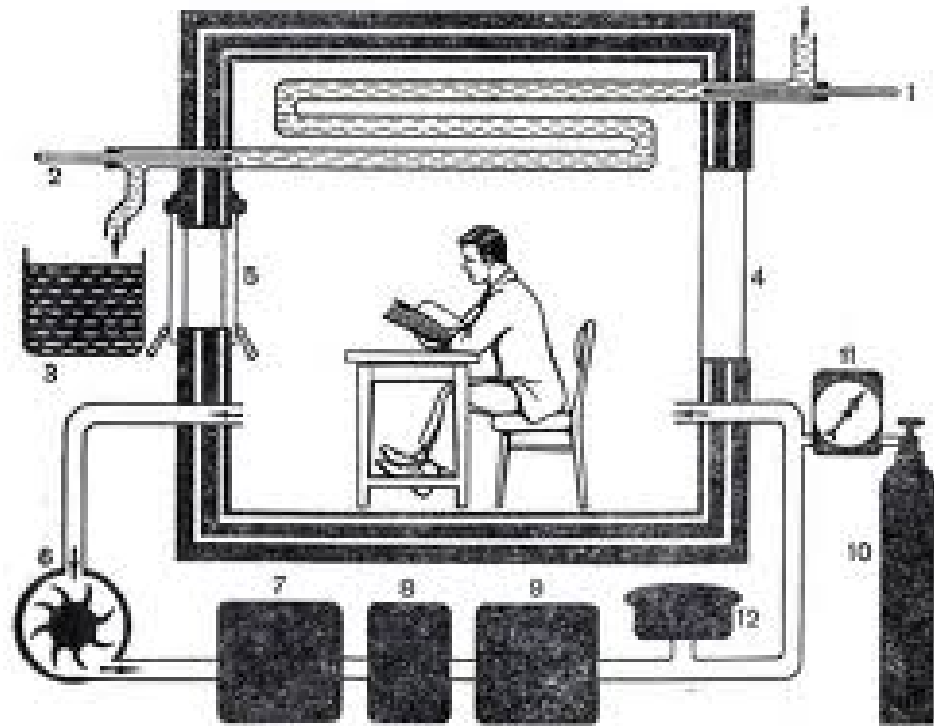


Рис. 1.1 Пряма біокалориметрія: 1–3 – проточна вода, яка поглинає виділену людиною теплоту; 6 – 11 – система для очищення повітря і подачі кисню



Рис.1.2 Непряма біокалориметрія

*Другий закон термодинаміки*

Перший закон термодинаміки констатує збереження енергії в процесі

перетворення її з однієї форми в іншу, однак не стосується можливих напрямків цього процесу. Це питання вирішує другий закон термодинаміки, який накладає певні обмеження на процеси, які можуть відбуватися в термодинамічних системах.

Відомо кілька формулювань другого закону термодинаміки:

1). Теплота не може самовільно переходити від менш нагрітого до більш нагрітого тіла (*формулювання Клаузіуса*, рис. 1.3).



Рис. 1.3 Передача теплоти згідно з другим законом термодинаміки

2). Неможливим є вічний двигун другого роду - періодично діюча машина, єдиним результатом дії якої було би виконання механічної роботи внаслідок охолодження теплового резервуара (*формулювання Кельвіна*).

Другий закон термодинаміки свідчить, що будь-яка форма енергії може повністю перейти в теплоту, однак теплота перетворюється в інші форми енергії лише частково. У процесі перетворення теплоти в роботу частина її неминуче розсіюється. Теплові двигуни завжди мають коефіцієнт корисної дії менший, ніж 100%.

Всі реальні термодинамічні процеси (фізичні, хімічні, біологічні) протікають з розсіюванням частини енергії у вигляді теплоти. Це робить реальні процеси *незворотними*. Протилежні процеси, при яких термодинамічна система і навколишнє середовище повернулися б повністю в початковий стан, неможливі без додаткової витрати енергії ззовні.

## Ентропія

Для характеристики незворотного розсіювання енергії у вигляді теплоти використовують функцію стану термодинамічної системи, яка називається *ентропією*  $S$  (з грец. «перетворення»). Зміна ентропії системи  $dS$  дорівнює відношенню кількості теплоти  $dQ$ , яка входить або залишає систему, до її абсолютної температури  $T$  (рис. 1.4):

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

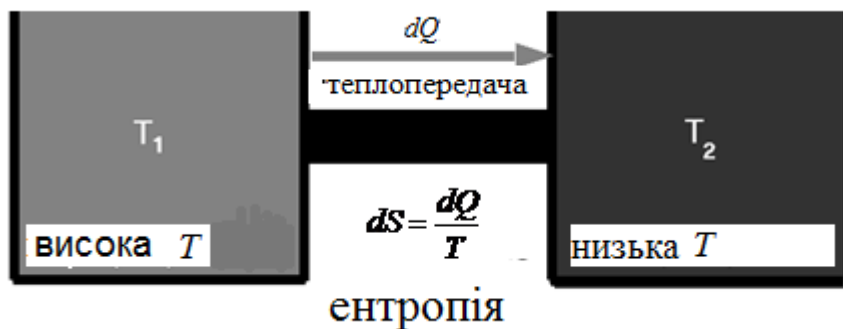


Рис. 1.4. Зміна ентропії в результаті перенесення теплоти

В ізольованих системах самовільно можуть відбуватись тільки такі процеси, які супроводжуються збільшенням ентропії.

Всі процеси в термодинамічних системах сприяють переходу систем в рівноважний стан. Він є найменш впорядкованим і в ньому величина ентропії системи максимальна. Тому ентропію також вважають мірою наближення до рівноважного стану, мірою невпорядкованості (хаосу) в системі (рис. 1.5).

## Термодинамічні потенціали

*Термодинамічні потенціали* використовують для характеристики енергії системи. Їх вибирають за двома незалежними параметрами стану, які зручні в кожній ситуації. До термодинамічних потенціалів відносять внутрішню енергію системи  $U$ , ентальпію  $H$ , вільну енергію Гельмгольца  $F$ , термодинамічний потенціал Гіббса  $G$ .

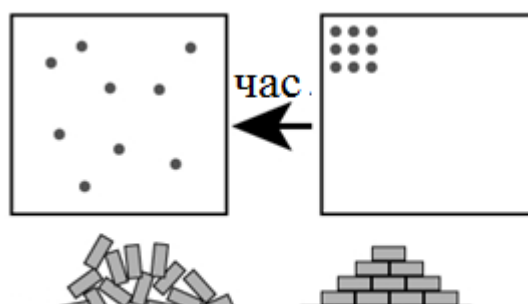


Рис. 1.5. Спонтанний перехід системи від упорядкованого стану до менш впорядкованого стану

Термодинамічні потенціали можуть бути обчислені за допомогою наступних рівнянь, в яких  $P$  - тиск,  $V$  - об'єм,  $S$  - ентропія і  $T$ -температура:

$$\begin{aligned}H &= U + PV \\F &= U - ST \\G &= U + PV - ST\end{aligned}$$

*Термодинамічний потенціал Гіббса* характеризує максимальну корисну роботу, яку може здійснити система. Він відповідає стану, при якому тиск і температура постійні, і застосовується для опису термодинамічних процесів в біологічних системах.

Величина термодинамічної потенціалу Гіббса в розрахунку на один моль речовини-електроліту називається *електрохімічним потенціалом*, який містить хімічний, осмотичний і електричний компоненти:

$$\tilde{\mu} = \mu_0 + RT \ln C + zF\varphi$$

В цьому рівнянні  $\mu$  - стандартний електрохімічний потенціал, який залежить від хімічної природи речовини і температури;  $C$  - молярна концентрація речовини,  $R$  - універсальна газова стала,  $T$  - термодинамічна температура,  $z$  - електричний заряд частинки в одиницях елементарного заряду,  $F$  - Фарадея константа,  $\varphi$  - електричний потенціал.

Електрохімічні потенціали натрію, калію і деяких інших речовин мають вирішальну роль в таких процесах, як перенесення речовин в мембранах клітин, генерація електричних потенціалів.

В самовільних процесах термодинамічні потенціали зменшуються, досягаючи мінімальних величин у стані термодинамічної рівноваги.

### *Термодинаміка незворотних процесів*

Біологічні об'єкти відносять до відкритого типу термодинамічних

систем, які не перебувають в стані термодинамічної рівноваги. Процеси, які відбуваються в таких системах, є незворотними, як і в інших типах систем. Проте існують важливі особливості змін ентропії у відкритих термодинамічних системах. Її повна зміна  $dS$  у відкритих системах визначається двома складовими. Перший  $dS_i$  - продукція ентропії всередині системи як результат незворотних процесів. Другий  $dS_e$  - результат обміну ентропією між системою і навколишнім середовищем. Значення  $dS$  знаходять за *рівнянням Пригожина*:

$$dS = dS_i + dS_e$$

Швидкість продукції ентропії у відкритих системах можна визначити як похідну рівняння Пригожина:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_e}{dt}$$

Швидкість продукції ентропії у відкритій термодинамічній системі залежить від двох складових: швидкості продукції ентропії всередині системи і швидкості її зміни внаслідок обміну енергією з навколишнім середовищем. Перший доданок може бути тільки позитивним (за 2 законом термодинаміки). Другий доданок може бути як позитивним, так і негативним, в залежності від напрямку потоку енергії через границі системи.

*Стаціонарний стан системи* спостерігається, коли підвищення ентропії всередині системи компенсується зменшенням ентропії внаслідок обміну ентропією із навколишнім середовищем, тобто коли  $dS_i = -dS_e$ . В цьому випадку продукція ентропії в системі не змінюється з часом:  $dS = 0$ .

*Теорема Пригожина* вказує, що в стаціонарному стані продукція ентропія є мінімальною.

Треба відмітити, що в ході функціонування біологічних систем можуть відбуватись певні процеси, які супроводжуються зменшенням ентропії. Проте вони завжди відбуваються за рахунок її збільшення в іншому процесі, який забезпечує їх вільною енергією. Це явище називається *спряженням*. Наприклад, деякі частинки можуть переміщатися через мембрану клітини в напрямку їх більш високої концентрації. При цьому відбувається зменшення ентропії системи. Проте воно забезпечується енергією гідролізу АТФ, в результаті якого ентропія системи в цілому збільшується

Стаціонарний стан відкритої системи має зовнішню схожість з термодинамічною рівновагою - для них обох характерна стабільність

параметрів стану. Однак стаціонарний стан відрізняється від рівноваги тим, що вимагає обміну енергією з навколишнім середовищем і потребує постійного надходження вільної енергії ззовні. Ентропія системи в стаціонарному стані залишається постійною, але не максимальною.

Стаціонарний стан характерний для біологічних систем. Багато фізіологічних та біохімічних показників організму залишаються стабільними, не зважаючи на різноманітні зміни в навколишньому середовищі. Спеціальні фізіологічні механізми підтримують їх сталість. Температура тіла теплокровних тварин може бути ілюстрацією стаціонарного стану. Вона підтримується завдяки балансу між продукцією і віддачею теплоти. Він досягається завдяки досконалій терморегуляції у вищих тварин.

### **Контрольні питання:**

1. Вкажіть види термодинамічних систем і їх характерні властивості.
2. Охарактеризуйте перший закон термодинаміки.
3. В чому полягає зміст другого закону термодинаміки?
4. Охарактеризуйте ентропію термодинамічної системи як міру термодинамічної ймовірності її стану.
5. Що таке термодинамічні потенціали, електрохімічний потенціал?
6. Як змінюються ентропія і термодинамічні потенціали в ході самовільних процесів?
7. Яку енергію використовує людина в процесі життєдіяльності?
8. Поясніть метод прямої біокалориметрії.
9. Поясніть сутність рівняння і теореми Пригожина для відкритих термодинамічних систем.
10. Що таке стаціонарний стан відкритої термодинамічної системи.

### **Оберіть правильні відповіді:**

1. Сумарна кінетична і потенціальна енергія частинок, що складають термодинамічну систему, називається:

- А. теплотою                      Б. роботою                      В. внутрішньою енергією  
Г. ентропією                      Д. температурою

2. Визначте, як змінюється загальна енергія ізольованої системи згідно першому закону термодинаміки:

- А. може збільшуватись                      Б. може зменшуватись  
В. не змінюється                      Г. завжди зменшується

Д. завжди дорівнює нулю

3. Проаналізуйте співвідношення виділеної теплоти при хімічному перетворенні однієї речовини в іншу у двох випадках: а). якщо відбувається пряме перетворення та б). перетворення відбувається в декілька етапів

- А. кількість виділеної теплоти в обох випадках однакова
- Б. при прямому перетворенні виділяється більше теплоти
- В. при прямому перетворенні виділяється менше теплоти
- Г. при прямому перетворенні теплота не виділяється
- Д. при непрямому перетворенні теплота не виділяється

4. Визначте, мірою чого є ентропія:

- А. величини внутрішньої енергії термодинамічної системи
- Б. величини вільної енергії термодинамічної системи
- В. розсіяння теплоти в термодинамічних системах
- Г. здатності термодинамічної системи здійснювати роботу
- Д. температури термодинамічної системи

5. Оберіть правильне твердження щодо напрямку самовільних термодинамічних процесів:

- А. термодинамічні потенціали і ентропія системи зменшуються
- Б. термодинамічні потенціали системи збільшуються
- В. ентропія системи зменшується до мінімальних значень
- Г. ентропія системи збільшується і досягає максимуму в стані рівноваги
- Д. термодинамічні потенціали системи і ентропія не змінюються

6. Проаналізуйте, яка однакова властивість характерна для рівноважного стану ізольованої термодинамічної системи і стаціонарного стану відкритої термодинамічної системи:

- А. вони не змінюються у часі
- Б. вони мають максимальну ентропію
- В. ентропія в цих станах мінімальна
- Г. вони мають максимальні термодинамічні потенціали
- Д. термодинамічні потенціали в цих станах дорівнюють нулю

7. Проаналізуйте, в яких термодинамічних системах може підтримуватись стаціонарний стан:

- А. в ізольованих
- Б. тільки в закритих



В. в ідеальних

Г. у відкритих

Д. ні в яких

8. Проаналізуйте, яка залежність існує між потоками та силами, що їх викликають, згідно лінійному закону термодинаміки незворотних процесів:

А. логарифмічна

Б. прямо пропорційна

В. зворотно пропорційна

Г. синусоїдальна

Д. експоненціальна

9. Рівняння Пригожина характеризує зміни ентропії:

А. ізольованої системи

Б. закритої системи

В. відкритої системи

Г. в ході метаболізму

Д. в рівноважному стані

10. Вкажіть правильне твердження про стаціонарний стан:

А. ентропія системи максимальна

Б. ентропія системи мінімальна

В. в системі відсутні градієнти

Г. зміни ентропії мінімальні

Д. термодинамічні потенціали максимальні.

## 2. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНОЇ БІОФІЗИКИ

Молекулярна біофізика вивчає структуру біологічно важливих молекул і фізичні фактори, які її визначають. Предметом молекулярної біофізики також є вивчення змін структури макромолекул при здійснення ними функціональної активності. Молекулярна біофізика ґрунтується на законах атомної і молекулярної фізики і тісно пов'язана з молекулярною біологією, біохімією і фізіологією.

### *Рівні структурної організації біологічних макромолекул*

У біологічних системах зустрічаються порівняно невеликі молекули і молекули дуже великих розмірів - макромолекули. Прикладами біологічних макромолекул є білки і нуклеїнові кислоти.

*Макромолекули* є полімерами і складаються з великого числа з'єднаних між собою залишків невеликих молекул - мономерів. Так, білки складаються з амінокислот, нуклеїнові кислоти - з нуклеотидів.

Деякі важливі особливості структури макромолекул проявляються вже на рівні молекул-мономерів. Зокрема для амінокислот і моносахаридів властива *хіральність*. Їх молекули асиметричні і можуть існувати в двох формах, які є як би дзеркальними відображеннями один одного: їх не можна поєднати ніяким поворотом в просторі, як неможливо поєднати праву і ліву руку («хейр» (грец) – «рука»). Такі молекули є оптично активними, тобто мають здатність обертати площину поляризації плоскополяризованого світла проти годинникової стрілки (лівообертальні, L-ізомери молекули) або за годинниковою стрілкою (правообертальні, D-ізомери молекули) (рис. 2.1).

При штучному синтезі хіральних молекул отримують *рацемічну суміш (рацемат)*, яка складається порівну з L-форм і D-форм і тому не має оптичної активності. Живі організми накопичують і синтезують тільки одну форму таких молекул: амінокислоти в біоб'єктах присутні переважно в L-формі, а вуглеводи - в D-формі.

Для макромолекул характерно кілька рівнів організації. Їх основою є *первинна структура* - послідовність мономерів в ланцюгу полімерної молекули, які зв'язані між собою міцними ковалентними зв'язками. *Вторинною структурою* називається впорядкована просторова організація окремих ділянок полімерного ланцюга. *Третинна структура* - це просторова укладка всього ланцюга. *Четвертинна структура* - просторове

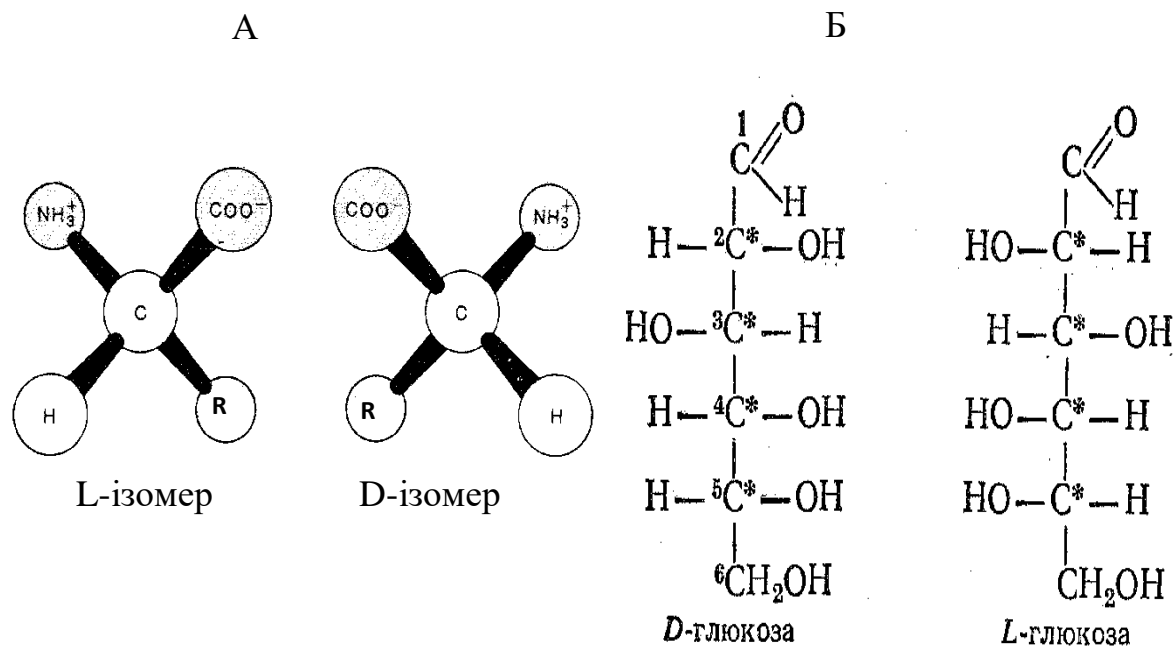


Рис. 2.1 Хіральні молекули, які мають оптичну активність: А) амінокислоти (в загальному вигляді); Б) моносахариди (на прикладі глюкози)

розташування декількох пов'язаних між собою полімерних ланцюгів з утворенням надмолекулярного комплексу. У стабілізації вторинної, третинної і четвертинної структури макромолекул основну роль відіграють слабкі (нековалентні) зв'язки.

Навколо одинарних ковалентних зв'язків можливо обертання, в ході якого утворюються різні поворотні ізомери. Вони визначають *конформацію макромолекули* - спосіб укладки полімерного ланцюга без розриву ковалентних зв'язків, який реалізується за рахунок розриву одних і утворення інших слабких зв'язків. Зі зміною конформації макромолекул тісно пов'язане їх функціонування.

### ***Різні види взаємодій в макромолекулах***

Структура біологічних макромолекул визначається сильними і слабкими зв'язками між атомами і групами атомів. Зв'язок називається сильним, якщо він не порушується під впливом безладного теплового руху частинок. Сильним хімічним зв'язком є ковалентний зв'язок, за допомогою якої мономери утворюють первинну структуру макромолекул. Ковалентним є також дисульфідний зв'язок, представлений в третинній структурі білка.

Крім сильних зв'язків між деякими групами молекул існують слабкі зв'язки. Вони стабілізують просторову структуру макромолекул, яка

відрізняється тонкою організацією і високою специфічністю, що обумовлює їх біологічну активність.

Один слабкий зв'язок не може забезпечити стійкість структури. Проте частини однієї молекули пов'язані великим числом таких зв'язків, внаслідок чого виявляється їх *кооперативність*, яка полягає у тому, що енергія, необхідна для їх розриву, значно більша, ніж сума енергії окремих слабких зв'язків.

Слабкі зв'язки допускають певну рухливість структури біологічних макромолекул, що дозволяє таким молекулам виконувати їх функції.

До слабких зв'язків відносять: сили Ван-дер-Ваальса, іонні зв'язки, іон - дипольні взаємодії, водневі зв'язки і гідروفобні взаємодії.

*Ван-дер-ваальсові сили.* Ван-дер-ваальсовими силами називаються міжмолекулярні взаємодії, обумовлені полярністю молекул. В них атоми значно розрізняються за електронегативністю. В результаті зміщення спільної електронної пари, яка утворюється при формуванні між ними зв'язку, на одному з атомів виникає надлишок негативного заряду, а на другому - надлишок позитивного заряду. Така молекула представляє собою *диполь* - систему з двох зарядів, розташованих на невеликій відстані один від одного. У зв'язку з цим між молекулами-диполями, які в цілому є електронейтральними, можуть виникати сили, що мають електричну природу - *ван-дер-ваальсові сили*.

*Іонні зв'язки* в макромолекулах існують між залишками формуючих їх молекул, які знаходяться в іонізованій формі при нейтральному значенні рН. Так, серед залишків амінокислот, які утворюють молекули білків, деякі виявляються зарядженими негативно, а інші - позитивно, і між ними виникає електростатичні взаємодії.

Величина енергії іонного зв'язку сильно залежить від оточення взаємодіючих заряджених груп: за відсутності води іонні сили достатньо великі, а у водному оточенні - вони значно зменшуються, оскільки молекули води взаємодіють із зарядженими групами і екранують їх. В водному розчині енергія іонних взаємодій приблизно дорівнює енергії слабкою водневого зв'язку. Поряд з цим, в глибині макромолекули, де контакт заряджених груп з водою обмежений, енергія іонних взаємодій може бути значно більше.

*Іон - дипольні взаємодії* так само, як і іонні, є електростатичними. Вони здійснюються між іонізованими атомними групами і полярними залишками макромолекул.

Водневі зв'язки виникають між групами, що містять атом водню (ОН, NH, SH), і більш електронегативними (ніж водень) атомами кисню, азоту, сірки та ін. Водневі зв'язки можуть утворюватися між різними молекулами і між частинами однієї молекули.

Гідрофільні і гідрофобні взаємодії грають істотну роль в стабілізації вторинної, третинної і четвертинної структури макромолекул. В реалізації таких взаємодій велику роль відіграють особливості структури води, яка служить середовищем для біологічних макромолекул.

Вода має цілу низку унікальних властивостей, які відрізняють її від інших рідин. Вона має порівняно високі величини температур плавлення, кипіння і випаровування, питомої теплоємності, поверхневого натягу. Важливою особливістю води є зменшення її густини при перетворенні в лід.

Всі перераховані унікальні властивості води пояснюються тим, що між її молекулами внаслідок їх електричної полярності утворюється велика кількість водневих зв'язків. Вони сприяють тому, що вода як речовина має певну структуру.

Полярність молекули води є результатом великої різниці в електронегативності атомів водню і кисню, внаслідок чого негативні електричні заряди в молекулах води виявляються віддаленими від позитивних (рис. 2.2). Тому вони є диполями.

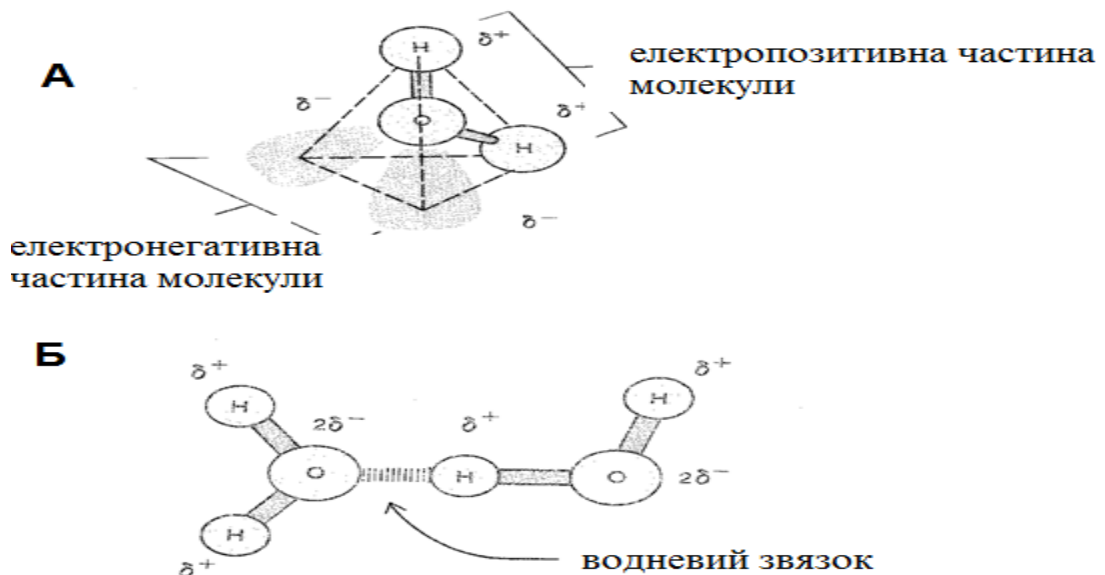


Рис. 2.2. Полярність молекули води (А) і утворення водневого зв'язку між двома молекулами води (Б)

Завдяки полярності дві сусідні молекули води можуть утворювати водневий зв'язок (рис. 2.2Б), а при наявності сукупності молекул води -

велику кількість таких зв'язків. При цьому атом кисню молекули води пов'язаний з атомами водню двох сусідніх молекул, а її два атоми водню - з атомами кисню ще двох молекул води. Таким чином, кожна з молекул води утворює водневі зв'язки з чотирма сусідніми молекулами. Ці зв'язки складають тетраедричну геометричну структуру (рис. 2.3).

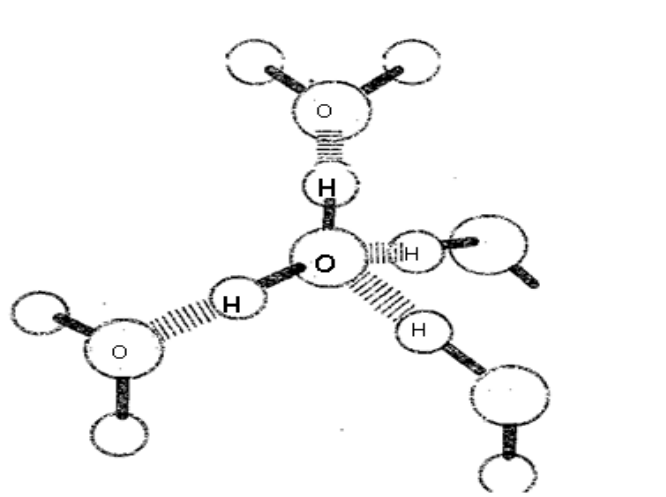


Рис. 2.3. Зв'язок молекули води (в центрі) з чотирма сусідніми молекулами води.

Однією з найбільш обґрунтованих моделей рідкого стану води є *модель «мерехтливих кластерів»*. Кластери - це короткоживучі впорядковані скупчення молекул води, поєднаних водневими зв'язками. В цілому вони утворюють структуру, яка при зниженні температури нижче точки замерзання формує кристалічну решітку льоду. Час життя кластерів  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  с: вони безперервно розпадаються і утворюються знову. В цілому, вода являє собою суміш поодиноких (вільних) молекул і кластерів.

*Гідрофільні і гідрофобні взаємодії.* Всі речовини діляться за ступенем своєї розчинності в воді на дві групи: гідрофільні і гідрофобні.

Гідрофільними є речовини, які добре розчиняються у воді. Такі сполуки є, найчастіше, полярними, тобто їх молекули мають властивості диполів. Потрапляючи в воду, гідрофільні молекули встановлюють водневі зв'язки з водою, вбудовуються в каркас її водневих зв'язків, мало руйнують його і тому добре розчиняються.

На відміну від гідрофільних речовин, *гідрофобні сполуки* є неполярними і погано розчиняються у воді. Вони не здатні встановлювати з її молекулами водневі зв'язки, а також руйнують ті зв'язки, які в ній існують.

В умовах порушення регулярної структури молекули води змушені групуватись на поверхні гідрофобних молекул, намагаючись утворити з ними водневі зв'язки (рис. 2.4 А). Це призводить до ущільнення розташування молекул води, яке стає більш впорядкованим. Час їх "осілого" життя збільшується. Цей процес призводить до загального зменшення ентропії системи «вода-гідрофобні частинки». Така зміна є термодинамічно не вигідною. Тому гідрофобні частинки відштовхують воду і зближуються між собою. (рис. 2.4 Б).

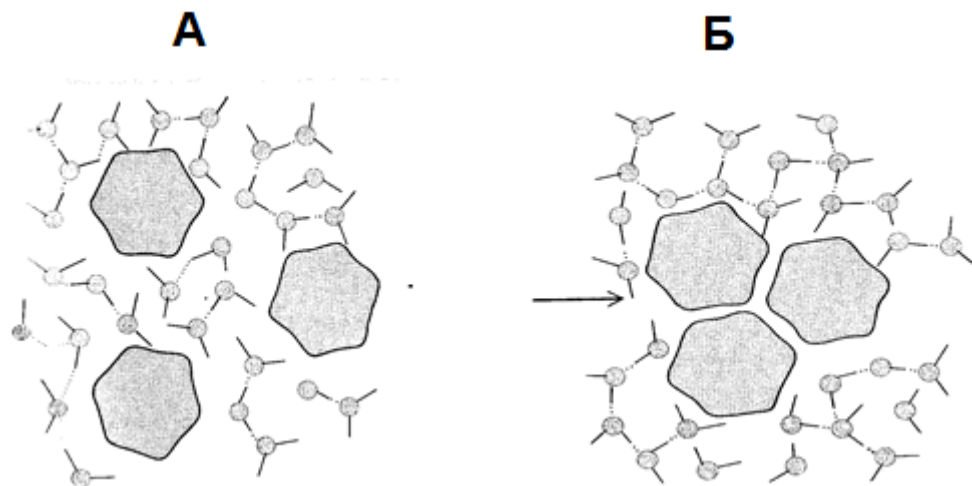


Рис. 2.4. Гідрофобні частинки, на поверхні яких групуються молекули води (А) і виникнення гідрофобної взаємодії (Б)

*Зближення гідрофобних частинок, що усуває або зменшує термодинамічно не вигідний їх контакт з молекулами води, представляє собою гідрофобну взаємодію. Вона не пов'язана з існуванням особливих сил тяжіння між гідрофобними молекулами, а має ентропійну природу.*

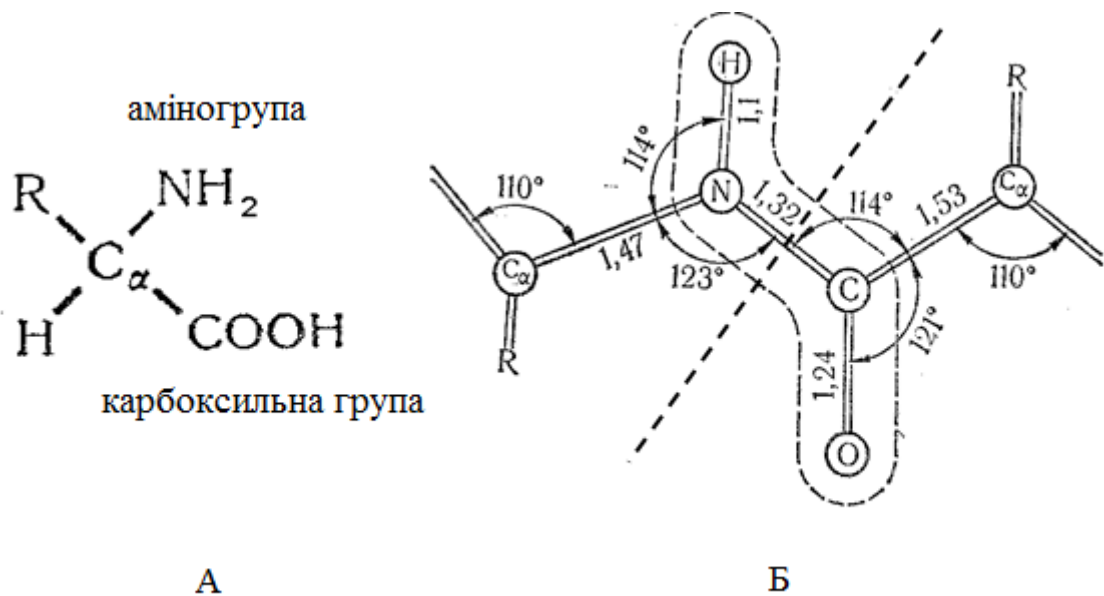
### ***Біофізика білків***

Білки відіграють визначну роль в структурній організації і функціонування клітини. Структура білкових молекул закована в генетичної інформації, в реалізації якої провідна роль також належить білкам.

Велика частина синтезованих в організмі білків служить структурними елементами тканин. Деякі з білків є ферментами, кожен з яких є специфічним каталізатором певної хімічної реакції в організмі. Білки м'язової і кісткової тканини є обов'язковими компонентами скорочувальних і рухових систем. Спеціальні білки виконують транспортну функцію в мембранах клітин; є

біологічно активними речовинами, які регулюють функції організму, або рецепторами до таких речовин; виконують захисні функції, беручи участь в реакціях імунітету і т.д.

Молекули білків дуже великі: їх молекулярна маса становить від 6000 до 1000000 і більше а.о.м. Вони представляють собою полімери, які утворюються комбінацією залишків двадцяти різних амінокислот (рис. 2.5). Число амінокислотних залишків в різних білках становить від декількох десятків до сотень тисяч.



двома амінокислотами (Б)

ж

Розрізняють декілька рівнів організації структури молекул білків: первинну, вторинну, третинну і четвертинну. Властивості білків визначаються особливостями їх просторової структури.

*Первинна структура* - це послідовність амінокислотних залишків, які поєднані між собою ковалентними пептидними зв'язками. Саме первинна структура безпосередньо закодована в молекулах ДНК і відтворюється в процесі синтезу білка. В теперішній час аналіз розташування амінокислотних залишків в білкових молекулах проводиться спеціальними приладами автоматично. Первинну структуру білка можна записати за допомогою скорочених позначень послідовно розташованих амінокислот.

*Вторинна структура* білка представляє собою впорядковану укладку поліпептидного ланцюга, стабілізовану водневими зв'язками між



амінокислотами. Така структура характеризує конформацію локальних ділянок ланцюга: в одній і тій же молекулі білка можуть зустрічатися різні типи вторинної структури, а також неупорядковані ділянки.

Зустрічаються два типи вторинної структури білкових молекул: альфа-спіраль і бета-структура (рис. 2.6).

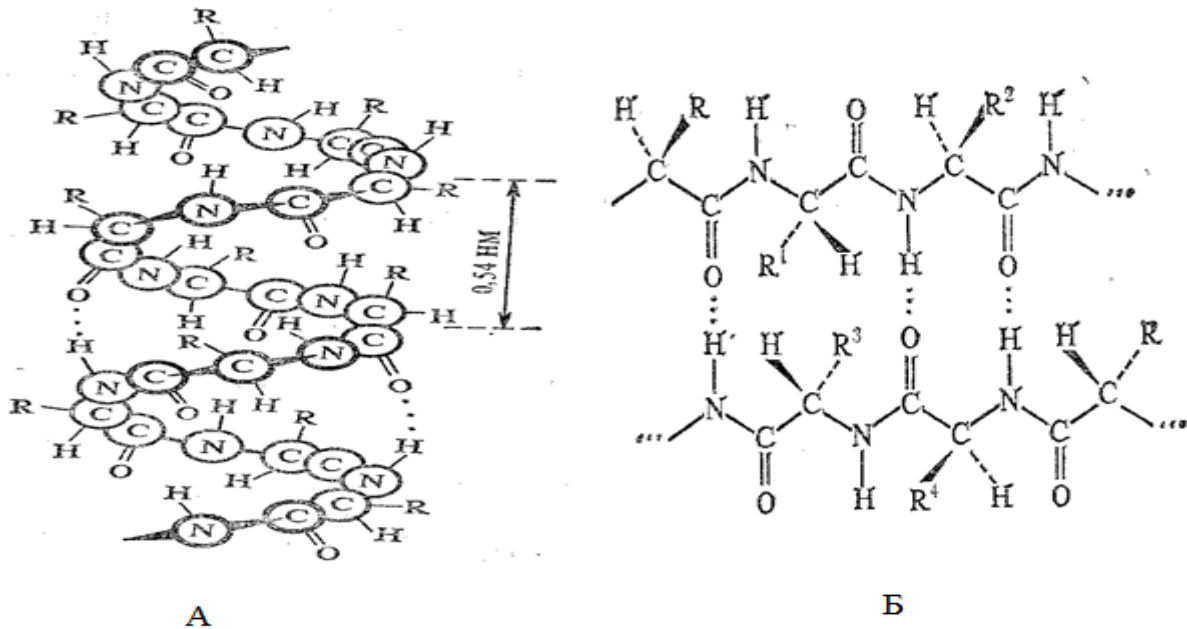


Рис. 2.6. Вторинна структура білка: А).  $\alpha$ -спіраль; Б).  $\beta$ -структура

Найбільш розповсюдженою і енергетично вигідною вторинною структурою є правозакручена альфа-спіраль (Л. Поллінг, Р. Корі). Вона утворюється, якщо поліпептидний ланцюг обертати вправо навколо альфа-карбонів атомів таким чином, щоб кут повороту залишався кожен раз однаковим. В альфа-спіралі остов білкової молекули закручений так, що радикали амінокислот звернені назовні.

Стабільність вторинної структури забезпечується водневими зв'язками між NH-групою однієї амінокислоти і CO-групою іншої амінокислоти, яка розташована через три амінокислоти поліпептидного ланцюга. Таким чином, на один виток альфа-спіралі доводиться в середньому 3,6 амінокислотних залишків. Відстань між сусідніми витками складає близько 0,54 нм.

В бета-структурі остови поліпептидних ланцюгів утворюють складчасту конфігурацію. Така структура нагадує складений гармошкою аркуш паперу. Вона стабілізована, як і альфа-спіраль, водневими зв'язками

між NH- і CO-групами. Однак зближення цих груп, що належать різним амінокислотам, забезпечується утворенням складок поліпептидного ланцюга.

Бета-структура може формуватися одним ланцюгом або декількома розташованими поруч поліпептидними ланцюгами (до 6).

*Третинна структура* утворюється на основі вторинної і представляє собою впорядковану укладку поліпептидного ланцюга у просторі. Третинна структура утворюється в результаті виникнення всіх видів слабких взаємодій між радикалами амінокислот (рис. 2.7). Можливо також формування ковалентного зв'язку – дисульфідного містку, якщо в молекулі білка присутні залишки амінокислоти цистеїну, які містять SH-групи.

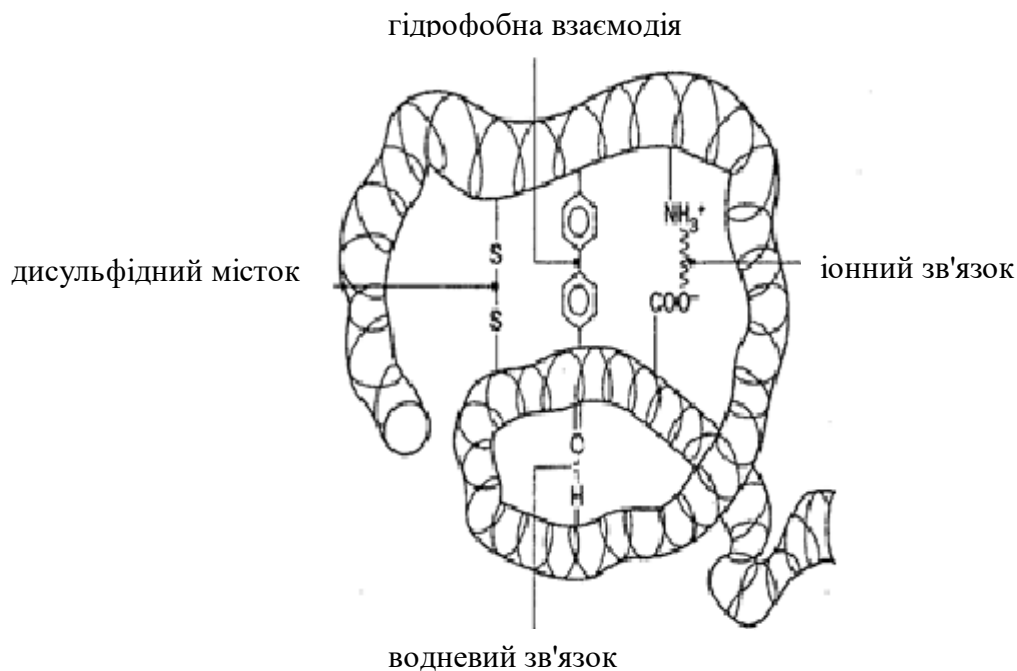


Рис. 2.7. Третинна структура білка

Зв'язки можуть виникати між амінокислотними залишками, які відстоять досить далеко один від одного у поліпептидному ланцюзі. В результаті він може складним чином згинатися в тривимірному просторі і приймати певну форму, утворюючи клубок (глобулу).

При формуванні третинної структури в молекулі білка з'являються *активні центри*, що складаються з декількох амінокислотних радикалів, які в первинній структурі можуть відстояти далеко один від одного.

Найбільш важливу роль у формуванні третинної структури білка у водному середовищі відграють гідрофобні взаємодії. Білкова молекула «прагне» прийняти таку третинну структуру, яка дозволить гідрофільним

амінокислотним залишкам знаходиться зовні (в контакті з водою), а гідрофобним радикалам – бути орієнтованими всередину глобули.

Третинна структура білкової молекули не є жорсткою і має певну рухливість. На конформацію цієї структури можуть впливати теплові флуктуації, біологічно активні речовини-регулятори, а також виконання білкової молекулою її функцій.

*Четвертинна структура* властива білкам, які складаються з декількох субодиниць. Прикладами білків в четвертинній структурі є молекула гемоглобіну, натрій-калієвий насос мембран клітин.

### 3. БУДОВА І ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ МЕМБРАН

#### *Функції біологічних мембран*

*Мембрани* – це тонкі плівки, утворені із органічних молекул. Товщина біологічних мембран дорівнює 7-10 нм.

Розрізняють *плазматичну (поверхневу)* мембрану, що відокремлює вміст клітини від зовнішнього середовища, і *внутрішні мембрани*, які формують різні клітинні органели: мітохондрії, ендоплазматичний ретикулум, апарат Гольджі, лізосоми та ін.

Плазматична мембрана представляє собою бар'єр, необхідний для підтримання сталості хімічного складу і фізичних властивостей клітини і відокремлення її внутрішнього вмісту від зовнішнього середовища. Разом з цим, мембрана є високовибірковим фільтром, який здійснює транспорт речовин: вона забезпечує надходження поживних та інших речовин, необхідних для життєдіяльності, всередину клітини і виведення з неї продуктів виділення.

Всі біологічні мембрани складаються з ліпідних і білкових молекул. Ліпіди утворюють неперервний подвійний шар (*бішар*), який служить відносно непроникним бар'єром для більшості молекул, розчинних у воді. Білки мембрани необхідні для виконання нею різних функцій. Одні білки здійснюють транспорт речовин всередину клітини і з неї; інші - є ферментами і каталізують біохімічні реакції; треті - забезпечують структурний зв'язок між клітинами і позаклітинною речовиною або служать рецепторами, які сприймають певні хімічні сигнали з навколишнього середовища.

Спеціалізована плазматична мембрана нервових клітин відіграє основну роль в поширенні електричних імпульсів (потенціалів дії), за допомогою яких здійснюється передача інформації в нервовій системі. Плазматичні мембрани епітеліальних клітин шлунково-кишкового тракту і нирок беруть участь в процесах всмоктування і секреції. В м'язових клітинах через електричні процеси в плазматичній мембрані опосередковується механічне явище – скорочення.

Процеси, які відбуваються в клітинних мембранах, мають велике значення у виникненні певних видів патології. Властивості мембран є важливими для проникнення лікарських речовин і їх дії в організмі людини.

### *Хімічний склад біологічних мембран*

Головними хімічними компонентами мембран є білки і ліпіди. В різних мембранах співвідношення між білками і ліпідами за масою коливається від 4: 1 до 1: 4. В більшості тваринних клітин ліпіди складають близько 50% маси плазматичної мембрани.

У клітинній мембрані присутні *фосфоліпіди* і *стероїди* (наприклад, холестерол).

Фосфоліпіди являють собою складні ефіри трьохатомного спирту гліцерина (*гліцерофосфоліпіди*, найбільш поширені) або аміноспирту сфінгозину (*сфінгофосфоліпіди*).

В гліцерофосфоліпіді одна з гідроксильних груп гліцерину заміщена залишком фосфорної кислоти, а дві інші - залишками жирних кислот. За допомогою залишку фосфорної кислоти до молекули гліцерофосфоліпиду приєднується одне з азотистих основ: холін, серін, етаноламін, інозит.

Залишки молекул жирних кислот, що входять до складу фосфоліпідів - це довгі вуглеводневі ланцюги. Жирні кислоти можуть бути насиченими (наприклад, стеаринова, пальмітинова.) і ненасиченими (олеїнова, лінолева, ліноленова, арахідонова та ін.). Як правило, до складу молекули гліцерофосфоліпиду входить одна насичена і одна ненасичена жирні кислоти. Ненасичені жирні кислоти містять один або більше подвійних зв'язків, в місці яких є вигин молекули.

В цілому молекула кожного гліцерофосфоліпиду складається з двох частин. Перша з них - "голівка". До її складу входить одна зі згаданих азотистих основ, а також залишки фосфорної кислоти і гліцерину. Друга частина - "хвості", які утворені залишками молекул жирних кислот. Структура молекули гліцерофосфоліпиду представлена на рис. 3.1.

Молекули сфінгофосфоліпідів побудовані за таким самим принципом, що і молекули гліцерофосфоліпідів, тобто також містять голівку і два хвості. Проте один з них представлений довгим ланцюгом, що входить до складу молекули сфінгозину, а тільки другий - залишком жирної кислоти.

Голівки і хвості, будучи двома складовими частинами молекул фосфоліпідів, характеризуються різними фізико-хімічними особливостями. Голівки мають виражені полярні властивості і тому є гідрофільними. Хвості, навпаки, неполярні і тому є гідрофобними. Наявність в молекулі фосфоліпідів двох частин, одна з яких гідрофільна, а інша гідрофобна - її *амфіфільність* - дуже важлива для тієї ролі, яку відіграють ці молекули в

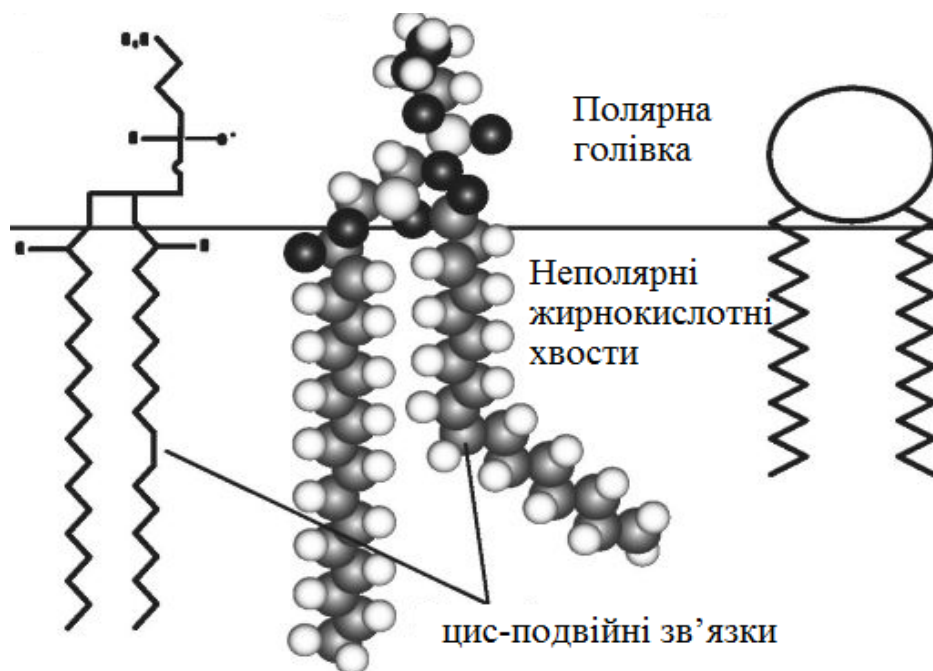


Рис. 3.1 Структура молекули гліцерофосфоліпіда

біологічних мембранах.

Друга складова частина біомембран - білки. Вони дуже різні за своєю структурою і функціями. Саме білки визначають функціональне різноманіття і спеціалізацію біологічних мембран. У зв'язку з тим, що в білкових молекулах міститься велика кількість амінокислот, як гідрофільних, так і гідрофобних, в цілому молекула білка є амфіфільною.

У клітинних мембранах виявляються також вуглеводи у вигляді сполук з ліпідами (гліколіпіди) і білками (глікопротеїни і протеоглікани). Вони розташовані тільки зовні мембрани.

### ***Будова біологічних мембран***

На теперішній час загальноприйнятою є теорія будови мембрани С.Сінгера і Г.Ніколсона (1972), яка описується *рідинно-мозаїчною моделлю* (рис. 3.2).

Основний зміст її полягає в тому, що подвійний шар молекул фосфоліпідів є основною неперервною частиною мембрани і знаходиться в рідкому стані. Білки, що входять до складу мембрани, як би «плавають» у фосфоліпідному бішарі.

Згідно з рідинно-мозаїчною моделлю, голівки молекул фосфоліпідів завдяки своїм гідрофільним властивостям звернені назовні і контактують з

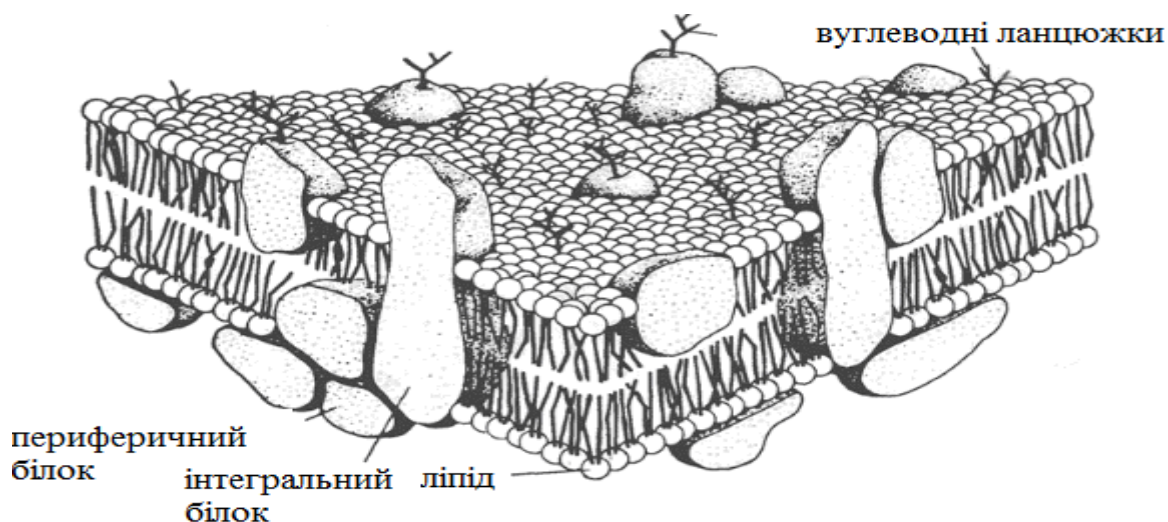


Рис. 3.2 Рідинно-мозаїчна модель мембрани [3]

водним середовищем. Хвости звернені всередину бішару і пов'язані гідрофобною взаємодією. При звичайній для клітини температурі ліпідний бішар знаходиться в рідиннокристалічному стані. За своїми фізичними властивостями (в'язкості, плинності) він відповідає оливковій олії.

Молекули фосфоліпідів в мембрані, як і в будь-якій рідині, мають рухливість. Вони здатні здійснювати різні види рухів. Одним з них є швидке *обертання* молекул фосфоліпідів навколо своєї поздовжньої осі. Другим їх рухом є *коливання хвостиків*, які є гнучкими. Найбільша їх рухливість спостерігається в центрі бішару, а найменша - близько полярних голівок.

Третій вид руху служить *латеральна дифузія* (рис. 3.3). В процесі цього руху молекули фосфоліпідів легко міняються місцями зі своїми сусідами в межах одного моношару. Це здійснюється дуже інтенсивно - за кілька секунд молекула фосфоліпиду може обійти навколо невеликої клітини.

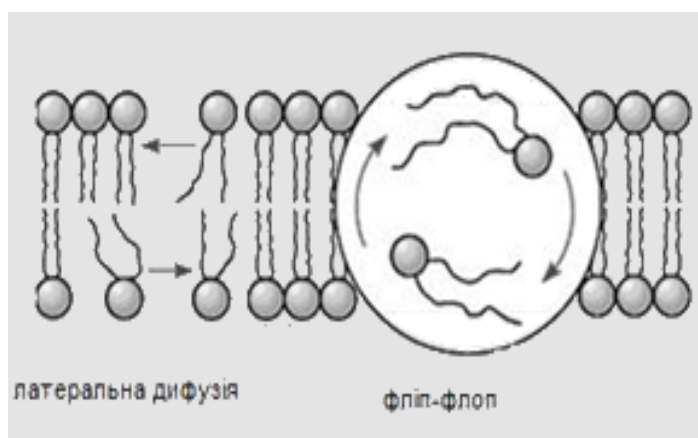


Рис. 3.3 Рух фосфоліпідів в мембрані

Підвищення температури збільшує ймовірність утворення вигину вуглеводневого ланцюга. Це призводить до збільшення проміжків між молекулами, сприяє їх пухкій упаковці в мембрані, збільшенню рухливості. Розташування молекул в мембрані стає менш впорядкованим. Все це відповідає переходу мембрани в рідкий стан (рис. 3.4).



Рис. 3.4 Вплив температури на структуру мембрани

Фізичний стан мембранних фосфоліпідів залежить від складу їх жирних кислот. У ненасичених жирних кислот в області подвійних зв'язків  $C=C$  утворюється вигин вуглеводневих ланцюгів (рис. 3.5). Тому в мембранах, що містять значну кількість ненасичених жирних кислот, вуглеводневі ланцюги упаковані пухко, з проміжками між молекулами. Все це збільшує плинність мембран і сприяє збереженню ними рідкого стану.

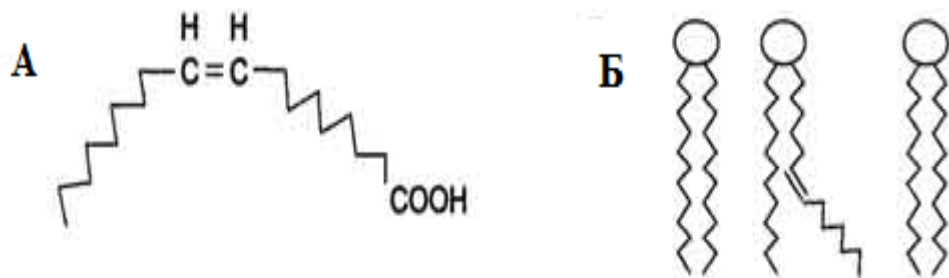


Рис. 3.5. Вигин залишку жирної кислоти в місці подвійного зв'язку (А) і вплив такого вигину на розміщення ліпідів в мембрані (Б)

Важливу роль в регуляції фізичних властивостей біомембран відіграє холестерин. Його молекули легко вбудовуються в подвійній фосфоліпідний шар, особливо в зону з неврегульованою структурою вуглеводневих ланцюгів. При температурі нижче критичної холестерин порушує



кристалічну упаковку ланцюгів, збільшуючи їх рухливість. При температурі вище критичної його присутність викликає зворотний ефект - зростання впорядкованості вуглеводневих ланцюгів і зменшення їх рухливості. Проте надлишок холестерину в мембранах призводить до значного зростання їх в'язкості, що несприятливо впливає на ряд біофізичних процесів, які відбуваються в мембранах.

За характером розташування в мембрані білки поділяються на *периферичні* та *інтегральні*. Периферичні білки розташовані на поверхні бішару і прилягають до головок молекул мембранних фосфоліпідів. На поверхні таких білків містяться, головним чином, гідрофільні групи, які зв'язуються з фосфоліпідами за допомогою електростатичної взаємодії і водневих зв'язків. Периферичні білки можуть бути порівняно легко виділені з мембрани за допомогою розчинів солей високої іонної сили або зміни рН.

Молекули інтегральних білків мають як гідрофільні, так і великі гідрофобні ділянки. Такі білки занурені в фосфоліпідний бішар мембрани на більш-менш значну глибину. Багато з них пронизують мембрану наскрізь і контактують своїми гідрофільними групами з водним середовищем по обидва боки мембрани, тоді як гідрофобні частини білка – знаходяться в зоні гідрофобних хвостиків фосфоліпідів. Таким чином, інтегральні білки пов'язані з мембраною гідрофобними взаємодіями і можуть бути виділені з неї мембрани тільки за допомогою органічних розчинників або детергентів.

Молекули мембранних білків рухливі. Вони здатні до обертального руху і латеральної дифузії. Однак через великі розміри молекул їх рухливість значно поступається рухливості фосфоліпідів. Рухливість деяких мембранних білків обмежена також завдяки тому, що вони пов'язані з розташованими в цитоплазмі специфічними білковими молекулами, які утворюють цитоскелет клітини.

Мембранні білки взаємодіють з фосфоліпідами. Молекули ліпідів, які утворюють шар навколо білкових молекул, обмежені в своїй рухливості. Такі ліпіди підтримують білки в конформації, що необхідна для здійснення ними функціональної активності.

### **Контрольні питання:**

1. Охарактеризуйте рівні організації білкової молекули і хімічні зв'язки, якими вони забезпечуються.
2. Поясніть сутність і термодинамічну природу гідрофобних взаємодій.

3. Поясніть, що таке кооперативність хімічних зв'язків.
4. Вкажіть, яку роль відіграє фіксація просторової структури білка слабкими взаємодіями у здійсненні його функціональної активності.
5. Опишіть хімічну структуру гліцерофосоліпіда.
6. Що таке амфифільна молекула? Яку роль відіграє амфифільність ліпідів і білків у формуванні структури мембрани?
7. Опишіть рідинно-мозаїчну модель будови мембрани.
8. Охарактеризуйте рухи ліпідів в мембрані.
9. Як в'язкість мембрани залежить від температури?
10. Як в'язкість мембрани залежить від хімічного складу ліпідів?

**Виберіть правильні відповіді:**

1. Вкажіть хімічний зв'язок або фізико-хімічну взаємодію, за допомогою якої утворюється первинна структура білка:

- |                 |             |                 |
|-----------------|-------------|-----------------|
| А. водневого    | Б. іонного  | В. ковалентного |
| Г. гідрофобного | Д. слабкого |                 |

2. Вкажіть хімічний зв'язок або фізико-хімічною взаємодію, за допомогою якої утворюється вторинна структура білка:

- |                 |               |                 |
|-----------------|---------------|-----------------|
| А. водневого    | Б. іонного    | В. ковалентного |
| Г. гідрофобного | Д. пептидного |                 |

3. Третинна структура білка представляє собою:

- |            |             |            |
|------------|-------------|------------|
| А. глобулу | Б. ланцюжок | В. спіраль |
| Г. місток  | Д. складку  |            |

4. Термодинамічна природа гідрофобних взаємодій полягає у:

- А. використанні енергії АТФ для їх здійснення
- Б. зменшення ентропії системи
- В. перетворенні теплової енергії в хімічну
- Г. збільшенні ентропії системи
- Д. збільшенні вільної енергії системи.

5. Вкажіть зв'язок або взаємодію, що відіграє основну роль в формуванні четвертинної структури білкової молекули на основі усіх попередніх:

- |              |                |                |
|--------------|----------------|----------------|
| А. пептидний | Б. водневий    | В. гідрофобний |
| Г. іонний    | Д. ковалентний |                |

6. Мономерами білкової молекули служать:

- А. пептиди                      Б. моносахариди                      В. амінокислоти  
Г. аміноспирти                      В. аміногрупи

7. Зміни конформації білкової молекулі зумовлені:

- А. розривом пептидних зв'язків                      Б. розривом слабких зв'язків  
В. утворенням пептидних зв'язків                      Г. змінами числа амінокислот  
Д. змінами виду амінокислот.

8. Голівки фосфоліпідів у мембрані знаходяться ззовні, оскільки вони:

- А. сферичні                      Б. гідрофільні                      В. ліпофільні  
Г. амфіфільні                      Д. гідрофобні

9. До складу голівок фосфоліпідів входять:

- А. білки                      Б. гліцерил                      В. вуглеводи  
Г. жирні кислоти                      Д. амінокислоти

10. Хвостики фосфоліпідів у мембрані знаходяться всередині бішару, оскільки вони:

- А. сферичні                      Б. гідрофільні                      В. дипольні  
Г. амфіфільні                      Д. гідрофобні

11. "Хвостики" молекул фосфоліпідів утворюють:

- А. амінокислоти                      Б. жирні кислоти                      В. фосфорна кислота  
Г. аденозінтрифосфорна кислота                      Д. гліцерол або сфінгозин

12. В цілому молекула фосфоліпиду:

- А. гідрофобна                      Б. гідрофільна                      В. ліпофільна  
Г. амфіфільна                      Д. амфотерна

13. Проаналізуйте, яким силам або зв'язкам належить провідна роль в утриманні в мембрані молекул інтегральних білків:

- А. водневим зв'язкам                      Б. гідрофобним силам  
В. силам Ван-дер-Ваальса                      Г. електростатичним силам  
Д. ковалентним зв'язкам

14. Проаналізуйте, яким силам або зв'язкам належить провідна роль в утворенні бішару фосфоліпідів у мембранах:

- А. електростатичним силам                      Б. силам Ван-дер-Ваальса

- В. гідрофобним взаємодіям                      Г. ковалентним зв'язкам  
Д. іонним взаємодіям

15. Цей рух фосфоліпідів в мембрані відбувається відносно рідко:

- А. латеральна дифузія                      Б. тепловий рух  
В. коливальний                      Г. обертальний                      Д. фліп-флоп

16. Зменшенню в'язкості мембрани сприяє:

- А. включення в неї молекул води та інших рідин  
Б. включення в фосфоліпіди ненасичених жирних кислот  
В. зменшення температури до критичного рівня  
Г. включення в фосфоліпіди насичених жирних кислот  
Д. зменшення відстані між ліпідами в моношарі

17. Проникність мембрани для речовин зростає при:

- А. збільшенні товщини мембрани  
Б. збільшенні температури мембрани  
В. зменшенні температури мембрани  
Г. зменшенні відстані між ліпідами в моношарі  
Д. збільшенні кількості насичених жирних кислот

## 4. ТРАНСПОРТ РЕЧОВИН У БІОЛОГІЧНИХ МЕМБРАНАХ

### *Класифікація видів транспорту*

Розрізняють два основних типи транспорту речовин через мембрану *пасивний* і *активний* (рис. 4.1). Крім того, певні сполуки можуть переміщатись в клітину і із неї шляхом *ендоцитозу* і *екзоцитозу*.

*1. Пасивний транспорт речовин.* Такий транспорт не вимагає додаткових витрат енергії. Його рушійною силою є концентраційний або електрохімічний градієнти відповідної речовини, яка переноситься з середовища з більшою концентрацією або електрохімічним потенціалом в середовище з меншою концентрацією або електрохімічним потенціалом.

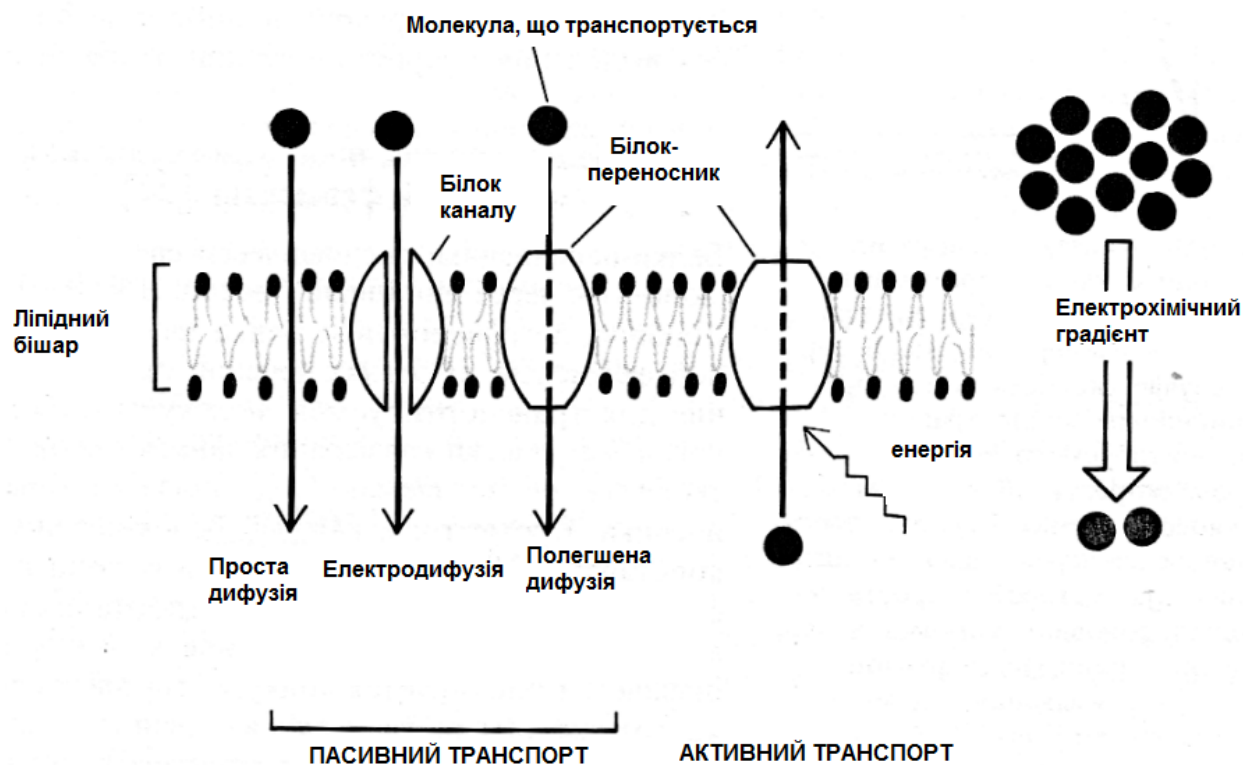


Рис. 4.1 Основні види транспорту речовин в плазматичній мембрані

Існують такі основні види пасивного транспорту речовин:

- 1). *Дифузія вільна* безпосередньо через фосfolіпідний бішар мембрани;
- 2). *Дифузія молекул полегшена* за допомогою спеціальних переносників;
- 3). *Дифузія іонів* через канали мембрани.

*II. Активний транспорт речовин.* В ході такого транспорту речовини переносяться в сторону більш високої їх концентрації або вищого електрохімічного потенціалу. Цей процес протікає зі споживанням енергії клітинного метаболізму. У ньому беруть участь спеціальні мембранні переносники. Розрізняють такі типи активного транспорту.

1). *Первинно - активний транспорт (насоси).*

2). *Вторинно - активний транспорт.*

*III. Ендоцитоз і екзоцитоз* - перенесення речовин в клітину або з неї за допомогою спеціальних мікропухирців (везикул). Даний процес пов'язаний з оборотними змінами структури мембрани.

### ***Вільна дифузія***

*Дифузією* називається переміщення частинок в нерухомому середовищі під впливом градієнта концентрації, а при наявності у частинок електричного заряду – градієнта електрохімічного потенціалу.

*Вільну дифузію* через плазматичні мембрани можуть здійснювати тільки молекули. Їх здатність до вільної дифузії залежить від розмірів молекул і від їх розчинності в фосфоліпідах. Безпосередньо через бішар мембрани легко проникають молекули кисню і вуглекислого газу, а також інші молекули малих розмірів. Як вище було вказано, хвостики фосфоліпідів мембрани відрізняються рухливістю. В результаті теплових флуктуацій в мембрані утворюються лабільні структурні дефекти, або петлі (кінки), які сприяють дифузії малих молекул.

Здатність дифундувати через мембрану крупних за розміром молекул залежить від їх розчинності в ліпідах. Багато неполярних молекул здатні розчинятися в ліпідному бішарі і дифундувати через мембрану. Прикладами таких речовин служать метанол, етанол. (рис. 4.2).

Кількісною мірою швидкості дифузії речовини є густина її потоку  $J$ , яка представляє собою кількість речовини в молях ( $dn$ ), яка проходить в одиницю часу ( $dt$ ) через одиницю поверхні ( $S$ ), розташовану перпендикулярно до напрямку переміщення:

$$J = \frac{dn}{dt} \cdot \frac{1}{S}$$

Швидкість вільної дифузії описує *закон Фіка*, згідно якому вона пропорційна своїй рушійній силі, тобто градієнту концентрації речовини:

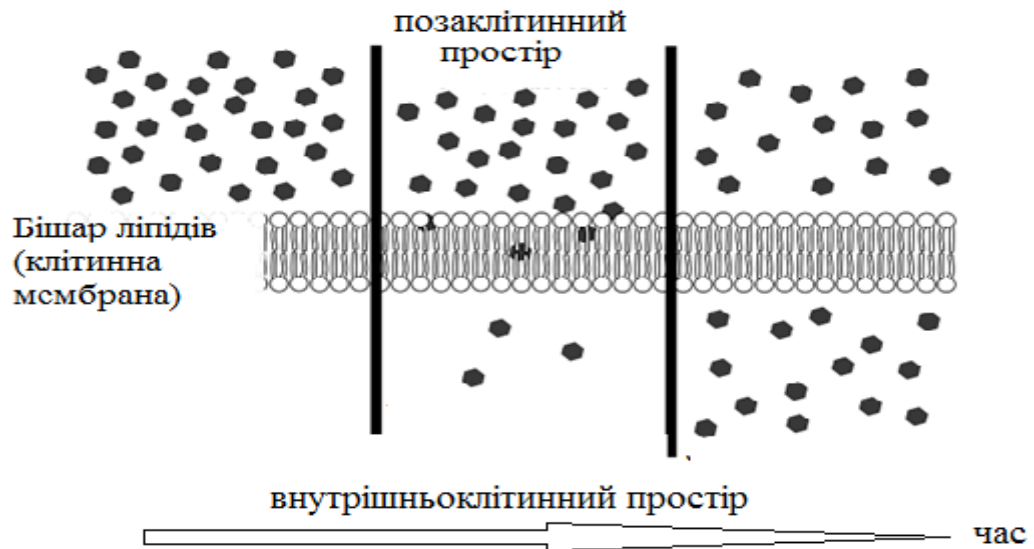


Рис. 4.2 Вільна дифузія речовини через мембрану

$$J = -D \cdot \frac{dC}{dx}$$

В рівнянні  $D$ - коефіцієнт дифузії, тобто густина потоку речовини за градієнта концентрації, що дорівнює одиниці. Величина коефіцієнту дифузії залежить від властивостей речовини, що дифундує, розчинника, в якому відбувається дифузія, а також від температури:

$$D = U \cdot R \cdot T$$

де  $U$ - рухливість частинок речовини в розчині,  $R$ - універсальна газова стала,  $T$ - абсолютна температура.

Негативний знак в рівнянні Фіка означає, що речовина переміщається в напрямку зменшення її концентрації.

Мембрана, яка знаходиться на шляху потоку речовини, що дифундує, може істотно впливати на швидкість вільної дифузії. Для її опису через мембрану можна перетворити рівняння закону Фіка. При допущенні, що вона однорідна, градієнт концентрації речовини, що транспортується, можна замінити різницею її концентрацій в розчинах по обидва боки мембрани.

При цьому застосовують *коефіцієнт проникності* мембрани для даної речовини  $P$ . Його величина визначається рівнянням:

$$P = \frac{D \cdot K}{l}$$

де  $D$  - коефіцієнт дифузії речовини в розчині, що омиває мембрану;  $l$ - товщина мембрани;  $K$  - коефіцієнт розподілу речовини між мембраною і

розчином, який характеризує ступінь розчинності речовини в мембрані.

Використовуючи коефіцієнт проникності мембрани для певної речовини, можна наступним чином представити густину потоку цієї речовини через мембрану:

$$J = -P \cdot (C_2 - C_1)$$

де  $C_1$  і  $C_2$  - концентрації речовини, що транспортується, по обидва боки мембрани.

### ***Полегшена дифузія молекул***

Полегшена дифузія – це транспорт молекул за допомогою спеціальних мембранних переносників. Таким засобом через мембрани м'язових клітин, еритроцитів переміщуються полярні молекули, які мають гідрофільні властивості (амінокислоти, моносахариди та ін.).

*Переносники* - це інтегральні білки плазматичної мембрани, вбудовані в фосфоліпідний бішар і певним чином орієнтовані, які здатні змінювати конформацію при приєднанні до них речовин, що транспортуються, або здійснювати рух через мембрану разом з молекулами речовини.

Полегшена дифузія відрізняється від вільної дифузії рядом особливостей, серед яких:

*1. велика швидкість перенесення речовини;*

*2. висока специфічність* – білки-переносники «впізнають» певні речовини і транспортують їх через мембрани. Переносники здатні відрізнити один від одного близькі за структурою молекули, включаючи навіть стереоізомери;

*3. наявність феномена насичення.* При підвищенні концентрації речовини її потік збільшується лише до деякої величини, яка визначається активністю систем перенесення. Подальше збільшення концентрації не призводить до прискорення дифузії (рис. 4.3);

*4. чутливість до певних речовин (інгібіторів),* які гальмують процес перенесення.

### ***Дифузія іонів через канали мембрани***

Фосфоліпідний бішар мембрани являє собою ефективний бар'єр для іонів. Вільному проникненню їх через мембрану перешкоджає електричний заряд і наявність гідратної (водної) оболонки. Іони здатні дифундувати тільки через спеціальні структури мембрани – *іонні канали*.



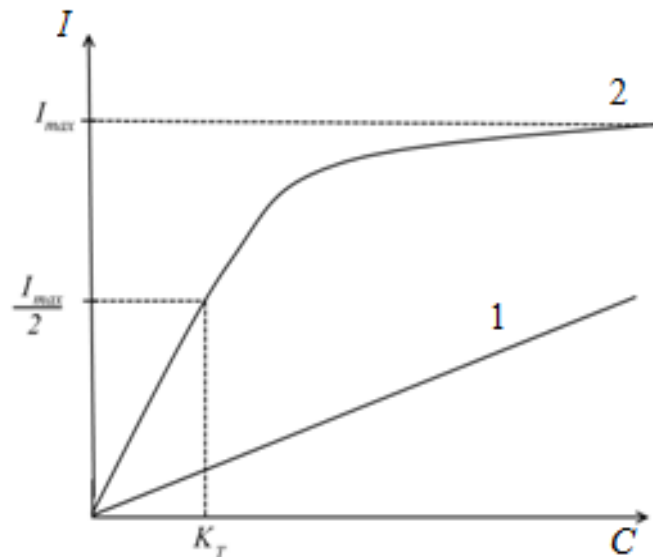


Рис. 4. (1) і полегшеній (2) дифузії (центрації при вільній

Іонні канали - це субмікроскопічні пори в мембрані, стінки яких утворені специфічними інтегральними білками. (рис. 4.4).

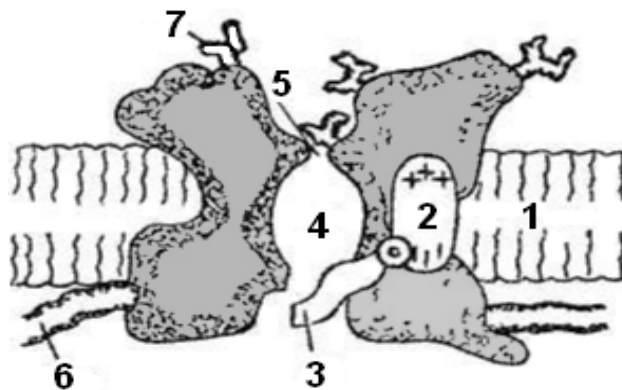


Рис. 4.4. Схема будови іонного каналу: 1 - фосфоліпідний бішар; 2 - сенсор; 3 - "ворота" іонного каналу; 4 - поря, заповнена водою; 5 - селективний фільтр; 6 - білок, що фіксує канал в мембрані; 7 - вуглеводи

Більшість іонних каналів мають два стани: відкритий і закритий. У відкритому стані вони можуть пропускати іони зі швидкістю вільної дифузії. Проникність мембрани для іонів регулюється *воротами каналів*.

Управління воротами здійснюється різними факторами. Наприклад, *потенціал-керовані канали* відкриваються або закриваються в залежності від величини мембранного потенціалу, *хемокеровані канали* відкриваються певними хімічними речовинами. Існують також інші засоби управління

воротами каналів.

Процес дифузії іонів залежить не тільки від їх концентраційного градієнта. Оскільки вони мають електричний заряд, на них впливає і електричне поле. Тому рушійною силою їх дифузії є градієнт електрохімічного потенціалу (*електрохімічний градієнт*).

Рівняння електрохімічного потенціалу приведено в термодинаміці (стр.15). Його градієнт є рушійною силою пасивного транспорту іонів в мембрані. Густина потоку іонів описує *рівняння Теорелла*:

$$I = -U \cdot C \cdot \frac{d\mu}{dx}$$

де  $U$  - рухливість іонів,  $C$  - їх концентрація,  $\frac{d\mu}{dx}$  - електрохімічний градієнт.

*Рівняння Нернста-Планка* показує, що швидкість електродифузії залежить від двох градієнтів: концентраційного і електричного:

$$I = -U \cdot R \cdot T \cdot \frac{dC}{dx} - U \cdot C \cdot F \cdot z \cdot \frac{d\phi}{dx}$$

### ***Активний транспорт***

Системи активного транспорту здійснюють перенесення речовин через мембрану в напрямку збільшення електрохімічного потенціалу з витратами енергії. Вона вивільняється при гідролізі макроергічних сполук (*первинно-активний транспорт*), або міститься в градієнті іонів (*вторинно-активний транспорт*), накопиченому в ході первинно-активного транспорту.

До систем первинно-активного транспорту відносять насоси: натрій - калієвий насос, кальцієвий насос, протонний насос.

*Натрій - калієвий насос* локалізований в плазматичній мембрані всіх клітин тварин і рослин. Він представляє собою складний інтегральний білок-переносник, який здійснює транспорт іонів натрію з цитоплазми в зовнішнє середовище, а іонів калію із зовнішнього середовища всередину клітини. Через насос іони рухаються проти градієнтів їх концентрації.

Насос має властивості ферменту гідролізу АТФ (*мембранна  $Na^+ - K^+ - Mg$ -залежна АТФаза*), в результаті якого вивільняється енергія, необхідна для активного транспорту іонів. Перенесення іонів обумовлене конформаційними змінами  $Na^+ - K^+$ -АТФази, в результаті яких вона виконує почергово роль натрієвого і калієвого переносників.

Гідроліз однієї молекули АТФ забезпечує перенос трьох іонів натрію

через плазматичну мембрану зсередини клітини назовні і двох іонів калію – в протилежному напрямку. Цей цикл роботи натрій - калієвого насоса повторюється безперервно. Він робить кілька сотень оборотів за секунду.

*Вторинно-активний транспорт* використовує для перенесення речовин енергію, що міститься в електрохімічному іонному градієнті, який створюється первинно-активним транспортом. Насос споживає енергію і переносить іони натрію через мембрану в зовнішнє середовище, в якому утворюється їх висока концентрація. Градієнт іонів натрію є рушійною силою, що направляє їх дифузію всередину клітини за допомогою мембранного переносника.

Прикладом вторинно-активного транспорту є система перенесення, що забезпечує всмоктування глюкози і амінокислот клітинами слизової оболонки кишечника. Вказані речовини, використовуючи градієнт натрію, потрапляють в ентероцити проти градієнту своєї концентрації за градієнтом концентрації натрію. Інші приклади вторинно-активного транспорту – натрій-кальцієвий і натрій-водневий обмінники, які використовують градієнт натрію, щоб видалити з клітини іони кальцію і водню.

### **Контрольні питання:**

1. Охарактеризуйте основні відмінності пасивного і активного транспорту.
2. Які речовини проникають через мембрану шляхом вільної дифузії?
3. Який вид транспорту описує закон Фіка.
4. Охарактеризуйте основні риси полегшеної дифузії неелектролітів. Наведіть приклади.
5. Опишіть дифузію іонів в мембрані. Які види іонних каналів за способом управління Вам відомі?
6. Приведіть рівняння, які описують дифузію іонів в мембрані.
7. Який вид транспорту здійснюють іонні насоси? Чому їх називають АТФазами?
8. Опишіть цикл роботи натрій-калієвого насосу мембрани.
9. Що таке вторинно-активний транспорт речовин у мембрані. Наведіть приклади.
10. Яким чином через мембрану переносяться високомолекулярні сполуки?

### Оберіть правильну відповідь:

1. Швидкість вільної дифузії згідно першому закону Фіка визначає градієнт:

- А. електричного потенціал                      Б. температури                      В. концентрації  
Г. статичного тиску                              Д. електрохімічного потенціалу

2. Проаналізуйте, яка основна відмінність активного транспорту через плазматичну мембрану від пасивного:

- А. він спрямований з навколишнього середовища всередину клітини  
Б. він спрямований із середини клітини у навколишнє середовище  
В. він здійснюється безпосередньо через бішар ліпідів мембрани  
Г. для його здійснення потрібні затрати енергії метаболізму  
Д. він приводить до зникнення градієнту концентрації

3. Проаналізуйте, які речовини переносяться через мембрану шляхом первинно активного транспорту:

- А. білки    Б. іони    В. кисень    Г. вуглеводи    Д. глюкоза

4. Шляхом вторинно-активного транспорту крізь мембрану може переноситись:

- А. кисень    Б. калій    В. амінокислоти    Г. білки    Д. жири

5. Глюкоза може транспортуватись крізь плазматичну мембрану шляхом:

- А. первинно-активного транспорту                      Б. вторинно-активного транспорту  
В. вільної дифузії                              Г. електроди фузії                              Д. ендоцитозу

6. Іони натрію через мембрану переносяться шляхом:

- А. піноцитозу і фагоцитозу                              Б. тільки активного транспорту  
В. тільки пасивного транспорту                              Г. активного і пасивного транспорту  
Д. тільки вільної дифузії

7. Іони калію транспортуються через плазматичну мембрану при пасивному переносі:

- А. безпосередньо через бішар фосфоліпідів  
Б. через іонні канали мембрани  
В. за допомогою білків-переносників  
Г. за допомогою натрій-калієвого насосу  
Д. іони калію пасивно не транспортуються

8. Іони натрію транспортуються через мембрану шляхом активного транспорту:

- А. через бішар ліпідів
- Б. через іонні канали
- В. через мембранні пори
- Г. за допомогою натрій-калієвого насосу
- Д. за допомогою ендоцитозу

9. Речовина, що здатна розчинятись у жирах, може проникати в клітину:

- А. шляхом вільної дифузії
- Б. шляхом полегшеної дифузії
- В. за допомогою активного транспорту
- Г. через мембранні насоси
- Д. через іонні канали мембрани

10. За рівнянням Теорелла розраховується:

- А. швидкість дифузії іонів
- Б. швидкість активного транспорту
- В. мембранний потенціал спокою
- Г. електрохімічний потенціал
- Д. амплітуда потенціалу дії.

## 5. БІОЕЛЕКТРИЧНІ ПОТЕНЦІАЛИ КЛІТИНИ

Всі тіла в природі здатні набувати електричний заряд. Його наявність проявляється в тому, що заряджені тіла взаємодіють між собою. Існує два види зарядів, які умовно позначаються як позитивний і негативний. Заряди одного знака відштовхуються один від одного, різних знаків - притягуються.

Електричний заряд є невід'ємною властивістю деяких елементарних частинок. Так, електрони мають негативний заряд, а протони - позитивний. Заряд всіх елементарних частинок однаковий за абсолютною величиною і тому називається *елементарним*.

Число елементарних зарядів у макроскопічних тілах дуже велике. В цілому вони, як правило, є електронейтральними, оскільки заряди в них розподілені з однаковою густиною. Тіла виявляються зарядженими у випадку переважання частинок того або іншого знака. Одиницею електричного заряду є *кулон (Кл)*.

### *Електричне поле*

Кожен електричний заряд утворює в своєму навколишньому просторі *електричне поле*. За його допомогою заряди взаємодіють один з одним. Пробний заряд, внесений в електричне поле іншого заряду, "відчуває" його присутність. Пробний заряд може притягуватись до заряду, який створює електричне поле, або відштовхуватися від нього.

Електричне поле можна представити у вигляді силових ліній, які показують напрямок електричних сил. Прийнято вважати, що він відповідає напрямку переміщення позитивного заряду. Тому силові лінії спрямовані від позитивного заряду до негативного.

### *Характеристики електричного поля*

1). *Напруженість* електричного поля є його силовою характеристикою.

Напруженість електричного поля в будь-якій його точці чисельно дорівнює електричній силі, яка діє на одиничний позитивний заряд  $q$ , поміщений в цю точку:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Напруженість є векторною величиною, яка має напрямок. Одиницею виміру напруженості є вольт, поділений на метр.

*Принцип накладення* (суперпозиції) полягає в тому, що сумарна

напруженість електричного поля, створеного безліччю зарядів, визначається складанням напруженостей полів, створених кожним зарядом, за правилами додавання векторів.

2). *Електричний потенціал* є енергетичною характеристикою електричного поля. Для того, щоб перемістити заряд проти діючої на нього електричної сили, необхідно виконати роботу. Вона не залежить від шляху переміщення заряду в електричному полі, а визначається початковим і кінцевим положеннями заряду.

В разі переміщення заряду з однієї точки електричного поля в другу точку проти електричної сили, його потенціальна електростатична енергія збільшується. Електричний потенціал в будь-якій точці поля чисельно дорівнює тій електростатичній потенціальній енергії  $W_p$ , яку має одиничний позитивний заряд  $q$  в цій точці:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

Електричний потенціал є скалярною величиною і вимірюється в вольтах (В). Реально виміряти можна лише різницю потенціалів між двома точками поля.

Величина напруженості електричного поля дорівнює негативному градієнту електричного потенціалу, який показує, як змінюється потенціал з відстанню  $x$ :

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dx}$$

### ***Електричне поле клітини. Мембранний потенціал спокою***

Кожна жива клітина створює і підтримує своє електричне поле. На це витрачається значна частина енергії, яку клітина отримує в процесі обміну речовин. На плазматичній мембрані кожної живої клітини існує різниця електричних потенціалів.

*Мембранний потенціал клітини* - це різниця електричних потенціалів між цитоплазмою клітини і зовнішнім середовищем (між внутрішньою і зовнішньою сторонами плазматичної мембрани).

Мембранний потенціал клітини, якщо вона знаходиться в звичайному (незбудженому для нервових і м'язових клітин) стані, називають *потенціалом спокою*.

У стані спокою цитоплазма клітини має *негативний електричний потенціал* відносно навколишнього середовища. Мембранний потенціал

спокою у різних клітин може складати від – 30 мВ до -90 мВ.

Для вимірювання мембранного потенціалу клітини необхідні два електроди. Один з них повинен знаходитися всередині клітини, а інший - в навколишньому середовищі. Електроди приєднують до вимірювального приладу. Цей дослід був вперше проведений А. Ходжкіним і Е. Хакслі (1939) на гігантському нервовому волокні кальмара. Діаметр такого волокна складає 0,5-0,8 мм, що дозволило ввести всередину нього тонкий електрод, не викликаючи істотних пошкоджень мембрани.

В подальшому для вимірювання мембранного потенціалу почали застосовувати скляні мікроелектроди. Вони представляють собою мікропіпетки з діаметром кінчика близько 0,1 мкм. Їх виготовляють із скляних тонких трубок, розтягуючи їх при нагріванні. Мікроелектроди заповнюють концентрованим розчином електроліту, який є провідником електричного струму. За допомогою мікроманіпулятора мікроелектрод вводять в клітину, проколюючи плазматичну мембрану і не викликаючи її значних пошкоджень. В момент проколу мембрани вимірювальний прилад, приєднаний до мікроелектроду і референтного електроду, фіксує величину мембранного потенціалу клітини.

### ***Походження мембранного потенціалу спокою***

В основі існування мембранного потенціалу спокою лежать особливості розподілу іонів в цитоплазмі клітин і їх навколишньому середовищі (таблиця 1). Головне значення має розподіл катіонів. Завдяки роботі натрій-калієвого насоса плазматичної мембрани в цитоплазмі підтримується відносно висока концентрація іонів калію. В оточуючому клітину середовищі (тканинної рідини, крові, лімфі) переважають іони натрію. На роботу натрій - калієвого насоса клітина витрачає значну енергію, джерелом якої є обмін речовин.

Таблиця 1

### ***Розподіл основних іонів всередині і зовні нервового волокна кальмара***

Іон	Концентрація (ммоль / л)	
	внутрішньоклітинна	позаклітинна
Калій	392	22
Натрій	78	462
Хлор	104	286



З числа аніонів у цитоплазмі переважають великі органічні іони, які синтезуються в клітині. Вони не здатні дифундувати через плазматичну мембрану. В оточуючому клітину середовищі переважають іони хлору. В наведеній таблиці вказана концентрація основних іонів в цитоплазмі нервового волокна кальмара і його навколишньому середовищі.

Безпосередньою причиною існування мембранного потенціалу спокою є дифузія іонів через відповідні канали мембрани. Першу гіпотезу, що пояснює походження мембранного потенціалу спокою, дав Ю.Бернштейн (1902). Він припустив, що негативний потенціал цитоплазми відносно зовнішнього середовища пов'язаний з дифузією іонів калію, спрямованою зсередини клітини назовні. Причиною дифузії є різниця концентрації цих іонів по обидві сторони мембрани.

Подальші дослідження надали докази справедливості цього припущення. Виявилось, що плазматична мембрана клітини в стані спокою набагато більш проникна для іонів калію, ніж для іонів натрію. Наприклад, для гігантського аксона кальмара співвідношення проникності мембрани в спокої для різних іонів складає  $P_{K^+} : P_{Na^+} : P_{Cl^-} = 1 : 0,04 : 0,15$ .

Це свідчить, що саме дифузія катіонів калію є основним чинником, що зумовлює величину мембранного потенціалу спокою. Тому в першому наближенні можна знехтувати проникністю мембрани для іонів натрію і хлору і розглядати лише процеси, пов'язані з дифузією іонів калію.

Іони калію дифундують через калієві канали мембрани зсередини клітини назовні. Більшість аніонів цитоплазми не проникають через мембрану. Тому в стані спокою створюється негативний потенціал цитоплазми відносно зовнішнього середовища. Він перешкоджає дифузії іонів калію за градієнтом концентрації. Результатом цього є встановлення рівноваги між потоками калію, що надходять в клітину і виходять з неї. В цьому випадку мембранний потенціал спокою повинен бути близький до рівноважного потенціалу іонів калію.

Рівноважний стан передбачає, що електрохімічний потенціал іонів калію всередині клітини  $\mu_i$  і зовні  $\mu_0$  дорівнюють один одному:

$$\tilde{\mu}_i = \tilde{\mu}_0$$

В таких умовах різницю електричних потенціалів між цитоплазмою клітини  $\varphi_i$  і зовнішнім середовищем  $\varphi_0$  (тобто мембранний потенціал спокою  $\varphi_m$ ) характеризує *рівняння Нернста*. Вказана різниця залежить від співвідношення концентрації іонів калію всередині клітини  $[K^+]_i$  і в

зовнішньому середовищі  $[K^+]_o$ .

$$\varphi_m = -\frac{R \cdot T}{F \cdot z} \cdot \ln \frac{[K^+]_i}{[K^+]_o}$$

Для точного розрахунку величини мембранного потенціалу спокою необхідно враховувати дифузію не тільки іонів калію, а також іонів натрію через мембрану. Її проникність для іонів натрію в спокої невелика, але їх дифузія все ж існує. Дифузійний потік іонів натрію спрямований всередину клітини, і він дещо зменшує величину мембранного потенціалу в порівнянні з потенціалом рівноваги для іонів калію.

Більш точний математичний опис мембранного потенціалу спокою можна отримати, якщо виходити з того, що на мембрані підтримується не іонна рівновага, а стаціонарний стан, при якому потоки різних іонів, що проходять через мембрану, не впливають один на другий. Такий опис надає *рівняння Гольдмана-Ходжкіна*. Величина мембранного потенціалу клітини залежить від концентрацій іонів калію, натрію і хлору в цитоплазмі клітини  $[K^+]_i$ ,  $[Na^+]_i$ ,  $[Cl^-]_i$  і зовнішньому середовищі  $[K^+]_o$ ,  $[Na^+]_o$ ,  $[Cl^-]_o$ , а також проникності  $P$  плазматичної мембрани для цих іонів.

$$\varphi_m = -\frac{R \cdot T}{F \cdot z} \cdot \ln \frac{p_{K^+} [K^+]_i + p_{Na^+} [Na^+]_i + p_{Cl^-} [Cl^-]_o}{p_{K^+} [K^+]_o + p_{Na^+} [Na^+]_o + p_{Cl^-} [Cl^-]_i}$$

Мембранний потенціал клітини разом з різницею концентрацій іонів в цитоплазмі і зовнішньому середовищі визначають величину градієнта електрохімічного потенціалу - значний запас потенціальної енергії, який клітина постійно створює і підтримує. Ця енергія витрачається на різні види життєдіяльності клітини. Величина мембранного потенціалу спокою позначається на багатьох її фізіологічних функціях. Вона може змінюватися під дією різних факторів. Зміна цієї величини у позитивний бік називається *деполяризацією* плазматичної мембрани, а в негативну сторону - *гіперполяризацією*. У нервових клітин такі зміни полягають в основі процесів збудження і гальмування відповідно.

### ***Електрична збудливість мембрани. Потенціал дії***

Нервові і м'язові клітини є збудливими. Вони здатні під дією певних факторів переходити зі стану спокою в стан збудження. Воно проявляється в

тому, що в плазматичних мембранах клітин виникають потенціали дії.

Нейрони генерують потенціали дії (нервові імпульси), які є сигналами - носіями інформації в нервовій системі. Потенціали дії нейронів мають однакову форму і поширюються по їх аксонам без згасання на значну відстань.

В мембрані м'язових клітин потенціали дії виконують іншу функцію - вони запускають процес м'язового скорочення.

*Потенціал дії* - це електричний імпульс, тобто швидке коливання мембранного потенціалу. В клітинах різних збудливих клітин потенціали дії відрізняються за величиною і тривалістю. Амплітуда потенціалу дії в нервових клітинах досягає 110 - 130 мілівольт, а тривалість становить 0,5 - 1,0 мілісекунд. В клітинах скелетних м'язів тривалість потенціалів дії дорівнює декілька мілісекунд, а в клітинах серцевого м'яза - сотні мілісекунд (рис. 5.1).

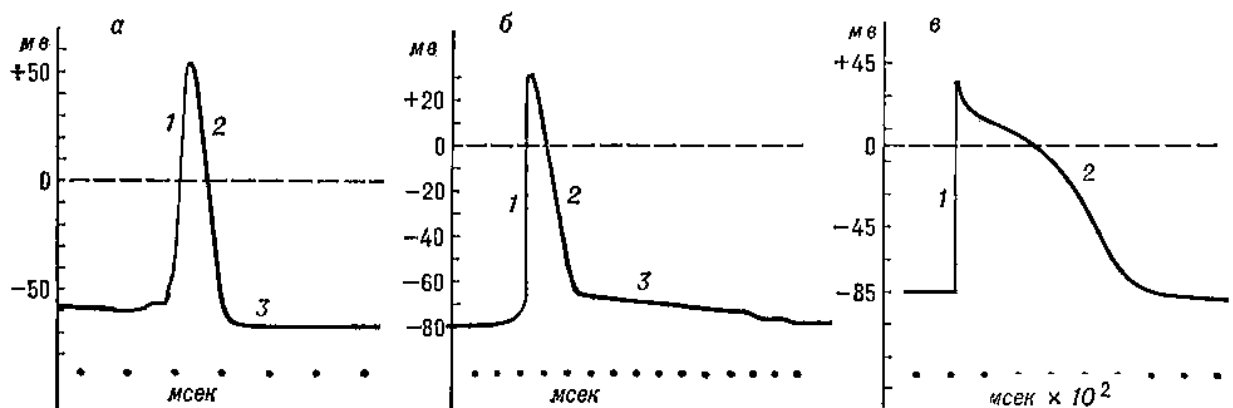


Рис.5.1 Потенціали дії нервової клітини (а), клітин скелетного (б) і серцевого (в) м'язів. По осі абсцис - амплітуда потенціалу, мВ; по осі ординат - час, мс

Виникнення потенціалу дії в мембрані починається з *фази деполаризації*, яка представляє собою швидке збільшення величини мембранного потенціалу клітини в напрямку нуля (рис. 5.2). Потім протягом короткого проміжку часу спостерігається *реверсія потенціалу* (овершут, англ.), коли мембранний потенціал стає позитивним, тобто змінює свій знак. Далі виникає *фаза реполяризації* мембрани - повернення мембранного потенціалу до своєї вихідної величини. Протягом реполяризації можуть відбуватись повільні коливання величини мембранного потенціалу (*слідові потенціали*).

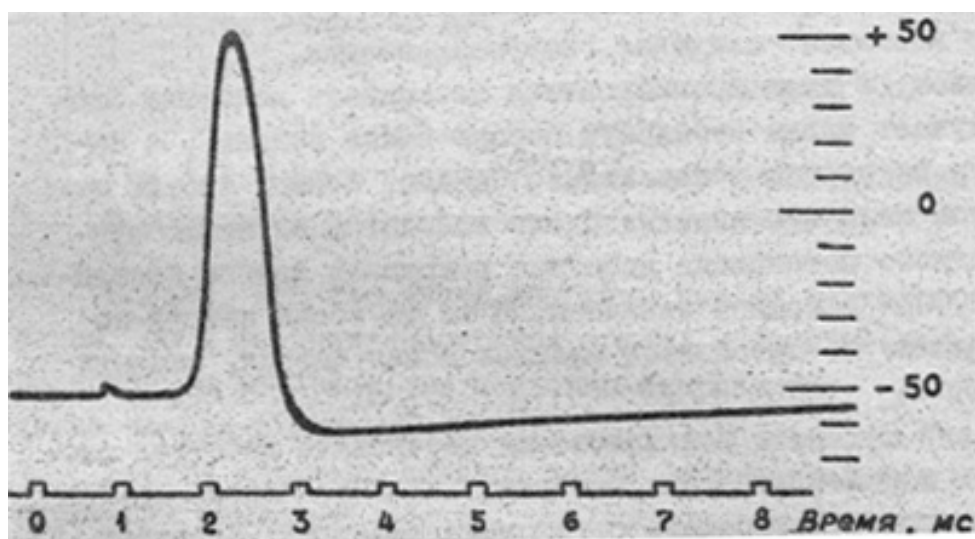


Рис.5.2. Графік потенціалу дії нервової клітини

### ***Біофізичний механізм виникнення потенціалу дії. Іонні струми***

Виникнення потенціалу дії обумовлено різким підвищенням іонної проникності плазматичної мембрани для іонів натрію. Її електропровідність збільшується в багато разів. Механізм цього явища розкрили англійські біофізики А. Ходжкін і Е.Ф. Хакслі в результаті дослідів на гігантському нервовому волокні кальмара (Нобелівська премія з фізіології та медицини в 1963 р). Вчені встановили, що мембрана збільшує свою проникність не для всіх іонів. Відбувається специфічне підвищення її проникності для іонів натрію, тобто активація перенесення натрію через мембрану.

Натрієва проникність мембрани збільшується приблизно в 500 разів у порівнянні зі станом спокою. При цьому проникність мембрани для іонів калію залишається в початковій фазі потенціалу дії незмінною.

Як відомо, концентрація іонів натрію в середовищі, що оточує клітину, значно перевершує їх концентрацію в цитоплазмі, а мембранний потенціал спокою негативний. Тому при підвищенні натрієвої проникності мембрани як концентраційний, так і електричний градієнти сприяють тому, що потік натрію спрямовується всередину клітини шляхом дифузії і викликає її деполяризацію.

Надходження іонів натрію всередину клітини зміщує її мембранний потенціал в напрямку нуля і робить його позитивним. Однак, мембранний потенціал не досягає рівноважного натрієвого потенціалу, який складає +55 мВ (рис. 5.3), оскільки при певному рівні деполяризації в мембрані виникає новий процес - *інактивація* перенесення натрію, яка припиняє його

надходження в клітину.

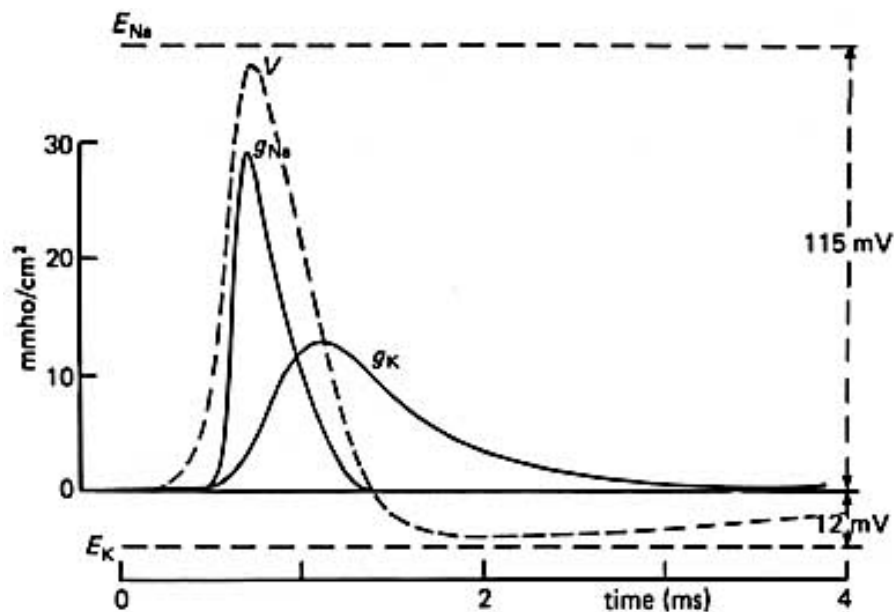


Рис. 5.3 Потенціал дії і рівноважні потенціали для іонів натрію і калію

Після піку деполяризації виникає *реполяризація* мембрани. Причиною реполяризації служить підвищення проникності плазматичної мембрани для іонів калію в порівнянні зі станом спокою. Внаслідок цього іони калію дифундують у напрямку зменшення свого електрохімічного потенціалу, тобто з клітини в навколишнє середовище, що сприяє відновленню мембранного потенціалу до його величини у спокої.

Таким чином, протягом потенціалу дії клітина отримує ззовні деяку кількість іонів натрію, а потім віддає таку саму кількість іонів калію. Однак іонний склад цитоплазми при цьому мало змінюється. Зрушення концентрації іонів при виникненні одного потенціалу дії у великій клітині становить приблизно 0,001% вихідної величини. Тому навіть при повному пригніченні активного транспорту іонів, який створює нерівноважну їх концентрацію в цитоплазмі і навколишньому середовищі, клітина здатна генерувати десятки тисяч потенціалів дії.

### ***Процеси в іонних каналах мембрани при виникненні потенціалу дії***

Плазматична мембрана нервового волокна має такі іонні канали, які управляються змінами мембранного потенціалу (потенціалзалежні канали). У процесі виникнення потенціалу дії беруть участь як натрієві, так і калієві

канали. Перші з них деполяризації мембрани, другі - в реполяризації.

Натрієві канали мембрани нервових клітин мають ворота, які є частиною структури каналних білків і регулюють проходження іонів через канали. Ворота пов'язані з певними угрупованнями атомів - сенсорами, що реагують на зрушення мембранного потенціалу. Ворота постійно осцилюють, але в залежності від величини мембранного потенціалу може переважати відкритий або закритий стан воріт. Взаємні переходи між цими станами відбуваються дуже швидко.

Натрієві канали збудливих клітин мають двоє воріт: *активаційні* і *інактиваційні*. Коли мембранний потенціал клітини відповідає потенціалу спокою, активаційні ворота знаходяться, головним чином, в закритому стані. Проникність мембрани для іонів натрію дуже невелика. Інактиваційні ворота у стані спокою відкриті.

Причиною виникнення потенціалу дії є деполяризація плазматичної мембрани, яка переводить клітину в стан збудження. При деполяризації збільшується ймовірність переходу активаційних воріт натрієвих каналів у відкритий стан. Відкривання воріт пов'язане з переміщенням в мембрані рухомих електричних зарядів у складі сенсорів електричної напруженості.

Процес переходу натрієвих каналів мембрани у відкритий стан перебігає з позитивним зворотним зв'язком (рис. 5.4). Коли деполяризація досягає певного рівня, вона починає сама себе підсилювати. Іони натрію, що надходять через канали, викликають подальшу деполяризацію клітини, внаслідок чого збільшується проникність мембрани для іонів натрію. Це викликає, в свою чергу, подальшу деполяризацію. В результаті потенціал дії швидко досягає максимальної амплітуди.

Деполяризація мембрани впливає не тільки на активаційні, а ще й на інактиваційні ворота натрієвих каналів. Вони закриваються при більш значній деполяризації, ніж та, яка потрібна для відкривання активаційних воріт. Це припиняє надходження натрію в клітину.

На рис. 5.5 показані три стану натрієвого каналу, які замінюють один одного під впливом змін мембранного потенціалу. У першому з них, що відповідає спокою, активаційні ворота закриті, а інактиваційні - відкриті. У цьому стані канал не пропускає іони натрію. Далі під впливом деполяризації відкриваються активаційні ворота і пропускають іони натрію всередину клітини. Коли ж процес деполяризації досягає максимального розвитку, закриваються інактиваційні ворота, припиняючи подальше надходження

іонів натрію в клітину.



Рис. 5.4 Взаємне посилення деполаризації мембрани і її натрієвої проникності при виникненні потенціалу дії

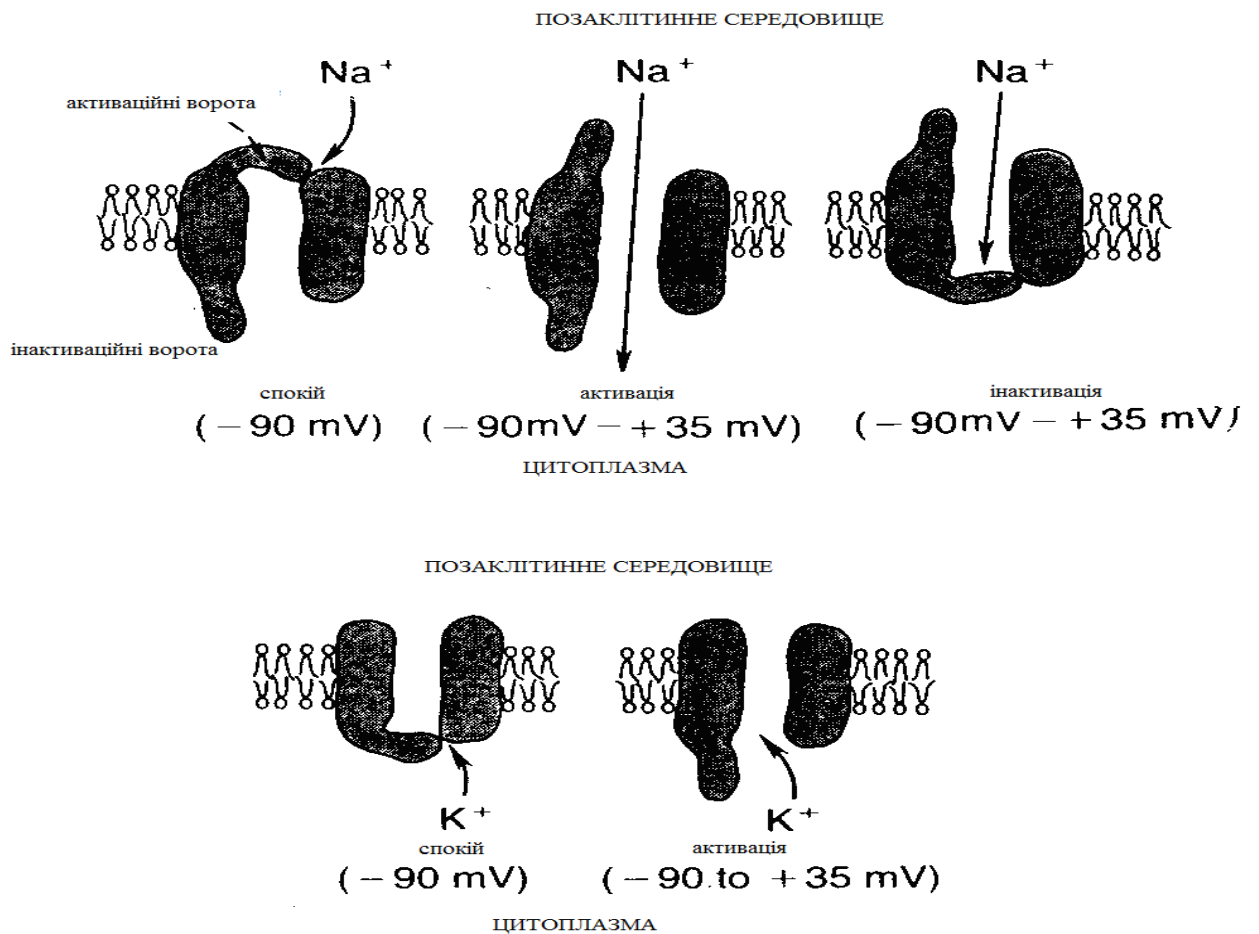


Рис. 5.5. Зміна стану воріт натрієвих і калієвих каналів мембрани при виникненні потенціалу дії

Під впливом деполяризації мембрани відкриваються також ворота частини її калієвих каналів. Їх максимальне відкривання відбувається, коли натрієві канали вже інактивовані. Внаслідок цього певна кількість іонів калію залишає клітину, і мембранний потенціал повертається до вихідної величини. Калієві канали не мають інактиваційних воріт. Тому калієвий струм через мембрану більш тривалий, ніж натрієвий.

### *Поширення потенціалу дії*

Найважливішою особливістю потенціалу дії є його здатність поширюватися по мембрані нервових волокон (аксонів) з певною швидкістю.

Аксони нервових клітин можна розглядати як циліндричні провідники. Їх вміст (цитоплазма) має відносно малий електричний опір, тоді як плазматична мембрана - дуже великий опір. При виникненні потенціалу дії утворюються місцеві електричні струми, які поширюються лише на невелику відстань від збудженої ділянки мембрани. Поширення потенціалу дії на значну відстань без згасання пояснюється тим, що на мембрані відбувається безперервне підсилення змін місцевого електричного потенціалу.

Місцеві електричні струми в мембрані, що виникають під впливом потенціалу дії, деполяризують сусідні, незбуджені її ділянки. В результаті вони також переходять у стан збудження – в них виникають потенціали дії. І знов виникають місцеві електричні струми (рис. 5.6).

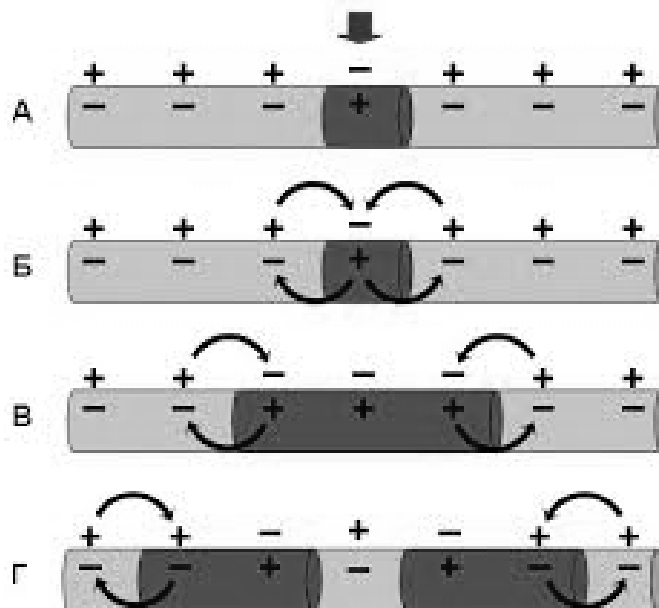


Рис. 5.6 Поширення потенціалу дії по нервовому волокну за допомогою місцевих електричних струмів



У вищих тварин існують нервові волокна, які забезпечують високу швидкість проведення збудження при порівняно невеликому радіусі. Значна частина поверхні їх мембрани покрита жироподібною речовиною - мієліном, який утворюється в периферичній нервовій системі шванівськими клітинами (рис. 5.7), а в головному мозку – олігодендроцитами (клітинами глії). Залишаються непокритими тільки окремі ділянки, які називаються *перехопленнями Ранвє*.

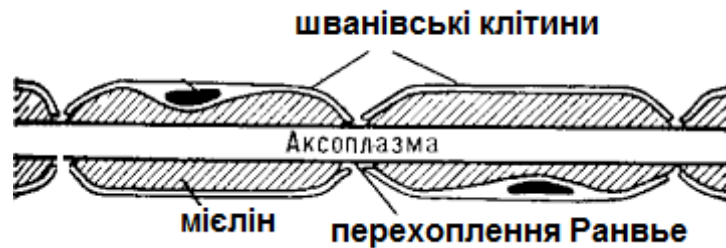


Рис. 5.7. Мієлінова оболонка нервового волокна

Мієлін є ізолятором, через який не проходять силові лінії місцевих струмів. перехоплення Ранвє мають велику кількість натрієвих каналів і малий електричний опір. Це надає потенціалу дії можливість "стрибати" від одного перехоплення до іншого. В результаті швидкість поширення потенціалу дії збільшується в багато разів (рис. 5.8).

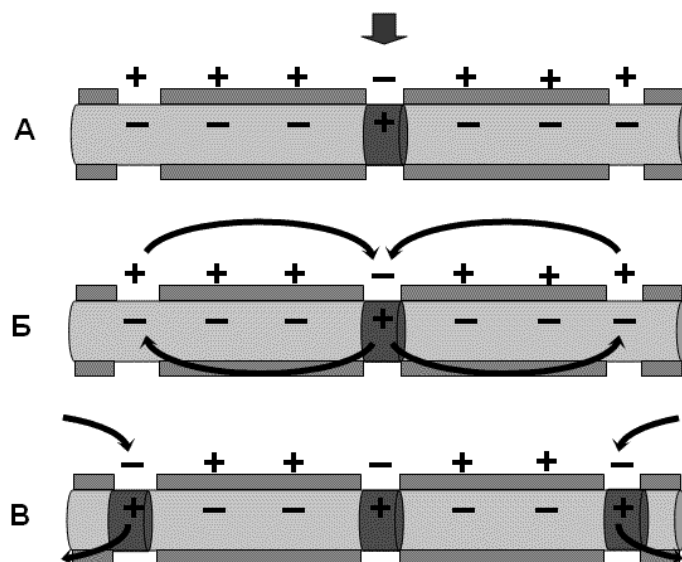


Рис. 5.8. Поширення збудження по мієлінізованим нервовим волокнам

### Контрольні питання:

1. Що таке електричний потенціал? Які одиниці його вимірювання?
2. Вкажіть причини існування мембранного потенціалу спокою.
3. Докажіть за допомогою рівняння Нернста калієву природу мембранного потенціалу спокою.
4. Що дозволяє розрахувати рівняння Гольдмана-Ходжкіна?
5. Охарактеризуйте фази потенціалу дії нервового волокна.
6. Поясніть іонний механізм потенціалу дії нервового волокна.
7. Охарактеризуйте стан натрієвих і калієвих каналів мембрани в різні фази потенціалу дії. Які це канали за способом управління воротами?
8. Охарактеризуйте розповсюдження потенціалу дії по немієлінізованому нервовому волокну?
9. Як відбувається розповсюдження потенціалу дії в мієлінізованому нервовому волокну.
10. Чому потенціал дії не розповсюджується в зворотному напрямку?

### Оберіть правильну відповідь:

1. Іони калію розподілені всередині і ззовні клітини наступним чином:  
А. всередині клітини його концентрація більша, ніж ззовні  
Б. всередині клітини його концентрація менша, ніж ззовні  
В. всередині і ззовні концентрація іонів однакова  
Г. всередині клітини іон відсутній, а ззовні його концентрація велика  
Д. всередині концентрація іону велика, а ззовні він відсутній
2. Зсув мембранного потенціалу в позитивний бік називається:  
А. гіперполяризацією      Б. деполяризацією      В. реполяризацією  
Г. реверсією      Д. овершутом
3. В найбільшій мірі величині мембранного потенціалу спокою нервового волокна відповідає:  
А. +45 мікрвольт      Б. -70 мілівольт  
В. +70 мікрвольт      Г. +45 мілівольт      Д. -120 мілівольт
4. Негативна величина мембранного потенціалу спокою зумовлена:  
А. надходженням калію всередину клітини  
Б. дифузією калію із клітини  
В. надходженням натрію всередину клітини

- Г. дифузією натрію із клітини
- Д. дифузією натрію в клітину

5. Амплітуда потенціалу дії нервового волокна складає близько:

- А. 10 мікрвольт
- Б. 100 мікрвольт
- В. 10 мілівольт
- Г. 100 мілівольт
- Д. 10 вольт

6. Виберіть правильну послідовність фаз потенціалу дії:

- А. реполяризація, деполяризація, реверсія потенціалу
- Б. деполяризація, реверсія потенціалу, реполяризація
- В. деполяризація, реполяризація, реверсія потенціалу
- Г. реполяризація, реверсія потенціалу, деполяризація
- Д. реверсія потенціалу, реполяризація, деполяризація

7. Однією з причин реполяризації збудливої мембрани при виникненні потенціалу дії служить дифузія:

- А. натрію всередину клітини
- Б. натрію із клітини
- В. калію всередину клітини
- Г. калію із клітини
- Д. натрію і калію всередину клітини

8. Визначте, який фактор здатний викликати збільшення проникності збудливої мембрани для іонів калію:

- А. інактивація
- Б. гіперполяризація
- В. деполяризація
- Г. реполяризація
- Д. реверсія

9. Проаналізуйте, як зміниться потенціал дії нервового волокна, якщо іони натрію в середовищі, що оточує клітину, замінити іншими іонами, які не здатні проникати крізь мембрану:

- А. не зміниться
- Б. зменшиться за амплітудою
- В. перестане виникати
- Г. зменшиться за тривалістю
- Д. збільшиться за амплітудою

10. Іони натрію потрапляють всередину нервової клітини при її збудженні:

- А. безпосередньо через бішар фосфоліпідів
- Б. за допомогою калій-натрієвого насосу
- В. за допомогою білків-переносників
- Г. через іонні канали мембрани
- Д. через натрій-водневий обмінник

## 6. БІОФІЗИКА М'ЯЗОВОГО СКОРОЧЕННЯ

Всі різноманітні форми рухів у живій природі, починаючи з биття війок одноклітинних організмів і руху листя рослин і закінчуючи скороченнями скелетних м'язів, мають деякі спільні риси. Всі рухи пов'язані з перетворенням хімічної енергії, що звільняється при гідролізі аденозінтрифосфату (АТФ), в механічну енергію. Крім того, всі вони відбуваються в клітинах за участю спеціалізованих білкових молекул.

Скелетні м'язи відіграють надзвичайно важливу роль в життєдіяльності організму. Завдяки їх скороченням людина здатна не тільки переміщатися в просторі і підтримувати позу тіла, але й виражати свої думки і почуття за допомогою мови, міміки та жестів.

### *Структура скелетного м'яза*

Скелетний м'яз складається з окремих пучків м'язової тканини, кожен з яких включає в себе велику кількість *м'язових волокон* - клітин, здатних скорочуватися і здійснювати механічну роботу. М'язове волокно представляє собою багатоядерну клітину, діаметр якої може складати від 10 до 100 мкм, а довжина, як правило, дорівнює довжині м'яза в цілому. М'язові волокна оточені плазматичною мембраною.

Кожне м'язове волокно включає в себе від декількох сотень до двох тисяч тонших витягнутих волоконцець – *міофібрил* діаметром 1-2 мкм, що безпосередньо беруть участь в м'язовому скороченні. Міофібрили знаходяться в цитоплазмі м'язового волокна поряд зі звичайними внутрішньоклітинними органелами.

Кожна міофібрила складається з менших субодиниць - *міофіламентів*, які утворені з білкових молекул, відповідальних за скорочення м'язів. Існують два види скорочувальних білків: *актин* і *міозин*. Кожна з міофібрил містить близько 1500 міозинових і 3000 актинових філаментів, які лежать паралельно один одному. Міозинові філаменти є більш товстими, ніж актинові. Їх діаметр становить 15 нм, а у актинових - 10 нм. Міозинові і актинові філаменти розташовані геометрично впорядковано.

Міофібрила по усій свої довжині рівномірно поділена поперечними Z-мембранами. Вони розташовані на одному рівні в усіх міофібрилах м'язового волокна.

Частина міофібрили (або м'язового волокна в цілому) між двома

сусідніми Z-мембранами називається *саркомером*. Його довжина у стані спокою м'язового волокна становить близько 2,5 мкм.

В саркомері актинові філаменти прикріплюються до *Z-мембран*, а міозинові - розташовані в його центрі. В спокої кінці актинових і міозинових філаментів трохи перекриваються між собою. Завдяки їх впорядкованому розташуванню міофібрили, які складаються з багатьох саркомерів, в мікроскопі виглядають як сукупність світлих і темних дисків, тобто мають поперечну смугастість.

Світлі диски містять тільки актинові філаменти і називаються *ізотропними (I-дисками)*. В темних дисках, які називаються *анізотропними (A-дисками)*, представлені міозинові і актинові філаменти. Зона перекривання актинових і міозинових філаментів в анізотропному диску виглядає темнішою, ніж центральна *H - зона*, в якій знаходяться тільки міозинові філаменти (рис. 6.1). У центрі саркомера видно тонку темну *M-лінію* - мережу опорних білків, які утримують міозинові філаменти в складі єдиної впорядкованої в просторі структури.

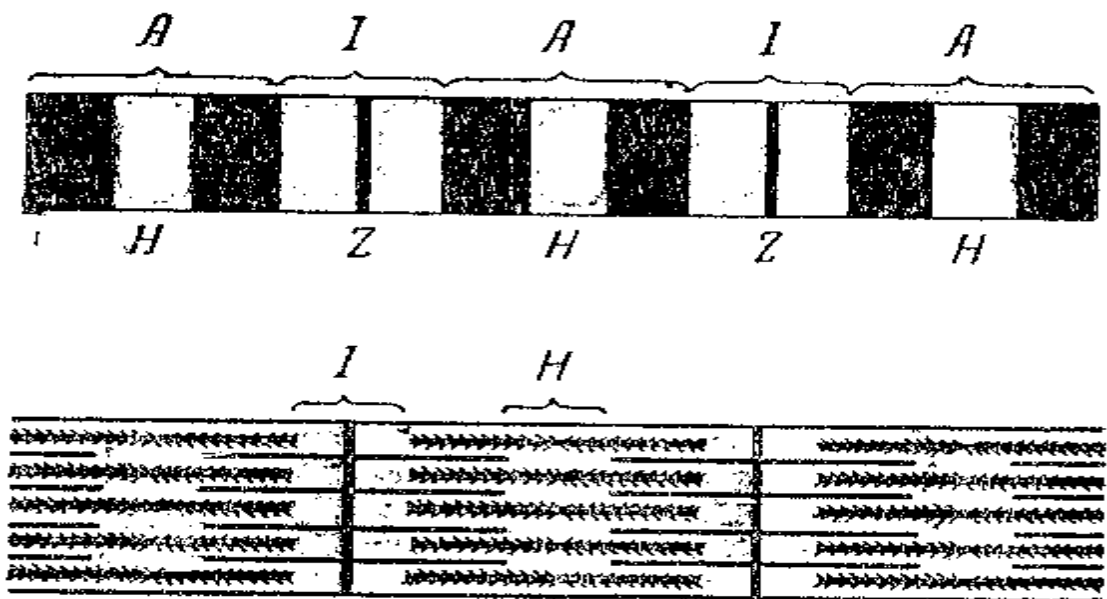


Рис. 6.1. Саркомери міофібрили м'язового волокна у спокої

У м'язовій клітині є дві специфічні мембранні системи: *T-система* і *саркоплазматичний ретикулум (СПР)*, які мають пряме відношення до м'язового скорочення. *T-система* являє собою канали, які утворює плазматична мембрана в поперечному напрямку м'язового волокна. *T-система* контактує з *СПР* - системою витягнутих каналів і цистерн, всередині

яких міститься висока концентрація іонів кальцію, яку створює кальцієвий насос. СПР охоплює міофібрили на зразок муфти.

Для розуміння молекулярного механізму м'язового скорочення має велике значення структура міозинових і актинових філаментів, яка на теперішній час детально вивчена.

Міозиновий філамент складається з молекул міозину (білок  $M=500000$ ). Кожна з них сформована шістьма поліпептидними ланцюгами: двома важкими і чотирма легкими (рис. 6.2 А). Два важкі ланцюги переплетені між собою, формуючи подвійну спіраль, яка називається хвостом. Кінці кожного з важких ланцюгів згорнуті в дві грушоподібні глобулярні структури - голівки. Складовими частинами голівок є також чотири легкі ланцюги міозину (по 2 в кожній). Голівки містять центри зв'язування АТФ і в присутності актину здатні каталізувати реакцію гідролізу АТФ.

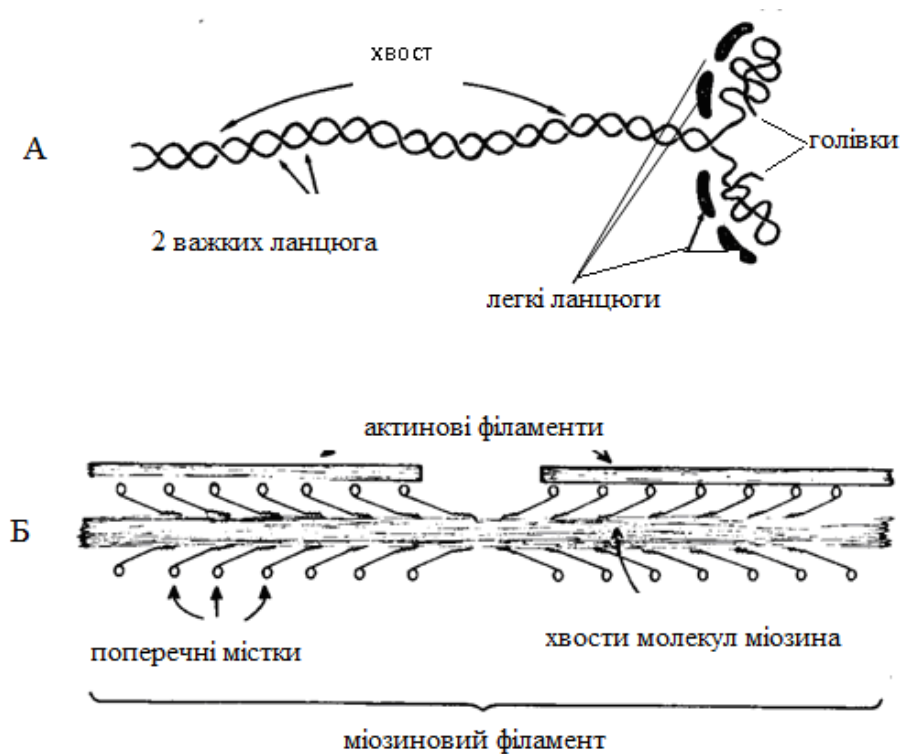


Рис. 6.2. Молекула міозину (А) і структура міозинового філаменту (Б)

Частина спіралі кожної молекули міозину разом з голівками формують *поперечні містки*. Вони можуть приєднуватись до актинових філаментів при

ініціації м'язового скорочення.

Близько 200 молекул міозину утримуються разом електростатичними силами і формують структуру міозинового філаменту (рис. 6.2 Б). Хвости молекул міозину формують середню частину філаменту - *стрижень*, а голівки розташовані з обох боків від нього так, що актинові філаменти, прикріплені до Z-мембран, можуть рухатись в напрямку один одного при ініціації м'язового скорочення.

Тонкі актинові філаменти також мають складну будову. Вони сформовані з трьох білкових компонентів: актину (білок  $M = 42000$ ) і двох регуляторних білків: тропоміозину і тропоніну. У кожному актиновому філаменті дві молекули актину згорнуті, формуючи спіраль. На її поверхні розташовані *активні центри* - ділянки, до яких можуть прикріплятися поперечні містки молекул міозину при скороченні м'яза (рис. 6.3).

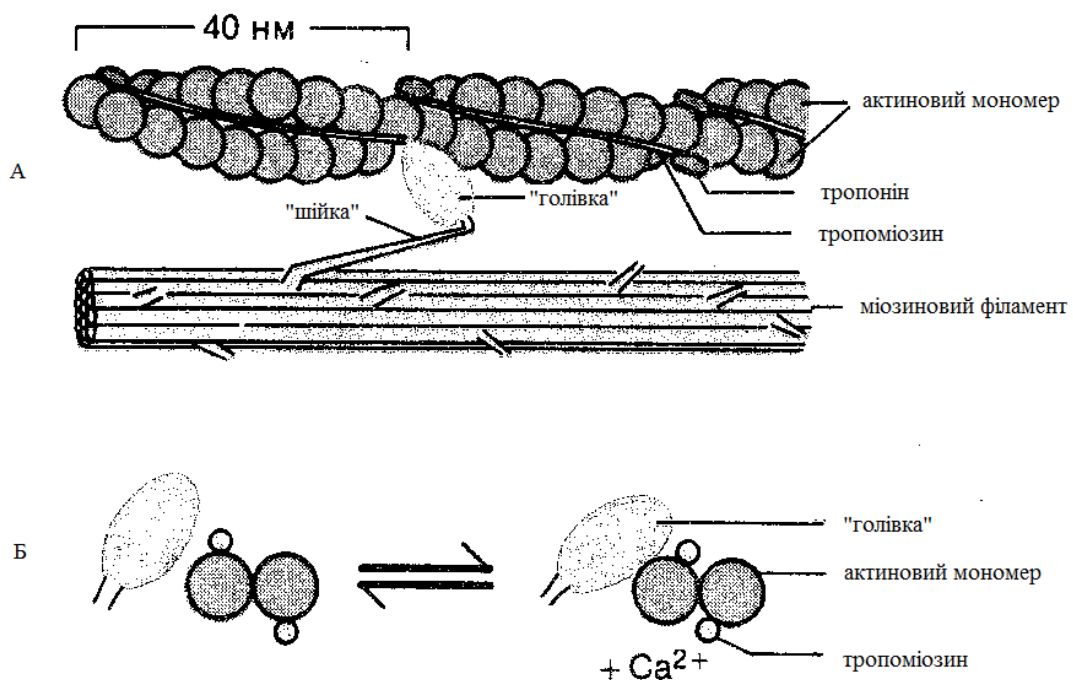


Рис. 6.3. Структура актинового філаменту (А) і роль іонів кальцію у його конформаційних змінах, які забезпечують взаємодію активного центру з голівкою поперечного містка (Б)

В стані спокою активні центри актинового філаменту покриті тропоміозином, що запобігає взаємодії між ними і поперечними містками міозину. Молекули тропоніна прилягають до поверхні молекул тропоміозина і мають велику спорідненість до іонів кальцію. При взаємодії з ними

тропонін змінює конформацію так, що тропоміозин перестає покривати активні центри и до них можуть приєднуватись поперечні містки.

### *Молекулярний механізм м'язового скорочення*

Г. Хакслі показав, що під час м'язового скорочення актинові і міозинові філаменти не змінюють своєї довжини. Вони лише переміщуються один вздовж одного, в результаті чого довжина окремих міофібрил і м'яза у цілому зменшується (*модель взаємного ковзання*).

На рис. 6.4 видно, що у спокої актинові філаменти кожного саркомера лише трохи перекривають міозинові філаменти, а при скороченні м'язового волокна – втягуються в проміжки між міозиновими філаментами, починають перекривати

мембрані

о Z-

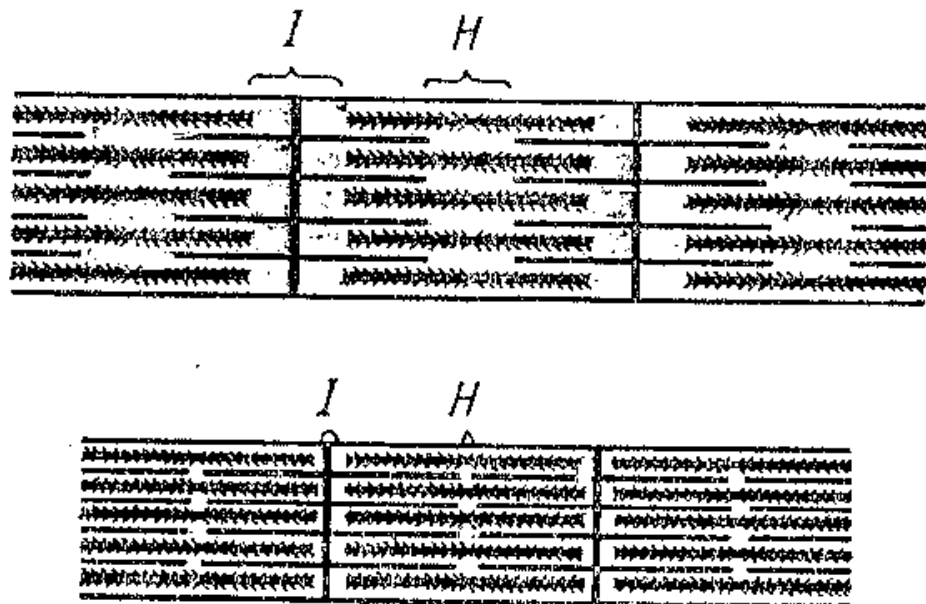


Рис. 6.4 Міофібрила у спокої (зверху) і при скороченні (знизу)

Механічні сили, які викликають «ковзання» міофіламентів, виникають при взаємодії поперечних містків міозинових філаментів з активними центрами актинових волокон (рис. 5.3). У стані спокою ці сили відсутні, але з'являються при потраплянні до саркоплазми іонів кальцію під час збудження м'язового волокна. Крім того, для процесу скорочення необхідна енергія, яка вивільняється при гідролізі АТФ.

Збудження м'язового волокна відбувається під впливом потенціалів дії, які надходять від рухових нейронів спинного мозку (мотонейронів) або при прямому електричному подразненні м'яза. У відповідь на поодинокий



потенціал дії або подразнення виникає поодиноким скороченням м'яза.

У цілому низка подій під час поодиноким скороченням м'язовим волокном є такою:

1. Через аксон мотонейрону потенціал дії надходить до м'язовим волокном і передається на нього через спеціальний контакт – нервово-м'язовий синапс.

2. В плазматичній мембрані м'язовим волокном виникає потенціал дії (збудження). Він поширюється уздовж мембрани м'язовим волокном, деполяризуючи її, за тим самим механізмом, що й потенціал дії в нервовому волокні.

3. Деполяризація мембрани поширюється вглиб м'язовим волокном по каналам Т-системи і викликає підвищення проникності мембрани СПР для іонів кальцію. Це викликає їх вивільнення в саркоплазму через специфічні кальцієві канали.

4. Іони кальцію ініціюють взаємодію між актиновими і міозиновими філаментами, змушуючи їх переміщатися один відносно одного, що і викликає процес скорочення м'яза.

5. Через короткий час іони кальцію відкачуються з саркоплазми назад в СПР шляхом активного транспорту (роботи кальцієвого насоса). Видалення іонів кальцію з саркоплазми призводить до припинення скорочення і до розслаблення м'яза.

В присутність іонів кальцію, які сприяють відкриванню активних центрів актиновим філаментом, голівка кожного поперечного містка «підключається» до найближчого активного центру під прямим кутом, і тут же нахилиється приблизно до кута  $45^{\circ}$  (рис. 6.5). При цьому голівка діє як важіль, приводячи в напружений стан шийку поперечного містка. В результаті розвивається пружний натяг, що зміщує актиновий філамент приблизно на 10 нм. Після цього голівка від'єднується від активного центру актиновим філаментом, і, повертаючись в свою нормальну позицію, формує зв'язок з новим активним центром. На кожний крок поперечного містка витрачається енергія гідролізу 1 молекули АТФ.

Такий процес настає знову і знову до тих пір, поки актинові філаменти не втягнуться повністю між міозиновими філаментами, підтягуючи до їх кінців Z-мембрани. Скорочення кожного саркомера здійснюється роботою великого числа поперечних містків. Чим більша їх кількість формує контакти з актиновими філаментами, тим сильніше скорочення.

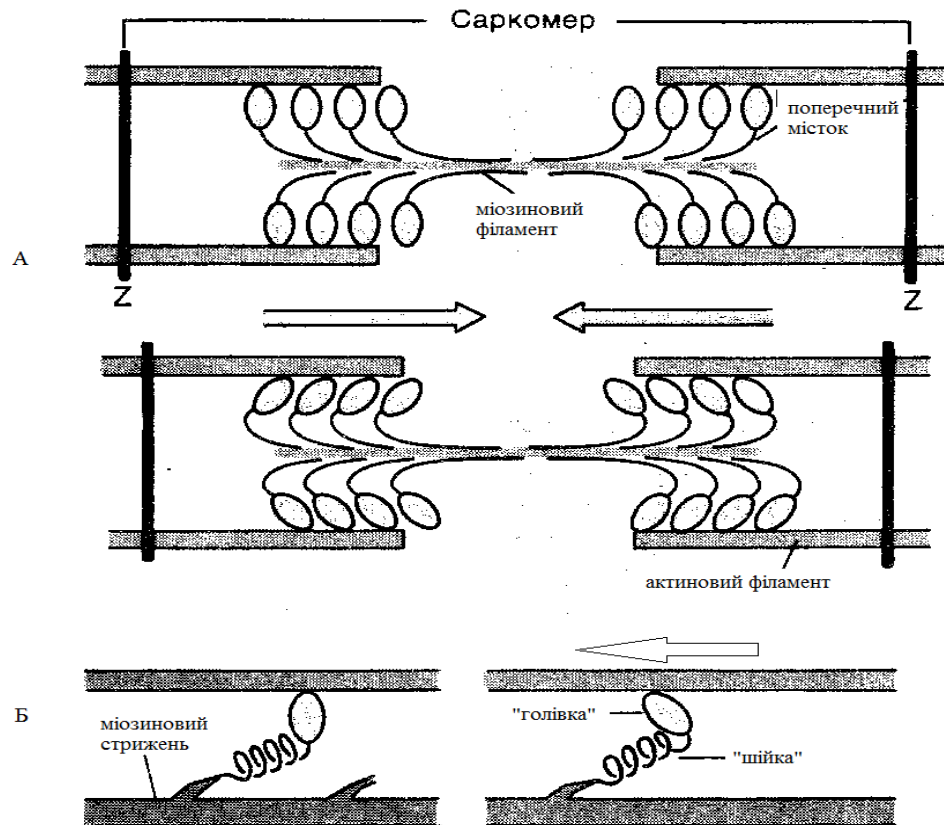


Рис. 6.5. Зміни куту прикріплення поперечних містків при скороченні саркомера м'язового волокна

### **Енергетика м'язового скорочення**

При скороченні м'яза виконується робота, і на це потрібна енергія. Її джерелом служить АТФ. Голівки поперечних містків міозину в присутності молекул актину функціонують як фермент *аденозинтрифосфатаза* (АТФаза). Це дозволяє голівці каталізувати гідроліз АТФ. Цей процес проходить через низку стадій, під час яких утворюються проміжні конформації міозину, збагачені енергією. Вона використовується для конформаційного переходу голівки міозину.

Вивільнення продуктів гідролізу АТФ, якими є неорганічний фосфат і АДФ, з активного центру голівки поперечного містка відбувається, коли він прикріплюється до актинової молекули під кутом  $45^\circ$ . В результаті голівка від'єднується, змінює конформацію і приєднується під кутом  $90^\circ$  до наступного активного центру актинового філаменту. На кожний такий «крок» поперечного містка необхідна одна молекула АТФ.

Ефективність будь-якого енергетичного двигуна обчислюється як відношення енергії, яка перетворюється в роботу, до загальної кількості витраченої енергії. У роботу м'яза перетворюється не більш, ніж 25%

хімічної енергії, що міститься в продуктах харчування. Велика її частина розсіюється у вигляді теплоти. Причина такої невеликої ефективності полягає в тому, що близько половини енергії поживних речовин втрачається в процесі синтезу АТФ. В ході використання АТФ тільки 40-45% її енергії може бути в подальшому перетворено в м'язову роботу.

Значна частина енергії АТФ витрачається в м'язі не тільки на виконання механічної роботи, але і на роботу іонних насосів: натрій-калієвого і кальцієвого. Перший з них забезпечує підтримання високої концентрації іонів калію в саркоплазмі, другий - високої концентрації іонів кальцію усередині СПР. Його активність необхідна і для того, щоб видаляти надлишок іонів кальцію з саркоплазми при розслабленні м'яза.

Запас АТФ в м'язі невеликий і дуже швидко витрачається при м'язових скороченнях. Однак в м'язі міститься також інша макроергічна речовина - *креатинфосфат (КФ)*. Його молекули служать джерелом енергії для швидкого синтезу молекул АТФ. Поповнення запасів АТФ і КФ відбувається в результаті окислення поживних речовин.

#### ***Зв'язок швидкості скорочення м'яза з доданим навантаженням***

За відсутності навантаження скелетний м'яз скорочується швидко. При його навантаженні швидкість м'язового скорочення зменшується. Коли величина навантаження зростає до значення максимальної сили, яку здатний розвинути м'яз, то скорочення припиняється. Його швидкість стає рівною нулю, незважаючи на активацію м'язових волокон. Залежність між швидкістю скорочення м'яза і навантаженням визначається *рівнянням Хілла*.

Англійський фізіолог А.В. Хілл досліджував термодинаміку м'язового скорочення (Нобелівська премія з фізіології за 1922 р). Вченому вдалося виміряти з великою точністю теплоту, яка виділяється м'язом при його скороченні. В результаті було встановлена закономірність, яка виражається *основним рівнянням м'язового скорочення*.

$$(P + a) \cdot (v + b) = const$$

У цьому рівнянні  $P$  - навантаження м'яза,  $v$  - швидкість скорочення,  $a$  і  $b$  - коефіцієнти пропорційності.

Рівняння Хілла вказує на зворотну залежність між прикладеним навантаженням і швидкістю скорочення м'яза.

Максимальна ефективність м'язового скорочення може бути

реалізована в умовах помірної його швидкості. Коли м'яз перебуває у стані напруги за відсутністю його вкорочення, велика кількість енергії розсіюється у формі теплоти. Робота в такому випадку мала або взагалі не виконується. Це зменшує ефективність м'язового скорочення.

При надто швидкому скороченні м'яза велика кількість енергії використовуються на подолання в'язкого тертя всередині нього. Це також зменшує ефективність скорочення. Зазвичай вона є максимальною, коли швидкість скорочення становить близько 30% максимальної.

### ***Взаємодія м'язів з кістковою системою***

М'язи передають зусилля кісткам скелета. Це служить основою виконання найрізноманітніших рухів, які може здійснювати людина. При цьому діапазон зусиль і швидкостей, які може розвивати той чи інший м'яз, міг би виявитися недостатнім. У природних умовах він розширюється за допомогою перетворювачів сил і швидкостей - *важелів*.

*Важіль* - це тверде тіло, яке не деформується і має точку опори (обертання). В організмі функцію важелів виконують кістки скелета. На одне плече важеля діє сила, що розвивається м'язом, а на інше - навантаження, проти якого працює м'яз (найчастіше сила тяжіння окремих компонентів тіла – голови, плеча, тулуба і т.д.).

Розрізняють важелі першого і другого роду (рис. 6.6). У *важеля першого роду* точка опори розташована між лініями діючих сил. Прикладом важеля першого роду в тілі людини служить шийно-потиличне зчленування і сукупність м'язів, прикріплених до основи черепа спереду і ззаду від нього. Це зчленування можна розглядати як точку опори, вагу голови - як навантаження. Урівноважує її сила м'язів, які забезпечують збереження положення і рухи черепа і розташовуються ззаду від точки опори.

У *важеля другого роду* лінії діючих сил знаходяться по один бік від точки опори. Ці важелі дуже широко представлені в опорно-руховому апараті людини. Практично всі елементи кінцівок (кисть, передпліччя, плече, стопа, гомілка, стегно) є важелями другого роду.

Прикладом такого важеля може служити система м'язів, за допомогою яких людина стає на носки. У цій системі точкою опори служать плеснові кістки стопи, навантаженням - вага тіла, прикладена до гомілковостопного суглоба, а протидіє їй сила спрямована вгору, яку створює литковий м'яз у місці прикріплення Ахіллового сухожилля до п'яткової кістки.

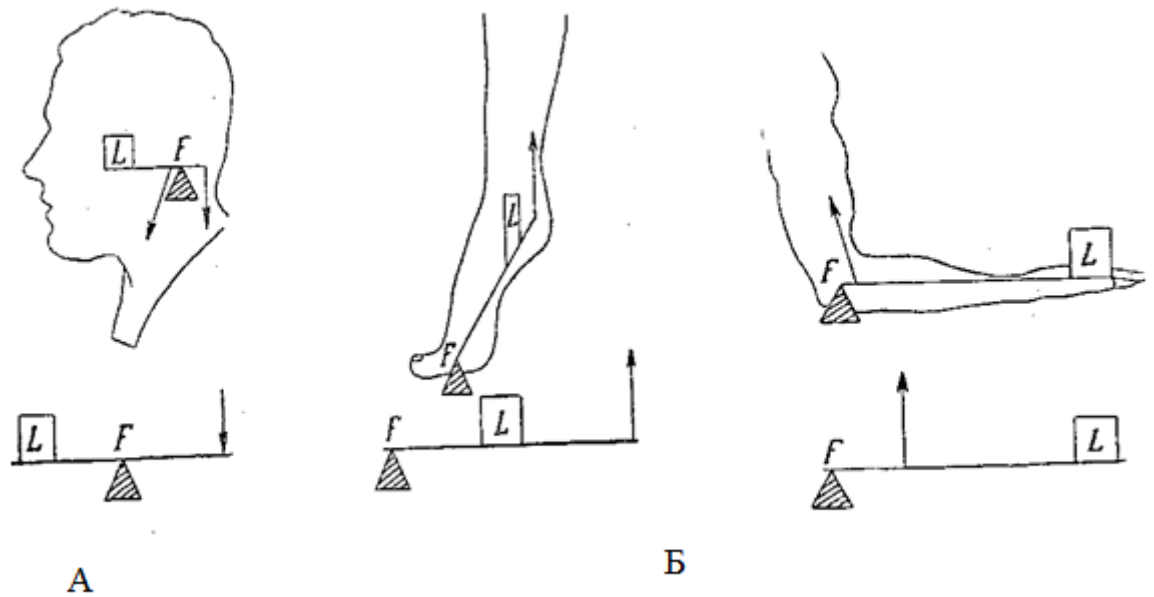


Рис. 6.6 Схематичне зображення типових важелів: першого роду (А); другого роду (Б). Точка опори позначена трикутником, навантаження –  $L$ , лінія дії сили, що розвивається м'язом – стрілкою

Ще одним прикладом важеля другого роду в тілі служить ліктювий суглоб. Його можна розглядати як точку опори. При згинанні в суглобі сила створюється в результаті скорочення двоголового м'яза плеча. Вона прикладена недалеко від точки опори, а навантаження створюється вагою передпліччя і будь-якого предмета, який людина тримає в руці.

Два важеля можуть утворювати *кінематичну пару*, яка збільшує обсяг їх руху. Більш складними системами з декількох важелів є *кінематичні ланцюги* (наприклад, верхня кінцівка, ланками якої є плече, передпліччя, кисть, фаланги пальців). Обсяг рухів у кінематичних ланцюгах значно вище, ніж в кінематичній парі.

Будова організму людини характеризується деякими особливостями, що забезпечують певні переваги його опорно-рухового апарату. Прикладом може служити система прикріплення сухожилів згиначів до фаланг пальців. При скороченні цих м'язів сили, що розвиваються ними, прикладаються через сухожилля до фаланг пальців. Система зв'язок утримує сухожилля в положенні, приблизно паралельному осі пальців. При такому устрої скорочення м'язів призводять до згинання пальців, що дозволяє захоплювати предмети.

У ряді випадків м'язи перекидаються не через один, а через два

суглоби. Це також створює певні переваги. Наприклад, під час бігу нога одночасно згинається в тазостегновому суглобі і розгинається в колінному. Роботу при цьому виконує лише один м'яз, що дозволяє отримати економію енергії, яка витрачається.

### **Контрольні питання:**

1. Охарактеризуйте структурну організацію скелетного м'яза.
2. Вкажіть особливості м'язового волокна.
3. Опишіть будову саркомера
4. Опишіть будову актинової протофібрили.
5. Охарактеризуйте будову міозинової протофібрили.
6. Вкажіть послідовність подій при виникненні м'язового скорочення.
7. Опишіть процес скорочення саркомеру.
8. Вкажіть відомі Вам режими м'язового скорочення.
9. Охарактеризуйте рівняння Хілла.
10. Опишіть взаємодію м'язів з кістковою системою.

### **Оберіть правильну відповідь:**

1. Із 6 поліпептидних ланцюгів складається:  
А. міозинове волокно  
Б. актинове волокно  
В. молекула міозина  
Г. молекула актина  
Д. тропоміозин
2. І-диск саркомера у спокої містить:  
А. тільки міозинові волокна  
Б. тільки актинові волокна  
В. актинові і міозинові волокна  
Г. сітку опорних білків  
Д. тільки молекули тропоніна
3. Центри зв'язування іонів кальцію знаходяться в молекулі:  
А. G-актина                      Б. F-актина  
В. тропоміозина              Г. тропоніна                      Д. міозина
4. Центри зв'язування АТФ знаходяться в молекулі:

- A. G-актина                      Б. F-актина  
В. тропоміозина              Г. тропоніна                      Д. міозина

5. Іони кальцію при м'язовому скороченні вивільняються із саркоплазматичного ретикулума шляхом:

- A. первинно-активного транспорту  
Б. вторинно-активного транспорту  
В. дифузії через канали  
Г. вільної дифузії  
Д. дифузії через переносники

6. Поперечний місток – частина молекули:

- A. G-актина                      Б. F-актина                      В. тропоміозина  
Г. тропоніна                      Д. міозина

7. Активні центри актинового міофіламента у спокої прикриті:

- A. тропоніном                      Б. міозином  
В. тропоміозином                      Г. G-актином

8. Рівняння Хілла вказує, що швидкість м'язового скорочення:

- A. не зв'язана з навантаженням м'яза  
Б. тим більша, чим менше навантаження м'яза  
В. тим більша, чим більше навантаження м'яза  
Г. залежить тільки від теплоти активації м'яза  
Д. залежить тільки від теплопродукції м'яза

9. М'яз подразнювали прямокутними електричними імпульсами. Кожне наступне подразнення наносили в середині фази розслаблення м'яза. Вкажіть режим м'язового скорочення в даних умовах:

- A. поодинокі                      Б. зубчатий тетанус  
В. гладкий тетанус                      Г. ізометричне                      Д. ізотонічне

10. Вкажіть режим м'язового скорочення, коли змінюється довжина м'яза, проте напруження м'яза залишається сталим:

- A. ауксотонічне  
Б. тетанічне  
В. поодинокі  
Г. ізотонічне  
Д. ізометричне

## 7. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЇ

Багато органів повністю або частково складаються зі збудливих клітин, виникнення біопотенціалів в яких є причиною створення електричних полів в організмі. Їх можна зареєструвати з поверхні тіла людини. На цьому заснована ціла низка методів дослідження, які мають важливе діагностичне значення в клінічній практиці. Одним з них служить *електрокардіографія* - метод реєстрації електричного поля серця. Існують також інші методи, засновані на реєстрації біопотенціалів різних органів: електроміографія, електроенцефалографія, електронейрографія, електрогастрографія і ін.

### *Походження електрoкардіограми*

Збудження кожної клітини серцевого м'яза проявляється у виникненні потенціалу дії. Як і в скелетних м'язах, він починається з деполяризації плазматичної мембрани і закінчується її реполяризацією. Відмінною особливістю потенціалу дії м'язової клітини серця (кардіоміоциту) є його велика тривалість (рис. 7.1).

Електричне поле серця виникає як результат накладення електричних полів окремих його клітин. Шлях поширення збудження в серці складний, і різні його відділи збуджуються неодноразомно. Тому біопотенціали, які відводять від серця в цілому, значно відрізняються від тих, які виникають в окремих його клітинах.

Біопотенціали серця у цілому відносно великі за амплітудою. Тому їх можна зареєструвати з поверхні тіла людини. Графічний запис біопотенціалів серця називається *електрокардіограмою (ЕКГ)*.

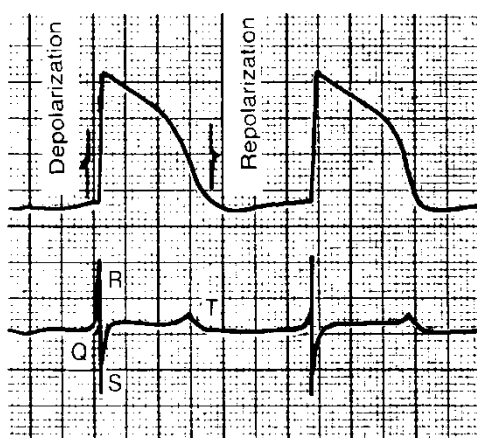


Рис. 7.1 Потенціали дії клітини шлуночка серця (верхня крива) і електрокардіограма (нижня крива)



Електрокардіограма була вперше зареєстрована у людини і проаналізована голландським фізіологом В. Ейнтховеном (Нобелівська премія з фізіології за 1924 р). Ейнтховен користувався порівняно простим вимірювальним приладом - струнним гальванометром.

Сучасний прилад для реєстрації ЕКГ - *елект рокардіограф* - на вході має перемикач відведень, який дозволяє відводити ЕКГ як різницю потенціалів між різними точками тіла (рис.7.2). Для цього на поверхню тіла накладають електроди. В електрокардіографі є підсилювач біопотенціалів, який збільшує їх за амплітудою. Прилад має калібратор, що генерує електричні потенціали стандартної величини, які використовують для визначення амплітуди і тривалості компонентів ЕКГ. Запис ЕКГ може проводити безпосередньо за допомогою реєстратора на паперовій стрічці. У більш складних електрокардіографах використовують процесори для введення сигналів ЕКГ в пам'ять комп'ютера, їх обробки і зберігання.



Рис. 7.2 Електрокардіограф

### *Опис елект рокардіограми*

На рис. 7.3 показана нормальна ЕКГ. Видно горизонтальну ізоелектричну лінію (ізолінію), яка записується за відсутності в даний період різниці потенціалів. Відхилення від ізолінії називаються *зубцями ЕКГ*. Вони позначаються латинськими літерами *P, Q, R, S, T*. Зубці ділять на позитивні (спрямовані вгору) і негативні (спрямовані вниз). Позитивне відхилення комплексу зубців *QRS* називають зубцем *R*. Негативні відхилення, що передують зубцю *R* і наступне за ним, названі відповідно зубцями *Q* і *S*. Зубці *P* і *T* в нормі позитивні, але можуть бути негативними при патологічних станах. Відстані між двома розташованими поруч відхиленнями на ЕКГ називаються *сегмент ами*. Сегмент *PQ* є відстанню між кінцем зубця *P* і початком зубця *Q*,

сегмент  $ST$  - між зубцями  $S$  і  $T$ . Відстань між початками двох зубців називаються *інт ервалами*.

Зубці ЕКГ виникають під час систоли серця. У період діастолі різниця потенціалів відсутня. Зубець  $P$  відображає процес збудження передсердь. Зубці  $Q$ ,  $R$ ,  $S$ ,  $T$  відповідають періоду збудження шлуночків. Процеси, що лежать в основі виникнення зубців і інтервалів електрокардіограми, розглядаються детально в курсі фізіології.

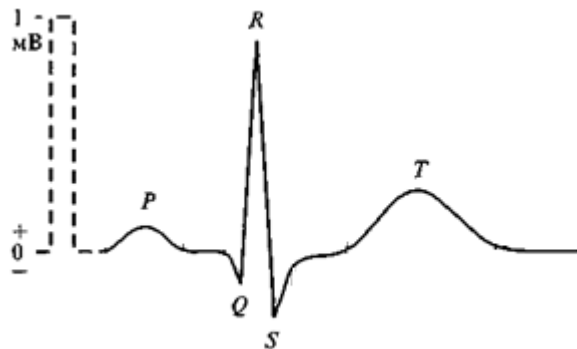


Рис. 7.3 Нормальна електрокардіограма

### ***Відведення елект рокардіограми***

Електроди, накладені на тіло людини для реєстрації ЕКГ, відводять різницю електричних потенціалів між певними точками тіла. Існують загальноприйняті стандарти положення електродів, як позначаються як *відведення ЕКГ*.

За Ейнтховеном застосовують *три стандартних відведення*, які представлені на рис. 7.4:

- I - між правою і лівою руками;
- II - між правою рукою і лівою ногою;
- III - між лівою рукою і лівою ногою.

У клінічній практиці при реєстрації ЕКГ використовують і інші відведення, які дозволяють більш детально досліджувати функції серця.

Точки накладення електродів при стандартних відведеннях можна мислено поєднати між собою, в результаті чого утворюється *трикутник Ейнт ховена*. Вчений запропонував розглядати кінцівки людини під час запису ЕКГ в стандартних відведеннях провідниками електричного струму і вважати, що різниця потенціалів записується між точками біля основи кінцівок. В цьому випадку трикутник Ейнтховена є рівностороннім, а серце знаходиться в центрі трикутника.

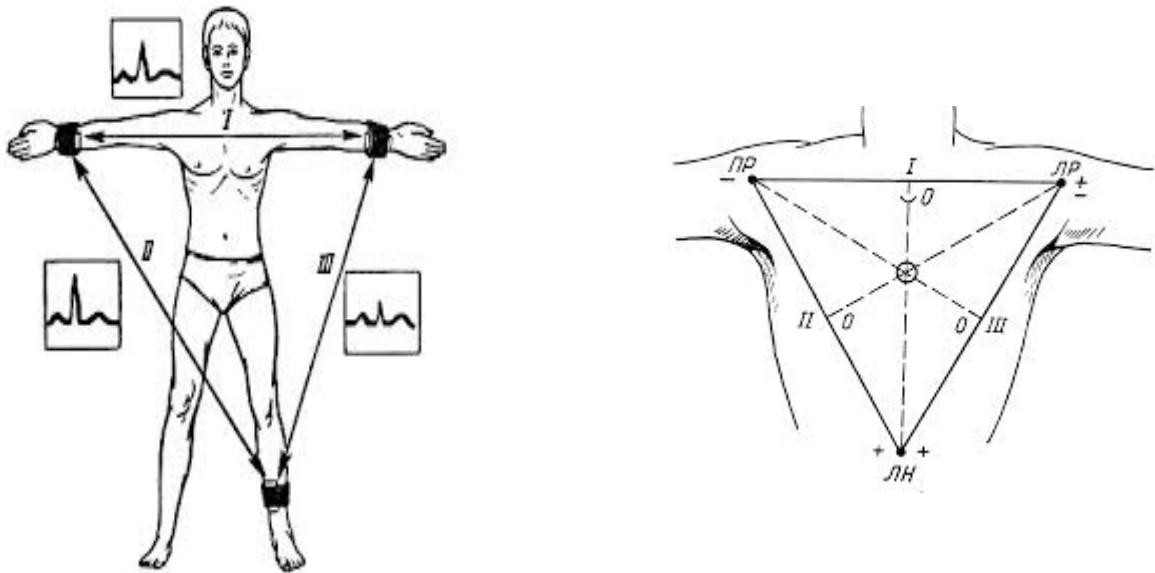


Рис. 7.4 Стандарні відведення електрокардіограми і трикутник Ейнтховена

### *Електричний диполь, дипольний момент .*

Теоретичні уявлення про основи електрокардіографії та інших електрографічних методів дослідження пов'язані з поняттям електричного диполя. Електричне поле, утворене системами з кількох позитивних і негативних зарядів, має певні особливості в порівнянні з електричним полем одиночного заряду. Існують такі системи: диполь, квадруполь, октаполь. Найпростіша з них - *електричний диполь* - представляє собою два рівних за величиною і протилежні за знаком електричних заряди, розташовані на невеликій відстані один від одного. Вона називається плечем диполя.

Характеристикою диполя є *дипольний момент*. Його числове значення визначається за формулою:  $\vec{P} = \vec{l}q$ , де  $\vec{l}$  - плече диполя,  $q$  - електричний заряд. Дипольний момент є векторною величиною, спрямованою від негативного заряду до позитивного.

Електричне поле диполя має силові лінії, які починаються на його позитивному заряді і закінчуються на негативному заряді (рис. 7.4, А)

Розглянемо точку А в електричному полі диполя на відстані  $r$  від нього (рис. 7.4, Б). Величину електричного потенціалу в цій точці можна визначити за рівнянням :

$$\varphi = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\vec{P} \cdot \cos \alpha}{r^2}$$

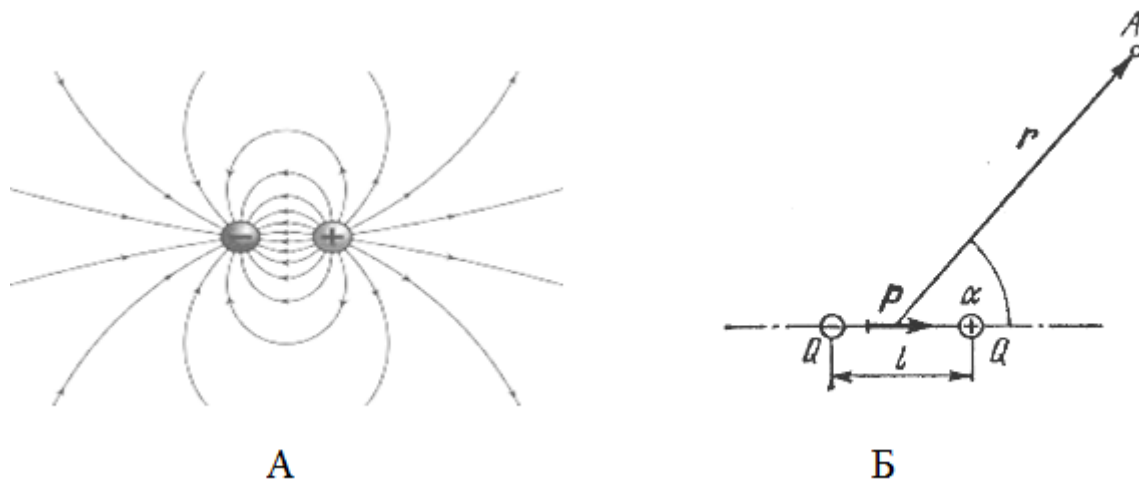


Рис. 7.5 Силові лінії (А) і потенціал (Б) електричного поля диполя

В цьому рівнянні  $\varphi$ - потенціал в точці А,  $\epsilon_0$  - діелектрична стала,  $\epsilon$  - діелектрична проникність середовища, в якій створюється поле,  $\vec{P}$ - дипольний момент;  $\alpha$  - кут між радіус-вектором точки А і вектором диполя.

Припустимо, існують дві точки, розташовані в електричному полі диполя на однаковій відстані від нього і певній відстані один від одного. Відповідно до наведеного вище рівняння, величина різниці потенціалів між ними  $\varphi_1 - \varphi_2$  прямо пропорційна добутку  $\vec{P} \cdot \cos \alpha$ .

Тому різниця потенціалів між точками буде максимальною, якщо вони розташовані на лінії, яка збігається за напрямком з вектором дипольного моменту. У випадку розташування точок на лінії, перпендикулярній вектору дипольного моменту, різниця потенціалів між ними відсутня. Ці міркування важливі для дослідження електричного поля серця, аналіз якого заснований на дипольній теорії.

### *Дипольна теорія елект рокардіограми*

Електричне поле серця, яке реєструється за допомогою електрокардіографії, є результатом накладення електричних полів багатьох м'язових клітин, що утворюють його стінки. Зубці електрокардіограми виникають при деполаризації і реполаризації клітин серцевого м'яза.

У стані спокою вся зовнішня поверхня клітини електропозитивна відносно внутрішнього середовища і між окремими точками поверхні різниці потенціалів не існує. Вона з'являється при виникненні в мембрані

потенціалів дії. Збудження не охоплює всю клітину одночасно. Воно поширюється по мембрані з деякою швидкістю. Тому в певні моменти частина клітини вже прийшла в стан збудження і в ній виникла деполяризація мембрани, інша частина клітини зберігає мембранний потенціал спокою.

На рис. 7.6 показана діаграма осьового перерізу клітини в той момент, коли хвиля деполяризації знаходиться біля її центру. Права частина клітини охоплена збудженням. Тут мембрана деполяризована, і мембранний потенціал поміняв свій знак. До лівої частини клітини хвиля збудження ще не дійшла. Вимірювання, проведене зовні клітини на деякій відстані від неї, може виявити різницю потенціалів між її неактивною і активною частинами. Силві лінії електричного поля клітини в навколишньому середовищі спрямовані так, як це спостерігається в електричному полі диполя, тобто від позитивного електричного заряду до негативного.

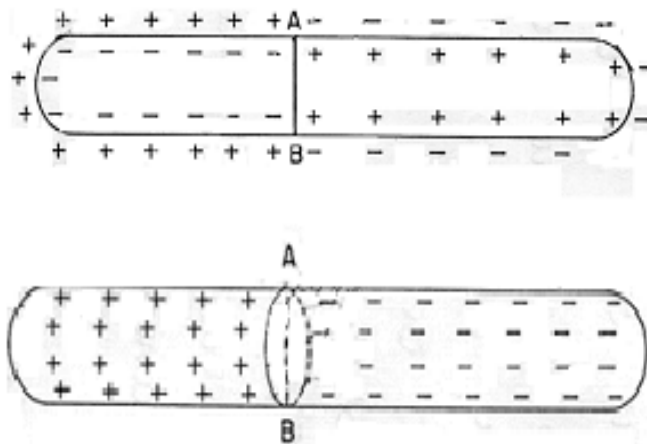


Рис. 7.6 Зміни електричного потенціалу мембрани кардіоміоциту в процесі збудженням

Таким чином, кожна клітина в момент охоплення її збудженням представляє собою мініатюрний диполь. Дипольні моменти окремих клітин накладаються один на одного і формують сумарний дипольний момент серця. Тому його можна розглядати як *дипольний електричний генератор*. Серце оточене тканинами, які є провідниками. Між збудженими і не збудженими частинами серця тече електричний струм. Тому серце є *струмовим диполем*.

Напрямок дипольного моменту серця називають його *електричною*

віссю (рис. 7.7). Силкові лінії його електричного поля замкнені. Воно має екіпотенціальні лінії, тобто лінії, потенціал точок яких однаковий. Очевидно, що максимальна різниця потенціалів буде зареєстрована електродами, які розташовані уздовж електричної осі. Перпендикулярно їй знаходиться лінія, де різниця потенціалів між точками дорівнює нулю.

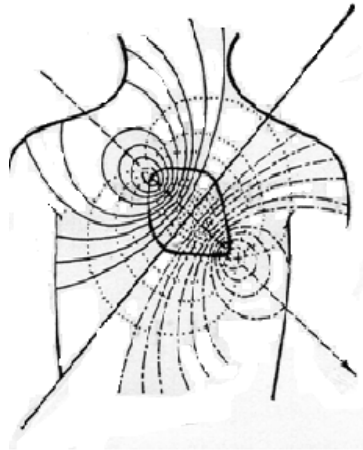


Рис. 7.7 Електрична вісь серця

Амплітуда зубців ЕКГ в кожному з трьох стандартних відведень залежить від напрямку електричної осі серця.

На рис. 7.8 (А) представлений трикутник Ейнтховена і приклад напрямку електричної осі. Його прийнято характеризувати величиною кута  $\alpha$  між електричною віссю і стороною трикутника, яка відповідає I стандартному відведенню. Амплітуда зубців ЕКГ в стандартних відведеннях пропорційна проекції електричної осі на сторони трикутника. На записах ЕКГ в стандартних відведеннях (рис. 7.8, Б) видно, що за такого напрямку електричної осі максимальну амплітуду мають зубці в II стандартному відведенні ЕКГ. Це пояснюється тим, що напрям сторони трикутника цього відведення майже збігається з напрямком електричної осі серця.

Реєстрація ЕКГ у пацієнтів дозволяє визначати у них напрямок електричної осі серця. Цей напрямок в дійсності безперервно змінюється протягом серцевого циклу. Прийнято визначати його для того моменту, коли виникає комплекс зубців *QRS*. Для цього необхідно виміряти амплітуду зубців *Q*, *R* і *S* в I і III стандартних відведеннях і обчислити алгебраїчну суму амплітуди цих зубців, враховуючи, що зубець *R* є позитивним, а зубці *Q*, і *S* - негативними.

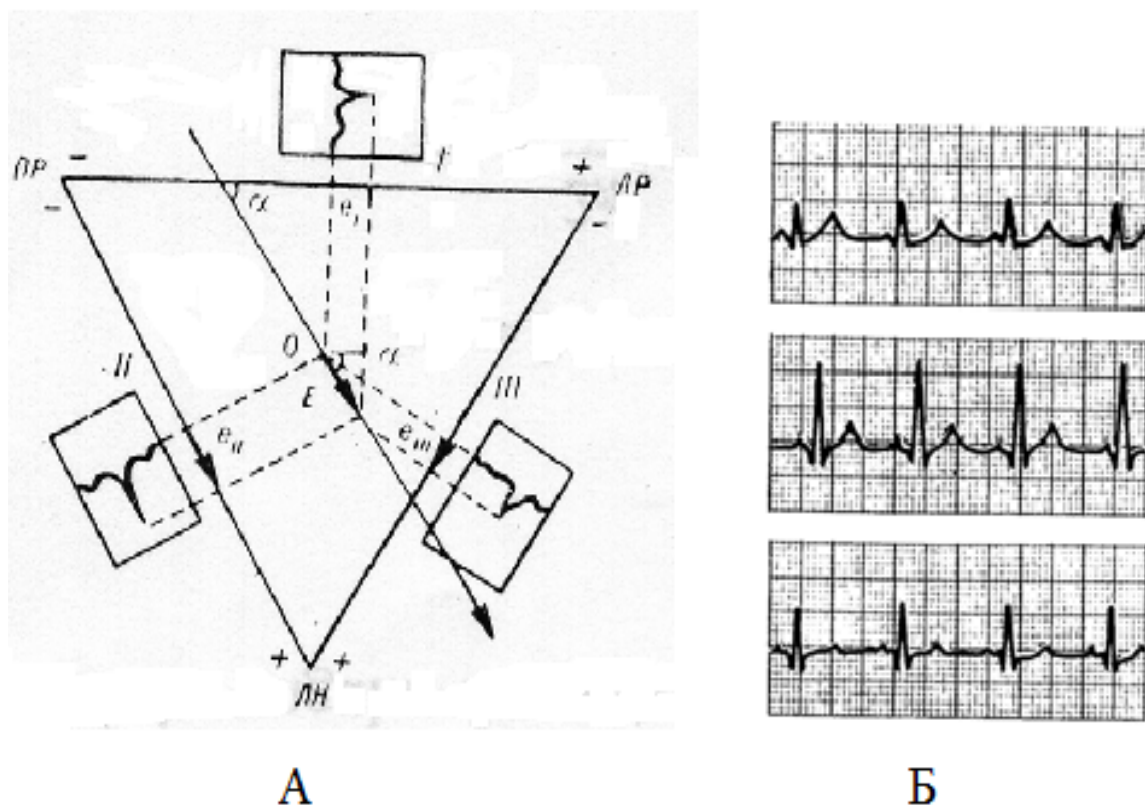


Рис. 7.8 Трикутник Ейнтховена (А) і ЕКГ в стандартних відведеннях (Б)

Результати обчислень відкладають у вигляді відрізків на сторонах трикутника Ейнтховена, які відповідають I і III відведенням, в однаковому масштабі з урахуванням знаку суми і полярності відведення. Так отримують точки, через проводять перпендикуляри. Їх точка перетину - кінець вектору дипольного моменту серця, початок вектору – в центрі трикутника. В реальних умовах подібна обробка ЕКГ є автоматизованою.

Показник напрямку електричної осі в нормі складає від  $0^{\circ}$  до  $+90^{\circ}$  (*нормограма*). В умовах патології електрична вісь серця може відхилитися проти годинникової стрілки, кут  $\alpha$  становить менш, ніж  $0^{\circ}$  (*лівограма*) або за годинниковою стрілкою, коли кут  $\alpha$  стає більшим, ніж  $90^{\circ}$  (*правограма*). Напрямок електричної осі серця має діагностичне значення в кардіології.

#### Контрольні питання:

1. Що таке електричний диполь? Яка його основна характеристика?
2. В чому полягає теорія електрокардіограми Ейнтховена?
3. Опишіть форму нормальної електрокардіограми.
4. Що таке електрична вісь серця? Як визначити її напрямок?

5. Як за даними ЕКГ визначити частоту серцевих скорочень?

**Оберіть правильну відповідь:**

1. Визначте перше відведення електрокардіограми:

- А. права рука-ліва нога
- Б. ліва рука - ліва нога
- В. права рука - права нога
- Г. права рука - ліва рука
- Д. ліва нога - правая нога

2. Проаналізуйте, який з зубців нормальної електрокардіограми має найбільшу амплітуду:

- А. зубець Q
- Б. зубець R
- В. зубець P
- Г. зубець S
- Д. зубець T

3. В теорії Ейнтховена серце представлено моделлю:

- А. поодинокого заряду
- Б. струмового диполю
- В. коливального контуру
- Г. рівностороннього трикутника
- Д. векторної діаграми

4. Електрокардіограма представляє собою запис:

- А. роботи серця
- Б. скорочень серця
- В. біопотенціалів серця
- Г. серцевих шумів
- Д. потенціалів дії клітин серця

5. Цей зубець електрокардіограми спрямований вниз:

- А. зубець R      Б. зубець S      В. зубець T
- Г. зубець P      Д. зубець U

6. Правограма спостерігається, якщо кут електричної вісі серця відносно 1 відведення складає.



- А. 110 градусів                      Б. 30 градусів                      В. 60 градусів  
Г. - 20 градусів                      Д. -50 градусів

7. Визначте правильну послідовність зубців ЕКГ:

- А. P R Q S T  
Б. R Q P T S  
В. P Q R S T  
Г. Q P T R S  
Д. P Q T R S

8. Електрична вісь серця надає інформацію про:

- А. ритм серцевих скорочень  
Б. силу серцевих скорочень  
В. наповнення кров'ю серця  
Г. напрямок анатомічної вісі серця  
Д. про хвилиний об'єм кровообігу

9. Визначте одиницю вимірювання амплітуди електрокардіограми:

- А. міліампер                      Б. мілівольт                      В. мілісекунда  
Г. міліграм                      Д. міліфарад

10. Сума зубців комплексу QRS в першому стандартному відведенні склала +4, а в третьому відведенні вона дорівнювала -4. Зробіть висновок про ЕКГ:

- А. нормограма  
Б. лівограма  
В. правограма  
Г. вертикальна вісь  
Д. горизонтальна вісь

## 8. РЕЦЕПТОРИ. БІОФІЗИКА РЕЦЕПТОРІВ СМАКУ, НЮХУ ДОТИКУ

Центральна нервова система безперервно отримує сенсорну інформацію із зовнішнього та внутрішнього середовища організму (лат. «sensus» - відчуття). Будь-який вплив, який викликає відчуття або інші зміни в організмі, вважають *подразником (стимулом)*. Спеціальні клітини, що сприймають стимули, називаються *рецепторами*. Ті з них, які отримують стимули з навколишнього середовища, називаються *екстерорецепторами*, а ті, які сприймають подразнення внутрішніх органів - *інтерорецепторами*.

Кожен вид рецепторів виявляє дуже високу специфічну чутливість до певних форм енергії. Вони служать для рецепторів *адекватними стимулами*. Чутливість певних рецепторів до інших форм енергії в багато разів менша. Для того, щоб організм міг виявити і розрізнити ті або інші стимули, рецептори перетворюють їх в нервові імпульси (потенціали дії). Їх частота і послідовність залежить від характеристик подразників.

### *Класифікація рецепторів*

Рецептори класифікують за тими видами адекватних для них стимулів. Розрізняють наступні основні види рецепторів.

1) *Механорецептори* відповідають на стискання або розтягнення тканин, що прилегають до рецепторів. До них відносять рецептори, які реагують на дотик до шкіри, збільшення тиску в кровоносних судинах; рецептори внутрішнього вуха, які реагують на звукові хвилі і т.п.

2) *Терморецептори* стимулюються змінами температури. Деякі з них реагують на теплоту, другі – на холод.

3) *Хеморецептори* реагують на певні хімічні речовини, наприклад, на вміст у крові кисню або вуглекислого газу. Рецептори смаку і нюху відносять до хеморецепторів.

4) *Фоторецептори* в сітківці ока відповідають на дію світла.

5) *Больові рецептори* (ноцицептори) реагують на фізичні і хімічні пошкодження тканин організму.

Будова рецепторів характеризується великим різноманіттям. В основному, їх можна поділити на наступні два типи.

До першого типу відносять рецептори, які представляють собою закінчення відростків аферентних (чутливих) нервових клітин, розташовані в

різних органах і тканинах. Ці клітини передають інформацію в центральну нервову систему. Закінчення їх відростків можуть вільно лежати в тканинах або бувають заключені в спеціальні тканинні структури.

Другий тип рецепторів представлений високо спеціалізованими клітинами, які не відносяться до нервових клітин. Вони активуються відповідними стимулами і через спеціальні контакти (синапси) передають сигнали відросткам аферентних нервових клітин.

### ***Біофізичний механізм перетворення сенсорного стимулу у збудження***

Відмінність рецепторів від інших клітин полягає в наявності спеціалізованих плазматичних мембран, які надзвичайно чутливі до певних стимулів. В мембранах рецепторів містяться канали, які здійснюють транспорт іонів. Проникність каналів регулюється воротами - певними ділянками молекул, які утворюють стінки каналів. Ворота можуть перебувати в закритому чи відкритому стані. Особливістю рецепторів є те, що іонні канали мембран можуть змінювати проникність під дією специфічних стимулів.

Наприклад, в хеморецепторах молекула певної хімічної речовини вступає у взаємодію зі спеціалізованою молекулою, яка пов'язана з воротами іонного каналу (рис. 8.1). В результаті її стан змінюється, і вона як би «відсувається», відкриваючи іонний канал. В результаті потік іонів через нього посилюється.

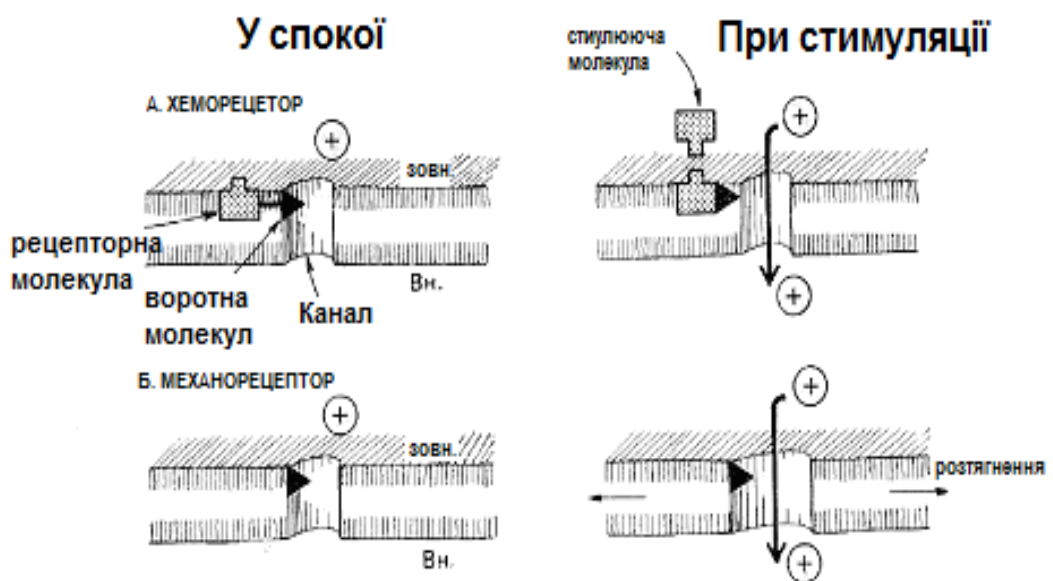


Рис. 8.1. Зміни в каналах плазматичної мембрани хеморецептора і механорецептора під впливом подразників

Припускають, що в механорецепторах розтягнення плазматичної мембрани розширює пору каналу, внаслідок чого іонний струм через нього підсилюється.

У переважній більшості рецепторів відкривання каналів мембрани викликає посилення надходження іонів натрію всередину клітин, оскільки їх концентрація у навколишньому середовищі значно перевищує їх концентрацію в клітині. В результаті величина мембранного потенціалу зміщується в позитивну сторону, тобто виникає деполяризація мембрани. Цей зсув мембранного потенціалу називається *рецепторним потенціалом*. На відміну від потенціалу дії його амплітуда залежить від інтенсивності стимулу, який діє на рецептор. Чим сильніше стимул, тим більша величина рецепторного потенціалу. Вона може досягати декількох десятків мілівольт.

Деполяризація мембрани рецептора при виникненні рецепторного потенціалу породжує потенціали дії, які поширюються далі по нервових волокнах в центральну нервову систему (рис. 8.2). Чим вище амплітуда рецепторного потенціалу, тим більша частота виникаючих потенціалів дії. Таким чином, інтенсивність стимулу, який впливає на рецептор, кодується амплітудою рецепторного потенціалу і частотою потенціалів дії.

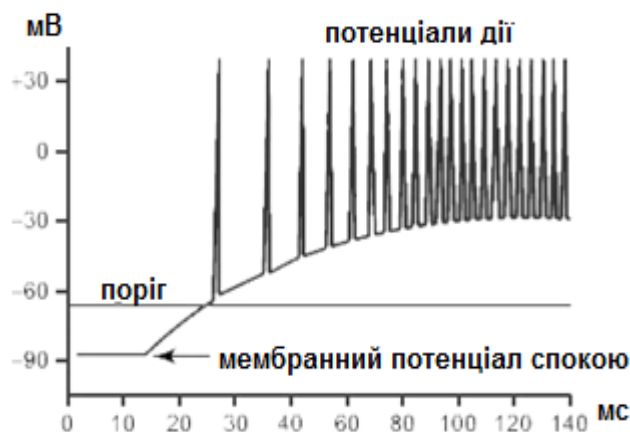


Рис. 8.2 Залежність частоти потенціалів дії нервового волокна від величини рецепторного потенціалу

При тривалому впливі стимулу в рецепторах виникає *адаптація*. Вона проявляється в зниженні активності рецептора, не зважаючи на подальшу дію стимулу. Рецептори значно відрізняються за здатністю до адаптації. Так деякі рецептори, що відповідають на дотик до шкіри, адаптуються протягом сотих часток секунди. В больових рецепторах адаптація розвивається дуже повільно, і вони ніколи не адаптуються повністю.

### *Залежність інтенсивності відчуття людини від сили подразника*

В 19 в. Е.Вебер і Г.Фехнер встановили, що інтенсивність будь-якого відчуття прямо пропорційна логарифму інтенсивності подразника, що викликає дане відчуття.

Закон Вебера-Фехнера описується рівнянням:

$$P = k \lg S/S_0,$$

де  $P$  – інтенсивність відчуття,  $S$  – інтенсивність подразника,  $S_0$  – порогова інтенсивність подразника,  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

Дія закону Вебера-Фехнера показана на прикладі рецепторів слуху, зору та ін.

Закон Вебера-Фехнера строго виконується лише для середніх значень сили подразника. Більш універсальним є закон Стівенса, згідно якому між інтенсивністю відчуття і силою подразника існує ступенева залежність:

$$P = k S^n$$

де  $P$  – інтенсивність відчуття,  $S$  – інтенсивність подразника,  $k$  – коефіцієнт пропорційності, а  $n$  – показник ступеню, який різний для різних видів відчуття.

### *Смакові рецептори*

Смакові рецептори реагують на хімічні речовини і тому їх відносять до хеморецепторів. Вони особливо чутливі до харчових речовин. У різних тварин вони розташовані в різних ділянках тіла, наприклад у восьминогів - на щупальцях. Для вищих хребетних тварин, включаючи людину, характерно розташування смакових рецепторів на язичку, частково, в задньому відділі рота і в горлі. На клітинному рівні смакові рецептори об'єднані у смакові цибулини, які зібрані в сосочки - тупі стрижені на поверхні язика. Сосочки діляться на кілька типів, які по-різному розподілені на поверхні язика.

Всередині смакової цибулини знаходяться рецептори смаку (сенсорні клітини). На їхніх верхівках розташовані мікрворсинки. Вони виходять в загальну камеру, яка через пору на поверхні сосочка сполучається з зовнішнім середовищем (рис. 8.3). Мікрворсинки чутливі до хімічної стимуляції і є ділянками сенсорного перетворення.

Інший тип клітин у смаковій цибулині - базальні клітини. Вони постійно перетворюються в нові рецепторні клітини протягом усього життя, так як рецепторні клітини живуть всього приблизно десять днів. Смакові рецепторні клітини пов'язані з аферентними нервовими волокнами черепно-мозкових нервів.

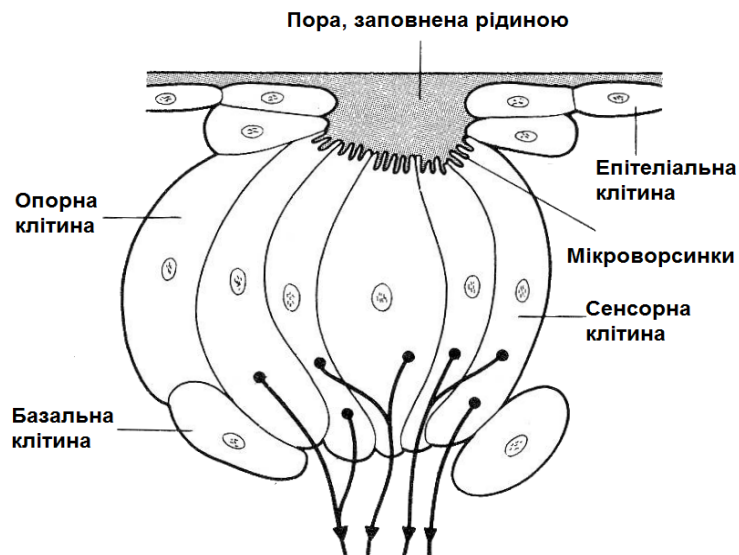


Рис. 8.3 Схеми будови смакового рецептора (цибулини)

Смакові відчуття можуть бути розділені на чотири якості: солодке, солоне, кисле і гірке. У недавні часи був виділений п'ятий «м'ясної» смак (япон. – «умами»). Солоний смак обумовлений наявністю в їжі катіонів, в основному натрію. Гіркий смак - наявністю аніонів. Він залежить від величини рН. Відчуття м'ясного смаку викликається наявністю глутамату. Все різноманіття смакових відчуттів складається завдяки комбінації перерахованих смаків. Реально смак є мультимодальних відчуттям. У його формуванні бере участь також запах їжі, її механічні властивості і температура. Існують недостатньо підтвержені дані про наявність жирового, водного, лужного та інших видів смаку.

Речовини, що викликають смакові відчуття, взаємодіють зі специфічними білковими молекулами на плазматичній мембрані рецепторних клітин. Встановлено, що кожна клітина чутлива лише до одного із зазначених п'яти смаків. Найбільше число клітин чутливо до речовин, що викликають гіркий смак. В результаті складних біохімічних процесів в клітинах виникають рецепторні потенціали, які, в свою чергу, породжують потенціали дії, що несуть інформацію в головний мозок.

Раніше було прийнято вважати, що смакові рецептори різного типу знаходяться на різних частинах поверхні язика. В даний час встановлено, що вони розподілені по всій його поверхні і відрізняються тільки густиною розподілу.

## Рецептори нюху

На поверхні слизової оболонки порожнини носа в області верхньої носової раковини знаходиться нюхова область. Вона містить велику кількість рецепторних клітин (рис. 8.4). Нюховий рецептор - це нервова клітина. Її короткий відросток (дендрит) має мікрровирости - вії. Він сприймає дію пахучих речовин. Інший довгий відросток (аксон) направляється в центральну нервову систему. Термін життя нюхових рецепторів - приблизно два тижні. Після цього вони змінюються новими клітинами.

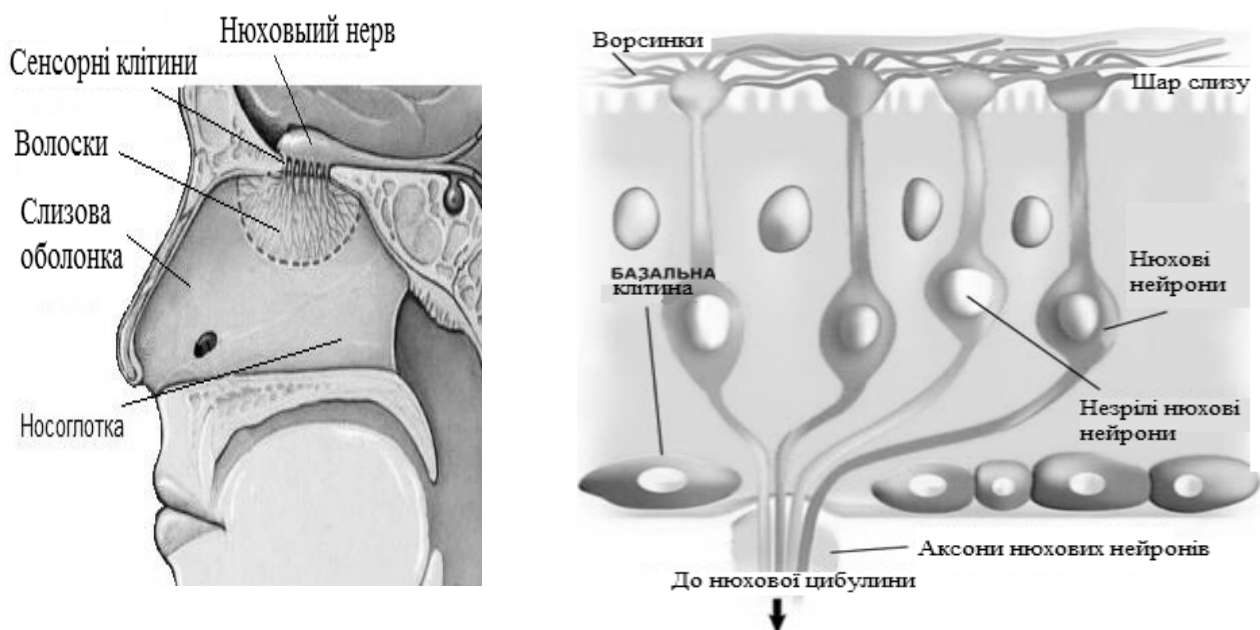


Рис. 8.4. Рецептори нюху

Пахучі речовини (одоранти) поглинаються слизом, що покриває порожнину носа, а потім дифундують до рецепторних клітин. Тут вони зв'язуються з рецепторними білковими молекулами в плазматичній мембрані. Це призводить до активації ряду речовин всередині клітини. У ній відкриваються натрієві і кальцієві іонні канали, в результаті чого в клітині виникає рецепторний потенціал. Його вдалося зареєструвати за допомогою електрофізіологічної методики в дослідях на тваринах. Рецепторні потенціали, шумуючись, викликають виникнення потенціалів дії, які проводяться по нюхової нерву в головний мозок.

За допомогою методів молекулярної біології Л.Бак і Р.Аксель встановили, що у ссавців в мембрані нюхових рецепторів існує близько 1000 видів специфічних білків (у людини близько 350). За це відкриття їм була

присуджена Нобелівська премія (2004). На мембрані однієї рецепторної клітини присутній тільки один з видів білків.

Кожен з таких білків має підвищену чутливість до дії певних одорантів. Така вибіркова чутливість залежить від структури молекули одоранту. Для окремих одорантів показано певну відповідність між зміною їх молекул і структурою рецепторних молекул в мембрані сенсорних клітин. До дії інших одорантів рецепторні молекули менш чутливі. Таким чином, очевидно, відмінності між окремими запахами кодуються у вигляді набору комбінацій різних рецепторів, які активуються різними одорантами. Грають роль і деякі інші властивості пахучих речовин. Краще відчувається запах тих з них, які розчиняються у воді і жирах.

Людина, а тим більше тварина, здатні розрізняти запахи тисяч різних речовин. Існують класифікації запахів, які виділяють їх основні типи. За однією з класифікацій виділяють шість типів запахів: квітковий (троянда), етерний (груша), мускусний (мускус), камфорний (евкаліпт), гнилісний (сірководень), пекучий (оцет). Також іноді говорять про солодкий запах. Існують стандартні джерела цих запахів, які застосовують при вивченні особливостей нюху людини.

У тварин нюх, в цілому, розвинений набагато сильніше, ніж у людини. Його особливості були добре вивчені в досліджах на комахах. Основна зв'язок між особинами одного виду здійснюється у них за допомогою нюхової рецепції. Для цього служать спеціальні речовини - феромони, чутливість до яких надзвичайно велика. Показано, що однієї молекули статевого феромону метелику шовковичного шовкопряда досить для того, щоб викликати відповідь одиночної рецепторної клітини самця.

Людина сильно поступається тваринам за чутливістю свого органу нюху. У нюховій області набагато менше рецепторних клітин. В міру ускладнення поведінки тварин все більшого значення набули слухова і зорова сенсорні системи, які дозволяють краще орієнтуватися в навколишньому світі.

### ***Тактильні рецептори***

На поверхні шкіри розташовані тактильні рецептори, або рецептори дотику і тиску. Тактильна чутливість неоднакова на різних ділянках шкіри. Найбільш чутливі губи, ніс, кінчики пальців, де на одиницю поверхні припадає більше число рецепторів. Найменш чутливі спина, живіт, стопи. Різні ділянки шкіри відрізняються також за порогом просторового



розрізнення - мінімальною відстанню між двома точками, дотик до яких сприймається роздільно. Вказаний поріг мінімальний на кінчиках пальців, на губах (1 - 2 мм) і максимальний на стегні, спині, плечі.

Існує кілька типів тактильних рецепторів (рис. 8.5), які відрізняються за фізіологічними характеристиками, в першу чергу, за здатністю до адаптації. Вони відповідають за сприйняття різних характеристик стимулу.

*Вільні нервові закінчення* поширені в шкірі і багатьох інших тканинах. Деякі з них обплітають корінці волосин. Вільні нервові закінчення реагують як на дотик, так і на тиск. Рецептори біля коріння волосся характеризуються дуже високою чутливістю, так як руху волосся при дотику до них підсилюють ефект подібно до важеля.

*Тельця Мейснера* - закінчення чутливого нерва, укладені в капсулу. Вони мають високу чутливість, але адаптуються протягом часток секунди. Тому вони найбільш чутливі до рухів по поверхні шкіри, наприклад, комах. Такі рецептори називають *диференційними*, оскільки вони реагують не стільки на силу стимулу, скільки на швидкість її змінення.

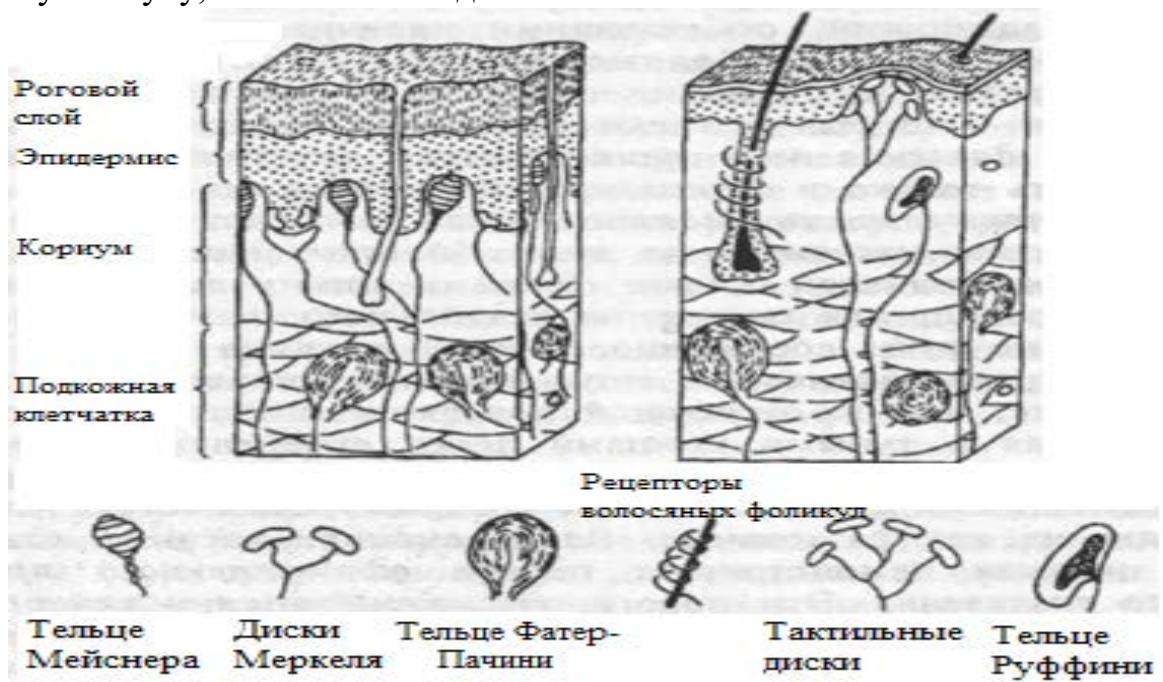


Рис. 8.5. Різні типи механорецепторів шкіри

*Тельця Фатера-Паччіні* лежать в підшкірній жировій клітковині. Вони стимулюються тільки швидким стисненням, оскільки адаптуються дуже швидко - протягом сотих часток секунди. Тільця Фатера-Паччіні пристосовані до оптимальної передачі синусоїдальних механічних подразнень, кожне коливання яких викликає поодинокий імпульс в

рецепторі. Тому такі тільця вважають відповідальними за сприйняття вібрації.

*Тельця Руффіні* представляють собою інкапсульовані нервові закінчення. Вони розташовані у відносно глибоких шарах шкіри і адаптуються повільно. Тому вони важливі для передачі інформації про тривалі дотики або тиск.

У шкірі існують також *терморецептори* (теплові рецептори), які представляють собою вільні нервові закінчення. Кожне з них забезпечує теплову чутливість на ділянці з діаметром приблизно 1 мм. Розрізняють холодні рецептори, розташовані недалеко від поверхні шкіри, і теплові - в більш глибокому її шарі. І ті, і інші повільно адаптуються.

Необхідно відзначити, що як тактильні, так і теплові рецептори знаходяться не тільки в шкірі, а й в інших тканинах організму.

## 9. ОСНОВИ БІОАКУСТИКИ. СЛУХОВІ РЕЦЕПТОРИ

### Фізична природа звуку

Звук є *поздовжньою механічною хвилею*. Вона утворюється тілами, що коливаються, наприклад, камертоном, струною музичного інструменту, голосовими зв'язками і т.д. Хвиля називається *поздовжньою*, якщо коливання частинок середовища відбуваються в напрямку поширення хвилі. Такі хвилі можуть виникати в твердих, рідких і газоподібних середовищах.

На рис. 9.1 показано створення звуку поршнем, який коливається в циліндрі з певною частотою. При переміщеннях поршня виникають зони стиснення і розрідження частинок середовища. Поширення цих зон є поздовжньою хвилею. При цьому кожна частинка середовища коливається біля свого положення рівноваги, передаючи наступним енергію звукової хвилі. Частина цієї енергії витрачається на подолання внутрішнього тертя середовищ і розсіюється. Тому з відстанню звукова хвиля згасає.

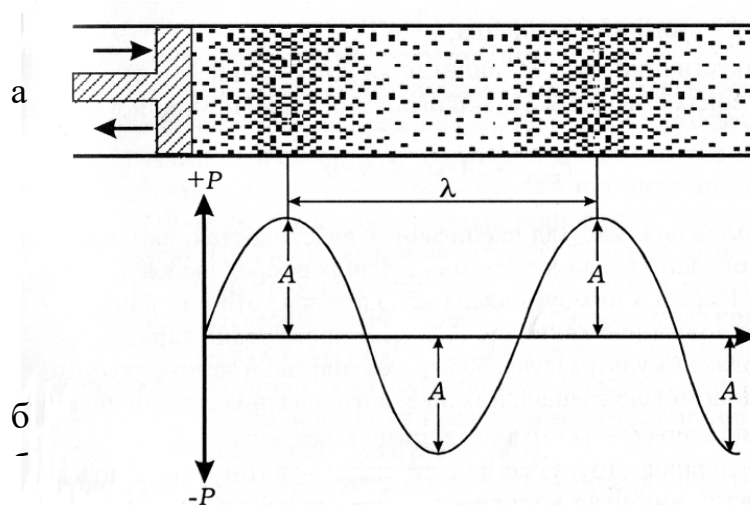


Рис. 9.1 Створення поздовжньої механічної хвилі поршнем, що коливається: а). формування зон стиснення і розрідження частинок середовища (відповідно зон підвищеного і зниженого тиску); б). зміна тиску ( $P$ ) в середовищі по мірі віддалення від поршня

Механічні хвилі мають такі самі характеристики, як і коливальний рухи, і додатково – хвильові характеристики.

Коливання кожної частинки середовища, що бере участь в поширенні хвилі, описується такими фізичними величинами:

*Період коливань  $T$  [секунда, с]* - тривалість одного повного коливання.

Коливання називаються періодичними, якщо величина періоду залишається стабільною, і неперіодичними – в інших випадках.

*Лінійна частота* коливань  $\nu$  [Герц] - число коливань в одиницю часу.

*Циклічна частота* коливань  $\omega$  [радіан/секунда] - величина, яка пов'язана з лінійною частотою:  $\omega = 2\pi \nu$ .

*Зміщення*  $X$  [метр] - відстань, на яку відхиляється частинка від положення рівноваги влюбий момент часу.

*Амплітуда* коливань  $A$  [метр] - максимальна величина зміщення.

*Фаза* коливань  $\varphi$  [радіан] – величина, яка визначає положення частинки, що коливається, влюбий момент часу.

Всі вказані величини входять в *рівняння гармонічних коливань*, які протікають в часі за законом синуса або косинуса (рис. 11.1 Б):

$$x = A \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

$$x = A \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

В рівняннях  $\varphi_0$  - початкова фаза, а вираз в дужках  $(\omega t + \varphi_0)$  - фаза коливань в момент часу  $t$ .

Хвильовими характеристиками звуку служать:

*Фронт хвилі* – це геометричне місце точок, до яких в певний момент часу поширились коливання. За формою фронту хвиля може бути сферичною і плоскою.

*Швидкість хвилі*  $v$  [метр/секунда] – це відстань, на яку поширюється фронт хвилі за одиницю часу.

*Довжина хвилі*  $\lambda$  [метр] - відстань між найближчими частинками середовища, які коливаються в однаковій фазі. Довжина хвилі  $\lambda$  дорівнює відстані, на яку поширюються коливання зі швидкістю  $v$  в середовищі за один період  $T$ :

$$\lambda = v \cdot T$$

*Інтенсивність* – енергія, яка переноситься хвилею за одиницю часу через одиницю поверхні, розташованої перпендикулярно напрямку хвилі:

$$I = \frac{E}{t \cdot S}$$

Вимірюється інтенсивність хвилі в Вт/м<sup>2</sup>.

Швидкість звуку залежить від фізичних особливостей середовища. У

твердих речовинах і рідинах звук поширюється швидше, ніж в газах. Швидкість звуку в повітрі близько 335 м/с, а у воді – 1430 м/с. Середня швидкість звуку в тканинах тіла людини становить 1570 м/с.

### **Класифікація звуків**

Розрізняють такі види звуків:

1. *Простий тон* - звук, утворений гармонічними коливаннями однієї певної частоти. Його джерелом може бути камертон.

2. *Складний тон* - звук, утворений періодичними, але негармонічними коливаннями (рис. 9.2 А). Він представляє собою результат накладення один на одного декількох простих тонів. Той з них, що має саму низьку частоту, називається основним тоном. Тони з більш високою частотою, кратною частоті основного тону, називаються обертонами. Складними тонами є звуки музичних інструментів, голосні звуки української мови.

За допомогою спеціальних приладів можна провести спектральний аналіз складного тону - виділити складові його прості тони. Так отримують *акустичний спектр* - діаграму, яка відображає частоти основного тону і обертонів і відповідні їм інтенсивності (рис. 9.2 Б).

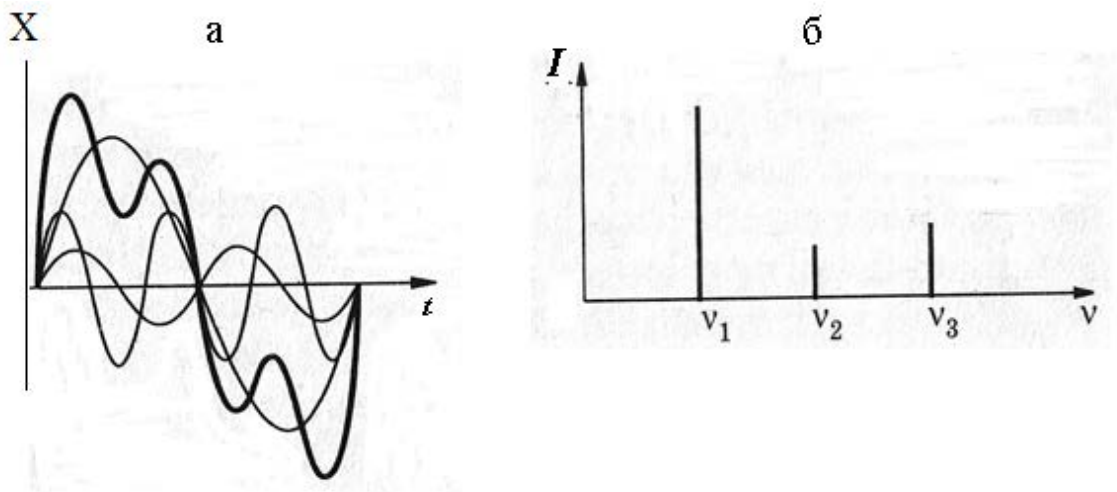


Рис. 9.2 Складний тон: а). графік коливань частинок середовища: жирна лінія відповідає складному тону, три інші – прості тони, що його складають; б). акустичний спектр складного тону

3. *Шум* - це звук, в якому частота та інтенсивність коливань змінюються в кожен момент часу незакономірно. Звукові хвилі, які

створюють шум, не мають певного періоду і частоти. Тому акустичний спектр шуму – суцільний (рис. 9.3). Прикладами шумів є приголосні звуки.

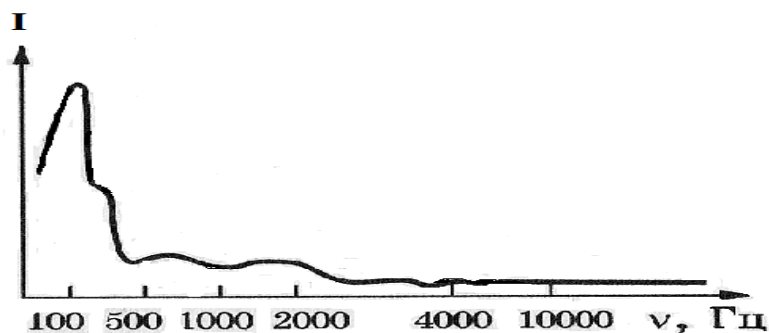


Рис. 9.3 Суцільний акустичний спектр шуму

### Область чутності людини

Звуки є джерелом слухових відчуттів людей. Проте людина може чути лише звуки, характеристики яких знаходяться в межах *області чутності* (рис. 9.4). Така область визначається границями, які створюються певними значеннями інтенсивності і частоти звуків.

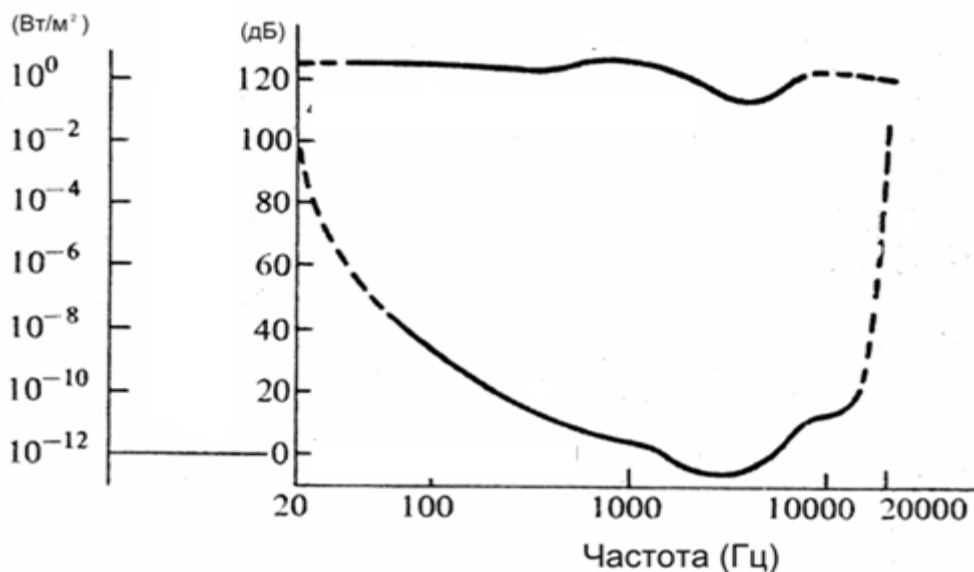


Рис. 9.4 Область чутності людини

Мінімальна інтенсивність звуку, яка може викликати слухові відчуття, називається *порогом чутності*. Його середня величина дорівнює  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>. Така інтенсивність відповідає звуковому тиску  $2 \cdot 10^{-5}$  Па. При підвищенні інтенсивності звуку вище порога чутності слухове відчуття посилюється.

При досягненні звуком певної інтенсивності виникає біль у вухах, і

може наступити зворотна втрата слуху. Мінімальна інтенсивність звуку, яка викликає у людини біль у вухах, називається *порогом больового відчуття*. В середньому його величина становить  $10 \text{ Вт/м}^2$ , що відповідає звуковому тиску  $63 \text{ Па}$ . Больовий поріг є верхньою границею області чутності за інтенсивністю.

Область чутності людини обмежена також частотою звуків. Хвилі частотою менше  $16 \text{ Гц}$  називаються *інфразвуком*, а хвилі частотою вище  $20\ 000 \text{ Гц}$  - *ультразвуком*. Слухові відчуття у людини викликають звуки, частота яких знаходиться в межах від  $16$  до  $20\ 000 \text{ Гц}$ .

Для оцінки дії енергії звукових хвиль на орган слуху людини користуються їх *рівнем інтенсивності*. Його визначають за допомогою логарифмічної шкали. Теоретичним обґрунтуванням такого підходу є психофізичний *закон Вебера-Фехнера*, обґрунтований експериментально в 19 столітті. Згідно з цим законом, при збільшенні інтенсивності подразника, що діє на сенсорні системи людини, посилення відповідного відчуття відбувається пропорційно логарифму інтенсивності. Слухове відчуття людини характеризують рівнем інтенсивності звуку  $L$ :

$$L = \lg \frac{I}{I_0}$$

$I$  – інтенсивність звуку, який чує людина,  $\text{Вт/м}^2$ ,  $I_0$  – середній поріг чутності ( $10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ ).

Рівень інтенсивності звуку  $L$  вимірюється в одиницях логарифмічної шкали - белах (Б). Збільшення рівня інтенсивності звуку на один бел означає, що його інтенсивність зросла в десять раз. На практиці застосовують децибели (дБ):  $1\text{дБ} = 10\text{Б}$

Згідно з наведеною вище формулою, рівень інтенсивності порогу чутності дорівнює  $0 \text{ дБ}$ , а больового порогу, який на тринадцять порядків вищий, ніж поріг чутності -  $130 \text{ дБ}$ . Можна навести приклади рівнів інтенсивності деяких звуків: шепітної мови - близько  $20 \text{ дБ}$ , звичайної розмови -  $40 \text{ дБ}$ , шуму вулиці зі жвавим рухом -  $70 - 80\text{дБ}$ , звуків великого оркестру -  $90 \text{ дБ}$ , шуму реактивного двигуна -  $120 \text{ дБ}$ .

### ***Суб'єктивні характеристики звуку***

Звук має *об'єктивні характеристики*, які можуть бути визначені за допомогою вимірювальних приладів. До таких характеристик відносять: інтенсивність, частоту звукових хвиль і їх акустичний спектр.

Людина може описати різні звуки «на слух», за допомогою характеристик, які є *суб'єктивними*. Ними є гучність, висота і тембр. Суб'єктивний опис звуків ґрунтується на реальних їх об'єктивних характеристиках.

*Гучність звуку*, в основному, визначається рівнем інтенсивності звукової хвилі: чим він більший, тим гучнішим сприймається звук. Однак важливу роль відіграє також частота звукових коливань. Орган слуху людини найбільш чутливий до звукових хвиль частотою від 1000 до 4000 Гц, і тому суб'єктивно вони здаються більш гучними, ніж звукові хвилі такої самої інтенсивності, але іншої частоти. Враховуючи це, застосовують спеціальну шкалу гучності звуку, одиницею виміру якої є *фон*. Гучність звуку в фонах дорівнює:

$$E = k \cdot \lg \frac{I}{I_0},$$

де *k*- коефіцієнт пропорційності, умовно прийнятий за одиницю для звуку частотою 1000 Гц.

*Висота звуку* для простих тонів визначається їх частотою. Чим вона більше, тим вищим здається звук. Для складних тонів вона залежить, головним чином, від частоти основного тону.

*Тембр звуку* - це специфічне «забарвлення» звуку. Людина відрізняє звуки різних музичних інструментів і голоси різних співаків, навіть якщо вони беруть одну і ту ж ноту, завдяки характерному для звуків тембру. Він залежить, в основному, від акустичного спектру звуку: від кількості обертонів і рівня їх інтенсивності.

### ***Орган слуху людини***

Орган слуху людини має три відділи, які називають зовнішнім, середнім і внутрішнім вухом (рис. 9.5).

*Зовнішнє вухо* представлено вушною раковиною і зовнішнім слуховим проходом. Роль цього відділу - вловлювати звукові хвилі і передавати їх до середнього вуха, яке відділено від зовнішнього вуха барабанною перетинкою. Вона представляє собою прозору мембрану з волокнистої сполученої тканини, яка коливається під впливом звуків і передає коливання в середнє вухо.

*Середнє вухо* представлено барабанною порожниною об'ємом до 1 см<sup>3</sup>, в якій розташована система слухових кісточок – *молоточок, коваделко, стремінець*. Руків'я молоточка приєднане до барабанної перетинки, а основа



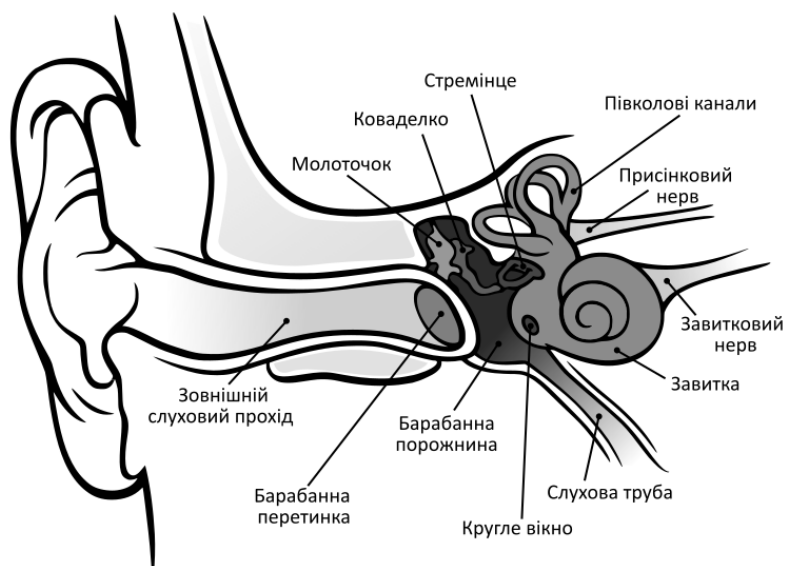


Рис. 9.5 Орган слуху людини

стремінця до овального вікна внутрішнього вуха. Основна роль слухових кісточок полягає у передачі коливань барабанної перетинки на перетинку овального вікна. При цьому відбувається значне їх підсилення. Це зумовлено тим, що барабанна перетинка має у 22 рази більшу площу, ніж перетинка овального вікна, а слухові кісточки поєднані між собою у суглоби так, що утворюють важелі сили.

*Внутрішнє вухо* через складну форму називають *лабіринтом*. До складу внутрішнього вуха входять три основні відділи: присінок (*переддвер'я*), півколові канали та завитка.

За сприйняття звуків відповідає завитка, яка представляє собою конічну закручену комірку у кістці, розміром приблизно із половинку горошини. Завитка робить у людини 2,5 обертів. Її зовнішня стінка утворена кістковим лабіринтом (рис. 9.6), а всередині розташована завиткова протока (*канал*), яка є частиною перетинчастого лабіринту і заповнена ендолімфою – рідиною с великою концентрацією іонів калію. Між кістковим і перетинчастим лабіринтом знаходиться інша рідина – перилімфа.

Нижня стінка завиткової протоки утворена базилярною мембраною, на якій міститься *спіральний, або Кортієв орган* - рецепторний орган слуху. Він складається із підтримуючих клітин та слухових рецепторів – волоскових клітин. Зверху вони вкриті покривною мембраною.

Волоскові клітини розташовуються чотирма рядами: один ряд внутрішніх волоскових клітин і три ряди зовнішніх. До основи волоскових клітин підходять чутливі нервові закінчення завиткового нерва. На верхівці

волоскові клітини мають велику кількість довгих мікрворсинок та одну війку. Вони виступають у ендолімфу завиткової протоки, а найдовші із них впираються у покривну мембрану. Мікрворсинки зсередини укріплені актиновими волокнами, а між собою поєднані спеціальними білковими містками.

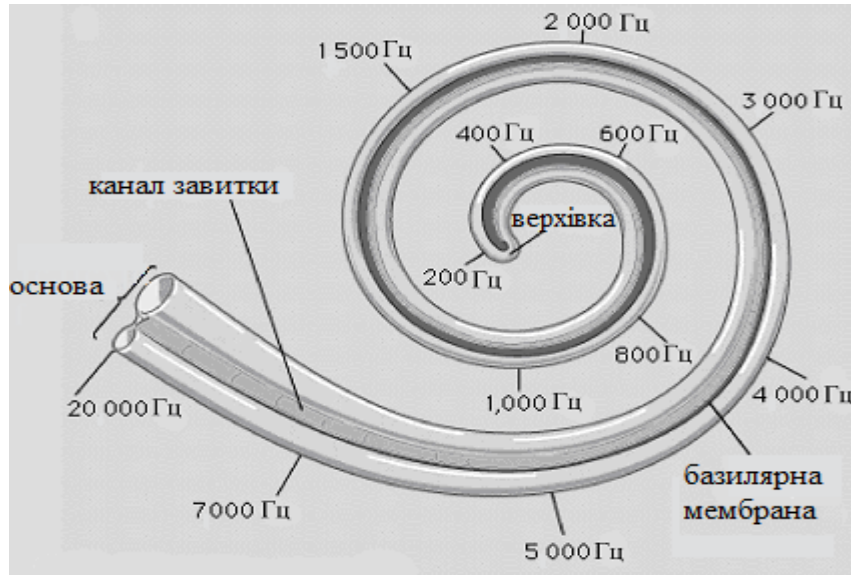


Рис. 9.6 Завитка внутрішнього вуха

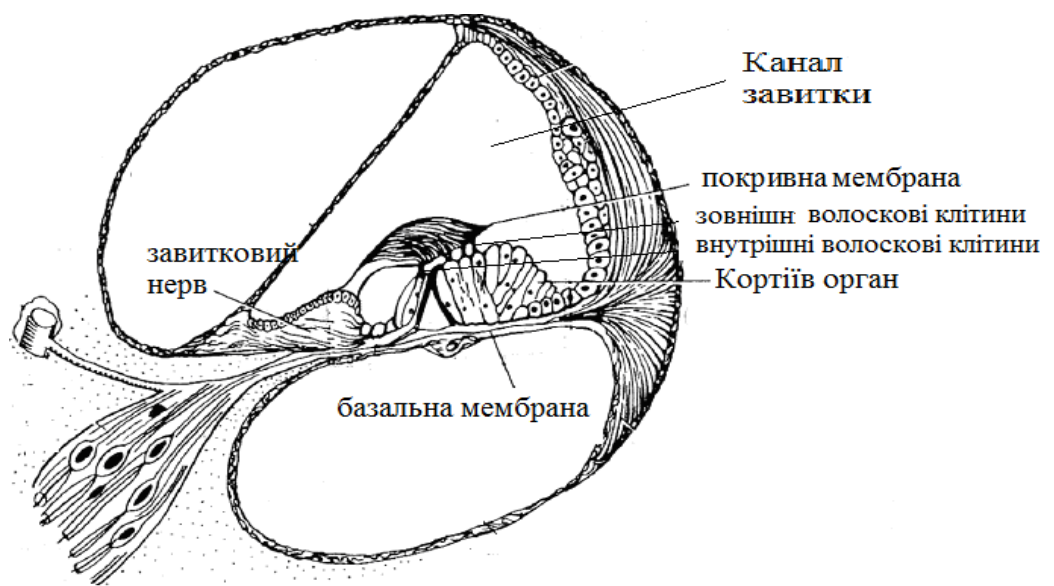


Рис. 9.7 Поперечний переріз завитки

Звукові хвилі через зовнішній слуховий отвір надходять до барабанної перетинки і спричиняють її коливання із відповідною частотою та амплітудою. Чим більша інтенсивність (гучність) звуку, тим більша амплітуда коливань перетинки. Вони передаються на слухові кісточки, що діють як важелі і розгойдують перетинку овального вікна внутрішнього вуха.

Коливаючись вперед-назад із певною частотою, овальне вікно внутрішнього вуха спричиняє аналогічний рух перилімфи, що поширюється від основи до верхівки завитки і спричиняє коливання базилярної мембрани. Внаслідок цього покривна мембрана зміщується, ритмічно подразнюючи волоскові клітини.

### **Слухові рецептори**

Волоскові клітини є механорецепторами. Під впливом коливань базилярної мембрани покривна мембрана зміщується і згинає довгі волоски. При цьому білкові фібрили які сполучають їх з короткими волосками розтягаються і відкривають катіонні (калієві і кальцієві) канали, через які всередину клітини рухаються іони  $K^+$  і  $Ca^{2+}$  і спричинюють деполяризацію її мембрани. Таким чином у волоскових клітинах виникає рецепторний потенціал. Це викликає вивільнення нейромедіатора (глутамату) у синаптичну щілину. Збудження передається на чутливі нервові закінчення і вони генерують потенціали дії.

Інформація про висоту звуку кодується у внутрішньому вусі. Хвилі різної частоти викликають збудження волоскових клітин у різних частинах завитки (рис. 9.6). Звуки високої частоти викликають максимальне коливання базилярної мембрани біля ового вікна, а низької частоти – ближче до верхівки. Звук, що складається із кількох тонів, одночасно активує різні групи волоскових клітин.

Гучніший звук викликає коливання барабанної перетинки, слухових кісточок, ового вікна та перилімфи із більшою амплітудою, це у свою чергу викликає сильніше зміщення базилярної мембрани і більше відхилення волосків рецепторних клітин, через що виникає рецепторний потенціал більшої амплітуди і в синаптичну щілину вивільняється більше нейромедіатору. В такому випадку нервові закінчення завиткового нерва частіше генерують потенціал дії. Мозок інтерпретує це як більшу гучність.

Сприйняття напрямку звуку здійснюється на основі порівняння інтенсивності та часу надходження звукових сигналів до кожного із двох вух.

### **Аудиометрія**

Діагностику порушень слуху людини проводять за допомогою аудиометрії – методу дослідження гостроти слуху шляхом пред'явлення стандартних за частотою та інтенсивністю звуків.

Для проведення аудіометрії застосовують спеціальний прилад - *аудіометр*, який представляє собою генератор електричних гармонічних коливань, що перетворюються динаміком в механічні звукові хвилі. Вони є простими тонами, частоту яких можна змінювати при обстеженні в частотних межах області чутності. Аудіометр дозволяє регулювати рівень інтенсивності звуку, який подається через навушники до пацієнта. Задають певну частоту звуку і плавно підвищують його інтенсивність, починаючи з мінімальної. Пацієнт повідомляє лікаря, як тільки почує звук. Його інтенсивність, при якому це відбувається, є порогом чутності для звуку даної частоти. Аналогічні дії виконуються для звуків інших частот. На підставі отриманих даних будують *аудіограму* - криву, яка відображає пороги чутності звуків різних частот.

### **Контрольні питання:**

1. Охарактеризуйте звук за фізичною природою.
2. Приведіть класифікацію звуків і охарактеризуйте їх.
3. Що таке поріг чутності і больовий поріг?
6. Як область чутності людини обмежена за частотою звуків?
7. Що таке суб'єктивні характеристики звуку? Назвіть їх.
8. Приведіть закон Вебера-Фехнера.
9. . Що таке гучність звуку? Від чого вона залежить?

### **Оберіть правильну відповідь:**

1. Проаналізуйте, яка властивість характерна тільки для гармонічних коливань:

- А. вони мають постійну частоту
- Б. вони мають постійну амплітуду
- В. їх графіком є синусоїда
- Г. вони є періодичними
- Д. вони є незатухаючими.

2. Визначте частоту коливань, якщо тіло за 10 секунд здійснило 20 повних циклів:

- А. 2 Гц
- Б. 10 Гц
- В. 20 Гц
- Г. 200 Гц
- Д. 0,5 Гц

3. Проаналізуйте, для звукових хвиль якої частоти поріг чутності має найменше значення:

- A. 16 Гц                                      Б. 1000 Гц  
В. 3000 Гц                                    Г. 10000 Гц                                    Д. 20000 Гц

4. Визначте рівень інтенсивності звуку частотою 1000 Гц, якщо його інтенсивність була  $10^{-9} \text{ Вт/м}^2$  :

- A. 9 дБ                                      Б. 10 дБ                                      В. 12 дБ                                      Г. 30 дБ                                      Д. 100 дБ

5. Проаналізуйте, в якій з відповідей усі три характеристики звуку є об'єктивними:

- A. гучність, тембр, частота  
Б. інтенсивність, частота, акустичний спектр  
В. частота, гучність, акустичний спектр  
Г. інтенсивність, тембр, частота  
Д. швидкість, висота, частота

6. Проаналізуйте, в якій з відповідей усі три характеристики звуку є суб'єктивними:

- A. інтенсивність, тембр, частота  
Б. інтенсивність, частота, акустичний спектр  
В. частота, гучність, акустичний спектр  
Г. гучність, тембр, висота  
Д. швидкість, висота, частота

7. Рівень інтенсивності звуку складає 40 дБ. У скільки разів його інтенсивність перевищує порогову інтенсивність?

- A. в 10 раз                                      Б. в 100 раз                                      В. 1000 раз  
Г. 10000 раз                                      Д. 100000 раз

8. Визначте, на скільки змінився рівень інтенсивності звуку, якщо його інтенсивність збільшилась в 100 разів:

- A. 10 дБ                                      Б. 20 дБ                                      В. 50 дБ                                      Г. 2 дБ                                      Д. 100 дБ

9. Визначте, який компонент є основним тоном складного тону:

- A. що має найменшу частоту                                      Б. що має найбільшу частоту  
В. що має найбільшу висоту                                      Г. що швидше розповсюджується  
Д. що має менший поріг чутності

10. Оцініть, як змінилась гострота слуху людини до звуків, якщо у неї збільшились пороги чутності:

А. зменшилась

Б. збільшилась

В. не змінилась

## 10. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ГЕМОДИНАМІКИ

### *Лінійна та об'ємна швидкості руху рідини*

Описати рух рідини – це визначити *лінійну швидкість*  $v$ , з якою окремі частинки рідини рухаються через кожную точку простору, в якому вона тече. Лінійна швидкість визначається як відстань  $X$ , яку частинки проходять за одиницю часу  $t$ :

$$v = \frac{X}{t}, \left[ \frac{m}{c} \right]$$

Іншим показником руху рідини є *об'ємна швидкість* (або *потік*) –  $Q$ . Це об'єм рідини  $V$ , що протікає через поперечний переріз трубки за одиницю часу  $t$ :

$$Q = \frac{V}{t} \quad \left[ \frac{m^3}{c} \right]$$

### *Рівняння неперервності струменя*

Відомо, рідина є практично нестисливою. Тому в умовах її течії нерозривним струменем величина  $Q$  у всіх поперечних перерізах трубки в будь-який момент часу однакова:

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = const$$

Об'ємна швидкість  $Q$  прямо пропорційна лінійній швидкості течії рідини і площі поперечного перерізу  $S$ :

$$Q = v \cdot S$$

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = \dots v_n \cdot S_n = const$$

Цей вираз представляє собою *рівняння неперервності струменя*. Сенс його полягає в тому, що добуток лінійної швидкості течії рідини на площу поперечного перерізу трубки в будь-який момент часу в усіх перерізах є однаковим.

З цього рівняння слідує, що лінійна швидкість течії рідини в будь-якому перерізі трубки обернено пропорційна площі цього перерізу (рис. 10.1):

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

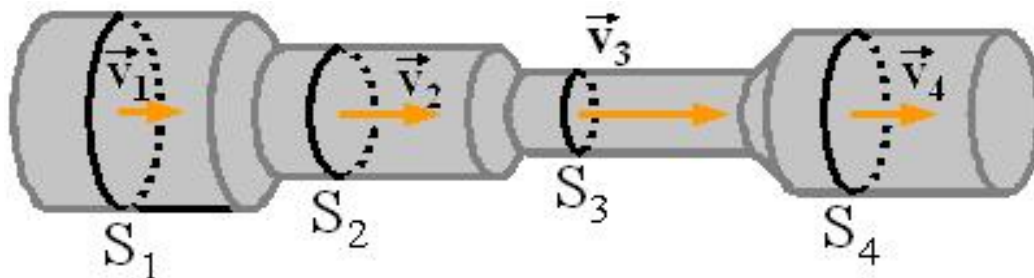


Рис. 10.1. Зміни лінійної швидкості течії рідини в трубі змінного перерізу

### **Тиск рідини в трубках**

Рідина може текти в трубках лише завдяки тиску.

Тиском  $P$  називається сила  $F$ , що діє на одиницю площі поверхні  $S$  і спрямована перпендикулярно до даної поверхні:

$$P = \frac{F}{S}$$

Одиницею вимірювання тиску в системі СІ є *паскаль* (Па). В медицині використовують несистемну одиницю - *мм ртутного стовпа*.

Тиск рідини відповідає її *питомій енергії*, тобто енергії, що припадає на одиницю об'єму. За її рахунок рідина може переміщатися і здійснювати роботу. Якби рідина була позбавлена тертя (*"ідеальна рідина"*), її енергія не витрачалася би на його подолання. В такому випадку величина тиску в будь-якому перерізі трубки залишалася би незмінною.

Однак будь-яка реальна рідина має внутрішнє тертя. На його подолання витрачається енергія. Тому величина повного тиску рідини неминуче знижується по ходу трубки, по мірі віддалення від насосу.

### **В'язкість і внутрішнє тертя рідини**

Причиною *в'язкості* рідини є внутрішнє тертя. Воно обумовлено силами взаємодії між молекулами. В'язкість рідини вперше досліджував Ньютон, який назвав цю властивість "недостатнім ковзанням".

На рис. 10.2 представлена схема досліду, в якому рідина знаходиться між паралельними пластинами, відстань між якими дорівнює  $x$ . Нижня пластина закріплена, а верхня може рухатись з постійною швидкістю під впливом сили  $F$ . Рідина, що знаходиться між пластинами, має в'язкість і чинить опір дії сили. При переміщенні верхньої пластини рідина починає рухатися. При цьому між пластинами створюється певний розподіл швидкостей різних шарів рідини. Вектори їх швидкостей позначені на рис.



10.2 стрілками.

З найбільшою швидкістю переміщається шар, прилеглий до верхньої пластини. Він захоплює за собою наступний шар рідини, але швидкість останнього є меншою і т.д. Шар, який прилягає до нижньої пластини, залишається нерухомим. В результаті між пластинами виникає *градієнт швидкості* течії рідини  $\frac{dv}{dx}$ .

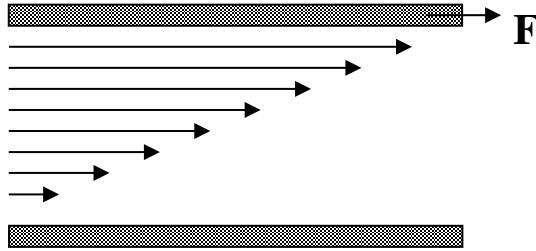


Рис. 10.2 Розподіл швидкостей шарів рідини в досліді Ньютона

Сила, що діє, на верхню пластину, необхідна для подолання тертя рідини. Вона дорівнює за своєю величиною силі тертя і описується рівнянням *Ньютона*:

$$F = \eta \cdot \frac{dv}{dx} \cdot S$$

У цьому рівнянні  $dv/dx$  - градієнт швидкості, який характеризує її зміни в перпендикулярному її вектору напрямку,  $S$  - площа поверхні взаємодіючих шарів рідини,  $\eta$  (грец. "эта") - коефіцієнт пропорційності, який називається *коефіцієнтом в'язкості*, або просто *в'язкістю*. Він чисельно дорівнює силі, яку потрібно прикласти до рухомої пластини, якщо площа взаємодіючих шарів рідини дорівнює одиниці, при градієнті швидкості, рівному одиниці. Розмірність коефіцієнта в'язкості в СІ –  $Па \cdot c$ .

В'язкість рідини залежить від її природи і температури. Вона може бути виміряна за допомогою спеціальних приладів, які називаються *віскозиметрами*. Часто обмежуються визначенням *відносної в'язкості* рідини - відношення її в'язкості до в'язкості води, прийнятої за одиницю.

### ***Ньютонівські і неньютонівські рідини***

Рівняння Ньютона застосовується не до всіх рідин, але лише до тих,

в'язкість яких залежить тільки від їх природи і температури. До цієї категорії відносяться однорідні низькомолекулярні рідини (вода, спирт і т.д.). Такі рідини називаються *ньютонівськими*.

До неоднорідних рідин: суспензій, емульсій, пін, а також до розчинів речовин, що складаються з великих молекул, рівняння Ньютон не застосовується. Такі рідини називаються *неньютонівськими*. Їх в'язкість залежить не тільки від природи і температури, але й від швидкості течії.

### ***Ламінарна і турбулентна течія рідини***

*Ламінарною* називається така течія рідини, коли вона переміщується шарами, кожен з яких характеризується своєю швидкістю. Такий вид течії в трубці круглого перерізу представлений на рис. 10.3. Швидкість течії в кожній точці поперечного перерізу залишається постійною. Розподіл векторів швидкості шарів рідини в поперечному перерізі трубки являє собою параболу.

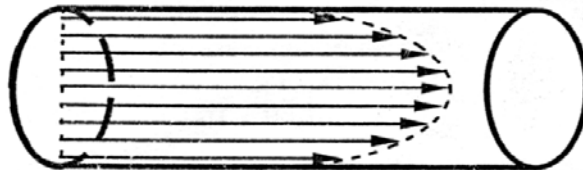


Рис. 10.3 Профіль розподілу векторів швидкостей при ламінарній течії рідини в трубці круглого перерізу

Інший тип течії рідини - *турбулентний*. Він характеризується тим, що швидкості частинок рідини безперервно безладно змінюються, в результаті чого в потоці утворюються місцеві завихрення. В цих умовах відбувається безперервне перемішування рідини. Для підтримання турбулентної течії рідини потрібно більше енергії, ніж для ламінарній течії.

О.Рейнольдс показав, що перехід ламінарної течії рідини в турбулентну залежить від ряду параметрів: в'язкості рідини  $\eta$ , її густини  $\rho$ , швидкості її течії  $v$  і діаметру трубки  $d$ . Вказані величини входять в *рівняння Рейнольдса*:

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta}$$

Re - безрозмірна величина, *число Рейнольдса*. При малих значеннях цього числа течія рідини є ламінарною. Коли число Рейнольдса перевищує деяку критичну величину, ламінарна течія переходить в турбулентну. Для

трубки круглого перерізу критична величина числа Рейнольдса становить близько 2000. В нормальних умовах течія крові в судинній системі є ламінарною. Вона турбулентна лише в порожнинах серця, де кров перемішується.

### ***Течія в'язкої рідини в трубках. Рівняння Пуазейля***

Французький фізик і фізіолог А. Пуазейль експериментально встановив один з основних законів гідродинаміки, який важливий для опису течії крові в серцево-судинній системі. Цей закон характеризує об'ємну швидкість ламінарної течії рідини (рис. 10.4).

Об'ємна швидкість рідини  $Q$  визначається рівнянням Пуазейля:

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)\pi r^4}{8\eta \cdot l}$$

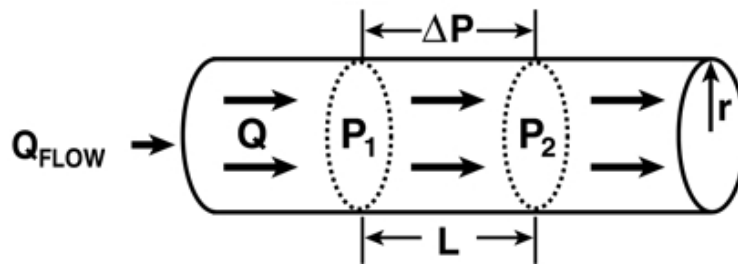


Рис. 10.4 Фактори, що визначають об'ємну швидкість рідини

В даному рівнянні різниця тисків  $(P_1 - P_2)$ - це сила, що змушує рідину переміщатися по трубці. Радіус трубки ( $r$ ) в четвертому ступені, її довжина ( $l$ ) і в'язкість рідини ( $\eta$ ) - фактори, які впливають на величину об'ємної швидкості.

Рівняння Пуазейля можна зробити більш універсальним, якщо ввести додаткову величину  $R$  - *гідродинамічний опір*:

$$R = \frac{8\eta \cdot l}{\pi r^4}$$

Тоді рівняння Пуазейля набуде вигляду:

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)}{R} \quad \text{або} \quad Q = \frac{\Delta P}{R}$$

Таким чином, зміст рівняння Пуазейля полягає в тому, що об'ємна швидкість рідини знаходиться в прямій залежності від різниці тисків на початку і в кінці трубки (або системи трубок) і в зворотній залежності від величини її (їх) гідродинамічного опору.

### ***В'язкість крові***

Кров є суспензією кров'яних клітин в рідині складного вмісту - плазмі. Кров'яні клітини представлені червоними кров'яними тільцями (еритроцитами), білими кров'яними тільцями (лейкоцитами) і кров'яними пластинками (тромбоцитами). В'язкість крові значно перевищує в'язкість води. В середньому, відносна в'язкість крові дорівнює 4,5 (від 3,5 до 5,4). Відносна в'язкість плазми менша. Вона дорівнює в середньому 2,2 (від 1,9 до 2,6). В'язкість крові вимірюють за допомогою спеціального приладу - *віскозиметра*.

Величина в'язкості крові визначається, в основному, концентрацією в ній еритроцитів, в меншій мірі - концентрацією білків в плазмі. Показник концентрації еритроцитів – *гематокрит*.

### ***Робота серця***

При кожній систолі серце виконує роботу  $A$ , яка полягає у наданні певному об'єму крові  $V$  (*систоличному об'єму*) статичного тиску  $P$ , а також у приданні масі крові  $m$  швидкості  $v$ . Це свідчить, що робота як лівого, так і правого шлуночків серця за один цикл складає:

$$A = PV + \frac{mv^2}{2}$$

Перший з додатків відповідає потенціальній енергії крові, яку вона отримує від серця, а другий - її кінетичній енергії. Величини  $P$  і  $V$  змінюються в часі. Тому для розрахунку роботи серця використовують їх середні значення.

З експериментів відомо, що середня величина  $P$  для лівого шлуночка становить у спокої близько 100 мм рт. ст., а швидкість крові в аорті - 0,5 м/с. Величина  $V$  в спокої дорівнює в середньому 70мл. Підставивши ці величини в наведене вище рівняння, отримаємо приблизну величину роботи лівого шлуночка за один серцевий цикл:

$$PV \sim 0,931 \text{ Дж} \quad \frac{mv^2}{2} = 0,009 \text{ Дж} \quad A \sim 0,931 \text{ Дж} + 0,009 \text{ Дж} \sim 0,940 \text{ Дж}$$

Таким чином, 99% роботи лівого шлуночка серця витрачається на те, щоб підвищити тиск об'єму крові і лише 1% - на повідомлення їй швидкості. Відповідно, статичний тиск в аорті становить 99% повного тиску, а динамічний - тільки 1%. Це свідчить, що основна частина питомої енергії крові в аорті є потенціальною і лише дуже мала частина – кінетичною.

Тиск крові в легеневій артерії значно нижче, ніж в аорті, а швидкість крові приблизно така сама. Підрахунки показують, що для правого шлуночка  $A \sim 0,15 \text{ Дж}$ .

### *Тиск крові в серцево-судинній системі*

Вище було вказано, що величина повного тиску рідини відповідає її питомій енергії. У серцево-судинній системі цю енергію крові надає серце. Тому найбільший її тиск спостерігається на виході з серця: у великому колі кровообігу - в аорті, а в малому колі - в легеневій артерії. При переміщенні крові в судинах її енергія витрачається на подолання гідродинамічного опору, в результаті чого кров'яний тиск падає по мірі віддалення судин від серця (рис. 10.5).

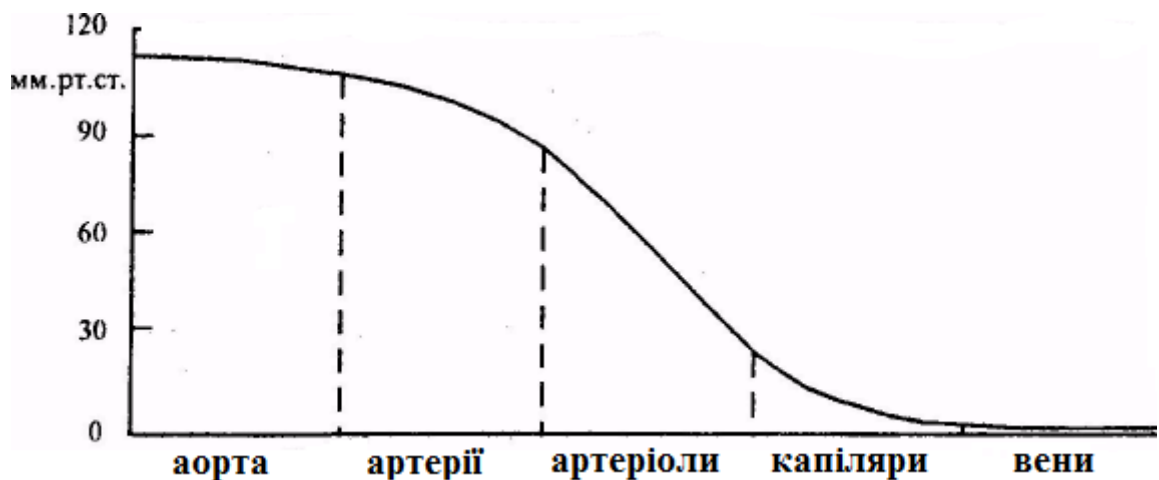


Рис. 10.5 Тиск крові в різних відділах великого кола кровообігу

В артеріальній частині серцево-судинної системи відбуваються пульсові коливання тиску. Пік тиску під час систоли називають максимальним (сistolічним), а найменша величина його під час діастоли - мінімальним (діастолічним) тиском. У людини середнього віку систолічний тиск у великих артеріях дорівнює близько 120 мм рт. ст., а діастолічний - 60 мм рт. ст.

Тиск крові знижується найбільшою мірою на тих ділянках судинного русла, які мають найбільший гідродинамічний опір. Величина опору аорти і великих артерій відносно невелика, у зв'язку з чим тиск крові лише незначно знижується по ходу цих судин.

Найбільший гідродинамічний опір мають *артеріоли* – він складає приблизно 50% загального гідродинамічного опору судинної системи. Тому по ходу артеріол великого кола середній тиск знижується до 35 – 70 мм рт.ст.

Подальше зниження тиску крові відбувається в капілярах, на частку яких припадає приблизно 25% загального опору судин. Тиск крові продовжує падати і по ходу вен, проте в набагато меншому ступені, оскільки їх гідродинамічний опір порівняно невеликий. Тиск крові у великих венах знижується до нуля.

На величину тиску крові в серцево-судинній системі впливає також сила тяжіння, яка обумовлює наявність гідростатичного компонента тиску. При положенні людини лежачи такий компонент не впливає суттєво на величину тиску крові в судинах. У вертикальному положенні роль гідростатичного тиску більш значна. Так в судинах голови у людини, яка стоїть вертикально, тиск приблизно на 30 мм рт. ст. нижчий, ніж на рівні серця; в судинах нижніх кінцівок (на рівні стопи) - на 30 мм рт. ст. вищий.

### ***Методика вимірювання артеріального тиску крові***

Величину артеріального тиску (АД) у людини вимірюють за допомогою *акустичного методу Короткова*.

Приладом для цього служить *сфігмоманометр*. До його складу входять стрілочний манометр, гумові манжета і груша. Манжету надягають на плече для вимірювання тиску крові в плечовій артерії. Тиск повітря в манжеті підвищують за допомогою натискання на грушу до тих пір, доки просвіт артерії не буде повністю закритий. Про це буде свідчити відсутність пульсу променевої артерії. Потім тиск в манжеті поступово зменшують. Коли він стає нижче максимального артеріального тиску, артерія починає відкриватися на короткі періоди лише під час систоли. В ці моменти швидкість крові вище звичайної, тому течія крові турбулентна. Це служить одною з причин виникнення звуків, які називаються *тонами Короткова*. Їх прослуховують за допомогою фонендоскопа.

При подальшому зниженні тиску в манжеті артерія під час систоли залишається відкритою протягом більш тривалого проміжку часу, а під час

діастолі закривається або відкривається лише частково. Тони Короткова продовжують бути чутні і стають голосніше. При пониженні тиску в манжеті до рівня мінімального артеріального тиску, артерія протягом усього серцевого циклу залишається відкритою. Ламінарна течія крові відновлюється, і тони Короткова зникають.

Таким чином, поява тонів Короткова при зниженні тиску повітря в манжеті сфігмоманометра сигналізує про величину максимального (систоличного), а їх зникнення відповідає мінімальному (діастолічного) артеріального тиску.

### *Лінійна швидкість кровоплину в серцево-судинній системі*

Відповідно до рівняння неперервності струменю, швидкість течії рідини в трубці зі змінним перерізом обернено пропорційна його площі. Це відноситься і до системи трубок, однак в цьому випадку необхідно взяти до уваги суму поперечних перерізів всіх паралельно з'єднаних трубок.

Судинна система складається з великої кількості судин, з'єднаних як послідовно, так і паралельно. Кров тече одночасно в усіх цих судинах. У зв'язку з цим для порівняння лінійної швидкості кровоплину в артеріях, капілярах, венах необхідно враховувати не площу перерізу окремої судини, а сумарну площу перерізу всіх судин одного типу.

Кровоносна система людини замкнута. Тому в будь-який момент часу об'ємна швидкість плинину крові в усіх перерізах судинної системи практично однакова. Об'єм крові, який протікає за одиницю часу через аорту, в будь-який момент дорівнює об'єму, що тече через всі артерії, всі капіляри і т.д. Для визначення середньої швидкості плинину крові в судинах різного типу потрібно розділити об'єм крові на сумарну площу їх поперечного перерізу.

Аорта має найбільшу площу перерізу в порівнянні з іншими судинами. Однак сума площ перерізів всіх артерій перевищує площу перерізу аорти. Це стосується і капілярів, сумарна площа перерізу яких перевершує площу перерізу аорти в 500 - 600 раз. В свою чергу сума площ перерізів вен значно менше, ніж капілярів. Чим більша сумарна площа перерізу судин якогось типу, тим повільніше плине в них кров.

В судинах великого кола кровообігу (рис. 10.6) лінійна швидкість максимальна в аорті (0,2-0,5 м/с) і мінімальна в капілярах (0,0003 м/с). У венах цей показник збільшується в порівнянні з капілярами. У великих венах лінійна швидкість крові досягає 0,1-0,15 м/с. Аналогічно розподіляється

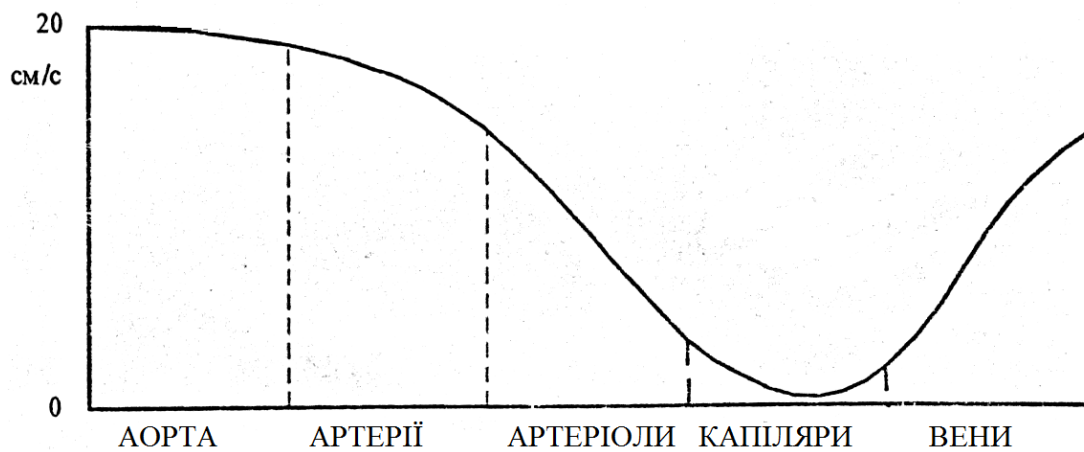


Рис. 10.6 Лінійна швидкість течії крові в різних відділах судинної системи

лінійна швидкість плинущ крові також у судинах малого кола.

Для вимірювання швидкості течії крові використовують метод *еходоплерографії*. Він дозволяє виміряти середні швидкості течії крові в серце і кровоносних судинах і розподіл швидкості крові в межах їх поперечного перерізу.

Для здійснення еходоплерографії використовують ультразвук, який спрямовують на кровоносну судину. Він відбивається, головним чином від еритроцитів, які під час дослідження рухаються. В результаті відбита ультразвукова хвиля змінює частоту у порівнянні з тою хвилею, що генерує ультразвуковий датчик. Зміна частоти хвилі при відносному русі джерела і приймача хвилі називається ефектом Доплера. Величина доплерівського зсуву частоти при еходоплерографії залежить від швидкості течії крові.

### Контрольні питання:

1. Поясніть рівняння неперервності потоку.
2. Дайте визначення в'язкості рідини, використовуючи рівняння Ньютонa.
3. Що таке ламінарний і турбулентний плин рідини?
4. Як рівняння Рейнольдса використовують для визначення характеру плинущ рідини?
5. Назвіть фізичні величини, які визначають об'ємну швидкість плинущ рідини за законом Пуазейля.
6. Вкажіть основні фактори, що визначають в'язкість крові.
7. Обґрунтуйте зміни лінійної швидкості крові у серцево-судинній системі людини.



8. Поясніть зміни середнього тиску крові в різних відділах серцево-судинної системи людини.
9. Поясніть на основі закону Пуазейля, які фактори визначають величину артеріального тиску у людини.
10. Опишіть акустичний метод вимірювання артеріального тиску за Коротковим.

**Виберіть правильну відповідь:**

1. Проаналізуйте, як буде змінюватись об'ємна швидкість течії рідини у трубці з різною площею її поперечних перерізів:

- А. не буде змінюватись
- Б. буде збільшуватись в вузьких місцях
- В. буде збільшуватись у широких місцях
- Г. буде зменшуватись в вузьких місцях
- Д. буде зменшуватись у широких місцях

2. Проаналізуйте, як буде змінюватись лінійна швидкість течії рідини у трубці з різною площею її поперечних перерізів:

- А. не буде змінюватись
- Б. буде збільшуватись в вузьких місцях
- В. буде збільшуватись у широких місцях
- Г. буде зменшуватись в вузьких місцях
- Д. буде зменшуватись від початку до кінця трубки

3. Проаналізуйте, що може ламінарну течію перетворити на турбулентну течію:

- А. збільшення в'язкості рідини
- Б. збільшення швидкості течії рідини
- В. зменшення температури рідини
- Г. зменшення густини рідини
- Д. зменшення кількості рідини

4. Оцініть, як змінюється тиск крові при її переході з капілярів у вени:

- А. не змінюється
- Б. зменшується
- В. збільшується
- Г. залежить від зовнішніх умов
- Д. залежить від органу

5. Проаналізуйте, чому тиск крові в капілярах нижчий, ніж в артеріях:
- А. сума поперечних перерізів капілярів більша, ніж артерій
  - Б. енергія крові витрачається на подолання опору судів
  - В. капіляри мають менший радіус, ніж артерії
  - Г. стінка капілярів тонша, ніж у артерій
  - Д. із-за більшої кількості капілярів, ніж артерій

6. Проаналізуйте, як зміниться об'ємна швидкість кровоплину в м'язах, якщо в результаті фізичного навантаження мускулатура стінок артеріол м'язів розслаблюється і ширина їх просвіту збільшується.
- А. не зміниться
  - Б. зменшиться
  - В. впаде до нуля
  - Г. збільшиться
  - Д. досягне ударного об'єму

7. Оцініть на основі закону Пуазейля, які величини визначають гідродинамічний опір трубки:
- А. довжина і радіус трубки, в'язкість рідини
  - Б. в'язкість і густина рідини, довжина трубки
  - В. тиск, в'язкість рідини, довжина трубки
  - Г. швидкість, в'язкість рідини, довжина трубки
  - Д. швидкість рідини, довжина і радіус трубки

8. Оцініть, в яких судинах швидкість зменшення тиску крові максимальна:
- А. артерії
  - Б. артеріоли
  - В. капіляри
  - Г. венули
  - Д. вени

9. Визначте, який з факторів впливає в найбільшій мірі на в'язкість крові:
- А. концентрація білків в плазмі
  - Б. концентрація солей в плазмі
  - В. концентрація еритроцитів
  - Г. концентрація лейкоцитів
  - Д. концентрація водневих іонів

## 11. ВПЛИВ ПОСТІЙНОГО І ЗМІННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА БІОЛОГІЧНІ ТКАНИНИ

Електричним струмом називається впорядкований рух електричних зарядів. Він виникає під дією електричних або магнітних сил, а також в результаті дифузії і хімічних реакцій у джерелі струму. Основною характеристикою електричного струму є *сила струму*  $I$ . Це скалярна величина, що чисельно дорівнює електричному заряду, який проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу. Миттєве значення сили струму дорівнює похідній заряду  $q$  по часу  $t$ :

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Одиницею вимірювання сили струму є *ампер* ( $A$ ). Один ампер - сила струму, коли через поперечний переріз провідника проходить заряд 1 кулон за одну секунду.

*Густина струму*  $J$  – це відношення сили струму  $I$  до площі поперечного перерізу  $S$ , що перпендикулярний напрямку струму:

$$J = \frac{I}{S} \quad \left[ \frac{A}{m^2} \right].$$

Розрізняють *постійний* і *змінний струм*. *Постійним* називають такий струм, сила якого не змінюється в часі.

Сила струму в провіднику визначається *законом Ома*. Згідно з ним сила струму  $I$  прямо пропорційна різниці потенціалів між кінцями провідника, тобто електричній напрузі  $U$ , і обернено пропорційна електричному опору провідника  $R$ . Одиницею вимірювання електричного опору є *Ом*.

$$I = \frac{U}{R}$$

Існують два роди провідників: *першого роду* (метали) і *другого роду* (розчини електролітів). Метали містять високу концентрацію вільних електронів, здатних переміщатися під дією електричного поля. В розчинах електролітів електричний струм утворюється позитивними і негативними іонами, які переміщуються під дією електричного поля в протилежних напрямках. Біологічні тканини, в основному, містять другий тип провідників,

хоча деякі структури в них (наприклад, мембрани) мають діелектричні властивості.

### ***Постійний струм у біологічних тканинах***

Різні біологічні тканини значно відрізняються за своїм електричним опором до постійного струму. Відносно невеликий опір мають рідкі тканини: цереброспінальна рідина, кров і лімфа. Він є середнім за величиною у м'язів і паренхіматозних органів: печінки, нирок, підшлункової залози та ін. Жирова тканина має значно вищий електричний опір, а у сухої шкіри і кісткової тканини він є найбільшим серед усіх тканин.

Ці відмінності пояснюються неоднорідністю структури біологічних тканин за їх електричним опором. Він є порівняно низьким у цитоплазми клітин і міжклітинної речовини, які відносять до провідників. Проте біологічні мембрани, які в значній мірі перешкоджають вільному переміщенню іонів, за своїми властивостями близькі до діелектриків. Як відомо, іони можуть перетинати їх тільки через спеціальні канали.

Тому електричний опір є невеликим у рідких тканин та тих органів, які містять відносно багато води і мають порівняно широкі міжклітинні простори. Постійний електричний струм погано проникає через суху шкіру. Струм, в основному, проходить в ній через вивідні протоки потових залоз завдяки вмісту в них рідкого секрету. Струм поширюється в тілі людини, головним чином, уздовж кровоносних і лімфатичних судин і по м'язах, не завжди прямолінійно.

При проходженні постійного струму через біологічні тканини виникає явище *поляризації* (рис. 11.1). Воно проявляється в тому, що сила струму при незмінній різниці потенціалів, яку прикладають до тканини, починає зменшуватися доки не досягне деякого стабільного рівня.

Поляризація може бути обумовлена поворотом електричних диполів, якими є багато біологічних молекул, під впливом зовнішнього електричного поля. Така поляризація називається *дипольною, або орієнтаційною*. В результаті цього виникає зустрічна електрорушійна сила (ерс), яка спрямована в протилежному напрямку відносно зовнішньої різниці потенціалів і тому зменшує її вплив.

При іонній поляризації відбувається зміщення іонів у кристалічній решітці вздовж і відповідно напрямку електричного поля, внаслідок чого виникає зустрічна ерс.

Неполярні молекули під впливом зовнішнього електричного поля набувають дипольного моменту внаслідок деформації електронних орбіталей. Поляризація, яка виникає при цьому, називається *електронною, або деформаційною*, оскільки утворені з неполярних молекул диполі розміщуються в електричному полі так, що виникає зустрічна ерс.

В біологічних тканинах провідну роль відіграє *макроструктурна поляризація*. Іони переміщуються під впливом постійного електричного поля відповідно своїм зарядам в електропровідному середовищі і зупиняються на структурах, які мають низьку електропровідність (наприклад, мембрани). К катоду рухаються катіони, тоді як аніони відштовхуються від нього. Аніони зупиняються, досягаючи мембран, децо деполіризуючи їх. Електричне поле, яке виникає між іонами обох знаків, протилежне за своїм напрямком зовнішньому полю (рис. 11.1 Б). На аноді процеси здійснюються за тим самим принципом: аніони притягуються електродом, а катіони відштовхуються ним, що призводить до гіперполяризації мембран клітин.

Існує також *електролітична поляризація*. При пропусканні постійного струму за допомогою електродів через біологічні тканини, у їх шарах, які межують з електродами, змінюється концентрація іонів. У зоні катода збільшується концентрація позитивних іонів, а у зоні анода – негативних. Результатом є також виникнення внутрішнього електричного поля, що є протилежним зовнішньому полю.

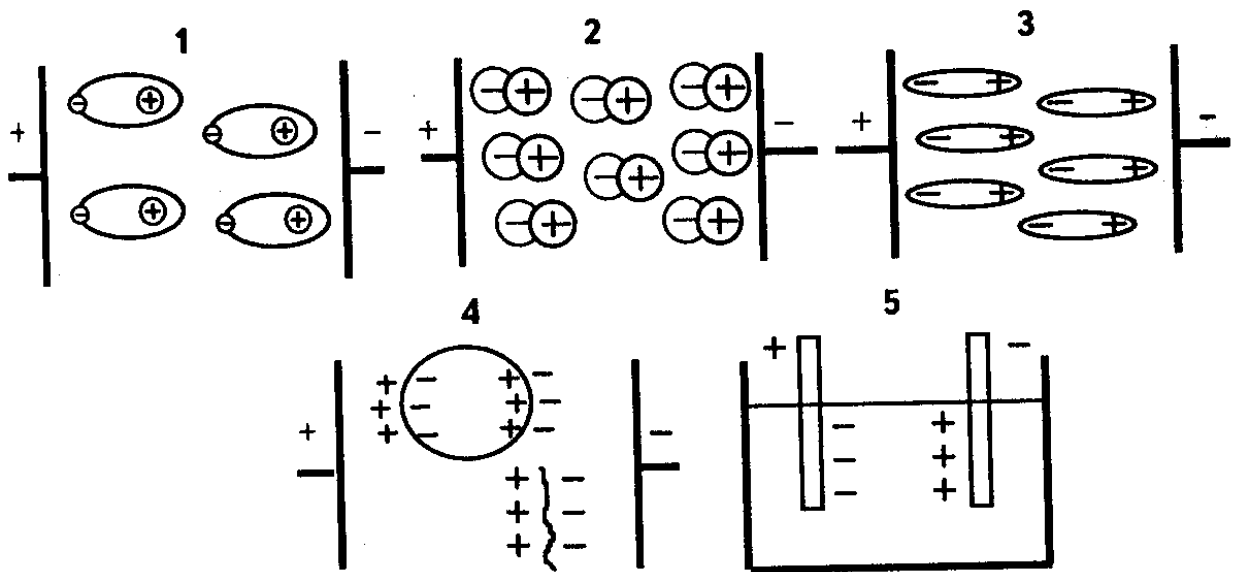


Рис. 11.1. Поляризація: 1- електронна, 2 – іонна, 3 – дипольна, 4 – макроструктурна, 5 - електролітична

### ***Гальванізація і лікувальний електрофорез***

Постійний електричний струм застосовується у медичній практиці для здійснення двох фізіотерапевтичних процедур: *гальванізації* та *лікувального електрофорезу*.

Метод гальванізації полягає в пропусканні постійного струму через певні ділянки тіла людини. Густина електричного струму не повинна перевищувати  $0,1 \text{ mA/cm}^2$ . Він виникає, коли на ділянку тіла розміщують електроди, між якими різниця потенціалів складає 50-80 В.

Під дією зовнішнього електричного поля в тканинах переміщуються переважно неорганічні іони. Гальванізація впливає у найбільшій мірі на стан біологічних мембран. Електрохімічні процеси, які виникають в тканинах, викликають місцеві зміни обміну речовин, підвищують проникність кровоносних судин, прискорюють кровообіг.

Гальванізація, як правило, поєднується з лікувальним електрофорезом. Цей метод полягає у використанні постійного електричного струму для введення ліків через неушкоджену шкіру і слизові оболонки в тканини організму. Електрофоретичним шляхом можуть вводитися тільки лікарські препарати, які дисоціюють у водних розчинах на іони (наприклад різні солі, антибіотики, місцеві анестетики, алкалоїди та ін.). Електричне поле змушує їх переміщатись. Позитивні іони відштовхуються від позитивного електроду і направляються до негативного електроду. Негативні іони – у протилежному напрямі. Основними шляхами іонів, що проникають через шкіру, є канали потових залоз.

Лікувальний електрофорез є зручним методом введення ліків, якщо прагнуть забезпечити місцеву їх дію безпосередньо на зону ураження. Внаслідок малої швидкості пересування іони не встигають проникнути на велику глибину і концентруються, головним чином, в шкірі і підшкірній клітковині. Тут формується їх депо, в якому місцева концентрація ліків може залишатися порівняно високою протягом тривалого часу. Особливість дії лікувального електрофорезу полягає також у тому, що зберігається первинна структура ліків, оскільки вони надходять у зону ураження, минаючи шлунково-кишковий тракт і не піддаючись метаболізму в печінці.

### ***Змінний електричний струм. Поняття імпедансу***

*Змінним* називається електричний струм, сила якого періодично змінюється за величиною і напрямком. Найбільш поширеним є

синусоїдальний змінний струм, миттєві значення якого змінюються в часі за законом синуса (або косинуса).

Такий струм виникає, якщо напруга на полюсах його джерела змінюється за законом  $U = U_0 \sin \omega t$ .

У цьому випадку коливання сили змінного струму описуються аналогічним рівнянням:  $I = I_0 \sin \omega t$ .

У рівняннях  $I_0$ ,  $U_0$  – максимальні (амплітудні) значення струму і напруги,  $\omega = 2\pi\nu$  – циклічна частота.

Поряд з опором  $R$ , який називається *активним*, електричні ланцюги змінного струму мають *реактивний опір* (рис.11.2). Він може бути двох видів: *ємнісний* (його створює конденсатор, що має ємність  $C$ ) та *індуктивний* (його джерелом є котушка, яку характеризує індуктивність  $L$ ).

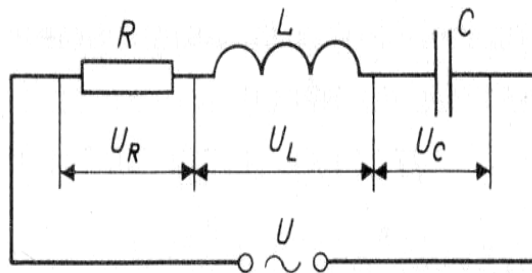


Рис. 11.2 Повний ланцюг змінного струму

Опір в ланцюзі змінного струму  $R$ , обумовлений зіткненням заряджених частинок з внутрішніми структурами провідника, називається *активним*, оскільки при проходженні струму в ньому відбувається незворотна втрата енергії у вигляді тепла.

*Реактивний опір*, обумовлений індуктивністю та ємністю ділянок ланцюга, не розсіює електричну енергію у теплоту.

*Індуктивний опір* пропорційний циклічній частоті струму і величині індуктивності ділянки електричного ланцюга:

$$X_L = \omega \cdot L$$

Індуктивність  $L$  залежить від магнітних властивостей речовини і від розмірів провідника, наприклад котушки, і вимірюється в *Генрі* (Гн). Індуктивний опір обумовлено дією електрорушійної сили самоіндукції, яка перешкоджає зміні сили струму в ланцюзі і збільшує його опір.

*Ємнісний опір* обернено пропорційний циклічній частоті струму  $\omega$  і ємності  $C$  даної частини ланцюга:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Такий опір має, наприклад, конденсатор - прилад, який складається з двох металевих пластин, розділених шаром діелектрика. На них можуть накопичуватися електричні заряди. Здатність до цього характеризує ємність, яка вимірюється у *фарадах* (Ф).

Сумарний (повний) опір ланцюга змінного струму називається *електричним імпедансом*  $Z$ . Його величина представляє собою векторну суму активного та двох видів реактивного опору:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

### ***Імпеданс біологічних тканин***

Біологічні тканини характеризуються як активним, так і реактивним опором. Вони практично позбавлені індуктивного опору, однак кожній клітині властивий ємнісний опір. Він обумовлений, головним чином, наявністю клітинної мембрани, будова якої схожа з конденсатором. Кожна мембрана складається з подвійного шару фосфоліпідів, який має високий електричний опір. Вона поляризована, оскільки на протилежних її сторонах відбувається накопичення іонів протилежного знака. Ємність мембрани досягає близько 10 мкФ на квадратний сантиметр поверхні.

Наявність ємності у живих клітин ускладнює вимірювання їх електропровідності при використанні постійного струму. Тому електричні параметри біологічних об'єктів вивчають, застосовуючи змінний струм.

Імпеданс біологічних об'єктів дорівнює векторній сумі активного  $R$  і ємнісного  $X_c$  опорів:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega \cdot C)^2}}$$

Імпеданс  $Z$  при збільшенні частоти у певному діапазоні зменшується до деякого значення, яке залишається практично незмінним при подальшому зростанні частоти (рис. 11.3). Така залежність імпедансу від частоти змінного струму називається *дисперсією імпедансу*.

Дисперсія імпедансу спостерігається тільки в живих тканинах. Після їх відмирання імпеданс перестає залежати від частоти змінного струму, оскільки мембрани втрачають свою структуру і позбавляються властивостей конденсатора. Дисперсію імпедансу досліджують, наприклад, з метою з'ясування життєздатності органів з метою їх трансплантації.



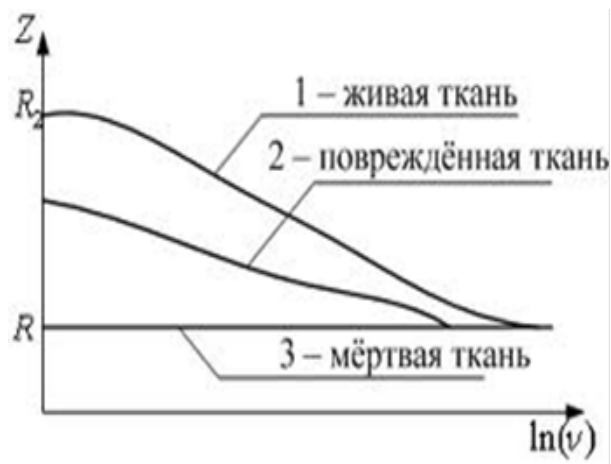


Рис. 11.3 Дисперсія імпедансу

### **Біофізичні основи реографії**

*Реографія* («реос» - грец. «потік, течія») - це метод діагностики стану кровообігу органів і тканин за результатами реєстрації змін їх електричного імпедансу впродовж серцевого циклу.

В ході реографії через органи пропускають слабкий електричний струм високої частоти -  $100 - 500$  кГц. Основною складовою імпедансу в таких умовах є активний опір.

При надходженні після систоли певного об'єму крові в судини будь-якого органу, його об'єм збільшується. При цьому змінюється також його активний електричний опір, оскільки кров має найбільшу електропровідність в порівнянні з іншими тканинами.

Це явище приблизно описує формула Кедрова:

$$\frac{\Delta V}{V} = -k \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

де  $V$  - об'єм органу і  $\Delta V$  - зміна об'єму органу після систоли,  $R$  - активний опір і  $\Delta R$  - зміна активного опору після систоли,  $k$  - коефіцієнт пропорційності.  $\Delta R$  має від'ємне значення, оскільки електричний опір органу знижується в період надходження у нього крові.

Реографію застосовують при дослідженні кровопостачання кінцівок, мозку, легенів, серця і т.п.

### **Фізіологічна дія електричного струму на біологічні тканини**

Фізіологічна дія електричного струму на біологічні тканини проявляється у збудженні нервових і м'язових клітин. У звичайних умовах життєдіяльності він є природним подразником для плазматичної мембрани,

оскільки саме виникнення локального електричного струму у ній є причиною появи і розповсюдження потенціалу дії. Електричний струм широко застосовується у медичній практиці з метою діагностики та лікування.

Проходячи через мембрану, електричний струм, в залежності від свого напрямку, може викликати два типа змін мембранного потенціалу – *деполяризацію* або *гіперполяризацію*.

У плазматичній мембрані нервових та м'язових клітин під впливом деполяризації збільшується проникність до іонів натрію. Це викликає появу додаткового електричного струму в самій мембрані, який призводить до подальшої її деполяризації. Виникає так звана *локальна відповідь* мембрани.

На рис. 11.4 показані зміни мембранного потенціалу нервової клітини під впливом струму, що деполяризує. При незначній силі струму з'являється локальна відповідь, яка при його посиленні збільшується.

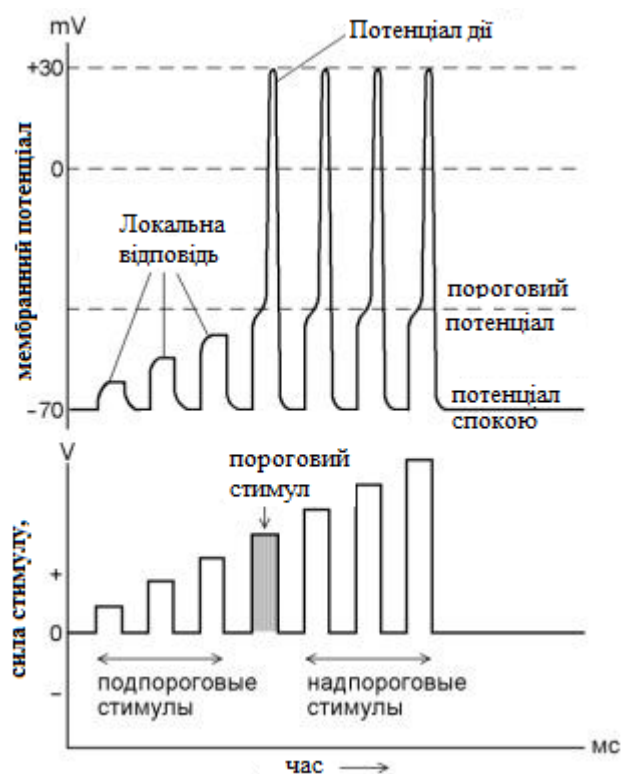


Рис. 11.4 Локальна відповідь і потенціал дії

Коли локальна відповідь мембрани досягає певного *критичного рівня*, натрієва проникність мембрани починає перевищувати калієву. Локальна відповідь переростає у потенціал дії, який розповсюджується вздовж мембрани. Мінімальна сила струму для виникнення потенціалу дії називається *порогом збудливості* мембрани.

При досягненні порогу збудливості проникність мембрани для іонів натрію швидко зростає в сотні разів, а потім при певному рівня деполяризації мембрани різко зменшується внаслідок інактивації натрієвих каналів і відповідно переносу іонів натрію через мембрану. Тому потенціал дії має максимальну амплітуду і не залежить від подальшого збільшення сили струму. Це явище отримало назву закон «все або нічого».

Дія електричного струму на збудливі клітини залежить не тільки від його сили, а ще й від тривалості впливу. Її роль вивчають шляхом дослідження порогу збудливості мембрани для електричних імпульсів, тобто коливань сили струму, різної тривалості.

Залежність між обома параметрами струму - силою і тривалістю - описує закон *Гоорвега-Вейса-Лапіка*, відповідно якому поріг збудження знаходиться в оберненій залежності від тривалості електричного дії електричного струму:

$$I_{\min} = \frac{a}{t} + b$$

де  $I_{\min}$  - порогова сила струму,  $t$  - тривалість його дії,  $a$ ,  $b$  - коефіцієнти, обумовлені властивостями плазматичної мембрани збудливої клітини.

Графік закону Гоорвега-Вейса-Лапіка представлений на рис. 11.5. Видно, що поріг збудження є мінімальним при достатньо тривалих імпульсах ( $t_2$ ). При дуже малій тривалості електричних імпульсів ( $t_1$ ) поріг зростає, і струм може досягти великої сили, не досягаючи порогу збудливості. Причиною цього являється те, що такий короткий імпульс не встигає деполяризувати плазматичну мембрану клітини до її критичного рівня.

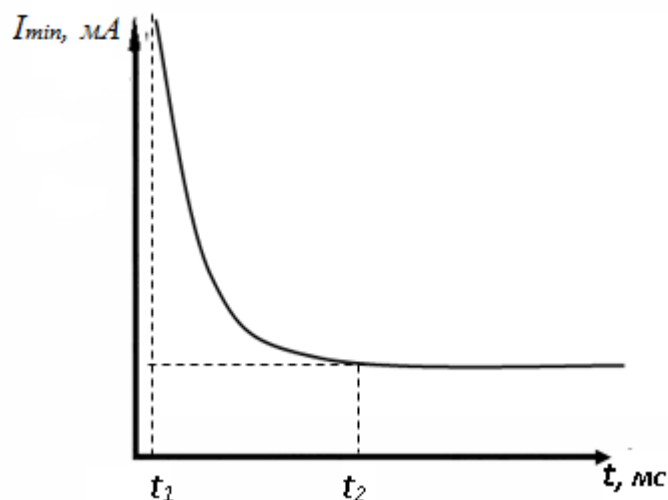


Рис. 11.5. Залежність між пороговою силою електричного струму і тривалістю його дії

## ***Електронні стимулятори***

*Електронні стимулятори* – це прилади, які використовують для підтримки і нормалізації функцій певних органів, до складу яких входять збудливі клітини. Їх стимуляцію проводять за допомогою електричних імпульсів достатньої сили та тривалості. Найбільш розвинена електрична стимуляція серця.

У нормальних умовах серце збуджується автоматично. Потенціали дії генерує атріальний вузол серця, які через провідну систему досягають м'язових клітин робочого міокарду. Виникнення і проведення імпульсів збудження в серці може бути сповільнене або навіть повністю порушене в результаті певних патологічних процесів. У цьому випадку виникають показання до застосування електронних стимуляторів серця.

Існують стимулятори, призначені для короткочасного застосування під час операцій на відкритому серці або в післяопераційному періоді. На певний час стимулюючий електрод вводять в серце через кровоносні судини, а стимулятор (генератор електричних імпульсів) залишається зовні.

При необхідності постійного застосування в тіло пацієнта вживлюють хірургічним шляхом мініатюрний кардіостимулятор. Він автономне джерело живлення, розрахований на термін в декілька років, який забезпечує енергією електронні схеми приладу.

## ***Електрофізіотерапія***

*Електрофізіотерапія* – комплекс методів лікування, для здійснення яких застосовують постійний або змінний електричний струм, а також електричне і магнітне поля та електромагнітні хвилі.

Методики застосування змінного струму або змінних полів у фізіотерапії поділяються на *низькочастотні* та *високочастотні*.

Апарати низькочастотної фізіотерапії здатні викликати збудження чутливих нервових закінчень шкіри, нервів і м'язів. Це пов'язано з тим, що частота генерованих цими апаратами електричних імпульсів порівняно невелика, а тривалість кожного з них достатня для того, щоб викликати збудження клітин. Силу струму підбирають таким чином, щоб викликати у пацієнта лише відчуття легкого поколювання шкіри. Прикладами методів низькочастотної електрофізіотерапії служать *діадинамотерапія*, *ампліпульстерапія* та ін.

Апарати високочастотної фізіотерапії генерують імпульси, частота яких перевищує мільйон герц. Тривалість кожного з таких імпульсів недостатня для збудження клітин навіть при досить значній силі струму. Завдяки синусоїдальній формі електричних коливань іони протягом одного періоду переміщуються в одну, потім - в протилежну сторони. Тому деполяризація мембран не досягає критичної величини. Внаслідок цього можна використати силу струму, достатню для нагрівання тканин організму, без якої-небудь збуджувальної дії.

Прикладами високочастотної фізіотерапії є *діатермія*, в якій для прогрівання тканин використовують електричний струм високої частоти, *індуктотермія*, в якій застосовують високочастотне магнітне поле. При *УВЧ-терапії* впливають електричним полем ультрависокої частоти, а при *НВЧ-терапії* - радіохвилями надвисокої частоти.

#### **Контрольні питання:**

1. Що таке електричний струм, які його характеристики.
2. Чим відрізняються між собою постійний і змінний електричний струм?
3. Приведіть закон Ома. Вкажіть, що таке електричний опір, електропровідність.
4. Охарактеризуйте біологічні ткани за електропровідністю і поясніть відмінності.
5. Опишіть методи гальванізації і лікувального електрофорезу.
6. Вкажіть складові частини повного ланцюгу змінного електричного струму і їх характеристики.
7. Що таке електричний імпеданс? Яка його особливість у біологічних тканинах?
8. Вкажіть сутність дисперсії імпедансу в біологічних тканинах.
9. Проаналізуйте застосування формули Кедрова в реографії.
10. В чому полягає фізіологічна дія електричного струму? Охарактеризуйте залежність порогової сили електричного струму від тривалості його впливу?

#### **Оберіть правильну відповідь:**

1. Для здійснення електрофорезу використовують:  
А. постійне магнітне поле  
Б. змінне магнітне поле  
В. постійний електричний струм

- Г. змінний електричний струм
- Д. електромагнітні хвилі

2. Активний опір відрізняється від реактивного тим, що

- А. зумовлює виділення теплоти в навколишнє середовище
- Б. залежить від частоти коливання електричної напруги
- В. залежить від індуктивності електричного ланцюга
- Г. залежить від ємності електричного ланцюга
- Д. залежить від ємності і індуктивності ланцюга

3. Біологічні тканини мають такі види електричного опору:

- А. ємнісний і індуктивний
- Б. активний і ємнісний
- В. активний і індуктивний
- Г. тільки активний
- Д. тільки індуктивний

4. Постійний струм відрізняється від змінного струму тим, що:

- А. він має постійну частоту коливань
- Б. він має постійну амплітуду коливань
- В. він має постійну частоту і амплітуду коливань
- Г. не змінюється у часі за силою і напрямком
- Д. постійно змінює амплітуду і напрямком

5. З якого електроду хворому потрібно вводити за допомогою електрофорезу новокаїн, частинки якого мають позитивний заряд:

- А. з відвідного
- Б. з обох електродів
- В. з катоду
- Г. з аноду
- Д. не має значення

6. На дії постійного струму заснований такий метод терапії:

- А. діатермія
- Б. гальванізація
- В. індуктотермія
- Г. реографія
- Д. дарсонвалізація

7. Реографічне дослідження проводять за допомогою:

- А. високочастотного ультразвуку
- Б. постійного електричного струму
- В. змінного струму низької частоти
- Г. змінного струму високої частоти
- Д. низькочастотного ультразвуку

8. Найбільший електричний опір має:

- А. кров                      Б. суха шкіра                      В. м'яз  
Г. печінка                      Д. лімфа

9. Імпеданс - це:

- А. силова характеристика магнітного поля  
Б. густина змінного електричного струму  
В. силова характеристика електричного поля  
Г. повний опір ланцюгу змінного струму  
Д. енергетична характеристика електричного поля

10. Реографію застосовують для:

- А. вимірювання в'язкості крові  
Б. визначення кровонаповнення органів  
В. вимірювання швидкості крові  
Г. введення ліків через неушкоджену шкіру  
Д. лікування больових синдромів

## 12. МАГНІТНЕ ПОЛЕ, ЙОГО ВПЛИВ НА ОРГАНІЗМ ЛЮДИНИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ В МЕДИЦИНІ

### *Магнітне поле та його силові характеристики*

Магнітне поле, подібно до електричного поля, створюється електричними зарядами. Ці поля є складовими частинами єдиного електромагнітного поля. Проте магнітне поле виникає тільки навколо рухомих зарядів або провідників, в яких тече електричний струм. Джерелами магнітного поля є також намагнічені об'єкти. Магнітне поле проявляється силовим впливом на рухомі електричні заряди.

Силовий характеристикою магнітного поля є *магнітна індукція*  $\vec{B}$ . Для її вимірювання можна внести в магнітне поле пробний електричний заряд  $q$ , який рухається в ньому з деякою швидкістю. Магнітна індукція є векторної величиною. Її абсолютне значення дорівнює силі  $\vec{F}$ , що діє на поодинокий електричний заряд  $q$ , який рухається з одиничною швидкістю  $\vec{v}$  в напрямку, перпендикулярному напрямку магнітної індукції:

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{q \cdot v_{\perp}}$$

Одиницею вимірювання магнітної індукції є *Тесла (Тл)*.

Напрямок вектора магнітної індукції можна визначити за «правилом лівої руки»: якщо чотири витягнутих пальці лівої руки вказують напрямок руху позитивного заряду  $q$ , а великий палець, відхилений на  $90^{\circ}$ , вказує напрямок дії на цей заряд сили  $\vec{F}$ , то вектор магнітної індукції входить у долоню.

Напрямок дії магнітних сил можна зобразити графічно за допомогою *ліній магнітної індукції*. Так називають уявні лінії, дотичні до яких в кожній з точок поля збігаються з напрямом вектора магнітної індукції в цих точках. Лінії магнітної індукції замкнені самі на себе.

У випадку, коли електричний струм тече по прямолінійному провіднику, лінії магнітної індукції представляють собою окружності, розташовані в площині, перпендикулярній провідникові (рис. 12.1). Напрямок цих ліній визначається правилом правого гвинта. Магнітні поля із замкнутими силовими лініями називаються *вихровими*. Вони не є потенціальними, оскільки неможливо приписати точкам поля певну потенціальну енергію.



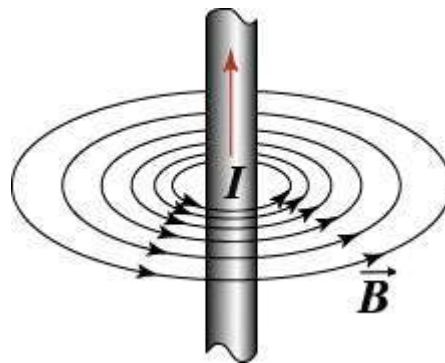


Рис. 12.1 Силкові лінії магнітного поля провідника з електричним струмом

Величина магнітної індукції залежить не тільки від джерела магнітного поля, але й від властивостей тих речовин, що у ньому знаходяться. Тому використовують також допоміжну характеристику магнітного поля - *напруженість*. Вона залежить лише від джерела поля і залишається незмінною незалежно від того, яке середовище заповнює поле. Величина напруженості визначається рівнянням:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu}$$

У даному рівнянні  $\vec{B}$  – магнітна індукція,  $\mu_0$  - магнітна постійна,  $\mu$  - відносна магнітна проникність середовища. Вона показує, у скільки разів у ньому при одному і тому ж джерелі магнітного поля його індукція більша або менша, ніж у вакуумі.

За своїми характеристиками магнітні поля бувають *постійними*, *змінними* та *імпульсними*.

***Дія магнітного поля на провідник з електричним струмом і на рухомий електричний заряд***

На провідник, в якому тече електричний струм, магнітне поле діє *сила Ампера*. Її величина залежить от величини магнітної індукції поля  $\vec{B}$  і від характеристик провідника. Він може мати різні довжину і форму. Тому для визначення сили Ампера в провіднику виділяють досить малі ділянки  $d\vec{l}$ , які можна вважати прямолінійними і розглядати як вектори, спрямовані у бік електричного струму. Вираз  $I \cdot d\vec{l}$  називають *елементом струму*. Для кожного елемента визначають силу Ампера за рівнянням:

$$d\vec{F} = k \cdot I d\vec{l} \cdot \vec{B} \cdot \sin \beta$$

В цьому рівнянні  $\beta$  – кут між елементом струму і вектором магнітної індукції поля.

Сила магнітного поля, що діє на одиночний рухомий електричний заряд, називається *силою Лоренца*  $F_L$ . Вона описується наступним рівнянням:

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \cdot \vec{B} \cdot \sin \beta$$

в якому  $q$  - величина заряду,  $\vec{v}$  - швидкість його переміщення,  $\vec{B}$  - магнітна індукція,  $\beta$  - кут між векторами  $\vec{v}$  і  $\vec{B}$ :

Сила Лоренца завжди перпендикулярна площині, в якій лежать вектори швидкості і магнітної індукції. Ця сила змінює лише напрямок руху частинки, але не її швидкість. Сила Лоренца дає можливість управляти потоками елементарних частинок, зокрема електронів, за допомогою магнітних полів. За їх допомоги можна змінювати напрямок руху пучка електронів і виробляти його фокусування (подібно заломлення світлового променя лінзами). Пристрої, що застосовуються при цьому, називають *електронними лінзами*. Управління потоком електронів за допомогою магнітного поля використовується в багатьох приладах, починаючи з побутових телевізорів і закінчуючи електронними мікроскопами.

### ***Магнітне поле навколо провідника зі струмом***

Навколо провідника, по якому тече електричний струм, виникає магнітне поле, індукцію якого в будь-якій точці, розташованій на відстані  $r$  від елемента струму  $I d\vec{l}$ , можна знайти використовуючи закон *Біо-Савара-Лапласа*:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{l} \cdot \sin \alpha}{r^2}.$$

### ***Магнітне поле електричного струму в замкненому контурі.***

#### ***Магнітний момент***

Припустимо, електричний струм тече по замкненому контуру і породжує магнітне поле, яке залежить від сили струму  $I$  в контурі і площі  $S$ , яку охоплює контур. Його характеристикою є *магнітний момент*  $P_m$ :

$$P_m = I S.$$

*Магнітний момент* - векторна величина. Він спрямований перпендикулярно площині контуру і пов'язаний з напрямком сили струму правилом правого гвинта. При розміщенні такого контуру в магнітному полі, він обертається під дією магнітних сил до тих пір, поки вектор його

магнітного моменту і вектор магнітної індукції поля не співпадуть у напрямку. Поняття магнітного моменту є важливим для пояснення магнітних властивостей різних речовин. У всіх них змінюється стан у магнітному полі. Однак це відбувається по-різному в залежності від будови їх атомів і молекул.

### *Магнітні властивості тіл*

Кожен електрон, який має елементарний негативний заряд, рухається в атомі по своїй орбіталі. Цей рух можна розглядати як електричний струм у замкнутому контурі. Кожен електрон має *орбітальний магнітний момент*  $P_{m.orb}$ :

$$P_{m.orb} = \frac{e \cdot v \cdot r}{2}$$

$e$  – заряд електрону,  $v$  – швидкість його руху,  $r$  – радіус орбіталі.

Електрон має також *власний магнітний момент*, який називається спіновим  $P_{m.s}$ .

Власні магнітні моменти мають також інші елементарні частинки атому - протони і нейтрони, які утворюють ядро. Магнітні моменти цих частинок складають магнітний момент ядра.

Магнітний момент атома в цілому дорівнює векторній сумі магнітних моментів його ядра і всіх електронів, які утворюють його оболонку. Таким же чином магнітний момент молекули дорівнює векторній сумі магнітних моментів атомів, що входять до її складу.

Усі речовини, поміщені в магнітне поле, набувають магнітних властивостей, тобто намагнічуються. За своєю здатністю намагнічуватися речовини діляться на три класи: *діамагнетики*, *парамагнетики* і *феромагнетики*.

До *діамагнетиків* відносять більшість речовин, зокрема багато хімічних елементів (вуглець, фосфор, сірка, золото, мідь та ін.), а також вода й переважна частина органічних сполук. У діамагнетиків за відсутності зовнішнього магнітного поля орбітальні, спінові та ядерні магнітні моменти взаємно компенсуються. Внаслідок цього сумарні магнітні моменти атомів і молекул діамагнетиків дорівнюють нулю. При розміщенні їх у зовнішньому магнітному полі в атомах виникають магнітні моменти, спрямовані протилежно зовнішньому полю, магнітна індукція якого внаслідок цього зменшується. Відносна магнітна проникність діамагнетиків менше одиниці. При видаленні діамагнетиків із зовнішнього поля індуквані магнітні

моменти атомів зникають, і діамагнетик розмагнічується.

До *парамагнетиків* відносять ряд елементів (азот, кисень, алюміній та ін.). У парамагнетиків орбітальні, спінові та ядерні магнітні моменти не компенсують один одного, і тому їх атоми мають магнітні моменти, відмінні від нуля. При відсутності зовнішнього магнітного поля, магнітні моменти окремих частинок парамагнетика орієнтовані хаотично. Внаслідок цього речовина в цілому не має магнітних властивостей. При розміщенні парамагнетика в зовнішньому магнітному полі, магнітні моменти його атомів орієнтуються переважно в напрямку цього поля, і воно посилюється. Відносна магнітна проникність парамагнетиків більше одиниці. В частинках парамагнетиків, поміщених у магнітне поле, виникає також діамагнітний ефект, але він не проявляється на тлі більш сильного парамагнітного ефекту.

До *феромагнетиків* відносяться метали: залізо, кобальт, нікель. Для них характерна здатність у багато разів підсилювати зовнішнє магнітне поле. Відносна магнітна проникність феромагнетиків значно більше одиниці. Крім того, вона непостійна і залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Особливості феромагнетиків пояснюються тим, що в них є великі області, утворені групами атомів з однаковим напрямком магнітних моментів – *домени*. Їх орієнтація відповідно силовим лініям зовнішнього магнітного поля значно його посилює, а при винесенні феромагнетиків з поля вони зберігають стан намагніченості.

Біологічні молекули в значній більшості є діамагнетиками. Однак в біологічних тканинах виявлені також парамагнетики, прикладами яких є вільні радикали, і феромагнітні частинки.

### ***Електромагнітна індукція***

У дії магнітних полів на живі організми, окрім магнітних властивостей біологічних молекул, має значення явище *електромагнітної індукції*. Припустимо, в замкненому провідному контурі тече електричний струм. Навколо цього контуру виникає магнітне поле, потік індукції ( $\Phi$ ) якого залежить від сили струму в контурі:  $\Phi = LI$ . Величина L - індуктивністю контуру, яка залежить від його розмірів, форми і магнітної проникності середовища і вимірюється в Генрі (Гн).

При зміні величини магнітного потоку, в контурі виникає електрорушійна сила  $\mathcal{E}_i$  і тече *індукційний електричний струм*. Це явище називається *електромагнітною індукцією*. Відповідно до основного закону

електромагнітної індукції (закона Фарадея), величина  $\varepsilon_i$  пропорційна швидкості зміни потоку магнітної індукції  $\Phi$ :

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Негативний знак в рівнянні закону Фарадея відображає правило Ленца, згідно з яким індукційний струм спрямований так, що його власне магнітне поле протидіє зміні первинного магнітного поля, яке викликало цей індукційний струм.

### *Електромагнітні хвилі*

Для виникнення електромагнітної хвилі досить порушити в будь-якій точці простору змінне електричне або змінне магнітне поле. Тоді взаємно пов'язані електричне та магнітне поля будуть поширюватися в просторі у вигляді електромагнітної хвилі (рис. 12.2). Її швидкість залежить від природи середовища (у вакуумі 300000 км / с).

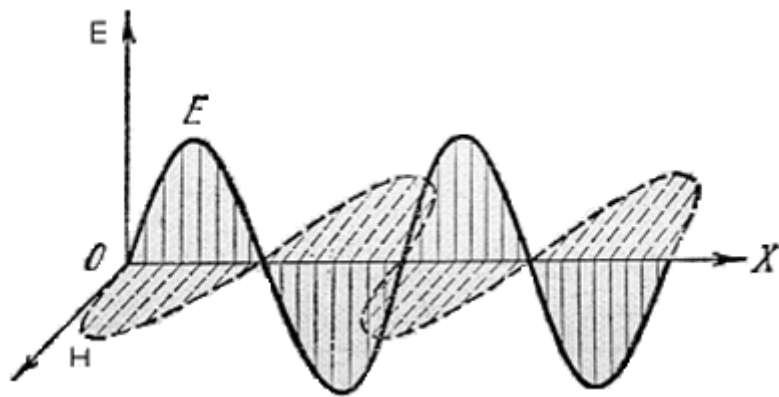


Рис. 12.2 Електромагнітна хвиля

Теоретичні уявлення про електромагнітні хвилі обґрунтував Дж. Максвелл. Його теорію можна в найбільш загальному вигляді звести до двох основних положень.

1). Зміна магнітного поля в будь-якій точці простору викликає появу в суміжних точках так званого вихрового електричного поля, яке також змінюється в часі. Його силові лінії замкнені, охоплюють силові лінії магнітного поля і розташовані в перпендикулярній до них площині. Таке вихрове електричне поле було названо струмом зміщення.

2). Зміна електричного поля в будь-якій точці простору викликає появу в суміжних точках змінного вихрового магнітного поля. Його силові лінії

також охоплюють лінії електричного поля і розташовані в перпендикулярній до них площині.

3). Теорія Максвелла викладена у вигляді системи диференціальних рівнянь. Їх рішення призводить до гармонічних функцій, які описують коливання векторів напруженості електричного ( $\vec{E}$ ) і магнітного ( $\vec{H}$ ) полів в електромагнітній хвилі:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\max} \cdot \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_{\max} \cdot \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

У наведених рівняннях  $\vec{E}_{\max}$  і  $\vec{H}_{\max}$  – амплітуди коливань вказаних вище векторів,  $\omega$  – їх циклічна частота,  $t$  – час,  $x$  – відстань від джерела хвилі до точки, в якій вони визначаються,  $v$  – швидкість поширення електромагнітної хвилі. Таким чином, вектори напруженостей електричного і магнітного полів коливаються в електромагнітній хвилі по гармонічному закону. Їх коливання збігаються по фазі, але відбуваються у взаємно перпендикулярних площинах.

Залежно від частоти (і довжини) електромагнітні хвилі поділяють на

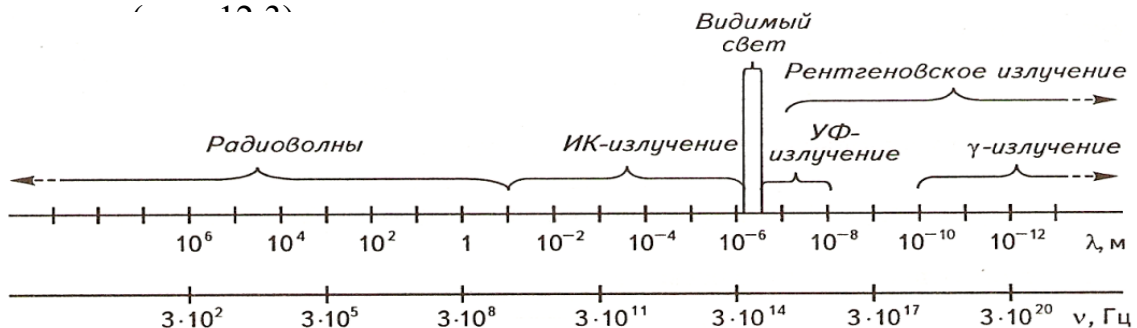


Рис. 12.3 Шкала електромагнітних хвиль

### ***Вплив магнітних полів на організм людини***

В навколишньому середовищі існують *природні* і *штучні* магнітні поля. Природне магнітне поле – це *геомагнітне поле* Землі. Його характеристики коливаються в зв'язку зі сонячною активністю. Штучні магнітні поля техногенні. Вони виникають в результаті виробничої діяльності людини, а також створюються у медичних приладах для терапевтичних впливів на організм або діагностики стану його органів.

Земля має власну магнітну оболонку - *магнітосферу*. Сучасна теорія пов'язує її походження з електричними струмами в зовнішньому ядрі Землі на глибині 2900-5100 км. Індукція геомагнітного поля становить в середніх широтах близько 50мкТл.

Характеристики геомагнітного поля не завжди стабільні. Найбільші їх зміни називають *магнітними бурями*, які виникають під час спалахів сонячної активності і пов'язані з впливом сонячного вітру. Він утворений двома типами випромінювань Сонця. Перше з них, *електромагнітне випромінювання* складається з електромагнітних хвиль широкого частотного діапазону. Другою складовою сонячного вітру є *корпускулярне випромінювання*, яке утворено позитивними іонами гелію і водню та електронами, а також частинками високих енергій, які вивільняються під час сонячних спалахів.

В періоди помірної сонячної активності магнітосфера Землі ефективно захищає планету від сонячного вітру. При спалахах на Сонці магнітосфера «стискається», що призводить до виникнення магнітних бур.

Сильні магнітні бурі здатні впливати на здоров'я людей. Статистичними методами доведено, що у періоди збільшення сонячної активності відбувається зростання частоти нещасних випадків і травматизму, що можна пояснити високою чутливістю нервової системи до дії електромагнітних факторів. Показано, що магнітні бурі викликають погіршення загального самопочуття людей, збільшення числа серцевих нападів, інсультів, приступів епілепсії, психічних порушень і т.п.

Медичне значення також має проблема впливу на здоров'я людей техногенних магнітних полів. Такі поля створюються високовольтними лініями електропередач, електрифікованим транспортом, промисловими і побутовими електротехнічними приладами і т.п. Техногенні поля характеризуються набагато більшою інтенсивністю, ніж геомагнітне поле, і нерівномірною локалізацією в просторі. Вони можуть перевищувати варіації геомагнітного поля в тисячу і більше разів. Тому негативні наслідки впливу техногенних магнітних полів можуть бути дуже істотними.

### ***Біофізичні механізми впливу магнітних полів на організм людини***

Існує багато даних, які свідчать про можливий вплив магнітного поля на молекули і клітини організму. Біологічні тканини утворені, головним чином, діамантними речовинами (вода і практично всі органічні речовини).

В них присутні лише в невеликих концентраціях парамагнітні частинки, зокрема вільні радикали. Магнітні поля здатні змінювати властивості діамагнітних і парамагнітних атомів і молекул. Ці зміни називають *діамагнітними і парамагнітним ефектами*. Припускають, що вони можуть бути основою впливу магнітних полів на більш складні структури надмолекулярного рівня (наприклад, мембрани, органели клітин та ін.), на клітини, тканини, органи і їх системи та організм в цілому. Показана чутливість до магнітних полів таких біологічно важливих молекул як ДНК, РНК, АТФ, багатьох ферментів.

Магнітні поля можуть впливати на тканини організму, здійснюючи силовий вплив на рухливі іони. Змінні і імпульсні поля викликають появу індукційних струмів. Цей механізм дії магнітних полів на біологічні тканини називають *механізмом викликаних струмів*. Слабкі магнітні поля викликають в біологічних тканинах мікроструми іонів, що змінює швидкість метаболічних процесів, проникність мембран клітин, швидкість доставки реагентів в клітину і т.п. Магнітні поля більшою напруженості можуть викликати індукційні струми, сила яких перевищує порогові значення для збудження нервових, м'язових і залізистих клітин організму.

В організмі людини найбільш чутливими до дії магнітного поля є нервова, серцево-судинна та ендокринна системи. Чутливими до нього є також органи відчуття.

### ***Застосування дії магнітного поля в медицині***

Існує метод *магнітотерапії*, при якому на тіло пацієнта дистанційно впливають постійним або змінним низькочастотним магнітним полем. При цьому не відбувається суттєвого виділення тепла у тканинах, однак відбуваються певні зміни на клітинному і молекулярному рівнях. Для проведення магнітотерапії використовують постійні магніти або котушки індуктивності (частіше). На них подається змінна електрична напруга, яка викликає появу змінного магнітного поля. Воно є більш ефективним, ніж постійне.

Магнітотерапія при місцевому застосуванні має виражену протизапальну, знеболюючу, протинабрякову дію. На системному рівні найчастіше використовують дію магнітних полів на центральну нервову систему, обмін речовин, функції крові та імунні процеси.



Одним із сучасних методів лікування і діагностики, в якому використовується магнітне поле, є *магнітостимуляція*. Імпульсний електричний струм високої сили пропускають через котушку індуктивності, яка знаходиться поблизу тіла пацієнта. У ній виникає магнітне поле, яке індукує в тканинах електричний імпульс. Його сила може бути достатньою для збудження нервових і м'язових клітин. Магнітостимуляцію застосовують для діагностичного дослідження збудливості нервової і м'язової систем, а також для лікування низки захворювань.

### ***Магнітні поля тіла людини***

Магнітні поля існують у самих біологічних об'єктах, в тому числі в тілі людини. Їх походження пов'язано, головним чином, з процесами збудження в нервових і м'язових клітинах. В процесі збудження виникають потенціали дії. Через плазматичні мембрани течуть електричні струми. Вони і є джерелом магнітних полів. Такі поля є в багато разів слабкішими, ніж магнітне поле Землі, а також техногенні магнітні поля, проте можуть бути зареєстровані дистанційно за допомогою спеціальних високочутливих датчиків.

Метод дослідження серцевої діяльності, який заснований на реєстрації магнітного поля серця, має назву *магнітокардіографія (МКГ)*. МКГ відображає різні фази збудження серцевих клітин в передсердях і шлуночках.

На відміну від ЕКГ, МКГ є безконтактним методом і не потребує накладення електродів. Комп'ютерні програми дозволяють обробляти вимірювання магнітного поля серця у великій кількості точок.

*Магнітоенцефалографія (МЕГ)* - метод вимірювання і візуалізації надслабких магнітних полів головного мозку. Вони виникають в результаті електричної активності нервових клітин і відображають функціональний стан різних відділів головного мозку. Метод МЕГ безконтактний. Магнітне поле головного мозку має дуже маленьку індукцію. Воно значно слабкіше зовнішніх техногенних полів. Тому при реєстрації МЕГ використовують спеціальні магнітоекрануючі камери.

### **Оберіть правильну відповідь:**

1. Магнітне поле відрізняється від електричного тим, що воно:
  - А. чинить силовий вплив на електричні заряди
  - Б. діє тільки на рухомі електричні заряди

- В. може бути представлено силовими лініями
- Г. може бути використано у медичній практиці
- Д. може бути зареєстровано за допомогою приладів

2. Одиницю вимірювання силової характеристики магнітного поля служить:

- А. Кулон
- Б. Ампер
- В. Генри
- Г. Тесла
- Д. Фарад

3. Магнітне поле діє на рухомий електричний заряд силою:

- А. Паскаля
- Б. Біо-Савара-Лапласа
- В. Лоренца
- Г. Ампера
- Д. Ньютона

4. Сила Лоренца застосовується в такому приладі:

- А. електронний осцилограф
- Б. електронний стимулятор
- В. електронний мікроскоп
- Г. електронний генератор
- Д. електронний підсилювач

5. Одиницю вимірювання напруженості магнітного поля служить:

- А. Кулон
- Б. Вебер
- В. Ампер/метр
- Г. Тесла
- Д. Вольт/метр

6. Основний вклад в магнітний момент атома вносять магнітні моменти:

- А. тільки протонів ядра
- Б. тільки нейтронів ядра
- В. протонів і нейтронів
- Г. неспарених електронів
- Д. спарених електронів

7. Атоми таких речовин у зовнішньому магнітному полі набувають магнітного моменту, спрямованого проти цього поля:

- А. діелектрики
- Б. провідники
- В. діамагнетики
- Г. парамагнетики
- Д. феромагнетики

8. Вода і більшість органічних речовин за магнітними властивостями є:

- А. феромагнетиками
- Б. діамагнетиками
- В. парамагнетиками
- Д. діелектриками
- Г. напівпровідниками

9. В цьому методі використовують дію імпульсних магнітних полів на органи:

- А. магнітокардіографія
- Б. магнітоенцефалографія
- В. магнітотерапія
- Д. магнітостимуляція
- Г. магнітографія

10. Найбільш ефективно діє на органи і тканини тіла людини магнітне поле певної напруженості, якщо воно:

- А. постійне
- Б. змінне
- В. імпульсне
- Г. вихрове

### 13. ОСНОВИ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Оптика вивчає природу світла, закономірності світлових явищ і взаємодію світла з речовиною. Оптику прийнято ділити на геометричну і фізичну (хвильову і квантову).

Геометрична оптика нехтує фізичною природою світла і вивчає його поширення на основі геометричних понять. Цей розділ оптики допомагає вирішувати багато проблем, які мають прикладне значення.

Фізична оптика складається з хвильової і квантової, що зумовлено подвійною природою світла. Воно одночасно представляє собою потік електромагнітних хвиль і фотонів – квантів електромагнітного випромінювання, які мають певні властивості частинок.

#### *Основні закони геометричної оптики*

В геометричній оптиці використовують поняття *світловий промінь* – це лінія, що вказує напрям поширення світла. Сукупність променів утворює пучок світла.

Геометрична оптика ґрунтується на чотирьох основних законах: закон прямолінійного поширення світла в однорідному середовищі, закон незалежності світлових променів і закони відбивання і заломлення світла.

*Закон відбивання* світла вказує, що падаючий промінь, відбитий промінь і перпендикуляр, опущений в точку падіння променя на границі двох середовищ, лежать в одній площині; кут падіння  $\alpha$  дорівнює куту відбивання  $\alpha_1$  (рис. 13.1).

При переході світла з одного середовища в інше, відмінне від першого за своїм оптичним властивостям, світло змінює напрямок, тобто заломлюється (рис. 13.1). *Закон заломлення* вказує, що промінь падаючий, перпендикуляр до точки його падіння і заломлений промінь лежать в одній площині. Для будь-яких двох даних середовищ (1 і 2) відношення синуса кута падіння  $\alpha$  до синуса кута заломлення  $\beta$  є сталою величиною, яка називається *відносним показником заломлення середовищ*  $n_{21}$ :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \text{const} = n_{21}$$

Причиною заломлення світла є різні швидкості світла у різних середовищах. Тому величину відносного показника заломлення  $n_{21}$  визначають за формулою:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

де  $v_1$  і  $v_2$  - швидкості світла в середовищах 1 і 2.

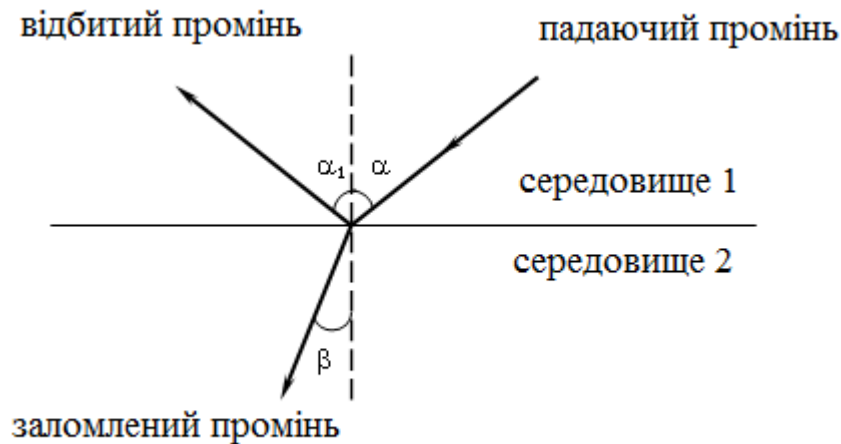


Рис. 13.1 Відбивання і заломлення світла

Оптичні властивості кожного середовища характеризує його *абсолютний показник заломлення* - відношення швидкості світла у вакуумі  $C$  до швидкості світла в даному середовищі  $v$ :

$$n = \frac{C}{v}$$

Середовище, що має більшу величину абсолютного показника заломлення порівняно з іншим середовищем, називають оптично більш густим.

### ***Повне внутрішнє відбивання***

Повне внутрішнє відбивання відбувається у випадку переходу світла з оптично більш густого середовища в оптично менш густе, наприклад, з води в повітря (рис. 13.2). В таких умовах кут заломлення світла буде більшим, ніж кут падіння. Якщо промінь падає на границю розділу середовищ під порівняно невеликим кутом, частина світла відбивається, а інша його частина заломлюється (через точки b, c, d). Кут падіння світла, якому відповідає кут заломлення  $90^\circ$  (точка e), називається *граничним кутом повного внутрішнього відбивання* ( $\alpha_{гр}$ ).

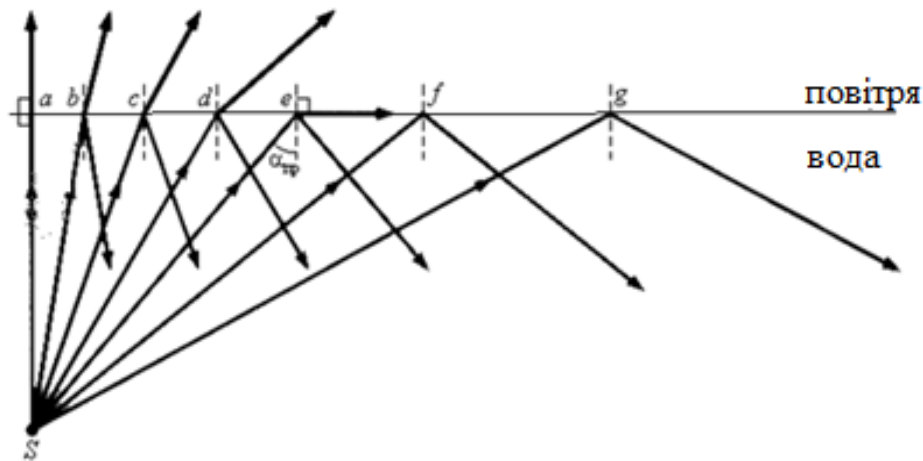


Рис. 13.2 Повне внутрішнє відбивання світла

Подальше збільшення кута падіння приводить до того, що світло повністю відбивається в середовище, де знаходиться джерело світла (точки f, g). Це явище є *повним внутрішнім відбиванням*.

Визначення граничного кута дозволяє визначати відносний показник заломлення двох середовищ, а також абсолютний показник заломлення одного з середовищ, якщо показник заломлення другого середовища відомий.

При граничному куті падіння: 
$$\frac{\sin \alpha_{cp}}{\sin 90^\circ} = n_{21}$$

Оскільки  $\sin 90^\circ = 1$ ,  $\sin \alpha_{cp} = n_{21}$

Оптичний прилад, який дозволяє визначити відносний або абсолютний показник заломлення розчину за граничним кутом повного внутрішнього відбивання, називається *рефрактометром*. В рефрактометрії на основі показника заломлення розчину визначають його концентрацію.

### ***Волоконна оптика. Ендоскопія***

Феномен повного внутрішнього відбивання є фізичною основою *волоконної оптики*. В ній застосовують тонкі гнучкі волокна, зроблені з пластмаси або скла. Їх поверхня покрита спеціальною речовиною, яка має менший показник заломлення, ніж матеріал волокна. В результаті цього на границі скло - речовина при досить великому куті падіння світла відбувається його повне внутрішнє відбивання.

Світло здатне поширюватися уздовж всієї довжини волокна, навіть якщо воно зігнуто, і доходить до його кінця, не послаблюючись після багаторазового відбиття. Таким чином, волокно ефективно передає світлову енергію на значну відстань (рис. 13.3).

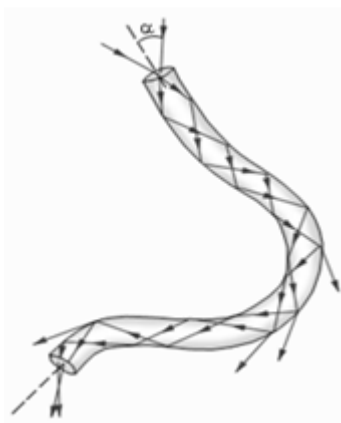


Рис. 13.3 Повне внутрішнє відбивання в скляному волокні. Ендоскоп

Світловоди застосовуються в *медичній ендоскопії*. Ендоскопічні методи дослідження широко використовуються як для діагностики, так і для лікування різних захворювань.

### *Лінзи*

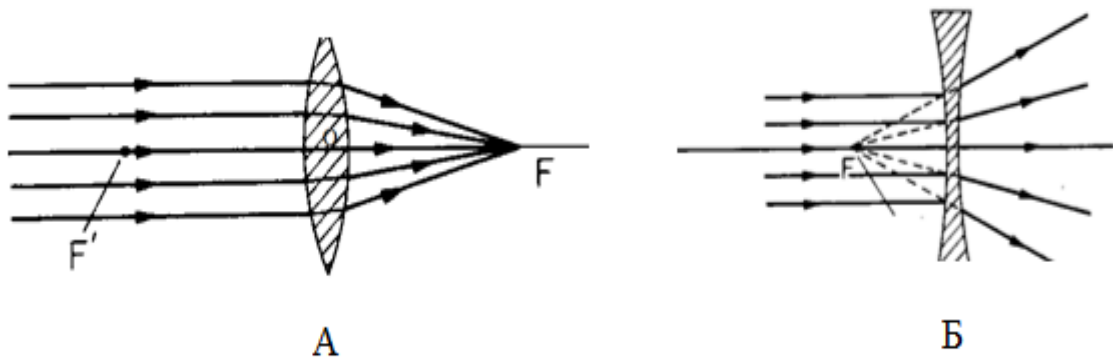
Лінзи використовуються для зміни напрямку світлових променів в оптичних системах з ціллю побудови зображень. *Лінзою* називається прозоре тіло, обмежене двома сферичними поверхнями, яке за показником заломлення відрізняється від навколишнього середовища. Існують *збірні* і *розсівні* лінзи.

Пряма, що проходить через центри сферичних поверхонь, які обмежують лінзу, називається *головною оптичною віссю*.

Для зручності розгляду використовують поняття тонкої лінзи, тобто такої, товщиною якої можна знехтувати. В тонкій лінзі заломлення променів відбувається в одній площині, яка називається *заломлюючою*. Точка перетину головної оптичної осі з заломлюючою площиною називається *оптичним центром лінзи*. Промені, що проходять через нього в різних напрямках, не заломлюються.

Пучок променів, що падають на тонку збірну лінзу паралельно її головній оптичній осі збирається на ній в одну точку після проходження через лінзу. Така точка називається *головним фокусом* лінзи  $F$  (рис. 13.4, А). Існують два головних фокусів по обидві сторони лінзи – *передній* і *задній*.

В розсівній лінзі паралельний пучок променів після заломлення розсіюється (рис. 13.4, Б). Продовження цих променів збираються в одній точці - *уявному фокусі*.



Відстань між оптичним центром лінзи і її головним фокусом, називається *фокусною відстанню* ( $f$ ). Величина, обернена фокусній відстані лінзи, називається її оптичною силою  $D$  :

$$D = \frac{1}{f}$$

Одиницею вимірювання оптичної сили лінзи є *діоптрія*. Одна діоптрія - оптична сила лінзи, фокусна відстань якої дорівнює одному метру.

### ***Побудова зображення предмета за допомогою лінзи***

За допомогою збірних лінз можна отримувати зображення дійсні та уявні, прямі і перевернуті, збільшені і зменшені.

Припустимо, перед лінзою  $L$  знаходиться об'єкт  $AB$  (рис. 13.5). Його відстань до оптичного центру лінзи знаходиться даліше, ніж її фокус.

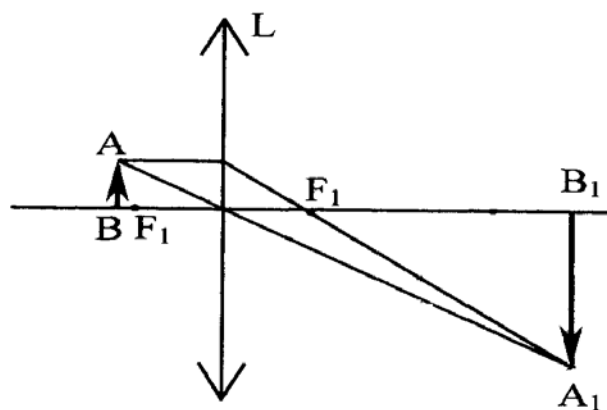


Рис. 13.5 Побудова дійсного зображення за допомогою збірної лінзи

Для того, щоб отримати зображенні точки об'єкта  $A$ , від неї слід провести через лінзу два променя. Один з них - паралельний її головній



оптичній осі. Після заломлення в лінзі він проходить через головний фокус. Другий промінь проводять через оптичний центр лінзи. Він не заломлюється. Перетин отриманих променів дасть зображення точки об'єкта  $A_1$ . Зображення  $A_1B_1$  є дійсним, перевернутим, збільшеним.

### **Хвильова природа світла**

Світло представляє собою *електромагнітну хвилю* – розповсюдження змінного електромагнітного поля у просторі.

Видиме світло представляє собою досить вузьку частину спектру електромагнітних хвиль, яка сприймається органом зору. Її границі - від 780 нм (червоне світло) до 400 нм (фіолетовий світло). Хвильова природа світла проявляється в таких явищах як інтерференція, дифракція і поляризація.

*Інтерференція* - це накладення когерентних хвиль у просторі, в результаті якого утворюється стійка картина їх посилення і ослаблення. *Когерентними* називають хвилі, які мають однакову частоту і постійну в часі різницю фаз. У природі не існує когерентних джерел світла, оскільки усі вони є сукупністю величезної кількості атомів, які випромінюють електромагнітні хвилі, не узгоджені між собою ні за частотою, ні за фазою. Для отримання когерентних хвиль «роздвоюють» пучок світла від одного джерела. Крім того, їх отримують за допомогою лазеру.

Світлові хвилі посилюють одна одну у випадку, коли геометрична різниця ходу дорівнює цілому числу довжин хвиль або парному числу півхвиль. Це є умовою *інтерференційного максимуму*:

$$\Delta d = k\lambda$$

$$\Delta d = 2k \frac{\lambda}{2}$$

де  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Хвилі послабляють одна другу, коли надходять в дану точку в протилежних фазах. В цьому випадку спостерігається *мінімум коливань*. Це відбувається тоді, коли геометрична різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль. Умова *мінімуму коливань*:

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Просторовий розподіл інтенсивності світла з максимумами і мінімумами, що чергуються між собою, називається *інтерференційною картиною*.

Явище інтерференції світла використовують для вимірювання дуже маленьких відстаней, порівняних з довжиною світлової хвилі. Існує інтерференційний мікроскоп, який дозволяє дуже точно вимірювати товщину гістологічного зрізу.

*Дифракція* - це відхилення світла від прямолінійного поширення при огинанні світловими хвилями перешкод, розміри яких сумірні з довжиною світлової хвилі, або країв вузьких щілин.

### **Оптична система мікроскопу**

Для спостереження малих об'єктів, які неможливо розглянути неозброєним оком, застосовують *мікроскоп*. Він представляє собою оптичну систему, що складається з короткофокусної збірної лінзи (об'єктива) і довгофокусної збірної лінзи (окуляра).

Хід променів у тубусі мікроскопа і формування збільшеного зображення об'єкта можна проілюструвати за допомогою схеми, представленої на рис. 13.6.

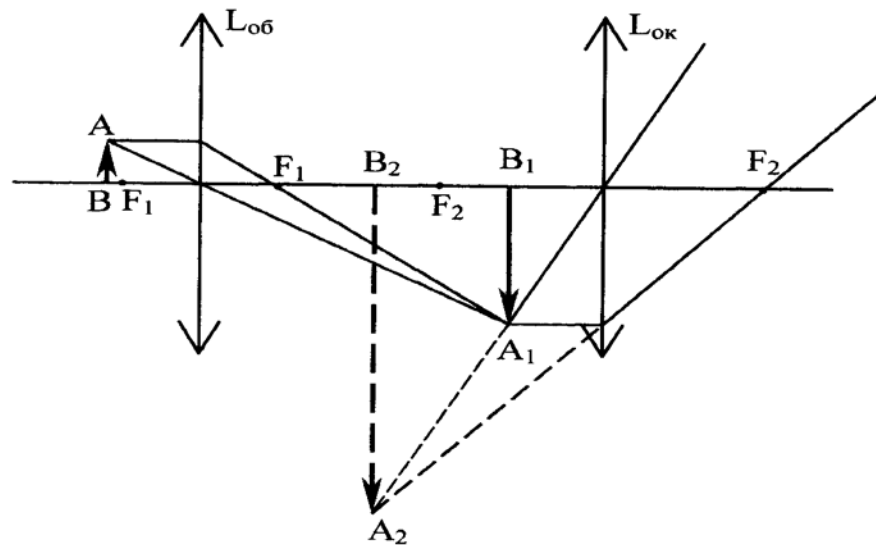


Рис. 13.6. Хід променів в світловому мікроскопі

Об'єкт  $AB$  знаходиться на відстані від об'єктива, яка трохи перевищує його фокусну відстань. Провівши два промені, один з яких проходить через оптичний центр, а інший паралельно головній оптичній осі, отримуємо точку  $A_1$ . Ця точка відповідає дійсному, збільшеному і перевернутому зображенню об'єкта  $A_1B_1$ . Таке зображення можна було би реально спостерігати на екрані, розташованому на відповідній відстані від об'єктива. Воно є проміжним

зображенням, яке розглядається за допомогою окуляра і має знаходитись на відстані від нього меншій, ніж його фокусна відстань. Тоді промені, що проходять через окуляр, розходяться. Це означає, що окуляр створює уявне і збільшене зображення об'єкта  $A_2B_2$ . Воно пряме щодо  $A_1B_1$ , однак перевернуте відносно АВ.

Таким чином, мікроскоп створює уявне, збільшене і перевернуте зображення об'єкта. АВ. Воно знаходиться від окуляра на *відстані найкращого бачення* (для нормального зору  $d=25$  см). Промені від окуляра перетинаються на сітківці ока, яке в цілому є збірною лінзою.

### ***Роздільна здатність мікроскопа, його загальне і корисне збільшення***

*Роздільна здатність мікроскопа* - це його здатність досліджувати дрібні деталі об'єкта, тобто відтворювати роздільне зображення близько розташованих його точок.

Роздільна здатність мікроскопа визначається його *межею розділення* ( $Z$ ) - найменшою відстанню між двома точками об'єкта, які в мікроскопі видні окремо:

$$Z = \frac{\lambda}{2 \cdot n \cdot \sin \theta}$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі світла в повітрі,  $n$  - показник заломлення середовища між об'єктивом лінзи і об'єктом, що досліджується,  $\theta$  - *апертурний кут*, тобто кут між крайнім променем конічного світлового пучка на вході в об'єктив і його оптичною віссю.

Роздільна здатність мікроскопа тим більша, чим менша його межа розділення, тобто тим дрібніші деталі об'єкта можна розглянути.

Загальне збільшення мікроскопа можна визначити, знаючи збільшення об'єктива та окуляра. Воно дорівнює добутку збільшення об'єктива на збільшення окуляра:  $K_M = K_{об} \cdot K_{ок}$

*Корисне збільшення* мікроскопа - максимальне збільшення, при якому чітко розрізняються всі деталі об'єкта, що досліджується. Обчислено, що межа розділення світлового мікроскопа складає близько 250 нанометрів, що дозволяє отримати корисне збільшення в 400 разів. Ця величина є граничною для звичайного світлового мікроскопа.

### ***Методи збільшення роздільної здатності мікроскопа***

*Введення імерсійного середовища.* Імерсією називається рідина між об'єктом і об'єктивом мікроскопа. Вона має показник заломлення більший,

ніж у повітря, і близький до показника заломлення об'єктива. В якості імерсії використовують кедрову олію ( $n=1,5$ ). Її застосування підвищує корисне збільшення мікроскопа.

*Використання більш коротких хвиль для освітлення об'єкта.* Цей метод здійснюється в ультрафіолетовому мікроскопі. Об'єкт освітлюють ультрафіолетом з довжиною хвилі 200 – 240 нм. В ультрафіолетових мікроскопах використовують оптику з кварцового скла, яке пропускає ультрафіолет. Також існують рентгенівські мікроскопи, в яких об'єкт «освітлюють» рентгенівськими променями. Ультрафіолетовий і рентгенівський мікроскопи потребують спеціальних регістраторів хвиль, що пройшли через об'єкт, оскільки вони не входять до діапазону видимого світла.

Максимальне підвищення корисного збільшення досягається в електронному мікроскопі, межа розділення якого досягає 0,1 нм.

*Електронний мікроскоп* - прилад, який дає можливість отримати зображення об'єктів з корисним збільшенням до мільйона разів. Воно досягається завдяки тому, що для «освітлення» об'єкту в електронному мікроскопі використовують пучок електронів.

Електрони характеризуються подвійною природою. Вони мають властивості частинок і хвиль. Це показав французький фізик, нобелівський лауреат Л.де Бройль. Електрону властива довжина хвилі ( $\lambda$ ), яка визначається рівнянням де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{\vec{P}} = \frac{h}{m \cdot \vec{v}}$$

В даному рівнянні  $h$  - константа Планка;  $P$  - імпульс електрона, який дорівнює добутку його маси  $m$  на швидкість  $v$ .

Корисне збільшення електронного мікроскопу в тисячі разів перевищує цей паразит у світлового мікроскопа внаслідок дуже малої довжини хвилі електронів.

### ***Поляризація світла***

Світло випромінюється окремими атомами. Коливання електричного вектора електромагнітної хвилі кожного з атомів в будь-який момент відбуваються в одній певній площині. В природному джерелі світла безліч атомів випромінюють незалежно один від одного. Це призводить до того, що воно хвилями, в яких коливання електричних векторів відбуваються в безлічі площин (рис. 13.7 а). Таке світло називається *природним*.

У випадку, коли коливання електричного вектора відбуваються переважно в одній певній площині, світло називається *плоскополяризованим* (рис. 13.7, б). Його отримання з природного світла називають *поляризацією світла*.

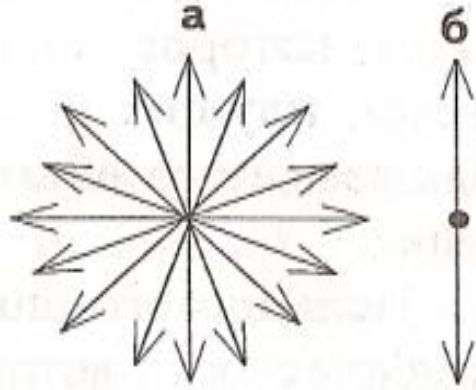


Рис. 13.7. Коливання векторів напруженості електричного поля в природному світлі (а) і в плоскополяризованому світлі (б)

Поляризацію можна спостерігати при відбиванні і заломленні світла, а також при проходженні його через анізотропні середовища (речовини, властивості яких неоднакові в різних напрямках).

При відбиванні світла відбитий промінь буде поляризований, якщо тангенс кута падіння  $i_B$  дорівнює відносному показнику заломлення двох середовищ (закон Брюстера):  $\text{tg } i_B = n_{21}$ .

Анізотропні властивості мають деякі кристали, у яких неоднакова відстань між атомами кристалічної решітки в різних напрямках. Це зумовлює неоднакову швидкість поширення в них світла. Прикладом таких кристалів є ісландський шпат ( $\text{CaCO}_3$ ). При падінні природного світла на кристал ісландського шпату відбувається *подвійне променезаломлення*, яке полягає в поділі світла на два світлових пучка, що йдуть у різних напрямках. Один з них називається *звичайним*, інший - *незвичайним*. Обидва промені повністю поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах.

### **Оптично активні речовини**

Деякі речовини мають *оптичну активність* - здатність повертати площину, в якій відбуваються коливання напруженості електричного поля плоскополяризованого світла. Такі речовини – *стереоізомери* – мають асиметричні молекули і можуть існувати в двох формах, які представляють собою якби дзеркальне відображення один одного. Їх прикладами є цукри,

амінокислоти та ін.

*Правообертальний ізомер (D- ізомер)* речовини обертає площину поляризації за годинниковою стрілкою, *лівообертальний (L- ізомер)* – проти годинникової стрілки. D- і L- ізомери однієї речовини однакові за хімічними властивостями, проте їх відмінності істотні в біологічному відношенні. Ферменти, що відрізняють субстрати за формою молекули, а також білки-переносники, які транспортують молекули оптично активних речовин, здатні розрізняти стереоізомери. Переважно в клітину потрапляють D-ізомери цукрів і L- ізомери амінокислот.

*Рацемічна суміш (рацемат)* - це суміш рівних кількостей двох оптичних ізомерів речовини. Така суміш не має оптичної активності. При синтезі оптично активних речовин утворюються рацемат, який при необхідності очищають від одного з ізомерів.

### ***Поляриметрія. Принцип роботи поляриметра***

*Поляриметрією* називається метод визначення концентрації оптично активних речовин в розчині за кутом повороту ним площини поляризації плоскополяризованого світла. Цей метод використовується для визначення чистоти лікарських препаратів, для вивчення біополімерів.

*Поляриметр* – прибор, який дозволяє виміряти кут обертання площини поляризації розчином оптично активної речовини. Принципова схема поляриметру представлена на рис. 13.8.

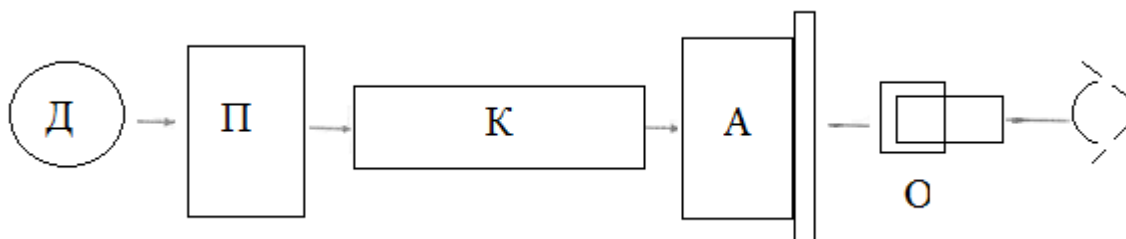


Рис. 13.8. Схема поляриметра: джерело природного світла (Д), поляризатор (П), кювета з розчином оптично активної речовини (К), аналізатор (А) і окуляр (О):

Двома найважливішими частинами поляриметра є поляризатор і аналізатор, кожен з яких представляє собою призму Ніколя або поляроїд – тонку плівку з нанесеними на неї в певному порядку кристалічними речовинами.

Поляризатор (П) утворює плоскополяризоване світло з однією

площиною коливання вектора напруженості електричного поля. Воно потрапляє на аналізатор (А). Світло повністю проходить через аналізатор, коли площина коливань у ньому однакова з площиною коливань поляризатору. У випадку перпендикулярного розміщення вказаних площин – світло повністю не проходить. При їх розташуванні під деяким кутом одна до іншої, світло проходить частково.

При відсутності оптично активної речовини в розчині, розміщеного в кюветі (К), напрямок площини поляризації при проходженні світла через кювету не змінюється. У випадку наявності в розчині такої речовини, наприклад глюкози, площина поляризації повернеться на деякий кут. За його величиною визначають концентрацію певної речовини в розчині:

$$C = \frac{\alpha}{[A] \cdot l}$$

де  $C$  - концентрація оптично активної речовини,  $\alpha$  - кут обертання площини поляризації в поляриметрії;  $[A]$  - питома кут обертання, що визначається природою речовини,  $l$  - довжина кювети.

### **Контрольні питання:**

1. Приведіть закони геометричної оптики.
2. Поясніть явище повного внутрішнього відбивання і опишіть його застосування в медицині.
3. Що таке лінзи, які їх види і характеристики Ви знаєте?
4. Охарактеризуйте правила побудови зображення за допомогою лінзи.
5. Охарактеризуйте світло як електромагнітну хвилю. В яких явищах проявляється хвильова природа світла.
6. Поясніть, що таке поляризоване світло, чим воно відрізняється від природного, як його можна отримати.
7. Охарактеризуйте призначення і принцип роботи поляриметра.
8. Поясніть принцип побудови зображення у світловому мікроскопі.
9. Що таке роздільна здатність і межа розділення мікроскопу?
10. Поясніть принцип роботи і велику роздільну здатність електронного мікроскопу.

### **Оберіть правильну відповідь:**

1. Визначте, яким буде кут заломлення, якщо світло проходить з середовища з меншою оптичною густиною в середовище з більшою оптичною густиною:

- А. збільшеним відносно кута падіння
- Б. зменшеним відносно кута падіння
- В. дорівнюватиме куту падіння
- Г. завжди буде дорівнювати 90 градусів
- Д. збільшеним або зменшеним відносно кута падіння

2. Граничний кут повного внутрішнього відбивання – це:

- А. кут заломлення, який дорівнює 90 градусів
- Б. кут відбивання, який дорівнює куту падіння
- В. кут падіння, при якому кут заломлення дорівнює 90 градусів
- Г. кут відбивання, який дорівнює 90 градусів
- Д. кут відбивання, який дорівнює куту заломлення

3. Визначте, яку зображення можна отримати за допомогою збірної лінзи, якщо об'єкт знаходиться від лінзи на відстані, меншій, ніж її фокусна відстань:

- А. дійсне, зменшене
- Б. мниме, збільшене
- В. дійсне, збільшене
- Г. мниме, зменшене
- Д. зображення не отримується

4. Визначте фокусну відстань збірної лінзи, якщо її оптична сила дорівнює десяти діоптріям:

- А. десять метрів
- Б. один метр
- В. одна десята метру
- Г. одна сота метру
- Д. сто метрів

5. Визначте оптичну силу лінзи, якщо її фокусна відстань дорівнює двом метрам.

- А. чотири діоптрії
- Б. дві діоптрії
- В. одна діоптрія
- Г. половина діоптрії
- Д. чверть діоптрії

6. Плоскополяризоване світло відрізняється від природного тим, що:

- А. воно може розповсюджуватись в одному напрямку
- Б. воно може розповсюджуватись в одній площині
- В. вектор напруженості електричного поля коливається в одній площині
- Г. воно представлено світловими хвилями однієї довжини



Д. вектор напруженості електричного поля коливається в одному напрямку

7. За допомогою поляриметра можна визначити:

- А. інтенсивність світлових хвиль
- Б. концентрацію речовин у розчині
- В. показник заломлення світла
- Г. показник поглинання розчину
- Д. ступень диспергованості розчину

8. При проходженні плоскополяризованого світла через оптично активні середовища відбувається:

- А. обертання площини поляризації
- Б. підсилення інтенсивності світла
- В. перетворення його у природне світло
- Г. зміни напрямку світлових променів
- Д. зміни швидкості розповсюдження хвиль

9. Роздільна здатність мікроскопу підвищується, якщо:

- А. використати розсівні лінзи замість збірних
- Б. збільшити межу розрізнення мікроскопу
- В. збільшити межу розрізнення окуляру
- Г. зменшити межу розрізнення мікроскопу
- Д. зменшити межу розрізнення окуляру

10. Роздільна здатність електронного мікроскопу вища, ніж у світлового мікроскопу, завдяки:

- А. великій довжині хвилі електрону
- Б. великому заряду електрона
- В. малому імпульсу електрона
- Г. малій довжині хвилі електрона
- Д. малій швидкості електрону

## 14. БІОФІЗИКА ЗОРУ. ЗОРОВІ РЕЦЕПТОРИ

Зір є тим відчуттям, за допомогою якого людина отримує більшу частину інформації про навколишнє середовище. Периферичним відділом зорового аналізатору служать очі. В них знаходяться рецептори, які перетворюють енергію світлових електромагнітних хвиль в енергію нервових імпульсів, що через провідні шляхи головного мозку потрапляють в проєкційні зони кори великих півкуль.

Очі людини мають досить складну будову. Вона забезпечує оптимальні умови для сприйняття світла рецепторами. Функції ока розглядають на основі уявлень геометричної і хвильової оптики.

### *Будова ока людини*

Очне яблуко складає в діаметрі приблизно 24 мм і має три оболонки: зовнішню, судинну і сітчасту (сітківку). Схема будови ока людини представлена на рис. 14.1.

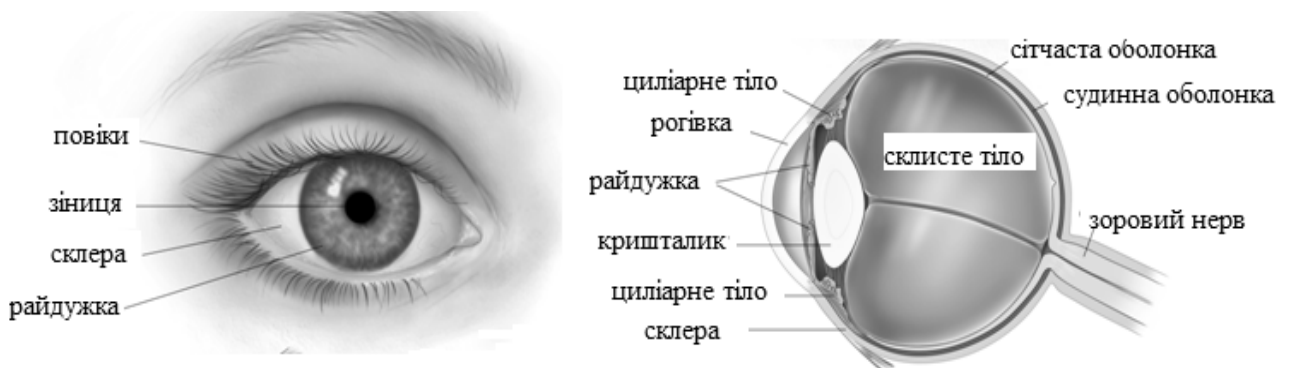


Рис. 14.1. Будова ока

Зовнішня оболонка складається з двох частин: її задня частина білого кольору (склера) непрозора. Вона забезпечує форму очей і захищає їх від пошкоджень. Передня частина зовнішньої оболонки (рогівка) прозора. Вона пропускає світло всередину очного яблука.

Судинна оболонка в своїй передній частині представлена райдужкою, отвір в якій називається зіницею. Райдужка містить пігмент, що визначає

колір очей. Діаметр зіниці може змінюватись, регулюючи потік світла, що надходить всередину очного яблука. Позаду зіниці знаходиться в'їччае (циліарне) тіло, в якому розташований циліарний м'яз. Судинна оболонка прилягає також до внутрішньої поверхні склери і містить велику кількість судин, що постачають очне яблуко кров'ю.

Сітківка прилягає до внутрішньої поверхні судинної оболонки. В ній знаходяться нервові клітини і фоторецептори - чутливі клітини, які сприймають світло. Існує два типи фоторецепторів - *палочки* і *колбочки*. В центральній ямці сітківки містяться лише колбочки. Така ямка є місцем найбільшої гостроти зору. Сліпа пляма позбавлена фоторецепторів. Це місце виходу зорового нерву з сітківки.

Усередині очного яблука знаходиться прозорий кришталік, який має вигляд двоопуклої лінзи. За допомогою цинової зв'язки він прикріплений до в'їчаеого тіла.

Простір між рогівкою і кришталіком заповнено водянистою вологою. Вона міститься в передній камері, яка знаходиться між рогівкою і райдужною оболонкою, і задню камеру - між райдужкою і кришталіком.

Позаду кришталіка знаходиться прозоре желеподібне склисте (склоподібне) тіло, яке заповнює очне яблуко зсередини.

### ***Заломлення світла оком***

Потрапляючи на око, світло проходить послідовно через чотири заломлюючі середовища: рогівку, водянисту вологу, кришталік, склисте тіло. Абсолютні показники їх заломлення не мають значних відмінностей. Вони складають 1,38 для рогівки, 1,33 для водянистої вологи, 1,40 для кришталіка і 1,34 для склистого тіла.

Найбільш значне заломлення світла (рефракція) відбувається на передній поверхні рогівки. Це пояснюється тим, що вона має невеликий радіус кривизни, а її показник заломлення в найбільшій мірі відрізняється від показника заломлення середовища - повітря, з якого надходить світло.

Здатність кришталіка заломлювати світло менша, ніж у рогівки, оскільки показник заломлення його речовини близький до показників заломлення оточуючих його рідин. Проте кришталік виконує дуже важливу функцію. Його оптична сила може змінюватись, що забезпечує пристосування зору до бачення об'єктів, розташованих на різних відстанях від ока.

### *Редуковане око*

Редуковане око є спрощеною моделлю реального ока (рис. 14.2). Редуковане око представлено однією лінзою. В ньому заломлюючі ефекти всіх поверхонь реального ока підсумовуються і зводяться до заломлення світла на передній поверхні цієї лінзи. Зображення об'єкта формується на її задній поверхні, яка відповідає сітківці ока.

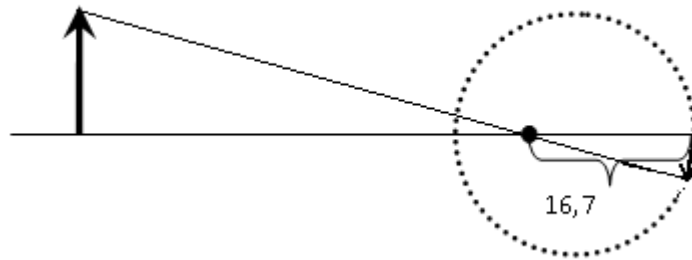


Рис. 14.2. Побудова зображення на сітківці редукованого ока

Редуковане око має головну оптичну вісь. На ній розташована центральна (кардіальна) точка на відстані 16,7 мм від сітківки. Промені світла проходять через цю точку без заломлення до сітківки, де утворюється дійсне, зменшене, перевернуте зображення об'єкта. Його сприйняття в нормальному положенні формується завдяки роботі головного мозку.

Оптична сила редукованого ока становить близько 58,8 діоптрій, довжина 23,4 мм, а показник заломлення 1,4. Редуковане око дозволяє робити обчислення, які мають значення в роботі офтальмохірурга.

### *Акомодація*

Для доброго бачення об'єкта необхідно, щоб його зображення формувалося точно на сітківці. Око не може одночасно чітко бачити далекі і близькі об'єкти. При переведенні погляду з далекого на близький об'єкт і назад потрібна зміна оптичної сили ока – *аккомодація*.

Найбільш віддалена точка, на яку фокусується око, називається *далекою точкою ока*. В нормі вона знаходиться в безмежності. Паралельні промені, що надходять в око від об'єкта, розташованого в дальній точці, фокусуються на сітківці. При цьому спостерігається *спокій аккомодації*.

Об'єкт видно в деталях, коли він встановлений якомога ближче до ока. Мінімальна відстань ясного бачення (*ближня точка ока*) при нормальному

зорі складає близько 7-9 см в 20-річному віці. При погляді у ближню точку апарат акомодатії знаходиться в максимально напруженому стані.

*Відстанню найкращого бачення* називають таку відстань, на якій видно всі деталі об'єкту, що розглядається, без максимального напруження апарату акомодатії, внаслідок чого очі тривалий час не втомлюються.

При фокусуванні ока на об'єкті, розташованому в ближній точці, воно повинно збільшити свою оптичну силу. Цей процес відбувається шляхом зміни форми кришталика. При переведенні погляду з далекої точки ока в ближню точку опуклість кришталика зростає (рис. 14.3).

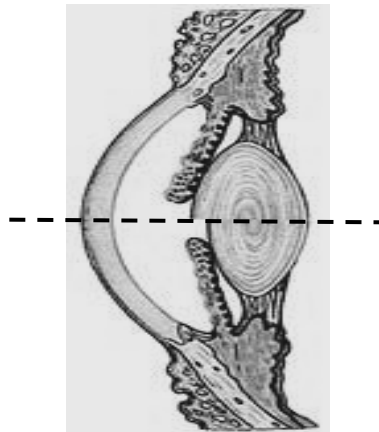


Рис. 14.3. Зміни кривизни кришталика при акомодатії (під пунктиром – його форма при погляді в далеку точку ока, над пунктиром – в ближню)

Кришталик є еластичним. Він оточений гнучкою капсулою і пов'язаний циновою зв'язкою з циліарним тілом. При фокусуванні ока на віддалених об'єктах, циліарний м'яз є розслабленим, цинова зв'язка натягнута. В таких умовах кришталик має відносно плоску форму, а оптична сила ока складає близько 59 Діоптрій.

При переведенні людиною погляду на близькі об'єкти, форма кришталика змінюється. Циліарний м'яз скорочується і зменшує напругу цинової зв'язки. В силу своєї еластичності кришталик стає більш опуклим, а його оптична сила зростає.

З віком еластичність кришталика зменшується, і він не може в повній мірі змінювати свою кривизну. Здатність ока до акомодатії порушується. Цей стан називається *пресбіопією*.

### ***Рефракція здорового ока і її аномалії***

*Еметропія* – рефракція здорового ока. Вона характеризується тим, що паралельні світлові промені від віддалених об'єктів фокусуються на сітківці при повному розслабленні циліарного м'яза. При фокусуванні близьких об'єктів він скорочується, забезпечуючи необхідну ступінь акомодатії. При еметропії людина чітко бачить як віддалені, так і близько розташовані об'єкти, оскільки їх зображення фокусується на сітківці.

*Гіперметропія (гіперопія)* відома також як далекозорість. Вона обумовлена або малим розміром очного яблука, або недостатньою оптичною силою ока (рис. 14.4). В таких умовах паралельні світлові промені від віддалених об'єктів у спокої акомодатії фокусуються за сітківкою. Для подолання цієї аномалії циліарний м'яз скорочується при погляді у далеку точку ока, збільшуючи його оптичну силу. Таким чином, далекозора людина здатна фокусувати віддалені об'єкти на сітківці, використовуючи механізм акомодатії. Для бачення ближчих об'єктів резерву акомодатії може не вистачати. Тому для корекції далекозорості необхідно збільшити здатність ока до заломлення світла. Для цього використовують опуклі (збірні) лінзи, які додають свою оптичну силу до оптичної сили ока



Рис. 14.4. Заломлення променів далекозорим оком людини (А) і корекція далекозорості (Б)

*Міопія.* При міопії (короткозорості) паралельні світлові промені від віддалених об'єктів фокусуються перед сітківкою, незважаючи на те, що циліарний м'яз повністю розслаблений (рис. 16.5 А). Причинами цього можуть бути занадто подовжене очне яблуко або надмірно висока оптична сила ока.

Механізму, за допомогою якого око могло б зменшити оптичну силу кришталика так, щоб вона була менша, ніж у спокої акомодатії, не існує. Тому у людини з міопією фокусування віддалених об'єктів на сітківці

неможливе. Зображення може сфокусуватися тільки, якщо об'єкт знаходиться досить близько від ока.

Занадто велика оптична сила ока при міопії може бути усунена увігнутою (розсівною) лінзою (рис. 14.5 Б). Використовуючи лазерну техніку, можна також відкоригувати занадто велику опуклість роговиці хірургічним шляхом.

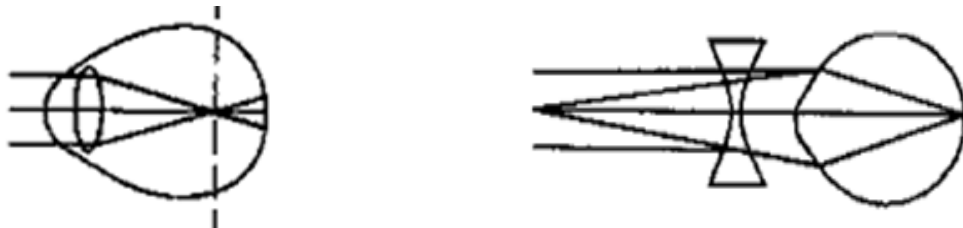


Рис. 14.5. Заломлення променів короткозорим оком людини (А) і корекція короткозорості (Б)

*Астигматизм.* Така аномалія рефракції зумовлена тим, що заломлююча поверхня рогівки є еліпсоїдальною, а не сферичною. Астигматизм спостерігається, коли рогівка в одній зі своїх площин має занадто велику кривизну. В результаті світлові промені, що проходять через різні площини рогівки, заломлюються неоднаково і не збираються в загальному фокусі. Астигматизм не може компенсуватися оком за допомогою акомодатції, але коригувати його можна за допомогою циліндричної лінзи, яка виправляє помилку в одній з площин.

Для корекції різних аномалій рефракції використовують окулярні і контактні лінзи. Останні встановлюють на передній поверхні рогівки. Вони фіксуються тонким шаром слізної рідини, що заповнює простір між лінзою і рогівкою. Жорсткі контактні лінзи виготовляють з пластмаси. Їх розміри складають до 1 мм в товщину і 1 см в діаметрі. В основному, використовують м'які контактні лінзи.

### ***Гострота зору***

Здатність людського ока розрізняти дрібні деталі обмежена. При нормальному зорі очі можуть розрізняти точкові джерела світла, розташовані на відстані 25 дугових секунд. Це означає, що людина з нормальною гостротою зору може розрізнити дві точки світла, які розташовані на відстані

приблизно 10м від ока, якщо вони знаходяться одна від другої на відстані 2мм (рис. 14.6). При її зменшенні зображення точок зливаються.

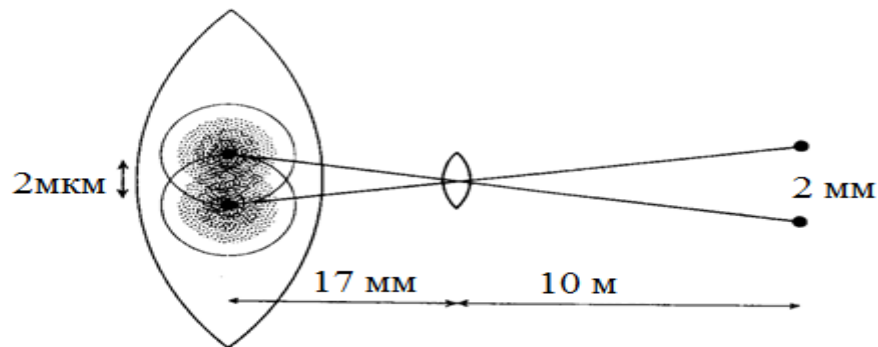


Рис. 14.6. Максимальна гострота зору для двох точкових джерел світла

Наявність цієї межі обумовлено структурою сітківки. Середній діаметр рецепторів в сітківці становить приблизно 1,5 мкм. Людина може розрізнити дві окремі точки, якщо в сітківці відстань між їх зображеннями становить не менш, ніж 2 мкм. Таким чином, щоб розрізнити два невеликих об'єкта, вони повинні викликати збудження двох різних рецепторів сітківки. Між ними повинен перебувати, принаймні, один незбуджений рецептор.

### ***Зорові рецептори***

У сітківці знаходяться зорові рецепторні клітини (фоторецептори) двох видів: *палички* і *колбочки*. Сітківка містить близько 7 млн. колбочок і 130 млн. паличок. Палички розрізняють лише ступінь освітленості об'єктів і здатні функціонувати в сутінках, забезпечуючи «скототопічний» зір. Колбочки розрізняють кольори спектра і зумовлюють «фототопічний» зір. Палички більш чутливі до світла, ніж колбочки.

Палички і колбочки мають зовнішній і внутрішній сегменти. Внутрішній сегмент включає ядро, мітохондрії та інші органели. Зовнішній сегмент представляє собою стопку мембранних дисків, утворених складками плазматичної мембрани. Ці диски містять молекули речовин, чутливих до світла – *фотопігментів*: у паличках родопсин, а у колбочках – один з трьох видів йодопсину. За допомогою синапсів палички і колбочки з'єднані з нервовими клітинами, яким вони передають інформацію.

Молекула родопсина складається з двох частин: небілкової, яка носить назву ретиналь, і білка опсина (рис. 14.8). Молекула ретиналя може пере-



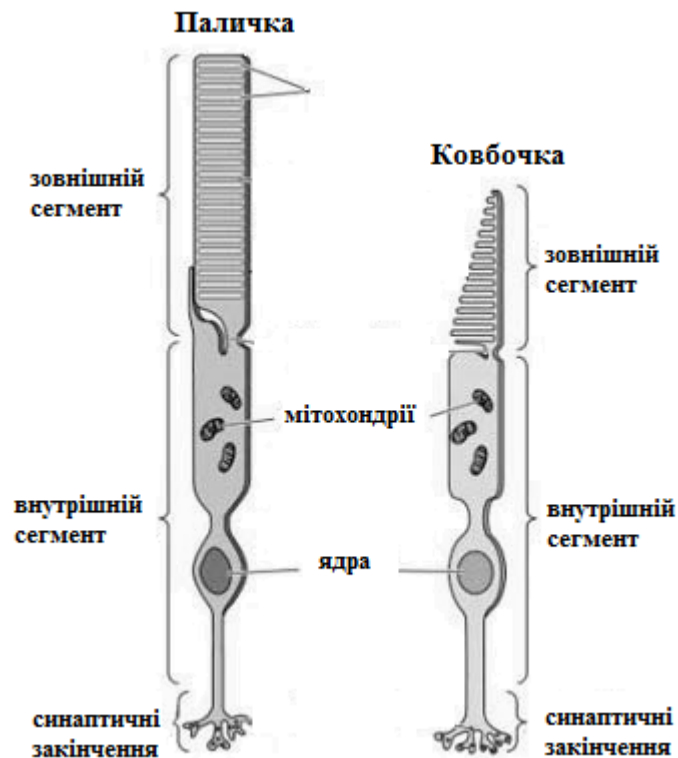


Рис. 14.7. Схема будови палички і ковбочки

бувати в двох формах. У одній з них бічний ланцюг витягнутий (транс-ізомери), в іншій - зігнутий (цис-ізомер). У формі цис-ізомера молекула ретиналя нестійка, але її форма стабілізована зв'язками з молекулою опсина (видно на малюнку). Під дією енергії кванта світла бічний ланцюжок молекули випрямляється і відділяється від опсина. Далі протікає складний цикл біохімічних реакцій, в результаті родопсин відновлюється.

Розпад молекул родопсину призводить до виникнення рецепторного потенціалу в паличках. Передбачається, що первинним ефектом є вивільнення іонів кальцію, які, в свою чергу, впливають на натрієві канали мембрани. Цікаво те, що на відміну від рецепторних потенціалів інших клітин, рецепторний потенціал фоторецепторів полягає в гіперполяризації мембрани. У темряві чутливість ока до світла більш велика, а через мембрану фоторецепторів тече відносно сильний натрієвий струм. Під дією світла відбувається закривання натрієвих каналів, результатом чого і є гіперполяризація мембрани. Рецепторний потенціал передається на пов'язані з фоторецепторами нервові клітини сітківки. В результаті складних процесів, що відбуваються в нейронах сітківки, виникають потенціали дії, що несуть інформацію в центральну нервову систему.

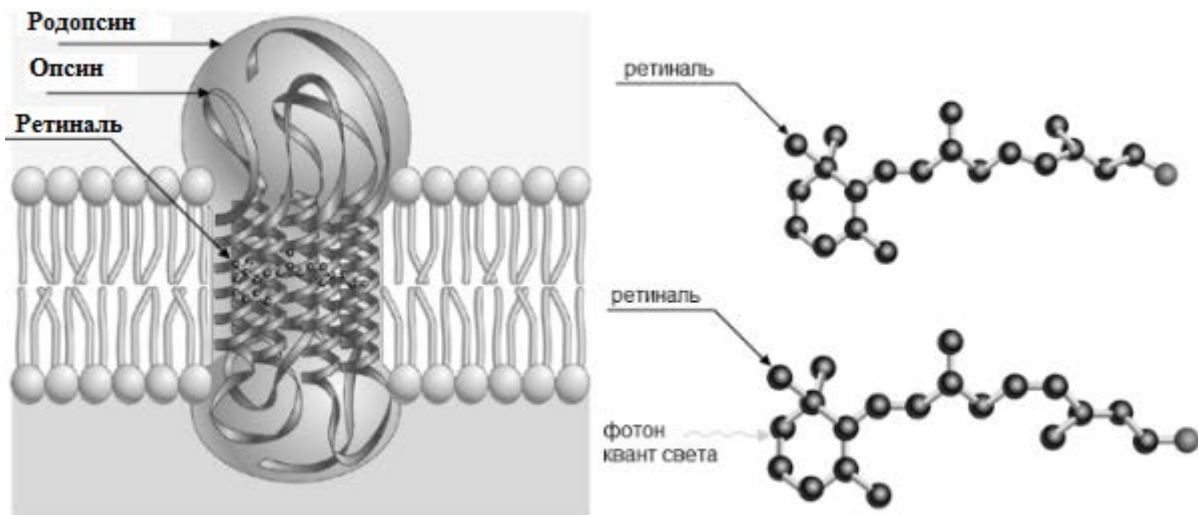


Рис. 14.8. Зоровий пігмент паличок - родопсин

### *Колірне бачення*

Існують три основні кольори: червоний, зелений і синій. Змішання їх в певному відношенні дає всі інші кольори. Біофізичний механізм колірного зору зводиться до наявності в сітківці трьох типів колбочок, яким відповідають три види молекул йодопсіну.

Максимум чутливості окремих видів молекул йодопсіну відповідає червоному, зеленому і синьому ділянкам спектра. З рис. 14.9 видно, що кожен з трьох видів колбочок виявляє найбільшу чутливість до певної довжини світлової хвилі. Відчуття інших кольорів спектру виникає в результаті збудження різних видів колбочок в різних співвідношеннях. Дуже сильне світло збуджує всі три види колбочок і тому сприймається як випромінювання сліпуче білого кольору.

Наявність трьох різних видів колбочок доведено за допомогою мікроелектродних досліджень активності фоторецепторів сітківки. Існує обумовлена спадковістю аномалія, при якій в сітківці відсутній будь-який з видів йодопсіну. В такому випадку людина не в змозі розрізнити один з трьох основних кольорів.

### **Контрольні питання:**

1. Опишіть будову ока людини, вкажіть його заломлюючі поверхні.
2. Побудуйте зображення об'єкта за допомогою редукованого ока.
3. Опишіть процес акомодатії ока. Які вона має границі?
4. Обґрунтуйте поняття «відстань найкращого бачення».

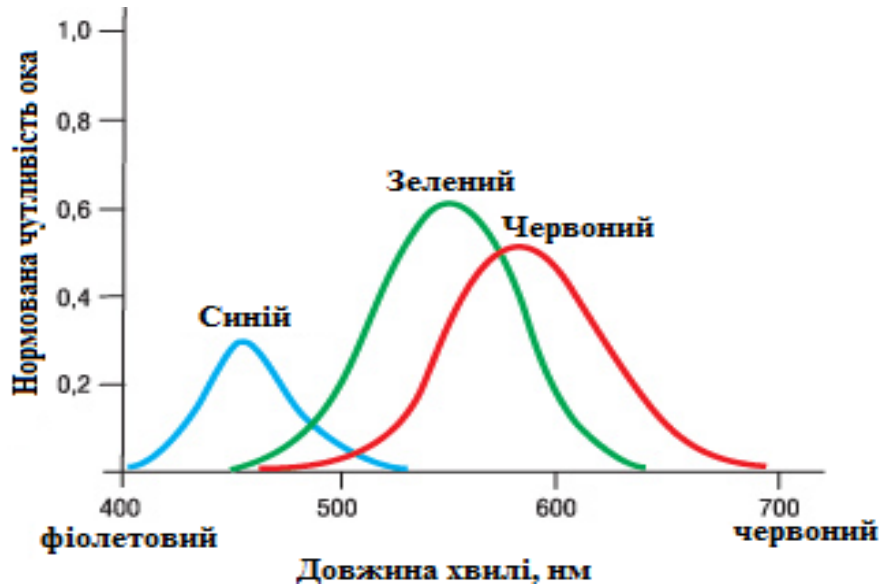


Рис. 14.9. Спектральна чутливість окремих видів колбочок

5. Охарактеризуйте властивості короткозорого ока. Яким чином здійснюють корекцію короткозорості.
6. Охарактеризуйте властивості далекозорого ока. Яким чином здійснюють корекцію далекозорості?
7. В чому причина астигматизму ока? Якими лінзами цей недолік коректують?
8. Охарактеризуйте роль фоторецепторів в забезпеченні зору людини.

**Оберіть правильну відповідь:**

1. Для корекції астигматизму використовують лінзи:
 

А. опуклі	Б. циліндричні	В. увігнуті
Г. збирають	Д. розсіюють	
  
2. Корекцію короткозорості проводять за допомогою лінз:
 

А. опуклих	Б. циліндричних	В. розсівних
Г. збірних	Д. любих	
  
3. Визначте властивість далекозорого ока:
 

А. збирає промені від далеких об'єктів перед сітківкою
Б. має зменшену оптичну силу
В. має збільшену оптичну силу
Г. його корекцію здійснюють розсівними лінзами



## 15. ОСНОВИ АТОМНОЇ ФІЗИКИ І КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ

До кінця 19 ст. атом вважали неділимою частинкою, проте відкриття електронів і інших елементарних частинок переконало вчених в складній будові атому. Вирішальне значення для розуміння його структури зіграли знамениті досліди Резерфорда з розсіювання  $\alpha$ -частинок. Були створені умови для розвитку *фізики атому*.

### *Будова атома. Постулати Бора*

Сучасні уявлення про будову атома засновані на дослідах Е. Резерфорда (1911). Він вивчав дію потоку альфа-частинок - ядер гелію на тонку металеву фольгу (рис. 15.1). Більшість частинок проникало крізь метал, але деяка частина відбивалася від нього. Результати дослідів показали, що в атомі є центральне ядро, в якому зосереджена майже вся його маса і позитивний заряд. Навколо ядра по кругових орбітах рухаються електрони. Їх сукупність називають *електронною оболонкою атому*.

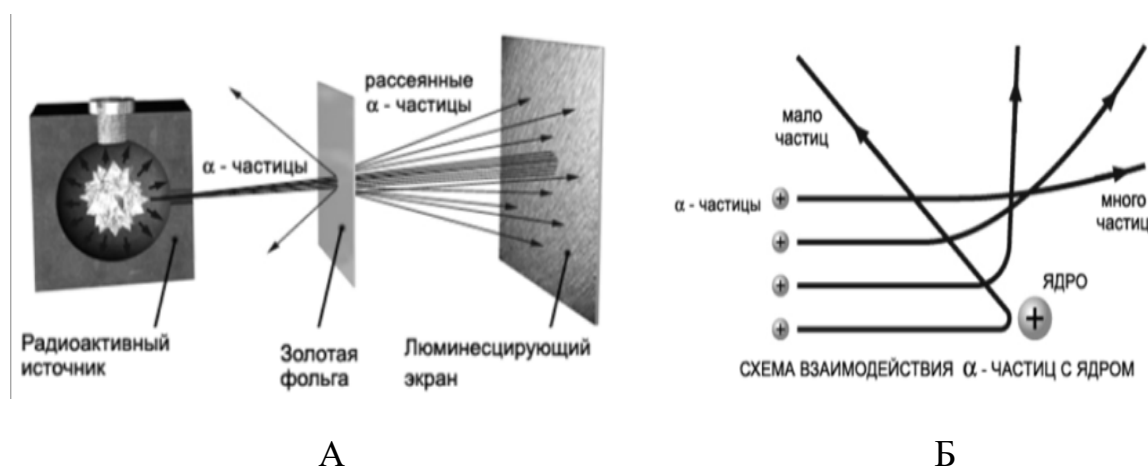


Рис. 15.1. Схема (А) і результати (Б) досліду Резерфорда

Дослідження Резерфорда дозволили визначити розмір ядра і величину його заряду. При цьому виявилось, що заряд  $q$  ядра, виражений в елементарних зарядах електрона, дорівнює порядковому номеру  $Z$  хімічного елемента в періодичній системі Менделєєва:  $q=Ze$  і дорівнює числу електронів в електронній оболонці атома. Тому атом в цілому електронейтральний.

Після втрати атомом одного і декількох електронів, він стає

позитивним іоном (катіоном). При приєднанні до нього електронів, атом перетворюється в негативний іон (аніоном).

Пізніше було показано, що атомне ядро складається з елементарних частинок - нуклонів. Існує два види нуклонів: позитивно заряджені протони і електрично нейтральні нейтрони. Ці частинки майже не відрізняються за своєю масою.

Резерфордівська модель будови атома (*планетарна*) в момент її розробки не могла пояснити стабільності атома і не вкладалася в рамки законів класичної фізики. Згідно з цими законами електрон, обертаючись навколо ядра, повинен був безупинно втрачати енергію шляхом випромінювання і наблизитися до ядра.

Н. Бор (1913) вдосконалив модель атома Резерфорда, створивши квантову теорію будови атома. Ця теорія змогла пояснити стабільність атома і багато процесів, що в ньому відбуваються. В основу теорії Бора покладено такі три постулати.

1. Електрони в атомі обертаються навколо ядра тільки по певним стаціонарним орбітам. При цьому електрони не випромінюють енергії. Стаціонарними орбітами є ті, для яких момент імпульсу електрона  $mV_n r_n$  кратний величині  $h/2\pi$ , тобто

$$mV_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

де  $n$  - ціле число, зване головним квантовим числом ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),  $h$  - константа Планка,  $m$  - маса електрона,  $v_n$  - швидкість електрона на  $n$ -й орбіті,  $r_n$  - радіус  $n$ -ї орбіти.

2. У кожному з стаціонарних станів атом має тільки строго визначену енергію  $E_1, E_2, \dots, E_n$ .

3. Перехід електрона з однієї стаціонарної орбіти на іншу супроводжується випромінюванням (або поглинанням) кванта енергії, тобто невідомої порції енергії електромагнітного випромінювання  $E = h\nu$ .

При переході атома зі стаціонарного стану з більшою енергією в стан з меншою енергією атом випромінює квант енергії електромагнітні хвилі з частотою

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h},$$

де  $E_n, E_m$  - енергія стаціонарних станів атома до і після випромінювання.

Перехід атома з стаціонарного стану з меншою енергією в стаціонарне стан з більшою енергією відбувається тоді, коли атом поглинає квант, енергія якого ( $E = h\nu$ ) дорівнює різниці енергії відповідних станів.

Теорія Бора стала основою для подальшого розвитку уявлень про будову атома і властивості мікрочастинок. Більш повні і точні уявлення про них надає *квантова механіка*. Вона заснована на уявленні про те, що електрони і інші мікрочастинки мають подвійні властивості – корпускулярні і хвильові.

### *Лінійчатий спектр атома водню*

Спектром електромагнітного випромінювання називається сукупність частот електромагнітних хвиль, що входять до його складу. В спектрах електромагнітного випромінювання відображається будова електронних оболонок випромінюючих атомів і процеси, що в них відбуваються.

Дослідження спектрів випромінювання різних розріджених газів (тобто спектрів випромінювання окремих атомів) показали, що кожному газу властивий цілком певний спектр, який складається з окремих світних ліній - *лінійчатий спектр*. Кожна лінія відповідає певній частоті випромінювання. Спектральні лінії можна розподілити по групах (серіям); лінії, що належать до однієї серії, пов'язані між собою певною закономірністю. Так, наприклад, у видимій частині спектру випромінювання атому водню (гідрогену) Бальмер виявив серію ліній, частота яких виражалася емпіричним рівнянням:

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots)$$

де - константа Рідберга.

Серія Бальмера схематично представлена на рис. 15.2. Перша лінія має яскраво-червоний колір, у формулі Бальмера їй відповідає  $n = 3$ . Лінія - блакитна ( $n = 4$ ), лінія - синя ( $n = 5$ ), - фіолетова ( $n = 6$ ).

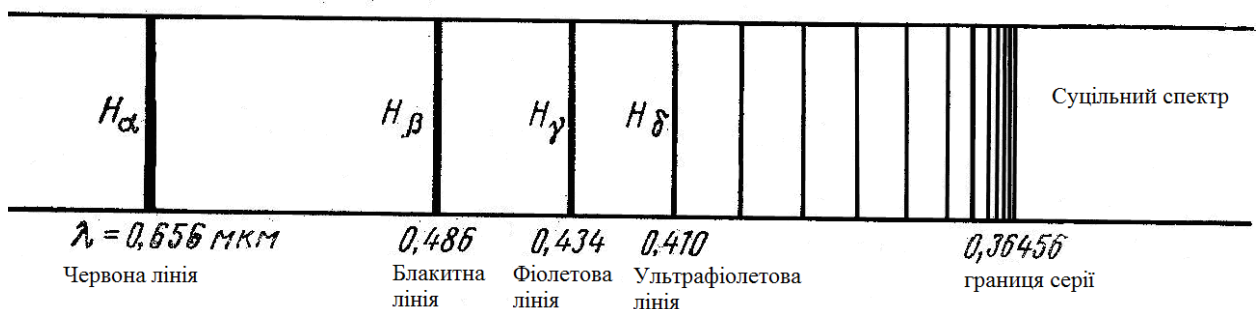


Рис. 15.2 Серія Бальмера електромагнітного спектра атому водню

Наступна серія - серія Лаймана описується рівнянням:

$$\nu = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

де  $n = 2, 3, 4, \dots$  Вона знаходиться в ультрафіолетовій частині спектру.

Існують і інші серії ліній спектра атома водню. Всі ці серії ліній можуть бути описані однією формулою - узагальненою формулою Бальмера-Рідберга:

$$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Величина  $m$  має в кожній даній серії постійне значення:  $m = 1, 2, 3, 4, \dots$  (визначає серію). Величина  $n$  приймає значення цілих чисел, починаючи з  $m + 1$ . Вона визначає окремі лінії цієї серії.

Кожна лінія спектра виникає в результаті переходу електрона з однієї з стаціонарних орбіт атома на іншу орбіту. Кількість стаціонарних орбіт в електронній оболонці атома обмежена. Відповідно до цього обмежена і кількість можливих електронних переходів. Тому в лінійчатому спектрі представлений набір певного числа ліній, кожна з яких має свою характеристику. На рис. 15.3 показаний зв'язок ліній спектра водню з електронними переходами в його атомах.

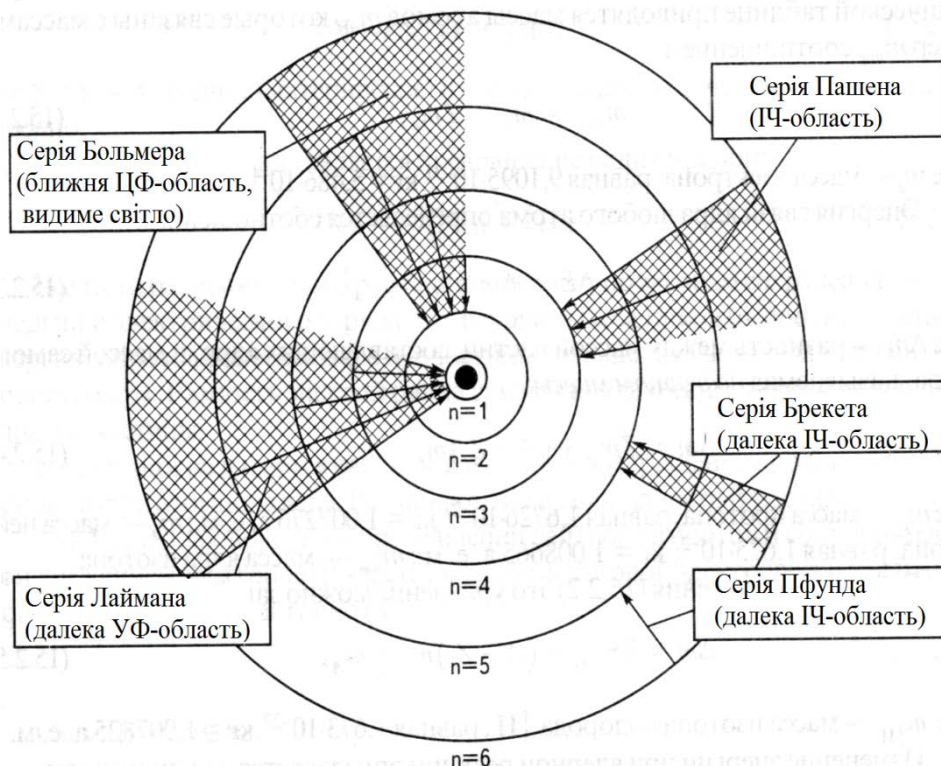


Рис. 15.3. Стаціонарні електронні орбіти атома водню і утворення спектральних ліній



## Енергетичні рівні атома

Для характеристики енергетичного стану електрона в атомі використовується поняття про енергетичні рівні атома. *Енергетичним рівнем* називається величина повної енергії електрона, що знаходиться на стаціонарній орбіті. Повна енергія електрону дорівнює сумі його кінетичної і потенціальної енергій і залежить від номера орбіти, який відповідає головному квантовому числу  $n$ :

$$E = E_k + E_n,$$

$$E = \frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8\varepsilon_0 h^2}$$

де  $m$  – маса електрона,  $e$  – заряд електрона,  $h$  – стала Планка,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична стала,  $n$  – номер орбіти.

Енергетичні стани атому утворюють послідовність енергетичних рівнів. Енергетичний стан з  $n=1$  є основним (нормальним), стани з  $n>1$  є збудженими. Енергію рівнів визначають в електронвольтах:

$$(1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}).$$

Для першої борівської орбіти ( $n=1$ ) в атомі водню значення енергії електрона складає 13,6 еВ. Наступні рівні енергії атому водню можна визначити за спрощеною формулою:

$$E = -\frac{13,6}{n^2}$$

Мінімум енергії атом має при русі електрона по найближчій до ядра орбіті ( $n=1$ ), а максимум енергії ( $E_\infty = 0$ )- при русі електрона по найдальшій орбіті ( $n = \infty$ ). Отже, значення  $E_\infty = 0$  відповідає іонізації атома (відриву від нього електрона). В нормальному незбудженому атомі водню електрон знаходиться на нижчому енергетичному рівні, що відповідає значенню квантового числа  $n = 1$ . Цей основний стан електрона стабільний. Якщо до атому ззовні підводиться енергія, то він переходить у збуджений стан і електрон підіймається на вищий енергетичний рівень. Повертаючись у нормальний, стабільний стан, атом випромінює квант енергії.

Спектральні лінії серії Лаймана відповідають випромінюванню атома водню при переході електрона з другого, третього, четвертого і т.д. енергетичних рівнів на перший; лінії серії Бальмера відповідають випромінюванню при переході електрона з третього, четвертого, п'ятого і т.д. рівнів на другий; лінії серії Пашена відповідають випромінюванню при

переході електрона з четвертого, п'ятого, шостого енергетичних рівнів на третій (рис.15.3).

Газ складається з сукупності в різному ступені збуджених атомів, тому в ньому одночасно відбуваються усі можливі типи переходів електронів, а в спектрі випромінювання водню одночасно представлені лінії усіх серій.

### ***Спектри. Спектральний аналіз***

Існують три основні типи спектрів: *суцільні, лінійчаті і смугасті*.

Спектр, в якому представлені усі довжини хвиль випромінювання, які поступово переходять одна в іншу, називається безперервним, або *суцільним*. Такі спектри має випромінювання розпечених твердих та рідких тіл, а також газів при високому тиску. Основну роль у випромінюванні грає хаотичний рух цих частинок (коливальний і обертальний), обумовлений високою температурою.

Монохроматичне випромінювання має спектр у вигляді однієї вузької лінії. Випромінювання, яке складається з декількох монохроматичних хвиль, має *лінійчатий спектр*. Лінійчаті спектри характерні для випромінювання газів і парів металів в атомарному стані. Атоми і молекули можуть бути збуджені нагріванням або електричним розрядом. Наприклад, пари натрію мають у видимій частині спектру дві близько розташовані жовті лінії, водень - чотири лінії: червону, блакитну і дві фіолетових. У видимій частині спектру парів ртуті найбільш яскраві лінії: помаранчева, жовта, зелена, блакитна і фіолетова.

*Смугасті спектри* характерні для газів, що складаються з багатоатомних молекул (кисень, вуглекислий газ, водяна пара і т.п.). Випромінювання викликано як електронними переходами в атомах, так і коливними рухами самих атомів в молекулі.

При проходженні білого світла крізь будь-яке досить прозоре середовище деякі з складових його простих хвиль можуть поглинатися середовищем більш інтенсивно, ніж інші, і тоді в спектрі білого світла в певних місцях з'являються лінії або смуги затемнення, характерні для даного середовища. Сукупність темних ліній або смуг, що утворюються в суцільному спектрі білого світла при проходженні його крізь цю прозору середу, називається *спектром поглинання*.

Пари або гази поглинають випромінювання тих же довжин хвиль, які вони випускають в збудженому стані (закон Кірхгофа).

Для кожного хімічного елемента (що знаходиться в стані розрідженого газу або пари) характерний цілком певний спектр випромінювання. На цьому заснований спектральний метод визначення хімічного складу речовини (*спектральний аналіз*).

За видом спектру можна ідентифікувати атоми і молекули, тобто здійснювати *якісний спектральний аналіз*. За інтенсивністю спектральних ліній визначають кількість випромінюючих (поглинаючих) атомів - *кількісний спектральний аналіз*. При цьому порівняно легко знаходять домішки в концентраціях  $10^{-5}$  -  $10^{-6}\%$  і встановлюють склад зразків дуже малої маси - до декількох десятків мікрограмів.

За допомогою спектрального аналізу, наприклад, було встановлено, що живі організми містять в незначних кількостях метали - кобальт, хром, титан і ін. Спектральний аналіз дозволяє встановити сліди крові (судова медицина), мікродомішки металів в консервованих продуктах (харчова гігієна) і т .п.

## 16. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ

### *Поняття теплового випромінювання*

*Теплове випромінювання* - це електромагнітне випромінювання тіл, яке виникає за рахунок їх внутрішньої енергії. При хаотичному (тепловому) русі атомів і молекул, відбуваються їхні зіткнення. Результатом цього є перехід частинок в збуджений стан. При зворотному переході їх в основний стан надлишок енергії випромінюється у вигляді електромагнітних хвиль, які представляють собою теплове випромінювання.

Весь діапазон інфрачервоного випромінювання ділять на області (відносно діапазону видимого світла): ближню (750нм - 2500нм), середню (2500нм – 50000нм) і далеку (50000нм – 2000000нм).

Теплове випромінювання властиве усім тілам.

### *Характеристики теплового випромінювання*

*Енергетична світність* тіла - це кількість енергії теплового випромінювання у всьому діапазоні його довжин хвиль, яке випускається тілом в усіх напрямках з одиниці площі поверхні за одиницю часу:

$$R = \frac{E}{t \cdot S} \quad \left[ \frac{Вт}{м^2} \right]$$

Теплове випромінювання представляє собою сукупність хвиль різної довжини, яким відповідає неоднакова енергетична світність. Величина енергетичної світності  $dR$  при даній температурі, яка припадає на певний інтервал довжин хвиль випромінювання, пропорційна ширині цього інтервалу  $d\lambda$  і спектральній густині енергетичної світності  $r_\lambda$  (випромінювальній здатності):  $dR = r_\lambda d\lambda$ .

*Спектр випромінювання* - це залежність спектральної густини енергетичної світності від довжини хвиль.

Тіла не тільки випускають, але також поглинають енергію теплового випромінювання. Відношення потоку енергії, який поглинається тілом  $\Phi_{\text{погл}}$  до енергії, що падає на нього  $\Phi_{\text{пад}}$ , називається *коефіцієнтом поглинання*  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\Phi_{\text{погл}}}{\Phi_{\text{пад}}}$$

*Монохроматичним коефіцієнтом поглинання* називається коефіцієнт поглинання певного діапазону довжини хвиль теплового випромінювання.

Величина коефіцієнта поглинання різних тіл може приймати значення від 0 до 1. Тіло з коефіцієнтом поглинання, що дорівнює одиниці, називають *абсолютно чорним тілом*. Воно є фізичною абстракцією. Однак моделлю, близькою за властивостями до чорного тіла, є порожнина з точковим отвором (рис. 16.1). Промені, що входять в таку порожнину, багаторазово відбиваються від її стінок і в результаті практично повністю поглинаються.

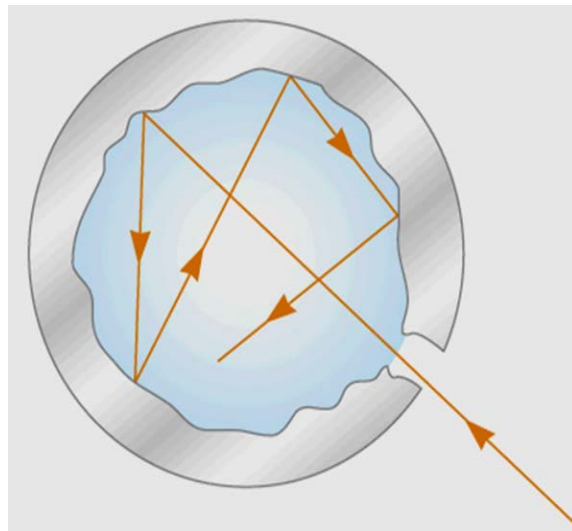


Рис. 16.1. Модель абсолютно чорного тіла

Тіла, для яких  $0 < \alpha < 1$ , називаються *сіримі тілами*. Їх коефіцієнт поглинання залежить від температури, але не від довжини хвилі. Тіло людини є сірим тілом з коефіцієнтом поглинання  $\alpha = 0,9$ .

### *Закони теплового випромінювання*

**Закон Кірхгофа.** Теплове випромінювання є рівноважним: чим більше енергії випромінює тіло, тим більше воно повинно її поглинати. В ізольованій системі, що складається з декількох тіл, відношення спектральної густини енергетичної світності до монохроматичного коефіцієнта поглинання при певній температурі є однаковим:

$$\left( \frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} \right)_1 = \left( \frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} \right)_2 = \left( \frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} \right)_3 = const$$

Вказане співвідношення залишається вірним і в тому випадку, якщо одне з тіл буде абсолютно чорним (АЧТ):

$$\left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}\right)_{\text{ачт}} = \text{const}$$

$$\left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}\right)_2 = \varepsilon_{\lambda T}$$

Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла був детально досліджений в кінці 19 століття за допомогою описаної вище експериментальної моделі. На графіку (рис. 16.2) видно, що спектр має більш полого праву частину (в області великих довжин хвиль), вершину і більш круту ліву частину. Зі збільшенням температури крива зміщується вгору, а точка максимуму переміщається вліво, тобто в бік меншої довжини хвилі. Ці закономірності описують закони Стефана-Больцмана і Віна.

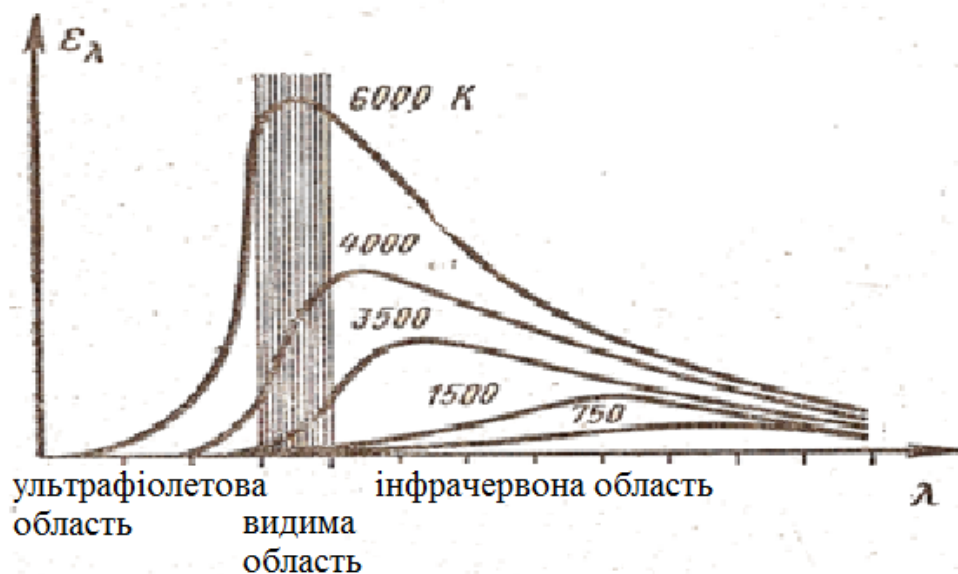


Рис. 16.2. Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла

Закон Стефана-Больцмана: енергетична світність пропорційна абсолютній температурі тіла в четвертому ступені:

$$R = \sigma T^4$$

де  $\sigma$  - константа Стефана-Больцмана.

Закон зміщення Віна: довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини енергетичної світності тіла, обернено пропорційна його абсолютній температурі  $T$ :

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

де  $b$  - константа Вина.

### ***Квантова теорія***

Квантова теорія розкриває природу електромагнітного випромінювання. М. Планк (1900) на підставі вивчення спектру випромінювання абсолютно чорного тіла висунув теорію, згідно з якою тіла випромінюють енергію електромагнітних хвиль не безперервним потоком, як це вважали раніше, а окремими неподільними порціями - квантами. Кванти світлового випромінювання називаються також фотонами. Енергія кванта прямо пропорційна частоті випромінювання  $\nu$ :  $E = h\nu$ , де  $h$  - константа Планка.

Важливу роль в доведенні квантової природи світла відіграли праці А. Ейнштейна в області теорії *фотоефекту* - випускання електронів речовиною під дією світла. Як показав Ейнштейн, світло не тільки випромінюється, але і поглинається у вигляді окремих квантів.

Квантова теорія відіграє надзвичайно важливу роль у фізиці, хімії і біологічних науках. Квантовий характер випромінювання не відчутний за допомогою наших органів почуттів внаслідок надзвичайної малості енергії квантів. Квантовий характер властивий всім діапазонам електромагнітних хвиль. Однак енергія квантів у різних діапазонів сильно відрізняється. Вона дуже мала у радіохвиль зважаючи на їх порівняно малу частоту і досягає максимального значення у  $\gamma$ -випромінювання, яке характеризується надзвичайно високою частотою.

Квантовий характер світлового випромінювання свідчить про його подвійну природу. Будучи електромагнітне хвилею, світло має хвильові властивості. Вони проявляються в інтерференції, дифракції і поляризації світла. В той же час світло має певні корпускулярні властивості, тобто властивості частинок, фотонів.

### ***Біологічна дія теплового випромінювання***

Тіло людини постійно поглинає теплове випромінювання. Цей процес залежить від температур тіла людини і навколишнього середовища. Застосування теплового випромінювання є одним з видів фізіотерапії. Для цього використовують солюкс, світло-теплові ванни, інфрачервоні лампи.

Інфрачервоні промені проникають в тканини організму на велику глибину. Це призводить до прогрівання всієї товщі шкіри і частини підшкірних тканин.

Під впливом інфрачервоного опромінення в тканинах посилюються метаболічні процеси і прискорюються ферментативні реакції, процеси загоєння ран, запальні процеси, підвищується місцева опірність тканин і захист проти інфекцій.

При дії теплового випромінювання в тканинах посилюється утворення ряду речовин, які впливають на передачу імпульсів в нервовій системі і на регуляцію кровообігу. В результаті дії інфрачервоних променів на шкіру в ній активуються специфічні чутливі нервові закінчення, інформація від яких надходить в центральну нервову систему. В результаті цього рефлекторно розширюються судини шкіри, збільшується об'єм циркулюючої в них крові, посилюється виділення поту.

Загальна дія теплового випромінювання призводить до виділення значної кількості поту, видалення зайвого жиру і разом з ним важких металів і ряду токсичних речовин.

### ***Реєстрація інфрачервоного випромінювання тіла людини***

Теплове випромінювання тіла людини відноситься до інфрачервоного діапазону природної шкали електромагнітних хвиль, довжина яких складає від 750нм до 2мм. Максимум випромінювання при температурі тіла припадає на довжину хвилі 9,5 мкм. Інфрачервоне випромінювання шкіри визначається її температурою і залежить від трьох основних чинників: особливостей кровопостачання, інтенсивності обмінних процесів і відмінностей в теплопровідності окремих ділянок.

Згідно із законом Стефана-Больцмана кількість випромінюваної енергії залежить від абсолютної температури в четвертому ступені. Тому навіть невеликі зміни температури поверхні тіла значно впливають на інтенсивність інфрачервоного випромінювання.

*Медична термографія (тепlobачення)* - це метод реєстрації інфрачервоного випромінювання тіла людини. Даний метод дозволяє вимірювати безконтактно температуру окремих ділянок тіла. Він має певне діагностичне значення, оскільки температура є важливим інтегральним показником фізіологічних процесів. Термографія - простий, короткотривалий, безболісний, хоч і не дуже специфічний метод дослідження, придатний для масових оглядів.



У нормі розподіл температури однакових ділянок тіла людини є симетричним. Тому завданням термографії служить виявлення локалізації та ступеня асиметрії розподілу температур.

*Тепловізори (термографи)* дають безконтактне зображення карти інфрачервоного світіння досліджуваної частини тіла людини. Їх чутливість дуже велика і досягає сотих часток градуса. Цедозволяє в багатьох випадках виявляти ранні доклінічні стадії патологічних порушень.

Існує також *контактна термографія*, яка здійснюється за допомогою рідкокристалічних плівок. Вона базується на оптичних властивостях рідких кристалів, які змінюють свій колір при нанесенні на тепловипромінюючі поверхні. При цьому такі зміни залежать від температури ділянки тіла, що досліджується. Перевагою контактної термографії є менша її вартість, але вона менш чутлива, ніж термографія, здійснювана тепловізорами.

Найбільш важливі області діагностичного використання термографії: розпізнавання пухлинних утворень грудної і щитовидної залоз; діагностика захворювань суглобів, уражень сонних артерій і артерій кінцівок, а також порушень венозного кровообігу.

### ***Загальна характеристика люмінесценції***

*Люмінесценція* - це нетеплове світіння речовини, яке відбувається після поглинання нею енергії збудження. На відміну від теплового випромінювання, люмінесценція відбувається не за рахунок внутрішньої енергії *люмінофора*, а за рахунок інших її форм: світлової, електричної, хімічної та ін.

Залежно від чинників, які викликають люмінесценцію, розрізняють: *фотолюмінесценцію*, яка виникає під впливом світла; *електролюмінесценцію* – під дією електричного поля; *хемілюмінесценцію* – за рахунок енергії хімічних реакцій; *катодолюмінесценцію* – під впливом швидких електронів; *рентгенолюмінесценцію* – під дією рентгенівських променів; *радіолюмінесценцію* - під впливом радіоактивних випромінювань.

За тривалістю розрізняють *флюоресценцію* (короткочасне світіння) і *фосфоресценцію* (тривале).

### ***Фізична природа люмінесценції***

Люмінесценція виникає в результаті переходу атомів і молекул зі збудженого стану в основний (стабільний). Зовнішня енергія, наприклад, енергія квантів світла при фотолюмінесценції необхідна для того, щоб

забезпечити перехід електрону з нижчого енергетичного рівня на більш високий. При цьому атом переходить у *збуджений стан*. Для такого переходу атому необхідна енергія  $E = h\nu$ , яка дорівнює різниці енергетичних рівнів збудженого і основного станів атома. Проте збуджений стан нестійкий: час перебування в ньому атома дуже короткий -  $10^{-8}$  с. Тому відбувається повернення електрона з більш високого енергетичного рівня на більш низький, який супроводжується випромінюванням кванту енергії. Такий перехід є *спонтанним (мимовільним)*.

В залежності від будови електронних оболонок атома у вигляді люмінесценції може випромінюватись частина або вся енергія збудження (рис. 16.3). Можливою є ситуація, при якій вся енергія, поглинена атомом, випромінюється у вигляді люмінесценції (а). Така люмінесценція називається *резонансною*. В цьому випадку енергія квантів, які поглинаються і випромінюються, однакова.

Для люмінесценції молекул характерний інший процес (б). Електрон спочатку переходить на проміжний рівень 2. Енергія при такому переході розсіюється у вигляді тепла. Випромінювання кванта люмінесценції відбувається при переході на рівень 1. В цьому випадку енергія кванта люмінесценції менш, ніж енергія поглиненого кванта.

У наступному прикладі (в) електрон з рівня 3 без випромінювання переходить спочатку на рівень 4 (метастабільний), де електрон може затримуватися відносно тривалий час. З метастабільного рівня він повертається через рівень 2 на рівень 1, що супроводжується люмінесценцією.

Приклади, показані на рис. 16.3 (а, б) характеризують флюоресценцію, тривалість якої становить приблизно  $10^{-8}$  с, на рис. 16.3 (в) - фосфоресценцію.

Її тривалість може ридіюватися секундами, хвилинами

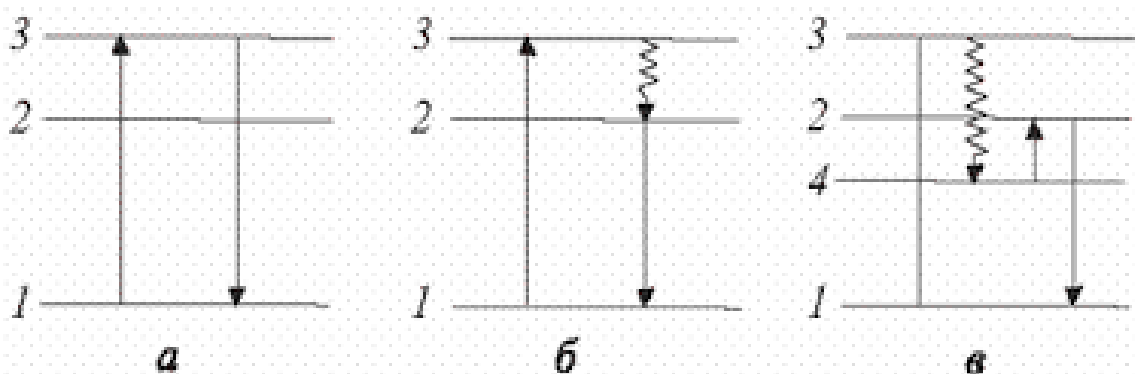


рис. 16.3. Електронні переходи, що викликають люмінесценцію

**Закон Стокса** встановлює, що довжина хвилі люмінесцентного випромінювання більше, ніж довжина хвилі світла, який викликав люмінесценцію. Спектр люмінесценції зміщений відносно спектра світла, який її викликав, в сторону більших довжин хвиль (рис.16.4).



Рис 16.4. Закон Стокса

Пояснити закон Стокса можна тим, що енергія кванта, що викликає збудження, при поглинанні його речовиною частково розсіюється у вигляді тепла. Тому енергія кванта люмінесценції виявляється меншою, а довжина світлової хвилі - більшою.

Можлива також *антистоксовська люмінесценція*, коли довжина хвилі люмінесцентного випромінювання менш, ніж довжина хвилі світла, що викликало люмінесценцію. Таке може відбуватись, якщо зовнішній квант поглинається вже збудженою молекулою.

Основною енергетичною характеристикою люмінесценції є *енергетичний вихід*  $\eta$  - відношення енергії, яка випромінюється люмінофором (E), до енергії, яку люмінофор поглинає ( $E_0$ ):

$$\eta = \frac{E}{E_0}.$$

**Закон Вавилова:** енергетичний вихід люмінесценції спочатку зростає пропорційно зростанню довжині хвилі збуджуючого світла, а потім різко падає (рис. 16.5). Спад енергетичного виходу до нуля пояснюється дуже маленькою енергією зовнішніх фотонів при великих довжинах хвиль.

### **Застосування люмінесценції в медицині**

*Використання в світильниках.* За допомогою люмінесцентних ламп можна отримати ультрафіолетове випромінювання, яке є важливим

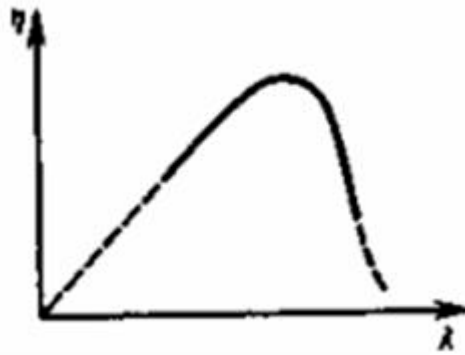


Рис. 16.5. Закон Вавилова

фізіотерапевтичним фактором, а також застосовується в багатьох приладах. Люмінесцентна ртутна лампа виготовлена з кварцового скла, прозорого для ультрафіолетових променів. У ній міститься невелика кількість ртуті. При пропусненні через лампу електричного струму ртуть випаровується і світиться за типом електролюмінесценції. В її спектрі поряд зі світловими променями є і ультрафіолетові хвилі. Вони широко використовуються як лікувальний фактор: для мобілізації захисних сил організму, стимуляції утворення вітаміну D. Ультрафіолетове випромінювання має також виражену бактерицидну дію.

*Люмінесцентний аналіз* - метод визначення різних речовин по характерному для них кольору люмінесценції (флуоресценції). Під дією ультрафіолетового випромінювання багато речовин випромінюють люмінесценцію в ультрафіолетовому або видимому діапазонах. Характеристики випромінювання залежать від природи речовини. Люмінесцентний метод дуже чутливий. Він дозволяє виявляти і вимірювати концентрацію багатьох біологічно важливих речовин, які містяться в надзвичайно малих кількостях, порядку мільйонної частки відсотка. Для цього об'єкт висвітлюють ультрафіолетовими променями і досліджують викликану ними флуоресценцію. Існують два види аналізу: якісний аналіз - це визначення наявності або відсутності певної речовини; кількісний аналіз - з'ясування її концентрації по інтенсивності світіння.

Макроаналіз дозволяє визначати речовини в макрооб'єктах за допомогою спеціальних приладів - *флюорометрів*. При необхідності дослідити спектр люмінесценції застосовують *спектрофлюорометр*.

Мікроаналіз вимагає застосування *люмінесцентного мікроскопа*. У такому мікроскопі препарат освітлюють ультрафіолетовими променями, і використовують фільтри, які пропускають тільки люмінесцентне

випромінювання. В люмінесцентній мікроскопії також використовують флуоресцентні зонди - речовини, які зв'язуються з певними структурами клітин.

Багато молекул біологічних речовин є природними люмінофорами, тобто здатні надавати люмінесцентне світіння при відповідному збудженні. До них відносяться білки, основним джерелом люмінесценції яких є амінокислота триптофан. Здатні до люмінесценції також нуклеїнові кислоти, ферменти, вітаміни, продукт окислення і пігменти.

*Застосування люмінесценції в діагностиці.* Відомо, що при розвитку злоякісних новоутворень, захворюваннях крові, печінки, суглобів та ін. в плазмі крові та інших біологічних рідинах з'являються різні відхилення від норми, які виявляються шляхом люмінесцентного аналізу. Наприклад, при злоякісних пухлинах спостерігається посилення і зрушення максимуму в бік коротких хвиль флуоресценції сироватки крові. За допомогою люмінесцентного аналізу вдається визначити зрушення концентрації певних білків крові, які характерні для захворювань, що дозволяє контролювати розвиток хвороби і хід лікування.

При введенні певних люмінофорів вони концентруються в пухлинах, що дозволяє більш точно визначати їх границі. Люмінесценцію деяких мікроскопічних грибків використовують для діагностики ураження ними волосся і нігтів.

*Люмінесцентна ангиографія* (дослідження судин). За допомогою люмінесцентних речовин досліджують показники кровообігу. Наприклад, при внутрішньовенному введенні одного з них - флуоресцеїна - через деякий час з'являється жовто-зелена флуоресценція губ, внутрішньої поверхні повік. Ця проба дає уявлення про час кругообігу крові. За допомогою люмінесценції досліджують кровообіг сітківки.

*Люмінесцентний аналіз в гігієні.* У санітарно-гігієнічній практиці люмінесцентний аналіз застосовують для оцінки якості продуктів харчування. Наприклад, витяжки з м'яса, риби та ін. поміщають у флуорометр. Свіжі продукти майже не дають люмінесценції. При псуванні продуктів вона з'являється і посилюється по мірі розвитку процесу. Люмінесценцію застосовують також при дослідженні якості молока, хліба, при аналізі якості питної води, ступеня її очищення. Дистильована вода практично не світиться. Люмінесценція з'являється при забрудненні вод органічними речовинами.

У біофізичних дослідженнях клітин застосовуються люмінесцентні зонди - молекули, які зв'язуються з біомембранами. За зміною люмінесценції можна судити про стан мембран, їх в'язкість, рухливість молекул, проникність, процеси переносу енергії.

### **Контрольні питання:**

1. Що таке теплове випромінювання?
2. Які характеристики теплового випромінювання тіла Вам відомі?
3. Який показник характеризує поглинання теплового випромінювання.
4. Охарактеризуйте закони теплового випромінювання: Кірхгофа, Стефана-Больцмана, Віна? В чому полягає гіпотеза Планка?
5. Що таке медична термографія? Вкажіть засоби її здійснення.
6. Яке випромінювання називається люмінесценцією? Вкажіть її види за джерелом енергії і тривалістю
7. Охарактеризуйте закони люмінесценції (Стокса, Вавілова).
8. Вкажіть області застосування люмінесценції в медицині.

### **Оберіть правильну відповідь:**

1. Джерелом енергії для теплового випромінювання тіла є:  
А. внутрішня енергія тіла  
Б. зовнішні джерела енергії  
В. енергія радіоактивного розпаду  
Г. енергія іонізації атомів  
Д. енергія руху тіла як цілого
2. Згідно закону Стефана-Больцмана енергетична світність тіла:  
А. прямо пропорційна довжині хвилі електромагнітного випромінювання  
Б. прямо пропорційна частоті електромагнітного випромінювання тіла  
В. прямо пропорційна абсолютній температурі в четвертому ступені  
Г. обернено пропорційна термодинамічній температурі тіла  
Д. обернено пропорційна довжині хвилі електромагнітного випромінювання.
3. Проаналізуйте, від чого залежить довжина хвилі, на яку припадає максимум теплового випромінювання тіла:  
А. знаходиться в логарифмічній залежності від температури тіла  
Б. обернено пропорційна монохроматичному коефіцієнту поглинання  
В. прямо пропорційна абсолютній температурі тіла

- Г. обернено пропорційна абсолютній температурі тіла
- Д. прямо пропорційна коефіцієнту поглинання

4. Проаналізуйте, що можна визначити за законом зміщення Віна для теплового випромінювання тіла:

- А. величину енергетичної світності тіла
- Б. довжину хвилі, на яку припадає максимум випромінювання
- В. максимальну довжину хвилі теплового випромінювання тіла
- Г. мінімальну довжину хвилі теплового випромінювання тіла
- Д. максимальну довжину хвилі при даній температурі тіла

5. Проаналізуйте, що можна визначити за допомогою закону Стефана-Больцмана для теплового випромінювання тіла:

- А. величину енергетичної світності тіла
- Б. коефіцієнт поглинання тіла
- В. довжину хвилі випромінювання тіла
- Г. енергію кванта випромінювання
- Д. частоту теплового випромінювання тіла

6. Величина енергії кванта випромінювання:

- А. прямо пропорційна його частоті
- Б. прямо пропорційна довжині хвилі
- В. обернено пропорційна його частоті
- Г. не залежить від частоти і довжини хвилі
- Д. є постійною величиною

7. Визначте, що таке коефіцієнт поглинання тілом теплового випромінювання:

- А. загальна кількість випромінювання, яке може поглинути тіло;
- Б. відношення поглиненого потоку випромінювання до потоку, що падає на тіло
- В. відношення потоку випромінювання, що падає на тіло, до потоку, що воно поглинає
- Г. сума потоків теплового випромінювання, яке падає і поглинається тілом
- Д. кількість випромінювання, яке може поглинути тіло за одиницю часу.

8. Проаналізуйте причини зменшення ефективності тепловіддачі за допомогою теплового випромінювання, якщо температура тіла дорівнює

температурі навколишнього середовища:

- А. тіло перестає бути джерелом теплового випромінювання
- Б. тіло поглинає стільки випромінювання, скільки випромінює
- В. внутрішня енергія тіла виснажується при підвищенні температури
- Г. тепловіддача перестає в таких умовах здійснюватися
- Д. в таких умовах не здійснюються електронні переходи в молекулах

9. Діапазон інфрачервоних хвиль ділиться на близьку, середню і далеку області. Такий поділ ведеться щодо:

- А. діапазону видимого світла
- Б. розміщення їх випромінювача в просторі
- В. розміщення їх приймача в просторі
- Г. початку шкали електромагнітних хвиль
- Д. їх здатності викликати віддалені ефекти

10. Безпосередньою причиною теплового випромінювання служать:

- А. переходи ядер речовин з вищих енергетичних рівнів на нижчі
- Б. переходи електронів між підрівнями зеєманівського розщеплення
- В. переходи електронів з нижчих енергетичних рівнів на вищі
- Г. переходи електронів з вищих енергетичних рівнів на нижчі
- Д. ядерні перетворень в атомах речовин, що утворюють організм

11. Фосфоресценція відрізняється від флюоресценції:

- А. інтенсивністю
- Б. тривалістю
- В. діною хвилі
- Г. частотою
- Д. кольором

12. Довжина хвилі люмінесцентного випромінювання по відношенню до довжини хвилі світла, яке викликає люмінесценцію, за законом Стокса:

- А. менша
- Б. однакова
- В. більша
- Г. не пов'язана з нею
- Д. значно менша

13. Люмінесценція є:

- А. спонтанним випромінюванням
- Б. тепловим випромінюванням
- В. індукованим випромінюванням
- Г. тривалим випромінюванням
- Д. іонізуючим випромінюванням

14. Закон Вавилова описує:

- А. максимальну довжину хвилі люмінесценції
- Б. мінімальну довжину хвилі люмінесценції



- В. енергетичний вихід люмінесценції
- Г. частоту люмінесцентного випромінювання
- Д. тривалість люмінесцентного випромінювання

15. Залежність енергетичного виходу люмінесценції від довжини хвилі світла, що викликало люмінесценцію, описує закон:

- А. Стокса
- Б. Вина
- В. Стефана-Больцмана
- Г. Планка
- Д. Вавилова

16. Залежність довжини хвилі люмінесценції від довжини хвилі світла, що викликало люмінесценцію, описує закон:

- А. Стокса
- Б. Вина
- В. Стефана-Больцмана
- Г. Планка
- Д. Вавилова

17. У медичній апаратурі, в якій використовуються іонізуючі випромінювання, для візуалізації внутрішніх процесів в тілі людини служить:

- А. іонолюмінесценція
- Б. катодолюмінесценція
- В. радіолюмінесценція
- Г. фотолюмінесценція
- Д. тріболюмінесценцією

18. У рентгенодіагностичній апаратурі люмінесценція використовується для:

- А. нагрівання
- Б. опромінення
- В. візуалізації
- Г. освітлення
- Д. іонізації

## 17. ЛАЗЕРИ. РАДІОСПЕКТРОСКОПІЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНІТНОГО І ЯДЕРНОГО МАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ

### *Фізична природа індукованого випромінювання*

Індуковане випромінювання відрізняється від спонтанного тим, що виникає не мимовільно за рахунок нестабільності збудженого стану атомів, а під дією інших квантів випромінювання. Існування індукованого випромінювання теоретично обґрунтував А. Ейнштейн, досліджуючи умови виникнення рівноваги між речовиною і випромінюванням.

Процес утворення індукованого випромінювання можливий, коли зовнішній квант випромінювання діє на вже збуджений атом, електрон якого знаходиться на більш високому енергетичному рівні (рис.17.1). В цьому випадку падаючий на атом квант може змусити його випромінювати. Умовою для цього є рівність енергії кванта і різниці енергетичних рівнів атома:  $h\nu = E_2 - E_1$ . Результатом є виникнення ще одного кванта випромінювання. Таке випромінювання є не спонтанним, а *індукованим (викликаним)*.

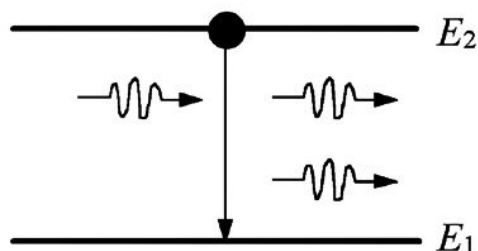


Рис.17.1. Виникнення індукованого випромінювання

Індуковане випромінювання відрізняється від спонтанного декількома властивостями.

1. Воно поширюється строго в тому ж напрямку, що і випромінювання, його викликало.
2. Фаза хвилі індукованого випромінювання, що випускається атомом, точно збігається з фазою падаючої хвилі.
3. Індуковане випромінювання поляризоване в тій же площині, що і падаюче випромінювання.

Таким чином, кванти індукованого випромінювання абсолютно однакові в усіх відношеннях і тотожні первинним стимулюючим квантам.

Тому вимушене випромінювання при своєму поширенні відрізняється від спонтанного випромінювання мізерно малою пучка, а також монохроматичністю і когерентністю.

### ***Умови виникнення індукованого випромінювання. Лазери***

У звичайних умовах величезна більшість атомів знаходиться в збудженому стані, тобто «заселяє» нижні енергетичні рівні. Тому ймовірність актів індукованого випромінювання мала, і речовина поглинає випромінювання. Для того, щоб переважало вимушене випромінювання, необхідно, «заселити» атомами верхні енергетичні рівні. Таку заселеність рівнів називають *інверсною*, а середу - *активною*.

Вперше таку активну середу вдалося створити російським вченим Н.Г.Басову, А.М.Прохорову і Ч.Х.Таунсу (Нобелівська премія з фізики). Сконструйовані прилади стали називати квантовими генераторами випромінювання. Перші квантові генератори випромінювали радіохвилі НВЧ діапазону. Надалі були створені *оптичні квантові генератори - лазери*. Цей термін є аббревіатурою англійських слів Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, тобто посилення світла за допомогою індукованого випромінювання.

Для створення інверсної заселеності рівнів в лазерах найчастіше використовують систему з трьох рівнів. Як приклад може служити рубіновий лазер. Його робочим тілом є кристал рубіна довжиною близько 5 см. Рубін представляє собою оксид алюмінію з домішкою атомів хрому. На рис.17.2 представлені три енергетичних рівня атомів хрому.  $E_1$  - основний рівень,  $E_3$  - збуджений. Проміжний рівень  $E_2$  є метастабільним. Це означає, що перехід  $E_3 \rightarrow E_1$ , заборонений законами квантової механіки, він мало ймовірний. Потрапивши в таке метастабільний стан, атом затримується в ньому. При цьому час життя атома в метастабільних станів  $\sim 10^{-3}$  с, що в сотні тисяч разів перевищує час життя атома в звичайному збудженому стані. Це забезпечує можливість накопичення збуджених атомів хрому з енергією  $E_2$ . Інакше кажучи, вдається створити інверсну заселеність цього рівня.

Схема пристрою рубінового лазера представлена на рис. 17.3 Процес надання робочому тілу (Р) лазера енергії для переходу атомів в збуджений стан називається *накачуванням*. Існують різні його фізичні механізми. У рубіновому лазері використовується дія інтенсивного світла - освітлення потужним ксеноновим лампою (Л).

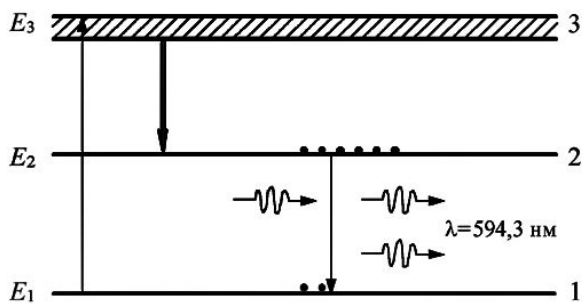


Рис. 17.2. Енергетичні рівні атомів хрому в рубіновому лазері

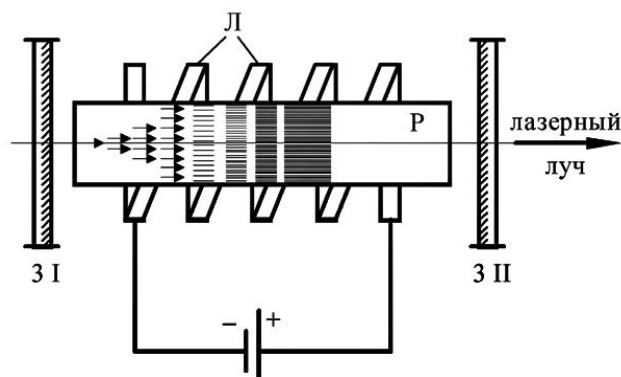


Рис. 17.3. Схема пристрою рубінового лазера

Поглинаючи випромінювання, атоми хрому переходять на рівень  $E_3$ , а потім на рівень  $E_2$ . Перехід  $E_3 \rightarrow E_2$  відбувається без випромінювання. Надлишок енергії передається кристалічній решітці рубіна, в результаті чого кристал нагрівається. Відносна стійкість рівня  $E_2$  забезпечує на деякий час переважну його заселеність. При цьому в результаті спонтанного переходу  $E_2 \rightarrow E_1$  поблизу торця кристала народжується перший квант випромінювання, який, взаємодіючи з атомами хрому, індукує появу нових квантів.

На торцях кристала знаходяться дзеркала  $З I$  і  $З II$ , одне з яких є напівпроникне. Випромінювання багаторазово відбивається від них. Процес народження нових квантів в робочому тілі наростає лавиноподібно. В результаті вимушене випромінювання поширюється вздовж осі кристала і посилюється. Виникає потужний імпульс лазерного випромінювання.

В даний час існує багато типів твердотільних лазерів на кристалах, газових лазерів, рідинних лазерів. Вони знаходять широке застосування в різних областях науки і техніки, а також в медицині.

## Застосування лазерів в медицині

Механізми дії лазера на організм складні і до кінця не розкриті. Встановлено, що це випромінювання викликає в біологічних тканинах збудження атомів і молекул. Спостерігається зміна структури біологічних молекул (*фотоізомеризація*). При цьому відбуваються зміни функцій мембранних білків-переносників і активація мембранних ферментів. У клітинах посилюється обмін речовин. Стимулюється синтез АТФ в мітохондріях. Ці ефекти в значній мірі визначаються специфічними властивостями лазерного випромінювання: монохроматичністю і когерентністю.

На клітинному рівні відбувається активація системи ДНК-РНК-білок. Посилюється мітотична активність клітин. Лазерне випромінювання перешкоджає розвитку запалення і набряку, покращує кровопостачання тканин; воно сприяє підвищенню рівня кисню в тканинах, стимулює регенерацію і імунні процеси.

*Лазерна терапія.* Лікувальна дія концентрованого світлового випромінювання (фототерапія) була відкрита ще в кінці 19 століття. Її застосовували для лікування низки шкірних захворювань. Оновоположником фототерапії був датський лікар Н.Р.Фінзен, який отримав Нобелівську премію в галузі фізіології і медицини за лікування туберкульозного ураження шкіри (вовчака) за допомогою ультрафіолетового випромінювання. Було встановлено, що чим вужче спектр випромінювання, тим вище лікувальний ефект.

З появою лазерів, що випромінюють одну довжину світлової хвилі, фототерапія отримала ще більшого поширення. З'явилася лазерна терапія. Показання до її застосування значно розширилися. Доведено, що лазерне випромінювання сприяє нормалізації фізіологічних процесів в тканинах. Перевага віддається випромінювачам, які працюють в червоній та інфрачервоній областях спектру.

В даний час лазерне випромінювання застосовують при лікуванні захворювань серцево-судинної системи, легенів, шлунково-кишкового тракту, сечостатевої системи. Воно застосовується також при захворюваннях нервової системи, лор-органів, опорно-рухового апарату. Лазерне випромінювання широко використовують при лікуванні шкірних захворювань і в косметології (видалення татуюж, епіляція та ін.).

*Лазерна хірургія.* При хірургічних операціях застосовують

високоенергетичні лазери («лазерний скальпель») Такі лазери дають можливість розсікати, руйнувати або зварювати різні тканини. Використання лазерного променя дозволяє здійснювати точне різання і абляцію (випаровування) тканин. При цьому відбувається їх коагуляція (згортання), в результаті чого зменшується кровотеча.

Можливість високої концентрації світлової енергії на малій площі дозволяє вибірково впливати на тканини і дозувати ступінь впливу від коагуляції до випаровування і розрізу. Застосування лазера менш травматично, ніж механічне розсічення тканин. Тепло мало передається на сусідні області і концентрується в зоні опромінення. Тому лазерний скальпель дозволяє видаляти тканини патологічного вогнища, не пошкоджуючи навколишні здорові тканини.

Додатковою перевагою є те, що лазерне опромінення має бактерицидний ефект. Тому лазерні рани практично стерильні і швидше загоюються. Лазерний скальпель дає можливість здійснювати операції в місцях, мало доступних для звичайних методів. Можливість передачі випромінювання по світловому волокну забезпечує зручність підведення його в різні області організму за допомогою світловодів. Завдяки цьому лазерне випромінювання застосовується не тільки в загальній, а й ендоскопічній хірургії. Зокрема, лазер використовують в оптоволоконному ендоскопі для лікування кровоточивих виразок шлунку.

*Лазерна офтальмохірургія.* Лазерне випромінювання застосовують для хірургічної корекції аномалій рефракції (заломлюючої здатності) ока - короткозорості, далекозорості та астигматизму. З цією метою використовують ультрафіолетовий газовий лазер. Лазерний промінь переміщається по поверхні рогівки і викликає абляцію поверхневих шарів рогівки. Цим досягається необхідне зміна кривизни її зовнішньої поверхні. В результаті вдається нормалізувати її рефракцію.

Лазерний промінь використовують також для «приварювання» відшарувалася сітківки ока. Відшарування сітківки звужує поле зору і може привести до сліпоті. Застосовують лазер з такою довжиною хвилі випромінювання, при якій енергія не поглинається прозорими тканинами ока і діє лише на сітківку.

*Лазерна діагностика.* Її методи знаходять застосування в дослідженні кровообігу, захворювань крові, ранньої діагностики раку і т.д. Прикладом може служити дослідження кровоплину в судинах сітківки ока. У кров

вводять нешкідливий барвник, здатний до фотолюмінесценції. Дно очей висвітлюють променем лазера. Підбирають таку довжину хвилі випромінювання, яка викликає максимальну люмінесценцію барвника. Зображення за допомогою спеціальних датчиків подається на дисплей.

### *Електронний парамагнітний резонанс*

Метод електронного парамагнітного резонансу (ЕПР), відкритий Е.К.Завойським, відноситься до методів *радіоспектроскопії*.

*Електронним парамагнітним резонансом (ЕПР)* називається резонансне поглинання електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону парамагнітними частками (атомами і молекулами), які знаходяться в постійному магнітному полі. Парамагнетиками називають речовини, атоми або молекули яких мають магнітний момент, відмінний від нуля. До них відносяться, наприклад, атоми Na, K, O, N і ін.

Електрони мають орбітальний і власний магнітні моменти. Останній є наслідком наявності у електрона власного механічного моменту - спіну (англ. Spin - вовчок). Власний магнітний момент також називають спіновим. Орбітальний і спіновий магнітні моменти складають магнітний момент електрона. Векторна сума магнітних моментів окремих електронів утворює магнітний момент електронної оболонки атома.

Електрони в електронній оболонці атома можуть бути спарені або неспарені. У спарених електронів магнітні моменти спрямовані протилежно і взаємно скомпенсовані. Тому сума магнітних моментів спарених електронів дорівнює нулю. Заповнені електронні оболонки також не мають магнітного моменту. Магнітні моменти тісно пов'язані з природою валентної хімічного зв'язку, так як хімічний зв'язок утворюють два електрона, магнітні моменти яких мають протилежний зміст.

Також існують атоми, що мають неспарені електрони. При розриві хімічного зв'язку виникають зазвичай частинки, що мають неспарені електрони з некомпенсованим магнітним моментом. До них відносяться *вільні радикали*. Вони характеризуються високою хімічною активністю.

При відсутності зовнішнього магнітного поля в речовині, до складу якої входять парамагнітні частинки, магнітні моменти неспарених електронів орієнтовані випадково і характеризуються деякою середньою енергією. При розміщенні такої речовини в постійному магнітному полі магнітні моменти електронів орієнтуються або по полю, або проти поля. Отже, електрони

поділяються на дві групи, яким відповідають два енергетичних підрівня. Відбувається *зеємановських розщеплення* (рис. 17.4). При цьому електрони, орієнтовані по полю, мають меншу енергію, ніж у відсутність поля, і заселяють нижній енергетичний підрівень. Електрони, орієнтовані проти поля, мають більшу енергію, ніж у відсутність поля, і заселяють верхні енергетичні підрівні.

Різниця енергії двох сусідніх підрівнів  $\Delta E$  визначається величиною магнітної індукції зовнішнього поля  $B$ :

$$\Delta E = g \mu_B B$$

В даному рівнянні  $g$  - фактор спектроскопічного розщеплення (величина, що характеризує внесок спин-орбітального моменту електрона в його сумарний електронний момент). Ця величина характеризує магнітні властивості електрона. Її визначають на основі квантових чисел. Величина  $\mu_B$  - магнетон Бора, або елементарна одиниця магнітного моменту електрона. Величина магнетона Бора визначається таким рівнянням:

$$\mu_B = e \hbar / 2 m_e$$

де  $e$  - заряд електрона,  $\hbar$  - константа Планка ( $h$ , поділена на  $2\pi$ ),  $m_e$  - маса електрона.

Якщо до зразка речовини тепер докласти електромагнітне поле з частотою  $\nu$ , то деякі з електронів, що знаходяться на нижньому рівні, будуть поглинати енергію цього поля ( $h\nu$ ) і переходити на верхній рівень. За умови  $h\nu = g\mu_B B$  відбуватиметься *резонансне* (інтенсивне) поглинання енергії електромагнітного поля. Частоти, при яких відбувається це явище, відносяться до діапазону радіохвиль.

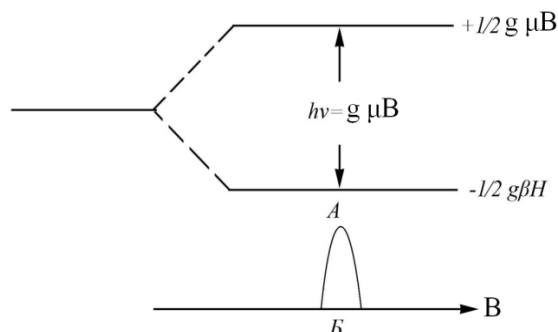


Рис. 17.4. Зеєманівське розщеплення (А) і явище електронного парамагнітного резонансу (Б) для вільного електрона



Після електромагнітного впливу електрони, які перейшли на верхній енергетичний підрівень, повертаються за законами термодинаміки на нижній - відбувається *релаксація*. Втрата енергії електрона при взаємодії з кристалічною решіткою речовини носить назву *спін-решіткової взаємодії* і відбувається за деякий час  $\tau$ . Чим сильніше спін-решіткова взаємодія, тим менше час релаксації і тим уже лінія сигналу ЕПР, і навпаки. Для вільних радикалів цей час може досягати декількох секунд.

У явищі ЕПР віддача енергії радіочастотним полем спостерігається у вигляді кривої поглинання. На криву поглинання впливає взаємодія між магнітним моментом неспареного електрона і магнітними моментами, атомних ядер, наявних в молекулі. Тому в спектрі ЕПР відбувається розщеплення резонансної лінії на кілька ліній (надтонка структура спектра ЕПР). Параметри такого розщеплення роблять спектри ЕПР індивідуальними для різних атомів і молекул і дозволяють ідентифікувати їх.

### ***Техніка ЕПР-спектрометрії***

Для спостереження спектрів ЕПР використовують складний комплекс радіоелектронної апаратури, що входить до складу спектрометра, і електромагніт (рис.17.5). У серійних приладах частота електромагнітного випромінювання задається постійною, а умова резонансу досягається шляхом зміни напруженості магнітного поля. Більшість спектрометрів працює на частоті 9000 МГц. Електромагнітне випромінювання надвисокої частоти (НВЧ) від джерела ( $K$ ) по хвилеводу ( $X$ ) надходить в об'ємний резонатор ( $P$ ), що містить досліджуваній зразок і поміщений між полюсами електромагніту  $NS$ . В умовах резонансу НВЧ випромінювання поглинається. Модульоване поглинанням НВЧ випромінювання по хвилеводу ( $X$ ) надходить на детектор ( $D$ ). Після детектування сигнал посилюється на підсилювачі ( $П$ ) і подається на пристрій реєстрації ( $P$ ).

За допомогою методу ЕПР проводять аналіз речовини на наявність в ній частинок, які мають неспарені електрони; кількісний аналіз їх концентрації шляхом порівняння сигналу ЕПР від досліджуваної речовини з величиною сигналу від стандарту, в якому вміст неспарених електронів відомий. Крім цього, метод ЕПР дозволяє на підставі аналізу ширини і форми сигналу робити висновки про взаємодію електронів з решітками твердого тіла або з частинками рідини в розчині. За шириною лінії ЕПР можна оцінити ступінь обміну і рухливості електронів між багатьма центрами.

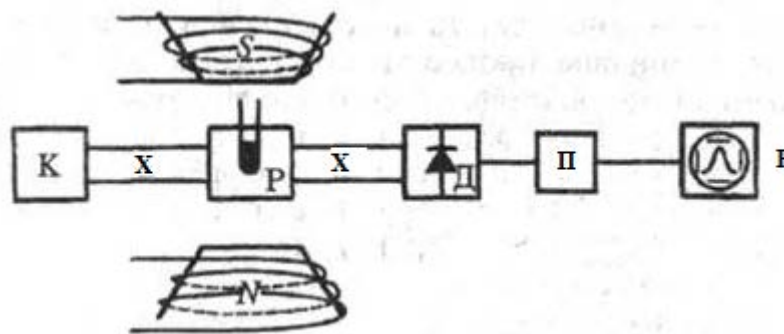


Рис 17.5. Блок-схема спектрометра ЕПР

### ***Фізичні основи ядерного магнітного резонансу***

Сутність ядерного магнітного резонансу (ЯМР) полягає в тому, що ядра деяких атомів здатні, перебуваючи в постійному магнітному полі, поглинати енергію зовнішнього електромагнітного поля, а потім випромінювати її у вигляді радіосигналу. Фізична природа ЯМР була розкрита І.А.Рабі (Нобелівська премія з фізики за 1944 р.), Ф. Блохом і Е.М.Парселлом (Нобелівська премія з фізики за 1952 р.)

Елементарні частинки, з яких складаються атоми, мають спін (від англ. обертання), тобто мають власний момент імпульсу. Тому навколо елементарних частинок існує магнітне поле, яке характеризується *магнітним моментом*. До таких частинок належать нуклони, з яких складаються атомні ядра (протони і нейтрони). Магнітний момент мають ядра, які містять непарне число нуклонів. До них відносяться ядра гідрогену Н, карбону С, фтору F і фосфору Р та ін.

Ядра атомів можуть мати різну енергією, тобто перебувати на різних енергетичних рівнях, які можуть бути визначені на основі законів квантової механіки. При розміщенні ядер, що мають спін, у зовнішньому постійному магнітному полі, їх магнітні моменти починають здійснювати *прецесійний рух*, який подібний обертанню дзиги. Цей рух відбувається навколо осі, спрямованої уздовж силових ліній прикладеного магнітного поля.

Розташування атомного ядра, яке здійснює прецесію, в постійному магнітному полі може бути в напрямі поля або проти нього. У першому випадку ядро знаходиться на більш низькому енергетичному рівні, у другому - на більш високому. Заселеність енергетичних рівнів ядер при цьому неоднакова: вищі рівні заселені в меншій мірі, ніж низькі.

Ядро може змінювати своє положення - з орієнтації магнітного моменту по полю переходити в орієнтацію проти поля, тобто з нижнього

енергетичного рівня на більш високий рівень. Це відбувається в результаті поглинання енергії зовнішнього електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону.

Таке поглинання є *резонансним*, тобто ядра поглинають електромагнітні хвилі тільки певної частоти. Його можливість залежить від енергії квантів електромагнітного поля. Вони поглинаються лише тоді, коли енергія квантів  $E = h\nu$  дорівнює різниці енергетичних рівнів атомних ядер, яка залежить від їх виду і магнітної індукції поля:

$$h \cdot \nu = g \cdot \mu_{\text{я}} \cdot \vec{B}$$

де  $g$  – множник Ланде,  $\mu_{\text{я}}$  – ядерний магнетон,  $B$  – магнітна індукція поля.

Електромагнітне поле радіочастотного діапазону прикладається у вигляді короткого імпульсу. Стан ядер на більш високому енергетичному рівні нестійкий. Коли радіочастотний імпульс закінчується, атомне ядро знову повертається в основний стан, тобто на більш низький енергетичний рівень. Цей процес називається *релаксацією* і супроводжується утворенням квантів енергії електромагнітного випромінювання. Час релаксації визначається двома процесами. Одним з них є спін-решіткова релаксація, в ході якої енергія розсіюється в навколишньому середовищі (решітками називають оточення ядер). Інший процес – спін-спінова релаксація, в результаті якої енергія передається іншим ядрам.

За допомогою спеціальних приладів можна зареєструвати сигнали (резонансне випромінювання) від релаксуючих атомних ядер. Амплітуда сигналів залежить від концентрації хімічного елемента в даному середовищі, а час релаксації – від багатьох факторів (молекулярної структури речовини, температури, в'язкості та ін.). Інформація міститься в спектрі резонансного випромінювання. На його вивченні заснований метод *ЯМР-спектроскопії*. За принципом здійснення вона подібна до ЕПР-спектроскопії.

ЯМР-спектроскопія застосовується в хімії для визначення структури молекул, розподілу в них електронів, ідентифікації хімічних речовин. У медицині широко застосовується магнітно-резонансна томографія (МРТ), заснована також на ядерному магнітному резонансі.

### ***Магнітно-резонансна томографія***

*Магнітно-резонансна томографія (МРТ)* – це метод отримання пошарових зображень внутрішніх органів, заснований на ядерному магнітному резонансі. Для проведення МРТ найчастіше використовують

магнітний резонанс ядер гідрогену (протонів), оскільки вони входять до складу води і всіх біологічних молекул. Метод МРТ був розроблений П.Лотербуром і П.Менсфілдом (Нобелівська премія з фізіології та медицини, 2003 р).

Система для МРТ складається з котушки електромагніту, який створює постійне магнітне поле (рис. 20.1). Всередині магніту є тунель, в якому

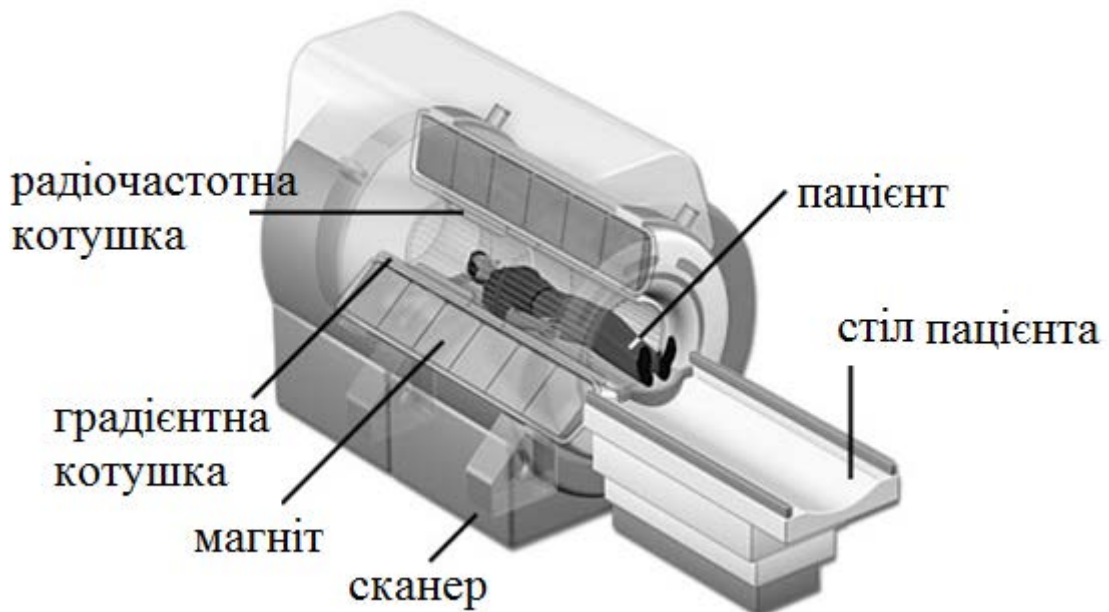


Рис. 17.6. Схема апарату для магнітно-резонансної томографії

розташовують пацієнта на спеціальному столі, який має автоматичну систему управління рухом в поздовжньому і вертикальному напрямку.

Для радіохвильового збудження ядер водню всередині основного магніту встановлюють додатково високочастотну котушку, яка одночасно служить і приймачем сигналу релаксації. Інші котушки створюють додатковий градієнт магнітного поля так, щоб заздалегідь вибране значення його інтенсивності було встановлено тільки в межах тонкого зрізу тіла, який є об'єктом дослідження.

Під час МРТ для того, щоб отримати зображення певного шару тканин, градієнти поля «обертають» навколо пацієнта. Фактично здійснюється сканування тіла людини. При впливі радіочастотних імпульсів на протони, які прецесують в магнітному полі, відбувається їх резонансне збудження і поглинання енергії. Після закінчення імпульсу відбувається релаксація протонів: вони повертаються в початкове положення, що супроводжується виділенням енергії у вигляді ЯМР-сигналу. Цей процес повторюється багато

разів. Отримані сигнали перетворюються в цифрові і надходять в пам'ять ЕОМ для аналізу. МРТ-установки включають в себе потужні високопродуктивні комп'ютери.

Характер МРТ-зображення визначається концентрацією ядер водню в досліджуваному зрізі і часом їх релаксації. Основний внесок в побудову зображення вносить саме час релаксації, яке значно відрізняється у різних живих тканин внаслідок відмінностей хімічного складу і будови. Різні тканини (жирова і сполучна, сіра і біла речовина головного мозку та ін.) відрізняються за часом релаксації ядер водню і дають різні відтінки МРТ-зображення. Це створює передумови для візуалізації нормальних і змінених тканин на МРТ-зображеннях, приклади яких представлені на рис. 17.7.

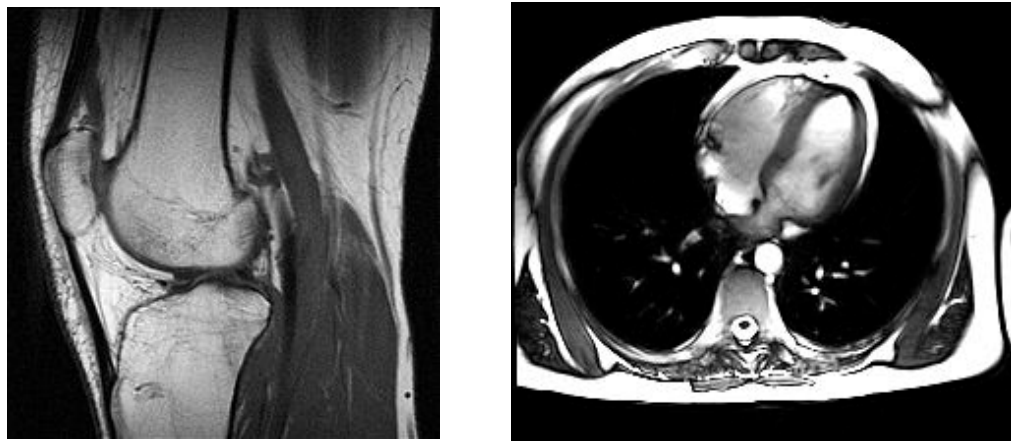


Рис. 17.7. МРТ колінного суглоба та грудної клітини

**Оберіть правильну відповідь:**

1. Від звичайного світла лазерний промінь відрізняється тим, що він:
  - А. поширюється з великою швидкістю
  - Б. є монохроматичним
  - В. не здатний до дифракції
  - Г. не здатний до інтерференції
  - Д. має меншу інтенсивність
2. Для отримання індукованого випромінювання необхідно:
  - А. створення інверсної заселеності енергетичних рівнів

- Б. підвищення абсолютної температури речовини
- В. штучне розщеплення ядер речовини
- Г. вплив радіоактивних випромінювань
- Д. перевести всі атоми в основний стан

3. Інверсна заселеність енергетичних рівнів в атомах речовини спостерігається, якщо:

- А. число незбуджених атомів перевищує число збуджених
- Б. всі атоми перебувають в однаковому енергетичному стані
- В. зміни енергетичного стану електронів неможливі
- Г. число збуджених атомів перевищує число незбуджених
- В. всі енергетичні рівні атомів зайняті електронами

4. Оптичний резонатор:

- А. збільшує інтенсивність світла
- Б. підсилює амплітуду власних коливань
- В. створює інверсну заселеність
- Г. зменшує частоту лазерного світла
- Д. збільшує частоту лазерного променя

5. Лазерне випромінювання завжди:

- А. червоного кольору
- Б. синього кольору
- В. інфрачервоне
- Г. когерентне
- Д. інтенсивне

6. Проаналізуйте, чим треба діяти на об'єкт, щоб викликати явище ядерного магнітного резонансу:

- А. ядрами атомів водню
- Б. альфа-частками
- В. гамма-променями
- Г. радіохвилями
- Д. світловими хвилями

7. Ядерний магнітний резонанс у медицині використовується для:

- А. лікування змінним магнітним полем
- Б. глибокого прогрівання тканин
- В. отримання зображення внутрішніх органів
- Г. отримання продуктів радіоактивного розпаду
- Д. лікування онкологічних захворювань

8. МРТ найчастіше здійснюється на основі ядерного резонансу:

- А. всіх атомів тіла
- Б. радіоактивних атомів

- В. атомів парамагнетиків
- Г. електронів парамагнетиків
- Д. атомів водню води

9. Вплив магнітного поля при здійсненні МРТ дозволяє:

- А. розщепити ядра на його складові
- Б. розщепити енергетичні рівні ядер
- В. локально прогрівати певні частини тіла
- Г. стимулювати ядерні реакції в організмі
- Д. стимулювати рефлекторні реакції

10. При здійсненні МРТ резонансно поглинаються:

- А. хвилі світлового діапазону
- Б. все електромагнітні хвилі
- В. постійне магнітне поле
- Г. хвилі радіочастотного діапазону
- Д. інфрачервоне випромінювання

11. Резонансна частота для ЯМР - це частота хвилі, коли вона здатна:

- А. викликати розпад ядра
- Б. поглинатися ядрами
- В. утворювати радіонукліди
- Г. іонізувати атоми
- Д. збільшувати число ядер

12. При поглинанні радіохвилі в методі ЯМР відбувається перехід:

- А. ядер на вищі підрівні
- Б. електронів на вищі рівні
- В. електронів на вищі підрівні
- Г. ядер одного елемента в ядра іншого елемента
- Д. нестабільних ядер у стабільні ізотопи

## 18. ОСНОВИ РЕНТГЕНОДІАГНОСТИКИ І РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ

Рентгенівське випромінювання було відкрито німецьким фізиком К.В. Рентгеном в 1895 році і названо вченим Х-променями. За своє відкриття він був удостоєний багатьох престижних нагород, а в 1901 р - першої Нобелівської премії з фізики.

### *Пристрій рентгенівської трубки. Гальмівне і характеристичне рентгенівське випромінювання*

Рентгенівське випромінювання представляє собою потік електромагнітних хвиль, довжина яких становить  $80 \text{ нм} - 10^{-5} \text{ нм}$ . Його отримують за допомогою рентгенівської трубки. Вона представляє собою двохелектродний вакуумний прилад (рис. 18.1).

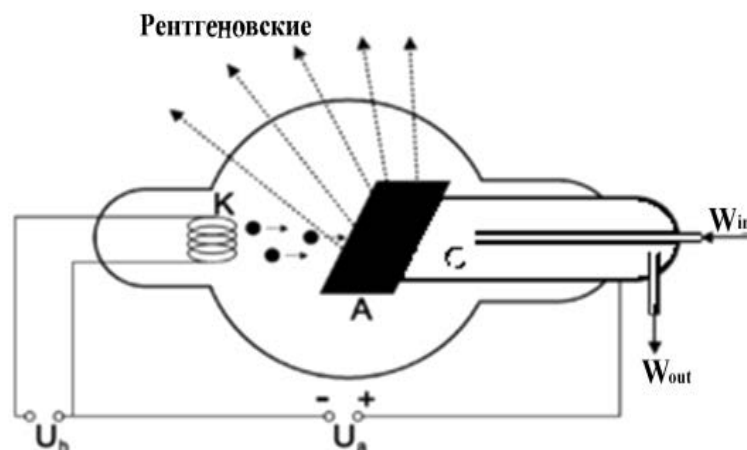


Рис. 18.1 Схематичне зображення рентгенівської трубки

Катод (К) нагрівається за допомогою змінного електричного струму ( $U$ ) і випромінює потік електронів. Це явище називається *термоелектронною емісією*. Електрони рухаються до позитивного електроду - аноду (А), значно прискорюючись міжелектродною різницею потенціалів ( $U$ ), яка в сучасних рентгенівських трубках становить сотні кіловольт. Кінетична енергія електронів в процесі їх руху практично не розсіюється внаслідок того, що в трубці відкачане повітря і сили тертя майже немає.

Електрони досягають аноду, маючи велику кінетичну енергію, і гальмуються електричними полями атомів його речовини. При цьому кінетична енергія рухомих електронів перетворюється в енергію квантів



електромагнітного випромінювання. Рентгенівські хвилі, які утворюються в результаті гальмування електронів атомами аноду, називають *гальмівним випромінюванням*.

При утворенні гальмівного рентгенівського випромінювання лише близько 1% сумарної кінетичної енергії всіх електронів витрачається на утворення рентгенівських променів, а 99% розсіюється у вигляді теплоти. Для кожного електрона співвідношення розсіяної енергії і тієї її частини, яка перейшла в енергію електромагнітної хвилі, випадково. Тому фотони рентгенівського випромінювання мають різну довжину хвилі і частоту. Внаслідок цього гальмівне випромінювання має суцільний спектр (рис. 18.2). При цьому потік ( $\Phi$ ) гальмівного рентгенівського випромінювання в трубці залежить від сили струму в трубці ( $I$ ), напруги між катодом і анодом ( $U$ ) та порядкового номера (заряду ядра  $z$ ) речовини анода:

$$\Phi = k \cdot I \cdot U^2 \cdot z$$

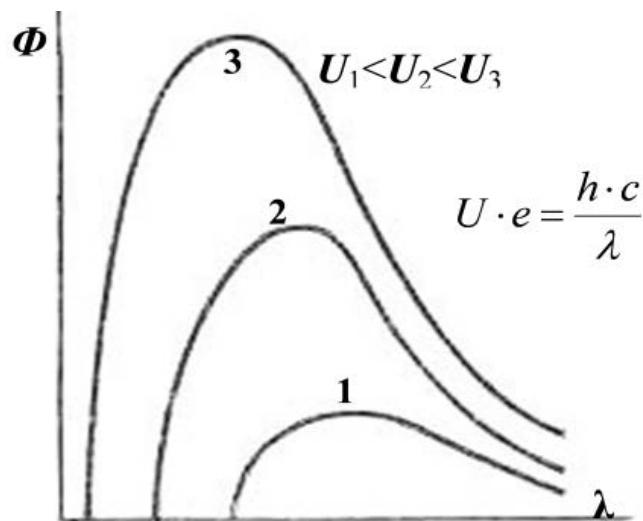


Рис. 18.2 Графік спектра гальмівного рентгенівського випромінювання

На рис. 18.2 представлені суцільні спектри рентгенівського випромінювання (криві 1, 2, 3), отримані при напрузі між катодом і анодом відповідно  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ . Формула на рисунку показує, що максимальна енергія кванта може бути досягнута лише при повному перетворенні кінетичної енергії ( $eU$ ) електрона в енергію електромагнітної хвилі. Тому регулювати

довжину хвилі рентгенівського випромінювання можна шляхом зміни різниці потенціалів між катодом і анодом.

За довжиною хвилі в суцільному спектрі гальмівного рентгенівського випромінювання виділяють: *м'яке* (80 нм - 0,01 нм) і *жорстке випромінювання* (0,01 нм -  $10^{-5}$  нм). Вони розрізняються за їх проникаючою здатністю і за поглинанням їх речовиною.

Анод виготовляють з тугоплавких матеріалів (наприклад, вольфраму або кераміки з молібденом), розташовують під кутом до катода, а в деяких конструкціях рентгенівських трубок - охолоджують водою або маслом і роблять рухомим. Все це створює оптимальні умови отримання рентгенівського випромінювання і сприяє збільшенню терміну служби рентгенівської трубки.

При значному збільшенні напруги між катодом і анодом на тлі суцільного спектра гальмівного рентгенівського випромінювання виникає лінійчатий спектр *характеристичного рентгенівського випромінювання* (рис. 18.3). Його інтенсивність становить 1-2% інтенсивності гальмівного.

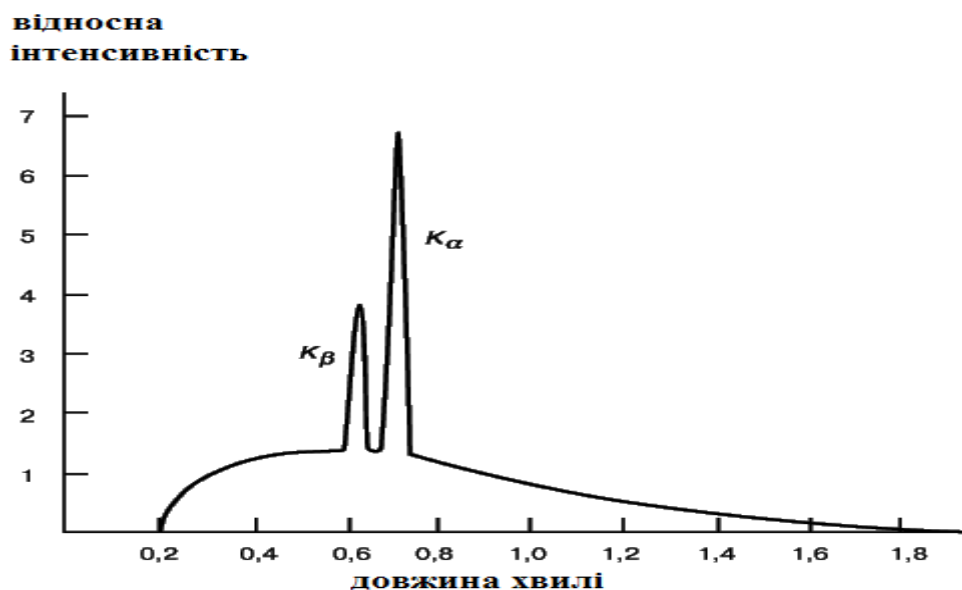


Рис. 18.3 Спектр характеристичного рентгенівського випромінювання

Походження характеристичного рентгенівського випромінювання обумовлено переходами електронів між енергетичними рівнями в атомах речовини анода. Такі переходи спостерігаються, якщо прискорені електрони, що випускаються катодом, вибивають електрони з внутрішніх оболонок

атомів речовини анода. Вакантні місця займають електрони з більш високих енергетичних рівнів. Різниця енергій вищого рівня і того рівня, на який здійснився перехід електрона, випромінюється у вигляді квантів характеристичного рентгенівського випромінювання. Їх частота визначається за законом Мозлі:

$$\sqrt{\nu} = A \cdot (z - B)$$

де  $A$ ,  $B$  - константи,  $z$  - порядковий номер (заряд ядра) випромінюючого елемента.

Джерелом рентгенівського випромінювання може бути не тільки рентгенівська трубка. На Землі воно утворюється в результаті гальмування заряджених частинок космічних променів частинками атмосфери, при деяких видах радіоактивного розпаду.

### ***Первинні механізми взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною. Закон поглинання рентгенівського випромінювання***

При поглинанні енергія електромагнітних хвиль передається атомам і молекулам речовини, в результаті чого можуть спостерігатися такі основні первинні механізми взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною:

1. *Когерентне розсіяння.* Відбувається, якщо енергія рентгенівського кванта менша, ніж енергія іонізації атома речовини. В результаті взаємодії кванта з електронами атомів відбувається зміна напрямку його поширення, але енергія його (і частота) залишаються незмінними.

2. *Фотоефект* спостерігається, якщо енергія рентгенівських променів дорівнює або трохи більша, ніж енергія іонізації атомів речовини (або роботи виходу електрона). При цьому рентгенівські кванти поглинаються атомами. В результаті з них вивільняються електрони. Частина енергії квантів може використовуватися на надання електронам кінетичної енергії.

3. *Ефект Комптона (некогерентне розсіяння)* спостерігається, якщо енергія кванта рентгенівського випромінювання істотно перевищує енергію іонізації атомів речовини, і він тільки частково поглинається. Це призводить до іонізації атомів, в результаті якої вивільняються електрони з великими значеннями кінетичної енергії. При цьому утворюється вторинний фотон рентгенівського випромінювання, що має інший напрямок, ніж первинний фотон, і більшу, ніж в останнього, довжину хвилі. Якщо кінетична енергія електрона і енергія вторинного фотона більша, ніж енергія виходу електронів з атомів речовини, відбувається подальша їх іонізація.

Енергія квантів рентгенівського випромінювання може бути достатньою лише для збудження атомів речовини. В такому випадку в деяких речовинах спостерігається *рентгенолюмінесценція*. Іонізація речовин в результаті фотоефекту і ефекту Комптона обумовлює хімічну дію Х-променів на фотоплівку, появу електропровідності речовини. Ці вторинні процеси є основою виявлення рентгенівського випромінювання в середовищі і при візуалізації діагностичних даних.

За рахунок поглинання рентгенівського випромінювання речовиною його потік зменшується за *законом Бугера-Ламберта*:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

де  $\Phi_0$  - початковий потік рентгенівського випромінювання,  $\Phi$  - потік рентгенівського випромінювання після його проходження через шар речовини товщиною  $d$ ,  $\mu$  - лінійний коефіцієнт послаблення. Він є сумою лінійного коефіцієнта розсіювання і лінійного коефіцієнта поглинання.

Зменшення потоку рентгенівського випромінювання визначається, в основному, поглинанням. Тому  $\mu$  часто називають *лінійним коефіцієнтом поглинання*. Він залежить від властивостей рентгенівського випромінювання і характеристик речовини, що поглинає:

$$\mu = k \cdot \lambda^3 \cdot z^3 \cdot \rho$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі рентгенівського випромінювання,  $z$  - порядковий номер речовини в таблиці Менделєєва,  $\rho$  – густина речовини.

### ***Основні види рентгенодіагностики***

Найбільш поширеною процедурою діагностики за допомогою рентгенівського випромінювання є *рентгенографія* - отримання зображення внутрішніх органів на фотоплівці.

Рентгенівська плівка знаходиться в світлонепроникній касеті. Вона розташована так, щоб рентгенівські промені потрапили на неї, пройшовши через певну частину тіла пацієнта.

Інтенсивність потоку променів, що пройшов через різні області тіла, неоднакова. Від неї залежить кількість металевого срібла, що утворюється на рентгенівській плівці і має чорний колір. Области тіла, які мало поглинають рентгенівські промені, на плівці виглядають темними після її проявлення. Кістки більше інших тканин поглинають рентгенівське випромінювання. В

результаті інтенсивність променів, які пройшли крізь кістки, невелика, і вони виглядають на фотоплівці світлими

Відмінності поглинання рентгенівських променів м'якими тканинами невеликі. Тому при дослідженні органів, що складаються з таких тканин, використовують контрастні речовини з великим коефіцієнтом поглинання. Їх вводять в порожнисті органи або в кров. Наприклад, при дослідженні органів травлення застосовують сульфат барію, а при дослідженні судинної системи - препарати йоду.

*Флюорографія* - це метод рентгенографії, який полягає в фотографуванні тіньового рентгенівського зображення з флуоресцентного екрану на фотоплівку або формування на основі вказаного зображення комп'ютерного знімку (*цифрова флюорографія*). Флюорографія використовується для масового обстеження населення.

*Рентгеноскопія* - метод рентгенодіагностики, під час якого зображення тіла пацієнта розглядають на флуоресцентному екрані. Рентгеноскопія дозволяє спостерігати в реальному часі структури, що досліджуються, при необхідності збільшувати за допомогою апаратури зображення областей, які зацікавили лікаря, проводиться швидко. Однак метод вимагає захисту медперсоналу від дії випромінювання за допомогою поглинаючих екранів і потребує більшої експозиції обстежуваного в зоні рентгенівського випромінювання.

Недоліком як рентгенографії, так і рентгеноскопії є отримання двомірних зображень анатомічних структур, які є тривимірними. При цьому зображення різних органів і тканин накладаються один на одного.

### ***Рентгенівська комп'ютерна томографія (РКТ)***

Найбільш точну візуалізацію стану внутрішніх структур дозволяє отримати *рентгенівська комп'ютерна томографія (РКТ)*. У 1973 році Кормак і Хаунсфілд створили перший в світі рентгенівський томограф, за що були удостоєні в 1979 р. Нобелівської премії в області фізіології і медицини.

Комп'ютерна томографія дозволяє отримати серію зображень поперечних зрізів частин тіла людини. Це досягається за допомогою математичної обробки великої кількості даних послаблення рентгенівського випромінювання кожним зрізом, отриманих під різними кутами. Комп'ютерна техніка проводить реконструкцію двовимірного зображення зрізу із серії одновимірних проєкцій.

Принцип дії томографів полягає в тому, що рентгенівська трубка і приймач рентгенівських променів (детектор) знаходяться з протилежних сторін об'єкта і можуть рухатися навколо нього. Інформацію несуть показники інтенсивності променів, які пройшли через обраний для дослідження зріз тіла. Сигнали від детектора перетворюються в цифрову форму, передаються в комп'ютер, де обробляються спеціальними математичними програмами.

До теперішнього часу було розроблено декілька поколінь комп'ютерних томографів. Їх створення спрямовано на вирішення двох основних завдань - зменшення часу експозиції об'єкта в рентгенівських променях, які є іонізуючими, і збільшення якості зображень.

Найбільш поширеною в теперішній час є *спіральна томографія*. При її здійсненні стіл пацієнта плавно переміщується при безперервному обертанні рентгенівської трубки (рис. 18.5). Цей метод дозволяє отримувати від 5 до 30 зображень в секунду.

Роздільна здатність КТ значно вище, ніж у класичної рентгенографії. КТ дозволяє без застосування контрастних речовин розрізняти окремі органи і тканини. На рис.18.6 показана комп'ютерна томограма черепа і головного мозку в сагітальній площині. На ній чітко видно мозкові звивини і інші деталі структури мозку.

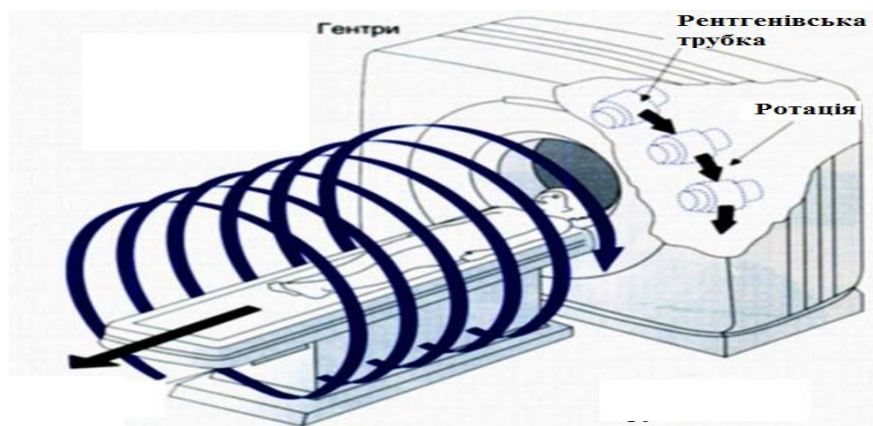


Рис. 18.5 Спіральний метод томографії

У *терапії* рентгенівське випромінювання застосовують для опромінення злоякісних пухлин, клітини яких внаслідок їх активної проліферації (ділення) є більш чутливими до шкідливого дії іонізуючого випромінювання, ніж клітини здорових тканин.



Рис. 18.6 Комп'ютерна томограма черепа і головного мозку

***Дифракція рентгенівських променів. Основи рентгеноструктурного аналізу та рентгенівської спектроскопії***

Для рентгенівських променів, як і для будь-яких хвиль, характерне явище дифракції - відхилення від прямолінійного поширення, якщо на їх шляху знаходиться перешкода, порівняна за розмірами з довжиною хвилі. Для спостереження дифракції світла використовують дифракційну решітку - систему паралельних щілин однакового розміру, які розділені непрозорими проміжками рівної ширини. Характеристикою дифракційної решітки є *постійна решітки* - сума ширини щілини і ширини проміжку. Умовою дифракції в цьому спектральному приладі є рівність постійної решітки і довжини хвилі падаючого на неї світла. Спостереження дифракції рентгенівських променів на звичайній дифракційній решітці неможливо внаслідок їхньої малої довжини хвилі.

Вперше явище дифракції рентгенівського випромінювання спостерігав німецький фізик М.Лауе через 15 років після відкриття рентгенівського випромінювання, який використовував як дифракційної решітки *монокристал*. Для нього характерна сувора впорядкованість внутрішньої структури. Тому кристали можна розглядати як тривимірні просторові решітки з постійною близько  $10^{-10}$  м. Така величина порівнянна з довжиною хвилі рентгенівського випромінювання.

Російський фізик Г.Вульф і англійські фізики У.Г.Брегг і У.Л.Брегг (батько і син) запропонували просте пояснення дифракційної картини, яка

формується рентгенівським випромінюванням при його падінні на кристал. Вона є результатом відображення рентгенівських променів від системи паралельних кристалографічних площин (площин, в яких розташовані атоми кристалічної решітки). Пучок монохроматичних рентгенівських променів, потрапляючи під кутом (рис. 18.7) на атоми кристалічної решітки, збуджує їх. Внаслідок цього вони стають джерелом когерентних вторинних хвиль, які інтерферують між собою, формуючи максимуми і мінімуми інтенсивності випромінювання.

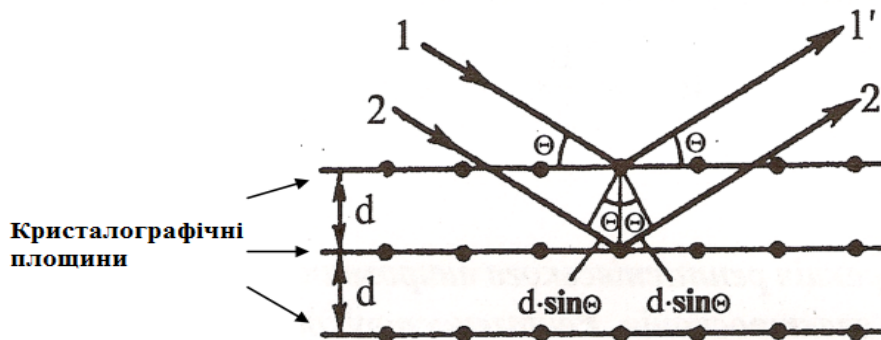


Рис 18.7. Схема дифракції рентгенівських променів в кристалі

Максимуми інтенсивності спостерігаються в напрямках падіння рентгенівського випромінювання на кристал, для яких справедливо умова:

$$2d \cdot \sin \theta = \pm m \cdot \lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

Це рівняння називають *умовою дифракції Вульфа-Брегга*. У ньому  $d$  - постійна решітки,  $\theta$  - кут, під яким рентгенівські промені падають на кристал,  $\lambda$  - довжина хвилі рентгенівських променів,  $m$  - порядок максимуму.

При довільному напрямку падіння монохроматичного рентгенівського випромінювання на кристал дифракція не виникає. Щоб її спостерігати, кристал обертають, поки не знайдуть потрібний кут. Дифракційна картина може бути отримана і при незмінному положенні кристала, але при цьому потрібно користуватися суцільним рентгенівським спектром, що випромінюється рентгенівської трубкою. При таких умовах завжди знайдуться довжини хвиль, які задовольняють умові Вульфа-Брегга.

Дифракція рентгенівських променів на кристалах отримала застосування в двох напрямках:

- *рентгеноструктурний аналіз* - методи дослідження невідомої структури кристалічних речовин за допомогою рентгенівського випромінювання відомого спектрального складу;



- *рентгенівська спектроскопія* - метод дослідження невідомого спектрального складу рентгенівського випромінювання за допомогою кристалів відомої структури.

Рентгеноструктурний аналіз може проводитися декількома методами. За методом *Лауе* вузький поліхроматичний пучок рентгенівського випромінювання направляється на нерухомий монокристал. Для кожної системи кристалографічних площин у випромінюванні знайдеться довжина хвилі, яка задовольнить умові Вульфа-Брегга. В результаті на фотопластинці, розташованій позаду кристала, реєструється система плям-максимумів (рис. 18.8, А). Взаємне розташування цих плям відображає симетрію кристала. На малюнку приведена рентгенограма (*лауеграма*) мінералу з групи силікатів.

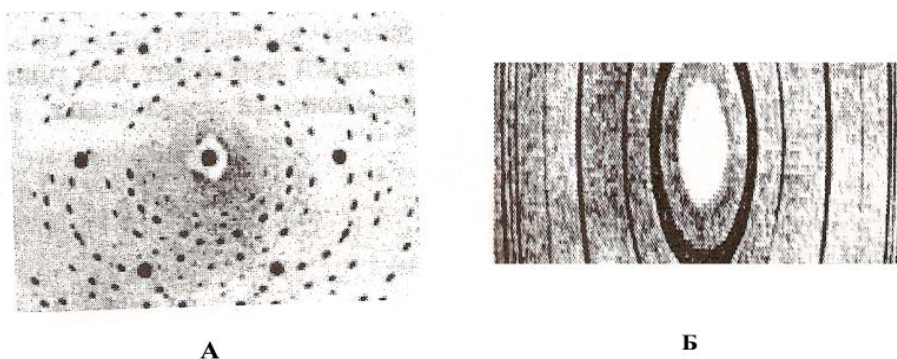


Рис. 18.8. лауеграма (А) і дебайграма (В)

За методом *Дебая-Шерера* вузький пучок монохроматичного рентгенівського випромінювання направляють на стовпчик розтертого до стану порошку досліджуваної полікристалічної речовини (або суміші монокристалів). Такий стовпчик представляє собою сукупність мініатюрних кристалів, орієнтованих хаотично. Серед них завжди знайдуться такі, які орієнтовані в напрямку, що задовольняє умові Вульфа-Брегга. В даному випадку дифрагований пучок буде утворювати конус напрямків - певний для кожної системи кристалографічних площин. Рентгенограма, отримана таким методом, називається *дебайграмою*, має вигляд концентричних кілець (рис. 18.8, Б).

*Метод кристала, що коливається*, використовують для дослідження монокристалів. Схема його приведена на рис. 18.9. Монокристал розташовується на столі і за допомогою спеціального механізму повільно коливається. Вузький монохроматический пучок рентгенівського випромінювання проходить через діафрагми і та, потрапляючи на кристал,

дифрагує. Інтерференційний максимум реєструється на фотоплівці  $\Phi$ . При зміщенні кристала порушується умова максимуму, і інтенсивність розсіяного пучка змінюється. Проте хвиля з меншою інтенсивністю, буде зареєстрована в іншому місці фотопластинки (пунктир). Таким способом можна визначити міжплосинні відстані (період решітки), а також розмір частинок, розташованих у вузлах кристалічної решітки.

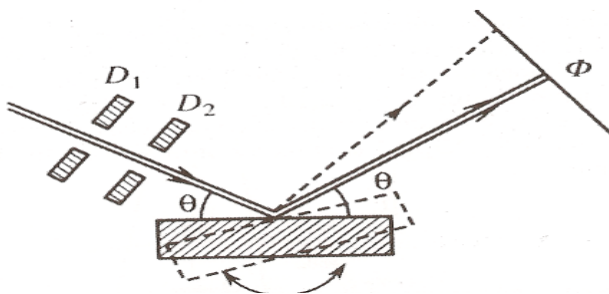


Рис. 18.9. Метод кристала, що коливається

Рентгеноструктурний аналіз в даний час є найпоширенішим методом визначення структури кристалічних речовин із-за його простоти і відносної дешевизни.

*Рентгенівська спектроскопія* дозволяє вивчати спектр рентгенівських променів, які: а). пройшли крізь зразок, або б). випромінюються ним (*рентгенофлуоресцентний аналіз*).

Спектральний склад рентгенівського випромінювання, тобто вимір його довжин хвиль, проводиться за допомогою формули Вульфа-Брегга. Для цього використовують кристали відомої структури і визначають напрямки (кути) і максимума дифракційної картини рентгенівського випромінювання на цьому кристалі.

Найчастіше застосовується рентгенофлуоресцентний аналіз. Він заснований на тому, що при збудженні атома електрони його внутрішніх оболонок переходять на вищі енергетичні рівні. Електрони з зовнішніх оболонок перескакують на вакантні місця нижніх енергетичних рівнів. При цьому надлишок енергії вивільняється у вигляді квантів характеристичного рентгенівського випромінювання або передається іншому електрону зовнішньої оболонки, який може в результаті цього звільнитися з атома (оже-електрон). Кожен атом випускає квант або електрон з енергією строго певного значення, наприклад залізо при опроміненні рентгенівськими променями випускає фотони 6,4 кеВ. За енергіями і кількістю випромінених квантів судять про кількісний та якісний склад аналізованого речовини.

Для аналізу спектру вторинного рентгенівського випромінювання застосовують або дифракцію рентгенівських променів на кристалі (досліджують хвильову дисперсію квантів), або детектори, чутливі до енергії кванта (досліджують енергетичну дисперсію квантів). На рис. 18.10 наведено приклад енергетичного спектру, отриманого в ході рентгенофлуоресцентного аналізу металевої руди. Видно, що в її складі переважає мідь (найвищий пік) і срібло (кілька піків).

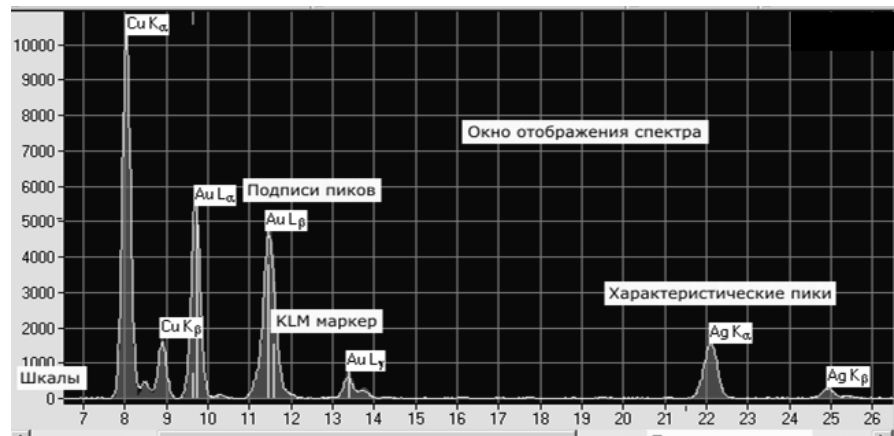


Рис. Енергетичний спектр зразка металевою руди

Рентгенофлуоресцентний метод широко використовується в промисловості, наукових лабораторіях, в тому числі фармакологічних, завдяки простоті, можливості експрес-аналізу, точності, відсутності складної підготовки проб.

### Контрольні питання:

1. Охарактеризуйте принцип роботи рентгенівської трубки.
2. Чим м'яке рентгенівське випромінювання відрізняється від жорсткого?
3. Поясніть суцільний спектр гальмівного рентгенівського випромінювання.
4. Охарактеризуйте закон Мозлі.
5. Поясніть механізми взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною.
6. Охарактеризуйте закон поглинання рентгенівського випромінювання речовиною.



- А. зменшиться                      Б. збільшиться                      В. не зміниться  
Г. подвоїться                      Д. зникне

7. Характеристичне випромінювання описується законом:

- А. Мозлі    Б. де Бройля    В. Стокса    Г. Планка    Д. Вавилова

8. Когерентне розсіювання рентгенівських променів спостерігається, якщо енергія їх квантів:

- А. перевищує енергію вивільнення електрона з атома  
Б. недостатня для іонізації атомів речовини  
В. недостатня для збудження атомів речовини  
Г. недостатня для вивільнення електронів  
Д. перевищує енергію розпаду ядра атома

9. Некогерентне розсіяння рентгенівських хвиль також називають:

- А. фотоелектричний ефект                      Б. лазерний ефект  
В. збудливий ефект                      Г. ефект Комптона

10. Збільшити поглинання речовиною рентгенівського випромінювання можна шляхом:

- А. зменшення його довжини хвилі  
Б. зменшення товщини поглинаючого шару  
В. зменшення потоку рентгенівського випромінювання  
Г. збільшення його довжини хвилі  
Д. збільшення частоти хвиль

## 19. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ІОНІЗУЮЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Радіоактивність* – це властивість ядер деяких елементів (радіонуклідів) мимовільно розпадатись із утворенням інших ядер і іонізуючих випромінювань. Явище радіоактивності вивчає *ядерна фізика*. В *ядерній медицині* радіонукліди застосовують з діагностичною метою і в терапії онкологічних захворювань.

### *Атомне ядро*

Атомне ядро складається з двох видів елементарних частинок, які називаються *нуклонами* - *протонів і нейтронів*. Протон має позитивний електричний заряд, який за величиною дорівнює заряду електрона. Маса протона в 1840 разів перевищує масу електрона. Маса нейтрона, який не має електричного заряду, майже на 0,1% більша, ніж маса протона.

Кожне ядро характеризується зарядовим числом  $Z$  (атомним номером) і масовим числом  $A$ .  $Z$  дорівнює кількості протонів і характеризує заряд ядра.  $A$  відповідає загальному числу протонів і нейтронів в атомному ядрі. Ядра, які мають однакове зарядове число, але різні масові числа, називаються *ізотопами*. Ізотопи кожного елемента є ідентичними в хімічному відношенні.



Рис. 22.1 Будова атомних ядер

В атомному ядрі діють три види сил: 1. *Сильна взаємодія* - надзвичайно міцні *ядерні сили*, які є силами тяжіння, неелектричними за своєю природою. Вони діють лише на близькій відстані і утримують нуклони разом у складі ядра; 2. *Електромагнітна взаємодія*, яка є значно слабкішою, ніж ядерні сили. Вона діє як сила відштовхування між зближеними протонами; 3.

*Слабка взаємодія*, яка має найменшу інтенсивність, не є силою тяжіння або відштовхування, однак несе відповідальність за бета-розпад ядра.

Атомні ядра називаються також *нуклідами*. Відомі сотні нуклідів природного та штучного походження, включаючи ізотопи. Деякі з них цілком стійкі. Інші виявляють тенденцію до спонтанного розпаду.

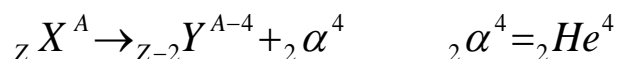
### **Радіоактивність**

Радіоактивність була відкрита французьким фізиком А.А.Беккерелем (1896). Він показав, що уран випускає невидимі промені, які можуть проникати через непрозорий контейнер і засвічувати фотографічну пластинку. Незабаром П'єр і Марія Кюрі виявили, що існують також інші радіоактивні елементи - радій і полоній. З'ясувалося, що випромінювання радіо неоднорідне і утворено трьома компонентами:  $\alpha$ -,  $\beta$ - і  $\gamma$ -променями. Їх походження розкрив Е.Резерфорд, який показав, що радіоактивність є результатом розпаду атомного ядра. У процесі розпаду ядро одного хімічного елемента перетворюється в ядро іншого елемента. За свої видатні відкриття А.А.Беккерель, П.Кюрі і М. Кюрі, Е. Резерфорд були удостоєні Нобелівської премії з фізики.

Існує кілька видів радіоактивного розпаду ядер. До числа основних відносяться  $\alpha$ - розпад і  $\beta$ - розпад.

#### **$\alpha$ -розпад**

$\alpha$ -розпад спостерігається у важких нестійких атомних ядрах. Атомне ядро  $X$  ("материнське ядро") випромінює  $\alpha$ -частинку, в результаті чого утворюється нове ядро  $Y$  ("дочірнє ядро").  $\alpha$ -частинка представляє собою ядро атома гелію, яке складається з двох протонів і двох нейтронів:



Дочірнє ядро зміщується в таблиці Менделєєва по відношенню до материнського на дві клітинки вперед.  $\alpha$ -частинка залишає материнське ядро з великою швидкістю, маючи при цьому дуже велику кінетичну енергію.

При  $\alpha$ -розпаді дочірнє ядро може бути в збудженому стані, який характеризується знаходженням нуклонів на більш високих, ніж основні, енергетичних рівнях. Вони нестійкі. Тому протягом короткого часу нуклони переміщуються на основні енергетичні рівні, а надлишок енергії випромінюється у формі  $\gamma$ -променів, які представляють собою

електромагнітні хвилі. За своєю природою вони повністю еквівалентні світловим хвилям і рентгенівським променям, які випускаються збудженими атомами. Проте  $\gamma$ -промені характеризуються значно меншою довжиною хвилі, а їх кванти мають більш високу енергію, ніж інші види електромагнітних хвиль.

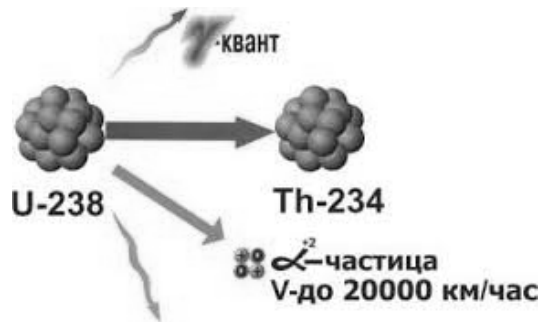
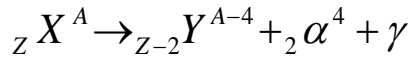
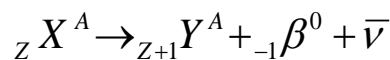


Рис. 23.2  $\alpha$ -розпад ізотопу урану U-238

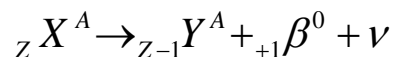
### **$\beta$ -розпад**

$\beta$ -розпад спостерігається в нестійких ізотопах відносно легких ядер. Материнське ядро випускає  $\beta$ -частинку, в результаті чого утворюється дочірнє ядро. Існують три основних види  $\beta$ -розпаду:

1. *Електронний  $\beta$ -розпад*: з материнського ядра вилітає електрон ( ${}_{-1}\beta^0$ -частинка). Атомний номер дочірнього ядра підвищується на одиницю в порівнянні з материнським ядром. В результаті даного виду розпаду утворюється також *антинейтрино* ( $\bar{\nu}$ )- незаряджена частинка, що володіє надзвичайно малою масою:



2. *Позитронний  $\beta$ -розпад*: з материнського ядра випускаються позитрон ( ${}_{+1}\beta^0$ - частинка) і *нейтрино* ( $\nu$ ). Зарядове число дочірнього ядра зменшується на одиницю в порівнянні з материнським:



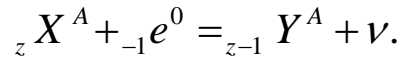
*Позитрони* - елементарні частинки, що володіють елементарним позитивним зарядом з масою, що дорівнює масі електрона.

Відомо, що для всіх елементарних частинок існують античастинки. Позитрон є античастинкою електрона, а антинейтрино - античастинкою нейтрино. Існують також антипротони, антинейтрони і ін. При взаємодії деякої частинки з її античастинкою відбувається *анігіляція* - їх взаємне



знищення. При цьому виділяється енергія у вигляді  $\gamma$ -променів.

3. *Електронне захоплення.* Його сутність полягає у захопленні ядром одного з електронів даного атома. В результаті виникає дочірнє ядро з зарядовим числом, яке на одиницю менш, ніж зарядове число материнського ядра, а також нейтрино:



В ході електронного захвату звільняється місце на одній з внутрішніх електронних оболонок атома. На неї переходить електрон із зовнішньої оболонки, в результаті чого виникає квант характеристичного рентгенівського випромінювання.

В основі всіх видів  $\beta$ -розпаду лежать перетворення нейтрона в протон або протона в нейтрон. Ці процеси відбуваються завдяки слабкій взаємодії в ядрі.

### ***Активність. Закон радіоактивного розпаду***

Існує два види радіоактивності: *природна* і *штучна*. В обох випадках ядра розпадаються спонтанно. Розподіл на природну і штучну радіоактивність зумовлений різним джерелом нестабільних ядер.

*Природна радіоактивність* є результатом нестабільності певних нуклідів, які існують в навколишньому середовищі. Вони перетворюються в інші нукліди, доки не утвориться стабільний елемент. Материнське ядро, проміжні дочірні ядра і стабільний елемент утворюють *радіоактивні сімейства*.

*Штучна радіоактивність* виникає при розпаді нуклідів, отриманих штучно в результаті ядерних реакцій.

Показником інтенсивності процесів радіоактивного розпаду в певному зразку речовини служить *активність* – число радіонуклідів, які розпалися за одиницю часу. Одиницею вимірювання активності в системі СІ є *бекерель (Бк)*. Один бекерель – це один акт радіоактивного розпаду за секунду. У зв'язку з цим бекерель занадто мала і тому незручна одиниця. Несистемною одиницею виміру активності служить *кюрі*. Ця одиниця відповідає активності 1 г радію  $1 \text{ Кюрі} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ .

Радіоактивний розпад є ймовірним процесом, оскільки він відбувається спонтанно і неможливо передбачити, яке саме ядро розпадеться в даний момент часу. Ймовірність радіоактивного розпаду однакова для всіх радіонуклідів даного виду. Ця обставина лежить в основі закону радіоактивного розпаду, який характеризує швидкість цього процесу.

Закон радіоактивного розпаду виражається наступним диференціальним рівнянням:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N_0$$

$\frac{dN}{dt}$  – швидкість радіоактивного розпаду,  $\lambda$  – стала розпаду, яка характеризує ймовірність розпаду даного виду радіонукліда,  $N_0$  – вихідне число радіонуклідів.

Рішенням диференціального рівняння служить функція:

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

де  $N$  – число радіонуклідів, які не розпались за час радіоактивного розпаду  $t$ . Така функція називається експоненціальною.

Таким чином, закон радіоактивного розпаду свідчить, що число радіонуклідів зменшується в часі по негативній експоненті. З цього слідує, що за рівні проміжки часу розпадається однакова частка наявних радіонуклідів.

Швидкість радіоактивного розпаду зручно характеризувати *періодом напіврозпаду*, який представляє собою проміжок часу, необхідний для розпаду половини початкової кількості радіонуклідів. Тривалість періодів напіврозпаду різних радіонуклідів сильно відрізняється. Наприклад, вона становить для  $U_{238}$  - 4,5 млрд. років, для  $Th_{230}$  - 8 тис. років, для  $Po_{218}$  - 3 хвилини. В медицині застосовують короткоживучі і ультра короткоживучі ізотопи радіонуклідів.

### ***Іонізуючі випромінювання***

*Іонізуючими* називають такі випромінювання, які викликають іонізацію речовини, тобто перетворюють атоми і молекули в іони. Радіоактивний розпад ядер призводить до утворення кількох видів іонізуючих випромінювання. Їх можна розділити на дві категорії: 1. *корпускулярні випромінювання* ( $\alpha$ -частинки,  $\beta$ -частинки, протони, нейтрони і ін.); 2. *хвильові випромінювання* -  $\gamma$ - і рентгенівські промені.

### ***Взаємодія іонізуючого випромінювання з речовиною***

Дія різних видів іонізуючих випромінювань на речовину має свої особливості. У процесі радіоактивного розпаду  $\alpha$ -частинки залишають материнські ядра з великою швидкістю, маючи значну кінетичну енергію. При проходженні через речовину  $\alpha$ -частинки часто стикаються з

електронними оболонками атомів, сповільнюючи свій рух. При цьому  $\alpha$ -частинки передають електронам деяку енергію, а також діють на них своїм електричним полем. В результаті відбувається перехід електронів з основних орбіталей на більш високі (збудження атомів і молекул – утворення *вільних радикалів*), а також відділення електронів від атомів. При цьому атоми перетворюються в позитивні іони. Вільні електрони поглинаються нейтральними атомами, в результаті чого утворюються негативні іони.

При одиночному зіткненні з атомом  $\alpha$ -частинка передає йому тільки невелику частину своєї енергії. Її передача відбувається до тих пір, поки швидкість  $\alpha$ -частинки не впаде до нуля. До цього моменту відбувається багато зіткнень. При цьому маса  $\alpha$ -частинки відносно велика, і вона мало відхиляється атомами - її траєкторія представляє собою майже пряму лінію. Іонізуюча здатність  $\alpha$ -частинки дуже значна. Після її проходження у речовині залишається слід, який складається з багатьох тисяч пар іонів. У зв'язку з цим  $\alpha$ -частинка дуже швидко витрачає свою енергію, і її шлях короткий. При значному зменшенні кінетичної енергії  $\alpha$ -частинка приєднує два електрони і перетворюється в нейтральний атом гелію. Середня відстань, пройдена  $\alpha$ -частинками до зупинки, залежить від густини середовища. В повітрі їх шлях не перевищує декількох сантиметрів. Звичайний лист паперу затримує  $\alpha$ -частинки. Вони не проникають глибше поверхневих шарів шкіри. Таким чином, проникаюча здатність  $\alpha$ -частинок невелика.

Електрони і позитрони ( $\beta$ -частинки) вилітають з материнських ядер з більшими швидкостями, ніж  $\alpha$ -частинки. Однак, на відміну від них, швидкості окремих  $\beta$ -частинок значно різняться. Вони проникають набагато глибше в речовину. Тут вони взаємодіють з електронами атомів і втрачають енергію, збуджуючи і іонізуючи атоми. Позитрони при взаємодії з електронами піддаються анігіляції з випусканням  $\gamma$ -променів. Кінетична енергія електрона значно менша, ніж у  $\alpha$ -частинки. Її величина достатня, щоб іонізувати тільки кілька десятків атомів. Через свою невелику масу  $\beta$ -частинки сильно відхиляються при кожному зіткненні. Тому вони поширюються в речовині не по прямій лінії, а в різних напрямках. Довжина пробігу електронів в повітрі становить кілька десятків сантиметрів (в залежності від енергії). У тіло людини  $\beta$ -частинки проникають до внутрішніх органів.

$\gamma$ -промені також іонізують речовину, передаючи свою енергію атомам речовини. Будучи електромагнітною хвилею,  $\gamma$ -кванти мають високу

проникаючу здатність. Тіло людини вони здатні пронизувати наскрізь. Для захисту від  $\gamma$ -випромінювання в залежності від його енергії потрібно товстий свинцевий екран.

Іонізуюча дія  $\gamma$ -променів відбувається в результаті трьох основних процесів:

1. *Фотоелектричний ефект* проявляється тоді, коли  $\gamma$ -кванти мають порівняно невелику енергію. Квант поглинається атомом, в результаті чого один з його електронів як би піднімається на більш високу орбіталь і може покинути атом. Останній стає позитивним іоном. Поглинання вільного електрона іншим нейтральним атомом призводить до утворення негативного іона.

2. *Ефект Комптона* виникає тоді, коли енергія  $\gamma$ -кванта перевищує енергію, необхідну для іонізації атома речовини. У цьому випадку лише частина енергії фотона витрачається на іонізацію. Інша частина - утворює новий  $\gamma$ -квант з меншою енергією. Він може іонізувати наступний атом або в результаті когерентного розсіяння покинути речовину.

3. *Створення пари електрон-позитрон* відбувається у випадку, коли енергія  $\gamma$ -кванта найбільша. Він поглинається одним з атомних ядер з утворенням пари частинок: електрона і позитрона.

### ***Виявлення і вимір іонізуючого випромінювання***

Існують різні типи приладів, які використовуються для виявлення іонізуючого випромінювання. Одним з них є *лічильник Гейгера-Мюллера* (рис. 22.3). Прилад представляє собою металевий циліндр, стінки якого використовуються в якості катода. Тонкий дріт уздовж осі циліндра служить анодом. Між анодом і катодом створюється різниця електричних потенціалів. Циліндр заповнений інертним газом аргоном. За відсутності в середовищі іонізуючих випромінювань між анодом і катодом електричний струм не проходить, оскільки молекули аргону електронейтральні.

Під дією випромінювань відбувається іонізація атомів аргону. Між катодом і анодом проходить короточасний електричний струм. При досить великій напрузі між електродами кожен вільний електрон, утворений дією іонізуючих випромінювань на аргон, викликає появу кількох вторинних електронів, які, в свою чергу, сприяють утворенню наступних електронів. В результаті електричний імпульс посилюється і може бути візуалізований або записаний. Такий лічильник компактний і зручний у використанні.

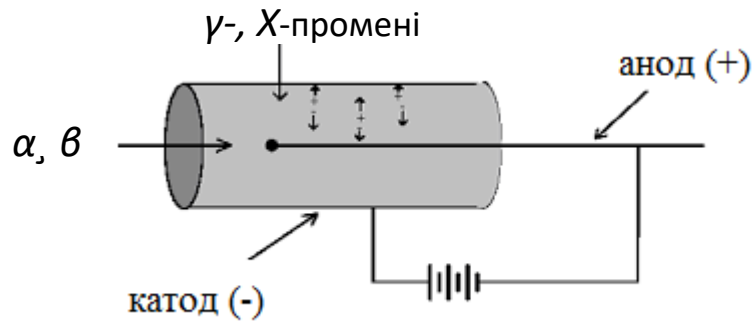


Рис.22.3 Схема лічильника Гейгера-Мюллера

Є також інші типи лічильників випромінювання, наприклад *сцинтиляційні лічильники*. Вони мають порівняно високу ефективність виявлення різних видів випромінювання і широко використовуються в рішенні біомедичних задач. Сцинтиляційний лічильник складається з кристала, який здатний до радіюлюмінесценції, тобто створює спалахи видимого світла, коли його атоми поглинають енергію іонізуючих випромінювань. Ці спалахи рахує чутливий електронний пристрій. Сцинтиляційні лічильники вимірюють інтенсивність іонізуючого випромінювання і допомагають ідентифікувати його природу.

#### Контрольні питання:

1. Охарактеризуйте явище радіоактивності. Чим природна радіоактивність відрізняється від штучної.
2. Охарактеризуйте будову атомного ядра і ядерні сили.
3. Приведіть правила зміщення для основних видів радіоактивного розпаду.
4. Яким чином утворюються гамма-промені?
5. Приведіть осиновий закон радіоактивного розпаду.
6. Що таке період напіврозпаду радіоактивного елементу?
7. Охарактеризуйте різні види іонізуючих випромінювань за проникаючою і іонізуючою здатністю.

#### Оберіть правильну відповідь:

1. Проаналізуйте, яке походження терміну "іонізуюче випромінювання":

- А. воно виникає внаслідок іонізації речовини
- Б. воно представляє собою потік іонів
- В. воно викликає утворення іонів у речовині
- Г. воно поглинається іонами речовини
- Д. воно утворюється іонами речовини

2. Проаналізуйте, що таке радіоактивний розпад:

- А. розпад складних молекул на більш прості
- Б. розпад молекул на атоми
- В. розпад електронних оболонок атомів
- Г. розпад атомних ядер
- Д. розпад вільних радикалів

3. Проаналізуйте, коли виникає випромінювання у вигляді ядер гелію:

- А. при електронному розпаді
- Б. при позитронному розпаді
- В. при альфа-розпаді
- Г. при усіх видах бета-розпаду
- Д. при гама-розпаді

4. Визначте, що представляють собою гама-промені:

- А. потоки заряджених частинок
- Б. електромагнітні хвилі
- В. потоки нейтронів
- Г. потоки ядер гелію
- Д. потоки електронів

5. Проаналізуйте, скільки радіоактивних ядер зостанеться від їх початкової кількості через три роки, якщо за рік їх кількість зменшилась у два рази:

- А.  $1/8$  частина
- Б.  $1/6$  частина
- В.  $1/4$  частина
- Г.  $1/3$  частина
- Д. не зостанеться нічого

6. Визначте, при якому виді радіоактивного розпаду із атомного ядра вилітають нейтрино:

- А. при альфа розпаді
- Б. при альфа і гама-розпаді
- В. при одному з них
- Г. при позитронному розпаді
- Д. при електронному розпаді

7. Визначте, протягом якого виду розпаду зарядове число дочірнього ядра зростає на +1 у порівнянні з материнським ядром:

- А. електронний розпад
- Б. позитронний розпад
- В. альфа-розпад
- Г. електронний захват
- Д. гамма-розпад

8. Найбільшу проникну здатність має:

- А. альфа-випромінювання
- Б. електронне випромінювання
- В. позитронне випромінювання
- Г. гама-випромінювання
- Д. усі випромінювання однаково

9. Найбільшу іонізуючу здатність при рівній поглиненій дозі має:

- А. електронне випромінювання
- Б. позитронне випромінювання
- В. альфа-випромінювання
- Г. гама-випромінювання
- Д. усі випромінювання однаково

10. В основі такого розпаду лежить перетворення нейтронів ядра у протони:

- А. альфа-розпад
- Б. гама-розпад
- В. електронний бета-розпад
- Г. позитронний бета - розпад
- Д. нейтронний розпад

## 20. ДОЗИМЕТРІЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ. ЇХ БІОЛОГІЧНА ДІЯ

### *Дози випромінювання*

*Доза іонізуючого випромінювання* - це величина, яка використовується для оцінки ступеню його впливу на речовину (радіаційного ефекту). Вимірювання або розрахунок дози випромінювання засновані на визначенні тих змін, які виникають під його впливом в живих або неживих об'єктах. Для цього застосовуються різні прилади: іонізаційні камери, кристали, здатні до люмінесценції, напівпровідникові прилади та ін. Дозиметрія іонізуючого випромінювання використовує кілька видів доз, основними з яких є поглинута доза, експозиційна доза і біологічна (еквівалентна) доза.

*Поглинута доза випромінювання.* В основі всіх радіаційних ефектів полягає поглинання речовиною енергії випромінювання. *Поглинута доза* - це кількість енергії, поглинена одиницею маси речовини. Така доза залежить від природи випромінювання і від властивостей речовини. Одиницею вимірювання поглинутої дози є *Грей (Гр)*. 1 Грей - це така доза, коли 1 кілограм речовини поглинає 1 Джоуль енергії випромінювання. Позасистемною одиницею поглинутої дози служить *рад*.  $1\text{Гр} = 100\text{Рад}$

*Експозиційна доза випромінювання.* Виміряти безпосередньо енергію випромінювання, поглинуту речовиною, можна лише в спеціальних лабораторних умовах. Значно простіше судити про дозу випромінювання по ступені іонізації повітря.

*Експозиційна доза* - сумарний електричний заряд, який виникає в одиниці маси повітря, під дією іонізуючого випромінювання. Одиницею експозиційної дози в системі СІ є *Кл/кг*, тобто доза, коли в 1 кг повітря виникає електричний заряд, що дорівнює 1 Кулону.

Більш зручною одиницею експозиційної дози є *рентген (Р)*. Це така доза випромінювання, коли в  $1\text{ см}^3$  сухого повітря при температурі  $0^{\circ}\text{C}$  і атмосферному тиску 760 мм. рт. ст. виникає близько двох мільярдів пар іонів. 1 рентген дорівнює  $2,58 \cdot 10^{-4}\text{Кл/кг}$ .

Один рентген експозиційної дози відповідає приблизно 100 Рад поглинутої дози для м'яких тканин тіла людини. Експозиційна доза залежить не від виду речовини, на яке діє випромінювання, а від його характеристик. Рентген - відносно велика доза. У звичайних умовах експозиційна доза вимірюється в мілірентгенах і мікрорентгенах.



*Потужність дози.* Радіаційний ефект залежить також від тривалості впливу певної дози випромінювання на об'єкт. *Потужність дози* – це її величина за одиницю часу.

*Біологічна (еквівалентна) доза.* Поглинута і експозиційна дози характеризують, в основному, фізичну сторону дії випромінювання. Його біологічний ефект сильно залежить від виду випромінювання. Зокрема, позитивно заряджені частинки з великою масою (протони,  $\alpha$ -частинки) створюють більш високу густину іонізації, ніж  $\beta$ -частинки і  $\gamma$ -промені.

Еквівалентна доза характеризує особливості впливу різних видів випромінювання на біологічні об'єкти. Її розраховують шляхом множення поглинутої дози на коефіцієнт відносної біологічної ефективності (ВБЕ) випромінювання. Величина цього коефіцієнту визначалася експериментально шляхом порівняння впливу різних видів випромінювання на тест-об'єкти з дією стандартних доз рентгенівського випромінювання. Одним з тест-об'єктів було око піддослідної тварини, в якому іонізуюче випромінювання викликає утворення катаракти. Було встановлено, що при  $ОБЕ=1$  для  $\gamma$ - і рентгенівських променів, 3-10 – для нейтронів і бета-частинок (в залежності від їх енергії), і 20 – для  $\alpha$ - частинок.

Одиницею вимірювання біологічної дози є *Зіверт (Зв)*, який відповідає 1 Гр поглинутої дози рентгенівського випромінювання. Позасистемною одиницею біологічної дози є *Бер*. Він відповідає 100 Рад поглиненої дози рентгенівського випромінювання.

### ***Уражаюча дія іонізуючого випромінювання***

Відносно великі дози іонізуючих випромінювань здатні викликати *променеу хворобу*. Особливо несприятливим є короткочасний вплив значної дози, коли її потужність більша, ніж потужність такої самої дози, але отриманої за більш тривалий проміжок часу.

Походження променевої хвороби детально вивчено. Основним первинним ефектом випромінювання в живих клітинах є іонізація молекул води. Поглинаючи енергію випромінювання, вони втрачають електрони і утворюють позитивні іони. Вільні електрони приєднуються до інших молекул води з утворенням негативних іонів.

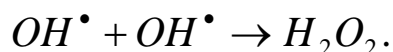


Іони води нестійкі і швидко розпадаються, утворюючи *вільні радикали* (водень і гідроксил):



Вільні радикали характеризуються дуже великою хімічною активністю. Вони вступають в реакцію з іншими хімічними речовинами, утворюючи з них нові вільні радикали. Таким чином, первинний ефект дії іонізуючого випромінювання посилюється.

Вільні радикали гідроксилу, взаємодіючи, утворюють перекис водню. Ця речовина відома як сильний окиснювач:



В клітині вільні радикали впливають на білки, нуклеїнові кислоти і інші біологічні молекули. Крім того, вони безпосередньо можуть поглинати енергію іонізуючих випромінювань. Все це може викликати розриви ланцюгів білків і нуклеїнових кислот або утворення в їх молекулах аномальних ковалентних зв'язків. В результаті функція цих життєво важливих молекул порушується. Процеси променевого ушкодження наростають.

Дія іонізуючих випромінювань на молекули води в біологічних об'єктах називається *непрямою*, а дія безпосередньо на біологічно важливі молекули – *прямою*. Вважають, що комбінація непрямої і прямої дії іонізуючих випромінювань на живі організми служить причиною *радіобіологічного парадоксу*, який полягає в тому, летальні дози опромінення є дуже незначними в перерахунку на тепловий вплив.

Встановлено, що ядро клітини більш чутливо до іонізуючих випромінювань, ніж цитоплазма. Це було доведено, зокрема, в експериментах на амебах. Одну групу амеб опромінювали летальною дозою випромінювання. Після цього їх ядра були вилучені і замінені ядрами здорових амеб, що склали другу групу. Останні, навпаки, отримали ядра опромінених амеб. Амеби першої групи залишилися живими, тоді як амеби другої групи загинули. Висока чутливість ядер до випромінювання пояснюється локалізацією в них генетичного апарату.

Дія випромінювання є найбільш шкідливим в період поділу клітини. Тому, як правило, найбільш чутливі до нього ті клітини, які часто діляться (*принцип Трибондо-Бергоньє*). Це стосується незрілих клітин крові, кишкового епітелію, статевих клітин та ін. Ембріони і діти більше чутливі до шкідливої дії випромінювання, ніж дорослі люди.

Гостра променева хвороба виникає при одноразовому опроміненні дозами понад 1 Зв. Вони викликають променево хворобу різного ступеня

тяжкості з ураженням органів кровотворення або кишечника. Дози однократного опромінення понад 10 Зв вважаються абсолютно смертельними.

Висока чутливість до іонізуючого випромінювання властива людям і деяким тваринам (мави, коні, собаки). Гризуни менш чутливі і можуть залишатися живими після отримання дози 7-8 Зв. Риби і амфібії можуть витримувати дози опромінення в декілька десятків Зіверт.

Існує досить небезпечні *віддалені ефекти* дії іонізуючих випромінювань. До них відносять виникнення злоякісних пухлин через багато років після опромінення. Ймовірність онкологічних захворювань пропорційна отриманій дозі.

Віддаленими наслідками дії випромінювання є також генетичні дефекти, або мутації. Збільшення їх частоти призводить до підвищення рівня передпологової смертності та збільшення числа дітей, що народилися з серйозними вадами розвитку. Встановлено, що частота мутацій також пропорційна дозі опромінення.

### ***Тривала дія невеликих доз іонізуючого випромінювання***

На всіх людей постійно впливають низькі дози іонізуючого випромінювання, яке виникає внаслідок природної і штучної радіоактивності. Рівень природної радіоактивності в залежності від регіону Землі становить 5-20 мікрорентген на годину. Вважають, що такий рівень радіації є безпечним для людини, хоча ця точка зору неоднозначна.

Одним з джерел природної радіоактивності є *космічне випромінювання* і *сонячна радіація*. Космічні промені включають майже всі типи іонізуючих випромінювань і характеризуються великою проникаючою здатністю. Захистом від космічних променів є земна атмосфера. Їх дія залежить від висоти над рівнем моря і подвоюється з кожною тисячею метрів.

Джерелом іонізуючого випромінювання є деякі породи земної кори, що містять радіонукліди уран, торій, радій і ін. Відомі місцевості, в яких на поверхню виходять граніти, радіоактивний фон яких перевищує середню величину в десятки разів. Радіоактивні частинки потрапляють в будівельні матеріали. Встановлено, що рівень випромінювання в будинках з цегли або бетону вдвічі вищий, ніж в дерев'яних.

Крім того, джерелами іонізуючого випромінювання можуть бути добрива, і навіть продукти харчування.

Важливим джерелом іонізуючого випромінювання є радіоактивний *інертний газ радон*. Він важчий за повітря і накопичується в основному під землею. На поверхню він виходить при видобутку корисних копалин і через тріщини в земній корі. Радон міститься у воді, особливо у видобутій з глибоких свердловин. Він надходить в будинки з побутовим газом, водопровідною водою, просочується через мікротріщини ґрунту, накопичується в підвалах. Показано, що вміст радону в повітрі ванної кімнати може в десятки разів перевищувати його концентрацію в житлових кімнатах.

Загальну середню дозу, яку отримує людина від усього природного радіаційного фону, вважають близькою до 0,3 - 0,6 мЗв на рік. Деякі групи населення отримують 1,0 - 1,6 мЗв на рік. На Землі є деякі місцевості, де рівень природної радіації досить високий.

До природного радіоактивного фону додається іонізуюче випромінювання штучного походження, доза якого може досягати половини від одержуваної дози природного походження. Найбільш істотним джерелом штучного випромінювання є медична рентгенодіагностика.

### ***Застосування радіонуклідів та іонізуючого випромінювання в медицині***

#### ***Радіонуклідна діагностика***

Радіоактивні ізотопи елементів, які використовуються в діагностиці, за хімічними властивостями не відрізняються від стабільних ізотопів того самого елемента. Радіоізотоп може бути легко впізнаний за своїм випромінюванням. У кров, дихальні шляхи або шлунково-кишковий тракт вводять відповідні радіоактивні ізотопи, включаючи їх до складу речовин, що накопичуються переважно в тому чи іншому органі і виконують певну функцію. Такі речовини випускаються промисловістю і називаються *радіофармпрепаратами*. Вони повинні швидко надходити в орган і виводитися з нього. Радіофармпрепарати мають короткий період напіврозпаду, що забезпечує безпеку дослідження. В медицині застосовують радіоізотопи йоду, талію, технецію, фосфору, індію та ін.

Радіоізотопи є свого роду мітками, що дозволяють судити про наявність того чи іншого препарату в органі. Кінцевим результатом дослідження можуть бути дані про форму і розміри органу і про локалізацію в ньому патологічних вогнищ.

Розподіл радіофармпрепаратів в організмі залежить від кровоплину і обміну речовин. Тому методи ядерної медицини спрямовані більшою мірою на функціональне дослідження органів і систем, і в меншому ступені - на аналіз анатомо-морфологічних особливостей. Цим радіонуклідна діагностика принципово відрізняється від ультразвукових і рентгенологічних методів.

Радіонукліди використовують для дослідження стану серця, щитовидної і паращитовидних залоз, печінки, нирок, легенів, кісток, молочної залози і т.д. Візуалізація за допомогою застосування радіофармпрепаратів дозволяє отримувати зображення розподілу в організмі речовин, мічених радіонуклідами.

Щитовидна залоза накопичує йод в процесі життєдіяльності. Після введення його радіонукліда сканування залози дає можливість оцінювати її здатність захоплювати вказаний елемент з крові. На цьому ж ґрунтується отримання зображення залози, даних про її анатомічне розташування, наявність в ній вузлів, які можуть бути як доброякісними, так і злоякісними. Цей метод дозволяє спостерігати підвищення або пониження активності окремих ділянок залози.

### ***Позитронно-емісійна томографія***

*Позитронно-емісійна томографія (ПЕТ)* - новітній діагностичний метод, заснований на застосуванні радіофармпрепаратів. Він використовується для оцінки функціональної активності органів і тканин. На практиці цей метод отримав найбільшу цінність і найбільшого поширення у діагностиці онкологічних захворювань. За допомогою ПЕТ можна діагностувати навіть невеликі пухлини, які ще не мають клінічних проявів, і відрізнити злоякісні пухлини від доброякісних. Однак ПЕТ використовують також при діагностиці інших захворювань, зокрема головного мозку, серця і інших органів.

В основі ПЕТ лежить фізичний феномен, який виникає при взаємодії електрона і його античастинки - позитрона. В результаті такої взаємодії відбувається їх взаємне знищення - анігіляція. При цьому народжуються два кванта гамма-випромінювання, які розлітаються під кутом  $180^\circ$ .

Для проведення ПЕТ використовують короткоживучі радіонукліди, які піддаються позитронному розпаду - найчастіше ізотопи фтору. Їх вводять в радіофармпрепарат, який представляє собою глюкозу або одне з її похідних, «мічені» радіонуклідом. Пацієнт отримує радіофармпрепарат, який

включається в обмін речовин. Накопичення препарату в різних ділянках мозку (та інших органів) відбувається тим більше, чим інтенсивніше в них метаболізм. Відповідно тим сильніше з них виходить  $\gamma$ -випромінювання.

$\gamma$ -промені реєструють шляхом сканування за допомогою спеціальних детекторів. У приладі детектори випромінювання розташовуються навколо об'єкта. Обробка інформації за допомогою комп'ютера показує, як розподіляється інтенсивність гамма-випромінювання в межах досліджуваного органу. Сканування дозволяє візуально визначати інтенсивність обмінних процесів, що протікають в різних ділянках і судити про їх функціональний стан. За допомогою комп'ютерної програми можна отримати тривимірне зображення об'єкта. Області значно підвищеної або зниженої радіоактивності можуть свідчити про відхилення від нормального функціонування органу. Метод ПЕТ відрізняється дуже високою чутливістю при діагностиці злоякісних пухлин, обмін речовин в яких значно посилений порівняно зі здоровими тканинами і доброякісними пухлинами. В сучасних приладах ПЕТ комбінується з рентгенівською комп'ютерною томографією (РКТ). При цьому ПЕТ використовується для ідентифікації пухлин, а РКТ дозволяє визначити їх точну локалізацію.

### ***Радіотерапія***

Клітини мають найбільшу чутливість до дії іонізуючих випромінювань в процесі ділення. Клітини злоякісних пухлин діляться значно частіше, ніж клітини нормальних тканин. Тому ракові клітини і клітини саркоми дуже чутливі до іонізуючих випромінювань. Нормальні тканини мають більшу здатність відновлюватися від його ефектів, ніж клітини злоякісних пухлин. Таким чином, доза випромінювання достатня, щоб знищити ракові клітини, пошкоджує суміжні нормальні клітини в меншому ступені і тимчасово.

Чутливість злоякісних пухлин до опромінення є основою застосування радіотерапії (*променевої терапії*) для їх лікування. Зазвичай радіотерапію застосовують для лікування онкологічних хворих в рамках комбінованої терапії. Використовують зовнішнє опромінення за допомогою спеціальних приладів: рентгенівських апаратів і джерел  $\gamma$ -випромінювання («кобальтових гармат»), що містять радіоактивний кобальт. Поверхнєве опромінення (здебільшого за допомогою рентгенівських променів) використовують при лікуванні злоякісних хвороб шкіри і очей.  $\gamma$ -промені, що випускаються радіоактивним кобальтом, забезпечують більшу ефективну дозу опромінення

пухлин глибоких тканин тіла. Крім зовнішнього опромінення, в пухлину можуть бути імплантовані заповнені радієм голки або невеликі капсули, що містять газ радон.

### *Радіохірургія*

Радіохірургія - порівняно нова галузь медицини, яка застосовує одноразово відносно високі дози опромінення для усунення пухлин та інших патологічних утворень.

*γ-скальпель* - це апарат, призначений для локального впливу на патологічні утворення головного мозку за допомогою потоку  $\gamma$ -променів (рис. 20.1). Для точного наведення потоку випромінювання голова пацієнта закріплюється під місцевим знеболенням в спеціальному пристрої - стереотаксичній рамі. Вона забезпечує тривимірну систему координат, яка визначає локалізацію різних мозкових структур. Спираючись на цю систему, апарат забезпечує дуже точне попадання променів в ціль.



Рис. 20.1 Апарат  $\gamma$ -скальпель (А) і стереотаксична рама з півсферою з джерелами радіоактивного випромінювання (Б)

Поряд з лікуванням злоякісних пухлин,  $\gamma$ -скальпель застосовується і для лікування інших захворювань головного мозку, зокрема епілепсії.  $\gamma$ -скальпель має великі переваги перед традиційними хірургічними методами. Зокрема він не вимагає загального наркозу і трепанації черепу, відкриває доступ до глибоких структур, які при звичайних операціях недоступні.

*Лінійні прискорювачі* - апарати для радіохірургії, в яких для впливу на патологічні утворення використовується високоенергетичне іонізуюче випромінювання - потік рентгенівських променів або електронів .

Джерелом вільних електронів в апараті є «електронна гармата», в якій

відбувається термоелектронна емісія. Вони прискорюються в напрямку анода, а далі потрапляють в спеціальну порожню конструкцію – хвилевід, що прискорює. В ньому швидкість електронів значно збільшується під дією високочастотного електромагнітного поля. Вони потрапляють на металеву мішень, де виникає гальмівне рентгенівське випромінювання. Воно або сам потік електронів використовується для впливу на клітини пухлини.

Спочатку уражена пухлиною частина тіла сканується в режимі 3D за допомогою методів РКТ або МРТ. Дані відправляються в потужну комп'ютерну мережу, яка проводить індивідуальне планування майбутніх дій: описує контури патологічного вогнища, встановлює дозу випромінювання. За допомогою спеціального пристрою пучку випромінювання надають певну форму відповідно до форми пухлини. До сеансу проводиться перевірка на фантомі.

Під час опромінення пацієнт залишається нерухомим. Положення його тіла контролюється за допомогою лазерних променів. Джерело випромінювання під управлінням комп'ютера обертається навколо пацієнта.

В процесі обертання пучок випромінювання, націлений на пухлину з усіх кутів, постійно змінюється і адаптується до її форми і розміру. Таким чином, забезпечується максимальна ефективність лікування при мінімальному впливі на здорові тканини.

Лінійний прискорювач є більш універсальним апаратом, ніж  $\gamma$ -скальпель, оскільки не тільки дозволяє руйнувати пухлини, розташовані в глибоких структурах головного мозку і мають маленький розмір, а також - пухлини спинного мозку, легенів, печінки і нирок.

### **Контрольні питання:**

1. Охарактеризуйте первинний механізм дії іонізуючих випромінювань на біологічні тканини.
2. Які фактори визначають ступень уражаючої дії іонізуючих випромінювань на біологічні тканини?
3. Назвіть основні дози іонізуючих випромінювань і одиниці їх вимірювання.
4. Поясніть принцип використання іонізуючих випромінювань в терапії.
5. Що таке радіонуклідна діагностика? Які вона має переваги перед іншими методами інтроскопії органів тіла людини?



**Оберіть правильну відповідь:**

1. Для визначення цієї дози використовують відношення енергії, що передана речовині до її маси:

- А. еквівалентна                      Б. поглинена                      В. експозиційна  
Г. ефективна еквівалентна                      Д. біологічна

2. Ступень іонізації повітря іонізуючими випромінюваннями характеризує доза:

- А. еквівалентна                      Б. поглинена                      В. експозиційна  
Г. ефективна еквівалентна                      Д. біологічна

3. Коефіцієнт відносно біологічної ефективності випромінювань вимірюється в:

- А. рентген                      Б. зіверт                      В. грей  
Г. рад                      Д. безрозмірний

4. Первинний механізм ушкоджуючої дії іонізуючих випромінювань на біологічні об'єкти полягає в:

- А. іонізації повітря, яким дихає людина  
Б. ініціації ядерних реакцій у тілі людини  
В. утворенні вільних радикалів у тілі людини  
Г. заміщенні стабільних ядер у біооб'єктах радіоактивними  
Д. прикріпленні радіоактивних частинок до біомолекул

5. Дія іонізуючих випромінювань в організмі дорослих людей найбільша на:

- А. нирки і сечові шляхи  
Б. шкіру голови  
В. кістки кінцівок  
Г. епітелій кишечника  
Д. головний мозок

6. Коефіцієнт якості випромінювання дорівнює одиниці для:

- А. електромагнітних випромінювань  
Б. корпускулярних випромінювань  
В. виключно альфа-частинок  
Г. виключно бета-частинок  
Д. усіх видів іонізуючих випромінювань

7. Позасистемною одиницею експозиційної дози служить:

- А. Грей                                      Б. Рад                                      В. Бер  
Г. Рентген                                    Д. Зіверт

8. Для м'яких тканин доза, виміряна у рентгенах, дорівнює поглинутій дозі, вираженій у:

- А. Берах                                      Б. Греях                                      В. Радах  
Г. Зівертах                                    Д. Кл/м<sup>3</sup>

9. У позитронній емісійній томографії використовується:

- А. ефект Зеемана                              Б. ефект анігіляції  
В. принцип Трибондо                              Г. принцип Паулі                              Д. ефект іонізації

10. Принцип здійснення позитронної емісійної томографії заснований на взаємодії:

- А. альфа-частинок и електронів  
Б. гамма-променів і електронів  
В. бета-частинок і електронів  
Г. гамма-променів і бета-частинок  
Д. альфа-частинок і гама-променів

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

### Основна література

1. Ємчик, Л.Ф. Медична і біологічна фізика [Текст]: підручник / Л.Ф. Ємчик, Я.М. Кміт. - Л. : Світ, 2003. - 592 с.
2. Медична та біологічна фізика : підруч. для студ. вищ. мед. навч. закл. III-IV рівнів акредитації / О. В. Чалий [та ін.]; за ред.: О. В. Чалого; МОЗ України. - Вид. 2-ге. - Вінниця: Нова книга, 2017. - 528 с.
3. Біофізика. Фізичні методи аналізу та метрологія. Нац. підруч. для студ. вищ. фармац. закл. III-IV рівнів акредитації / Е. І. Личковський, В. О. Тіманюк, О.В. Чалий [та ін.]; за ред.: Е.І. Личковського, В.О. Тіманюка. - Вінниця: Нова книга, 2014. - 464 с.
4. Тіманюк, В.А. Биофизика [Текст]: учеб. для студентов фармац. и мед. вузов / В.А. Тіманюк, Е.Н. Животова. - Х. : Золотые страницы, 2003. - 704 с.
5. Медична та біологічна фізика. Під ред.В.Г.Кнігавко.- Харків 2009.

### Додаткова література

1. Біофізика. Під ред. П.Г.Костюка. - К.: 2008 «Київ .універ.»
2. Біофізика: Підручник / П.Г.Костюк, В.Л.Зима, І.С.Магура та ін.; За ред. П.Г.Костюка. – К.:Обереги, 2001. – 544с.
3. Зефіров А., Сітдікова Л. Іонні канали мембрани (структура, функції, патологія). - Казань. - 2010 р.

### Інформаційні ресурси:

1. <http://www.library.biophys.msu.ru/rubin/>
2. <http://www.biophys.msu.ru/conferences/regulation/>
3. <http://www.molbiol.ru>
4. [http://phys.protres.ru/lectures/protein\\_physics/](http://phys.protres.ru/lectures/protein_physics/)
5. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Схема\\_простой\\_диффузии.jpg?u\\_selang=ru](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Схема_простой_диффузии.jpg?u_selang=ru)