

53(075.8)  
П639

Ю.І. ПОСУДІН

# ФІЗИКА З ОСНОВАМИ БІОФІЗИКИ



55025.8/  
17639

**Ю.І. ПОСУДІН**

**ФІЗИКА  
З ОСНОВАМИ  
БІОФІЗИКИ**

051455

*Затверджено  
Міністерством аграрної політики України  
як підручник для підготовки фахівців в аграрних навчальних  
закладах III-IV рівнів акредитації за спеціальностями  
“Ветеринарна медицина” і “Зооінженерія”*

Грант МБФВ КМА-200:  
«Сучасну книгу-  
МОГИЛЯНЦЮ!»

**КИЇВ  
СВІТ  
2003**

Наукова бібліотека  
Університету  
«Києво-Могилянська  
академія»

УДК 53; 577.3 (075.8)

Посудін Ю.І. Фізика з основами біофізики: Підручник. — Київ, Світ, 2003. — 400 с.

Наведено основні положення, закони та теорії з курсу загальної фізики. Розглянуто фізичні процеси та механізми, що складають основу життєдіяльності живих організмів і, зокрема — сільськогосподарських тварин. Викладено проблеми впливу зовнішніх фізичних факторів на тварину та її здатності реагувати на ці фактори. Приділено увагу принципам дії та можливим застосуванням сучасних фізичних методів та приладів у тваринницькій практиці.

Підручник містить приклади розв'язку практичних біофізичних проблем, контрольні завдання для перевірки засвоєння матеріалу студентами та контрольні запитання, відповіді на які студенти зможуть дати у разі ознайомлення із відповідними розділами підручника. Інформативний матеріал подано в додатку.

Для студентів аграрних навчальних закладів III-IV рівнів акредитації за спеціальностями 7.130501 «Ветеринарна медицина» і 6.130201 «Зооінженерія».

**Рецензенти:**

*Л.С. Брижик,*

д-р фіз.-мат.наук, провідний науковий співробітник  
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України

*Я.П. Раковський,*

канд. біол. наук, професор  
Харківського зооветеринарного інституту

*В.В. Бойко,*

канд. фіз.-мат. наук,  
доцент Національного аграрного університету

Затверджено Міністерством аграрної політики України  
(лист №18-2-1-13/149 від 3.04.2002 р.)

ISBN 966-7683-31-1

© Посудін Ю.І., 2003

*Автор глибоко вдячний ректору Національного аграрного університета академіку Дмитру Олексійовичу Мельничуку за щирі моральну підтримку, розуміння і фінансову допомогу, що уможливили видання цього підручника.*



*У 1945 році сенатор США Уільям Фулбрайт запропонував створити програму міжнародних обмінів у галузі освіти, що нині носить його ім'я.*

*У. Фулбрайт сприйняв з усією відповідальністю слова видатного фізика сучасності Альберта Ейнштейна: «Ми повинні опанувати цілком новими формами мислення, якщо хочемо, щоб людство вижило».*

*З прийняттям законодавчого акту щодо заснування Програми Фулбрайта понад 120 тисяч іноземців пройшли навчання або брали участь у наукових дослідженнях в США, а більше 90 тисяч американців відправилися за океан з тією ж метою.*



*Автор цього підручника, стипендіат Фулбрайта 1996 року, висловлює глибоку вдячність адміністрації Програми академічних обмінів імені Фулбрайта за сприяння виданню підручника, призначеного для тих, хто цікавиться фізикою і біофізикою тварин.*



# 1. ВСТУП

## 1.1. ПРЕДМЕТ ФІЗИКИ І БІОФІЗИКИ. ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ КУРСУ

Підручник «*Фізика з основами біофізики*» призначений для загальноосвітньої, теоретичної і практичної підготовки студентів ветеринарних та зооінженерних спеціальностей в галузі фізики і біофізики.

*Фізика* — це наука, що вивчає найпростіші, але разом з тим найбільш загальні закономірності явищ природи, властивості і будову матерії та закони її руху. Залежно від процесів, що вивчаються, фізика ділиться на такі розділи: механіка, гідродинаміка, акустика, молекулярна фізика, термодинаміка, електрика, магнетизм, оптика, атомна і ядерна фізика. Фізика є основою всіх природничих наук. Багато законів та положень фізики про основні властивості матерії використовуються в біології в процесі вивчення явищ живого світу. На стику фізики і біології виникла нова наука — *біофізика*, яка вивчає фізичні та фізико-хімічні явища в біологічних об'єктах та досліджує фундаментальні процеси, що складають основу живої природи. У біофізиці використовують фізичні принципи, методи та інструменти для вивчення живих систем.

Вивчення дисципліни «*Фізика з основами біофізики*» студентами ветеринарних та зооінженерних спеціальностей пов'язано з рядом специфічних особливостей об'єктів, що вивчаються, а саме: сільськогосподарських тварин, хутрових звірів, сільськогосподарської птиці, риб, бджіл.

В підручнику розглядаються закони фізики, які лежать в основі явищ і процесів, що характеризують функціонування сільськогосподарської тварини; фізичні характеристики та властивості організму; механізми впливу різноманітних зовнішніх фізичних факторів (зву-

ку, ультразвуку, інфразвуку, температури, вологості, електричних та магнітних полів, світла тощо) на тварину та її здатність здійснювати механо-, акусто-, термо-, електро-, магніто- та фоторецепцію, що дає їй можливість взаємодіяти з навколишнім середовищем.

Крім того, сучасний спеціаліст сільського господарства зустрічається у виробничих умовах з певною кількістю методів, інструментів і приладів, зрозуміти принципи дії яких неможливо без відповідної загальнофізичної підготовки. Саме тому значну увагу в підручнику приділено можливим прикладним застосуванням фізичних методів та приладів у тваринництві, сучасним інструментальним і, зокрема, автоматизованим системам вимірювання різноманітних параметрів, що характеризують стан тварини.

Підручник містить приклади розв'язку практичних біофізичних проблем, контрольні завдання для перевірки засвоєння матеріалу студентами та контрольні запитання, відповіді на які студенти зможуть дати у разі ознайомлення з відповідними розділами підручника. Інформативний матеріал подано у додатку.

Підручник відповідає програмам дисципліни «Фізика з основами біофізики» для аграрних навчальних закладів III-IV рівнів акредитації за спеціальностями 7.130501 «Ветеринарна медицина» і 6.130200 «Зооінженерія».

Автор висловлює щиру подяку член-кореспонденту АПН України, професору О.В. Чалому за критичні зауваження, які, без сумніву, сприяли покращенню змісту підручника.

## 1.2. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ

Характеристики процесів або властивостей тіл, що можуть бути визначені кількісно за допомогою тих чи інших вимірювань, називаються *фізичними величинами*.

Кожна фізична величина характеризується *числовим значенням* і *одиноцею вимірювання*. Наприклад, сила  $F = 5 \text{ Н}$  має числове значення (5) і одиницю вимірювання (Н).

Одиниці можуть бути *основними* (м, с, кг, К, А, кд, моль) і *похідними* (наприклад, м/с, кг · м/с<sup>2</sup>, кг · м<sup>2</sup>).

## 1.3. СКАЛЯРИ І ВЕКТОРИ

Всі фізичні величини діляться на скаляри і вектори.

*Скаляр* — це величина, що повністю визначається числовим значенням. Наприклад, робота  $A$ , температура  $T$ , маса  $m$ , час  $t$  є скаляри.

*Вектор* — це величина, що визначається числовим значенням і напрямком. Наприклад, сила  $\vec{F}$ , швидкість  $\vec{V}$ , прискорення  $\vec{a}$  є вектори.

### 1.3.1. Дії над векторами

*Додавання векторів:*

*Правило паралелограма* — для додавання векторів  $\vec{A}$  і  $\vec{B}$  слід шляхом паралельного переносу поєднати їх початки і побудувати на векторах паралелограм; вектор  $\vec{C}$ , який є діагоналлю цього паралелограма, являє собою шукану суму  $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$  (рис. 1.1).

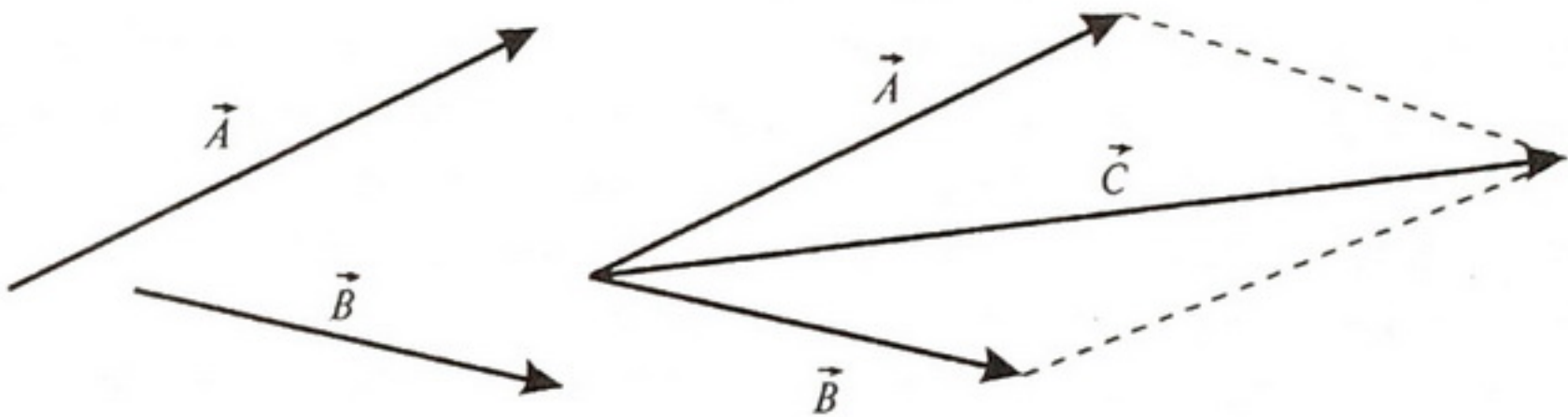


Рис. 1.1. Додавання векторів за правилом паралелограма

*Правило трикутника* — треба сполучити початок другого вектора з кінцем першого; вектор  $\vec{C}$ , який з'єднує початок першого вектора з кінцем другого, являє собою шукану суму  $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$  (рис. 1.2).

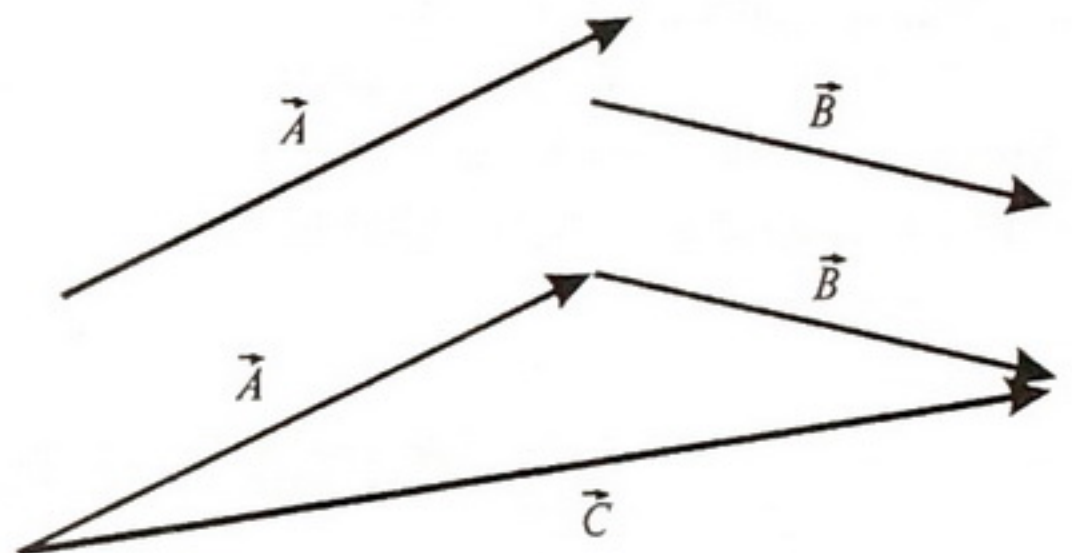


Рис. 1.2. Додавання векторів за правилом трикутника

*Віднімання векторів:* відняти вектор  $\vec{B}$  із вектора  $\vec{A}$  означає скласти вектор  $\vec{A}$  з вектором  $-\vec{B}$ , який протилежний вектору  $\vec{B}$  (рис. 1.3):

$$\vec{A} - \vec{B} = \vec{A} + (-\vec{B}) = \vec{C}. \quad (1.1)$$

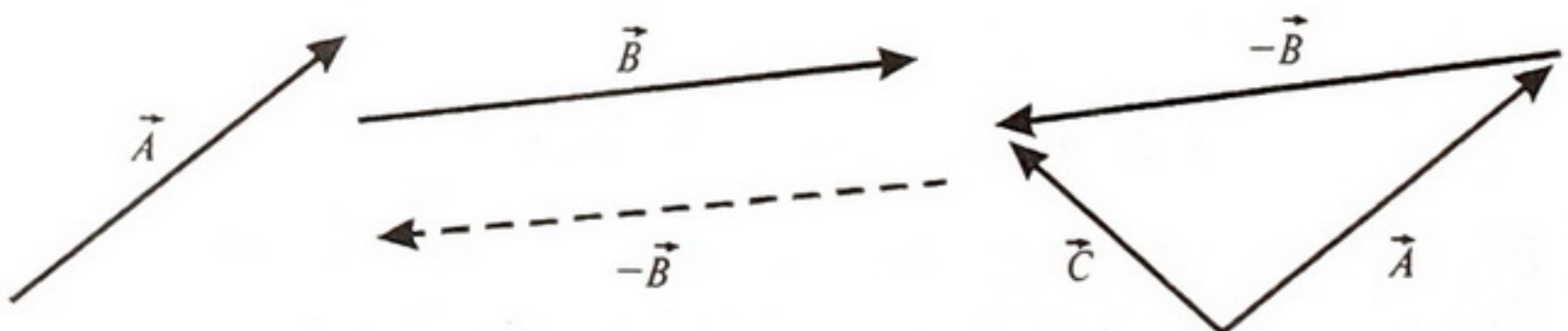


Рис. 1.3. Віднімання векторів

*Множення і ділення векторів на скаляр:* за множення вектора  $\vec{A}$  на скаляр  $n$  отримується вектор, що збігається за напрямком з вектором  $\vec{A}$ , і рівний за модулем  $nA$  (рис. 1.4); при діленні отримуємо вектор, що збігається за напрямком з вектором  $\vec{A}$  і модуль якого дорівнює  $A/n$  (рис. 1.5).



Рис. 1.4. Множення векторів на скаляр

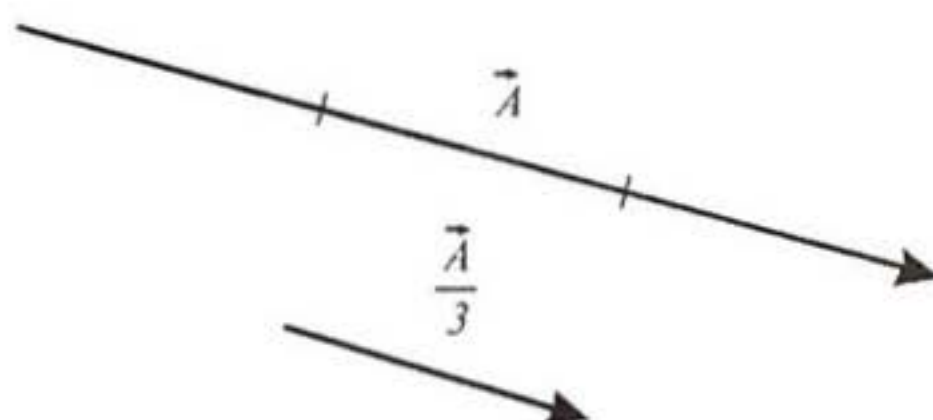


Рис. 1.5. Ділення векторів на скаляр

*Проеціювання векторів:* проекцією вектора  $\vec{A}$  на вісь  $Ox$  називається відрізок  $a_x$  між проєкціями на цю вісь початку і кінця вектора (рис. 1.6).

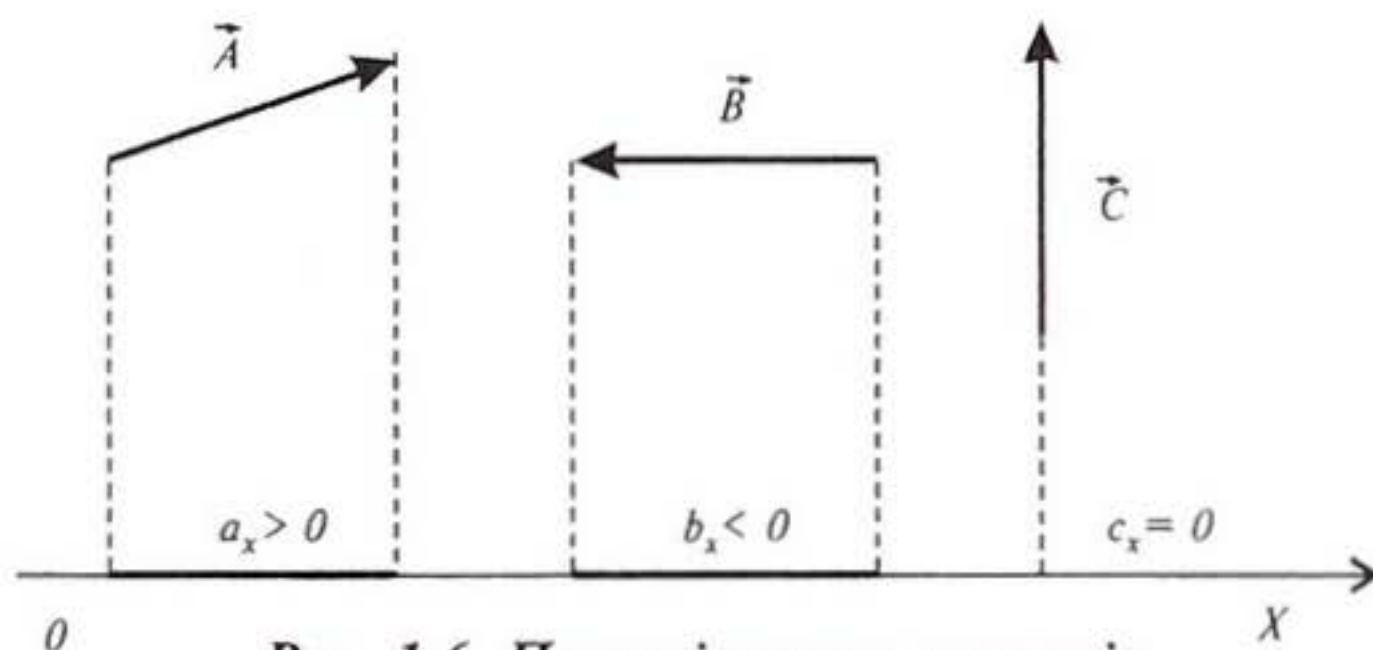


Рис. 1.6. Проеціювання векторів

Скалярний добуток  $\vec{A} \cdot \vec{B}$  двох векторів  $\vec{A}$  і  $\vec{B}$  є скаляр:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \cos \alpha, \quad (1.2)$$

де  $\alpha$  — кут між векторами  $\vec{A}$  і  $\vec{B}$ .

Векторний добуток  $\vec{A} \times \vec{B}$  двох векторів  $\vec{A}$  і  $\vec{B}$  є вектор, модуль якого рівний

$$|\vec{A} \times \vec{B}| = |\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \sin \alpha; \quad (1.3)$$



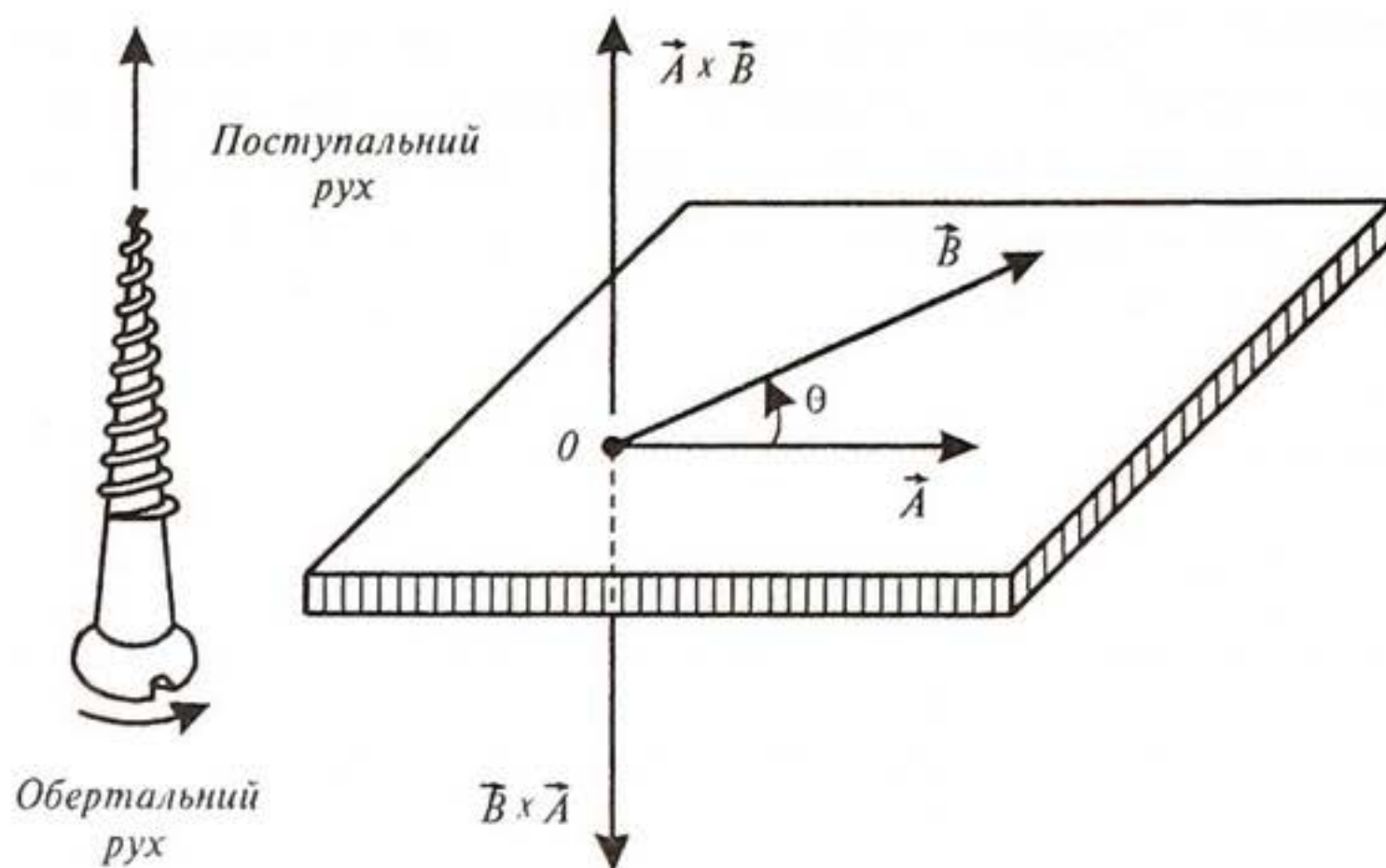


Рис. 1.7. Векторний добуток двох векторів

його напрямок перпендикулярний до обох векторів  $\vec{A}$  і  $\vec{B}$  і збігається з напрямком поступального руху правого гвинта при його обертанні від  $\vec{A}$  до  $\vec{B}$  на кут, менший  $\pi$  (рис. 1.7).

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Комаха знаходиться на стіні кімнати в точці з координатами (2 м; 1 м). Знайти відстань між комахою і кутом кімнати.

### Розв'язок

Кут кімнати можна уявити як прямокутну систему координат. Положення комахи на стіні описується двома векторами:  $\vec{A}$  і  $\vec{B}$ . Результуючий вектор дорівнює  $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$ . Величина цього вектора, що відповідає відстані між комахою і кутом кімнати, знаходять за формулою:

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}.$$

Звідси

$$C = \sqrt{1^2 + 2^2} = 2,24 \text{ м.}$$

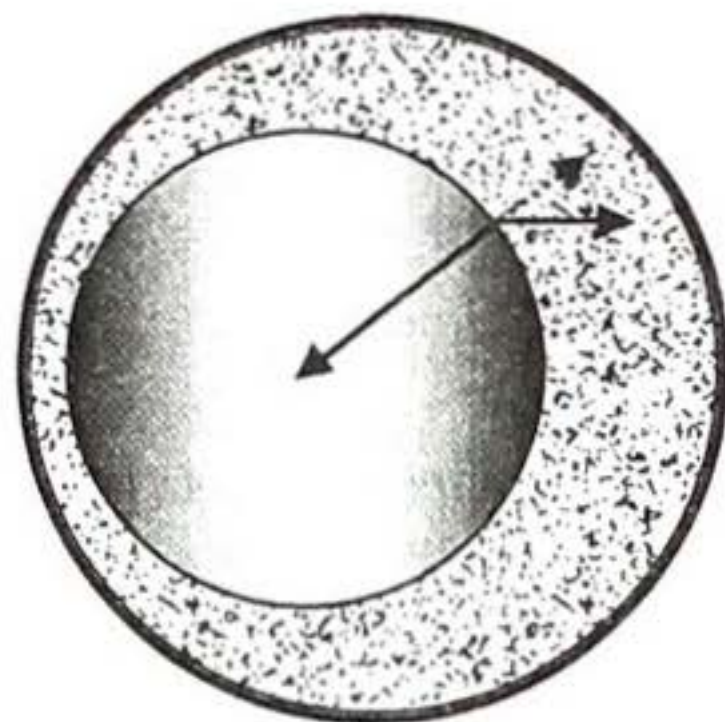
### Контрольне завдання № 1.1

Вектор  $\vec{A}$  спрямований по осі  $X$  прямокутної системи координат і має величину 5 см; вектор  $\vec{B}$  спрямований по осі  $Y$  і має величину 2 см. Зайти величину і напрямок вектора  $\vec{C} = \vec{A} - \vec{B}$ .

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називають скаляром? вектором?
2. Дати визначення скалярному добутку.
3. Дати визначення векторному добутку.

## 2. МЕХАНІКА



*Механіка* — розділ фізики, що вивчає механічний рух матеріальних тіл та взаємодію цих тіл.

### 2.1. ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

*Механічний рух* — зміна положення тіла з часом відносно іншого тіла або системи тіл, що умовно вважають нерухомою.

У механіці для опису реальних тіл використовують спрощені моделі, такі як матеріальна точка або абсолютно тверде тіло.

*Матеріальна точка* — це тіло, формою і розмірами якого в умовах даної задачі можна знехтувати.

*Абсолютно тверде тіло* — це тіло, деформаціями якого в умовах розглядуваної задачі можна знехтувати і відстань між двома точками якого завжди залишається незмінною.

*Система відліку* — це сукупність системи координат і годинника, зв'язаних з тілом, відносно якого вивчається рух будь-яких інших матеріальних точок або тіл. Наприклад, у декартовій системі координат положення точки  $A$  в даний момент часу характеризується трьома координатами  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ .

### 2.2. КІНЕМАТИКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ І ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ ТВЕРДОГО ТІЛА

*Кінематика* вивчає рух тіл без урахування причин, що викликають цей рух.

*Траєкторія* — це лінія, яку описує під час руху матеріальна точка. Залежно від траєкторії розрізняють *прямолінійний* і *криволінійний* рух точки.

Довжиною шляху  $s$  називається відстань, пройдена точкою за певний проміжок часу і яка вимірюється вздовж траєкторії.

Переміщення  $\Delta \vec{r}$  це є вектор, проведений із початкового положення точки, що рухається, в положення її у даний момент часу:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_0. \quad (2.1)$$

Тут  $\vec{r}_1$  і  $\vec{r}_0$  є радіус-вектори.

Траєкторію, довжину шляху і переміщення наведено на рис. 2.1.

Середня швидкість точки  $\langle \vec{V} \rangle$  є відношення переміщення  $\Delta \vec{r}$  до проміжку часу  $\Delta t$  (рис. 2.2):

$$\langle \vec{V} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}. \quad (2.2)$$

Одиниця вимірювання швидкості —  $m \cdot s^{-1}$ .

Миттєва швидкість точки  $\vec{V}$  дорівнює першій похідній радіуса-вектора за часом:

$$\vec{V} = \lim \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (2.3)$$

Прискорення  $\vec{a}$  дорівнює першій похідній швидкості  $\vec{V}$  руху точки за часом  $t$  (рис. 2.3):

$$\vec{a} = \lim \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = \frac{d\vec{V}}{dt}. \quad (2.4)$$

Одиниця вимірювання прискорення —  $m \cdot s^{-2}$ .

Криволінійний рух матеріальної точки характеризується тангенціальним  $a_\tau$  і нормальним  $a_n$  прискореннями:

$$a_\tau = \frac{dV}{dt}; \quad (2.5)$$

$$a_n = \frac{V^2}{r}. \quad (2.6)$$

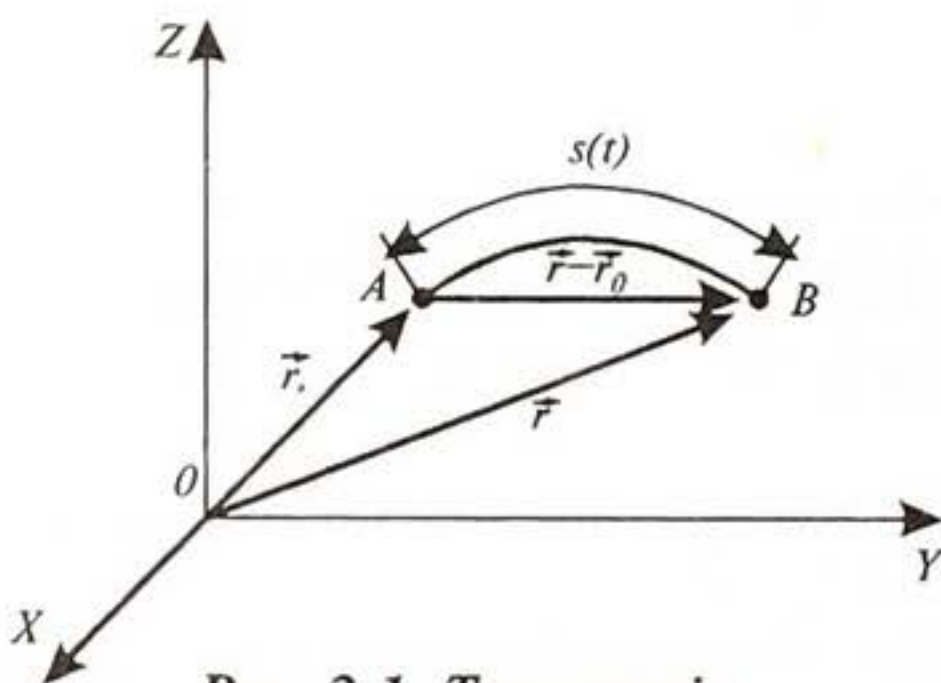


Рис. 2.1. Траєкторія, довжина шляху і переміщення

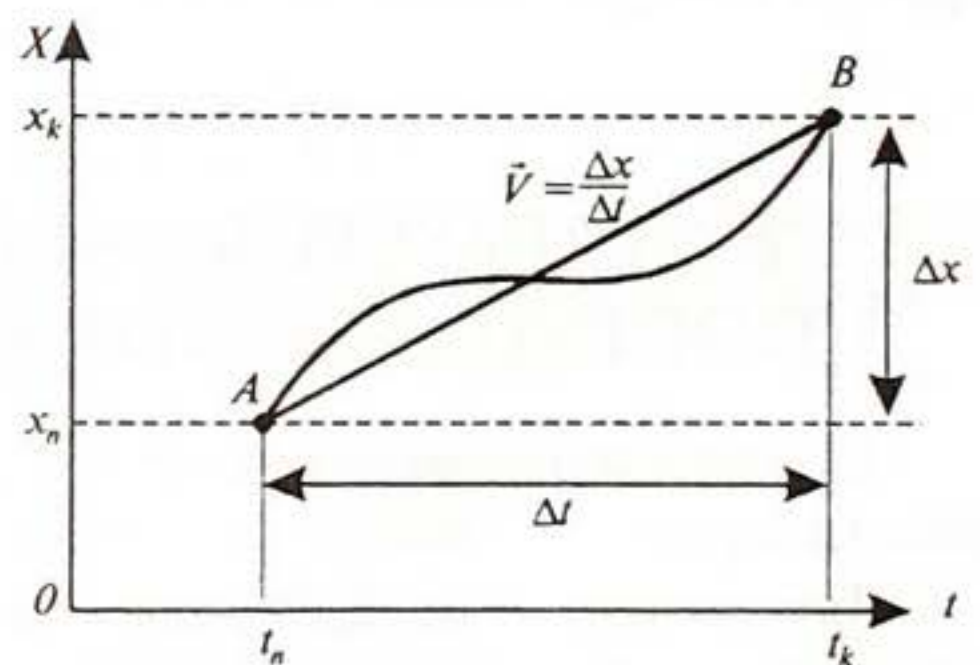


Рис. 2.2. Середня швидкість точки

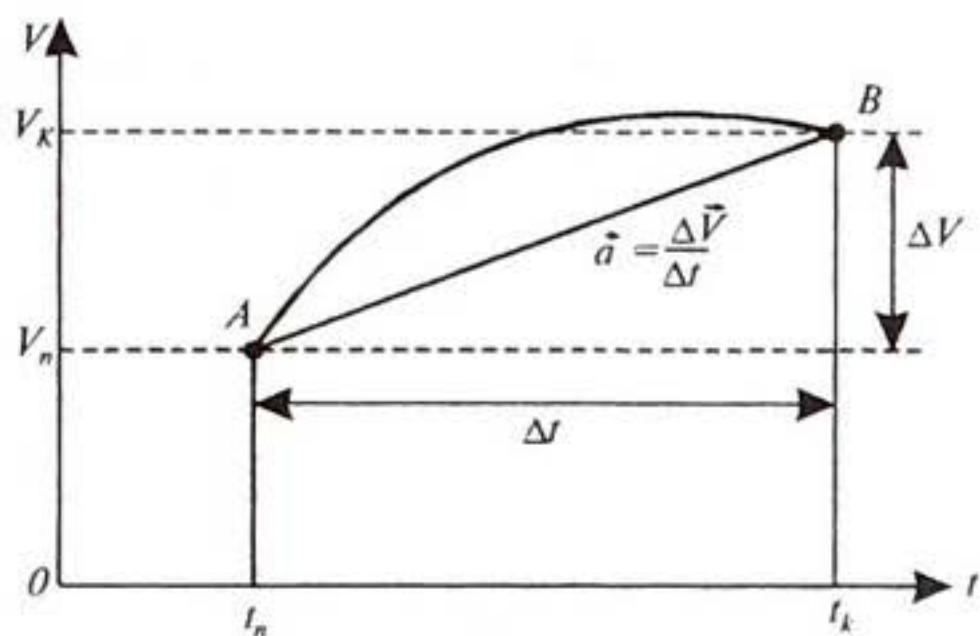


Рис. 2.3. Середнє прискорення точки

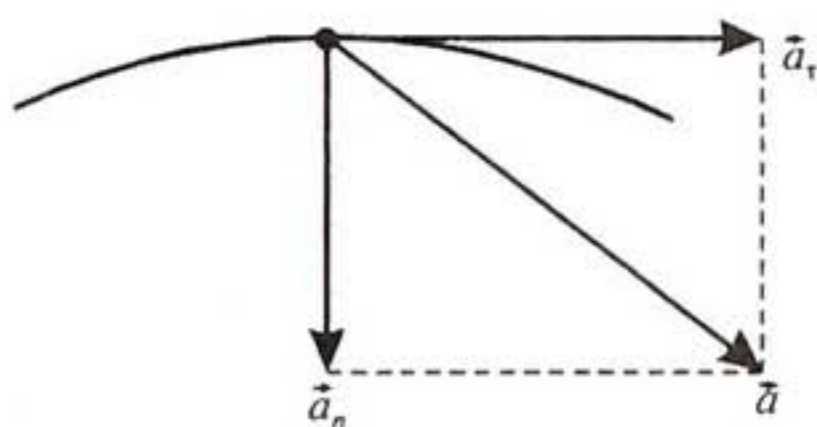


Рис. 2.4. Повне прискорення точки під час криволінійного руху

Повне прискорення  $a$  матеріальної точки під час криволінійного руху визначається так (рис. 2.4):

$$a = |\vec{a}| = \sqrt{\left[\left(\frac{dV}{dt}\right)^2 + \left(\frac{V^2}{r}\right)^2\right]}. \quad (2.7)$$

Поступальним називається такий рух твердого тіла, при якому пряма, що з'єднує будь-які дві точки цього тіла, залишається паралельною сама собі.

## 2.3. ДИНАМІКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ І ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ ТВЕРДОГО ТІЛА

Динаміка вивчає рух тіл у зв'язку з тими причинами, які викликають або змінюють цей рух.

В основі динаміки лежать три закони Ньютона.

Перший закон Ньютона: будь-яка матеріальна точка (тіло) зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, доки дія з боку інших тіл не примусить його змінити цей стан.

Властивість тіл зберігати стан спокою або рівномірного прямолінійного руху називається *інерцією*.

*Сила* — фізична величина, що характеризує дію одного тіла на інше; результатом прикладення до тіла сили є набування прискорення або деформації тіла.

Одиниця вимірювання сили —  $H$ .

*Маса* тіла — фізична величина, яка є однією з основних характеристик матерії, що визначає її інерційні та гравітаційні властивості.

Одиниця вимірювання маси —  $кг$ .

Типові значення маси сільськогосподарських тварин наведено в табл. 2.1.

## 2.1. Жива маса сільськогосподарських тварин

Тварина	Жива маса, кг
Бугаї-плідники	500÷1400
Корови	350÷500
Коні	
верхові і рисисті породи	400÷600
ваговозні породи	500÷700
Кнури-плідники	200÷350
Свиноматки	240 і більше
Барани-плідники	100÷130
Вівцематки	50÷70
Цапи-плідники	90
Козоматки пухові і вовняні	50
Кури	
яєчні	1,4÷1,5 (22 тижні)
м'ясні	1,9÷2,2 (22 тижні)
Індики	4,5÷7,5 (22 тижні)
Качки	2,7÷2,9 (7 тижнів)
Гуси	4,5÷5,0 (22 тижні)

Густина речовини  $\rho$  — це є маса, що припадає на одиницю об'єму:

$$\rho = m/V, \quad (2.8)$$

де  $m$  — маса тіла;  $V$  — об'єм тіла.

Значення густини деяких речовин наведено у табл. 2.2.

## 2.2. Густина деяких речовин

Речовина	Густина, кг·м <sup>-3</sup>	Температура, °С
Повітря	1,293	0
Повітря	1,205	20
Повітря	1,128	40
Вода	999,8	0
Вода	1000,0	4
Вода	999,7	10
Вода	998,2	20
Вода	995,6	30
Вода	992,2	40
Молоко	1028,5	20
Мед	1400+1450	20
Гліцерин	1200	20
Рицинова олія	900	20
Спирт	790	20
Кров тварин	1052+1060	20
Легені	260	40
Внутрішня камера ока	1336	40
Хрящ	1100	40
Кістка	1800+1900	40
Зуб	1950+2380	40

Густина сферичної частинки радіусом  $R$  дорівнює:

$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3} = \frac{m}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3}, \quad (2.9)$$

де  $D$  — діаметр частинки.

Значення густини біологічних рідин інколи можуть використовуватися як діагностичні критерії стану організму (табл. 2.3).

### 2.3. Залежність густини жовчі від стану здоров'я

Стан здоров'я	Густина, кг·м <sup>3</sup>
Норма	1008 ± 0,2
Хронічний холангіогепатит	1004 ± 2,0
Цироз печінки	1001 ± 0,6

Другий закон Ньютона: прискорення, що набуває матеріальна точка (тіло), пропорційне силі, яка викликає це прискорення, збігається з нею за напрямком і обернено пропорційне масі матеріальної точки (тіла)

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (2.10)$$

Останнє рівняння можна записати так:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (2.11)$$

Третій закон Ньютона: будь-яка дія матеріальних точок (тіл) одна на одну має характер взаємодії; сили, з якими діють одна на одну матеріальні точки (тіла), завжди рівні між собою за модулем, протилежні за напрямком і діють вздовж прямої, що з'єднує ці точки (тіла)

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}. \quad (2.12)$$

Механічна система, на яку не діють зовнішні сили, називається *замкнутою*.

Для системи матеріальних точок рівняння (2.11) запишеться так:

$$\frac{d(m\vec{V})}{dt} = \vec{F}_{\text{зовн}}, \quad (2.13)$$

де  $\vec{F}_{\text{зовн}} = \sum (\vec{F}_i)_{\text{зовн}}$  — головний вектор зовнішніх сил. Для замкнутої системи матеріальних точок маємо  $\vec{F}_{\text{зовн}} = 0$ , отже  $\frac{d(m\vec{V})}{dt} = 0$ , або  $(m\vec{V}) = \sum m_i \vec{V}_i = \text{const}$ , тобто імпульс замкнутої системи не змінюється з часом (закон збереження імпульсу замкнутої системи).

Розглянемо систему матеріальних точок (рис. 2.5). Точка  $C$ , радіус-вектор якої рівний відношенню суми добутків мас усіх мате-

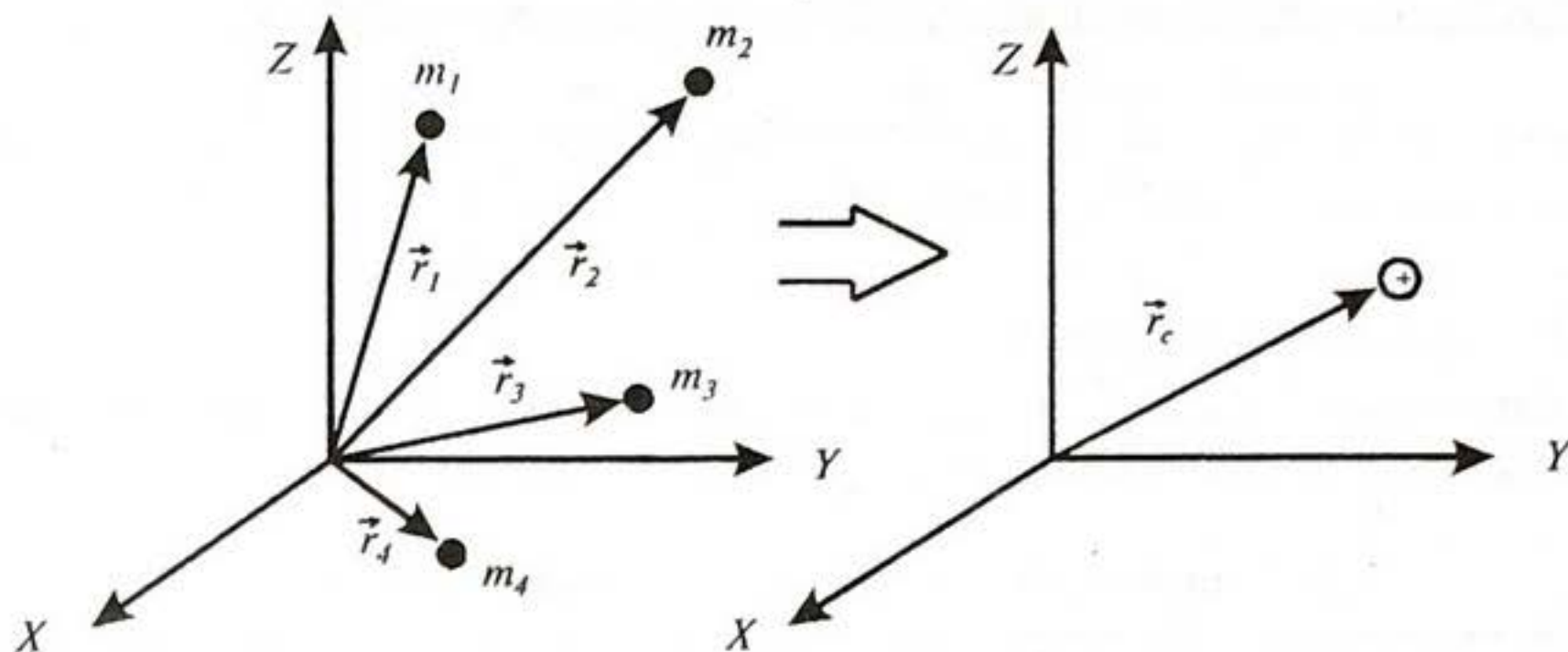


Рис. 2.5. Центр мас системи матеріальних точок як матеріальна точка, в якій міститься маса всієї системи

ріальних точок системи на їх радіуси-вектори до маси  $m$  всієї системи, називається *центром мас* системи матеріальних точок:

$$\vec{r}_c = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + \dots + m_N \vec{r}_N}{m_1 + m_2 + \dots + m_N} = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i}. \quad (2.14)$$

Таким чином, центр мас системи матеріальних точок рухається як матеріальна точка, в якій міститься маса всієї системи і на яку діє сила, що дорівнює геометричній сумі всіх сил, які діють на систему. Отже, тверде тіло еквівалентне системі матеріальних точок.

## 2.4. ТИПИ СИЛ

### 2.4.1. Сили тяжіння

Закон всесвітнього тяжіння: дві будь-які матеріальні частинки з масами  $m_1$  і  $m_2$  притягуються в напрямку одна до одної з силою, що прямо пропорційна добутку мас і обернено пропорційна квадрату відстані  $r$  між ними

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.15)$$

де  $r$  — відстань між точками,  $m_1$  і  $m_2$  — їх маси,  $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$  — гравітаційна стала. Матеріальні частинки — це будь-які тіла, розміри яких значно менші за відстань між ними.

Розглянемо сили, що діють на нерухоме тіло, розташоване на земній поверхні. З боку Землі діє *сила притягання*  $F$ , що визначається за законом всесвітнього тяжіння:

$$F = G \frac{mM_3}{R^2}, \quad (2.16)$$

де  $m$  — маса тіла;  $M_3$  — маса Землі;  $R_3$  — радіус земної кулі.

Крім того, за рахунок добового обертання Землі на тіло діє *відцентрова сила інерції*  $F_{від}$ , що спрямована від осі обертання і визначається за виразом:

$$F_{від} = m\omega^2 r, \quad (2.17)$$

де  $\omega$  — кутова швидкість добового обертання Землі ( $7,3 \cdot 10^{-5}$  рад  $\cdot$  с $^{-1}$ ),  $r$  — радіус обертання.

Геометрична сума сили притягання Землі та відцентрової сили інерції називається *силою тяжіння*. Сила притягання значно перевищує відцентрову силу інерції, оскільки величина  $\omega^2$  дуже мала; отже, сила тяжіння майже не відрізняється від сили притягання.

Проекція відцентрової сили інерції  $F_{від}$  на напрямок дії сили притягання Землі дорівнює:

$$F'_{від} = m\omega^2 r \cos \varphi, \quad (2.18)$$

де  $\varphi$  — географічна широта знаходження тіла.

*Вага*  $P$  тіла, як видно з рис. 2.6, визначається як різниця сили притягання  $F$  і проекції відцентрової сили  $F'_{від}$  на напрямок дії сили притягання (рис. 2.6):

$$P = G \frac{mM_3}{R^2} - m\omega^2 r \cos \varphi. \quad (2.19)$$

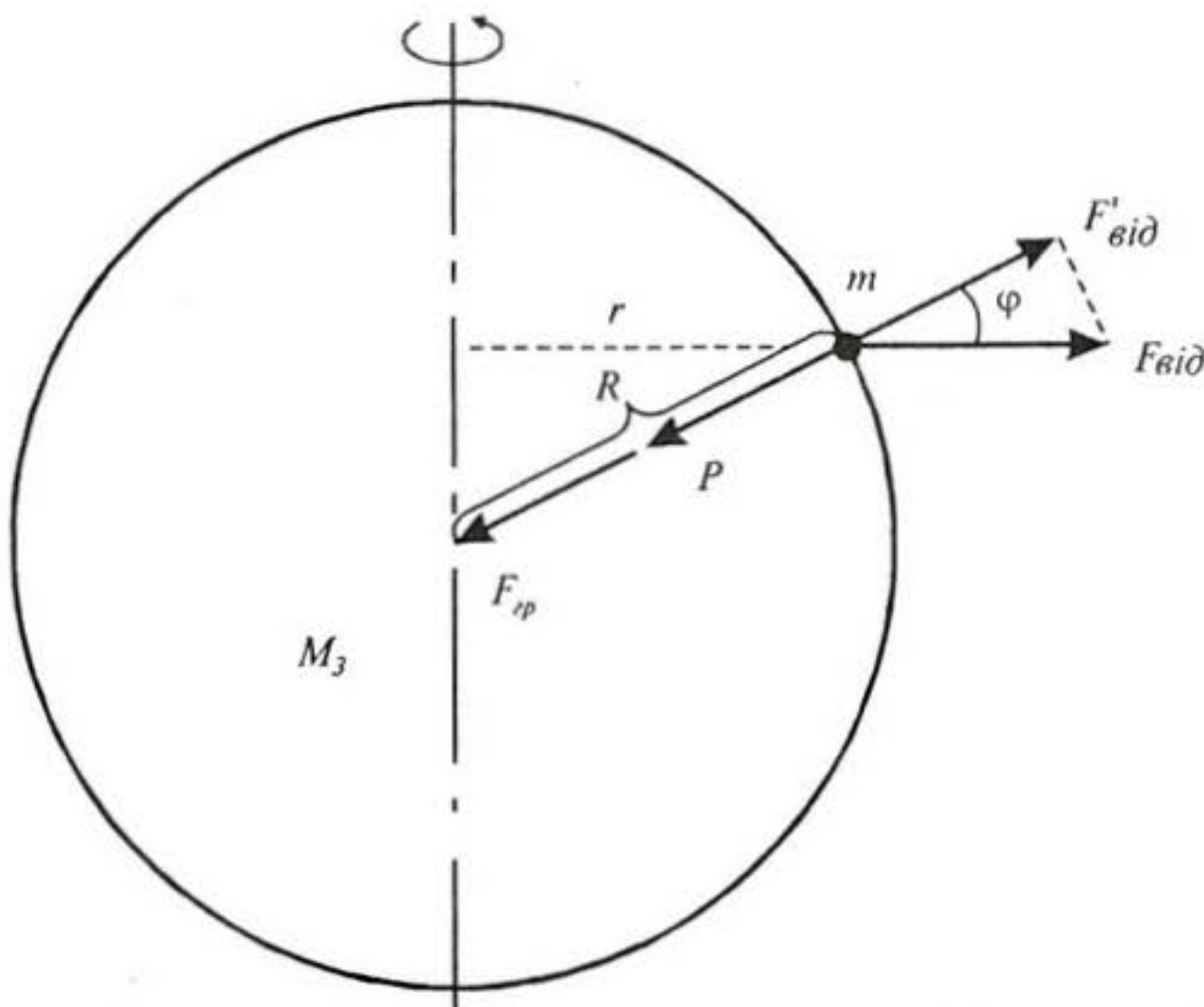


Рис. 2.6. Дія сил на тіло, що лежить на земній поверхні:  
 $F_{gp}$  — гравітаційна сила;  $F_{від}$  — відцентрова сила;  
 $P$  — вага тіла;  $\varphi$  — географічна широта знаходження тіла;  
 $r$  — радіус обертання тіла;  $R$  — радіус земної кулі



Враховуючи, що  $r = R \cos \varphi$ , отримуємо вираз:

$$P = G \frac{mM_2}{R_1^2} - m\omega^2 R \cos^2 \varphi. \quad (2.20)$$

Таким чином, вага тіла залежить від географічної широти  $\varphi$  знаходження тіла.

### 2.4.2. Пружні сили

*Механічна деформація* — це зміна взаємного розташування множини частинок матеріального середовища, що призводить до спотворення форми та розмірів тіла і викликає зміну сил взаємодії між частинками, тобто появу напружень.

*Пружними* називаються деформації, що виникають і зникають одночасно з навантаженням і не супроводжуються розсіюванням енергії. *Пластичними* називаються деформації, що залишаються після зняття навантаження і супроводжуються розсіюванням енергії. Існують деформації *розтягу*, *стиску*, *прогину*, *вигину*, *кручення* та *зсуву* (рис. 2.7). Деформація викликає в тілі, що деформується, появу сили пружності.

Закон Гука для однобічного розтягу (стиску): сила пружності  $F_{пр}$ , що виникає при деформації тіла, пропорційна видовженню цього тіла  $x$

$$F_{пр} = -k \cdot x, \quad (2.21)$$

де  $k$  — коефіцієнт пружності, що залежить від розмірів і матеріалу тіла.

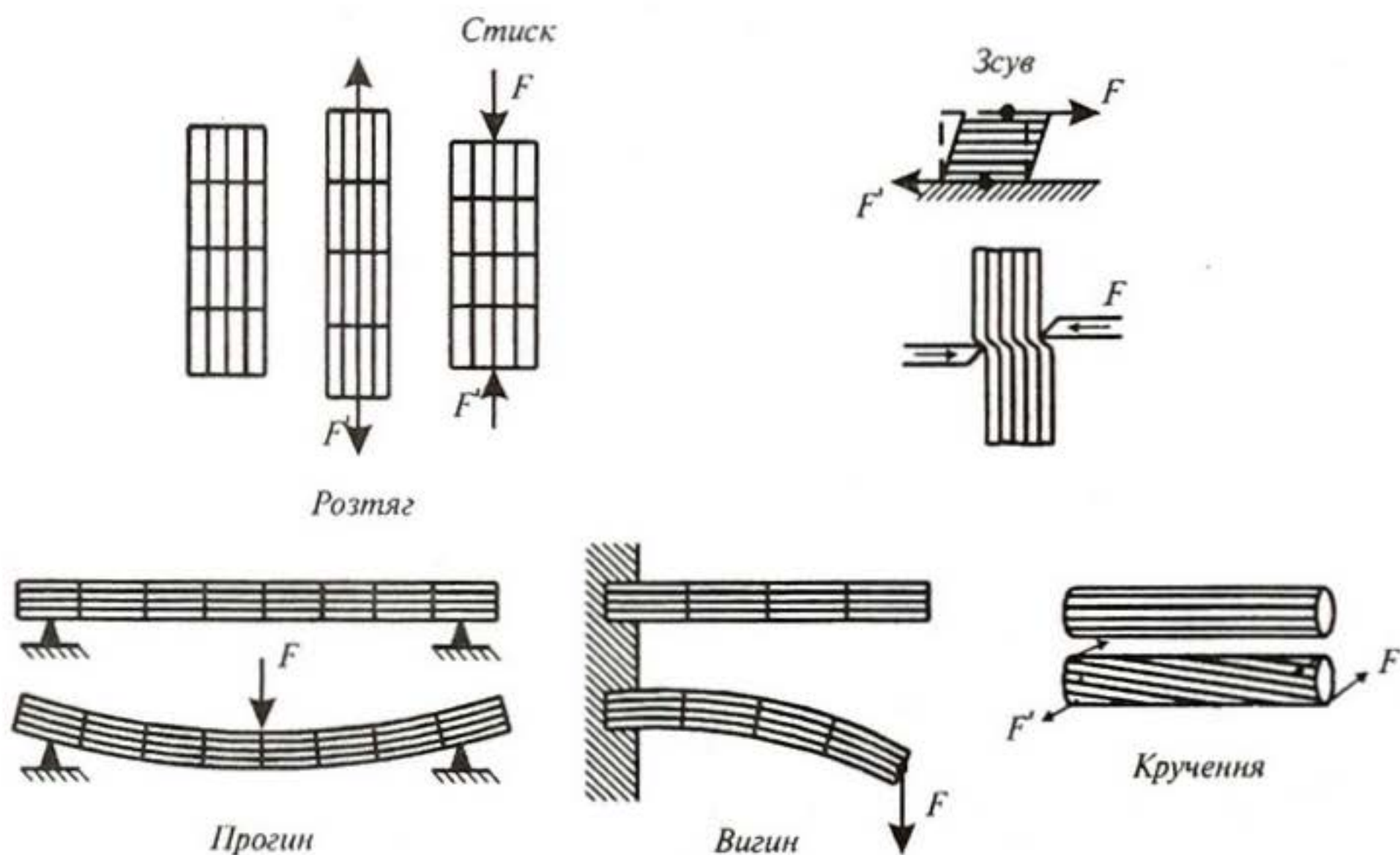


Рис. 2.7. Типи деформацій

Закон Гука може бути сформульований і записаний так: при невеликих деформаціях, що є пружними, нормальне напруження  $\sigma$  пропорційне відносному видовженню  $\epsilon$

$$\sigma = E \cdot \epsilon, \quad (2.22)$$

де  $\sigma$  — нормальне механічне напруження ( $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$ ),  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$  — відносне видовження тіла,  $E$  — модуль Юнга (значення модуля Юнга різних пружних матеріалів наведено в табл. 2.4). Модуль Юнга характеризує пружні властивості речовини; він визначається напруженням, що викликає відносне видовження тіла, рівне одиниці.

#### 2.4. Модуль Юнга для різних пружних матеріалів

Матеріал	Модуль Юнга $E$ , $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$
Сталь	$2 \cdot 10^{11}$
Кістка (вздовж осі)	$2 \cdot 10^{10}$
Колаген	$10^7 \div 10^8$
Сухожилля	$2 \cdot 10^7$
Хрящ реберний	$1,2 \cdot 10^7$
Гума	$2 \cdot 10^6$
Резилін	$1,7 \cdot 10^6$
Еластин	$6 \cdot 10^5$
Кровоносна судина	$2 \cdot 10^5$
Клітини гладеньких м'язів у стані збудження	$10^5$
у стані спокою	$10^4$

354150  
Нормальне механічне напруження — величина  $\sigma$ , що дорівнює відношенню модуля пружності  $F_{пр}$  до площі поперечного перетину  $S$  тіла

$$\sigma = \frac{F_{пр}}{S}. \quad (2.23)$$

Залежність механічного напруження  $\sigma$  від відносного видовження  $\epsilon$  називається *діаграмою розтягу* (рис. 2.8). Тут можна виділити такі ділянки і характерні точки:  $OA$  — область пружності, точка  $A$  — межа пружності,  $AB$  — область пластичності, точка  $B$  — межа пластичності,  $BC$  — область руйнування тіла,  $C$  — межа міцності.

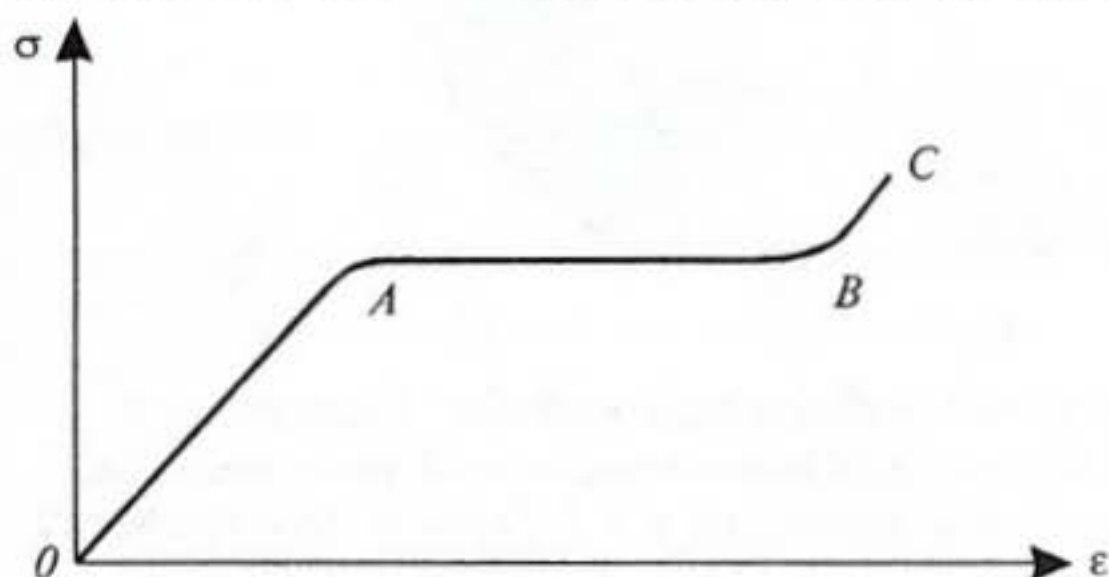


Рис. 2.8. Діаграма розтягу:  $\sigma$  — механічне напруження,  $\epsilon$  — відносне видовження,  $A$  — межа пружності,  $B$  — межа пластичності,  $C$  — межа міцності

Потенціальна енергія пружно-деформованого тіла визначається так:

$$W_{II} = \frac{k \cdot x^2}{2} = \frac{E \cdot S \cdot (\Delta l)^2}{2 \cdot l} = \frac{\sigma^2 \cdot V}{2 \cdot E}. \quad (2.24)$$

### 2.4.3. Пружні властивості біологічних матеріалів

*Колаген* — білок, органічний компонент кісткової тканини. Крім того, колаген міститься в шкірі і тканинах кровоносних судин.

*Еластін* — являє собою пружний білок, що зустрічається у хребетних у вигляді тонких жмутів в ареоллярній з'єднувальній тканині, яка знаходиться в стінках артерій, особливо біля серця.

*Резилін* — білок, що зустрічається у комах. Пружні властивості резиліну надають їм можливість здійснювати стрибки.

*Абдуктин* — білок, знайдений у молюска — морського гребінця (*Pecten*) в основі черепашки. Гребінець здатний пливти, відкриваючи і закриваючи стулки з частотою 3 коливання за секунду.

Пружні властивості деяких біологічних матеріалів (наприклад, абдуктину) характеризуються певними особливостями. Так, діаграма розтягу не має вигляду прямої лінії — криві напруження і розслаблення матеріалу не збігаються (рис. 2.9). Явище, яке полягає в тому, що фізична величина (в даному випадку відносне видовження  $\epsilon$ ) неоднозначно залежить від фізичної величини, яка характеризує зовнішні умови (напруження  $\sigma$ ), називається *гістерезисом*.

Багато біологічних матеріалів складаються з кількох пружних компонентів, що зумовлює специфічний характер діаграми розтягу. Так, наприклад, потилична зв'язка *Ligamentum nuchae* копитних тварин (рис. 2.10) містить такі пружні субстанції як еластін та колаген, модулі Юнга яких значно відрізняються (табл. 2.4). Отже, еластин відповідає за початковий відгук зв'язки, тоді як колаген — за кінцевий (рис. 2.11).

Розглянемо вид деформації, який викликається дотичними (тангенціальними) напруженнями  $\tau$ . Така деформація тіла, при якій всі

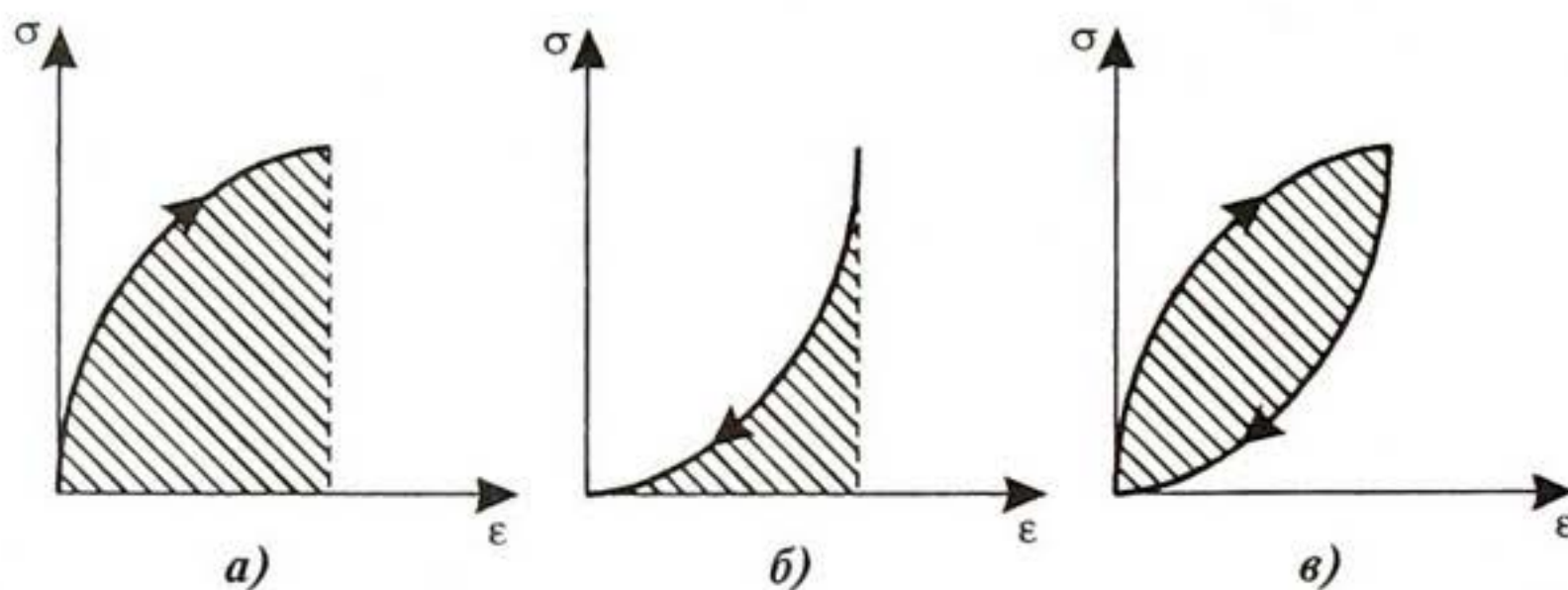


Рис. 2.9. Залежність напруги від деформації під час гістерезису: а — крива напруження, б — крива розслаблення, с — повна енергія, що визначається як різниця площ під кривими а і б (крива гістерезису)

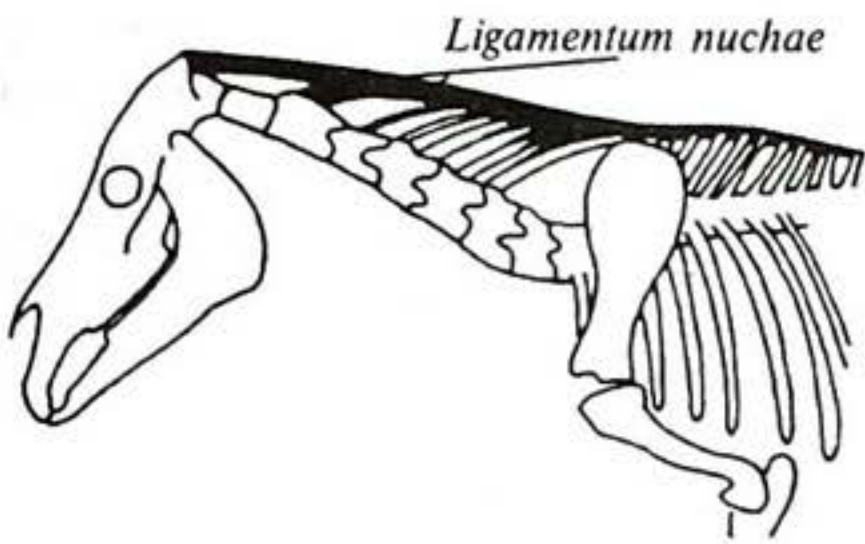


Рис. 2.10. Розміщення потиличної зв'язки (*Ligamentum nuchae*) у копитних тварин

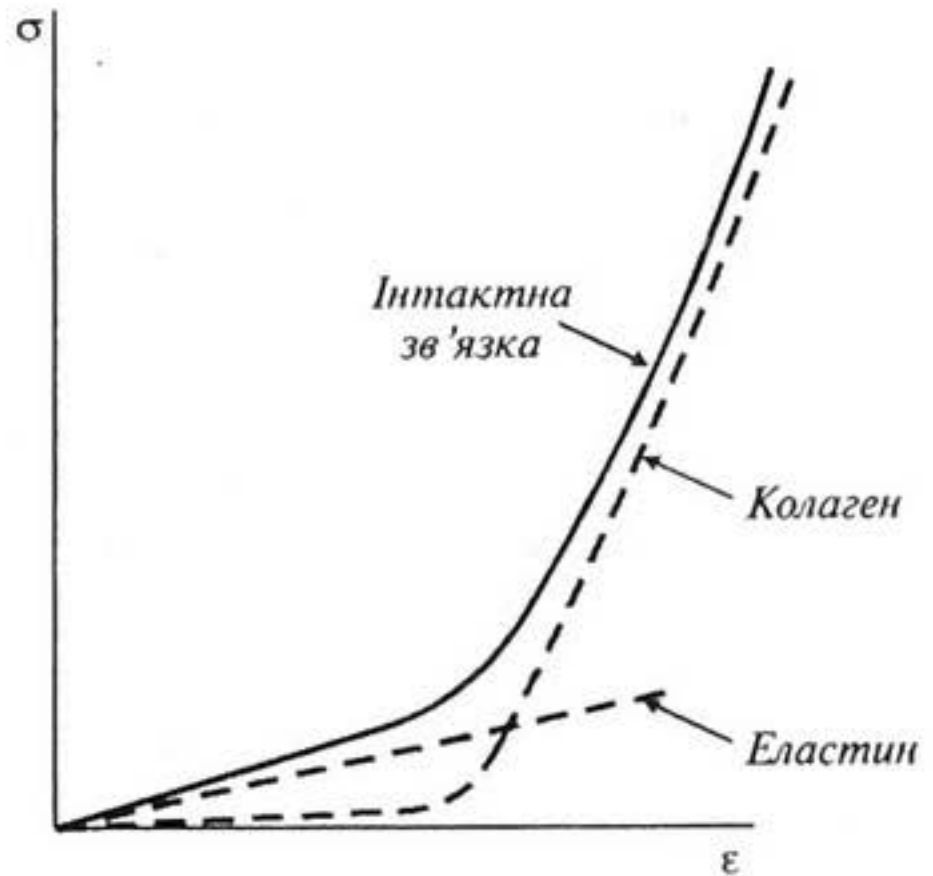


Рис. 2.11. Вплив еластину та колагену на пружні властивості потиличної зв'язки

його шари, паралельні деякій площині (площині зсуву), зміщуються без будь-яких змін паралельно один одному, називається зсувом (рис. 2.12). Згідно з законом Гука дотична напруга  $\tau$  пропорційна куту зсуву  $\gamma$ :

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad (2.25)$$

де  $G$  — модуль зсуву;  $\gamma \cong \text{tg} \gamma = \frac{x}{l}$ .

Типові значення модуля зсуву наведено в табл. 2.5.

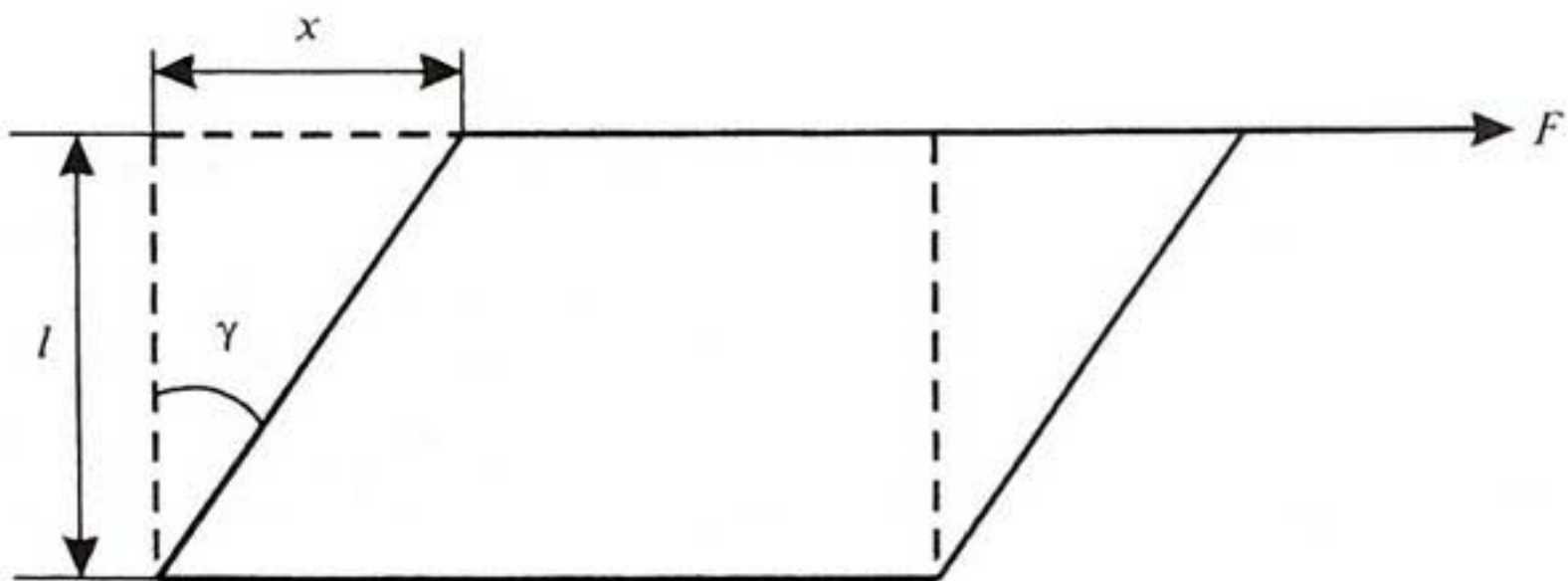


Рис. 2.12. Деформація зсуву

### 2.5. Модуль зсуву деяких матеріалів

Матеріал	Модуль зсуву $G$ , $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$
Кістка	$(0,8+1,5) \cdot 10^{10}$
Сталь	$8 \cdot 10^{10}$
Алюміній	$2,6 \cdot 10^{10}$
Гума	$1,6 \cdot 10^6$

Кістки є основними компонентами опорно-рухового апарату людини і тварини. Вивчення пружних властивостей кісткової тканини доцільне з точки зору завдань, що стоять перед сучасною хірургією та ортопедією, пов'язаних з розробкою та впровадженням засобів протезування. Крім забезпечення руху, кістки виконують функції підтримки та захисту м'язових тканин, являють собою місце накопичення кальцію. За своєю формою кістки діляться на довгі, короткі, плоскі та ірегулярні. Маса кісток становить близько 18% загальної маси тіла. Приблизно 60% об'єму (40% ваги) компактної кісткової тканини займає органічний матеріал колаген; решту — неорганічний матеріал гідроксилапатит  $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ . Кристалики цієї речовини розташовані між волокнами колагену і міцно прикріплені до них. Саме така структура кісток зумовлює їх пружні властивості. Модуль пружності кісткової тканини займає проміжне значення між модулями пружності її компонентів і істотно залежить від їх процентного вмісту. Типова довга кістка зображена на рис. 2.13. Механічні характеристики кістки наведено в табл. 2.6.

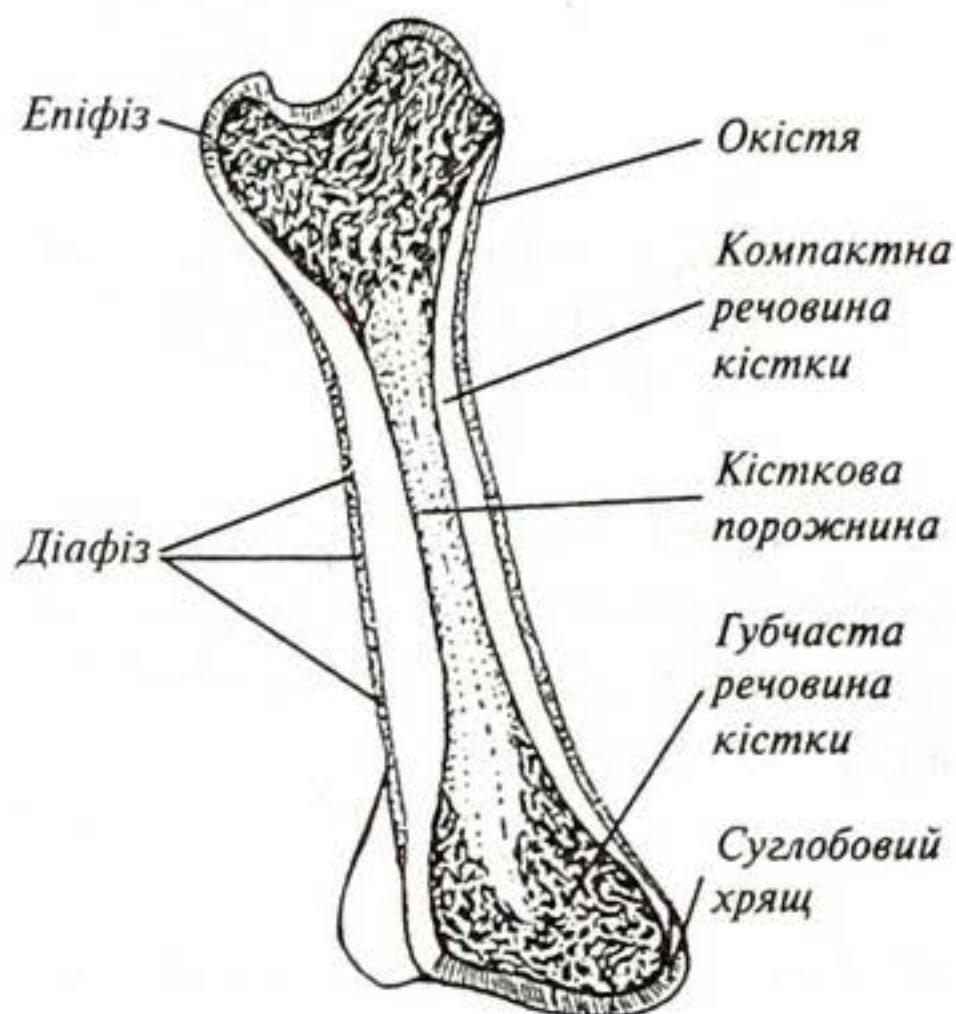


Рис. 2.13. Типова довга кістка

### 2.6. Механічні характеристики кістки

Механічний параметр	Величина, одиниці
Густина компактної кісткової тканини	$1,9 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Межа міцності на розтяг	$1,2 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$
Межа міцності на стиск	$1,7 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$

## 2.5. РОБОТА, ПОТУЖНІСТЬ І ЕНЕРГІЯ

Робота сили є міра дії сили, що залежить від числової величини і напрямку сили та від переміщення точки її прикладання.

Якщо тіло рухається прямолінійно і на нього діє постійна сила  $\vec{F}$ , що складає деякий кут  $\alpha$  з напрямком переміщення, то робота цієї сили визначається як скалярний добуток вектора сили  $\vec{F}$  на вектор переміщення  $\vec{r}$ :

$$A = \vec{F} \cdot \vec{r}, \quad (2.26)$$

або

$$A = |\vec{F}| \cos \alpha \cdot |\vec{r}|. \quad (2.27)$$

У загальному випадку, коли сила може змінюватися як за модулем, так і за напрямком, доцільно ввести поняття елементарної роботи  $dA$ :

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F \cos \alpha \cdot ds, \quad (2.28)$$

де  $ds = |d\vec{r}|$  — елементарний шлях.

Робота  $A$ , яка виконується силою  $\vec{F}$  на ділянці траєкторії від точки 1 до точки 2, дорівнює сумі елементарних робіт сили  $\vec{F}$  на всіх нескінченно малих ділянках траєкторії; ця сума приводиться до інтегралу:

$$A \equiv \int_1^2 \vec{F} d\vec{r} = \int_{s_1}^{s_2} F \cos \alpha \cdot ds. \quad (2.29)$$

Одиниця вимірювання роботи — Дж = Н · м.

*Потужність сили* — це відношення елементарної роботи  $dA$ , що здійснюється цією силою  $\vec{F}$  за малий проміжок часу, до його тривалості  $dt$ :

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{\vec{F} \cdot d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{V}. \quad (2.30)$$

Одиниця вимірювання потужності — Вт = Дж · с<sup>-1</sup>.

*Енергія* — фізична величина, що є загальною мірою руху та взаємодії всіх видів матерії.

*Кінетична енергія* механічної системи — це енергія механічного руху цієї системи.

*Потенціальна енергія* — це механічна енергія системи тіл, що визначається їх взаємним розташуванням і характером сил взаємодії між ними.

Якщо робота, що здійснюється силами при переміщенні тіла з одного положення до іншого, не залежить від того, по якій траєкторії відбулося це переміщення, а залежить лише від початкового і кінцевого положень, то такі сили називаються *консервативними*.

Закон збереження енергії у механіці: повна механічна енергія замкнутої системи тіл, між якими діють лише консервативні сили, залишається сталою.

## 2.6. КІНЕМАТИКА І ДИНАМІКА ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ТВЕРДОГО ТІЛА

*Обертальним рухом твердого тіла* називають такий його рух, при якому всі точки, з яких складається тіло, описують кола, центри яких лежать на прямій, що називається віссю обертання.

Кінематичні характеристики обертального руху:

Кутова швидкість  $\vec{\omega}$  є векторна величина, що дорівнює першій похідній кута обертання тіла за часом:

$$\vec{\omega} = \lim \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}. \quad (2.31)$$

Одиниця вимірювання кутової швидкості —  $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Кутове прискорення є векторна величина, що дорівнює першій похідній кутової швидкості за часом:

$$\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}. \quad (2.32)$$

Одиниця вимірювання кутового прискорення —  $\text{рад} \cdot \text{с}^{-2}$ .

Динамічною характеристикою твердого тіла, що обертається, є момент інерції — сума добутків мас  $m_i$  матеріальних точок, з яких складається тіло, на квадрат відстані їх від осі обертання:

$$I = \sum m_i r_i^2. \quad (2.33)$$

Для довільного тіла момент інерції становитиме:

$$I = \int r^2 dm. \quad (2.34)$$

Наведемо формули моментів інерції деяких однорідних тіл масою  $m$  відносно осей симетрії, що проходить через центр мас:

$$\text{Циліндр, диск радіусом } R \quad I = \frac{1}{2} mR^2; \quad (2.35)$$

$$\text{Сфера радіусом } R \quad I = \frac{2}{5} mR^2; \quad (2.36)$$

$$\text{Стержень довжиною } l \quad I = \frac{1}{12} ml^2. \quad (2.37)$$

Одиниця вимірювання моменту інерції —  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

Теорема Штейнера: момент інерції тіла  $I$  відносно будь-якої осі обертання дорівнює моменту його інерції  $I_c$  відносно паралельної осі, що проходить через центр мас  $C$  тіла, складеному з добутком маси  $m$  тіла на квадрат відстані  $d$  між осями

$$I = I_c + md^2. \quad (2.38)$$

Кінетична енергія обертання

$$E_{об} = \frac{I\omega^2}{2}. \quad (2.39)$$

Моментом  $\vec{M}$  сили  $\vec{F}$  відносно нерухомої точки  $O$  називається векторний добуток радіус-вектора  $\vec{r}$ , проведеного із точки  $O$  в точку прикладення сили  $\vec{F}$ :

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]. \quad (2.40)$$

Одиниця вимірювання моменту сили —  $H \cdot m$ .

Основне рівняння динаміки обертального руху:

$$\vec{M} = I \times \vec{\beta}, \quad (2.41)$$

де  $I$  — момент інерції тіла, що обертається;  $\vec{\beta}$  — кутове прискорення.

Останнє рівняння можна переписати як:

$$\vec{M} = I \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt}, \quad (2.42)$$

звідки

$$\vec{M} \cdot dt = I \cdot d\vec{\omega}. \quad (2.43)$$

Закон збереження моменту імпульсу в механіці: для замкнутої системи момент імпульсу відносно нерухомої точки не змінюється з часом.

Дійсно, для замкнутої системи маємо  $\vec{M} = 0$ , отже  $\vec{M} \cdot dt$ , звідки

$$d(I \cdot \omega) = 0; \quad (2.44)$$

$$I \cdot \omega = const. \quad (2.45)$$

## 2.7. СТАТИКА ТВЕРДОГО ТІЛА

Статика вивчає закони рівноваги системи тіл.

Важіль — найпростіший механізм, що дає змогу меншою силою зрівноважити більшу; являє собою тверде тіло, що обертається навколо нерухомої опори (рис. 2.14).

Плече сили — це найкоротша відстань між віссю обертання та напрямком дії сили.

Момент сили — це добуток сили на плече:

$$M = F \cdot l. \quad (2.46)$$

Якщо опора розташована між точками прикладення сил, то це важіль I роду; якщо обидві сили прикладені з одного боку опори, то це важіль II роду.

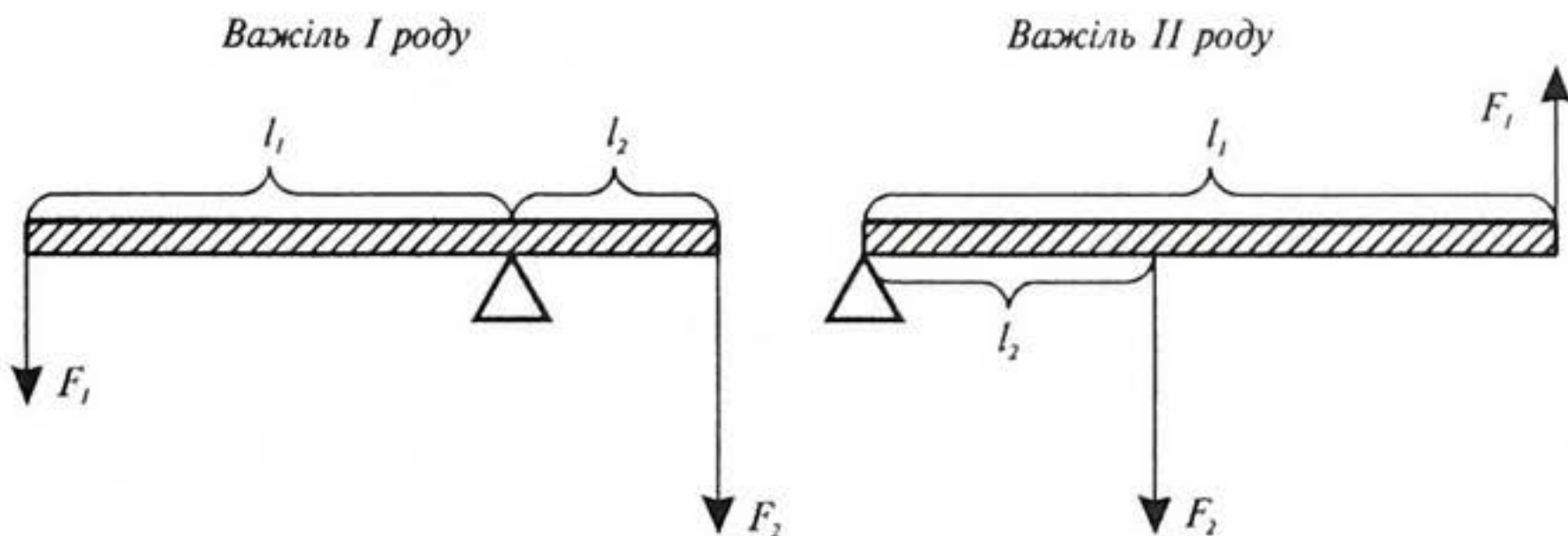


Рис. 2.14. Типи важелів ( $F_1$  і  $F_2$  — сили,  $l_1$  і  $l_2$  — плечі прикладених сил)



Умова рівноваги важеля: важіль перебуває в рівновазі, якщо сума моментів діючих сил дорівнює нулю, тобто сума моментів сил, що обертають важіль за годинниковою стрілкою (додатних), дорівнює сумі моментів сил, які обертають важіль проти годинникової стрілки (від'ємних)

$$F_1 \cdot l_1 - F_2 \cdot l_2 = 0, \quad (2.47)$$

де  $l_1$  і  $l_2$  — плечі прикладених сил (рис. 2.14).

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Бджола летить вздовж осі  $X$  так, що в момент часу  $t_1 = 1$  с вона знаходиться в точці  $X_1 = 12$  м, а в момент часу  $t_2 = 3$  с — в точці  $X_2 = 4$  м. Знайти переміщення та середню швидкість польоту бджоли за даний проміжок часу.

### Розв'язок

Переміщення бджоли знайдемо за виразом:

$$\Delta X = X_2 - X_1 = 4 \text{ м} - 12 \text{ м} = -8 \text{ м}.$$

Середню швидкість знаходимо за формулою:

$$\langle V \rangle = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1} = \frac{4 \text{ м} - 12 \text{ м}}{3 \text{ с} - 1 \text{ с}} = -\frac{8 \text{ м}}{2 \text{ с}} = -4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

### Приклад

Частинка рухається вздовж осі  $X$  згідно з рівнянням  $X = 3t^2$ , де  $X$  вимірюється в м, а  $t$  — в с. Знайти миттєву швидкість руху частинки.

### Розв'язок

В початковий момент часу  $t$  координата частинки є  $X_n = 3t^2$ . Через проміжок часу  $\Delta t$ , тобто в момент часу  $t + \Delta t$  координата частинки становить

$$X_k = 3(t + \Delta t)^2 = 3[t^2 + 2t\Delta t + (\Delta t)^2] = 3t^2 + 6t\Delta t + 3(\Delta t)^2.$$

Звідси переміщення частинки за інтервал часу  $\Delta t$  дорівнює:

$$\Delta X = X_k - X_n = 3t^2 + 6t\Delta t + 3(\Delta t)^2 - 3t^2 = 6t\Delta t + 3(\Delta t)^2.$$

Середня швидкість бджоли за інтервал часу  $\Delta t$  дорівнює:

$$\langle V \rangle = \frac{\Delta X}{\Delta t} = 6t + 3\Delta t.$$

Миттєву швидкість бджоли визначимо за виразом (при умові, що  $\Delta t \rightarrow 0$ ):

$$V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X}{\Delta t} = 6t \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

### Контрольне завдання № 2.1

Швидкість руху частинки вздовж осі  $X$  описується рівнянням  $V = (40 - 5t^2) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , де  $t$  вимірюється в секундах. Знайти середнє прискорення, з яким рухається частинка за проміжок часу від  $t = 0$  до  $t = 2$  с та миттєве прискорення в момент часу  $t = 2$  с.

*Відповідь:*  $\langle a \rangle = -10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ;  $a = -20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ .

### Приклад

Молоко являє собою суміш жирових глобул ( $1\div 10$  мкм), міцел казеїну ( $0,1\div 0,2$  мкм) і частинок сироваткового білка ( $0,01\div 0,02$  мкм). Визначити масу жирової глобули молока діаметром 10 мкм, якщо її густина становить  $1028,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

### Розв'язок

Використовуючи формулу (2.9), визначимо масу глобули:

$$m = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3 \cdot \rho.$$

Підставляємо числові дані:

$$m = \left(\frac{4}{3}\right) \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{10 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{2}\right)^3 \cdot 1028,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 7 \cdot 10^{-13} \text{ кг}.$$

### Контрольне завдання № 2.2

Визначити масу міцели казеїну молока діаметром 0,1 мкм, якщо її густина становить  $1110 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

*Відповідь:*  $5,81 \cdot 10^{-19} \text{ кг}$ .

### Приклад

Залежність густини молока від температури визначається за допомогою рівняння:

$$\rho = 1 + a + bt + ct^2 + dt^3,$$

де  $t$  — температура в  $^{\circ}\text{C}$ ,  $a, b, c, d$  — числові коефіцієнти, наведені в табл. 2.7.

Знайти густину незбираного молока при температурі  $20^{\circ}\text{C}$ .

### 2.7. Значення числових коефіцієнтів $a, b, c, d$

Продукт	$a$	$b$	$c$	$d$
Незбиране молоко	$3,50 \cdot 10^{-2}$	$-3,58 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$-1,0 \cdot 10^{-7}$
Збиране молоко	$3,66 \cdot 10^{-2}$	$-1,46 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$-1,6 \cdot 10^{-7}$

### Розв'язок

Підставляємо числові значення в останнє рівняння:

$$\begin{aligned} \rho &= 1 + 3,50 \cdot 10^{-2} - 3,58 \cdot 20 \cdot 10^{-4} + 4,9 \cdot 400 \cdot 10^{-6} - 1,0 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-7} = \\ &= 1 + 350 \cdot 10^{-4} - 71,6 \cdot 10^{-4} + 19,6 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-4} = 1,029 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}. \end{aligned}$$

### Контрольне завдання № 2.3

Знайти густину збираного молока при температурі  $20^{\circ}\text{C}$ .

*Відповідь:*  $\rho = 1,0333 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ .

### Контрольне завдання № 2.4

Використовуючи висновки О.Л.Чижевського, приймемо поверхню еритроцита рівною  $109 \text{ мкм}^2$ , а об'єм його —  $64 \text{ мкм}^3$ . Показати, що поверхня куба такого ж об'єму менша, ніж поверхня еритроцита.

### Приклад

Розглянемо важіль, що складається з передпліччя, розміщеного горизонтально, і біцепса (м'яза, що згинає передпліччя), який складає кут  $15^\circ$  з плечовою кісткою (рис. 2.15,а). Відстань  $x$  від точки опори до точки прикладання сили (еквівалентна схема важеля наведена на рис. 2.15,б) становить  $1/5$  відстані від ліктя до долоні з вантажем. Визначити зусилля, яке розвиває біцепс при утриманні тіла вагою  $5 \text{ Н}$ .

### Розв'язок

Умова рівноваги важеля має вигляд:

$$P \cdot l_1 = F \cdot l_2,$$

або

$$P \cdot 5 \cdot x = F \cdot x \cdot \cos 15^\circ.$$

Звідки

$$F = \frac{P \cdot 5}{\cos 15^\circ}.$$

Підставляємо числові дані:

$$F = \frac{5 \cdot 5}{0,966} = 25,9 \text{ Н}.$$

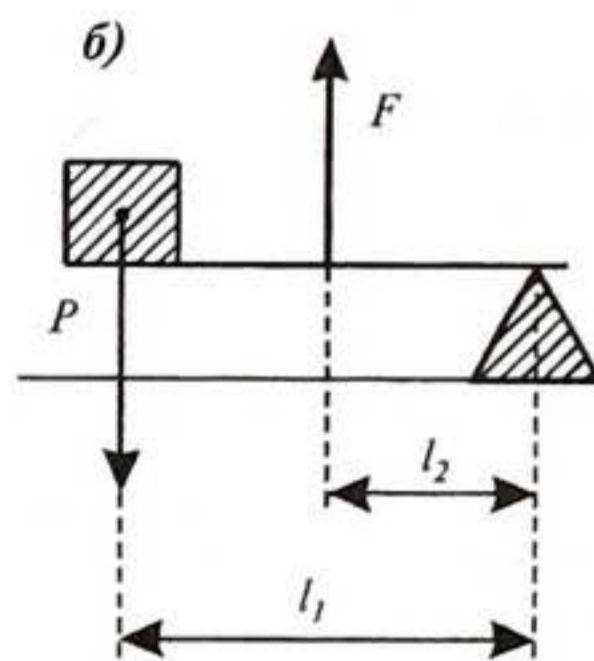
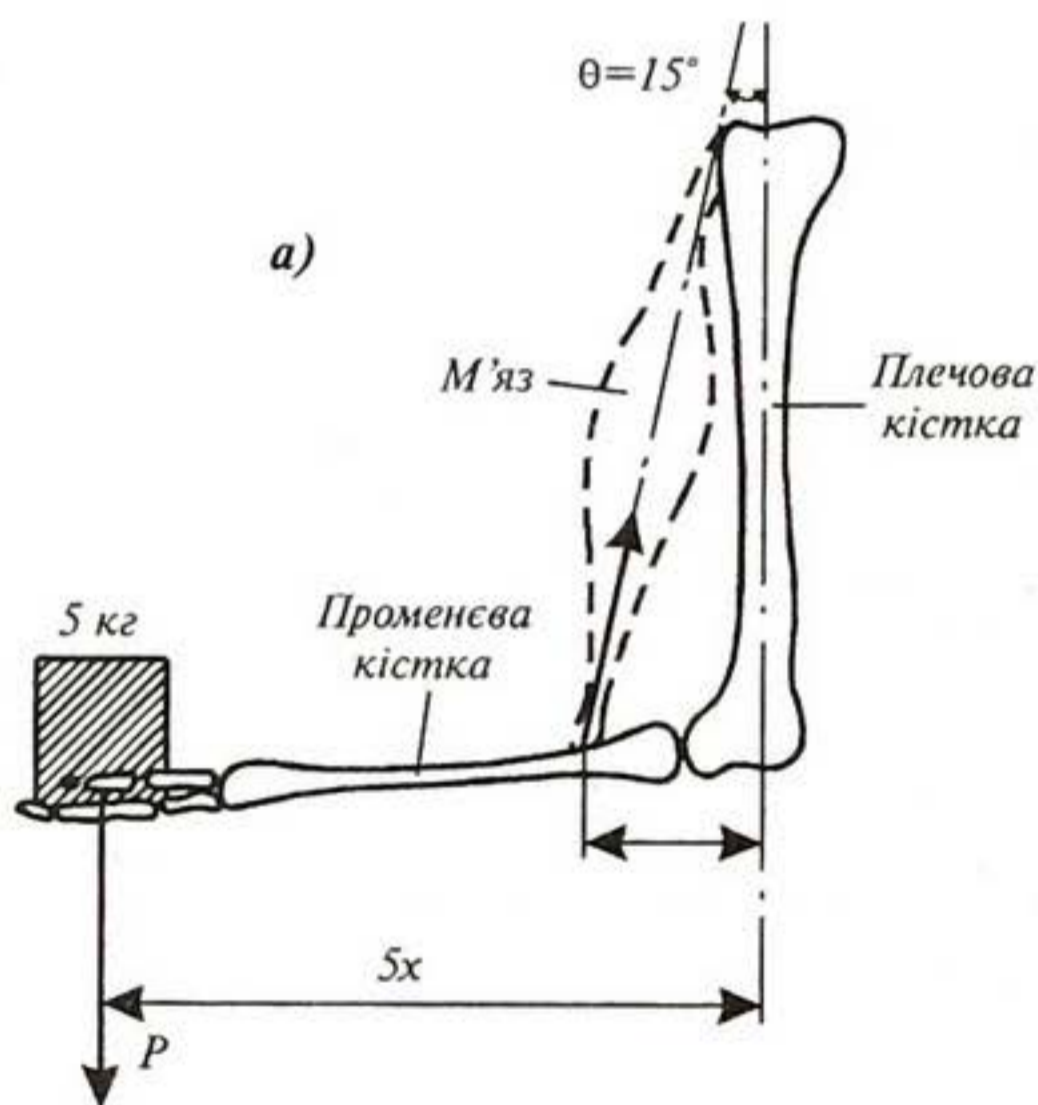


Рис. 2.15. а) важіль, що складається з плечової, променевої кісток і м'яза; б) еквівалентна схема важеля:  $P$  — вантаж,  $F$  — діюча сила,  $l_1$  в  $l_2$  — плечі

### Контрольне завдання № 2.5

Визначити зусилля, яке розвиває біцепс, для ситуації, зображеної на рис. 2.16.

Відповідь:  $F = 143,7 \text{ Н}$ .

### Приклад

Смушка тканини завдовжки  $5 \text{ см}$  з поперечним перерізом  $0,1 \text{ см}^2$  вирізана зі стінки аорти, модуль Юнга якої становить  $2 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ . Яку

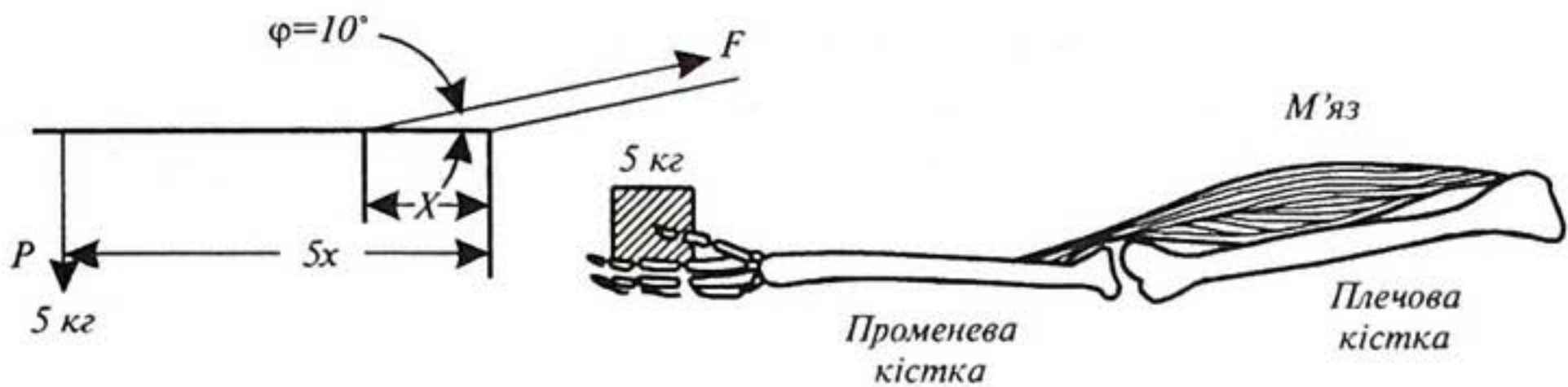


Рис. 2.16. Важіль та його еквівалентна схема згідно з умовою завдання 2.5

масу слід прикріпити до вертикально підвішеної смужки, щоб викликати видовження 0,5 см (зміною поперечного перерізу знехтувати).

### Розв'язок

Сила  $F$ , прикладена до смужки, визначається як:

$$F = m \cdot g,$$

де  $m$  — маса прикріпленого вантажу;  $g$  — прискорення вільного падіння. Останнє рівняння з урахуванням виразу (2.22) можна переписати так:

$$\frac{m \cdot g}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l},$$

звідки

$$m = \frac{E \cdot \Delta l \cdot S}{g \cdot l} = \frac{(2 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{М}^2}) \cdot (0,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}) \cdot (0,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2)}{(10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}) \cdot (5 \cdot 10^{-2} \text{ м})} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ кг.}$$

### Контрольне завдання № 2.6

Стегнова кістка собаки має довжину 25 см і переріз 3 см<sup>2</sup>. Визначити силу пружності при стисканні кістки на 0,5 мм, якщо модуль Юнга дорівнює  $2 \cdot 10^{10} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Відповідь: 12 кН.

### Приклад

Визначити роботу, що виконується при стисканні стегнової кістки собаки (використати дані контрольного завдання № 2.6).

### Розв'язок

Робота стискання кістки витрачається на збільшення її потенціальної енергії:

$$A = W_{np} = \frac{E \cdot S \cdot (\Delta l)^2}{2 \cdot l}.$$

Підставляємо числові дані:

$$A = \frac{(2 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{М}^2}) \cdot (3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2) \cdot (25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2)}{2 \cdot 0,25 \text{ м}} = 3 \text{ Дж.}$$

### Контрольне завдання № 2.7

Визначити потенціальну енергію, накопичену у кінцівці блохи об'ємом  $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3$ , при 100%-ному стисканні, якщо модуль Юнга резиліну (пружного матеріалу) дорівнює  $1,7 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ .

*Відповідь:*  $2,38 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$ .

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке траєкторія? довжина шляху? переміщення?
2. Дати визначення середній та миттєвій швидкостям.
3. Що таке прискорення?
4. Що називають густиною речовини? В яких одиницях вона вимірюється?
5. Сформулювати закон всесвітнього тяжіння.
6. Що таке вага тіла? Пояснити залежність ваги тіла від географічної широти місцезнаходження тіла.
7. Сформулювати закон Гука.
8. Що таке нормальне механічне напруження? В яких одиницях вона вимірюється?
9. Що характеризує модуль Юнга?
10. Від чого залежить потенціальна енергія пружно-деформованого тіла?
11. Що таке робота сили? потужність?
12. Сформулювати закон збереження механічної енергії.
13. Що таке кутова швидкість? кутове прискорення?
14. Дати визначення моменту інерції матеріальної точки; тіла.
15. Сформулювати теорему Штейнера.
16. Що називають важелем?
17. Сформулювати умову рівноваги важеля.
18. Сформулювати закон збереження моменту імпульса.



## 3. БІОМЕХАНІКА

*Біомеханіка* — розділ біофізики, що вивчає механічні властивості тканин, органів та організму в цілому, а також явища, пов'язані з рухом тварин, роботою окремих органів і систем.

### 3.1. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВАРИН. ПРИНЦИП АЛОМЕТРІЇ

Всі тварини характеризуються механічними параметрами — геометричними розмірами  $L$ , площею поверхні  $S$  та об'ємом  $V$ . Якщо перехід від невеликих тварин до великих супроводжується пропорційною зміною параметрів  $L$ ,  $S$  і  $V$ , то можна казати про *ізометрію* цих організмів, тобто про геометричну схожість. У цьому разі відбувається лінійна залежність фізіологічних параметрів  $y$  від механічних  $x$ , а саме  $y = kx$  (де  $k$  — константа). В реальній ситуації організми не ізометричні; залежність фізіологічних параметрів тварин від механічних описується степеневою функцією типу  $y = ax^b$ , де  $a$

і  $b$  — константи. Така кореляційна залежність одержала назву *алометрії* (від грец. *alloios* — різний). Приклади алометричних співвідношень наведено на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Алометричні співвідношення між фізіологічними ( $L$  — довжина пор;  $S$  — площа пор шкаралупи яйця) і механічними ( $M_{\text{я}}$  — маса яйця) параметрами для двох значень коефіцієнта  $b$  ( $b = 1,236 > 1$  і  $b = 0,456 < 1$ )

Наприклад, маса тіла найменшого птаха (колібри) становить  $M_{mk} = 2$  г, а найбільшого (страуса) —  $M_{mc} = 100$  кг. Маса яйця самки колібри становить  $M_{як} = 0,3$  г. Якщо використати ізометричне співвідношення для визначення маси яйця самки страуса, то ця маса становитиме 15 кг, що нереально. Дійсний зв'язок між масою яйця і масою тіла птиці описується алометричним рівнянням  $M_{я} = 0,277 \cdot M_{т}^{0,770}$ .

### 3.2. ОПОРНО-РУХОВИЙ АПАРАТ ТВАРИН

Основне призначення опорно-рухового апарату сільськогосподарських тварин — забезпечення динамічних переміщень тіла або окремих його частин у просторі та зберігання під час спокійного стояння статичної рівноваги. Основними елементами опорно-рухового апарату тварин є кістки, м'язи, суглоби, сухожилля та зв'язки. Кістки, зв'язані одна з одною у рухомі ланки, утворюють кінематичні ланцюги. Окремі ланки такого ланцюга можна розглядати як найпростіший механізм — важіль. Точкою опори, навколо якої відбувається обертання важеля, є суглоб. Рух кісток, що утворюють важіль, забезпечується м'язами. Скорочуючись, вони змінюють положення кісток, до яких прикріплені. Основою опорно-рухового апарату тварин та його несучою конструкцією є скелет. Таким чином, опорно-руховий апарат тварин складається з кісток — міцних матеріалів, що виконують пасивні функції у процесі руху тіла, та м'язів, які є активним елементом опорно-рухового апарату.

Тварина бере участь у різноманітних типах рухів — поступальному (рух тіла в цілому), обертальному (рух зчленувань), коливальному (рух окремих частин тіла і внутрішніх органів), хвилеподібному (рух хребта). Зчленування демонструють такі типи рухів як згинання, розгинання, роз'єднування, з'єднування (рис. 3.2).

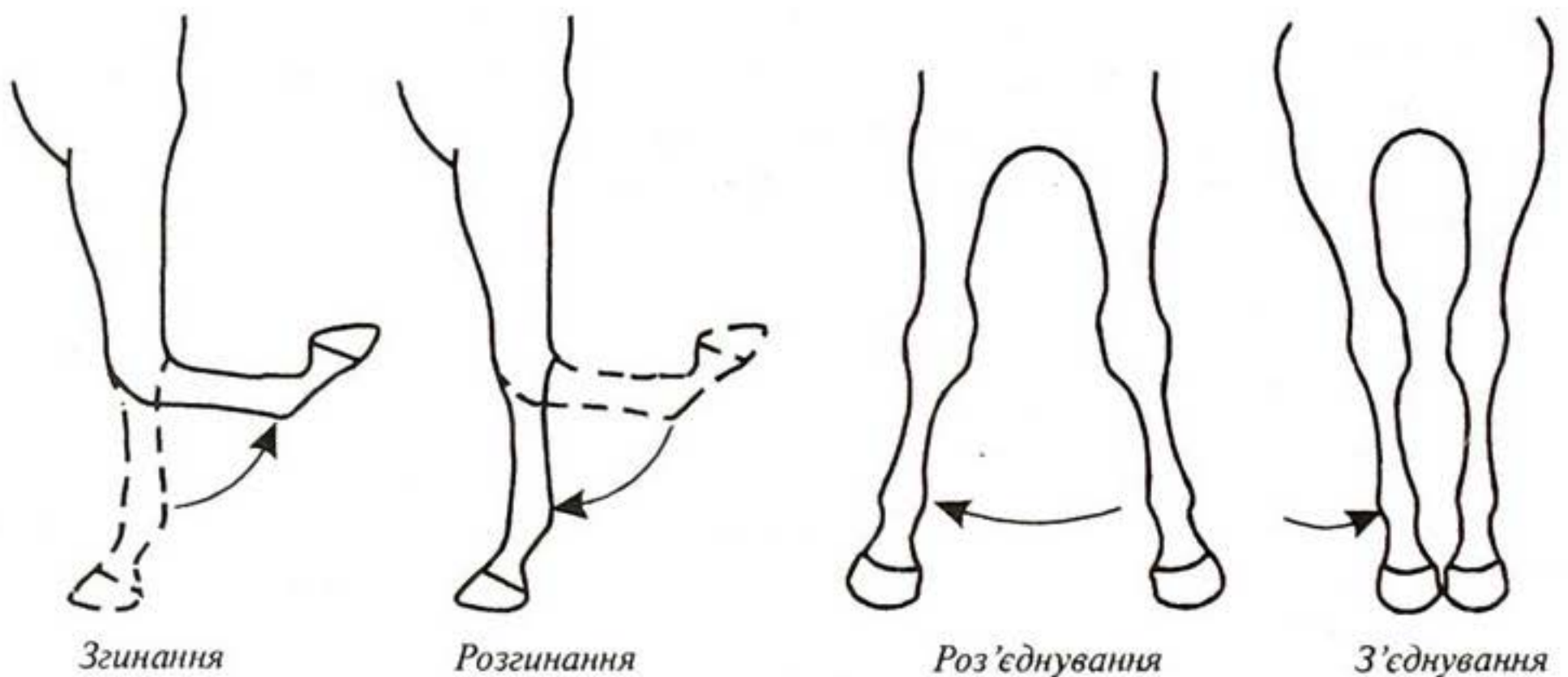


Рис. 3.2. Типи рухів, що демонструють зчленування

### 3.3. ОСНОВИ ФІЗИКИ М'ЯЗОВОГО СКОРОЧЕННЯ

М'язи, маса яких становить від 40 до 50% загальної маси тіла тварини, являють собою тканини, що характеризуються здатністю скорочуватися, тобто змінювати свою довжину і викликати відповідні зміни просторового положення всього тіла і його частин.

У хребетних тварин є три типи м'язових тканин — *скелетні* (або *поперечно-посмуговані*), *серцеві* та *гладенькі*. Скелетні м'язи беруть участь у роботі опорно-рухового апарату; серцеві м'язи (міокард) пов'язані з роботою серця; гладенькі м'язи утворюють стінки внутрішніх органів (кишок, кровоносних судин, стравоходу). Скелетний м'яз складається з центральної тканини, здатної скорочуватися, та двох сухожиль. Одне з них прикріплено до кістки, що рухається, а інше — до опорної кістки. Тканина скелетного м'яза утворюється з *м'язових волокон* — багатоядерних клітин циліндричної форми діаметром  $20\div 80$  мкм і завдовжки від декількох міліметрів до десятків сантиметрів, які оточені оболонкою — *сарколемою*. Кожне м'язове волокно містить від кількох сот до кількох тисяч *міофібрил* діаметром  $1\div 2$  мкм, що складаються з *протофібрил* — товстих (білок *міозин*) і тонких (білок *актин*) ниток. Довжина міозинових ниток —  $1,6$  мкм, актинових —  $1$  мкм; діаметр міозинових ниток —  $16$  нм, актинових —  $8$  нм. Товсті міозинові нитки мають *поперечні містки*. Будова скелетного м'яза наведена на рис. 3.3. Результати електронної мікроскопії свідчать про те, що міофібрили складаються з основних одиниць, які повторюються, — *саркомерів*. Довжина саркомера —  $2\div 3$  мкм; всі саркомери розділені *Z-дисками* (рис. 3.4). Відносна кількість міозину становить  $50\div 55\%$ , а актину —  $20\div 25\%$  загальної кількості білків. Крім того, у процесі скорочення беруть участь такі білки як *тропоміозин* (7%) і *тропонин* (2%). Тропонин містить три субодиниці: найбільшу субодиницю *ТнТ*, що зв'язана з молекулою тропоміозину; середню субодиницю *ТнІ*, що зв'язується з молекулою

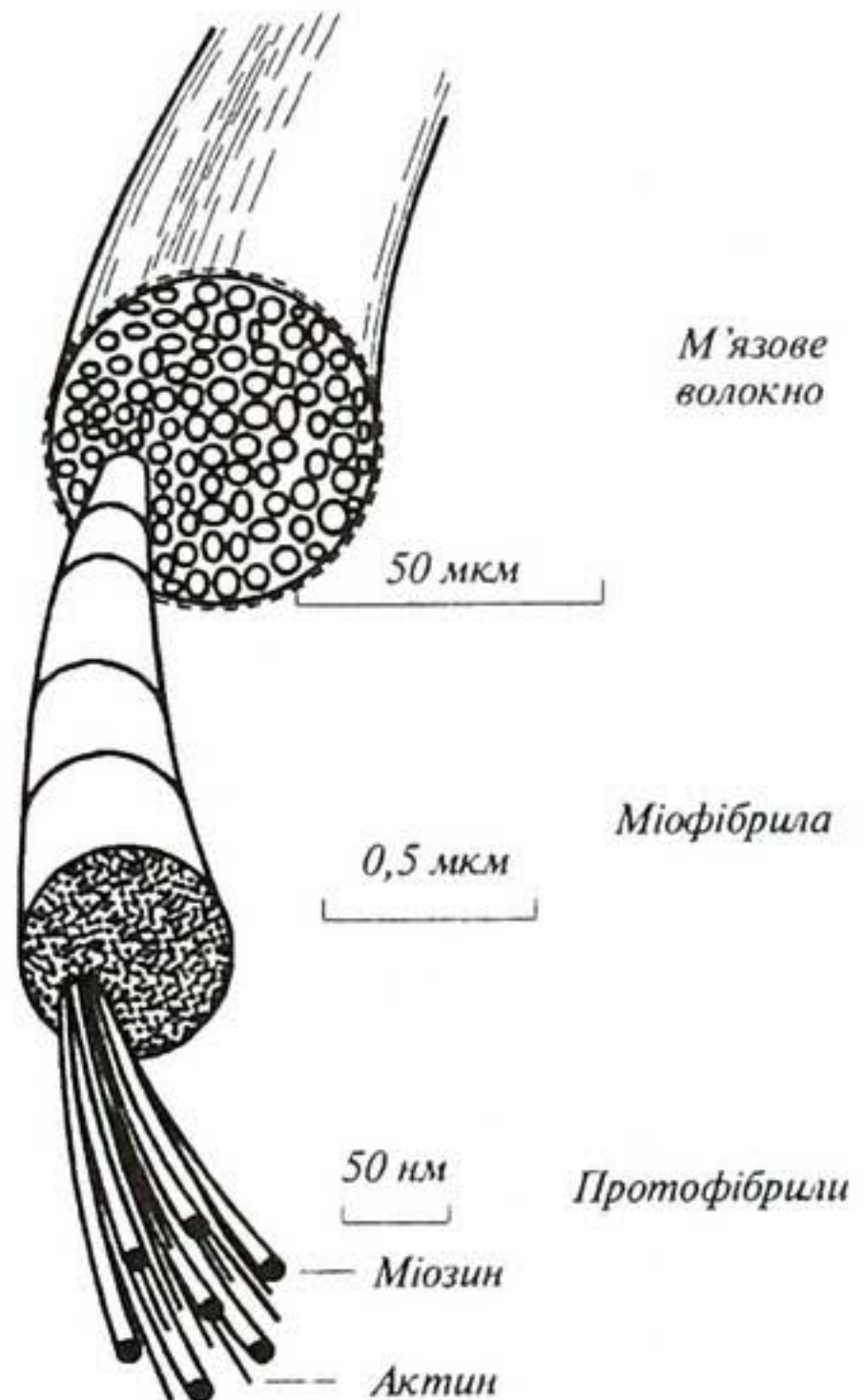


Рис. 3.3. Будова скелетного м'яза



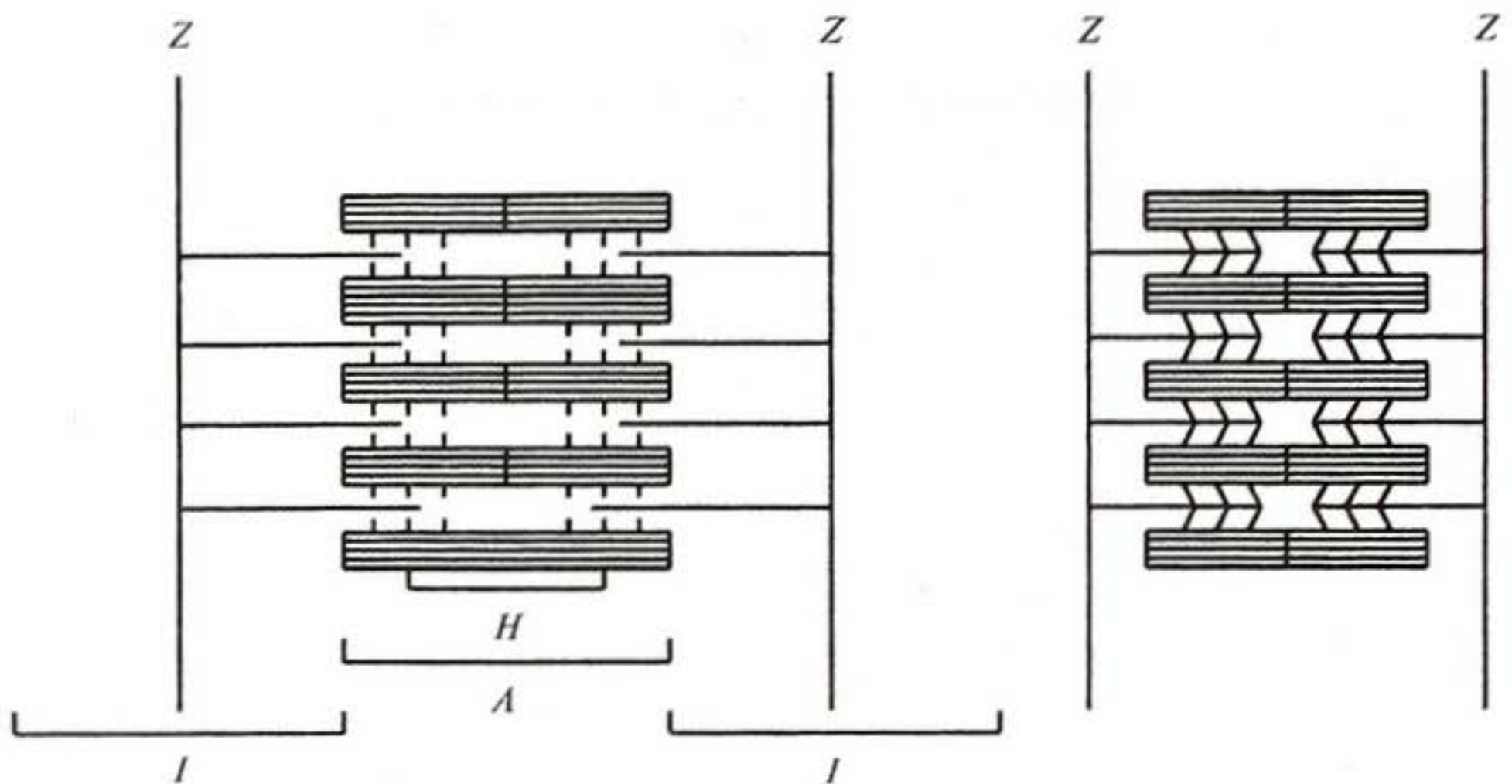


Рис. 3.4. Структура саркомера. Области, що займають: *H* — товсті нитки; *I* — тонкі нитки; *A* — товсті та тонкі нитки разом

актину і може інгібувати актин-міозинову взаємодію; найменшу субодиницю *TnC*, що зв'язується з кальцієм. Зв'язувальні властивості субодиниць тропонину залежать від концентрації іонів кальцію в оточуючому просторі. У стані спокою м'яза основна частина іонів кальцію знаходиться в саркоплазматичному ретикулумі; *TnC* і *TnT* дуже слабо зв'язані між собою. Під впливом потенціалу дії концентрація кальцію перевищує певний рівень ( $10^{-8}$  М), внаслідок чого має місце значне зв'язування субодиниць тропонину. Залежить від концентрації кальцію і ступінь зв'язування комплексу *TnI* - *TnC* з актином: чим вища концентрація кальцію, тим менша взаємодія субодиниць тропонину з молекулою актину.

В стані розслаблення м'яза (при концентрації іонів кальцію  $< 10^{-8}$  М) тропоміозин орієнтується під кутом  $50^\circ$  відносно центру актинової нитки, у результаті чого *TnI* сильно зв'язується з актином, що призводить до такої орієнтації тропоміозину, яка припиняє взаємодію поперечних містків з актиною ниткою (рис. 3.5). При збудженні м'яза і збільшенні концентрації кальцію відбувається зв'язування *TnC* з *TnT* і *TnI*; у той же час взаємодія *TnI* з актином зменшується. Цей процес супроводжується орієнтацією тропоміозину під кутом  $70^\circ$  і укладанням його в борозну актинової спіралі, що ініціює взаємодію поперечних містків з актиною ниткою (рис. 3.6).

Після припинення потенціалу дії активується кальцієва помпа саркоплазматичного ретикулуму; відбувається перекачування іонів кальцію в цистерни цього ретикулуму за рахунок енергії розщеплення АТФ. Тропоміозин виходить з борозни і знову блокує процес прикріплення поперечних містків міозинової нитки до актинової. Отже, скорочення м'язів відбувається завдяки ковзанню тонких ак-

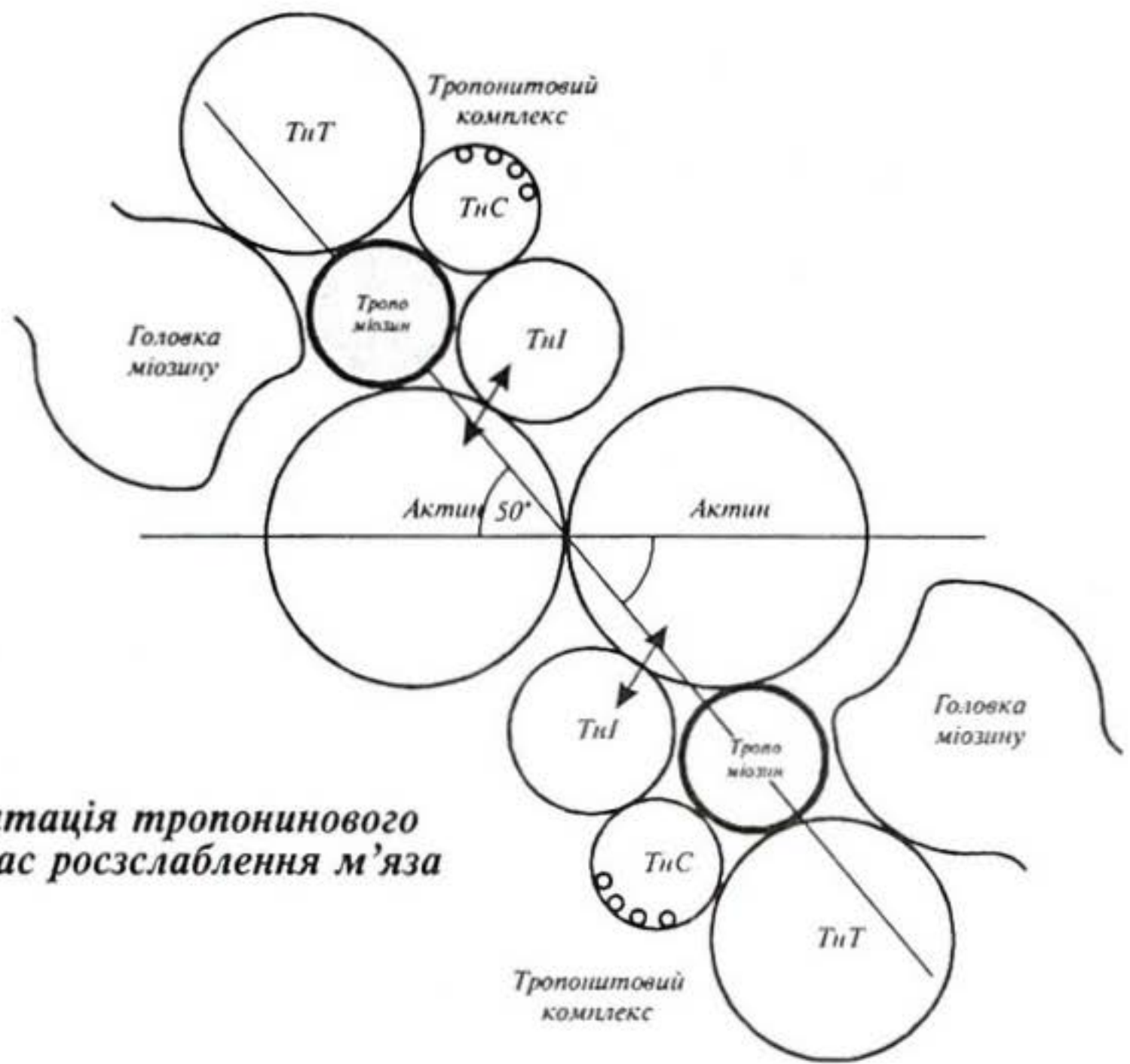


Рис. 3.5. Орієнтація тропонинового комплексу під час розслаблення м'яза

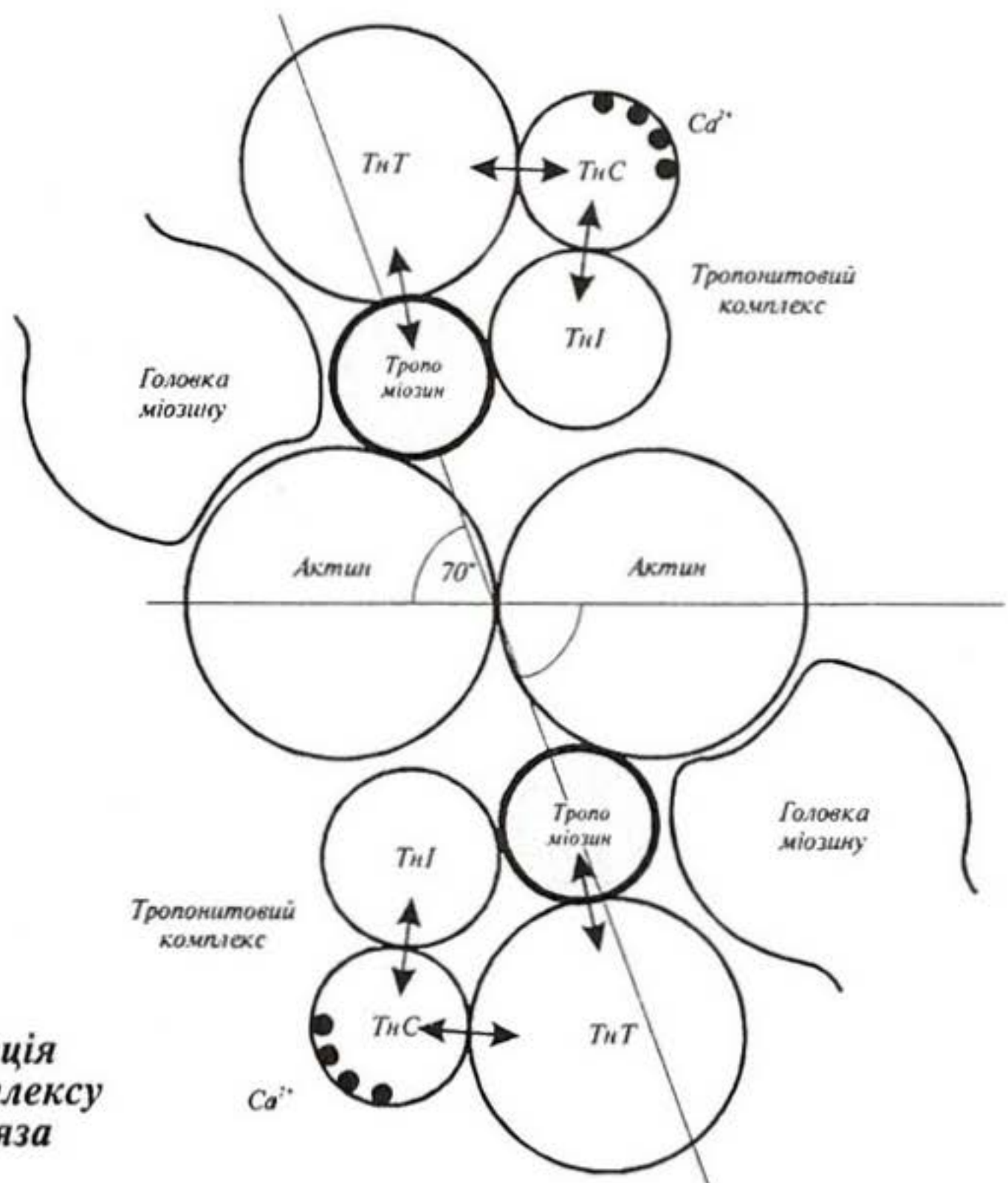


Рис. 3.6. Орієнтація тропонинового комплексу при збудженні м'яза

тинових ниток вздовж товстих міозинових. Актинові нитки, що прикріплені до Z-дисків, тягнуть їх за собою, що викликає скорочення саркомера. Сумарне скорочення всіх саркомерів і міофібрил забезпечує загальне скорочення м'яза.

Розглянемо експериментальну техніку дослідження м'язового скорочення. На користь теорії сковзання протофібрил свідчать результати дослідження залежності в'язкості суспензії актоміозину (суміші білків актину і міозину) від ступеня його зв'язування з АТФ. Додавання АТФ

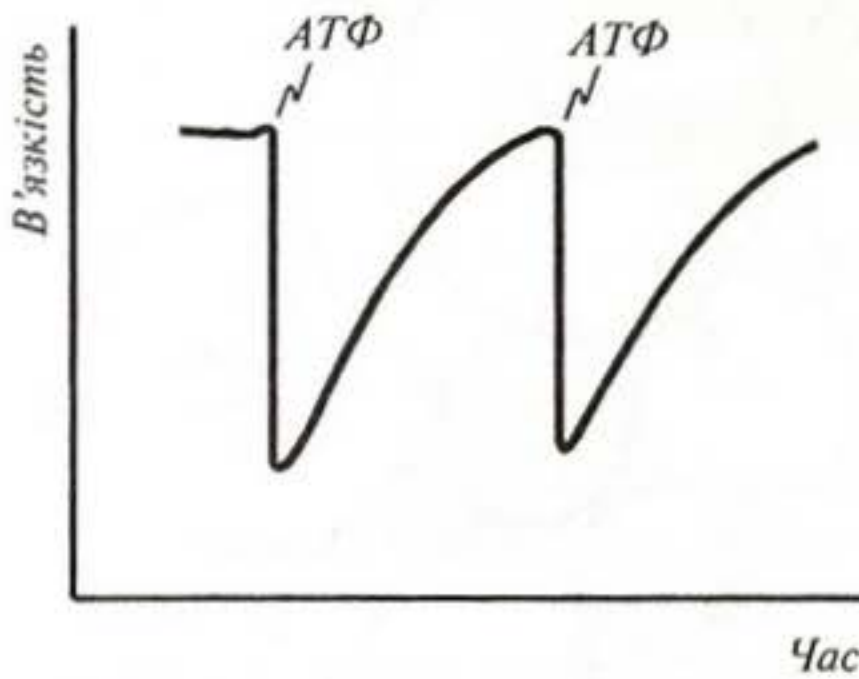


Рис. 3.7. Залежність в'язкості суспензії актоміозину від ступеня його зв'язування з АТФ

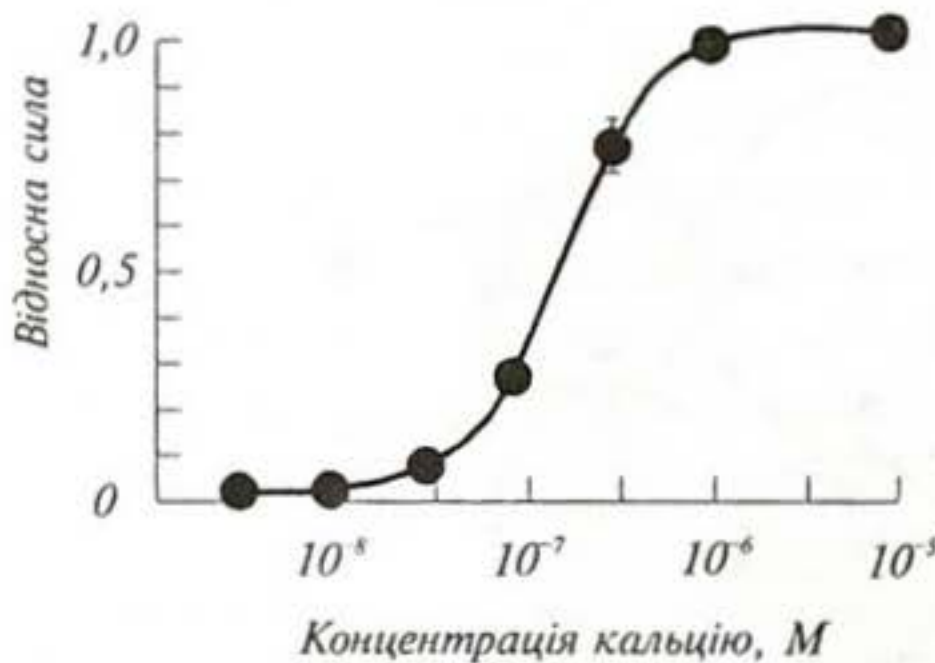


Рис. 3.8. Залежність сили м'язового скорочення від концентрації вільного кальцію в саркоплазмі

до суспензії призводить до різкого зменшення в'язкості (рис. 3.7), що можна пояснити дисоціацією актоміозину на актин і міозин-АТФ комплекс. Під час гідролізу АТФ (у присутності іонів  $Mg^{2+}$ ) відбувається відновлення первинної величини в'язкості суспензії. Встановлено залежність відновлення первинної величини в'язкості суспензії від концентрації вільного  $Ca^{2+}$ .

Експериментально встановлено зв'язок між концентрацією вільного  $Ca^{2+}$  в саркоплазмі і силою м'язового скорочення (рис. 3.8): сила зростає від 0 ( $C=10^{-8}M$ ) до максимуму ( $C=5 \cdot 10^{-6}M$ ).

Ще один експеримент передбачає використання чутливого до  $Ca^{2+}$  білка екворину (рис. 3.9). Коли молекула цього білка приєднує три іони кальцію, вона випромінює квант світла. Екворин вводили в незбуджений м'яз і за допомогою фотоелектронного по-

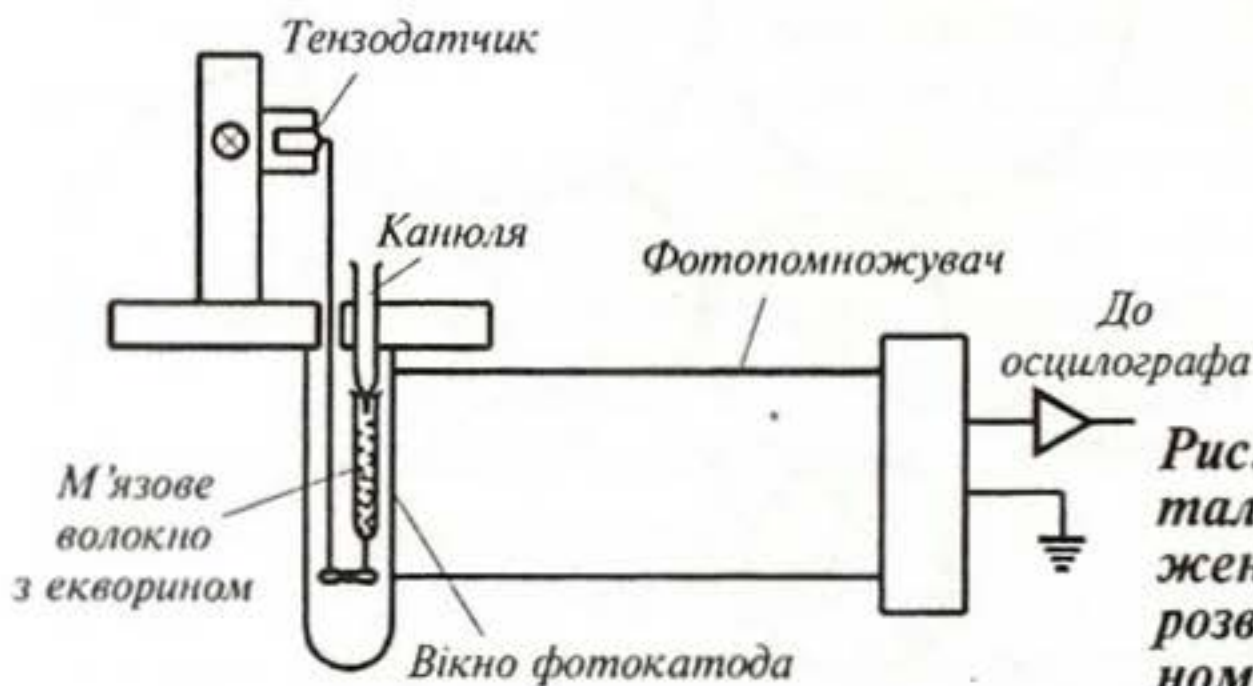


Рис. 3.9. Схема експериментального пристрою для дослідження сили, що розвивається м'язовим волокном, від концентрації вільного кальцію (пояснення в тексті)

множувача спостерігали залежність випромінювання світла від концентрації кальцію в процесі його вивільнення з саркоплазматичного ретикулуму. Сила, що розвивається м'язовим волокном, залежить лінійно від концентрації вільного  $Ca^{2+}$ .

Залежність сили скорочення від положення поперечних містків у живому м'язі досліджували за допомогою рентгеноструктурного аналізу (рис. 3.10), в основі якого лежить дифракція рентгенівського випромінювання на квазікристалічній структурі м'язових ниток. Коли поперечні містки виступають із міозинової нитки і приєднуються до актинової нитки, інтенсивність рентгенівського випромінювання зменшується завдяки його дифракції на періодичній структурі, що утворюється поперечними мітками. Коливання інтенсивності випромінювання корелюють з коливаннями напруження м'яза (рис. 3.11).

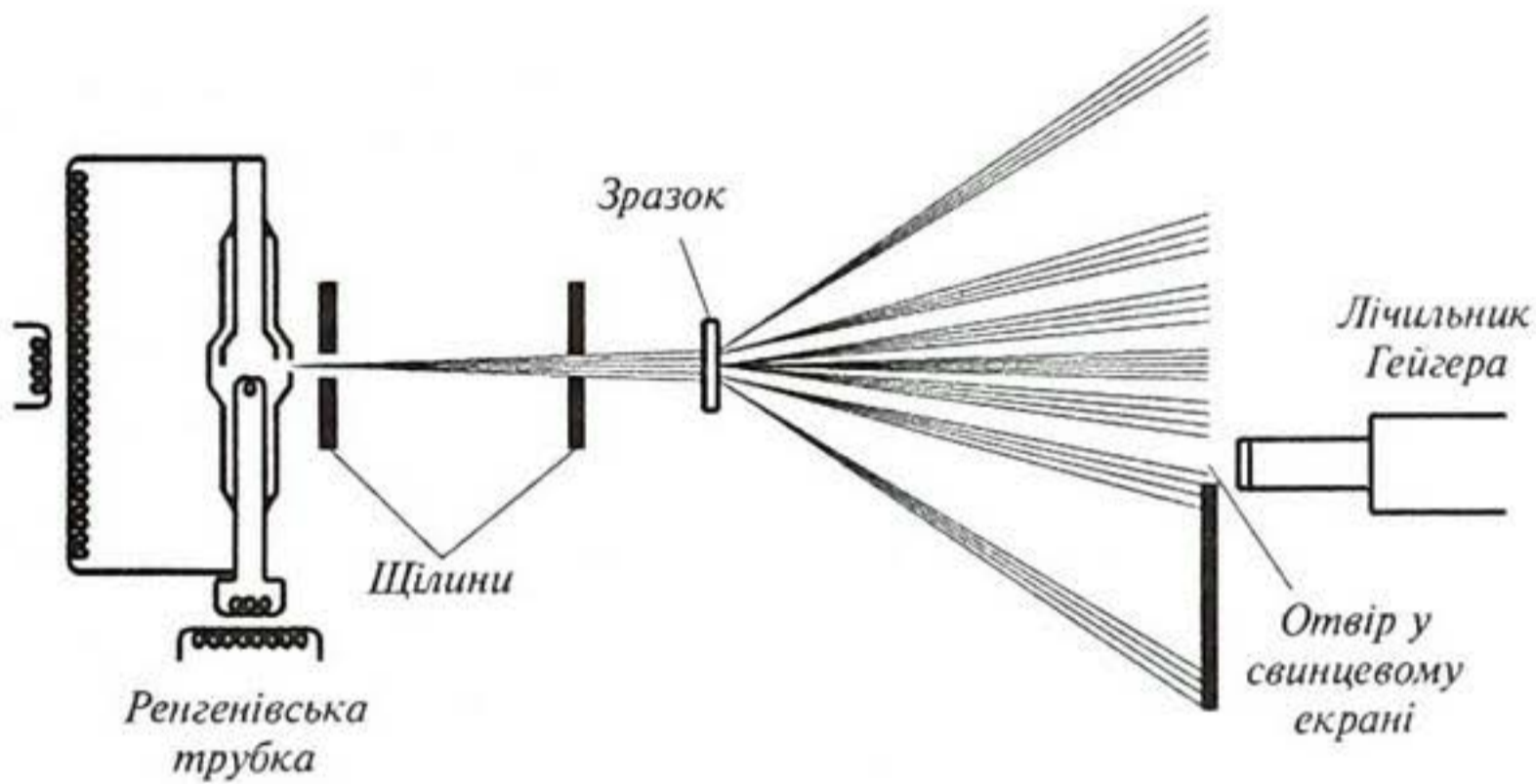


Рис. 3.10. Рентгеноструктурний аналіз залежності сили скорочення від положення поперечних містків у живому м'язі (пояснення в тексті)



Рис. 3.11. Кореляція коливань інтенсивності рентгенівського випромінювання зі зміною напруження м'яза

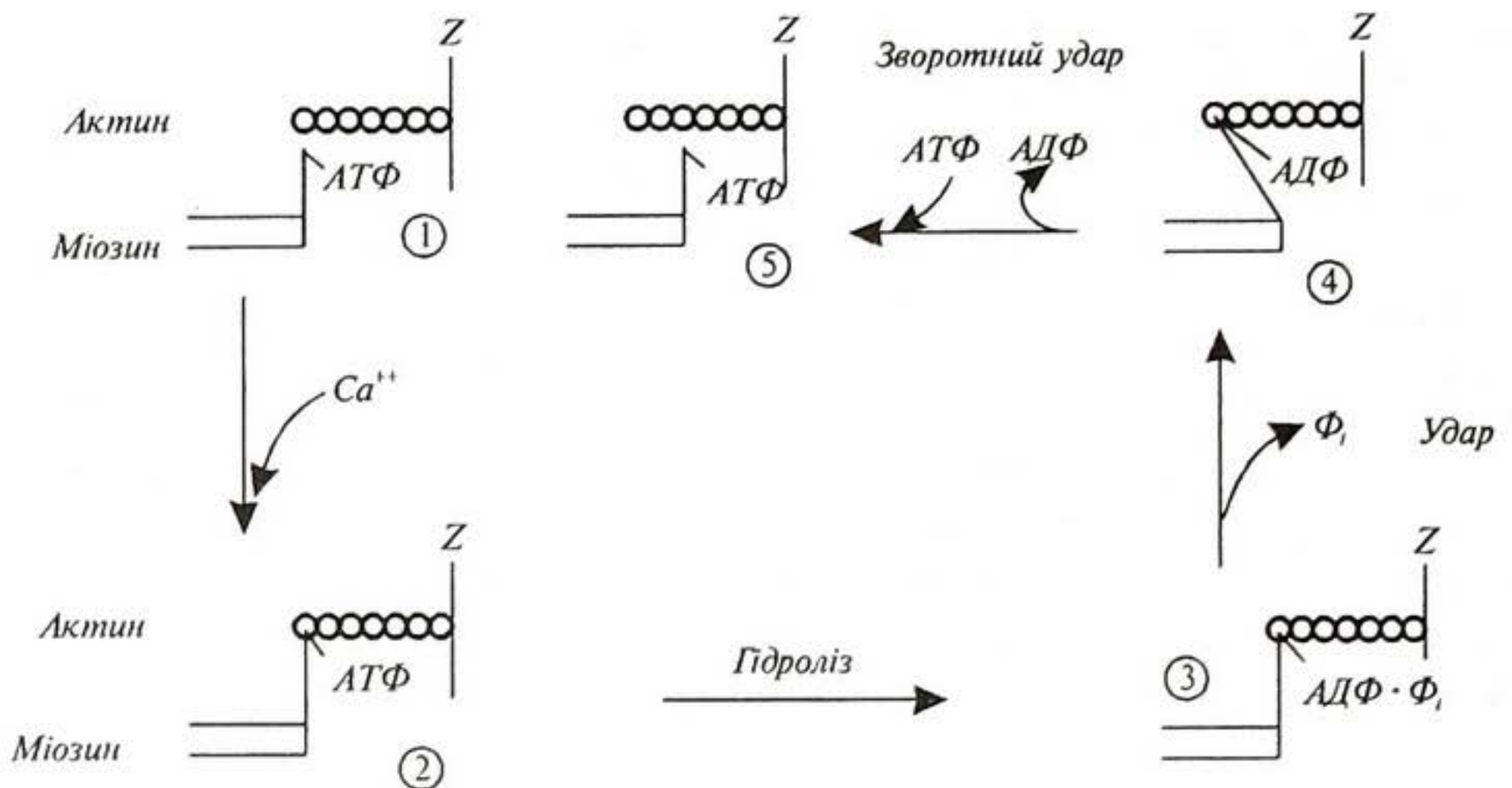


Рис. 3.12. Основні етапи процесу взаємодії товстих і тонких ниток під час м'язового скорочення

Таким чином, теоретичні і експериментальні дослідження дають змогу припустити, що процес взаємодії товстих і тонких ниток під час скорочення складається з таких етапів (рис. 3.12): 1. зв'язування АТФ з міозиновими містками; 2. активація і зв'язування активованого міозин-АТФ комплексу з актином в тонких нитках у присутності іонів  $Ca^{2+}$ ; 3. гідроліз АТФ; 4. вивільнення фосфату і зміна орієнтації поперечних містків; 5. вивільнення АДФ і зв'язування АТФ з міозиновими містками.

## 3.4. НЕМ'ЯЗОВІ ФОРМИ РУХЛИВОСТІ

### 3.4.1. Амебоїдний рух

Крім м'язового скорочення, живі організми мають ще такі основні механізми утворення руху як амебоїдний рух та биття війок і джгутиків.

Амебоїдний рух супроводжується зміною форми клітини завдяки спрямовуванню уперед вакуолізованої серцевини цитоплазми (ендоплазми) в одну або кілька псевдоподій — паростків, які витягуються, втягуються та змінюють форму (рис. 3.13). У результаті перетікання в псевдоподії ендодплазми відбувається їх випинання. Течія ендодплазми обмежена периферійною оболонкою.

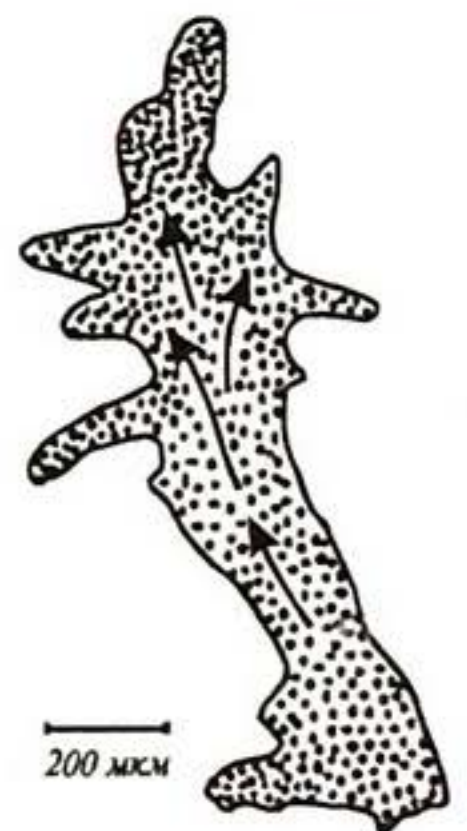


Рис. 3.13. Зображення амеби *Chaos carolinensis*

Пересування (локомоція) амебоподібних організмів можливе при наявності контакту з будь-яким субстратом. Вільно повзаючі амеби рухаються зі швидкістю  $0,5\div 4,5$  мкм  $\cdot$  с<sup>-1</sup>.

### 3.4.2. Війки та джгутики

Органели з характерною внутрішньою структурою, розташовані на поверхні клітини, забезпечують переміщення рідини вздовж поверхні за рахунок коливальних рухів; короткі органели називають *війками*, а відносно довгі — *джгутиками*. Війками, наприклад, наділені інфузорії; джгутиками — водорості, деякі з найпростіших, сперматозоїди.

Війки демонструють активність лише у водному середовищі; вони дають можливість організму змінювати напрямок і швидкість рухів під впливом зовнішнього подразника. Довжина війок становить  $10\div 20$  мкм, а діаметр —  $0,20\div 0,25$  мкм. Частота биття війок знаходиться в межах  $10\div 40$  ударів за секунду. Типовим для війок є рух у вигляді *хвильових вигинів* (рис. 3.14), що складаються з прямого гребного удару та зворотного відновного руху. Джгутики мають більші, ніж війки, розміри і досягають довжини від 20 мкм до кількох міліметрів; діаметр джгутика дорівнює  $0,20\div 0,25$  мкм.

Структура війок і джгутиків характеризується наявністю дев'яти пар мікротрубочок, розташованих навколо однієї центральної пари (рис. 3.15). Мікротрубочки мають діаметр близько 22 нм; стінки кожної мікротрубочки будуються з глобулярного білка тубуліну.

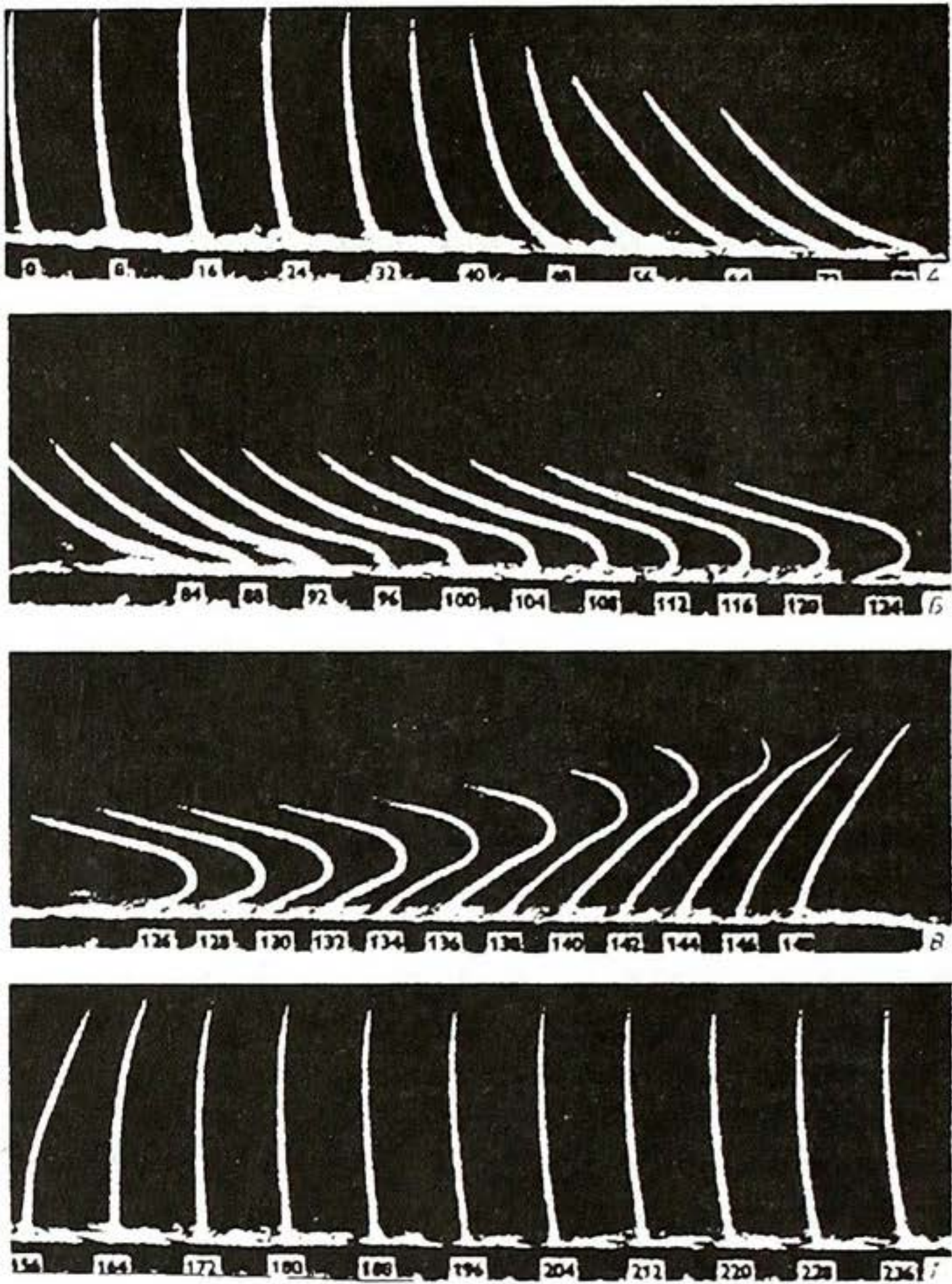
Згідно з сучасними уявленнями, механізм війчастого і джгутикового руху пов'язаний з *ковзанням* периферійних пар мікротрубочок одна відносно одної та відносно центральної пари, завдяки чому відбувається вигин війки або джгутика.

Робота, що виконується під час руху війки або джгутика, спрямована в основному на подолання сил внутрішнього тертя середовища і пружного опору органели вигину. Робота прямого удару органели становить  $4 \cdot 10^{-16}$  Дж, а зворотного —  $10^{-16}$  Дж; потужність одного удару дорівнює  $(1\div 4) \cdot 10^{-14}$  Вт.

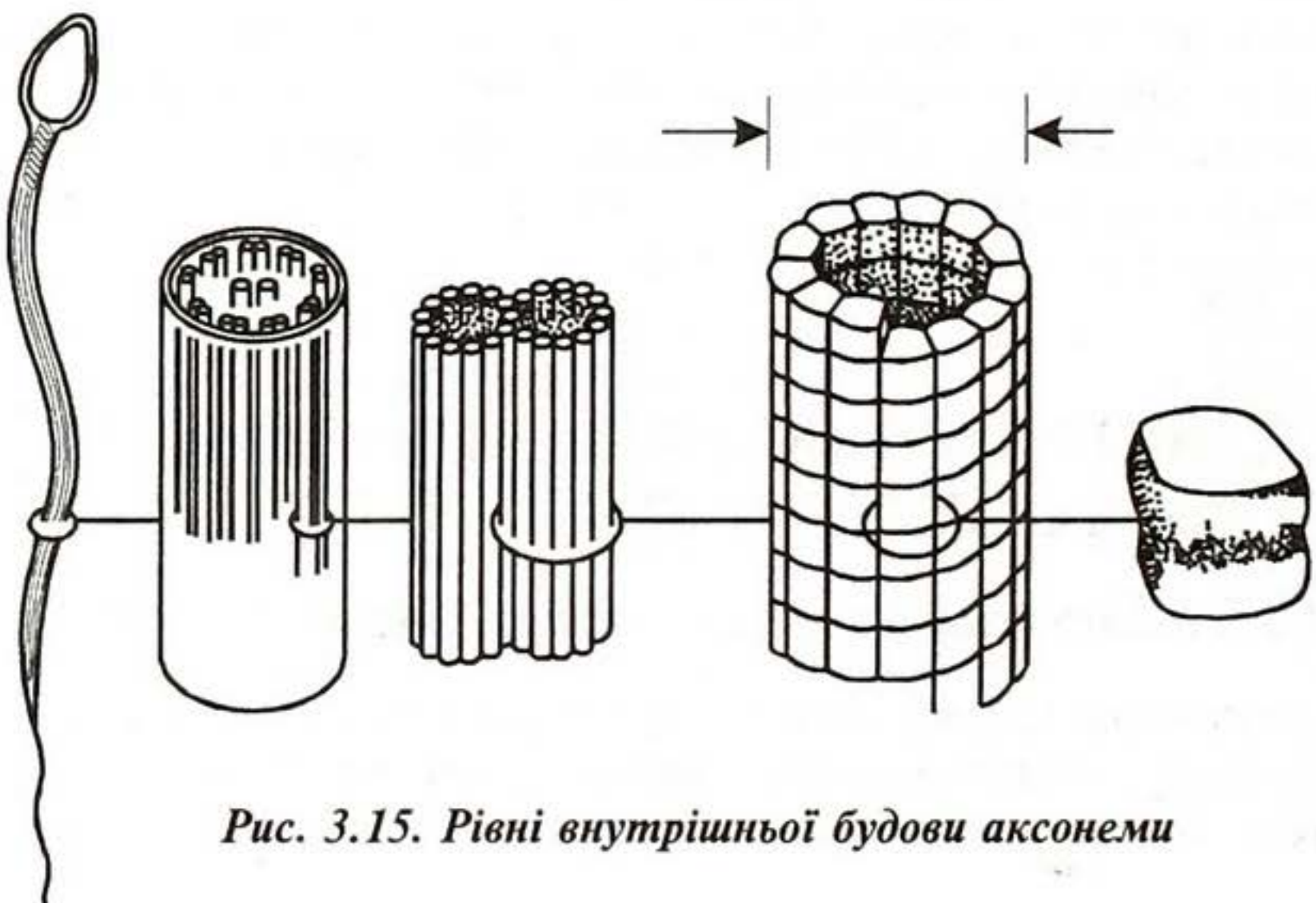
## 3.5. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ РУХОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВАРИН

### 3.5.1. Кінематичні характеристики тварин

До основних кінематичних характеристик тварини належать довжина кроку, частота кроків, тривалість контакту кожної кінцівки з ґрунтом. Всі ці параметри вимірюються за допомогою високо-



*Рис. 3.14. Рух війок у вигляді хвильових вигинів*



*Рис. 3.15. Рівні внутрішньої будови аксонем*

### 3.1. Кінематичні характеристики коня

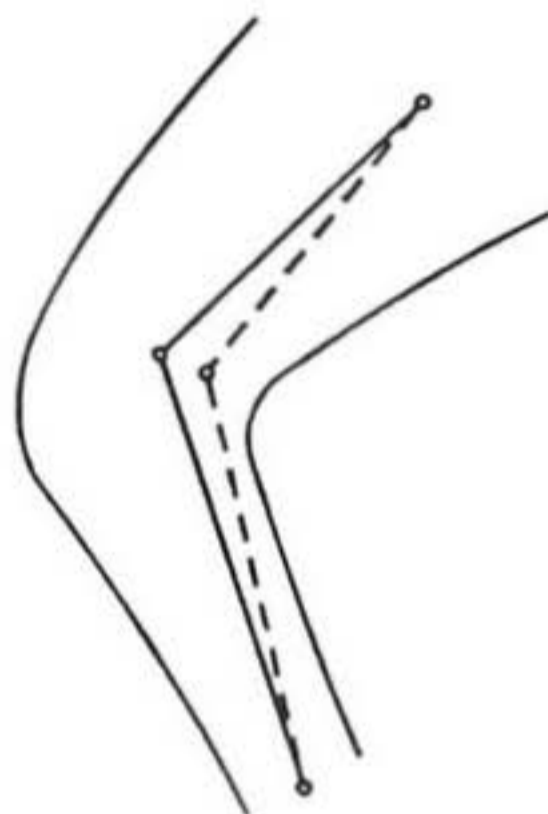
Тип руху	Швидкість руху, км·г <sup>-1</sup>	Довжина кроку, м
Хода	6+7 (верхові породи) 4+5 (возові породи)	1,4+1,8
Рись	11+18	2,5+3,5
Галоп	30+40	1,5+2,0

швидкісної кінематографії або акселерометрії. Прикладом результатів вимірювань кінематичних характеристик є швидкість руху і довжина кроку коня (табл.3.1).

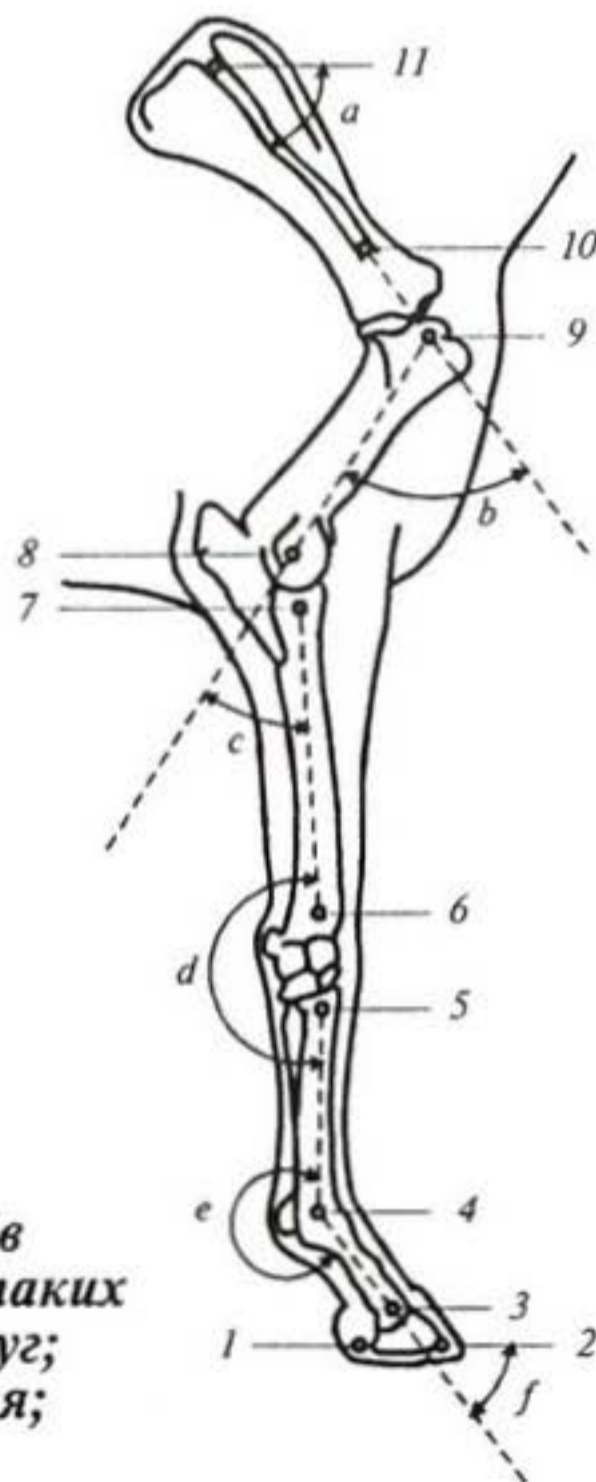
У ветеринарній медицині дедалі частіше використовують такий параметр, як кут між окремими сегментами зчленування. Вимірювання кінематичних характеристик проводять у дво- або тривимірному просторі за допомогою камер, розташованих збоку, позаду або спереду тварини. Методика вимірювань передбачає використання маркерів, що закріплюються в центрі обертання суглоба і на окремих сегментах (рис. 3.16). Розмір кожного маркера становить 2,5 см. Розвитком цієї техніки можна вважати застосування фотодіодів як маркерів, на які діють три світлових промені, що скануються в тривимірному просторі. Розміщення 11 фотодіодів на передній кінцівці коня (рис. 3.17) дало можливість визначити залежність кута між сегментами від часу для таких суглобів як вертлуг, плече, лікоть, кістка зап'ястя, щітка, суглоб копита.

Кінематографічна техніка дає змогу реєструвати послідовність і тривалість фаз руху, які визначаються опорою, відштовхуванням, підняттям і переносом кінцівок твариною. Типові циклограми руху коня наведено на рис. 3.18,а-с.

*Рис. 3.17. Схематичне зображення маркерів (номери 1-11) та кутів між сегментами таких суглобів передньої кінцівки коня: а — вертлуг; b — плече; c — лікоть; d — кістка зап'ястя; e — щітка; f — суглоб копита*



*Рис. 3.16. Закріплення маркера в центрі обертання суглоба*





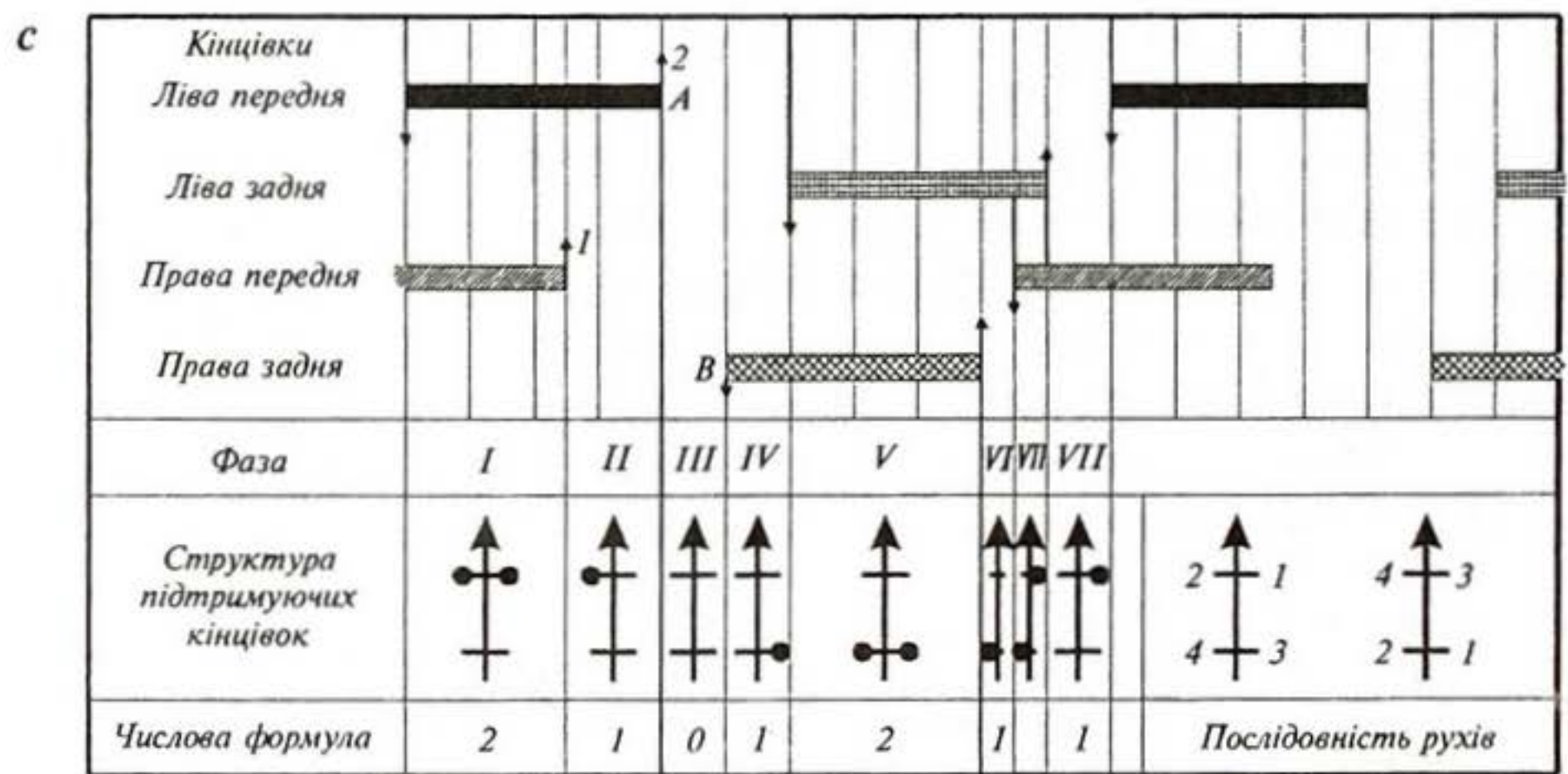
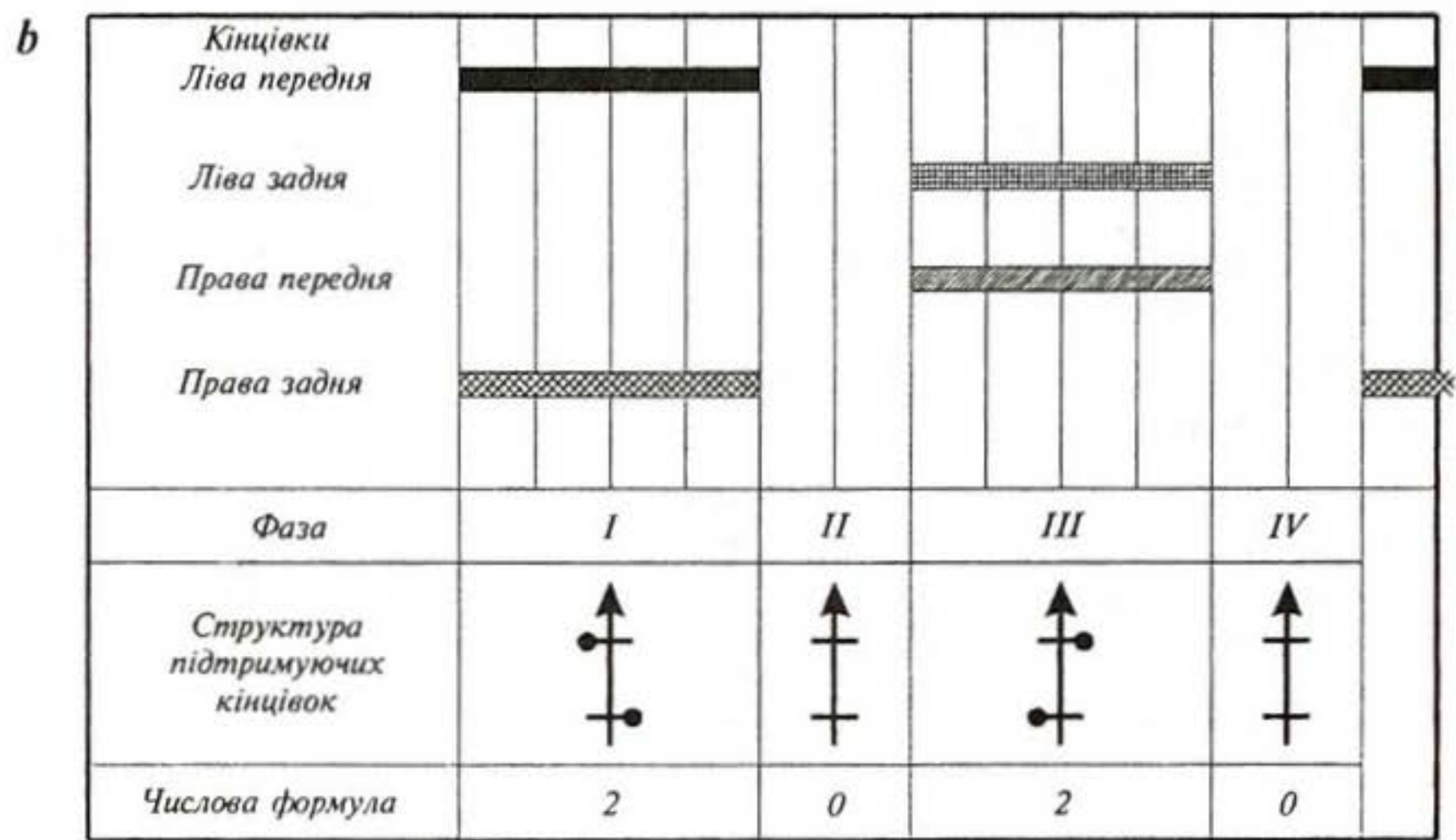
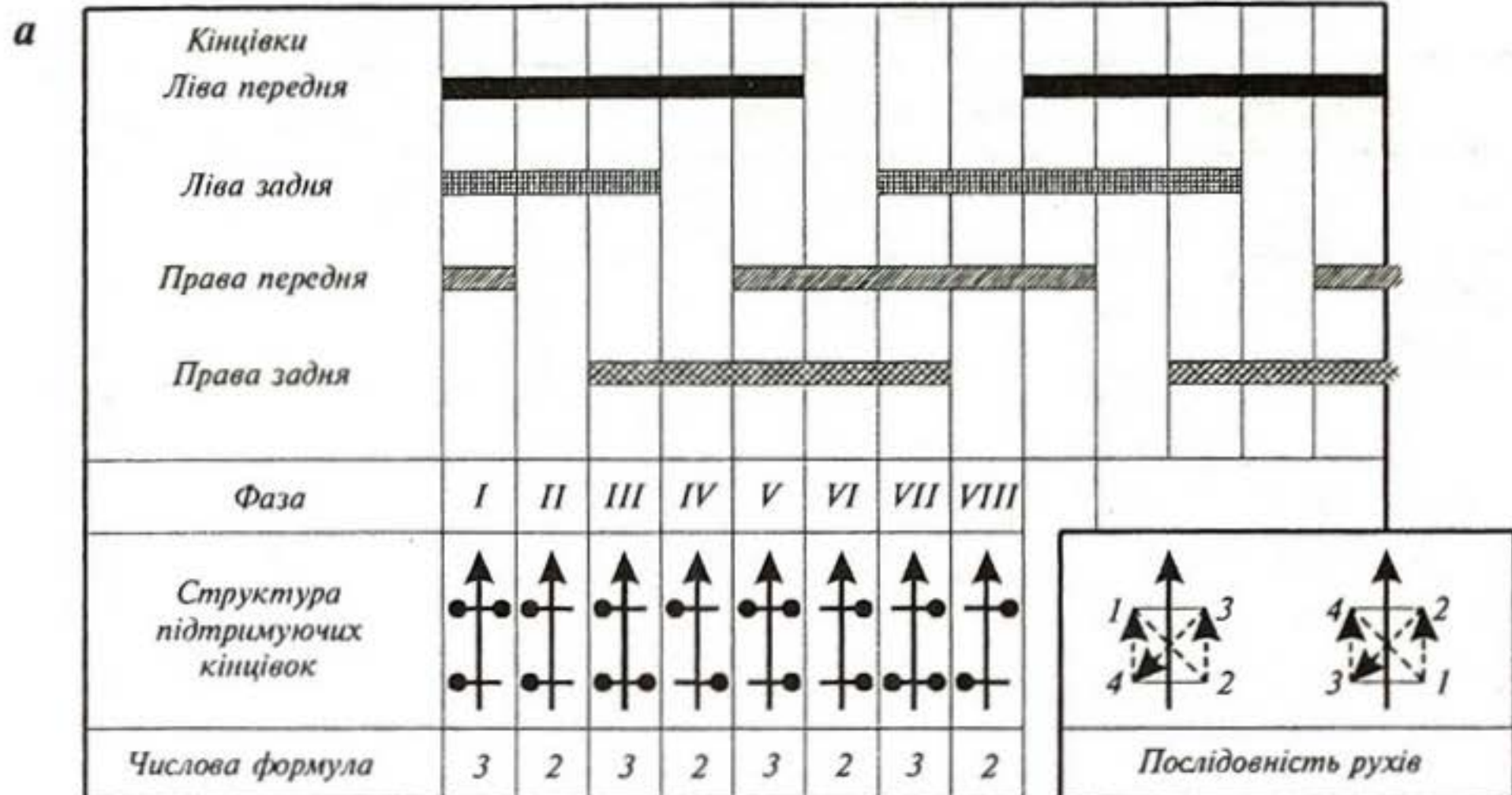


Рис. 3.18. Типові циклограми руху коня: а — нормальна хода; б — цілком синхронізована рись; с — поперечний галоп

### 3.5.2. Динамічні характеристики тварин

Під час руху тварини виникають внутрішні сили, що розвиваються м'язами в тілі тварини і перетворюються в обертання сегментів суглобів і поступальний рух тварини в цілому, а також зовнішні сили, такі як реакція опору ґрунту. Один з методів оцінки зовнішніх сил передбачає використання силових пластин, що являють собою плоскі пластини розміром 60×90 см, з'єднані з 3-4 п'єзоелектричними перетворювачами або датчиками напруги. Ці пластини встановлюють на шляху руху тварини, яка досліджується.

Ще один метод вимірювання базується на використанні силових черевиків, обладнаних датчиками. Як приклад, можна навести результати дослідження залежності реакції опору ґрунту під час ходи коня (рис. 3.19).

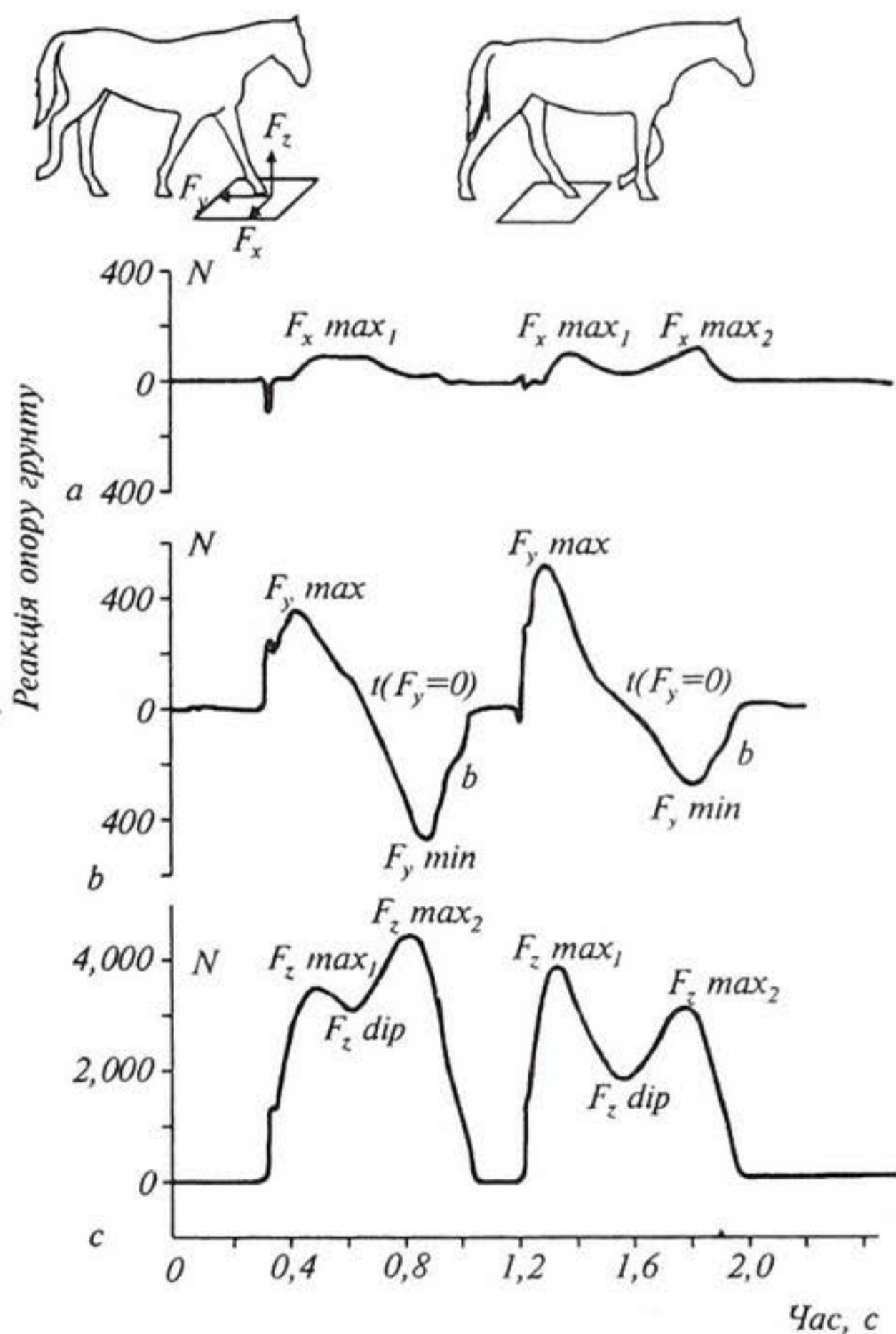


Рис. 3.19. Результати вимірювання реакції опору ґрунту під час ходи коня за допомогою силових черевиків: а, б — горизонтальні сили; с — вертикальні сили

Важливою динамічною характеристикою тварини є розтяг, що відбувається на поверхні кісток тварини під час їх згинання або кручення. Цей параметр оцінюють за допомогою датчиків, що дають змогу вимірювати силу або напругу, які викликають розтяг. Неоднорідність і нелінійність пружних властивостей кістки потребують попереднього калібрування датчиків.

Розтяг сухожиль, який відбувається при навантаженні, можна вимірювати, наприклад, за допомогою датчиків, що працюють на основі ефекту Холла (див. розділ 26.1).

### 3.5.3. Оцінка рухливості джгутикових

**Фотометричний метод.** В основі методу, призначеного для контролю якості сперми, лежить властивість спермій повертатися у процесі поступального руху. Освітлюючи рухомі спермії боковим світлом, можна реєструвати відблиски, пов'язані з обертальною (а, отже, із поступальною) швидкістю. Фіксування кількості спермій, що проходять через певний перетин, дає можливість визначити їх концентрацію. Схему фотометричного аналізатора наведено на рис. 3.20.

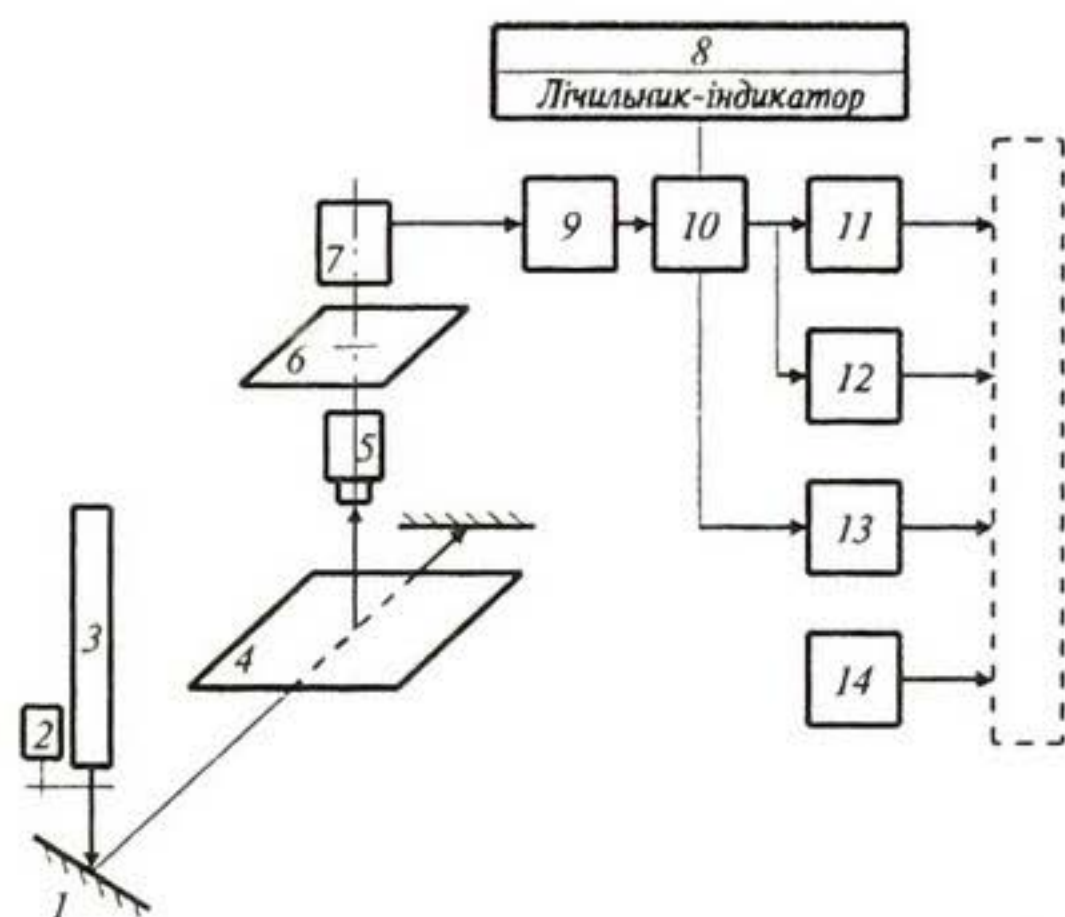
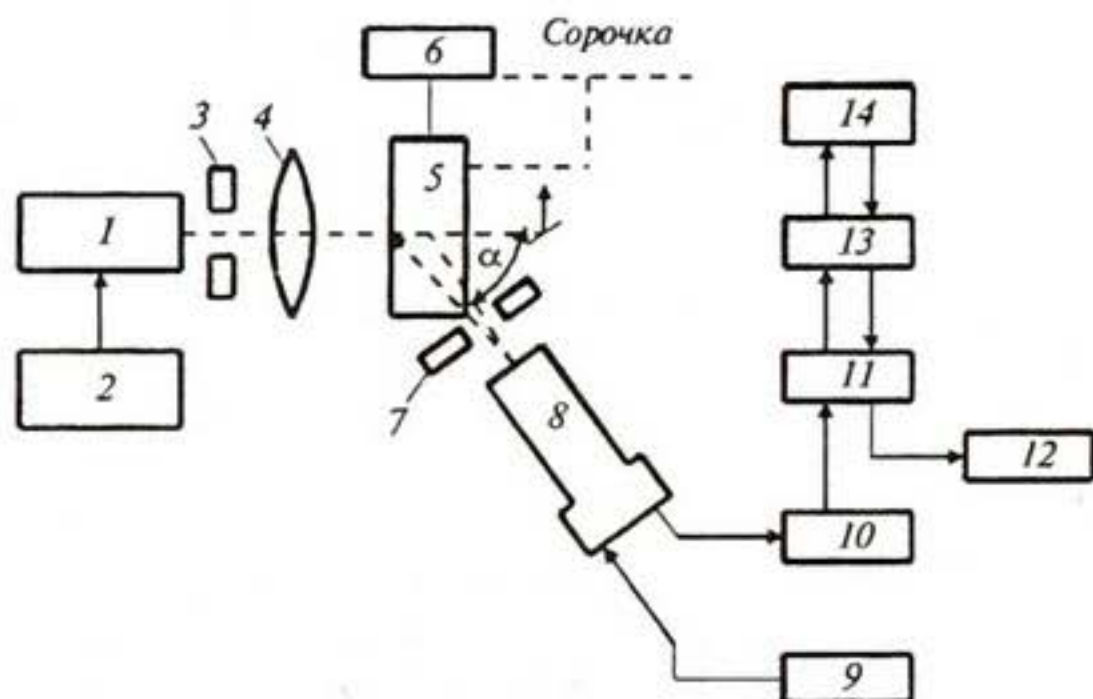


Рис. 3.20. Схема лазерного фотометричного аналізатора для контролю якості сперми: 1 — відбивач; 2 — модулятор; 3 — лазер; 4 — кювета; 5 — оптичний прилад; 6 — діафрагма; 7 — фотоприймач; 8 — блок розподілу швидкості; 9 — підсилювач; 10—14 — блоки обробки даних

Рис. 3.21. Схема автоматизованого доплерівського спектрометра: 1 — лазер; 2 — блок живлення; 3 — діафрагма; 4 — фокусуюча система; 5 — камера з об'єктом; 6 — дозатор; 7 — діафрагма; 8 — фотоприймач; 9 — підсилювач; 11 — цифровий корелятор; 12 — таймер; 13 — комп'ютер; 14 — принтер



*Допплерівська спектрометрія.* Метод ґрунтується на реєстрації зміни довжини хвилі (частоти) розсіяного на рухливих сперміях лазерного випромінювання. Ці зміни частоти (доплерівські зсуви) залежать від поступального і обертального руху сперміїв, а також від частоти биття джгутиків. Схему автоматизованого доплерівського спектрометра наведено на рис. 3.21.

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Відношення маси мозку у ссавців до маси тіла описується алометричним рівнянням:

$$M_{\text{мозку}} = 0,01 \cdot M_m^{0,70}.$$

Визначити масу мозку тварини з масою тіла 2 кг.

### Розв'язок

Логарифмуємо останній вираз і підставляємо числові дані:

$$\lg M_{\text{мозку}} = \lg 0,01 + 0,70 \lg 2 = -2 + 0,70 \cdot 0,301 = -1,7893.$$

Звідки  $M_{\text{мозку}} = 0,016$  кг.

*Відповідь:*  $M_{\text{мозку}} = 0,016$  кг.

### Контрольне завдання № 3.1

Маса кістяка  $M_k$  риб пов'язана з масою тіла  $M_m$  таким алометричним рівнянням (маса виражена у грамах):

$$M_k = 0,033 M_m^{1,03}.$$

Знайти масу кістяка щуки, якщо маса її тіла становить 120 г.

*Відповідь:*  $M_k = 4,57$  г.

### Приклад

Визначити, у скільки разів відрізняється інтенсивність метаболізму в яйці курки порівняно з яйцем нанду (південноамериканського страусоподібного птаха), якщо вважати, що швидкість проходження газів прямо пропорційна загальній площині пор в яйці і обернено пропорційна довжині цих пор. Алометричні співвідношення мають вигляд:

$$L_{\text{пор}} = 5,126 \cdot 10^{-2} M_{\text{я}}^{0,456};$$

$$S_{\text{пор}} = 9,2 \cdot 10^{-3} M_{\text{я}}^{1,236}.$$

Маса яйця курки становить 60 г, маса яйця нанду — 600 г.

### Розв'язок

Прологарифмуємо алометричні рівняння:

$$\lg L_{\text{пор}} = \lg(5,126 \cdot 10^{-2}) + 0,456 \cdot \lg M_{\text{я}};$$

$$\lg S_{\text{пор}} = \lg(9,2 \cdot 10^{-3}) + 1,236 \cdot \lg M_{\text{я}}$$

Підставляємо числові значення для курячого яйця:

$$\begin{aligned} \lg L_{\text{пор}} &= \lg(5,126 \cdot 10^{-2}) + 0,456 \cdot \lg 60 = \lg 5,126 - 2 \cdot \lg 10 + 0,456 \cdot \lg 60 = \\ &= 0,7098 - 2 + 0,456 \cdot 1,7781 = 0,7098 - 2 + 0,8108 = -0,4794. \end{aligned}$$

$$L_{\text{пор}} = 0,3316 \text{ мм.}$$

$$\begin{aligned} \lg S_{\text{пор}} &= \lg(9,2 \cdot 10^{-3}) + 1,236 \cdot \lg 60 = \lg 9,2 - 3 \cdot \lg 10 + 1,236 \cdot \lg 60 = \\ &= 0,9638 - 3 + 1,236 \cdot 1,7781 = 0,9638 - 3 + 2,1977 = 0,1615. \end{aligned}$$

$$S_{\text{пор}} = 1,4504 \text{ мм}^2.$$

Для яйця нанду:

$$\begin{aligned} \lg L_{\text{пор}} &= \lg(5,126 \cdot 10^{-2}) + 0,456 \cdot \lg 600 = \lg 5,126 - 2 \cdot \lg 10 + 0,456 \cdot \lg 600 = \\ &= 0,7098 - 2 + 0,456 \cdot 2,7781 = 0,7098 - 2 + 1,2699 = -0,0234. \end{aligned}$$

$$L_{\text{пор}} = 0,9475 \text{ мм.}$$

$$\begin{aligned} \lg S_{\text{пор}} &= \lg(9,2 \cdot 10^{-3}) + 1,236 \cdot \lg 600 = \lg 9,2 - 3 \cdot \lg 10 + 1,236 \cdot \lg 600 = \\ &= 0,9638 - 3 + 1,236 \cdot 2,7781 = 0,9638 - 3 + 3,4337 = 1,3972. \end{aligned}$$

$$S_{\text{пор}} = 24,9557 \text{ мм}^2.$$

Визначаємо відношення  $(L_{\text{пор}})_{\text{н}} / (L_{\text{пор}})_{\text{к}}$  і  $(S_{\text{пор}})_{\text{н}} / (S_{\text{пор}})_{\text{к}}$ :

$$(L_{\text{пор}})_{\text{н}} / (L_{\text{пор}})_{\text{к}} = 0,9475 / 0,3316 = 2,86;$$

$$(S_{\text{пор}})_{\text{н}} / (S_{\text{пор}})_{\text{к}} = 24,9557 / 1,4504 = 17,21.$$

### Контрольне завдання № 3.2

Рівняння проникності водяної пари крізь шкаралупу має такий вигляд:

$$G(H_2O) = 0,432 \cdot M_{\text{я}}^{0,780}.$$

Використовуючи дані попередньої задачі, визначити відношення  $G(H_2O)_{\text{н}} / G(H_2O)_{\text{к}}$ . Проаналізувати, як впливає на інтенсивність випаровування збільшення маси яйця.

Відповідь:  $\sim 6$ .

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає принцип ізометрії і алометрії?
2. Як впливає коефіцієнт  $b$  на характер кривої, що описується алометричним рівнянням?
3. З яких елементів складається опорно-руховий апарат тварини?
4. Назвати основні типи м'язових тканин.
5. З чого складається скелетний м'яз?
6. Пояснити механізми м'язового скорочення.
7. Які експериментальні методи використовують при дослідженні м'язового скорочення?
8. Назвати нем'язові форми рухливості.
9. Які методи використовують для вимірювання кінематичних та динамічних характеристик тварин?
10. Пояснити принципи контролю якості сперми самців.

## 4. МЕХАНОБІОЛОГІЯ



*Механобіологія* — розділ біофізики, що вивчає механізми впливу зовнішніх механічних факторів на живі організми та реакцію організмів на ці фактори (механорецепцію).

### 4.1. МЕХАНОРЕЦЕПЦІЯ У ТВАРИН

Складно побудована система, що перетворює енергію зовнішнього подразнення у послідовність нервових імпульсів, утворює *сенсорну систему* (або *аналізатор*; застарілий термін — *орган чуттів*). Сенсорна система складається з рецептора, доцентрового шляху та мозку. Фактори, що збуджують сенсорні враження певної якості, називають *стимулами*. Клітини сенсорної системи, здатні реагувати на стимули, називають *рецепторами*.

*Механорецептори* — це спеціалізовані чутливі утворення, призначені для трансформації механічного стимулу в активність нервової клітини, що зумовлює поширення нервового імпульсу.

Механорецептори здатні реагувати на різноманітні механічні стимули і здійснювати: 1) *тактильну чутливість* (сприймання тиску, зміни тиску, дотику, вібрацій); 2) *вестибулорецепцію* (підтримання рівноваги); 3) *інтерорецепцію* (координацію руху окремих частин організму).

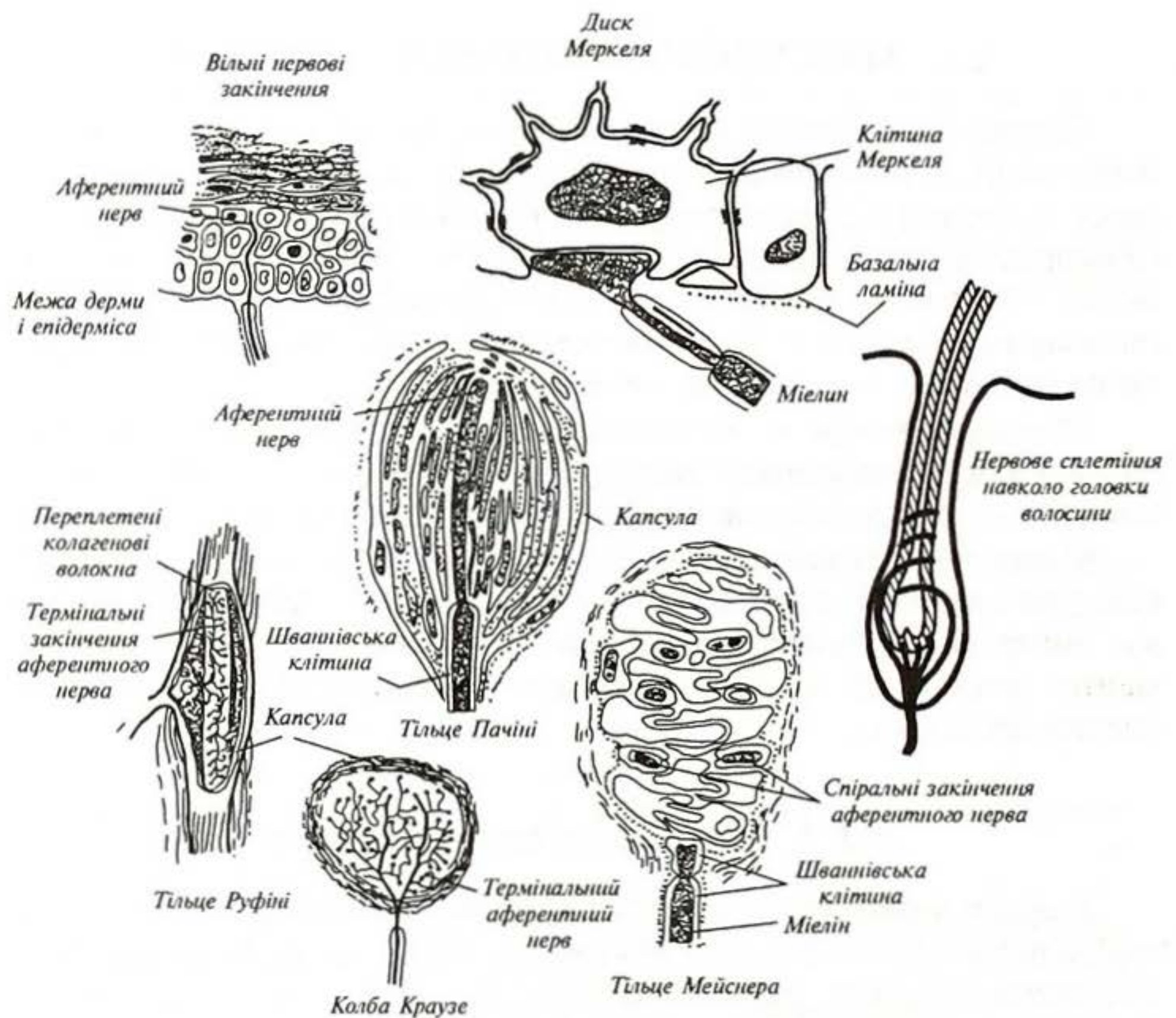
#### 4.1.1. Механорецептори шкіри

У шкірі знаходиться велика кількість механорецепторів. Якщо шкіра вкрита волоссям, для неї характерні вільні нервові закінчення, диски Меркеля, нервові закінчення навколо волосяних сумок. У шкірі, позбавленої волосяного покриву, механорецепторами є

вільні нервові закінчення, диски Меркеля, тільця Мейснера і Пачіні. В підсосочковому шарі дерми можна знайти колби Краузе; в глибині дерми зустрічаються тільця Руфіні. Основні типи механорецепторів шкіри наведено на рис. 4.1.

*Вільні нервові закінчення* є найбільш поширеними рецепторами шкіри; вони входять у систему розвиненої мережі нервових волокон, розміщених у поверхневих структурах дерми. Вільні нервові закінчення часто розгалужуються і можуть займати велику площу.

*Диски Меркеля* містяться в нижній частині епідермісу. Волокна, що відходять від кількох дисків Меркеля, можуть об'єднуватися в єдине волокно, утворюючи єдину *тактильну корпускулу* (тактильний — такий, що сприймається дотиком) діаметром 100÷500 мкм, що здійснюється над поверхнею шкіри. Кожна клітина Меркеля з'єднується з термінальним (кінцевим) диском аферентного (чутливого) нервового волокна, що проводить імпульси від периферії до центральної нервової системи. Кількість дисків Меркеля в одній корпускулі може досягати 30÷50. Цей тип механорецепторів можна виявити, наприклад, на губах тварин.



**Рис. 4.1. Типи механорецепторів**

*Нервові закінчення навколо волосся* являють собою немієлінізовані (тобто без мієлінових оболонок, що складаються з суміші ліпоїдних та білкових речовин) нервові волокна, які густо обплітають структури волосяної сумки. Кожний волос оточений декількома волокнами; в той же час, одне й те ж саме волокно може обплітати велику кількість волосся. Наприклад, у вусі кроля одне волокно охоплює близько 300 волосяних фолікулів на площі 1 см<sup>2</sup>. У тварин у волосяному покриві зустрічаються чутливі волоски — *вібриси*, що локалізуються навколо ротового отвору. Кожна вібриса може бути оточена більш ніж 100 волокнами, що забезпечує її високу чутливість.

*Тільця Мейснера* виявляють у шкірі, позбавленої волосяного покриву. Вони знаходяться в сосочковому шарі дерми і мають конусоподібну або еліпсоподібну форму. Довжина тілець Мейснера становить 90÷120 мкм. Зовні кожне тільце вкрите тонкою капсулою (оболонкою), тісно зв'язаною з прилеглими тканинами.

*Тільця Пачіні* являють собою інкапсуловані закінчення в шкірі розмірами — 4÷5 мм завдовжки і 1÷2 мм завширшки (інкапсуляція — процес утворення оболонки). Розміщені в нижніх шарах дерми і в підшкірній жировій клітковині. Складаються з зовнішньої капсули, внутрішньої колби і немієлінізованого нервового закінчення, зв'язаного з м'якотним нервовим волокном. Кожне тільце Пачіні обплетене товстими м'якотними волокнами.

*Колби Краузе* знаходяться в підсосочковому шарі дерми і являють собою сферичні утворення в капсулі. Внутрішнє середовище їх пронизане розгалуженою мережею закінчень аферентного нерва.

*Тільця Руфіні* мають веретеноподібну форму і оточені капсулою. Діаметр рецептора досягає 150 мкм. Основа кожного тільця Руфіні — складно переплетені колагенові волокна, зв'язані з численними розгалуженнями аферентного нервового волокна.

Згідно з найпростішою гіпотезою про механорецепторне перетворення, стимулом, що безпосередньо впливає на механорецептор, є розтяг або деформація поверхневої клітинної мембрани, які зумовлюють зміни проникності іон-селективних каналів.

### 4.1.2. Вестибулорецепція

*Вестибулорецепція* — це сприймання зміни швидкості та напрямку переміщення тіла у просторі за допомогою *вестибулорецепторів* — волоскових клітин перетинчастого лабірину внутрішнього вуха. Цей тип рецепції реалізується за допомогою *вестибулярного апарату*, що складається з *переддвер'я* і трьох *напівкруглих каналів*, розміщених у взаємоперпендикулярних площинах (рис. 4.2). У порожнині переддвер'я знаходяться рецепторні клітини з волосками, зануреними в желеподібну масу, що містить кристали карбонату кальцію — так



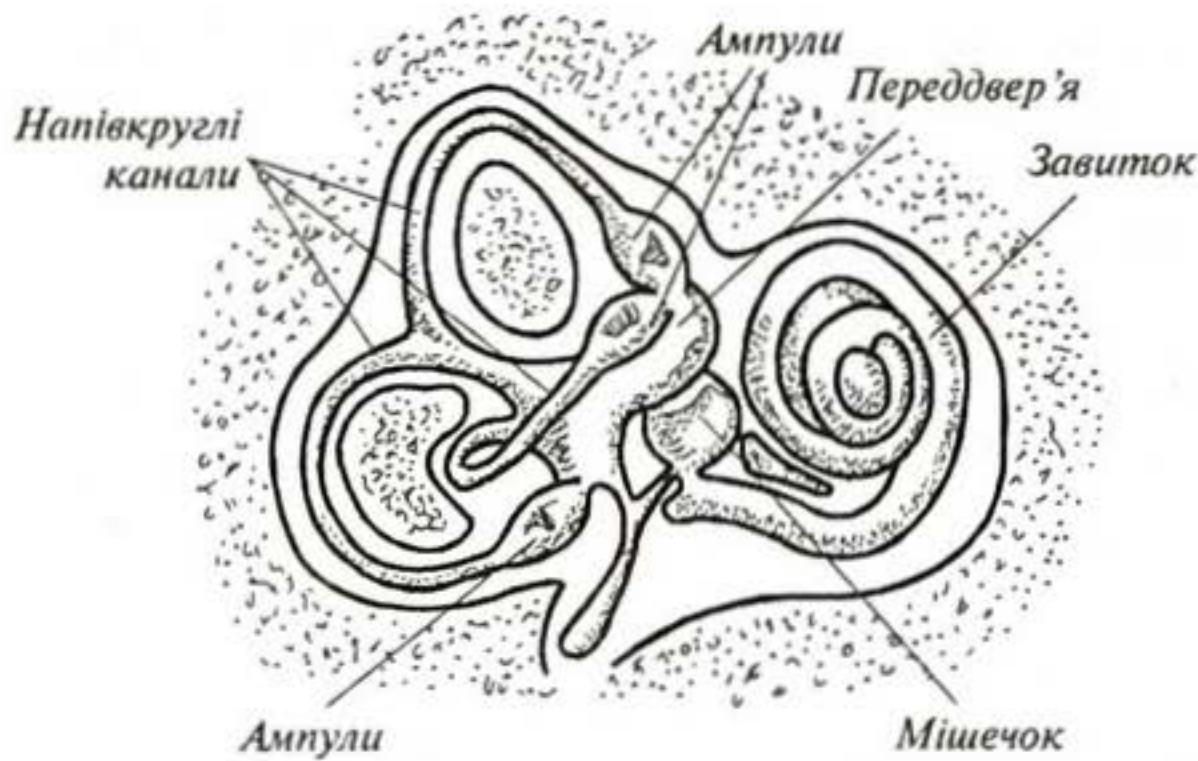


Рис. 4.2. Вестибулярний апарат

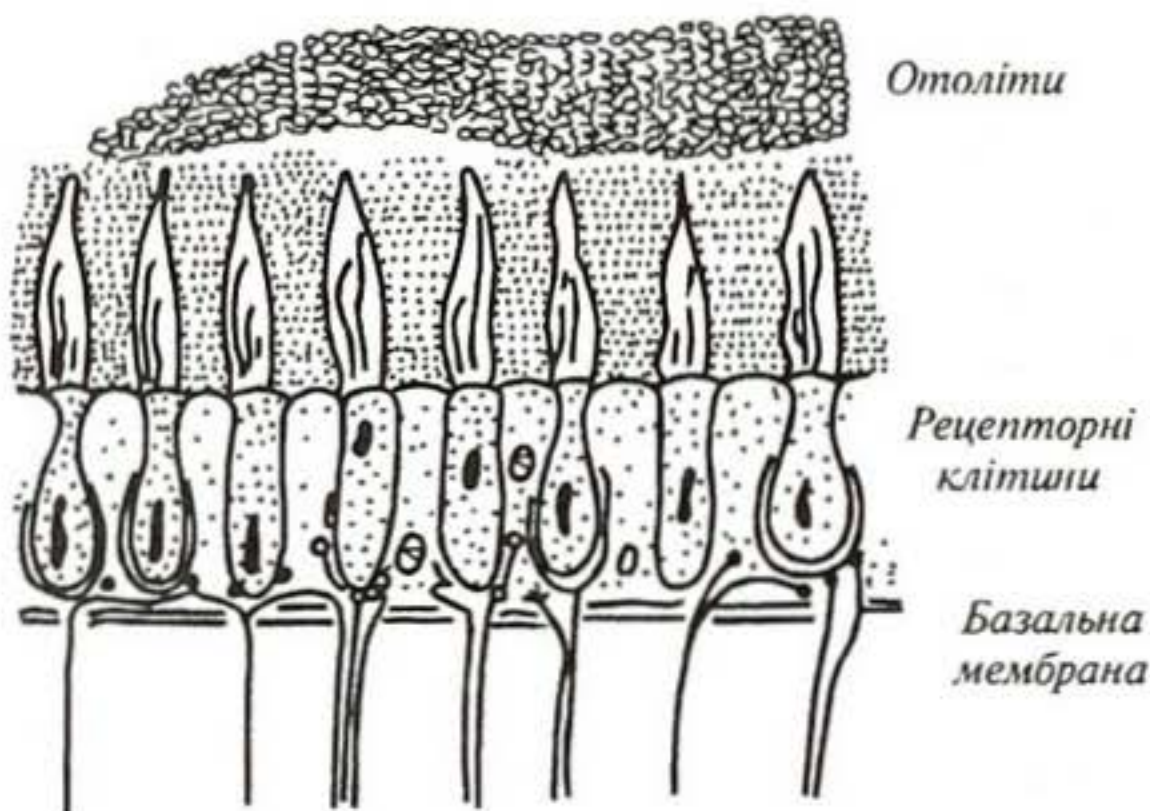


Рис. 4.3. Вміст порожнини переддвер'я

звані *отоліти*. Якщо голова тварини нахиляється, напівкруглі канали набувають прискорення, тоді як ендолімфа намагається залишитися на місці через силу інерції. У підсумку отоліти зміщуються і згинають волоски, що приводить до збудження нервових клітин, пов'язаних з рецепторними клітинами, і передачі інформації до мозку про положення голови або тіла у просторі (рис. 4.3). Обидва внутрішніх вуха являють собою *білатеральну* (двобічну) рецепторну систему: якщо під час обертання голови ліві напівкруглі канали набувають прискорення, то праві канали набувають уповільнення. У

мозку тварини відбувається порівняння й аналіз частоти посилення біопотенціалів, що надходять з обох систем.

### 4.1.3. Інтерорецепція

Рецептори, локалізовані в серцево-судинній системі та внутрішніх органах, здатні сприймати подразники різної природи, називаються *інтерорецепторами*. Інтерорецептори поділяються на пропріорецептори та вісцеральні рецептори.

*Пропріорецептори* сигналізують про відносне положення різних частин тіла. Представлені ці типи механорецепторів *м'язовими веретенами* і *сухожильними органами Гольджі*.

М'язові веретена зорієнтовані паралельно скелетним м'язам і пов'язані з сухожиллями (рис. 4.4); вони надають інформацію про *довжину м'яза*. М'язове веретено являє собою інкапсуловану групу тонких і спеціалізованих м'язових ниток. Оскільки капсула, де містяться ці нитки, має веретеноподібну форму, ці нитки називають *внутрішньоверетеними*. Вони пов'язані з сухожиллями; при-

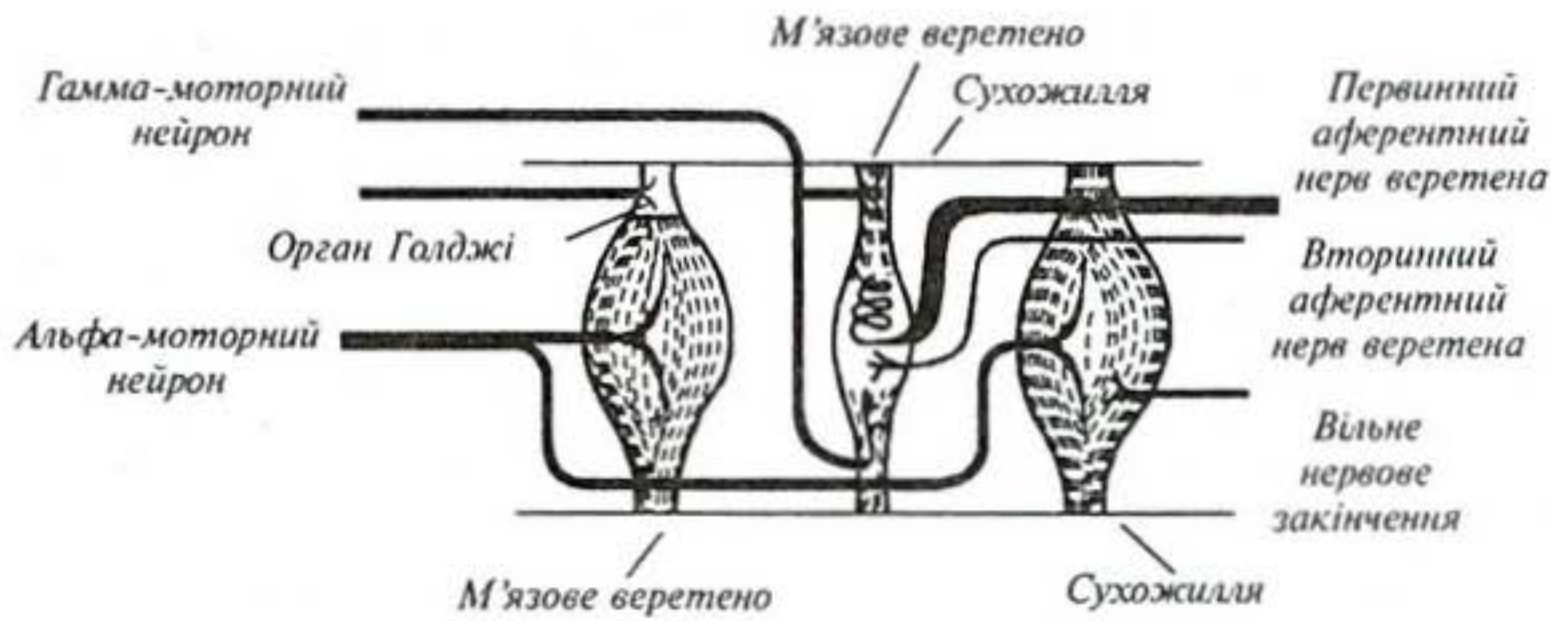


Рис. 4.4. М'язове веретено

чому, кінці цих ниток містять скоротливі білки, тоді як середня частина позбавлена їх. Аферентний нерв м'язового веретена знаходиться саме в середній його частині. Полярні кінці цього веретена мають власні рухливі нерви, що називаються *гамма-рухливими нейронами* (на відміну від *альфа-рухливих нейронів*, що зв'язані з м'язовими волокнами). Під час скорочення або видовження скелетного м'яза змінюється довжина середньої частини веретена, що зумовлює виникнення біопотенціалів, частота яких залежить від рівня зміни довжини середньої частини.

Сухожильний орган Гольджі являє собою тонку капсулу всередині сухожилля, що зв'язує 15÷20 м'язових волокон (рис. 4.5). Кожний орган має аферентний нерв, який посилає потенціали в центральну нервову систему під час скорочення м'яза. Орган Гольджі реагує на *механічне напруження*, що виникає в сухожиллі. Частота посилення потенціалів пропорційна напруженню, що виникає в сухожиллі.

*Вісцеральні рецептори* постачають інформацію про рух або стан внутрішніх органів (шлунка, кишечника, сечового міхура), а також сигналізують про стан внутрішнього середовища, з яким пов'язані відчуття голоду (рівень цукру в крові) або спраги (підвищення осмотичного тиску в плазмі крові).

Таким чином, всі механорецептори відрізняються не тільки будовою, але й здатністю реагувати на різні механічні стимули — дотик, тиск, зміну тиску, стиск, вигин, розтяг, лінійне або обертальне прискорення, зміну довжини м'язів або механічного напруження, що виникають в м'язах.



Рис. 4.5. Сухожильний орган Гольджі

## 4.2. МЕХАНОРЕЦЕПЦІЯ У РИБ

Сприймання рибами зовнішніх механічних факторів та реакція на них здійснюється за допомогою особливих структур, а саме: ампул Лоренціні, пухирців Саві та власне сейсмосенсорних органів (каналів, борозенок), що містять рецепторні елементи — *невромас-ти* або *сейсмосенсорні пупки*. До застарілих належать терміни «бокова лінія», «органи бокової лінії».

Вздовж тіла більшості риб, а також в області голови розташована сейсмосенсорна система, що являє собою послідовність каналів, відкритих через певний проміжок для води.

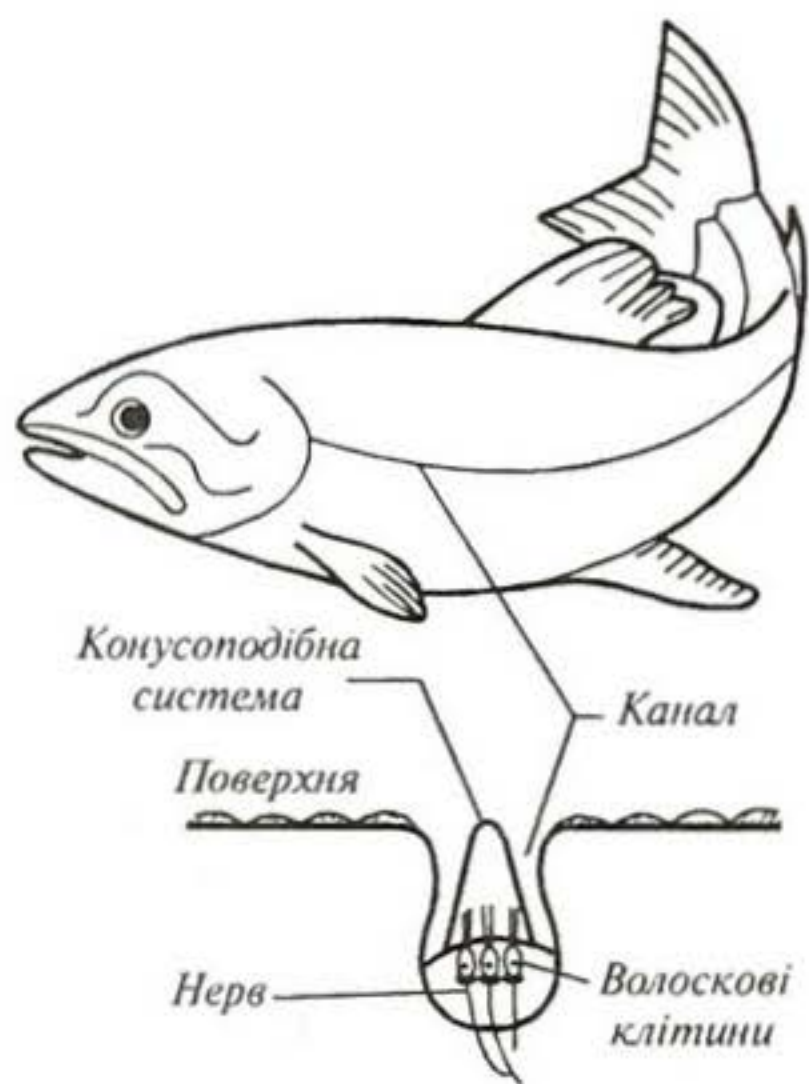


Рис. 4.6. Будова каналу сейсмосенсорної системи риб

Складаються ці канали з в'язких желатинових конусоподібних структур (*cupulae*), які містять волоски, зв'язані з чутливими клітинами (*neuromasts*). До кожної такої клітини підходить нервове закінчення (рис. 4.6). Потік води, що рухається, викликає деформацію волосків, що сприяє утворенню електричних потенціалів та їх передачі у нервову систему. Такі сейсмосенсорні системи, здатні реагувати на мінімальні зміщення води, забезпечують організм інформацією щодо напрямку руху водних потоків та наявності турбулентних течій, викликаних присутніми у водному середовищі членів зграї або ворогів.

## 4.3. МЕХАНОРЕЦЕПЦІЯ У БДЖІЛ

Механорецептори бджоли реагують на механічні деформації певної своєї частини під час дотику або контакту з твердим субстратом, впливу потоку повітря, або виступають як пропріорецептор, що реагує на деформації або напруження м'язів та зовнішнього скелета.

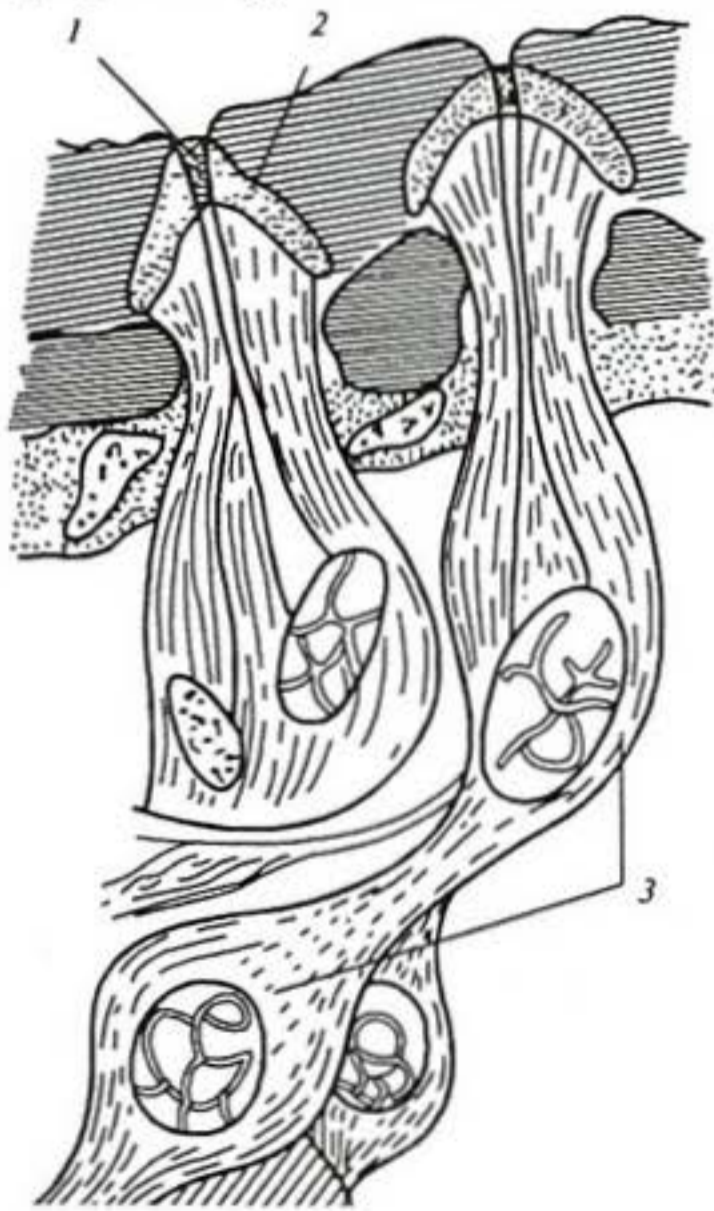
Розміщені механорецептори бджоли на вусиках, ротових придатках, кінцівках, поверхні черевця. Чутливими елементами механорецепторів є сенсили, а саме: *sensilla trichodea*, *s.scolopophora*, *s.campaniformia*, *s.schaetica*.

Трихоїдні сенсили (*s.trichodea*), що виконують функції *рецепторів дотику*, складаються з двох частин — спеціалізованого утворення (волоска) і нервового закінчення, що перебуває в контакті з цим утворенням (рис. 4.7). Подразнення волоска передається розміщеній біля його основи нервовій клітині і через її відростки по-

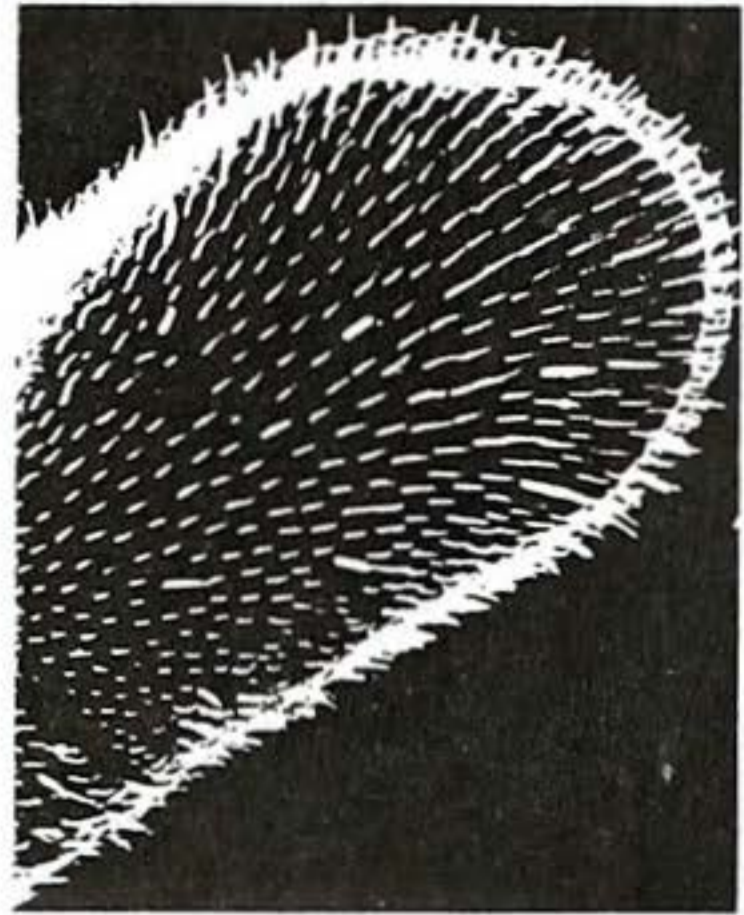
трапляє в центральну нервову систему. Розміщені трихоїдні сенсили по всьому тілу бджоли. За допомогою сенсил, розміщених на антенах, бджола має можливість виявляти й аналізувати мікрорельєфи на поверхні квітів. Розміри сенсили (близько 10 мкм) співмірні з розмірами цих мікрорельєфів, які можуть трішки змінюватися від краю квітки до центру; аналіз цих змін надає інформацію відносно розташування нектару.

Трихоїдні сенсили, розміщені у місці зчленування голови та грудей, виконують також функції *гравірецепторів*. Тиск голови на груди залежить від положення голови бджоли відносно тіла; реєструючи рівень тиску за допомогою волосків, бджола здатна контролювати положення у просторі свого тіла, а також вимірювати кути шестикутних чарунок при їх побудові.

Реакція бджоли на механічні напруги та деформації відбувається завдяки сенсилам, розташованих на голові та кінцівках (*s.scolorophora*), а також на гострому кінці жала (*s.campaniformia*).



**Рис. 4.8.** *Пропріорецептор пружних деформацій кутикули: 1 — заломлююче тіло; 2 — кутикулярний шар; 3 — чутлива нервова клітина*



**Рис. 4.7.** *Трихоїдна сенсила як рецептор дотику*

На відміну від трихоїдних ці сенсили спеціалізуються як *пропріорецептори пружних деформацій кутикули*. Розміщені по лініях деформацій, вони передають сигнали щодо інтенсивності та напрямку вигинів кутикули. Морфологічно вони відрізняються від трихоїдних сенсил, бо позбавлені волоска, що перетворений тут у невеликий овальний ковпачок, до якого підходить колоколоподібний кінцевий відросток чутливої клітини (рис. 4.8). Дзвоноподібні сенсили у робочій бджолі містяться на крилах (їх 1510), кінцівках (450), жалі (100); у маток — на крилах (1310) і кінцівках (450); у трутнів — на крилах (1998) і кінцівках (606). Зміна натягу кутикули біля сен-

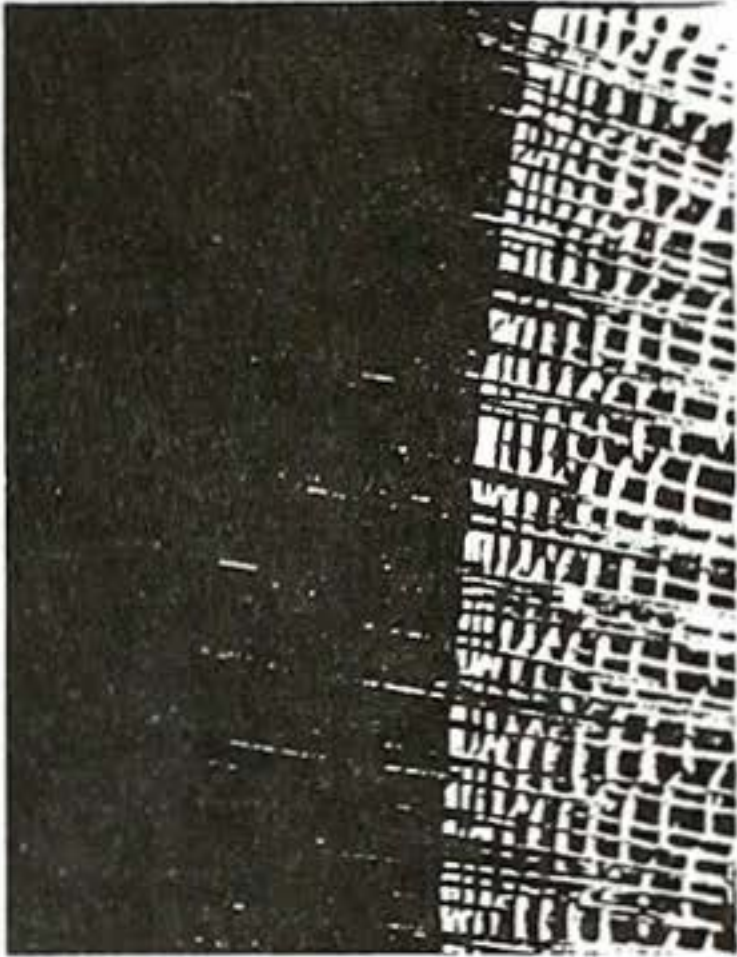


Рис. 4.9. Фрагмент складного ока бджоли: поміж фасетками розміщені чутливі волоски, що діють як рецептори повітряних потоків

сили викликає або зменшення, або збільшення кривизни кутикулярного купола.

Медоносна бджола здатна оцінювати швидкість потоків повітря та їх напрямок під час польоту завдяки чутливим волоскам, що діють як *аеродинамічні датчики*. Розміщені ці волоски на складних очах бджоли (рис. 4.9), на деяких ділянках голови та крилах. Оцінка швидкості руху відносно земної поверхні відбувається візуально, за допомогою фоторецепторів. Затрати енергії під час польоту дають можливість бджолі мати уявлення про відстань польоту. Крім того, бджола отримує інформацію через *рецептори тиску*, розміщені на стінках медового мішка: тиск зменшується, якщо мішок спорожнюється.

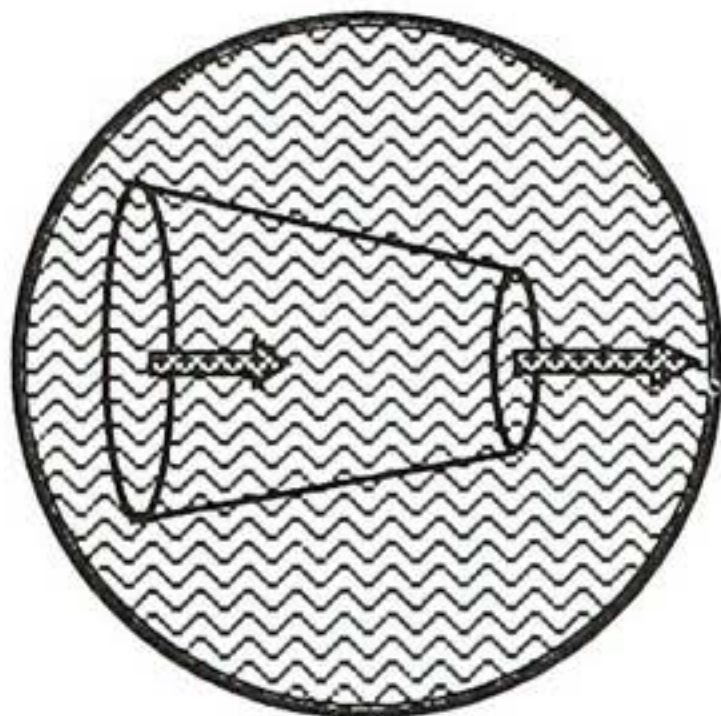
Реакція бджоли на *вібрації субстрата*, на поверхні якого вона знаходиться, відбувається завдяки спеціалізованим органам (*s.scolopophora*), розміщеним у верхніх частинах гомілок передніх кінцівок. Чутливі елементи цих органів (сколопідії) здатні реєструвати коливання субстрату. Саме ці рецептори використовуються під час спілкування бджіл у замкненому просторі вулика.

Ще одна спеціалізована форма механорецепторів — *Джонстонів орган (s.schaetica)*, розміщений на другому членику антени. Стимуляція цього органу відбувається під час обмацування антенами різних предметів та руху бджоли у повітрі.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке механорецептор?
2. На які механічні стимули реагують механорецептори?
3. Назвати механорецептори шкіри.
4. Пояснити, як діє вестибулорецептор.
5. З чого складається м'язове веретено? сухожильний орган Гольджі?
6. В чому полягають функції вісцеральних рецепторів?
7. Які структури риб відповідають за механорецепцію?
8. Назвати основні механорецептори бджоли.

# 5. ОСНОВИ ГІДРОДИНАМІКИ



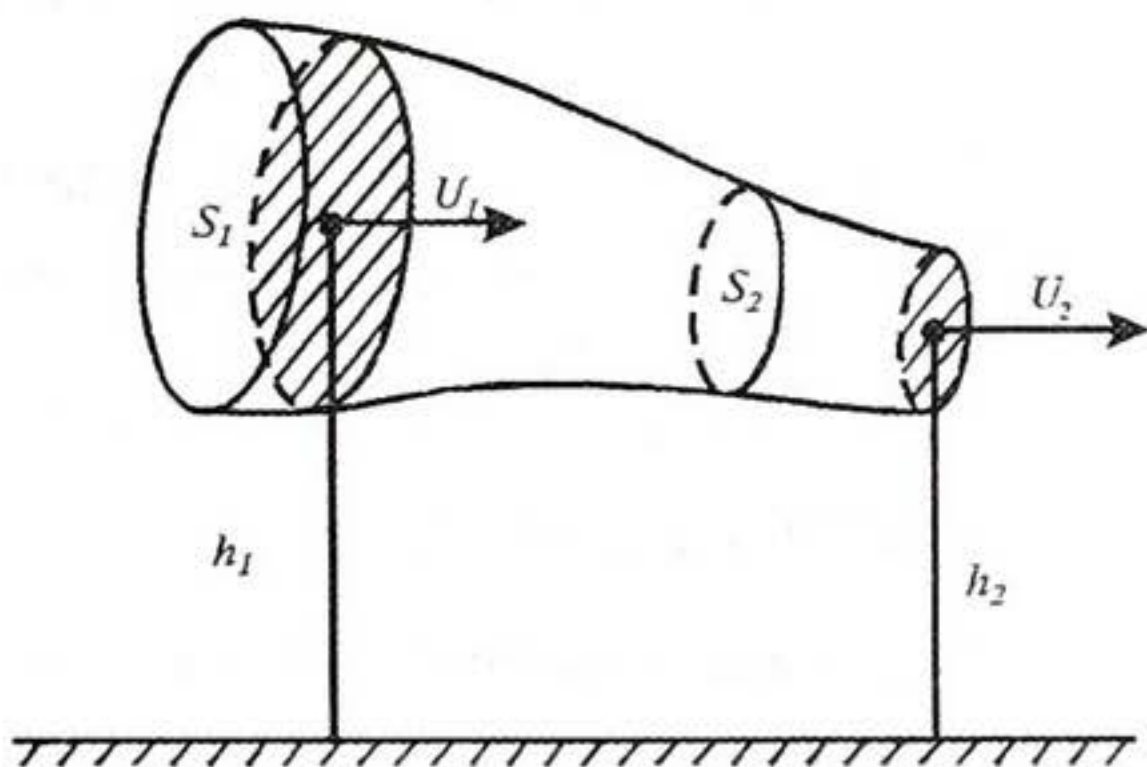
*Гідродинаміка* — розділ фізики, що вивчає рух рідин, їх взаємодію між собою та твердими тілами, які вони обтікають.

## 5.1. РУХ ІДЕАЛЬНОЇ РІДИНИ

*Ідеальною* вважається рідина, в якій відсутні сили тертя (в'язкості) та яка нестислива.

*Нестисливою* називають рідину, густина якої є стала.

*Течією* називають рух рідини, а *поток*ом — саму рідину, що рухається. Якщо швидкість руху рідини в кожній точці об'єму не



*Рис. 5.1. Трубка змінного перетину*

змінюється з часом, такий рух рідини називається *стаціонарним*. Графічно рух рідини зображується за допомогою *ліній течії* — таких ліній, дотичні до яких збігаються з напрямками вектора швидкості в даній точці потоку. Частина рідини, обмежена лініями течії, називається *трубкою течії*.

Рівняння нерозривності потоку: при стаціонарній течії рідини добуток швидкості течії рідини на поперечний переріз трубки течії є величиною сталою

$$S \cdot V = \text{const.} \quad (5.1)$$

З цього рівняння можна отримати вирази:

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2, \quad (5.2)$$

$$\left( \frac{V_1}{V_2} \right) = \left( \frac{S_2}{S_1} \right), \quad (5.3)$$

$$S = \frac{\text{const}}{V}. \quad (5.4)$$

Тиск  $p$  — скалярна величина, що вимірюється відношенням суми сил  $F$ , що діють перпендикулярно на будь-яку частину поверхні, до площі  $S$  цієї частини:

$$p = \frac{F}{S}. \quad (5.5)$$

Одиниця вимірювання тиску —  $\text{Па} = \text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Рівняння Бернуллі: в стаціонарному потоці повний тиск, що складається з статичного, гідростатичного та динамічного тисків, є величиною сталою для будь-яких перерізів потоку

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{\rho \cdot V^2}{2} = \text{const}, \quad (5.6)$$

де  $p$  — статичний тиск, тобто тиск, який утворює рідина на поверхні тіла, яке вона обтікає,  $\rho \cdot g \cdot h$  — гідростатичний тиск, викликаний вагою рідини,  $\frac{\rho \cdot V^2}{2}$  — динамічний тиск, зумовлений рухом рідини.

Для горизонтально розміщеної трубки рівняння Бернуллі має вигляд:

$$p + \frac{\rho \cdot V^2}{2} = \text{const}. \quad (5.7)$$

Таким чином, повна енергія одиниці об'єму ідеальної рідини в будь-якому перерізі потоку є величиною сталою.

## 5.2. РУХ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ

Якщо під час руху рідини в ній виникають сили тертя (в'язкість), то таку рідину називають *реальною*.

Рівняння Ньютона: тангенціальна сила  $F$ , що викликає зсув шарів рідини один відносно одного, пропорційна площі  $S$  шару, по якому відбу-

вається зсув, та градієнту  $\frac{\Delta V}{\Delta x}$  швидкості течії

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{V}{\Delta x}, \quad (5.8)$$

де  $\eta$  — коефіцієнт динамічної в'язкості. Він характеризує опір рідини зміщенню її шарів.

Одиниця вимірювання в'язкості —  $\text{Па} \cdot \text{с}$ .

Типові значення в'язкості деяких речовин наведено у табл. 5.1.

### 5.1. Коефіцієнт в'язкості речовин

Речовина	Коефіцієнт в'язкості, Па·с	Температура, °С
Повітря	$18 \cdot 10^{-6}$	20
Повітря	$21 \cdot 10^{-6}$	100
Вода	$1,781 \cdot 10^{-3}$	0
Вода	$1,306 \cdot 10^{-3}$	10
Вода	$1,002 \cdot 10^{-3}$	20
Вода	$0,798 \cdot 10^{-3}$	30
Вода	$0,653 \cdot 10^{-3}$	40
Суцільна кров	$(4 \div 5) \cdot 10^{-3}$	20
Плазма крові	$1,7 \cdot 10^{-3}$	20
Суцільне молоко	$1,45 \cdot 10^{-3}$	27
Збиране молоко	$1,42 \cdot 10^{-3}$	25
Молочна сироватка	$1,16 \cdot 10^{-3}$	24
Рицинова олія	$0,9 \cdot 10^{-3}$	20
Гліцерин	$1,5 \cdot 10^{-3}$	20

Рідину, яка в процесі течії підпорядковується рівнянню Ньютона, називають *ньютонівською*. Наприклад, вода є ньютонівська рідина, а кров — неньютонівська. Ньютонівська рідина рухається вздовж трубки як серія концентричних кільцеподібних шарів, швидкості руху яких змінюються за параболічним законом (рис. 5.2): рідина рухається швидше вздовж осі і повільніше — при наближенні до стінок трубки. Швидкість руху кожного шару радіусом  $r$  описується рівнянням:

$$V(r) = V_{max} (1 - r^2/R^2), \quad (5.9)$$

де  $V_{max}$  — швидкість руху рідини вздовж осі трубки,  $R$  — радіус трубки.

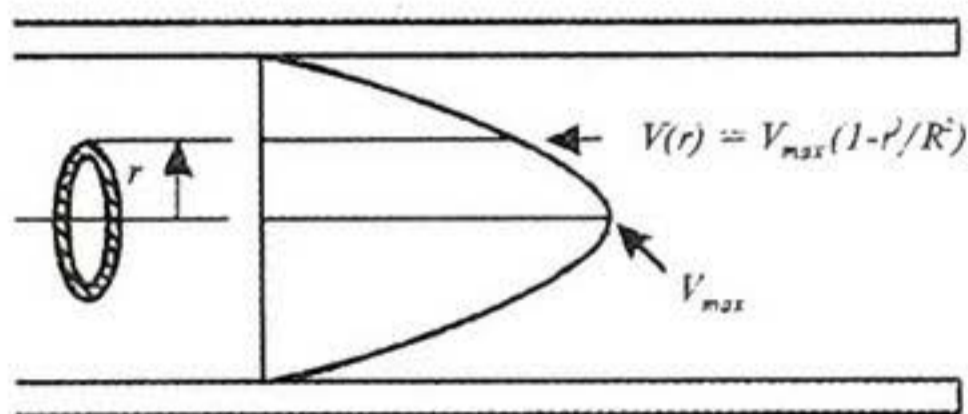


Рис. 5.2. Рух ньютонівської рідини як серії концентричних шарів радіуса  $r$ , швидкості  $V$  руху яких у трубці радіуса  $R$  змінюються за параболічним законом

Закон Стокса: сила, що діє на тверде тіло сферичної форми радіусом  $R$ , яке рухається повільно у в'язкій рідині, пропорційна коефіцієнту в'язкості  $\eta$  рідини, радіусу  $R$  і швидкості руху  $V$  тіла

$$F = 6\pi\eta RV. \quad (5.10)$$



Останнє рівняння використовують для визначення коефіцієнта в'язкості. Розглянемо рух кульки у в'язкій рідині. На цю кульку діють три сили:

1. Сила тяжіння:

$$m\bar{g} = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_{\kappa} \bar{g}. \quad (5.11)$$

2. Виштовхуюча (архімедова) сила:

$$\bar{F}_A = \rho_c V \bar{g} = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_c \bar{g}. \quad (5.12)$$

3. Сила тертя, що визначається законом Стокса:

$$F_c = 6\pi\eta R V, \quad (5.13)$$

де  $m$  — маса кульки,  $R = \frac{D}{2}$  — радіус кульки,  $\rho_{\kappa}$  і  $\rho_c$  — густина кульки і середовища.

Знайдемо проекції всіх трьох сил на вісь координат, що спрямована вертикально донизу:

$$mg - F_A - F_c = 0, \quad (5.14)$$

або

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_{\kappa} \bar{g} + \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_c \bar{g} - 6\pi\eta R V = 0. \quad (5.15)$$

З урахуванням того, що швидкість рівномірного руху кульки дорівнює:

$$V = \frac{l}{t}, \quad (5.16)$$

можна отримати такий вираз:

$$\eta = \frac{2 \cdot g \cdot R^2 \cdot t \cdot (\rho_{\kappa} - \rho_c)}{9 \cdot l}. \quad (5.17)$$

Звідки швидкість рівномірного падіння кульки малих розмірів у в'язкій рідині визначається за формулою:

$$V = g \cdot \frac{\rho_{\kappa} - \rho_c}{\eta} \cdot \frac{2 \cdot R^2}{9}. \quad (5.18)$$

Закон Гагена-Пуазейля: об'єм рідини, що протікає за одиницю часу через переріз трубки, прямопропорційний різниці тисків  $p_1 - p_2$  на кінцях трубки, четвертому ступеню радіуса  $R$  трубки і оберненопропорційний довжині трубки  $l$  і коефіцієнту в'язкості  $\eta$  рідини

$$Q = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\pi \cdot R^4}{8 \cdot l} \cdot (p_1 - p_2). \quad (5.19)$$

### 5.3. ЛАМІНАРНА І ТУРБУЛЕНТНА ТЕЧІЇ

Течія в'язкої рідини може бути *ламінарною* (якщо шари рідини, що рухається, не перемішуються), або *турбулентною* (при перемішуванні шарів).

Режим течії рідини характеризується числом *Рейнольдса*, що визначається за формулою:

$$Re = \frac{V \cdot \rho \cdot D}{\eta}, \quad (5.20)$$

де  $\eta$  — в'язкість рідини,  $\rho$  — густина рідини,  $D$  — діаметр трубки. Перехід від ламінарної течії до турбулентної визначається за допомогою *критичного числа Рейнольдса*  $Re_{кр}$ : якщо  $Re < Re_{кр}$ , течія ламінарна; при  $Re > Re_{кр}$  течія турбулентна. Для течії в'язкої нестисливої рідини в циліндричній трубці  $Re_{кр} = 2300$ .

### 5.4. ТЕЧІЯ РІДИНИ В ТРУБКАХ З ЕЛАСТИЧНИМИ СТІНКАМИ

Рух рідини в трубках з еластичними стінками супроводжується специфічними особливостями. Якщо насос проштовхує рідину, то вона розтягує трубку поблизу насоса і об'єм у цьому місці збільшується (рис. 5.3,а). Потім, коли тиск з боку насоса спадає, потенціальна енергія стінки переходить у кінетичну енергію рідини. В результаті надлишок рідини переходить у подальшу ділянку (рис. 5.3,б). Розтягування і поступові стискання стінок еластичної трубки, що супроводжуються її

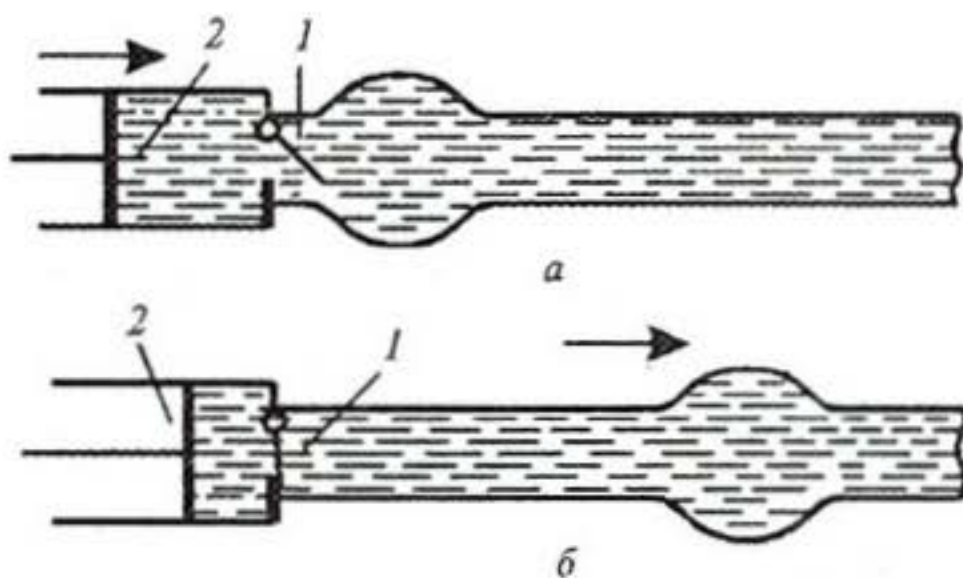


Рис. 5.3. Утворення пульсової хвилі під час протікання рідини по трубці з еластичними стінками:  
1 — клапан; 2 — насос

деформацією, яка поширюється вздовж трубки, називається *пульсовою хвилею*. Швидкість  $V$  поширення пульсової хвилі залежить від модуля Юнга  $E$  матеріалу трубки, зовнішнього  $D$  і внутрішнього  $d$  діаметрів трубки і густини  $\rho$  (рівняння Моенса-Кортевега):

$$V = \sqrt{\frac{E(D-d)}{\rho \cdot D}}. \quad (5.21)$$

### 5.5. ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ

Розглянемо молекулу всередині рідини (рис. 5.4,а). З різних боків що молекулу оточує однакова кількість сусідніх молекул, через що результуюча сил, що діють на молекулу, дорівнює нулю. Щодо моле-

кул, які знаходяться в поверхневому шарі рідини, то результуюча сил, що діють на такі молекули, не дорівнює нулю, оскільки концентрація молекул у повітрі над рідиною значно менша за концентрацію молекул в рідині

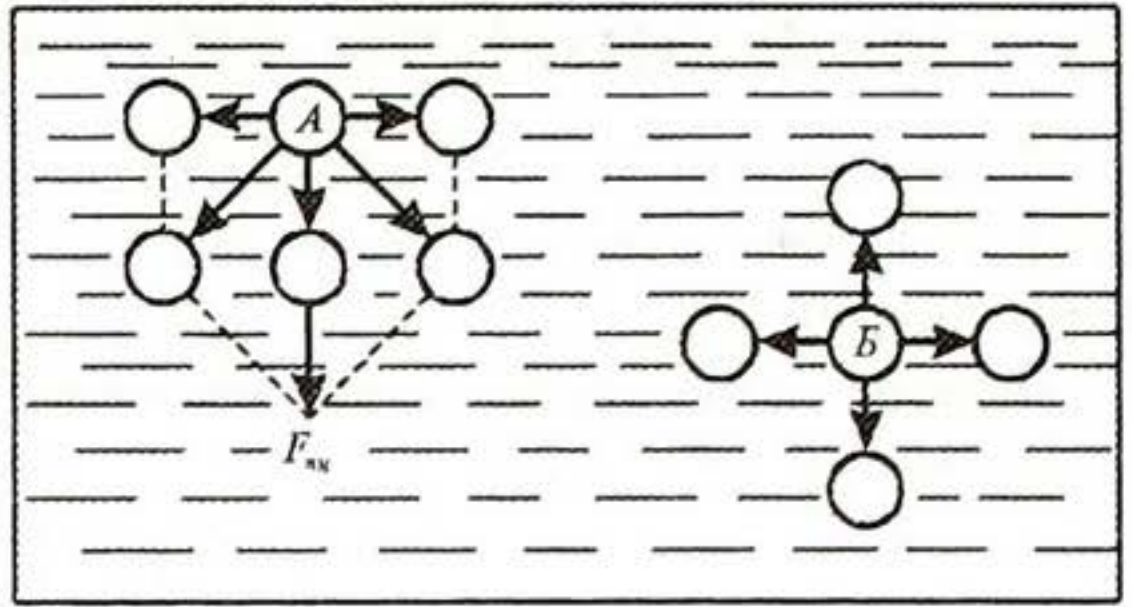


Рис. 5.4. Взіємодія молекул при поверхневому (А) та глибинному (Б) шарі рідини з доколишніми молекулами

(рис. 5.4,б). Причому, результуюча сила спрямована всередину рідини перпендикулярно її поверхні, через що поверхневий шар утворює на всю рідину тиск, який являє собою суму всіх результуючих сил, що діють на одиницю поверхні рідини. Цей тиск називається *молекулярним* або *внутрішнім*. Для переміщення молекули з глибини рідини в поверхневий шар потрібно затратити роботу, що здійснюється за рахунок кінетичної енергії молекул і затрачається на збільшення потенціальної енергії цих молекул. Через це молекули поверхневого шару рідини мають більшу потенціальну енергію, ніж молекули усередині рідини. Оскільки рівноважний стан характеризується мінімумом потенціальної енергії, рідина прагне скоротити площу поверхні. Поверхневий шар рідини в цьому разі схожий на еластичну розтягнуту плівку. Напружений стан поверхневого шару рідини називається *поверхневим натягом*, а сили, що зумовлюють скорочення поверхневої плівки рідини, — *силами поверхневого натягу*.

Сила поверхневого натягу на будь-якій межі поверхні рідини пропорційна довжині межі:

$$F = \alpha \cdot l, \quad (5.22)$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт поверхневого натягу,  $l$  — довжина межі рідини.

Коефіцієнт поверхневого натягу чисельно дорівнює силі поверхневого натягу, розрахованій на одиницю довжини межі; він залежить від типу рідини, домішок і температури. З підвищенням температури коефіцієнт поверхневого натягу зменшується, оскільки середня відстань між молекулами рідини збільшується. Типові значення коефіцієнта поверхневого натягу наведені у табл. 5.2, а залежність коефіцієнта поверхневого натягу води від температури — у табл. 5.3.

Речовини, що зменшують поверхневий натяг рідини, називають *поверхнево-активними*. Вивчення поверхневого натягу допоможе зрозуміти принципи боротьби з личинками малярійних комарів в водоймах на основі застосування поверхнево-активних речовин. Такі захворювання кровоносних судин як *газова емболія* та *гіаліново-мембранна хвороба новонароджених* (див. розділи 6.8 і 6.9) також можна пояснити з урахуванням поверхневого натягу рідин.

### 5.2. Коефіцієнти поверхневого натягу рідин

Рідина	Коефіцієнт поверхневого натягу $\alpha$ , Н·м <sup>-1</sup>
Вода	$72,8 \cdot 10^{-3}$
Рицинова олія	$36,4 \cdot 10^{-3}$
Нафта	$26 \cdot 10^{-3}$
Спирт етиловий	$22,8 \cdot 10^{-3}$
Спирт метиловий	$22,6 \cdot 10^{-3}$
Мильний розчин	$25,0 \cdot 10^{-3}$
Молоко	$44,0 \cdot 10^{-3}$
Плазма крові	$50,0 \cdot 10^{-3}$

### 5.3. Залежність коефіцієнта поверхневого натягу води від температури

Температура, °С	Коефіцієнт поверхневого натягу $\alpha$ , Н·м <sup>-1</sup>
0	$75,6 \cdot 10^{-3}$
20	$72,8 \cdot 10^{-3}$
60	$66,2 \cdot 10^{-3}$
100	$58,9 \cdot 10^{-3}$

## 5.6. КАПІЛЯРНІ ЯВИЩА

*Формула Лапласа:* додатковий тиск, викликаний кривизною поверхні рідини, визначається так:

$$\Delta p = \pm \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (5.23)$$

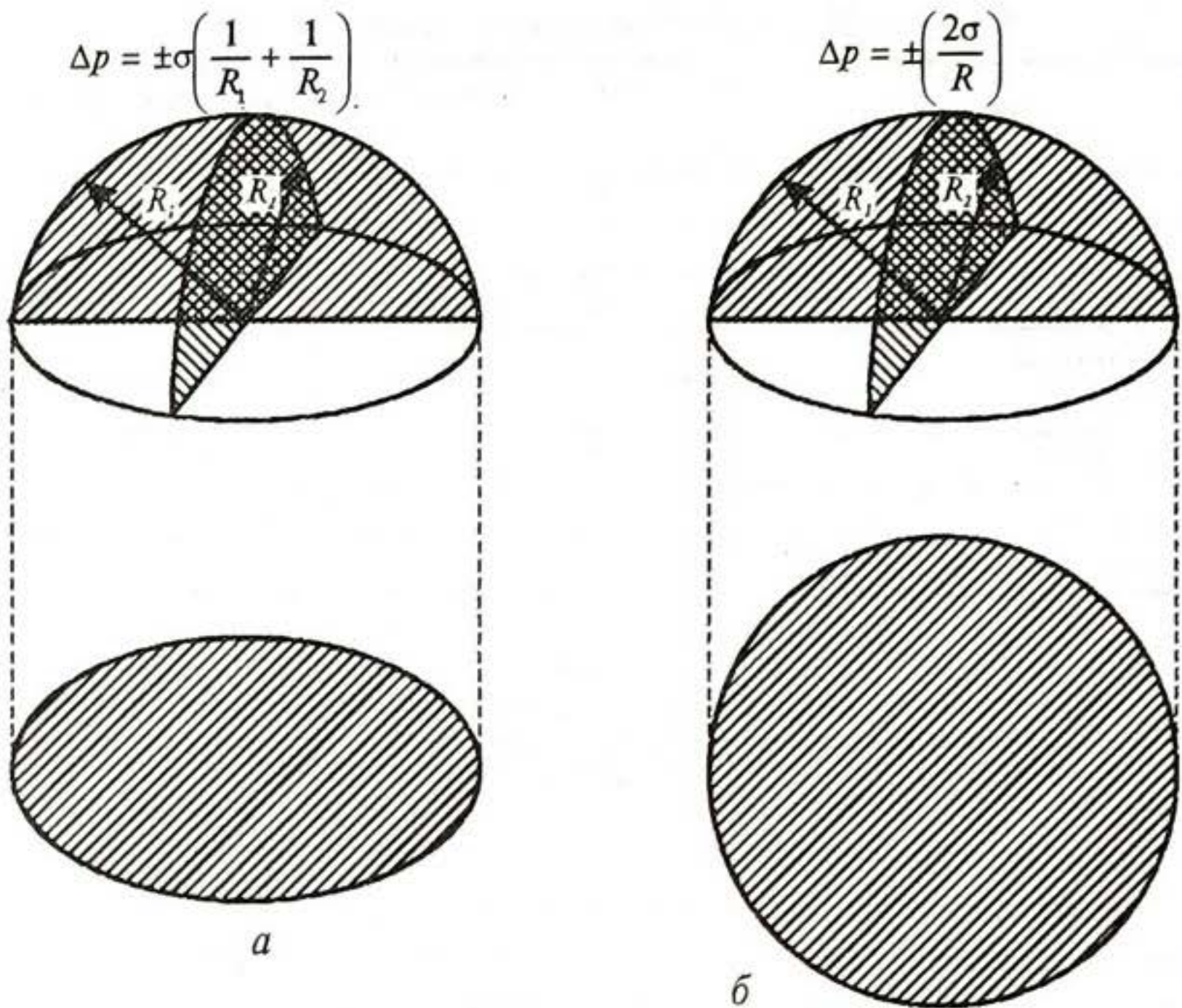
де  $\alpha$  — коефіцієнт поверхневого натягу,  $R_1$  і  $R_2$  — радіуси кривизни двох взаємно перпендикулярних перерізів поверхні рідини (рис. 5.5). Додатковий тиск береться зі знаком «+», якщо поверхня опукла, зі знаком «-» — якщо поверхня угнута. У разі сферичної поверхні ( $R_1 = R_2 = R$ ) формула Лапласа має вигляд:

$$\Delta p = \pm \frac{2\alpha}{R}. \quad (5.24)$$

### ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

#### Приклад

Тиск стовпа води висотою 1 м дорівнює  $\rho gh = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 1 \text{ м} = 10^4 \text{ Па}$ , що становить 0,1 нормальної атмосфери ( $10^5 \text{ Па}$ ). Визначити силу, що діє на барабанну перетинку плавця, який знаходиться на глибині 2 м під водою. Площа барабанної перетинки становлять  $0,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .



**Рис. 5.5. Форма меніска в капілярі:**  
*a* — еліптична ( $R_1 \neq R_2$ ); *б* — сферична ( $R_1 = R_2 = R$ ) поверхні

#### Розв'язок

Тиск внутрішнього середовища на барабанну перетинку дорівнює  $10^5$  Па, а зовнішнього —  $1,2 \cdot 10^5$  Па. Різниця тисків становить:

$$\Delta p = 1,2 \cdot 10^5 - 10^5 = 0,2 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Сила, що діє на барабанну перетинку, дорівнює:

$$F = \Delta p \cdot S = 0,2 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 1,3 \text{ Н.}$$

#### Контрольне завдання № 5.1

Визначити силу, що діє на барабанну перетинку плавця, який знаходиться на глибині 5 м під водою.

*Відповідь:* 3,3 Н.

#### Контрольне завдання № 5.2

Площа поперечного перерізу аорти дорівнює  $8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ , а лінійна швидкість руху крові становить  $40 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Визначити площу перерізу вени, якщо швидкість руху крові в ній дорівнює  $2 \cdot 10^{-1} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

*Відповідь:*  $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

#### Приклад

У рицинову олію опустили сталеву кульку діаметром  $D = 1 \text{ мм}$  і визначили, що відстань  $l = 5 \text{ см}$  вона пройшла за  $t = 14,2 \text{ с}$ . Вважаючи рух кульки рівномірним, визначити в'язкість  $\eta$  рицинової олії, якщо її густина становить  $\rho_m = 960 \text{ кг/м}^3$ , а густина сталі  $\rho_{ст} = 7860 \text{ кг/м}^3$ .

### Розв'язок

На кульку, що рухається у в'язкій рідині, діють сили тяжіння, виштовхуюча сила і сила тертя. Застосовуючи рівняння (5.10)—(5.16), можна отримати вираз:

$$\eta = \frac{2 \cdot g \cdot R^2 \cdot t \cdot (\rho_{cm} - \rho_m)}{9 \cdot l}$$

Підставляємо числові дані:

$$\eta = \frac{2 \cdot 9,8 \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 14,2 \cdot (7,86 - 0,96) \cdot 10^3}{9 \cdot 0,05} = 1,07 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

### Контрольне завдання № 5.3

Формула (5.13) справедлива не лише для рідин, але й для газів. Визначити час падіння пилинки у кімнаті висотою 3 м, якщо в'язкість повітря становить  $1,75 \cdot 10^{-4}$  пуаз, діаметр пилинки 5 мкм, а густина її  $2,5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ .

*Відповідь:* близько 42 годин.

### Приклад

В артеріолі діаметром  $2,5 \cdot 10^{-5}$  м рухається потік крові зі швидкістю  $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Чому дорівнює різниця  $\Delta p$  тисків на кінцях артеріоли, якщо її довжина становить  $5 \cdot 10^{-3}$  м? В'язкість крові  $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

### Розв'язок

Використовуючи формулу (5.19), знайдемо різницю тисків:

$$\Delta p = \frac{8 \cdot V \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot R^4} = \frac{8 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot R^4} = \frac{8 \cdot V \cdot \eta \cdot l}{R^2}$$

Підставляємо числові значення:

$$\Delta p = \frac{8 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{(1,25 \cdot 10^{-5})^2 \text{ м}^2} = 3200 \text{ Па}.$$

### Контрольне завдання № 5.4

Визначити градієнт тиску  $\Delta p/l$  в каплярі діаметром 20 мкм, якщо швидкість руху крові  $0,5 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ , а в'язкість крові —  $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

*Відповідь:*  $\Delta p/l = 1,8 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{-1}$ .

### Приклад

Визначити число Рейнольдса для черевної артерії кроля діаметром 0,3 см, якщо критична швидкість дорівнює  $0,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Якому режиму течії крові відповідає це число? В'язкість крові  $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$ .

### Розв'язок

Число Рейнольдса визначаємо із виразу (5.20):

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot V_{кр}}{\eta}$$

Підставляємо числові дані:

$$Re = \frac{1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 0,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{4,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}} = 400.$$

Оскільки  $Re < 2000$ , то такий режим ламінарний.

### Контрольне завдання № 5.5

Який режим течії крові встановиться в аорті з такими параметрами:  $D = 10$  мм,  $\rho = 10^3$  кг  $\cdot$  м $^{-3}$ ,  $V_{кр} = 0,4$  м  $\cdot$  с $^{-1}$ ,  $\eta = 0,0045$  Н  $\cdot$  с  $\cdot$  м $^{-2}$ ?

Відповідь:  $Re = 899$ , ламінарний.

### Приклад

Водомірка рухається по водній поверхні. Загальний периметр взаємодії кожної з її кінцівок з водою становить 1 мм. Припустивши, що поверхневий натяг діє вертикально, показати, що сили поверхневого натягу у змозі утримати тіло комахи масою  $25 \cdot 10^{-6}$  кг ( $\alpha = 72,8 \cdot 10^{-3}$  Н  $\cdot$  м $^{-1}$ ).

### Розв'язок

Сила поверхневого натягу рідини визначається для шести кінцівок водомірки як:

$$F = 6 \cdot \alpha \cdot l = 6 \cdot 72,8 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 436,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

Вага комахи становить:

$$P = m \cdot g = 25 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} = 245 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

Очевидно, що сила поверхневого натягу перевищує вагу тіла і, таким чином, у змозі утримати тіло комахи.

### Контрольне завдання № 5.6

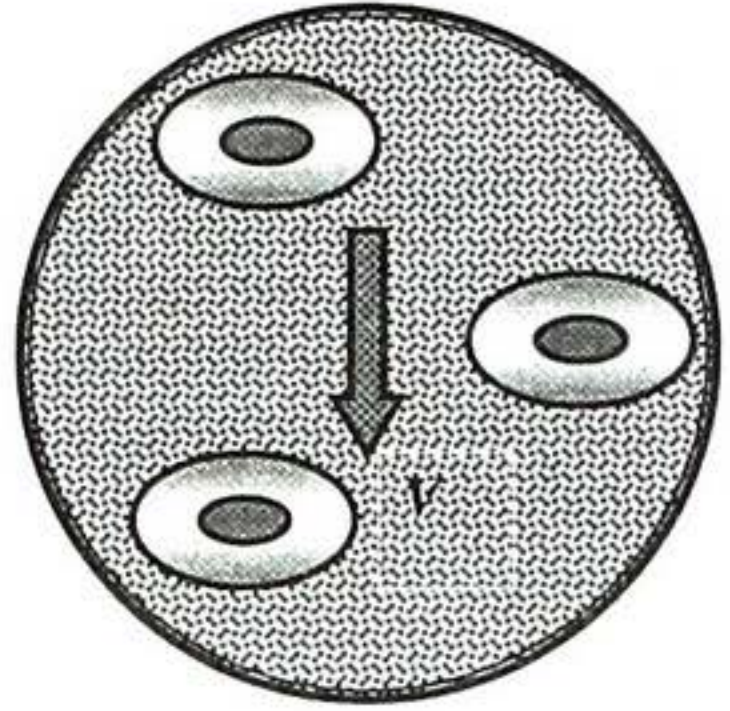
Водомірка бігає по поверхні води. Знайти вагу комахи, якщо відомо, що під кожною із шести лапок водомірки утворюється ямка, рівна півсфері з радіусом 0,1 мм.

Відповідь:  $27,5 \cdot 10^{-5}$  Н.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називають тиском? В яких одиницях вимірюється тиск?
2. Сформулювати закон нерозривності потоку.
3. Написати та пояснити рівняння Бернуллі.
4. Які сили діють на кульку, занурену в рідину?
5. Сформулювати закон Стокса. Для яких тіл він справедливий?
6. Сформулювати закон Пуазейля.
7. Що називається коефіцієнтом в'язкості? В яких одиницях він вимірюється?
8. Як залежить в'язкість від температури?
9. Що характеризує критична швидкість? Від чого вона залежить?
10. Який тиск називають молекулярним (внутрішнім)? Пояснити механізм його виникнення.
11. Що таке поверхневий натяг?
12. Від чого залежить сила поверхневого натягу?
13. Дати визначення коефіцієнта поверхневого натягу. В яких одиницях він вимірюється?
14. Що називають додатковим тиском?
15. Написати та пояснити формулу Лапласа для циліндричного та сплющеного каплярів.
16. Що таке  $R_1$  та  $R_2$  у формулі (5.23)?

## 6. ОСНОВИ ГЕМОДИНАМІКИ



Розділ біофізики, що вивчає причини, умови і механізми руху крові у замкненій системі кровоносних судин та описує цей рух на основі законів гідродинаміки, називається *гемодинамікою*.

### 6.1. СКЛАД КРОВІ

Кров тварини постачає кожній клітині воду, кисень, поживні речовини, гормони, а також отримує залишки продуктів метаболізму та здійснює їх передачу органам виділення. Крім того, кров бере участь у регуляції температури організму — вона переносить тепло, що утворюється в результаті життєдіяльності організму, від внутрішніх структур до поверхні тіла.

Кров — це непрозора в'язка суспензія, що складається з рідкої частини — *плазми* і завислих у ній кров'яних клітин, які називаються *форменими елементами* крові. Формені елементи крові складаються з еритроцитів, лейкоцитів і тромбоцитів.

*Плазма* крові — рідка частина крові, що складається з розчинених у воді солей, вуглеводів, білків і біологічно-активних сполук.

*Еритроцити* — формені елементи крові, що беруть участь у забезпеченні організму киснем і містять у собі значну кількість гемоглобіну, що зв'язує кисень; крім того, еритроцити беруть участь в амінокислотному, поліпептидному, пігментному, іонному або електростатичному обміні.

*Лейкоцити* — білі клітини крові, що забезпечують захист від мікроорганізмів. Вони являють собою ядерні клітини, які діляться на дві групи — зернисті (*гранулоцити*) і незернисті (*агранулоцити*). Лейкоцити здатні рухатися амебоїдно. Гранулоцити здатні проходити крізь дрібні судини завдяки зміні форми. Мігруючи через тканини, уражені бактеріями, вони діють як *фагоцити* — клітини, які пригнічують і засвоюють бактерії та інші сторонні матеріали. Агранулоцити відіграють певну роль у відновленні по-



шкоджених тканин, можливо, завдяки формуванню волокнистої сполучної тканини.

*Тромбоцити* — це кров'яні бляшки, що беруть участь у процесі зсідання крові при пошкодженні судин. Здатність крові зсідатися являє собою адаптивний механізм, завдяки якому організм не втрачає кров через пошкодження судин. У процесі зсідання крові бере участь матеріал *фібрин*, нитки якого скорочуються і утворюють компактну затверділу масу, що запобігає витіканню крові з судини.

## 6.2. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПОКАЗНИКИ КРОВІ

Густина крові варіює в межах  $(1,035 \div 1,055) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$  (конкретні значення цього показника наведено в табл. 2.2); густина плазми становить  $(1,025 \div 1,034) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ; еритроцитів  $(1,08 \div 1,09) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Значення в'язкості крові та плазми можна знайти у табл. 5.1. В'язкість крові залежить від показника гематокриту і температури (рис. 6.1). Основні показники крові тварин наведено в табл. 6.1.

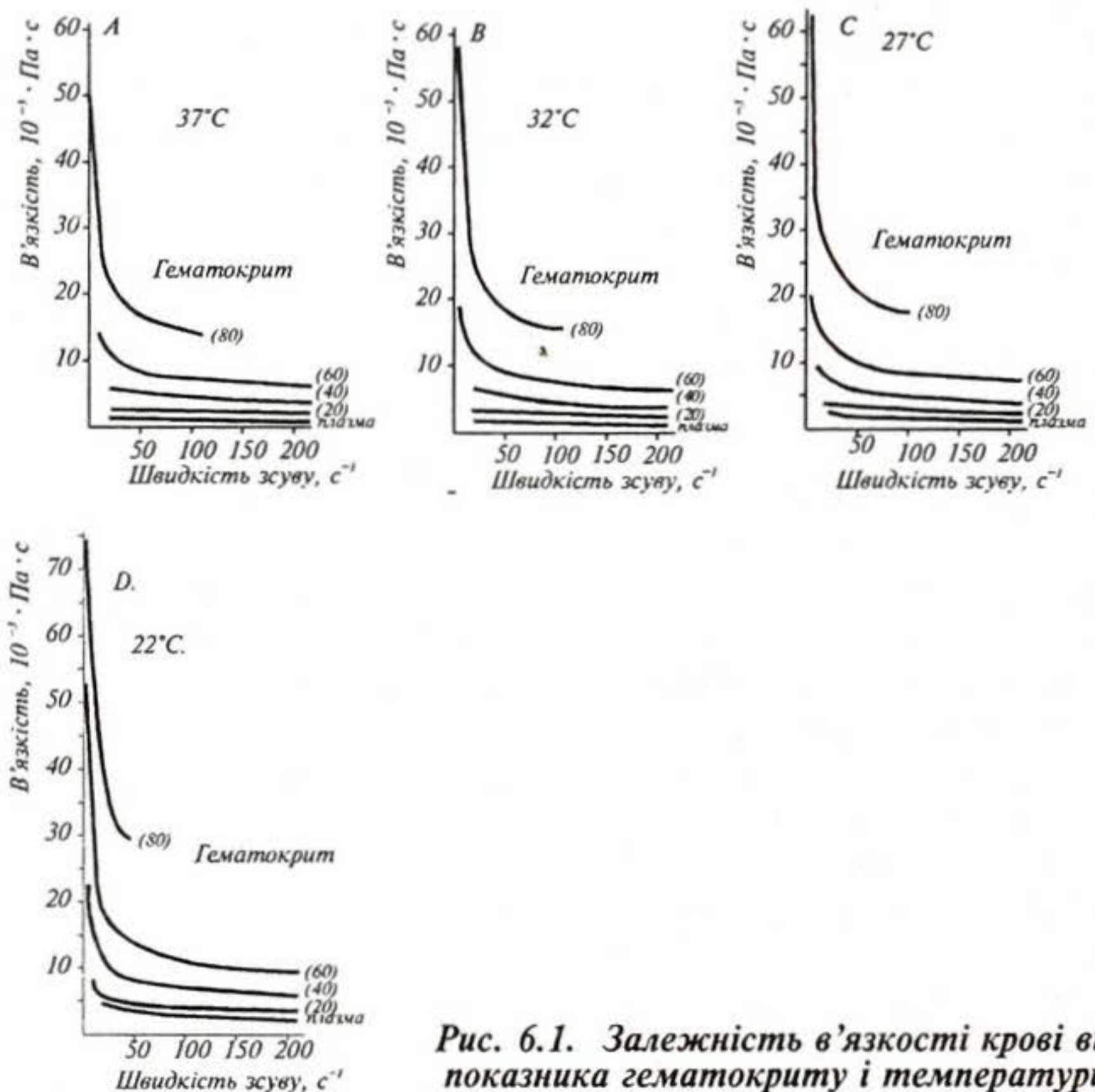


Рис. 6.1. Залежність в'язкості крові від показника гематокриту і температури

### 6.1. Показники крові сільськогосподарських тварин

Показник еритроцитів	Кінь	Велика рогата худоба	Вівця	Свиня	Курка	Кріль
Кількість еритроцитів, млн·мм <sup>-3</sup>	6+9	5+7,5	7+12	6+7,5	3+4	5+7,5
Діаметр, мкм	4,0+8,0	4,5+8,0	3,2+6,0	4,0+8,0	12×7.5	6,0
Середній діаметр, мкм	5,5+5,8	5,8	4,5	6,0		
Швидкість осідання еритроцитів, мм·г <sup>-1</sup> (через 1 годину)	64	0,7	0,6	8,0	4,0	1,5
Показник гематокриту Н, %	39	36	32	42	37	40

### 6.3. СИСТЕМА КРОВООБІГУ ТВАРИН. РУХ КРОВІ ПО СУДИНАХ

Кровоносна система тварин складається з сукупності судин різного діаметра, що утворюють замкнене коло. Типові параметри кровоносних судин наведено у табл. 6.2.

#### 6.2. Основні параметри кровоносних судин

Тип кровоносної судини	Кількість, тис.	Діаметр, мм	Площа, м <sup>2</sup>	Лінійна швидкість руху крові, м·с <sup>-1</sup>
Аорта	-	10,5	86·10 <sup>-6</sup>	40·10 <sup>-2</sup>
Кінцеві артерії	1,8	0,60	28·10 <sup>-8</sup>	<10·10 <sup>-2</sup>
Артеріоли	4·10 <sup>4</sup>	0,02	31·10 <sup>-11</sup>	0,5·10 <sup>-2</sup>
Капіляри	7·10 <sup>6</sup>	0,008	50·10 <sup>-12</sup>	<0,1·10 <sup>-2</sup>
Венули	8·10 <sup>4</sup>	0,03	70·10 <sup>-11</sup>	<0,3·10 <sup>-2</sup>
Кінцеві жилки	1,8	1,5	1,75·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-2</sup>
Вени	-	12,5	12,2·10 <sup>-5</sup>	20·10 <sup>-2</sup>

Згідно з законом Гагена-Пуазейля (формула (5.19)), об'єм кровотечії визначають за різницею тисків на початку і наприкінці системи судин і гідродинамічним опором  $R_{zd}$ , що виникає за тертя крові об стінки судин:

$$R_{zd} = (p_1 - p_2)/Q = 8l\eta / \rho R^4. \quad (6.1)$$

Об'ємною швидкістю кровотечії  $Q$  називається об'єм  $V$  крові, що проходить через судини за одиницю часу  $t$ :

$$Q = V/t. \quad (6.2)$$

Одиниця вимірювання об'ємної швидкості кровотечії —  $мл \cdot с^{-1}$ .

Лінійною швидкістю кровотечії  $V$  називається відношення об'ємної швидкості кровотечії  $Q$  до площі  $S$  поперечного перетину судини:

$$V = Q/S. \quad (6.3)$$

Одиниця вимірювання лінійної швидкості кровотечії —  $см \cdot с^{-1}$ .

Величина  $Q$  залишається сталою для будь-якої ділянки кровоносної системи. Лінійна швидкість  $V$  залежить від площі поперечного перетину судини. Сумарна площа судин на рівні капілярів у 700÷800 разів перевищує площу перетину аорти, а далі, на рівні венул і вен ця площа зменшується.

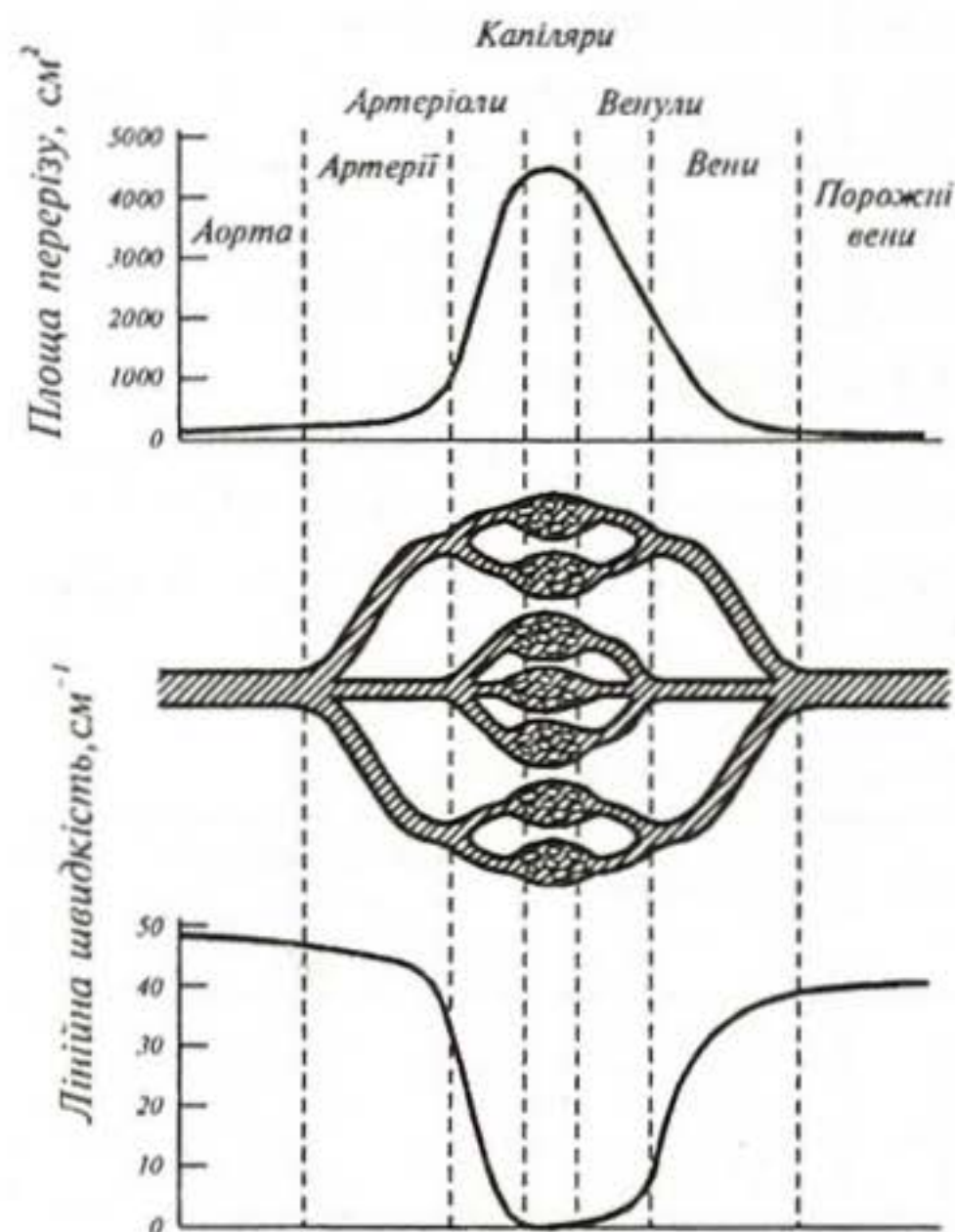


Рис. 6.2. Еволюція зміни швидкості крові у кровоносній системі

Швидкість руху потоків крові через судини змінюється від максимального значення ( $40 \cdot 10^{-2} м \cdot с^{-1}$ ) в аорті до мінімального (близько  $10^{-3} м \cdot с^{-1}$ ) в капілярах; швидкість потоку крові у венах перед тим, як досягнути серця, знову збільшується ( $20 \cdot 10^{-2} м \cdot с^{-1}$ ). Еволюцію швидкості руху крові у кровоносній системі наведено на рис. 6.2. Коли велика судина розгалужується на кілька дрібних судин, згідно з законом Пуазейля для одержання того ж самого потоку загальна площа  $n$  судин має бути в  $\sqrt{n}$  разів меншою площі великої судини. Дійсно, потік крові  $Q_1$  в судині великого діаметра зв'язаний з потоками  $Q_2$  крові в судинах меншого діаметра:

$$Q_1 = nQ_2 \quad (6.4)$$

Врахування рівняння нерозривності потоку приводить до виразу:

$$S_1V_1 = nS_2V_2 \quad (6.5)$$

Використовуючи закон Пуазейля, отримаємо:

$$\pi R_1^4 \Delta p / 8\eta l = \pi R_2^4 \Delta p / 8\eta l. \quad (6.6)$$

Звідки

$$\pi R_1^2 = \sqrt{n} \pi R_2^2; \quad (6.7)$$

$$\sqrt{n} \pi R_1^2 = n \pi R_2^2; \quad (6.8)$$

$$\sqrt{n} S_1 = n S_2. \quad (6.9)$$

Швидкість потоку в дрібних судинах зменшується:

$$V_2 = \frac{V_1}{\sqrt{n}}. \quad (6.10)$$

Рівняння Пуазейля можна застосовувати тільки до постійного потоку рідини по жорстких прямих трубках. Кровоносна система організму містить судини з еластичними стінками та кров, що являє собою складну суміш плазми і формених елементів. Отже, потік крові і зміна тиску в судині не можуть описуватися рівнянням Пуазейля. Мірою відхилення реальної ситуації, що відбувається у кровоносній системі, від тієї, що описується рівнянням Пуазейля, є деяка безрозмірна стала  $\alpha$ :

$$\alpha = R(\omega\rho/\eta)^{1/2}, \quad (6.11)$$

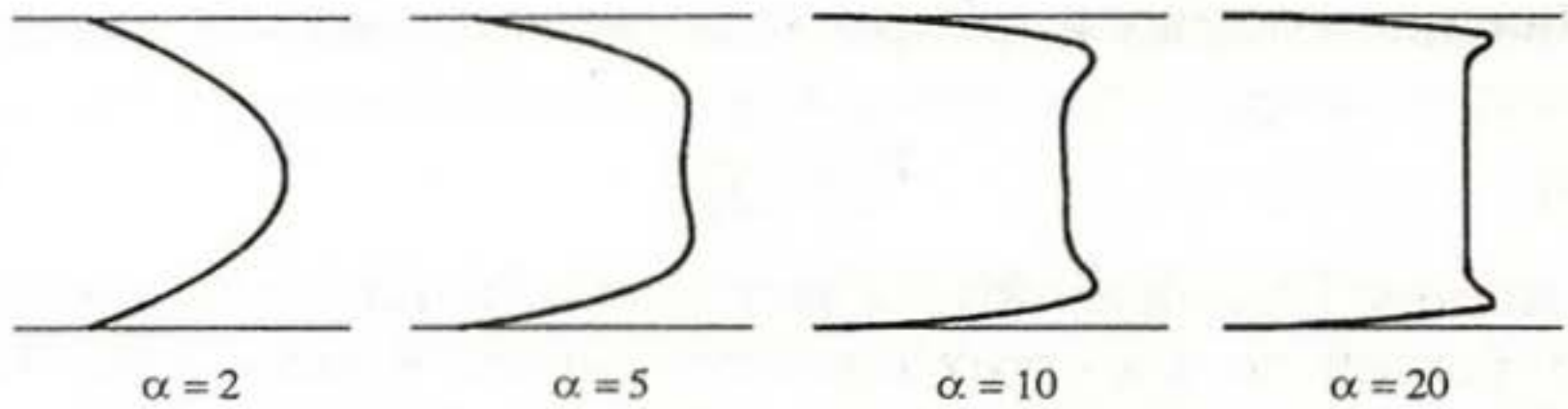
де  $\omega$  — частота коливань тиску в судині,  $\rho$  — густина рідини,  $\eta$  — в'язкість рідини.

Для артеріальної системи  $\alpha \approx 6$ , отже, рівняння Пуазейля використовувати не можна; для дрібних кінцевих артерій  $\alpha \approx 0,5$  і рівняння Пуазейля можна застосовувати. Для великих значень  $\alpha$  профіль розподілу швидкості руху відрізняється від параболічної форми, що властива малим значенням  $\alpha$  (рис. 6.3). Типові динамічні характеристики кровоносних судин наведено у табл. 6.3.

Аналіз цих характеристик свідчить про те, що зі зменшенням діаметра судин різко зменшується число Рейнольдса. Рух крові по більшості великих судин ламінарний; лише на початку аорти (у великих тварин) та в місцях розгалуження великих судин можлива турбулентна течія.

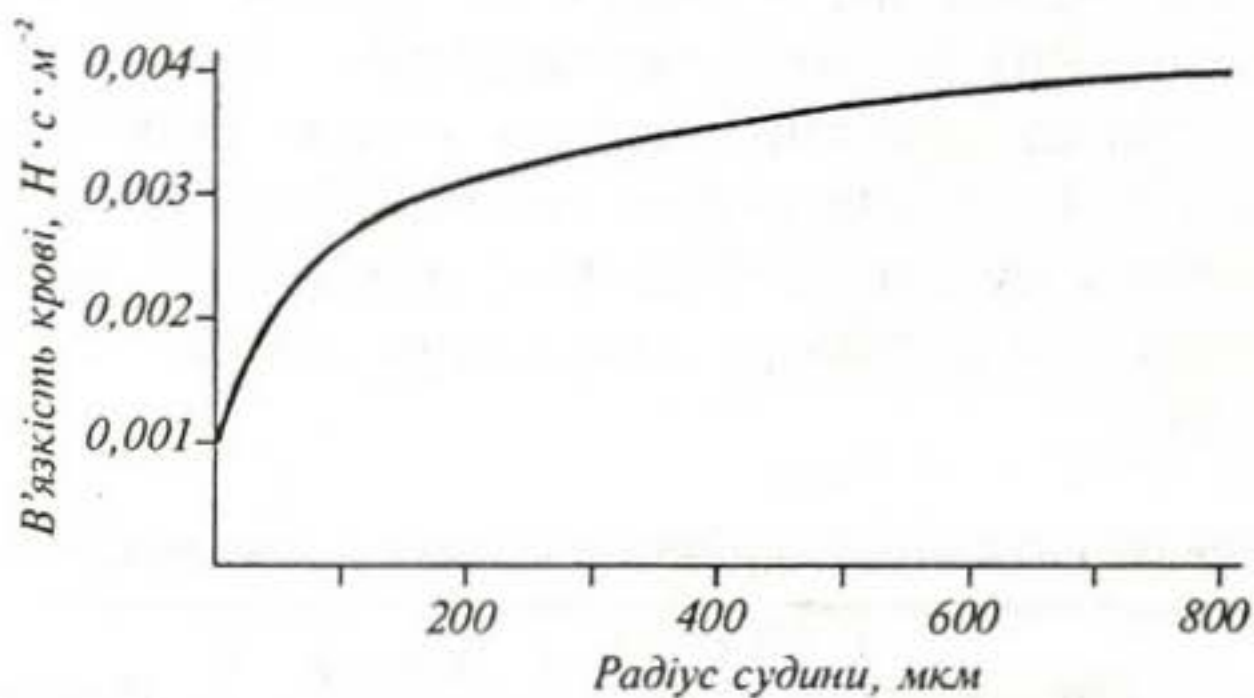
### 6.3. Типові динамічні характеристики кровоносних судин

Судина	Діаметр, мм	Об'ємна швидкість кровотечії, мл·с <sup>-1</sup>	Лінійна швидкість, см·с <sup>-1</sup>	Число Рейнольдса	Стала $\alpha$
Висхідна частина аорти	31	107	18	1500	21
Черевна частина аорти	18	33	14	640	12
Сонна артерія	5,9	6,5	14	217	4,2
Ниркова артерія	6,2	12	40	700	4
Клубова зовнішня артерія	8,2	6,3	12	260	5,8
Стегнова артерія	6,4	2,5	12	200	4
Великогомілкова задня артерія	3,8	0,17	3,5	35	2,7



*Рис. 6.3. Залежність профілю розподілу швидкості руху крові від безрозмірного параметра  $\alpha$*

Кров є неньютонівською рідиною і з цим пов'язані певні відмінності потоку крові від потоку такої ньютонівської рідини як вода. Якщо простежити рух води через трубки різних діаметрів, можна впевнитися, що в'язкість води у цьому разі не змінюється. Кров набуває меншої в'язкості при проходженні судин меншого діаметра (рис. 6.4). Пояснити залежність в'язкості від діаметра судини можна тим, що градієнт швидкості спонукає еритроцити концентруватися вздовж осі потоку. Завдяки цьому біля стінок судини утворюються шари крові з меншою в'язкістю, причому розміри цих шарів стають значними відносно загальної перетину трубки зі зменшенням радіуса судини.



*Рис. 6.4. Залежність в'язкості крові від радіуса судини*

## 6.4. РУХ ЕРИТРОЦИТІВ У ПОТОЦІ

Основну масу формених елементів крові складають еритроцити — червоні кров'яні тільця. Еритроцити ссавців — це спеціалізовані без'ядерні клітини, що мають форму двоввігнутого диска (рис. 6.5); у птахів і риб еритроцити містять ядра і мають форму двоопуклого диска.

У кровоносних судинах еритроцити рухаються радіально-кільцевим способом; орієнтацію еритроцитів відносно перерізу судини наведено на рис. 6.6. Крива розподілу швидкостей руху еритроцитів відрізняється більш плоским профілем у центрі судини і крутішим біля стінок. Під час руху у зсувному потоці еритроцити перевертаються; у цьому разі, залежно від швидкості зсуву, вони можуть

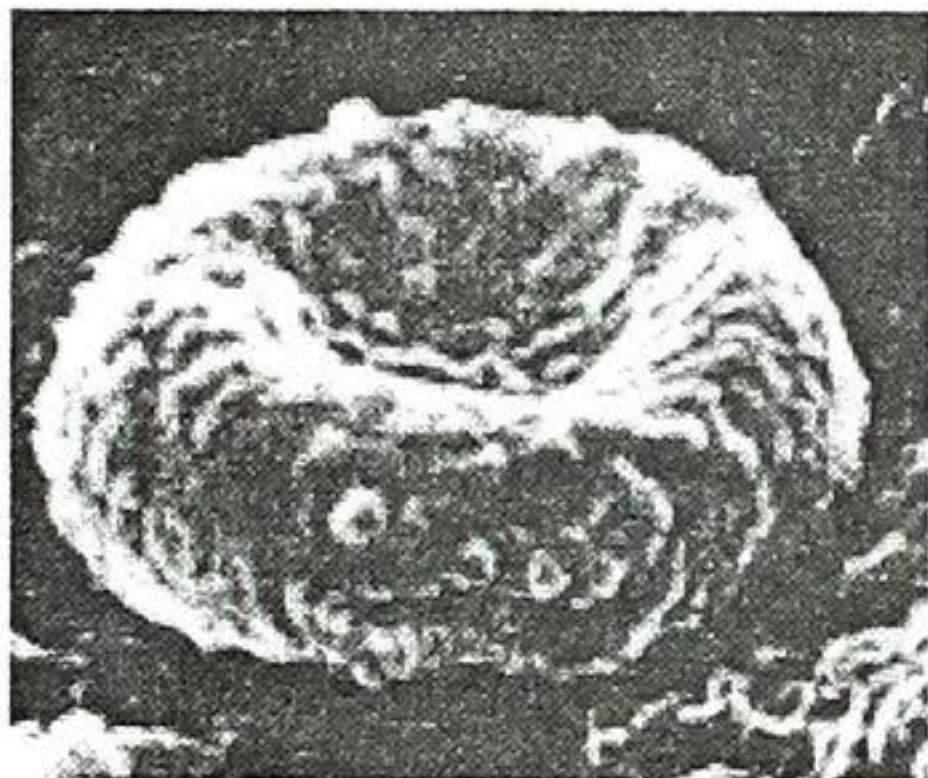
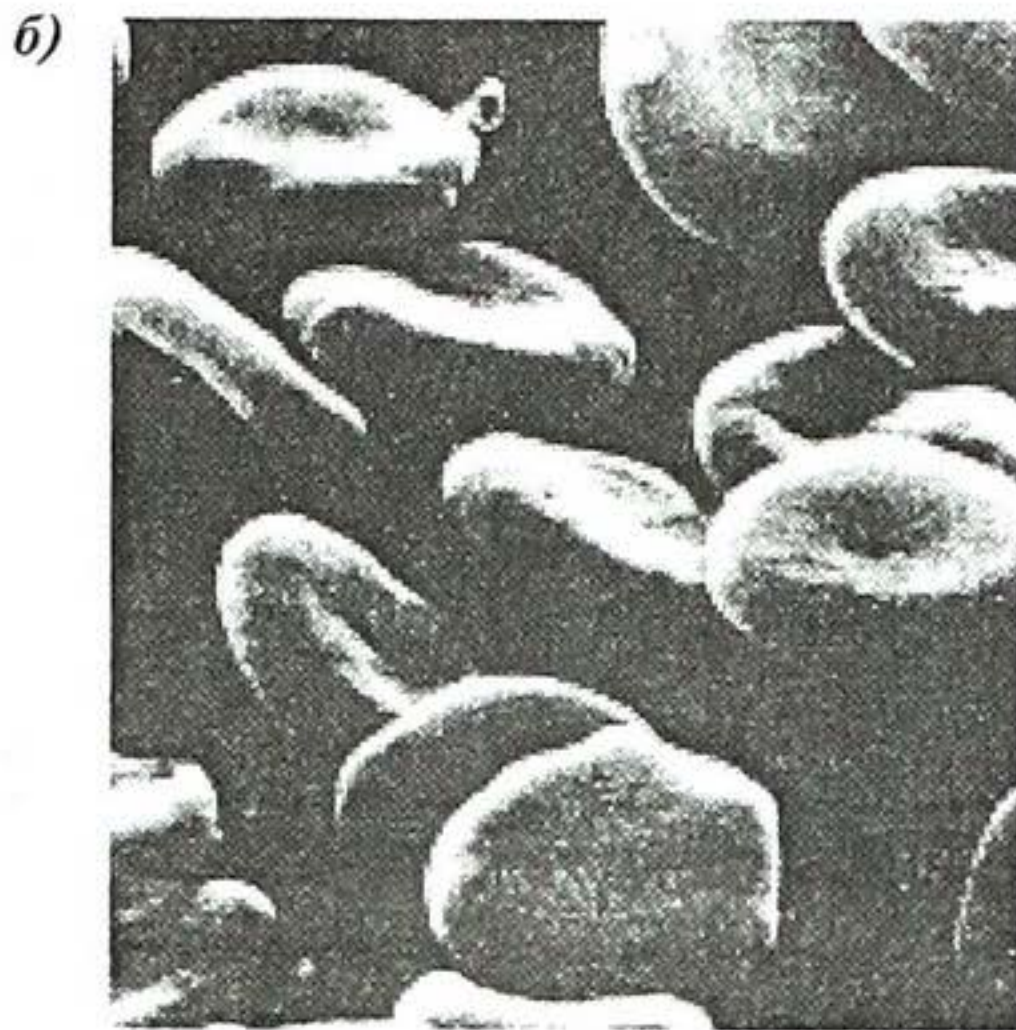
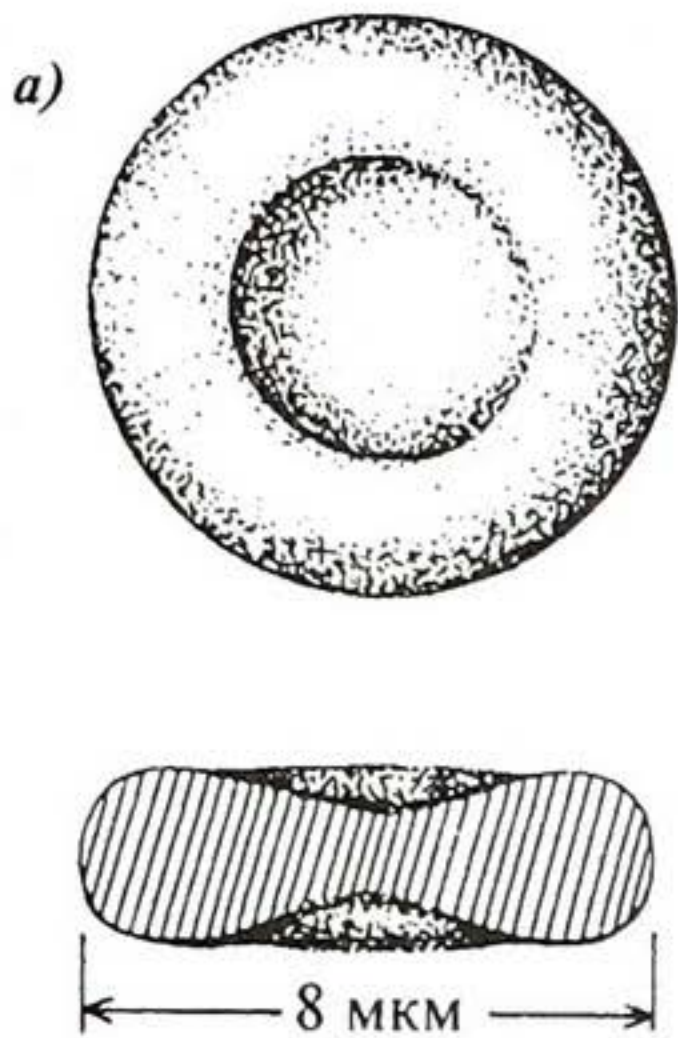


Рис. 6.5. Еритроцити ссавців: а) форма двоввігнутого диска; б) електронна мікрофотограма (збільшення  $\times 4000$ ); в) окремий еритроцит з пористою поверхнею (збільшення  $\times 10000$ )

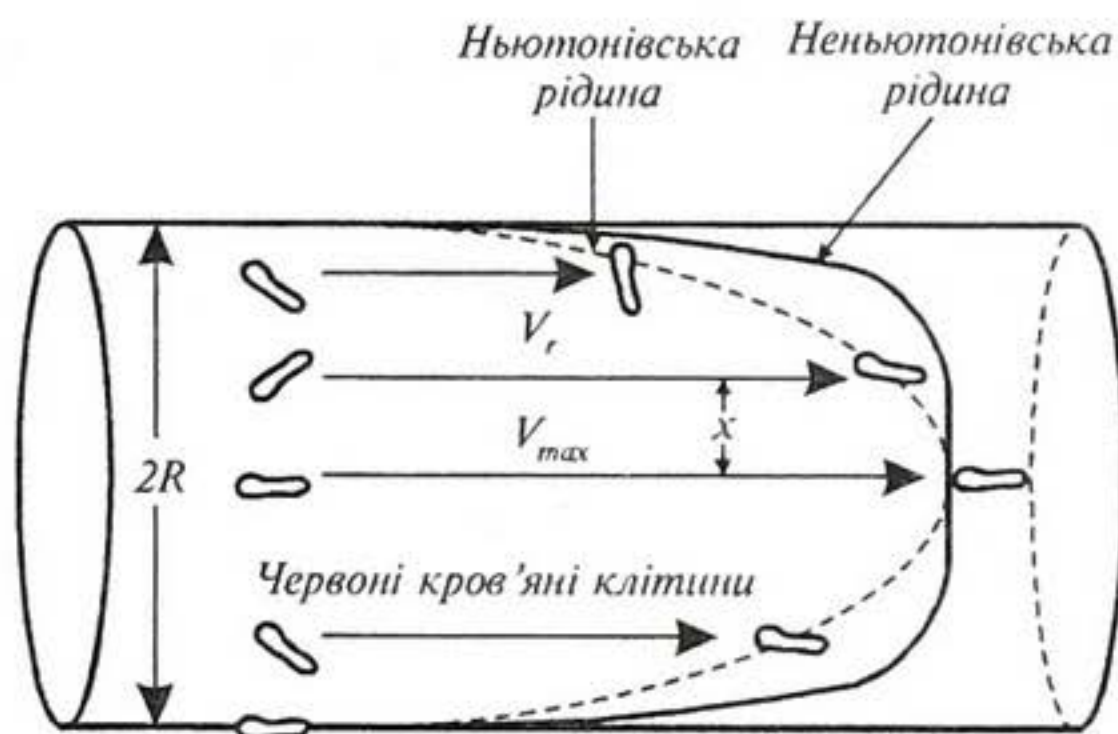


Рис. 6.6. Орієнтація еритроцитів відносно перерізу судини

зазнавати деформації, набуваючи овальної чи видовженої форми за зіткнень між собою та зі стінками.

Швидкість осідання еритроцитів при наближенні їх до сферичної форми (табл. 6.4) визначається за формулою:

$$V = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot g}{\eta} \cdot (\rho_{ep} - \rho_{пл}). \quad (6.12)$$

де  $r$  — радіус сфери;  $\rho_{ep}$  — густина еритроцита;  $\rho_{пл}$  — густина плазми;  $\eta$  — в'язкість плазми.

#### 6.4. Результати приведення форми еритроцитів до сфери

Діаметр еритроцита, мкм	Діаметр приведенного до сфери еритроцита, мкм
5,5	3,60
7,5	4,94
9,5	6,24

### 6.5. ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОСІДАННЯ ЕРИТРОЦИТІВ

Коефіцієнт в'язкості рідини залежить від температури:

$$\eta = a \cdot e^{\frac{b}{T}}, \quad (6.13)$$

де  $a$  і  $b$  — константи,  $T$  — абсолютна температура.

Швидкість осідання еритроцитів  $V$  пов'язана зі в'язкістю крові  $\eta$  залежністю:

$$V \approx \frac{1}{\eta}. \quad (6.14)$$

З урахуванням формул (6.13) та (6.14) можна довести, що швидкість осідання еритроцитів у в'язкій рідині (крові) залежить від температури:

$$V = a \cdot e^{bT}. \quad (6.15)$$

Зміна швидкості осідання частинок при зміні температури визначається із виразу:

$$\ln V_2 - \ln V_1 = b \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right). \quad (6.16)$$

## 6.6. СЕРЦЕ ЯК МЕХАНІЧНА СИСТЕМА. РОБОТА СЕРЦЯ

Серце здійснює роботу, щоб забезпечити необхідний тиск в кровоносній системі. Використовуємо рівняння Бернуллі для оцінки роботи серця. На рис. 6.7 наведено систему вимірювання тисків у лівій частині серця. Робота, що виконується серцем, витрачається на підняття рівня крові, збільшення швидкості її руху та підвищення тиску крові для подолання сил опору в еластичних судинах.

Повна робота, виконувана серцем при перенесенні  $1 \text{ см}^3$  крові, залежить від зміни (рис. 6.7): висоти  $m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$ , тиску

$(m/\rho) \cdot (p_2 - p_1)$  та швидкості течії крові  $\frac{1}{2} \cdot m \cdot (V_2^2 - V_1^2)$ , тобто:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + \frac{m}{\rho} \cdot (p_2 - p_1) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V_2^2 - V_1^2). \quad (6.17)$$

Припустимо, що різниця висот між шлуночком і артеріальною дугою дорівнює  $0,15 \text{ м}$ , швидкість руху крові на цій ділянці становить  $0,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , а густина —  $10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Початкова швидкість до систоли (скорочення м'язів серця) дорівнює нулю. Зазначимо, що артеріальний тиск у здорової людини змінюється від  $80 \text{ мм рт. ст.}$  (діастола) до  $120 \text{ мм рт. ст.}$  (систола). Однак мінімальний тиск, що встановлюється в артеріях, призводить до закриття аортального клапана, коли тиск дорівнює нулю. Отже, різниця тисків становить  $\Delta p = (120 \text{ мм рт. ст.} - 0) = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ .

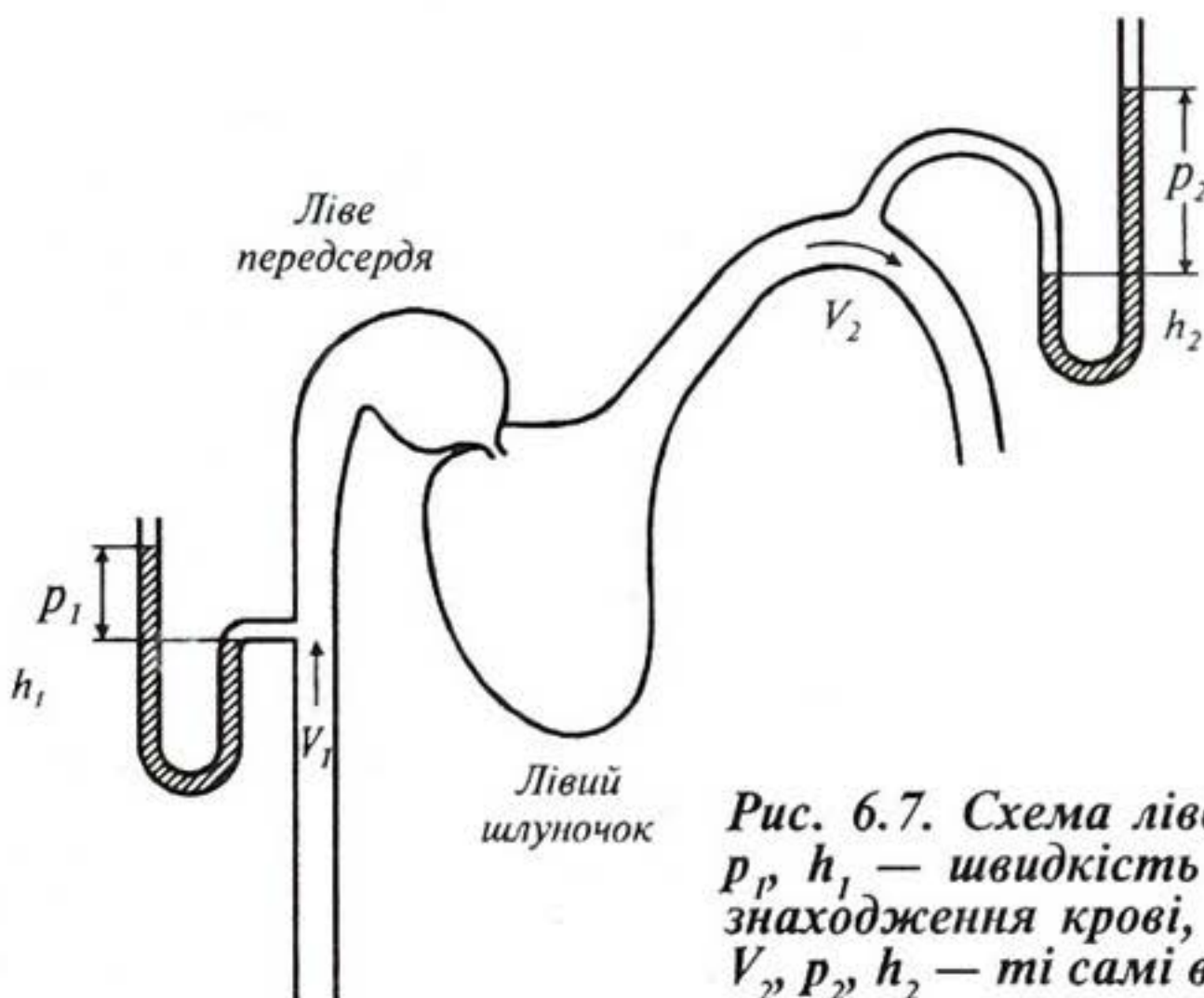


Рис. 6.7. Схема лівої частини серця:  $V_1$ ,  $p_1$ ,  $h_1$  — швидкість руху, тиск і висота знаходження крові, що входить у серце;  $V_2$ ,  $p_2$ ,  $h_2$  — ті самі величини для крові, що залишає серце



Таким чином повна робота, що виконується серцем для перенесення  $1 \text{ см}^3$  крові, дорівнює:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2) + mg(h_2 - h_1) + \frac{m}{\rho}(p_2 - p_1) = \\ &= (1/2) \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot (0,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})^2 + 10^{-3} \cdot 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 0,15 \text{ м} + \\ &\quad + (10^{-3} \text{ кг})(1,6 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}) / (10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}) = \\ &= (1/2) \cdot 0,16 + 1,5 \cdot 10^{-3} + 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4 = 1,76 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Робота серця за одне скорочення, при якому переноситься  $60 \text{ см}^3$  крові, становить

$$A = 1,76 \cdot 10^{-2} \text{ Дж} \cdot 60 \approx 1 \text{ Дж}.$$

До цієї роботи слід ще додати роботу правого шлуночка, який накачує кров у легеневу артерію, при цьому забезпечує тиск близько  $20 \text{ мм рт. ст.}$  ( $2,7 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ ) або  $1/6$  артеріального тиску.

Загальна робота, що виконується серцем за одне скорочення, дорівнює:

$$A_s = (1 + 1/6) \text{ Дж} = 1,17 \text{ Дж}.$$

За добу серце виконує (при пульсі  $60 \text{ хв}^{-1}$ ) роботу:

$$A_d = 1,17 \text{ Дж} \cdot 24 \cdot 3600 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

З урахуванням того, що тривалість систоли близько  $0,3 \text{ с}$ , середня потужність серця за час одного скорочення становить:

$$N = \frac{A_s}{t} \approx 4 \text{ Вт}.$$

## 6.7. ТИСК КРОВІ

Робота серця зумовлює виникненню *артеріального тиску*, який діє на стінки артерій і залежить від рівня стискування крові. Тиск, що виникає при скороченні серця, називається *систолічним*; тиск, що виникає при розслабленні серця, називається *діастолічним*. Артеріальний тиск вимірюється у  $\text{мм. рт. ст.}$  і позначається як відношення систолічного тиску до діастолічного. Залежність тиску крові від часу в процесі роботи серця зображено на рис. 6.8. Видно, що зміни тиску відбуваються від практично нульового рівня до  $120 \text{ мм рт. ст.}$  Різниця між систолічним і діастолічним тисками являє собою *пульсовий тиск*. Типові значення систолічного, діастолічного і пульсового тисків у кровоносній системі тварин наведено у табл. 6.5.

Значні для артеріальної системи зміни тиску крові від систоли до діастоли згладжуються до відносно постійного рівня (рис. 6.9) при проходженні крові через дрібні судини. Пульсова хвиля в кровоносних судинах поширюється зі швидкістю  $5\text{--}10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ; на величину пульсової хвилі впливає процес старіння організму, пов'язаний з погіршен-

6.5. Типові значення тисків у кровоносній системі тварин

Тварина	$P_{max}$ , мм рт.ст.	$P_{min}$ , мм рт.ст.	$\Delta p$ , мм рт.ст.
Кінь	172	123	49
ВРХ	98+128	69+99	29
Свиня	139	99	40
Вівця	151	114	37

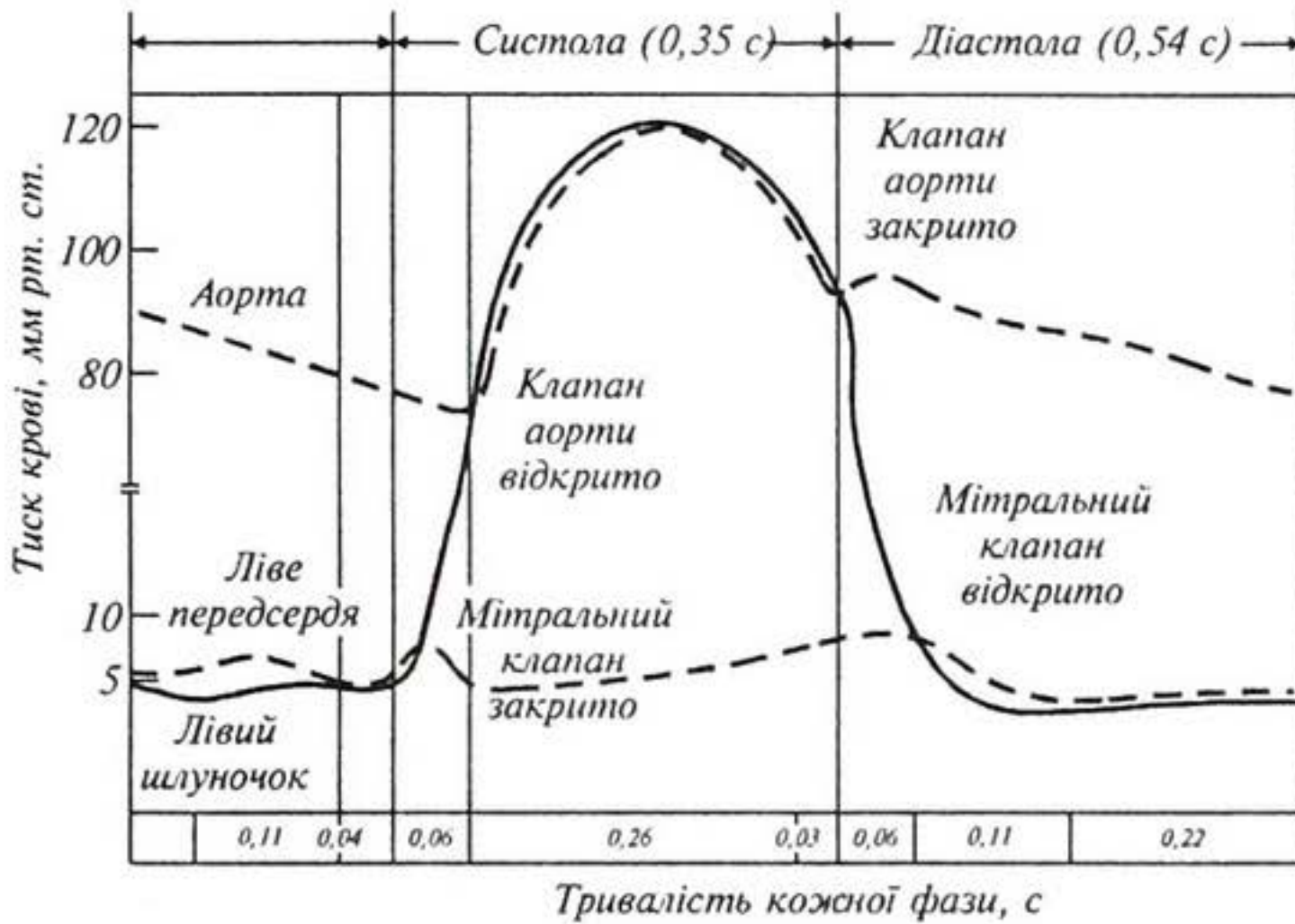


Рис. 6.8. Залежність тиску крові від часу в процесі роботи серця

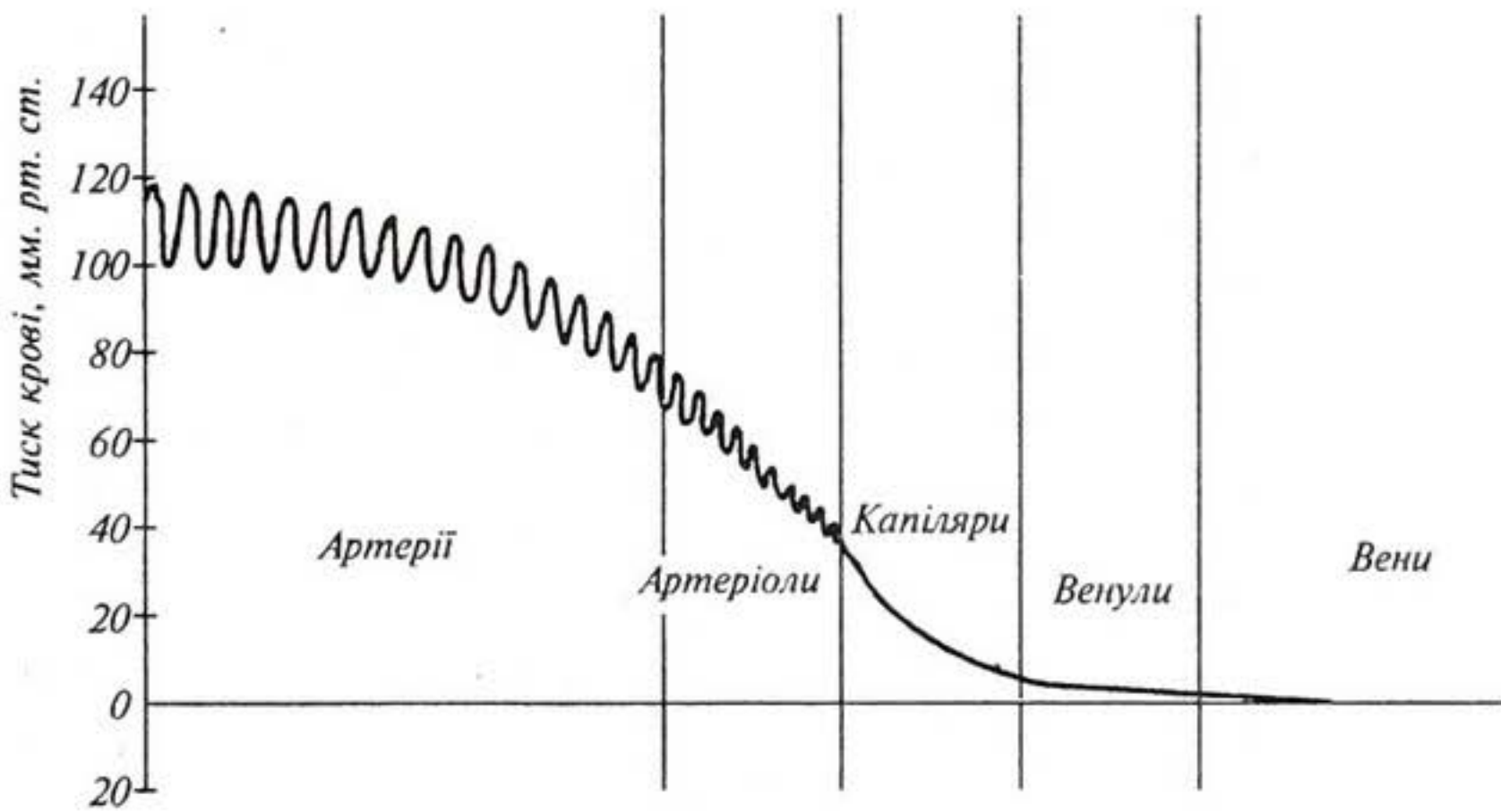


Рис. 6.9. Тиск крові в різних ділянках кровоносної системи

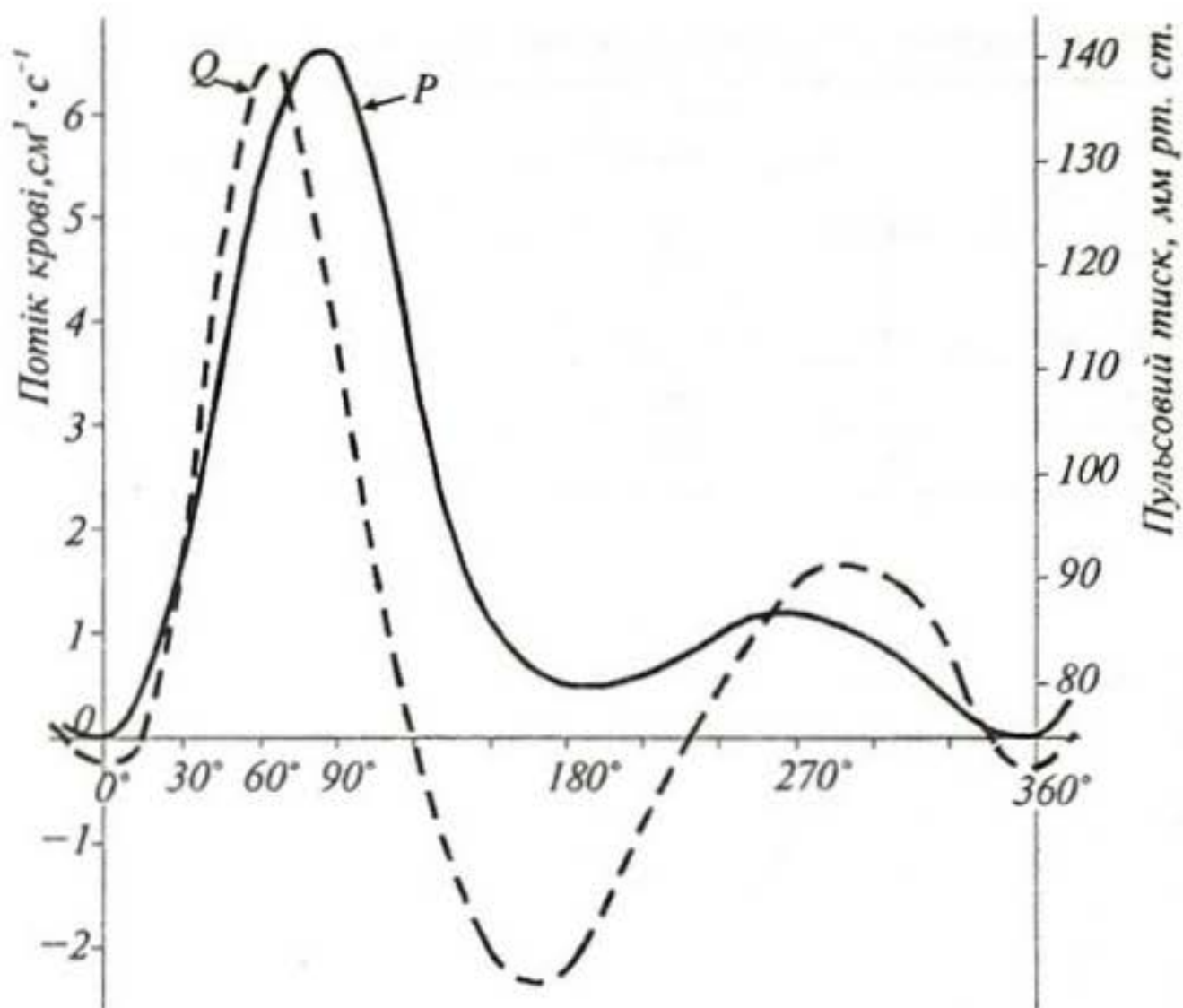


Рис. 6.10. Пульсовий тиск і потік крові в стегновій артерії собаки

ням пружних властивостей стінок кровоносних судин. На рис. 6.10 наведено профілі пульсового тиску і потоку крові в стегновій артерії собаки. Слід зазначити, що максимум потоку випереджує появу максимуму тиску, оскільки потік викликається градієнтом тиску.

## 6.8. ФІЗИЧНІ ЯВИЩА І ПРОЦЕСИ, ЩО ЛЕЖАТЬ В ОСНОВІ ЗАХВОРЮВАНЬ КРОВІ ТА КРОВОНОСНИХ СУДИН

Захворювання крові та ураження стінок кровоносних судин можуть бути пов'язані зі зміною концентрації еритроцитів та їх посиленою агрегацією, що призводить до підвищення в'язкості крові. Зміна кількості еритроцитів у загальному об'ємі крові сприяє захворюванню тварин. Так, збільшення кількості еритроцитів викликає *поліцитемію* — значне збільшення еритроцитів у крові, що може викликати у великої рогатої худоби збільшення гематокриту (сумарного об'єму формених елементів крові відносно всього об'єму крові) від 35% (норма) до 71% та кількості еритроцитів від  $5 \div 7,5$  до  $20 \div 24$  млн/мм<sup>3</sup>. Зменшення кількості еритроцитів або концентрації гемоглобіну в одиниці об'єму крові призводить до такого захворювання як *анемія*. У тварин анемія викликається втратами крові через кровотечі, дію паразитів, прискорення руйнування еритроцитів або вповільнення *еритропоезу* (процесу утворення еритроцитів). У випадку *серпоподібно-клітинної анемії* спостерігають істотне підвищення в'язкості крові при великих швидкостях зсуву. Зовнішній вигляд порушеної форми еритроцитів внаслідок серпоподібно-клітинної анемії наведено на рис. 6.11. Викликається це захворювання наявністю в еритроцитах патологічних гемоглобінів.

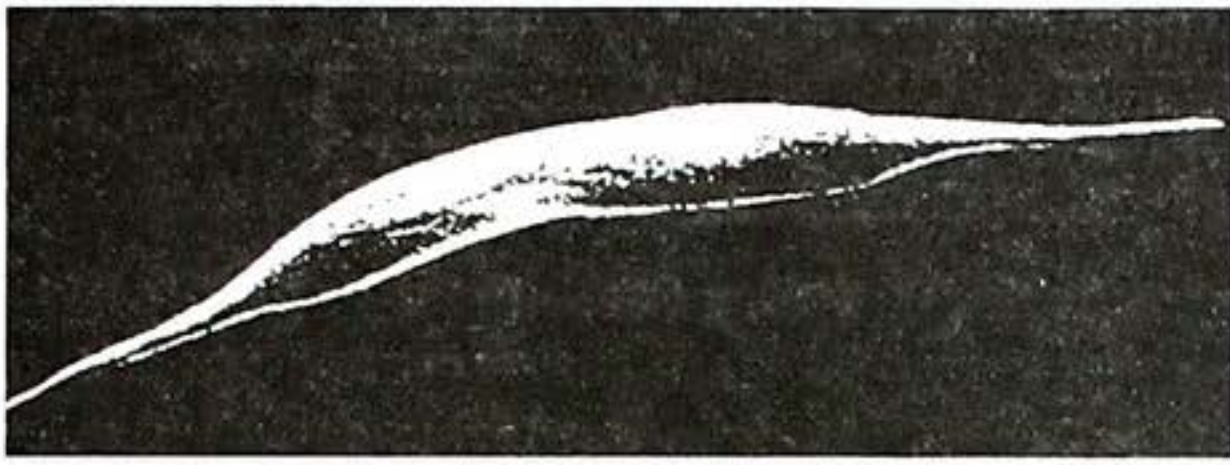


Рис. 6.11. Вигляд порушеної внаслідок серпоподібно-клітинної анемії форми еритроцита

Багато захворювань пов'язано з посиленням агрегації еритроцитів у вигляді так званих монетних стовпчиків або складніших конгломератів (рис. 6.12).

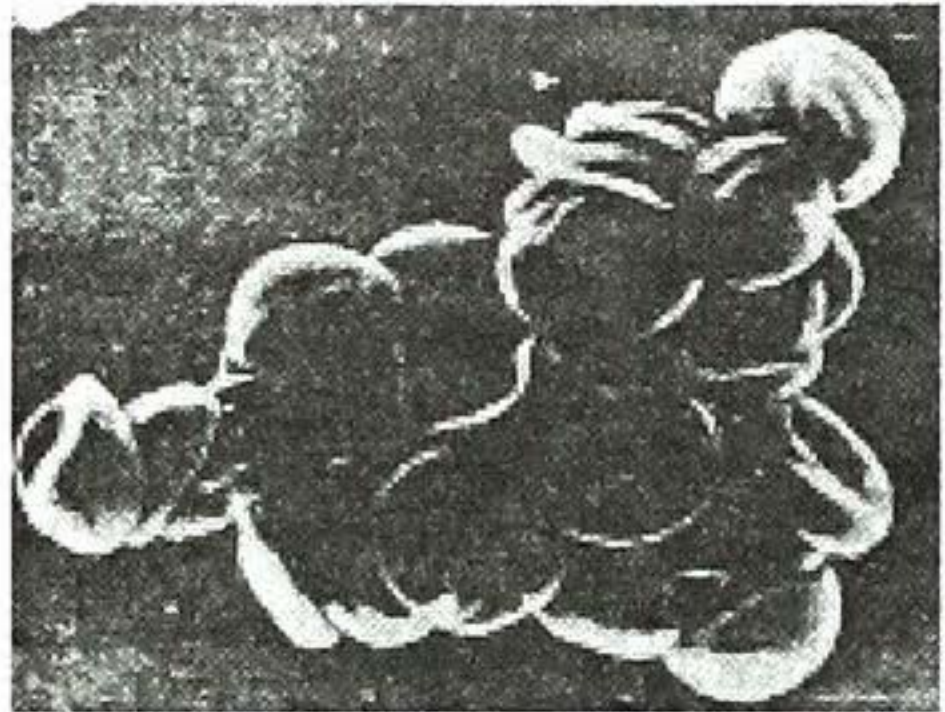
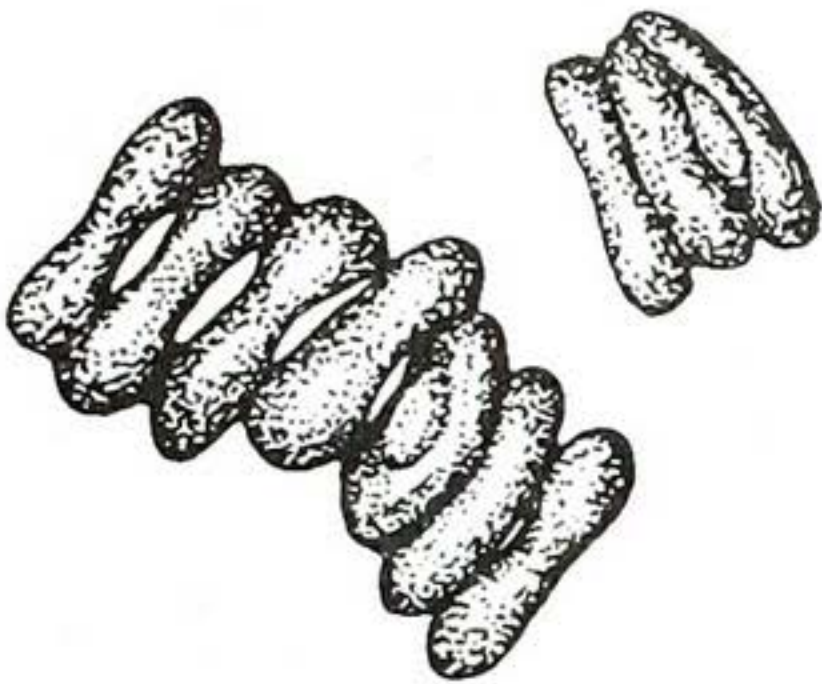


Рис. 6.12. Агрегація еритроцитів

Руйнування оболонки еритроцитів та вихід із них гемоглобіну у плазму називається *гемолізом*. Причиною цього явища можуть бути хімічні речовини, механічні подразнення, зміна осмотичного тиску, дія випромінювання рентгенівського або ультрафіолетового діапазонів, процедура переливання крові.

Розглянемо фізичні принципи захворювань кровоносних судин, пов'язаних з ущільненням судини за утворення на внутрішній стінці кров'яних згустків або дифузним розширенням отвору внаслідок патологій стінок.

*Тромбоз.* Утворення ущільнених мас крові або лімфи, що зсілися, в кровоносній системі призводить до зменшення перерізу судини. Це зменшення величини перерізу  $S$  судини супроводжується збільшенням швидкості  $V$  течії крові у місцях меншого перерізу (рис. 6.13) згідно з рівнянням нерозривності потоку  $S = \frac{const}{V}$ ; збільшення швидкості  $V$  течії призводить до зменшення статичного тиску  $p$  відповідно до рівняння Бернуллі  $p + \frac{\rho \cdot V^2}{2} = const$ . Зменшення цього тиску нижче певного рівня призводить до за-

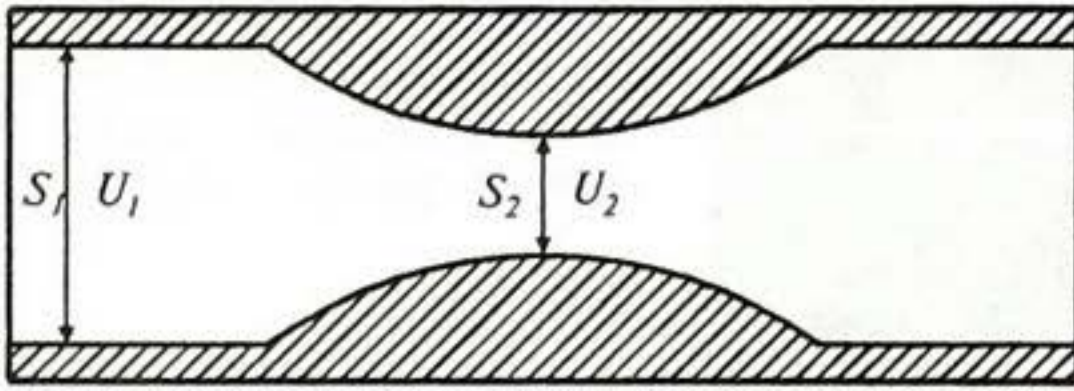


Рис. 6.13. Звуження кровоносної судини внаслідок тромбозу

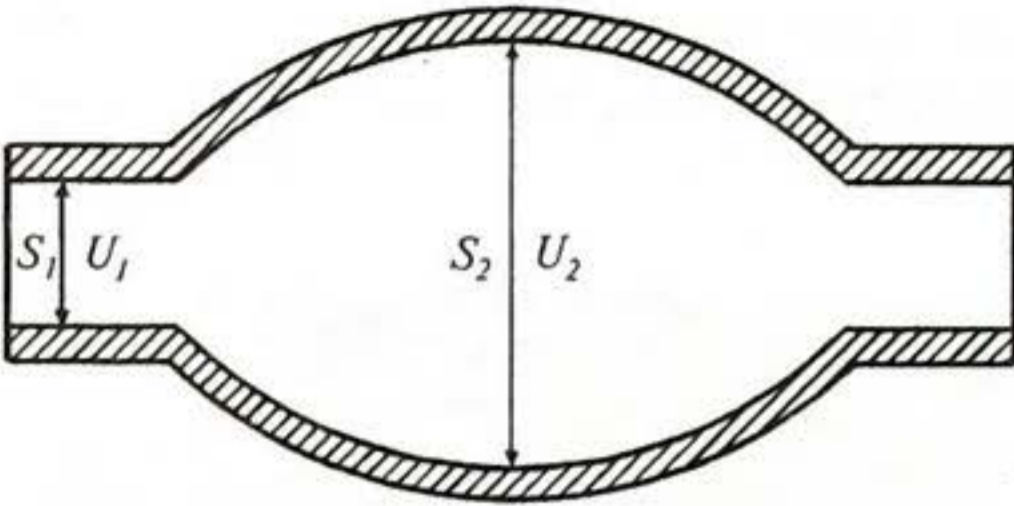


Рис. 6.14. Розширення перерізу кровоносної судини внаслідок аневризми

купорювання судини. Але через це кінетична енергія крові, що рухається, збільшується, і отвір судини збільшується. Виникають зміни стінок кровоносної судини, які викликають болісні відчуття.

**Аневризма.** При розширенні перерізу  $S$  судини внаслідок патоморфологічних змін в стінках (рис. 6.14) швидкість течії  $V$  зменшується (рівняння нерозривності потоку), але статичний тиск  $p$  збільшується (рівняння Бернуллі). Цей надлишковий тиск може

призвести до крововиливу. Процеси, що відбуваються у судині внаслідок аневризми, можна розглянути з позицій пружних властивостей судини.

Рівняння Лапласа (5.24) для трубки циліндричної форми потребує заміни  $a \rightarrow \sigma$  і  $R_1 \rightarrow \infty$ , тобто

$$\Delta p = \frac{\sigma}{R}, \quad (6.18)$$

де  $\Delta p$  є тиск, з яким рідина діє на трубку,  $\sigma$  — напруження в стінці на одиницю довжини,  $R$  — радіус трубки.

Звідси

$$\sigma = \Delta p \cdot R. \quad (6.19)$$

Графік залежності  $\sigma$  від  $R$  наведено на рис. 6.15. Але кровоносна судина містить в собі пружні матеріали, зокрема білки еластин і колаген. Через це залежність  $\sigma(R)$  має криволінійну форму (рис. 6.16). Перетин графіків  $\sigma(R)$  для циліндричної трубки і еластичної кровоносної судини дає значення  $\sigma_1$  і  $R_1$ , що відповідають стабільній ситуації (рис. 6.17). З послабленням пружних властивостей крива залежності  $\sigma(R)$  пересувається за годинниковою стрілкою; значення стабільного радіуса кривизни збільшується (рис. 6.18). Подальше зменшення пружності судини може призвести до ситуації, коли два графіки  $\sigma(R)$  (трубки і судини) не перетинатимуться (рис. 6.19). Це відбувається, коли залежність  $\sigma(R)$  набуває максимального нахилу:

$$\left( \frac{d\sigma}{dR} \right)_{max} = \Delta p_{max}. \quad (6.20)$$

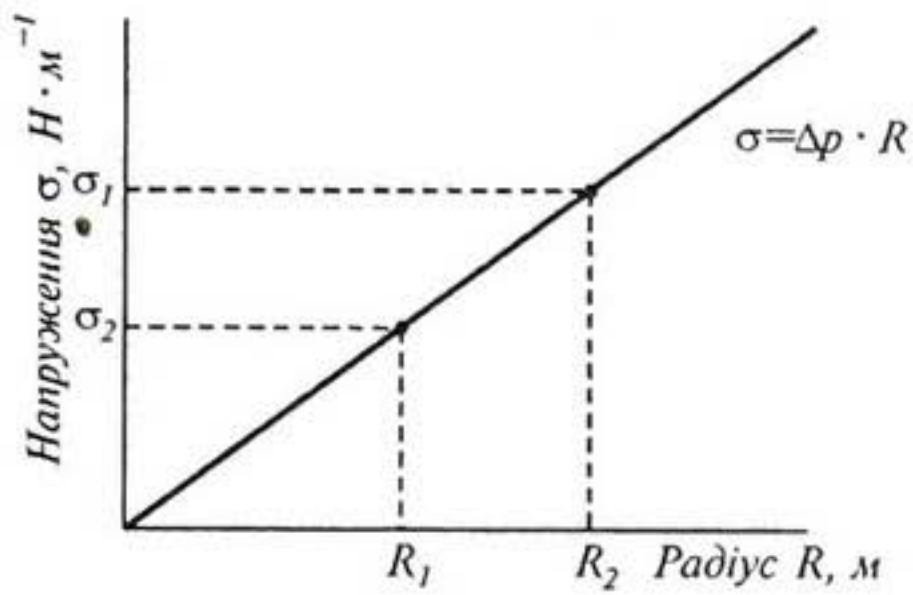


Рис. 6.15. Залежність напруження  $\sigma$  від радіуса  $R$  трубки циліндричної форми

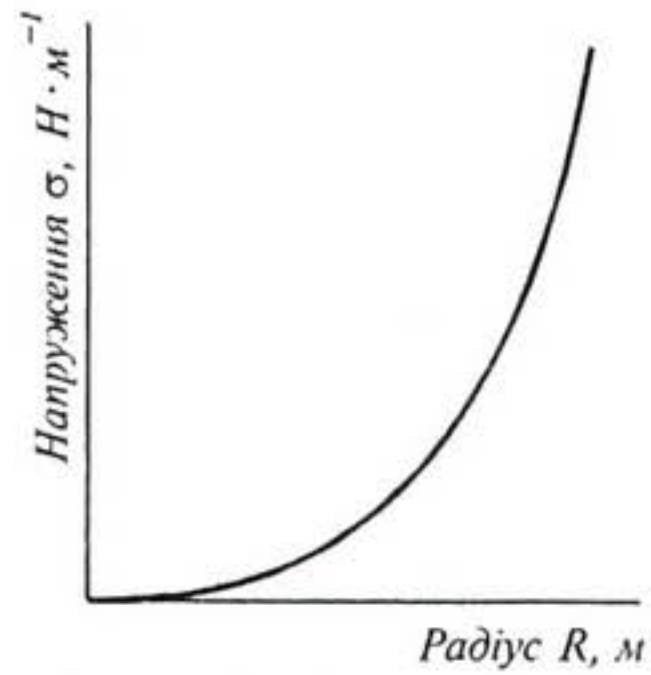


Рис. 6.16. Залежність напруження  $\sigma$  від радіуса  $R$  нормальної еластичної артерії

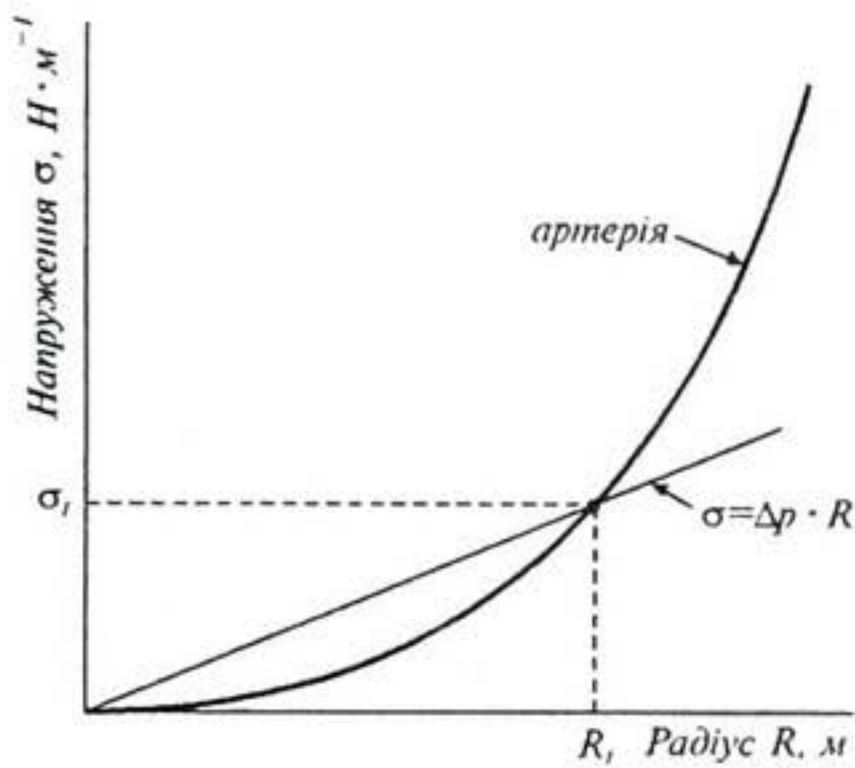


Рис. 6.17. Знаходження значень  $\sigma_1$  і  $R_1$ , що відповідають стабільній ситуації, на перетині графіків  $\sigma(R)$  для циліндричної трубки і еластичної кровоносної судини

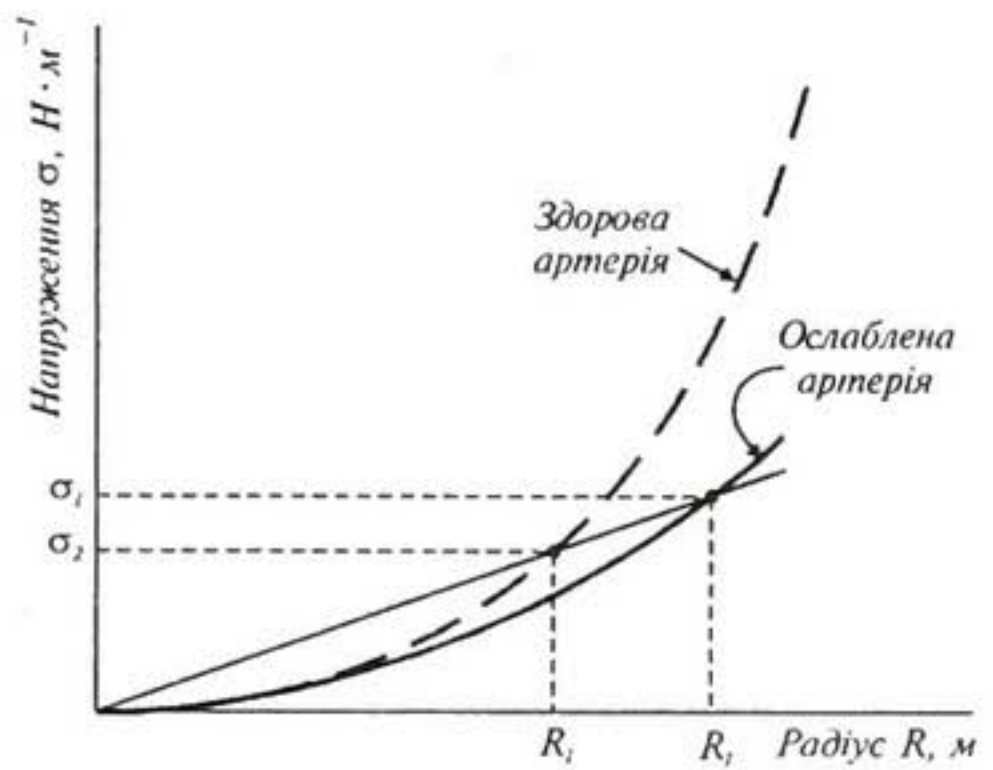


Рис. 6.18. Вплив зниження пружних властивостей судини на характер залежності  $\sigma(R)$

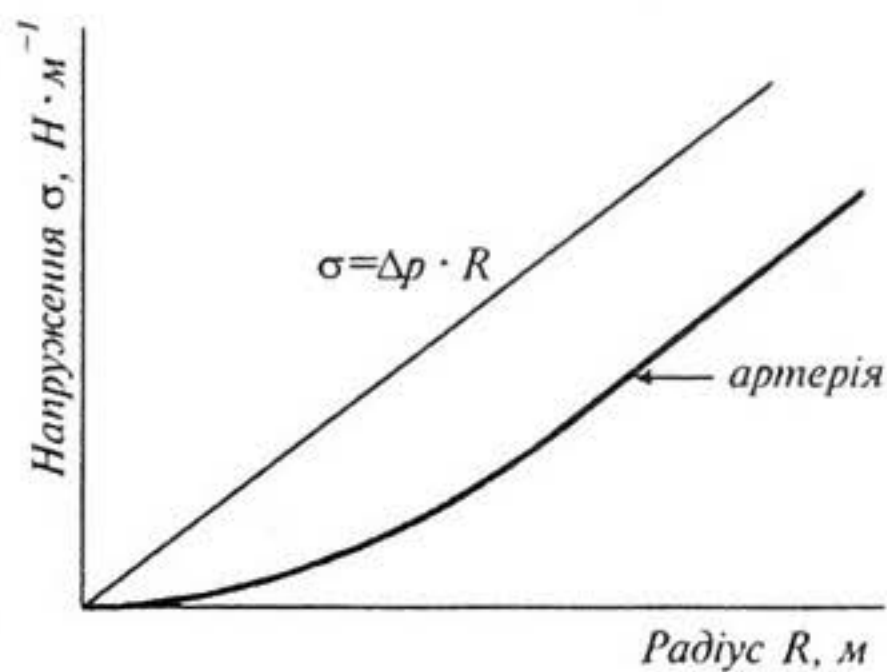


Рис. 6.19. Відсутність перетинання графіків  $\sigma(R)$  для циліндричної трубки і еластичної кровоносної судини

Згадаємо закон Гука:

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta x}{x}, \quad (6.21)$$

який для еластичної судини можна подати так:

$$\frac{d\sigma}{t} = E \frac{dR}{R_0}, \quad (6.22)$$

де  $t$  — товщина стінки судини,  $R_0$  — радіус судини у нормальному стані.  
Звідси

$$\left( \frac{d\sigma}{dR} \right)_{max} = \frac{E_{max} t}{R_0} = \Delta p_{max}. \quad (6.23)$$

Якщо використати експериментально отримані дані  $E_{max} = 7 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ ,  $R_0 = 0,35 \text{ см}$ ,  $t = 0,07 \text{ см}$ , то тиск, необхідний для аневризми, становитиме  $1,4 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$  (більше 1 атмосфери). Цей тиск значно перевищує систолічний тиск, який утворює серце.

*Газова емболія.* У кровоносній судині, в якій з певних причин (наприклад, унаслідують кесонної хвороби) утворилась бульбашка газу, за потоку форма бульбашки спотворюється — ліва й права півсфери мають різні за величиною радіуси кривизни (рис. 6.20). Отже, згідно з рівнянням Лапласа, додаткові тиски, зумовлені поверхневим натягом рідини на лівій та правій межах поділу, будуть відрізнятися. Ця різниця тисків може призвести до розриву або закупорювання судини.

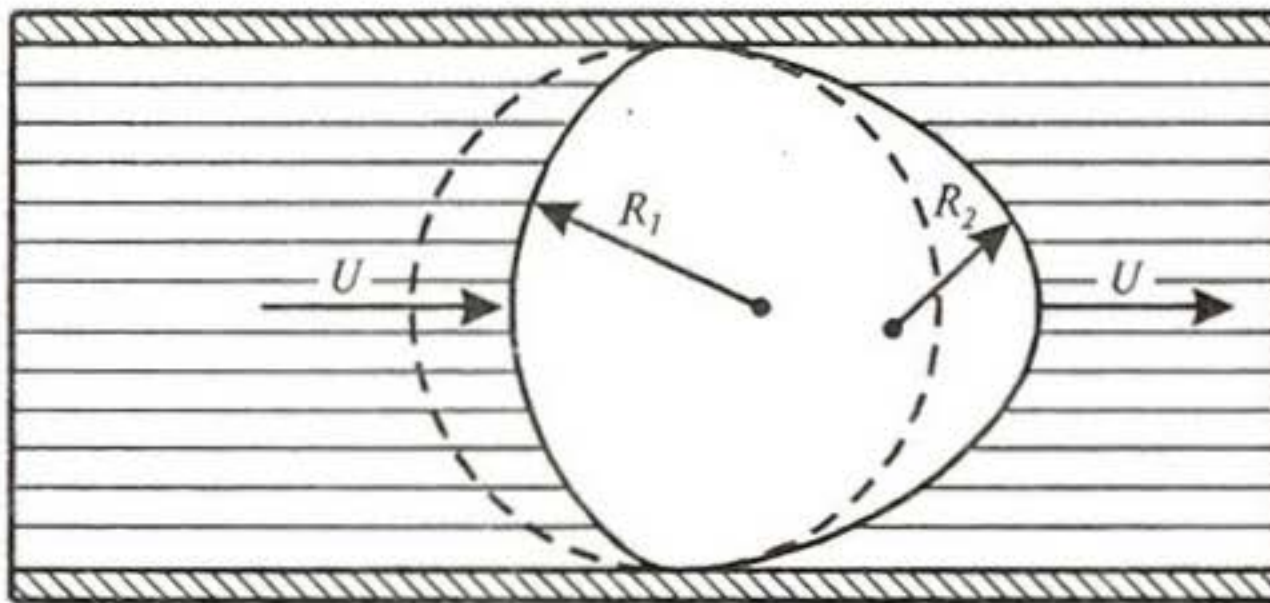


Рис. 6.20. Виникнення газової емболії за руху крові в судині, що зумовила деформацію бульбашки газу ( $R_1 \neq R_2$ ), різницею тисків і розрив судини

## 6.9. ПОВЕРХНЕВІ ЯВИЩА В ЛЕГЕНЯХ

Поверхня легень має специфічну рельєфну форму і велику площу для забезпечення кращого газообміну. Так, у легенях дорослої людини міститься близько 300 мільйонів альвеол, а загальна площа легень становить  $70 \div 80 \text{ м}^2$ . Зображення елементарної структури легень (аль-

веоли) наведено на рис. 6.21. Під час нормального функціонування легень цей значний тиск компенсується поверхневим натягом, що виникає на поверхні легень. В альвеолах легень у поверхневому шарі є моношар *антиателектатичного фактора (сурфаканта)* — поверхнево-активної речовини фосфоліпідної природи, що не дає змоги альвеолам спадати при видиху. Якщо в легенях новонароджених не вистачає сурфаканта, може виникнути підвищення поверхневого натягу, що призводить до небезпечного респіраторного захворювання — *гіаліново-мембранної хвороби новонароджених*. Запобігти цьому захворюванню можна за внесення поверхнево-активних речовин, що зменшують поверхневий натяг. Однією з таких речовин є *фосфатидилхолін*, молекули якого складаються з гідрофільних полярних головок і гідрофобних ланцюгів жирних кислот. Полярні головки перебувають у контакті з водою, тоді як жирні кислоти залишаються у повітрі (рис. 6.22). Результатом дії такого молекулярного шару є зменшення коефіцієнта поверхневого натягу від  $70 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$  до  $30 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$ .

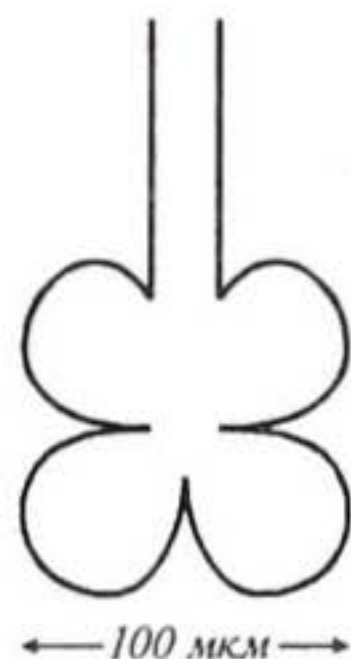


Рис. 6.21. Елементарна структура легень альвеола

Гідрофобні ланцюги  
жирних кислот

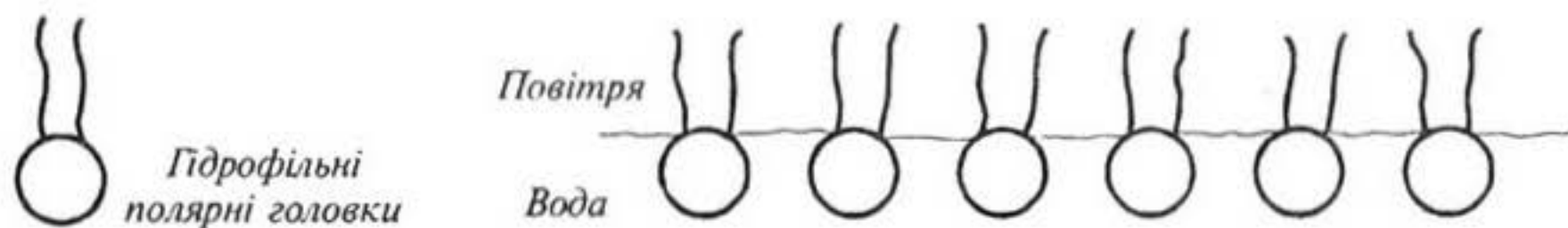


Рис. 6.22. Розташування гідрофільних полярних головок і гідрофобних ланцюгів жирних кислот на межі поділу «повітря-вода»

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Кров в артерії діаметром 0,6 мм тече зі швидкістю  $0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Артерія переходить у  $n$  капілярів діаметром  $8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ . Швидкість руху крові у капілярі становить  $10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Чому дорівнює кількість капілярів?

### Розв'язок

Середній об'ємний потік  $Q_a$  крові в артерії визначається виразом:

$$Q_a = S_a \cdot V_a,$$

де  $S_a$  — площа перерізу артерії,  $V_a$  — швидкість руху крові по артерії.

Середній об'ємний потік  $Q_x$  крові у капілярі пов'язаний з  $Q_a$  співвідношенням:

$$Q_a = n \cdot Q_x,$$



де  $n$  — кількість капілярів.

Використовуючи закон нерозривності потоку (рівняння (5.2)), отримуємо:

$$S_a \cdot V_a = n \cdot S_k \cdot V_k,$$

або

$$\frac{\pi \cdot D_a^2}{4} \cdot V_a = n \cdot \frac{\pi \cdot D_k^2}{4} \cdot V_k.$$

Звідси

$$n = \frac{D_a^2 \cdot V_a}{D_k^2 \cdot V_k}.$$

Підставляємо числові значення:

$$n = \frac{(0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2 \cdot 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{(8 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}} = 5,6 \cdot 10^5.$$

### Приклад

Середній об'ємний потік крові, що рухається в артеріальній системі, становить  $8,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , а площа поперечного перерізу аорти становить  $10^{-4} \text{ м}^2$ . Знайти лінійну швидкість руху крові в аорті і середню кінетичну енергію, що припадає на одиницю об'єму крові. Густина крові  $1052 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

### Розв'язок

Лінійну швидкість можна знайти з рівняння (6.3):

$$V = \frac{Q}{S}.$$

Підставляємо числові дані:

$$V = \frac{8,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}}{10^{-4} \text{ м}^2} = 8,49 \cdot 10^{-1} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Середню кінетичну енергію можна визначити за виразом:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2,$$

Підставляємо числові дані:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot 1052 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot (8,49 \cdot 10^{-1} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})^2 = 379 \text{ Дж}.$$

### Приклад

Визначити швидкість осідання еритроцитів діаметром  $5,5 \text{ мкм}$ , якщо в'язкість плазми при температурі  $15^\circ\text{C}$  становить  $0,0228 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Густина одиничного еритроцита  $\rho_{ep} = 1,09 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ , густина плазми  $\rho_{pl} = 1,03 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ .

### Розв'язок

Використовуючи дані табл. 6.4, знайдемо, що еритроциту діаметром  $5,5 \text{ мкм}$  відповідає сфера діаметром  $3,6 \text{ мкм}$ . Швидкість осідання еритроцитів при наближенні їх до сферичної форми визначається за формулою:

$$V = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot g}{\eta} \cdot (\rho_{ep} - \rho_{кл}).$$

Підставляємо числові значення:

$$V = \frac{2}{9} \frac{(1,8 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 10 \frac{M}{c^2} \cdot (1,09 - 1,03) \cdot 10^3 \frac{Kz}{M^3}}{0,0228 \cdot 10^{-1} \frac{Kz}{M \cdot c}} =$$

$$= 1,895 \cdot 10^{-7} \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1} = 0,6822 \text{ мм} \cdot \text{з}^{-1}.$$

### Контрольне завдання № 6.1

Використовуючи дані, наведені в табл.5.1 і табл.6.4, визначити швидкість осідання еритроцитів діаметром 9,5 мкм при температурі 20°C.

*Відповідь:* 2,74 мм · г<sup>-1</sup>.

### Приклад

Визначити роботу серця, якщо різниця висот між шлуночком і дугою аорти становить 15 см, швидкість течії крові у цій точці дорівнює 40 см · с<sup>-1</sup>, густина крові — 1 г · см<sup>-3</sup>. Прийняти початкову швидкість перед систолою рівною нулю, артеріальний тиск протягом діастолі — 80 мм рт.ст., протягом систолі — 120 мм рт.ст.

### Розв'язок

Підставляємо числові дані у рівняння (6.17):

$$A = 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot (0,15) + \frac{10^{-3}}{10^3} \cdot \left( \frac{120 - 80}{760} \cdot 1,013 \cdot 10^5 \right) +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot 10^{-3} \cdot (0,4 - 0)^2 = 0,01755 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Якщо припустити, що середній об'єм крові, що переноситься за одне скорочення, становить 60 см<sup>3</sup>, то робота за переносу цього об'єму буде дорівнювати:

$$A' = A \cdot 60 \cong 0,01755 \cdot 60 = 1,053 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тиск у правому шлуночку становить 20 мм рт.ст. або 1/6 тиску в аорті. Таким чином, повна робота, що виконується серцем за одне скорочення, становить:

$$A'' \cong 1 \text{ Дж}.$$

### Контрольне завдання № 6.2

Визначити роботу, яку виконує серце коня за добу, якщо артеріальний тиск протягом діастолі становить 70 мм рт. ст., а протягом систолі — 130 мм рт. ст. Середній об'єм крові, що переноситься за один удар, дорівнює 850 мл, а середня швидкість течії крові — 0,5 м · с<sup>-1</sup>. Припустити, що порожня вена та аорта знаходяться на одному рівні ( $h_1 = h_2 = 0$ ).

*Відповідь:* 5,9 · 10<sup>5</sup> Дж.

### Приклад

Визначити надлишковий тиск, що виникає в аорті діаметром 10 мм при її розширенні до 15 мм, якщо швидкість руху крові  $40 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

### Розв'язок

Запишемо рівняння нерозривності потоку у такій формі:

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2,$$
$$\frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot V_1 = n \cdot \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot V_2,$$

звідки

$$\frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2.$$

Використовуючи рівняння Бернуллі для горизонтальної трубки, отримаємо:

$$p_1 + \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \cdot V_2^2}{2},$$

Звідки

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2} \cdot (V_1^2 - V_2^2) = \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} \cdot \left( 1 - \frac{V_2^2}{V_1^2} \right).$$

Комбінуючи рівняння нерозривності потоку і рівняння Бернуллі, можна отримати:

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^4 \right].$$

Підставляємо числові значення:

$$\Delta p = \frac{10^3 \cdot 0,4^2}{2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{10}{15} \right)^4 \right] = 13 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2} \sim 0,1 \text{ мм рт.ст.}$$

### Контрольне завдання № 6.3

Визначити надлишковий тиск, що виникає у вені з площею поперечного перерізу  $10^{-4} \text{ м}^2$  при її розширенні до  $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , якщо швидкість руху крові у ній дорівнює  $2 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

*Відповідь:*  $1,9 \cdot 10^{-1} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ .

### Приклад

На скільки зменшиться тиск крові в артерії при досягненні нею місця, де артерія звужується внаслідок атеросклеротичних явищ до  $1/5$  площі нормального перерізу. Нормальний тиск крові в артерії 100 мм рт.ст., швидкість руху крові  $0,10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

### Розв'язок

Запишемо рівняння Бернуллі для артерії перерізом  $S_1$ , що звужується до перерізу  $S_2$ :

$$p_1 + \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \cdot V_2^2}{2},$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} \cdot (V_2^2 - V_1^2).$$

Згідно з законом нерозривності потоку

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2,$$

або

$$V_2 = 5 \cdot V_1.$$

Комбінуючи останні рівняння, отримаємо:

$$\Delta p = 12 \cdot \rho \cdot V_1^2 = 12 \cdot 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot (0,10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})^2 = 120 \text{ Па}.$$

Враховуючи, що нормальний тиск крові в артерії становить  $p = 100$  мм рт.ст., визначимо тиск  $p_1$  як:

$$p_1 = \rho \cdot g \cdot h = 136000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 0,1 \text{ м} = 13600 \text{ Па}.$$

Відносне зменшення тиску дорівнюватиме:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{120}{13600} \cdot 100 = 0,88\%.$$

### Приклад

Визначити, в скільки разів зміниться додатковий тиск, зумовлений поверхневим натягом крові на лівій і правій межах поділу повітряної бульбашки, яка виникає при газовій емболії, якщо лівий радіус кривизни збільшився, а правий — зменшився на 25% (рис. 6.20).

### Розв'язок

Використовуючи формулу Лапласа, визначимо додатковий тиск, що виникає на лівій і правій межах поділу:

$$\Delta p_s = \pm \frac{2 \cdot \sigma}{R + \Delta R},$$

$$\Delta p_n = \pm \frac{2 \cdot \sigma}{R - \Delta R}.$$

Відношення додаткових тисків становить:

$$\frac{\Delta p_s}{\Delta p_n} = \frac{R + \Delta R}{R - \Delta R} = \frac{R \cdot \left(1 + \frac{\Delta R}{R}\right)}{R \cdot \left(1 - \frac{\Delta R}{R}\right)} = \frac{1 + \frac{\Delta R}{R}}{1 - \frac{\Delta R}{R}}.$$

Підставляємо числові значення:

$$\frac{\Delta p_s}{\Delta p_n} = \frac{1 + 0,25}{1 - 0,25} = 1,67.$$

### Контрольне завдання № 6.4

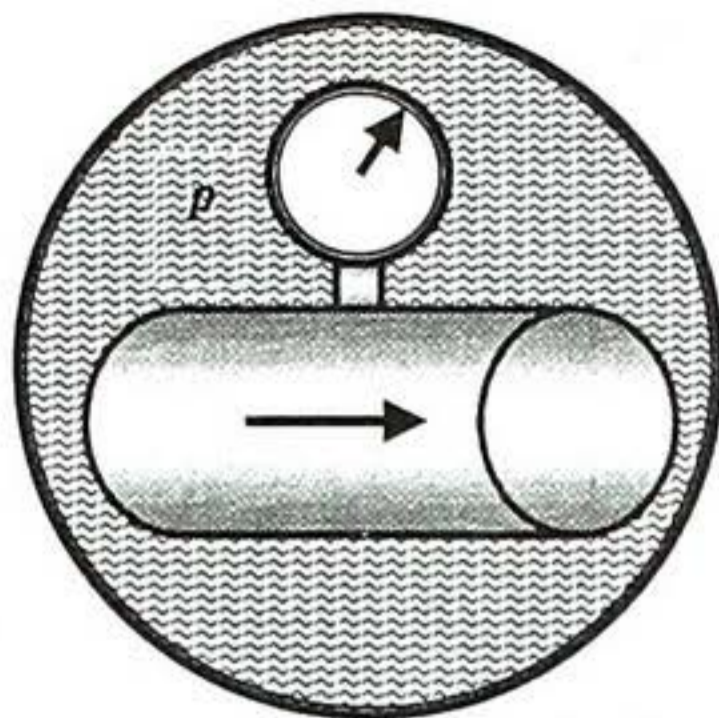
Середній радіус альвеоли становить близько  $5 \cdot 10^{-5}$  м. Визначити додатковий тиск, викликаний кривизною альвеоли, якщо коефіцієнт поверхневого натягу плазми  $50 \cdot 10^{-3}$  Н · м<sup>-1</sup>.

*Відповідь:*  $2 \cdot 10^3$  Н · м<sup>-2</sup>.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Пояснити, чому еритроцит має тороїдальну форму?
2. Що називають середнім об'ємним потоком рідини, що рухається в трубці?
3. Пояснити фізичні принципи вимірювання швидкості осідання еритроцитів.
4. Від чого залежить робота серця?
5. Пояснити фізичні принципи захворювання на тромбоз.
6. Пояснити фізичні принципи захворювання на аневризму.
7. Пояснити фізичні принципи захворювання на газову емболію.
8. До чого призводить підвищення поверхневого натягу на поверхні легень?

# 7. ПРИКЛАДНА ГІДРОДИНАМІКА ТА ГЕМОДИНАМІКА



## 7.1. УЛЬТРАЦЕНТРИФУГУВАННЯ

Техніка відокремлення компонентів складних речовин і отримання однорідних фракцій називається *ультрацентрифугуванням*.

Розглянемо частинку масою  $m$  і густиною  $\rho$ , занурену у рідке середовище з густиною  $\rho_0$ . На цю частинку діють гравітаційна сила

$$F_{zp} = mg = V\rho g, \quad (7.1)$$

спрямована донизу, і архімедова сила

$$F_0 = m_0 g = V\rho_0 g, \quad (7.2)$$

спрямована догори, що чисельно дорівнює вазі  $m_0 g$  рідини, виштовхнутої частинкою. Результуюча сила дорівнює:

$$F_s = F_{zp} - F_0 = V\rho g - V\rho_0 g = Vg(\rho - \rho_0). \quad (7.3)$$

Якщо  $\rho < \rho_0$ , результуюча сила спрямована догори (процес *випливання*); якщо  $\rho > \rho_0$ , результуюча сила спрямована донизу (процес *седиментації*).

У той же час рідке середовище характеризується в'язкістю (внутрішнім тертям). Якщо рухається частинка сферичної форми радіуса  $r$ , сила опору, зумовлена в'язкістю, визначається за законом Стокса:

$$F_\eta = 6\pi\eta r V \quad (7.4)$$

і швидкість седиментації визначиться так:

$$\begin{aligned} V_{сед} &= Vg(\rho - \rho_0)/6\pi\eta r = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \\ &= \frac{2}{9} g(\rho - \rho_0) r^2 / \eta. \end{aligned} \quad (7.5)$$

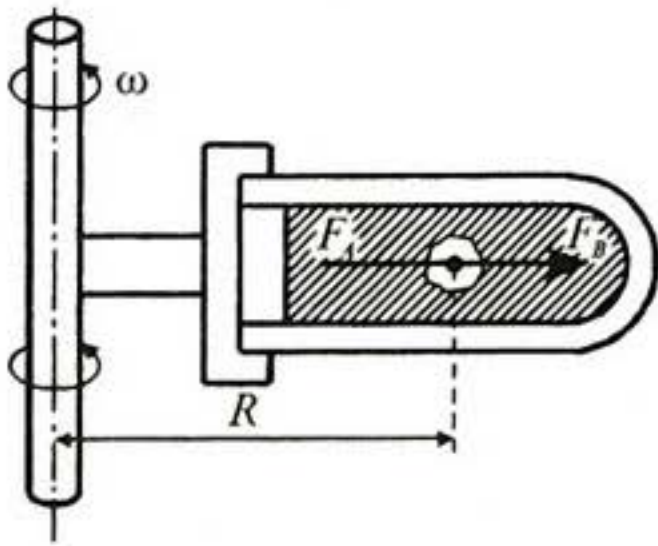


Рис. 7.1. Пробірка з розчином частинок, що обертається навколо вертикальної осі з кутовою швидкістю  $\omega$

Слід підкреслити, що субклітинні структури характеризуються настільки малою швидкістю седиментації у гравітаційному полі Землі, що очікувати седиментацію цих структур доводиться протягом місяців або років. Для прискорення процесу седиментації використовують техніку ультрацентрифугування.

Розглянемо пробірку з розчином частинок, яка обертається навколо вертикальної осі з кутовою швидкістю  $\omega$  (рис. 7.1). На частинку діє доцентрова сила  $F_d$ , спрямована до осі обертання:

$$F_d = \frac{m_0 V^2}{r} = m_0 \omega^2 r = \rho_0 V \omega^2 r, \quad (7.6)$$

де  $m_0$  — маса рідини, що виштовхується,  $V$  — лінійна швидкість частинки,  $\omega$  — колова швидкість частинки,  $V$  — об'єм рідини,  $r$  — радіус частинки.

Крім того, виникає відцентрова сила  $F_s$ , прикладена до зв'язку і спрямована від осі обертання:

$$F_s = \frac{m V^2}{r} = m \omega^2 r = \rho V \omega^2 r, \quad (7.7)$$

де  $m$  — маса частинки,  $V$  — об'єм частинки.

Рідке середовище характеризується в'язкістю, у результаті чого виникає сила опору  $F_\eta$ , пропорційна швидкості руху частинки:

$$F_\eta = \mu V = 6\pi\eta r V, \quad (7.8)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт тертя,  $\eta$  — в'язкість.

Підбираючи швидкість  $V$  руху частинки, можна добитися рівності:

$$F_s - F_d = F_\eta, \quad (7.9)$$

або

$$6\pi\eta r V = \omega^2 r V (\rho - \rho_0). \quad (7.10)$$

Звідки

$$V_{сед} = \frac{2}{9} \omega^2 r (\rho - \rho_0) r^2 / \eta. \quad (7.11)$$

Порівнюючи вирази (7.5) і (7.11), можна впевнитися в тому, що швидкість седиментації у полі доцентрової сили в багато разів більша, ніж у гравітаційному полі Землі:

$$\frac{(V_{сед})_d}{(V_{сед})_{zp}} = \frac{\omega^2 r}{g}. \quad (7.12)$$

Наприклад, якщо пробірка в центрифугі радіусом 10 см обертається зі швидкістю 60000 обертів за хвилину, відношення  $\frac{(V_{сед})_d}{(V_{сед})_{zp}}$  становить близько 400000.

Відношення  $S = V_{sed}/\omega^2 r$  з виразу (7.11) називається *коефіцієнтом седиментації*. Залежить цей коефіцієнт від гідродинамічних параметрів частинки ( $\rho, V$ ) та розчину ( $\rho_0$ ), але не залежить від параметрів центрифугування ( $\omega, r$ ), і, таким чином, характеризує седиментацію частинки. Вимірюється цей коефіцієнт у секундах [с] або сведбергах [С]:  $1 \text{ С} = 10^{-13} \text{ с}$ . Типові значення  $S$  наведено у табл. 7.1.

### 7.1. Коефіцієнт седиментації біологічних речовин

Речовина	S, с	Молярна маса
Лізоцим (яйцевий жовток)	$1,91 \cdot 10^{-13}$	14400
Гемоглобін (кінь)	$4,41 \cdot 10^{-13}$	68000
Сироватковий альбумін (кінь)	$4,46 \cdot 10^{-13}$	70000
Пепсин (свиня)	$3,30 \cdot 10^{-13}$	35500
Інсулін (бик)	$3,58 \cdot 10^{-13}$	46000

## 7.2. ФІЗИЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КРОВІ

*Прямі вимірювання діаметру еритроцитів.* Еритроцити на забарвленій плівці освітлюються так, що їх зображення проєкціюється на екран зі збільшенням у 1000 разів. Недоліком методу є тривалість процесу вимірювань.

*Дифракційні методи визначення середнього діаметра еритроцитів.* Метод базується на огинанні світловим променем еритроцита і спостереженні дифракційної картини, що складається з концентричних кілець. Діаметр цих кілець залежить від розмірів еритроцита і відстані між об'єктом та джерелом світла. Прилад складається з двох телескопічних циліндрів; зовнішній містить джерело світла, а внутрішній — плівку з еритроцитами та калібровані отвори певного діаметра. Спостерігач пересуває внутрішній циліндр, доки діаметр дифракційної картини не зрівняється з діаметром каліброваного отвору. Значення середнього діаметра еритроцита нанесені на ручці, за допомогою якої пересувається внутрішній циліндр.

*Вимірювання швидкості осідання еритроцитів.* При вилученні крові з кровоносних судин варте уваги вивчення швидкості осідання еритроцитів (*ШОЕ*). Відповідно до рівняння (6.15), швидкість осідання частинок у в'язкій рідині залежить від температури. Якщо температура тіла зростає, в'язкість зменшується, а швидкість осідання еритроцитів збільшується. Збільшення швидкості осідання еритроцитів зумовлюється запальними процесами, гострими інфекційними захворюваннями, хронічними локалізованими інфекціями (абсцесами), травмами, злоякісними пухлинами, станом вагітності.

*Оцінка кількості еритроцитів в одиниці об'єму.* Чим більша кількість еритроцитів в одиниці об'єму, тим менша швидкість осідання еритро-



цитів. Визначення кількості еритроцитів у крові можливе за допомогою лічильних камер або електронних приладів. Для використання лічильної камери кров розбавляють у співвідношенні 1:100 або 1:200. Зразок розбавленої крові розміщують на предметному столику мікроскопа і аналізують. Типову лічильну камеру наведено на рис. 7.2.

Принцип дії електронного приладу для визначення кількості кров'я-

них клітин ґрунтується на вимірюванні електричного опору крові за допомогою двох електродів, занурених у цю кров. Електропровідність крові залежить від кількості і розмірів формених елементів крові, причому кров'яні клітини мають значно більший опір, ніж плазма крові; можна вважати, що опір крові корелює з показником гематокриту. Звичайно, такий прилад потребує попереднього калібрування щодо концентрації і розмірів кров'яних клітин, а також типу тварин, кров яких досліджується.

Електронний лічильник (рис. 7.3) складається з двох судин — широкої 1, яка містить кров, і вузької 2, зануреної у кров. Вузька судина має вузький отвір 3, через який проходять кров'яні клітини завдяки деякому розрядженню повітря, що створюється помпою 4. Система обладнана електродами 5, з'єднаними з приладом 6 для вимірювання електропровідності. Крім того, вузька судина зв'язана з ртутним манометром 7.

Під час проходження кров'яної клітини через вузький отвір відбувається короткочасне замикання електричного ланцюга, зав-

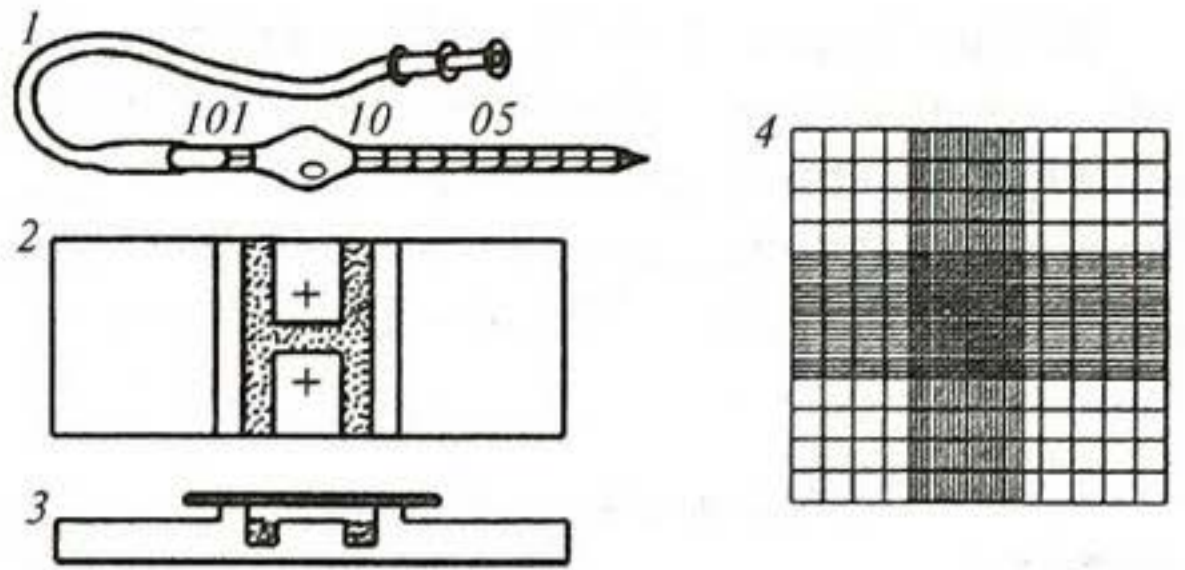


Рис. 7.2. Типова лічильна камера для оцінки кількості формених елементів крові в одиниці об'єму: 1 — піпетка для розчинення зразка; 2 — вид камери згори з лічильними зонами (поміченими хрестиками); 3 — вид камери збоку; 4 — збільшене зображення лічильної зони, справжня площа якої становить  $1/400 \text{ мм}^2$

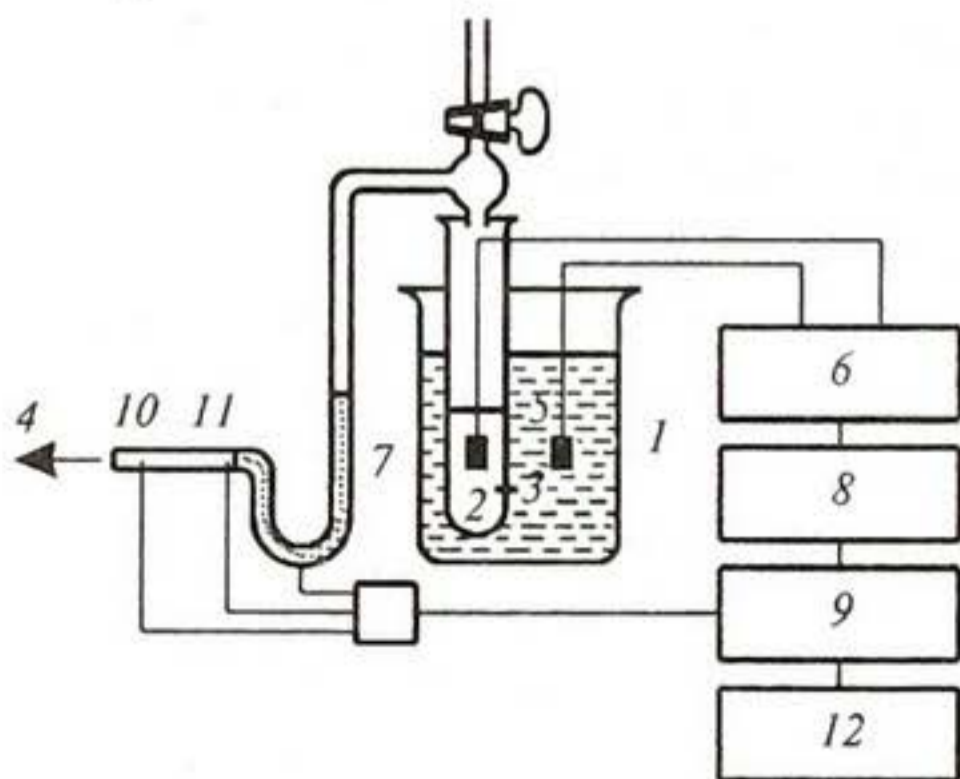


Рис. 7.3. Електронний лічильник: 1 — широка судина, що містить кров; 2 — вузька судина, занурена у кров; 3 — вузький отвір у вузькій судині, через який проходять кров'яні клітини за деякого розрідження повітря, що створюється помпою 4; 5 — електроди, з'єднані з приладом 6 для вимірювання електропровідності; 7 — ртутний манометр; 8 — амплітудний дискримінатор; 9 — імпульсний затвор; 10 і 11 — електроди; 12 — лічильник

дяки чому вимірювач електропровідності генерує імпульс, амплітуда якого залежить від об'єму клітини. Ці імпульси аналізуються амплітудним дискримінатором 8, що реагує лише на імпульси певної амплітуди, після чого вони проходять (або ні) через імпульсний затвор 9, відкритий при замиканні ртутним стовпчиком манометра електрода 10 і закритий, якщо замикається електрод 11. Таким чином відбувається кількісна оцінка об'єму кров'яних клітин, що пройшли через вузький отвір і змінили тиск у судині 2.

Ще один метод визначення кількості кров'яних клітин базується на мікроскопії темного поля (рис. 7.4). Розбавлена кров 1 проходить через тонку трубку 2, освітлювану конусоподібним променем, що утворюється лампою 3 і конденсором темного поля (лінзи 4 і діафрагму 5 з кільцевою апертурою).

Якщо в трубці відсутні кров'яні клітини, світло через трубку не проходить. При наявності в трубці кров'яної клітини світло розсіюється на ній, завдяки чому утворюється світлове зображення клітини на темному полі. Це світлове зображення потрапляє через лінзу 6 і діафрагму 7 на фотоелектронний підсилювач 8.

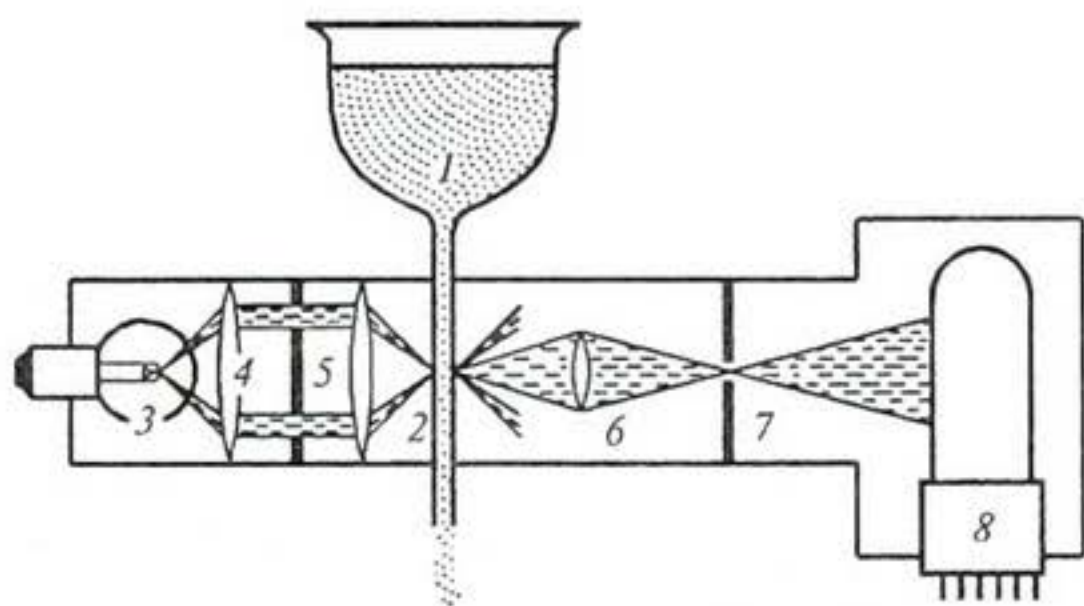
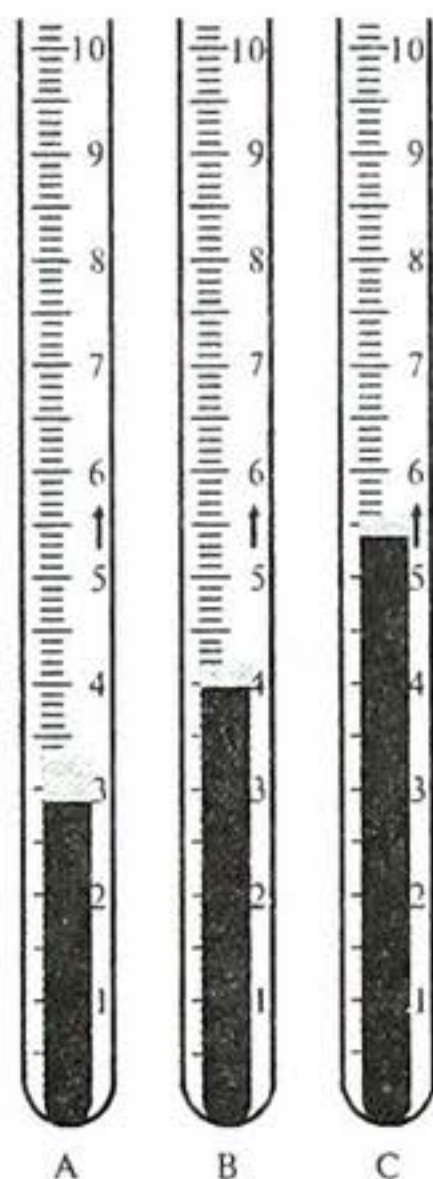


Рис. 7.4. Метод визначення кров'яних клітин на основі мікроскопії темного поля: 1 — розбавлена кров; 2 — тонка трубка; 3 — лампа; 4 — лінза; 5 — діафрагма з кільцевою апертурою; 6 — лінза; 7 — діафрагма; 8 — фотоелектронний підсилювач

**Визначення гематокриту.** Техніка ультрацентрифугування дає можливість розділити кров на три фракції: на дні кювети розміщуються еритроцити; далі розміщені шар лейкоцитів і тромбоцитів; у верхній частині кювети міститься плазма крові. Таким чином можна визначити відносну кількість складових частин крові і гематокрит. На рис. 7.5 наведено результати ультрацентрифугування крові собаки: тут кювета А містить кров собаки, яка страждає на анемію (об'єм еритроцитів становить 29 мм) і лейкоцитоз (шар завдовжки 4 мм, колір якого змінюється від білого до сірого). Кювети В і С демонструють діапазон нормальних рівнів еритроцитів і лейкоцитів.

Рис. 7.5. Результати застосування техніки ультрацентрифугування крові собаки (пояснення в тексті)



Показник гематокриту може бути визначений за допомогою номограми (рис. 7.6), на тлі якої розмішують капіляр з компонентами крові, отриманими після ультрацентрифугування.

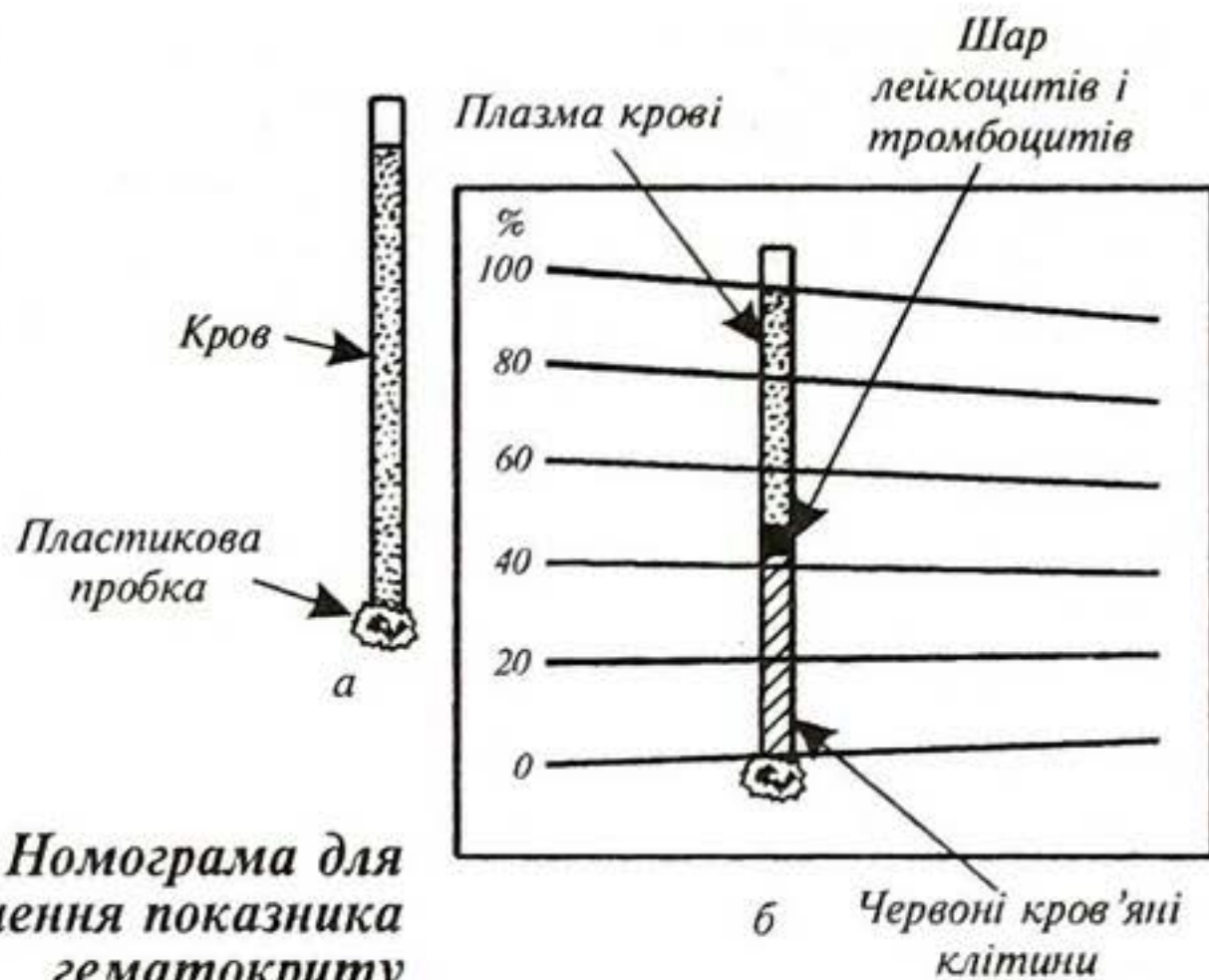


Рис. 7.6. Номограма для визначення показника гематокриту

### 7.3. ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ КРОВІ

Розглянемо два методи вимірювання тиску крові.

*Неінвазивний метод* полягає в прослуховуванні шумів, що утворюються пульсовими хвилями. Між плечем і ліктем накладають манжету, в яку накачують повітря. Коли в променевій артерії припиниться течія крові, пульс зникає і процес накачування припиняють. Потім повітря випускають за допомогою вентиля. Цей етап супроводжується зменшенням тиску. Коли тиск стає рівним систолічному, кров проштовхується крізь артерію і в ній утворюється турбулентна течія, що супроводжується шумами — так званими *тонами Короткова*. Подальше зниження тиску викликає відновлення ламінарної течії і зникнення шумів. Показання манометра в цей момент відповідають діастолічному тиску. Шуми в артерії контролюють за допомогою стетоскопа (фонендоскопа). Сам прилад називається *сфігмоманометром* (рис. 7.7).

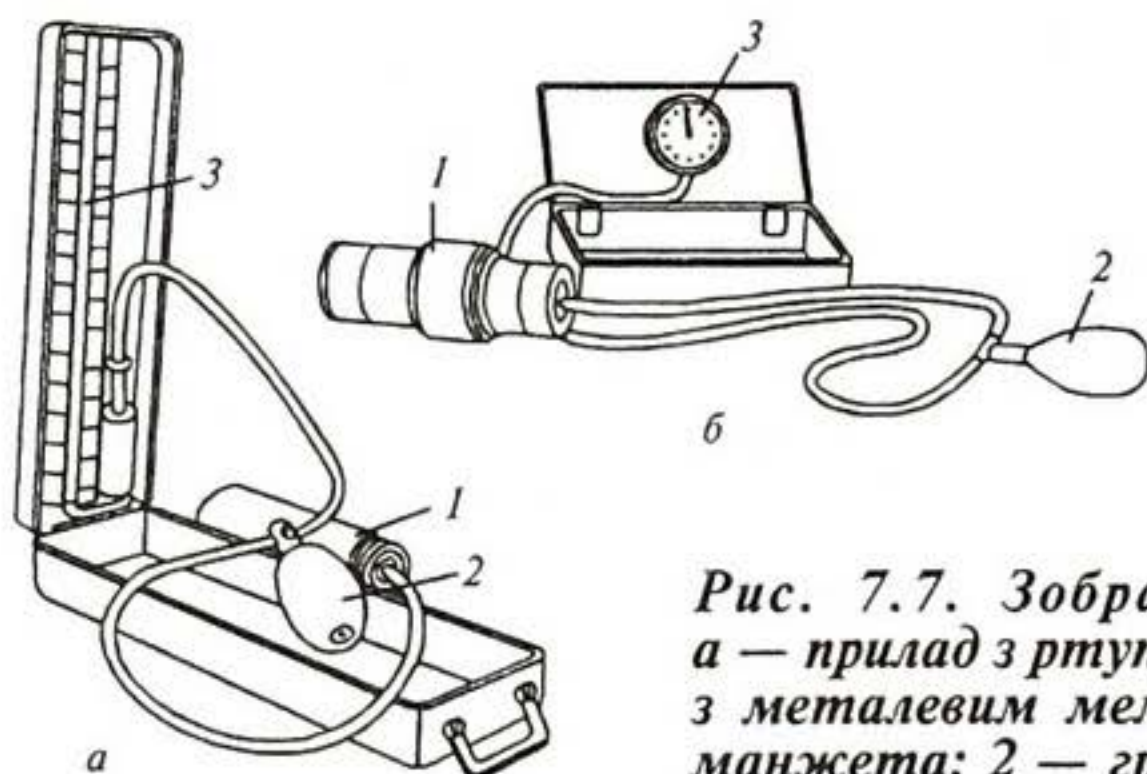


Рис. 7.7. Зображення сфігмоманометра: а — прилад з ртутним манометром; б — прилад з металевим мембранним манометром; 1 — манжета; 2 — груша; 3 — манометр

Середній тиск визначають так:

$$\langle p \rangle = \frac{p_c + p_d}{2}, \quad (7.13)$$

де  $p_c$  і  $p_d$  — систолічний і діастолічний тиски відповідно.

Точніший вираз для визначення середнього тиску, що враховує тривалість пульсової хвилі, має вигляд:

$$\langle p \rangle = \frac{1}{3}(p_c + p_d) + p_d. \quad (7.14)$$

Неінвазивний метод точний, безболісний і зручний у користуванні. Але не виключає можливих суб'єктивних помилок під час вимірювання понижених тисків. Крім того, цьому методу бракує інформації щодо форми пульсової хвилі.

*Прямий метод* передбачає безпосереднє введення в кровоносну судину голки або спеціалізованої трубки — *катетера*. Сучасна технологія вимірювання тиску на основі прямого методу базується на уведенні катетера в судину, розташовану поблизу шкіри, або в артерію чи вену, інколи — навіть в саме серце. Катетер мусить бути коротким, жорстким і не роздуватися від потоків крові, щоб запобігти помилкам під час вимірювання тиску. Для запобігання зсіданню крові або газової емболії катетер заповнюють сольовим розчином. Потік розчину з коагулянтном (речовиною, що спричинює збільшення частинок) утворюється за допомогою еластичної сумки, що заповнюється повітрям. Коли катетер вводять у вену, потік крові спрямовується за допомогою клапана до перетворювача тиску, зв'язаного з системою реєстрації тиску (рис. 7.8).

Перевагою прямого методу є можливість безперервного контролю форми пульсової хвилі і вища точність вимірювань порівняно з неінвазивним методом. До недоліку методу слід віднести втручання катетера в кровоносну систему пацієнта, що призводить до болісних відчуттів та травми.

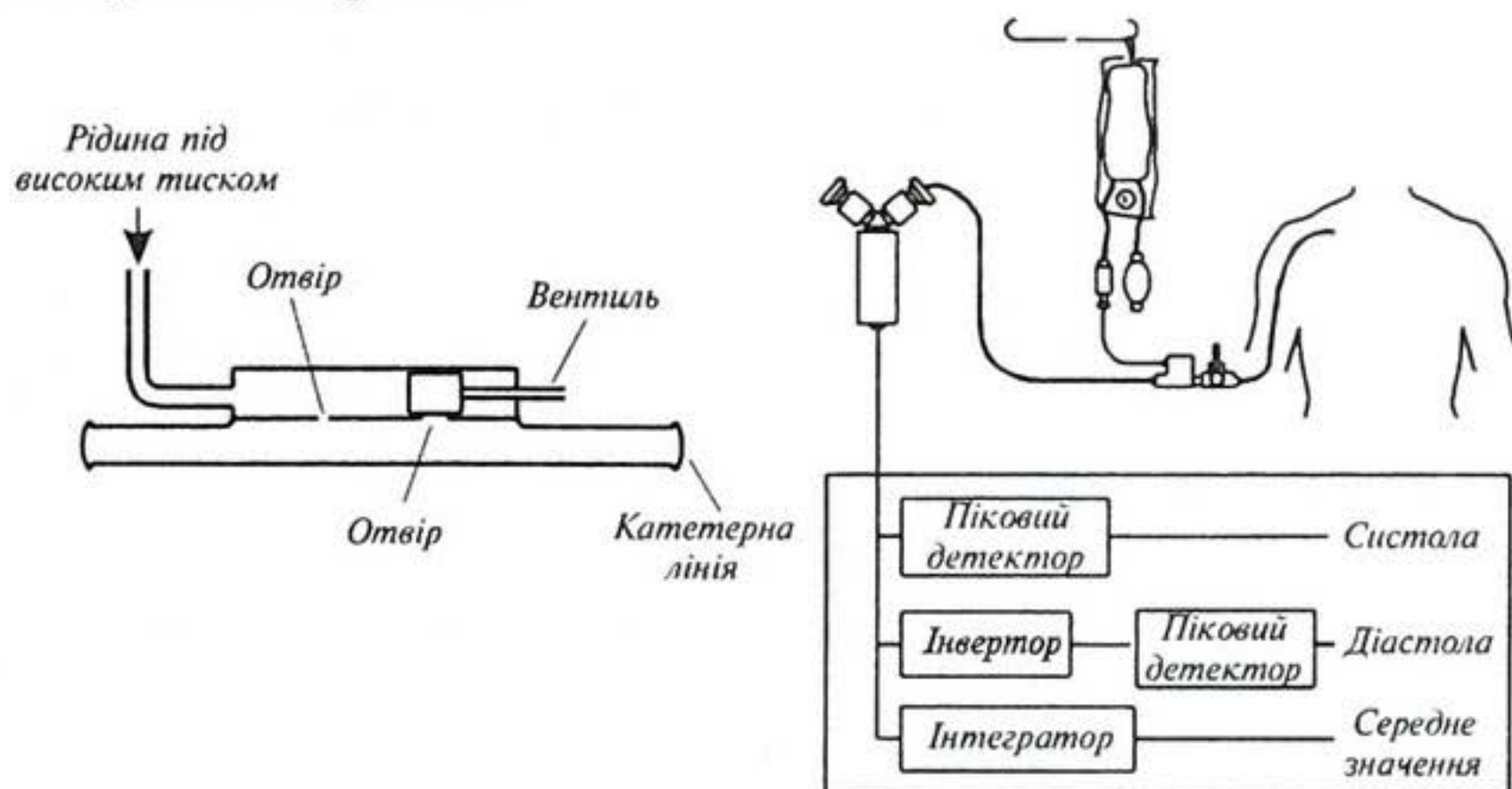


Рис. 7.8. Катетер та система його введення в кровоносну судину

## 7.4. АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ КРОВІ

Недоліки, властиві неінвазивним та прямим методам вимірювання тиску крові, спонукають до розробки та впровадження автоматизованих систем. Деякі такі системи обладнані перетворювачем тиску, зв'язаним з манжетою сфігмоманометра, та мікрофоном, розташованим під манжетою біля артерії. Перетворювач тиску з'єднаний з ртутним манометром, а мікрофон — з системою реєстрації, яка перетворює акустичні шуми (тони Короткова) у електричні сигнали, що записуються на діаграмній стрічці. Через те, що сигнали треба аналізувати й інтерпретувати, така система є по суті напівавтоматизованою.

Схему автоматизованої системи для вимірювання тиску крові наведено на рис. 7.9. Манжета зв'язана з системою перетворення акустичних сигналів у електричні, амплітуда яких пропорційна тиску; ці сигнали записуються системою реєстрації і супроводжуються звуковими сигналами, що відповідають тонам Короткова.



*Рис. 7.9. Схема автоматизованої системи для вимірювання тиску крові: 1, 2, 3 — підсилювач з фільтром; 4 — підсилювач; 5 — регульоване постачання повітря; 6 — клапан; 7 — триходовий клапан; 8 — датчик тиску; 9 — вимірювач рівня тиску; 10 — хронометр*

### ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

#### Приклад

Центрифуга забезпечує 60000 об/хв. Визначити, у скільки разів швидкість седиментації частинок у полі відцентрової сили перевищує швидкість седиментації частинок у гравітаційному полі Землі. Радіус обертання 10 см.

#### Розв'язок

Кутова швидкість  $\omega$  пов'язана з числом обертів  $n$  за одиницю часу співвідношенням:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu,$$

де  $\nu = \frac{n}{60}$ , а  $n$  — швидкість обертання ротора центрифуги (об/хв).

Звідки

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}.$$

Швидкість седиментації в полі відцентрової сили перевищує швидкість седиментації в гравітаційному полі Землі в  $\left(\frac{\omega^2 \cdot r}{g}\right)$  разів.

Підставляємо числові дані:

$$\frac{\omega^2 \cdot r}{g} = \frac{\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}\right)^2 \cdot r}{g} = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 60000 \frac{1}{\text{с}}}{60}\right)^2 \cdot \frac{0,1 \text{ м}}{9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 402841.$$

Таким чином,

$$\frac{v_e}{v_g} = 402841.$$

### Контрольне завдання № 7.1

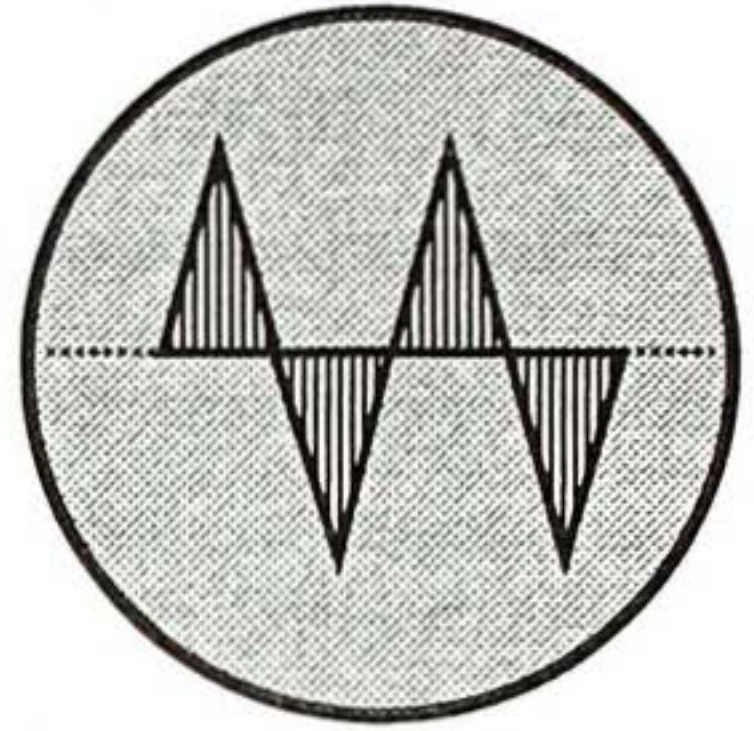
Розрахувати, у скільки разів центрифугальне прискорення більше за прискорення земного тяжіння, якщо центрифугувальна кювета розміщена на відстані 8 см від осі обертання ротора, а його швидкість обертання становить 60000 об/хв.

*Відповідь: 322273.*

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. В чому полягає процес ультрацентрифугування?
2. Які сили діють на частинку, занурену у рідке середовище, під час ультрацентрифугування?
3. Сформулювати умови впливання та седиментації.
4. Що називають коефіцієнтом седиментації? В яких одиницях він вимірюється?
5. Назвати основні фізичні методи дослідження крові.
6. Пояснити принципи неінвазивного та прямого вимірювань тиску крові.
7. Що таке «тони Короткова»?

# 8. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ



## 8.1. МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ

Коливання — це рухи або процеси, що характеризуються певною повторюваністю у часі. *Вільними (власними)* називаються коливання, які відбуваються за відсутності зовнішніх впливів на коливальну систему і виникають за будь-якого початкового відхилення цієї системи від стану її стійкої рівноваги. *Періодичними* є коливання, що повторюються через однакові проміжки часу.

Розглянемо матеріальну точку масою  $m$ , що висить на пружині (рис. 8.1). Якщо розтягнути пружину на відстань  $x$ , прикладаючи до матеріальної точки силу  $F_0$ , то виникне пружна сила  $F_{np}$ :

$$F_{np} = -kx, \quad (8.1)$$

де  $k$  — жорсткість пружини.

У цьому положенні діюча сила  $F_0$  зрівноважується пружною силою  $F_{np}$ :

$$F_0 = F_{np}; \quad (8.2)$$

$$ma = -kx; \quad (8.3)$$

$$m \frac{dV}{dt} = -kx; \quad (8.4)$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx. \quad (8.5)$$

Рішення останнього диференційного рівняння має вигляд

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (8.6)$$

де  $A$ ,  $\omega$  і  $\varphi_0$  — константи, причому  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

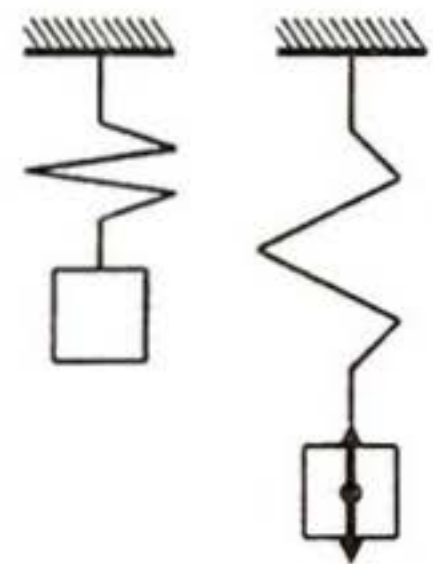


Рис. 8.1. Матеріальна точка, що висить на пружині

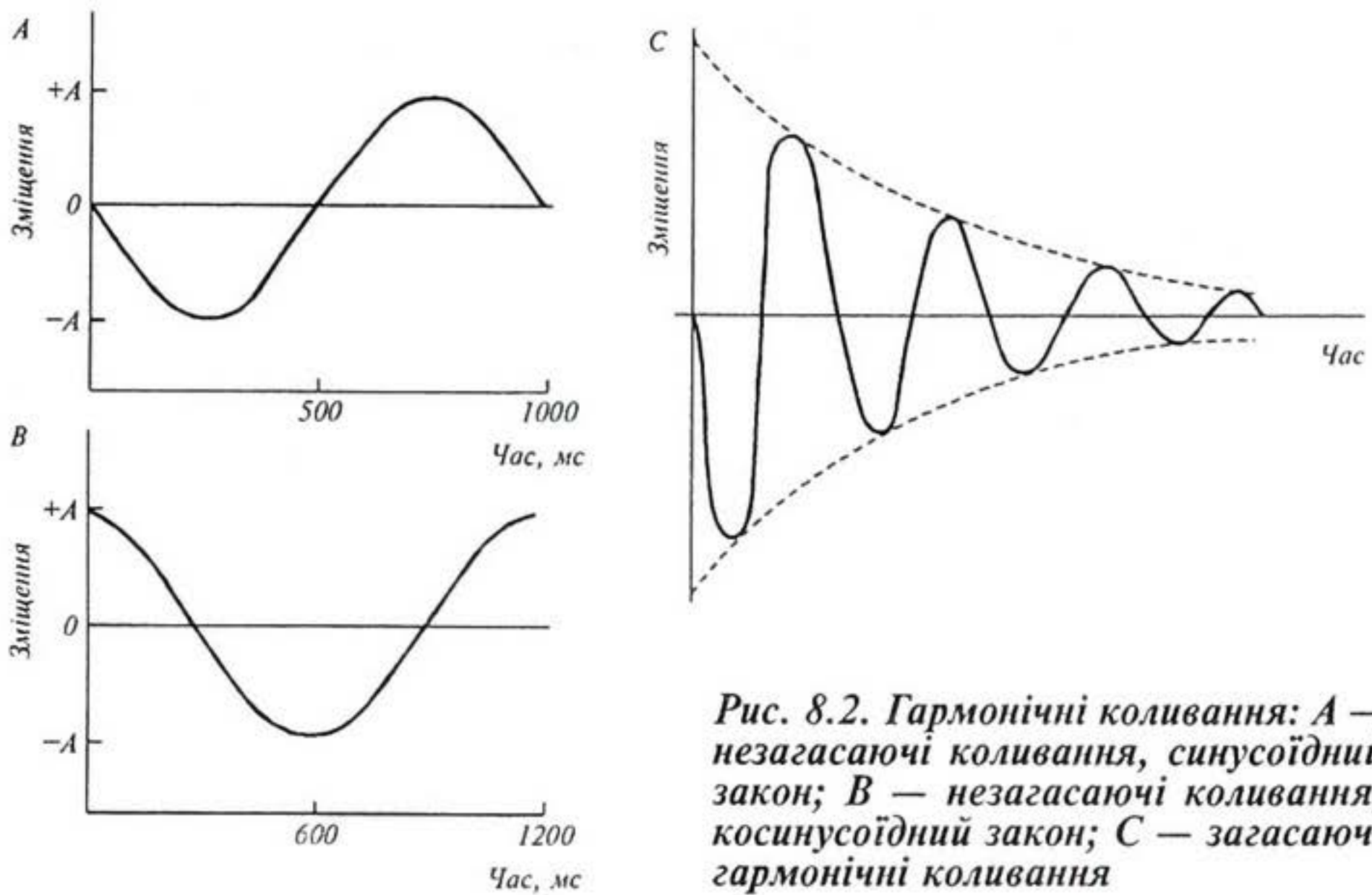


Рис. 8.2. Гармонічні коливання: *A* — незагасаючі коливання, синусоїдний закон; *B* — незагасаючі коливання, косинусоїдний закон; *C* — загасаючі гармонічні коливання

Коливання, при яких фізична величина змінюється з часом за синусоїдним (або косинусоїдним) законом (рис. 8.2), називаються гармонічними.

## 8.2. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАРМОНІЧНОГО КОЛИВАННЯ

У рівняння (8.6), що описує гармонічне коливання, входять такі характеристики: *A* — амплітуда коливань (максимальне значення величини, що коливається),  $\omega$  — колова частота,  $\omega t + \varphi_0$  — фаза коливань у момент часу *t*,  $\varphi_0$  — початкова фаза (фаза коливань у момент часу  $t = 0$ ). Найменший проміжок часу, за який відбувається повний цикл коливань, називається періодом коливань *T*. Період *T* пов'язаний з коловою частотою  $\omega$  співвідношенням:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (8.7)$$

Величина, що дорівнює кількості коливань за одиницю часу, називається частотою *f*. Частота *f* пов'язана з періодом *T* так:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (8.8)$$

Одиниця вимірювання частоти — Гц.

На основі рівнянь (8.7) і (8.8) можна отримати співвідношення:

$$\omega = 2\pi f. \quad (8.9)$$



### 8.3. ЕНЕРГІЯ МЕХАНІЧНИХ ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАНЬ

Розглянемо матеріальну точку, що здійснює гармонічні коливання вздовж осі  $x$  під впливом пружної сили  $F$ .

Швидкість руху матеріальної точки визначається так:

$$V = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (8.10)$$

Кінетична енергія матеріальної точки дорівнюватиме:

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{mV^2}{2} = \frac{m}{2} [A\omega \cos(\omega t + \varphi_0)]^2 = \\ &= \frac{mA^2\omega^2}{2} \cos^2(\omega t + \varphi_0). \end{aligned} \quad (8.11)$$

Потенціальна енергія матеріальної точки дорівнює:

$$\begin{aligned} E_n &= \frac{kx^2}{2} = \frac{m^2\omega^2}{2} [A \sin(\omega t + \varphi_0)]^2 = \\ &= \frac{mA^2\omega^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi_0). \end{aligned} \quad (8.12)$$

Додавання рівнянь (8.11) і (8.12) дає змогу отримати вираз для повної енергії механічних коливань:

$$\begin{aligned} E &= E_k + E_n = \\ &= \frac{mA^2\omega^2}{2} [\cos^2(\omega t + \varphi_0) + \sin^2(\omega t + \varphi_0)] = \frac{mA^2\omega^2}{2}. \end{aligned} \quad (8.13)$$

### 8.4. ЗГАСАЮЧІ КОЛИВАННЯ

Коливання, амплітуда яких через втрати енергії реальною коливальною системою зменшується з часом, називаються *згасаючими*.

Рівняння згасаючих коливань має вигляд:

$$x = Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (8.14)$$

де  $\delta$  — коефіцієнт загасання.

Графік залежності  $x = f(t)$  під час згасаючих коливань наведено на рис. 8.2.

### 8.5. ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ

Коливання називаються *вимушеними*, якщо вони виникають у будь-якій системі за змінного зовнішнього впливу. Для того, щоб система здійснювала незгасаючі коливання, необхідно діяти на неї силою  $F_0$ , що змінюється періодично за законом:

$$F_a = F_0 \sin \omega_a t, \quad (8.15)$$

де  $F_0$  — амплітудне значення сили,  $\omega_a$  — колова частота вимушених коливань,  $t$  — час.

Рівняння руху тіла, що коливається без будь-якого опору, має вигляд:

$$F + F_a = ma, \quad (8.16)$$

де  $F$  — зворотна сила.

З урахуванням того, що  $F = -m\omega^2 x$ , останнє рівняння можна переписати так:

$$-m\omega^2 x + F_0 \sin \omega_a t = -m\omega_a^2 x. \quad (8.17)$$

Рішення цього рівняння має вигляд:

$$x = F_0 \sin \omega_a t / [m(\omega^2 - \omega_a^2)]. \quad (8.18)$$

Видно, що амплітуда вимушеного коливання

$$A = F_0 / [m(\omega^2 - \omega_a^2)] \quad (8.19)$$

залежить від співвідношення колових частот  $\omega$  і  $\omega_a$ ; амплітуда  $A$  прямує до нескінченності, якщо  $\omega_a \rightarrow \omega$ .

Явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань при  $\omega_a \rightarrow \omega$  називається *резонансом*.

## 8.6. БІЖУЧА ХВИЛЯ

*Біжуча хвиля* може бути визначена як збурення, що рухається у просторі з перенесенням енергії. Розглянемо біжучу хвилю, синусоїдну за формою, що поширюється, починаючи з моменту часу  $t = 0$ , зі швидкістю  $V$  у напрямку  $+x$  (рис. 8.3). Рівняння такої хвилі має вигляд:

$$y = y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right). \quad (8.20)$$

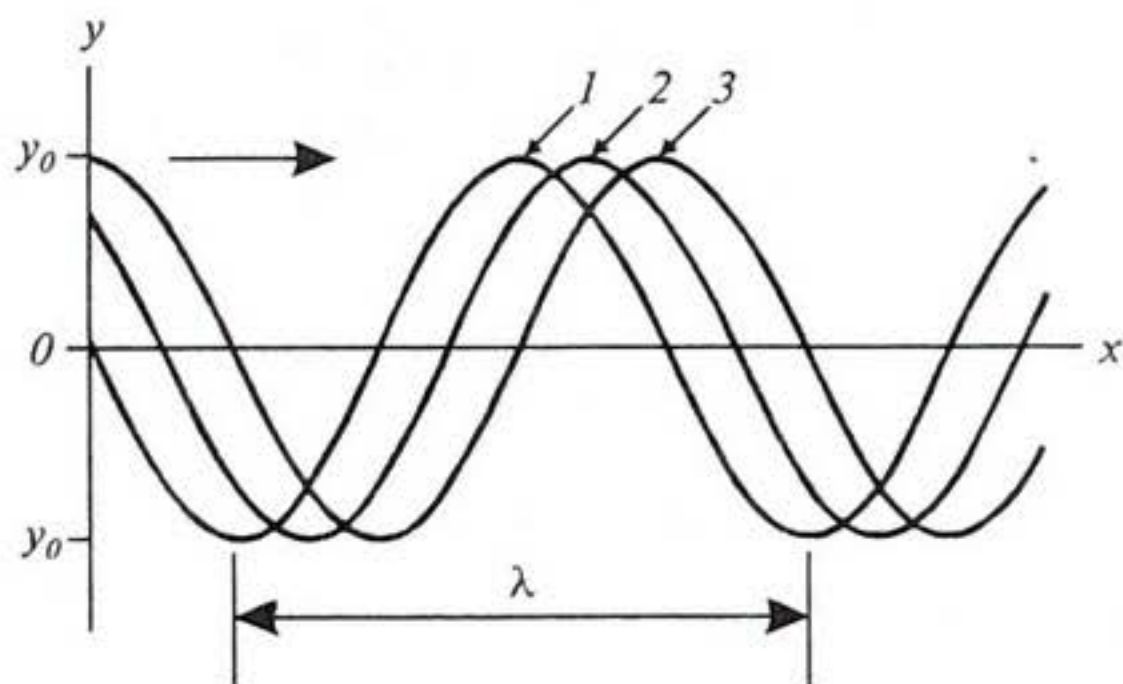


Рис. 8.3. Біжуча хвиля, як збурення, що рухається у просторі з перенесенням енергії:  $V$  — швидкість поширення біжучої хвилі;  $\lambda$  — довжина хвилі; 1, 2, 3 — послідовні переміщення хвилі

Якщо біжуча хвиля поширюється у напрямку  $-x$ , то рівняння записується так:

$$y = y_{\sigma} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \frac{2\pi}{\lambda} x\right). \quad (8.21)$$

Величина  $\frac{2\pi}{\lambda}$  в останніх двох рівняннях називається *хвильовим вектором*; вона позначається символом  $k$ .

Рівняння (8.20) і (8.21) можуть набувати ще таких форм:

$$y = y_{\sigma} \sin\left(2\pi\nu t \pm \frac{2\pi}{\lambda} x\right), \quad (8.22)$$

або

$$y = y_{\sigma} \sin(\omega t \pm kx), \quad (8.23)$$

або

$$y = y_{\sigma} \sin(Vt \pm x)k, \quad (8.24)$$

## 8.7. СТОЯЧА ХВИЛЯ

Розглянемо біжучу хвилю, що відбивається від поверхні і за цього змінює свою фазу на  $180^{\circ}$ . Таким чином, якщо рівняння біжучої хвилі, що падає на поверхню, має вигляд:

$$y_1 = y_{max} \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad (8.25)$$

то рівняння біжучої хвилі, що відбилася від поверхні, виглядатиме так:

$$y_2 = y_{max} \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right). \quad (8.26)$$

Ці дві хвилі взаємодіють між собою, в результаті чого утворюється результуюча хвиля:

$$y = y_1 + y_2 = 2 y_{max} \sin \frac{2\pi t}{T} \cos \frac{2\pi x}{\lambda}. \quad (8.27)$$

Особливістю стоячої хвилі є те, що частинки коливаються одночасно, у цьому разі утворюються області з максимальною амплітудою коливань (*спученості*) і області спокою (*вузли*). Відстань між сусідніми вузлами (або сусідніми спученостями) дорівнює половині довжини хвилі (рис. 8.4).

Якщо  $\cos \frac{2\pi x}{\lambda} = \pm 1$ , величина зміщення максимальна ( $y = 2y_{max}$ ); значення  $x$  у цьому разі відповідає спученості; якщо  $\cos \frac{2\pi x}{\lambda} = 0$ , то  $y = 0$  і значення  $x$  відповідає вузлу.

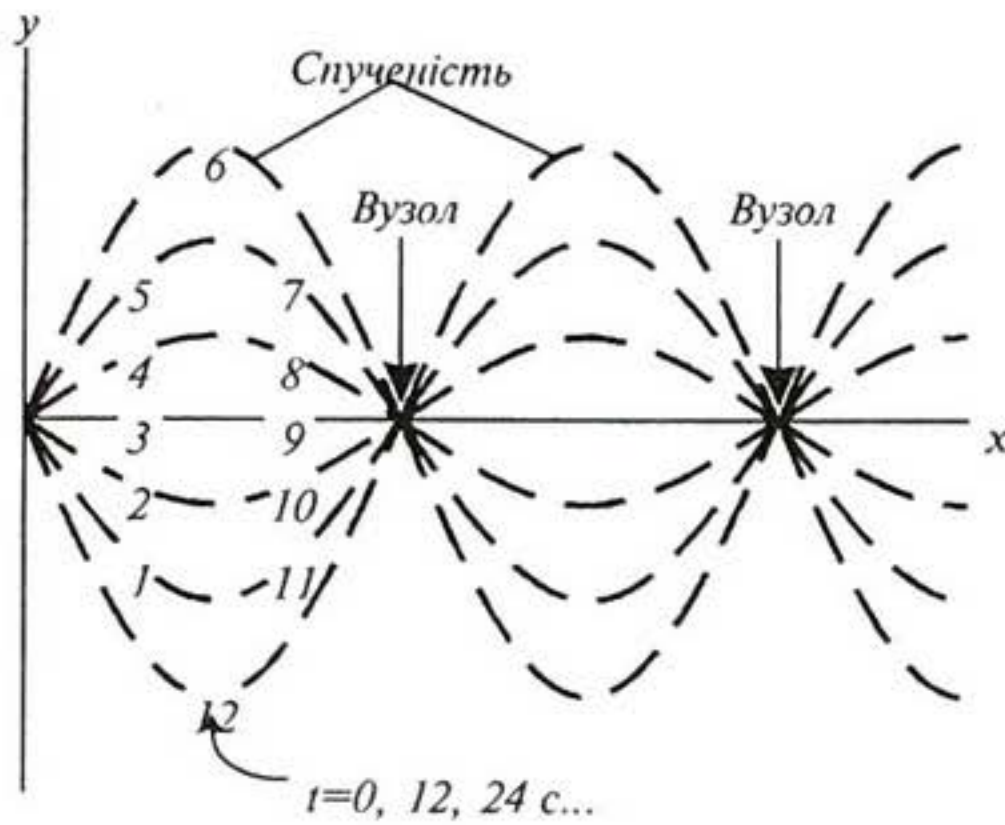


Рис. 8.4. Стояча хвиля (цифрами позначено моменти часу, які послідовно проходить частинка, що коливається)

## 8.8. БИТТЯ КОЛИВАНЬ

Розглянемо дві хвилі, що трохи відрізняються частотою і поширюються в одному напрямку. Під час спостереження поведінки цих двох хвиль у даній точці простору відбуваються *биття коливань* — періодичні коливання інтенсивності в даній точці завдяки накладанню двох хвиль з частотами, що трохи відрізняються.

Нехай рівняння двох коливань мають вигляд:

$$y_1 = y_{max} \cos 2\pi f_1 t, \quad (8.28)$$

$$y_2 = y_{max} \cos 2\pi f_2 t. \quad (8.29)$$

За накладання двох коливань результуюче коливання описується рівнянням:

$$y = y_1 + y_2 = y_{max} (\cos 2\pi f_1 t + \cos 2\pi f_2 t). \quad (8.30)$$

Використовуючи тригонометричне співвідношення

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right), \quad (8.31)$$

отримаємо:

$$y = 2y_{max} \cos 2\pi \left( \frac{f_1 - f_2}{2} \right) t \cos 2\pi \left( \frac{f_1 + f_2}{2} \right) t. \quad (8.32)$$

Графік результуючого коливання наведено на рис. 8.5.

Таким чином, ефективна частота результуючого коливання дорівнює  $\left( \frac{f_1 + f_2}{2} \right)$ ; максимальна амплітуда результуючих коливань має місце тоді, коли  $\cos 2\pi \left( \frac{f_1 - f_2}{2} \right) t = \pm 1$ , тобто амплітуда результуючих коливань змінюється з частотою  $\left( \frac{f_1 - f_2}{2} \right)$ .

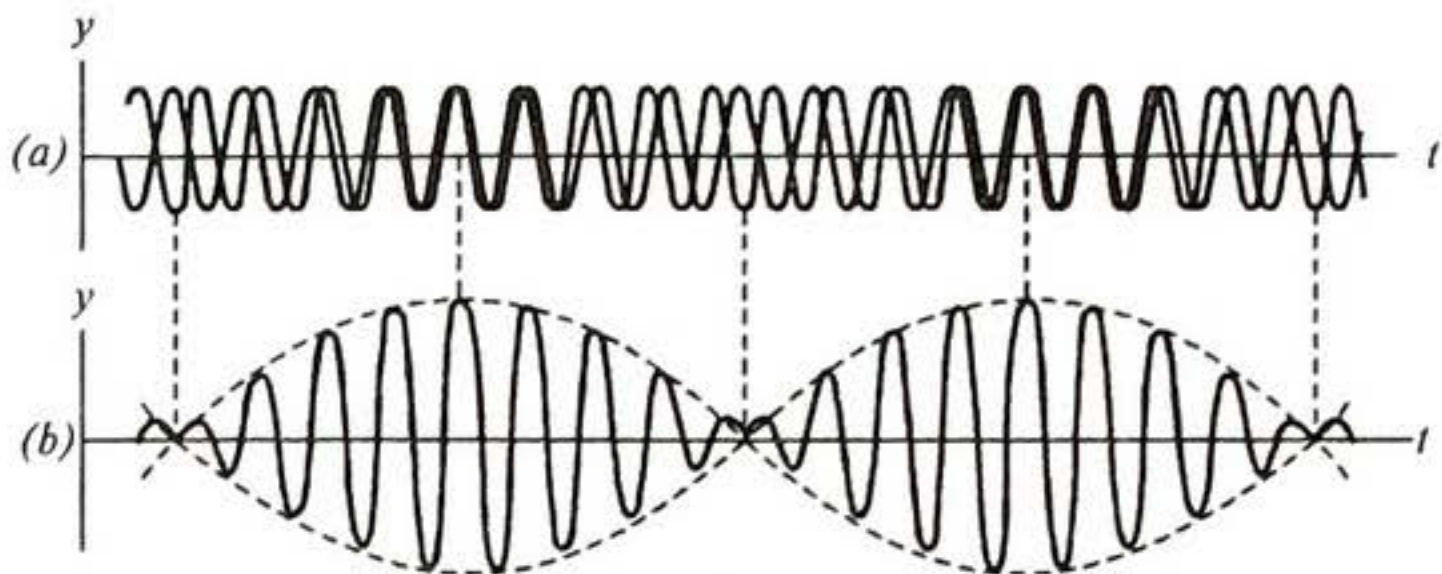


Рис. 8.5. Биття коливань

## 8.9. РОЗКЛАДАННЯ СКЛАДНИХ КОЛИВАНЬ У РЯД ФУР'Є

Згідно з Фур'є будь-яке складне коливання  $y(t)$  можна уявити як комбінацію достатньо великої кількості синусоїдних та косинусоїдних хвиль, що утворюють ряд Фур'є:

$$y(t) = \sum_n (A_n \sin 2\pi f_n t + B_n \cos 2\pi f_n t), \quad (8.33)$$

де  $A_n$  і  $B_n$  — амплітуди гармонічних коливань,  $f_n$  — частота  $n$ -го коливання.

Залежність відносної інтенсивності гармонік від їх частоти називається гармонічним спектром складного коливання. Приклад роз-

кладання складного коливання в ряд Фур'є наведено на рис. 8.6, а відповідний гармонічний спектр цього коливання — на рис. 8.7.

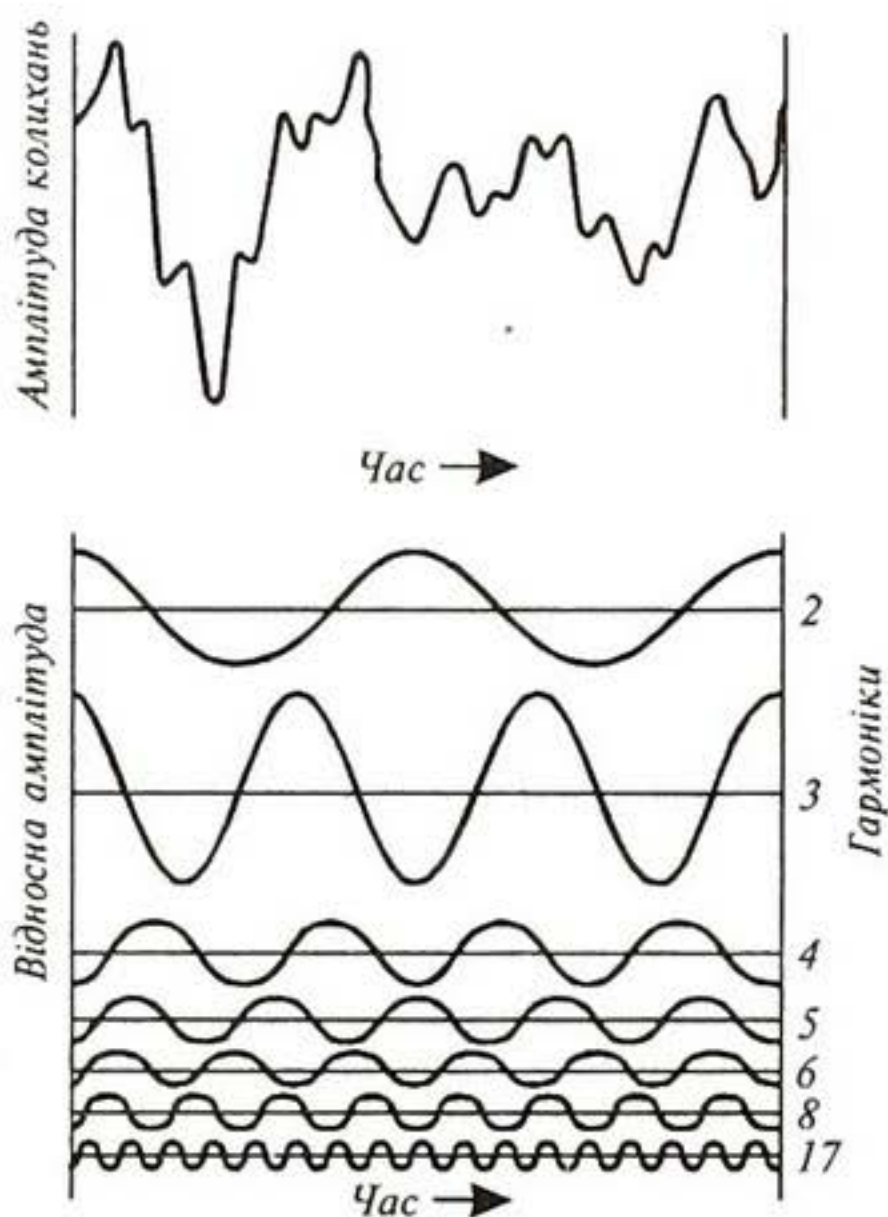


Рис. 8.6. Розкладання складного коливання в ряд Фур'є

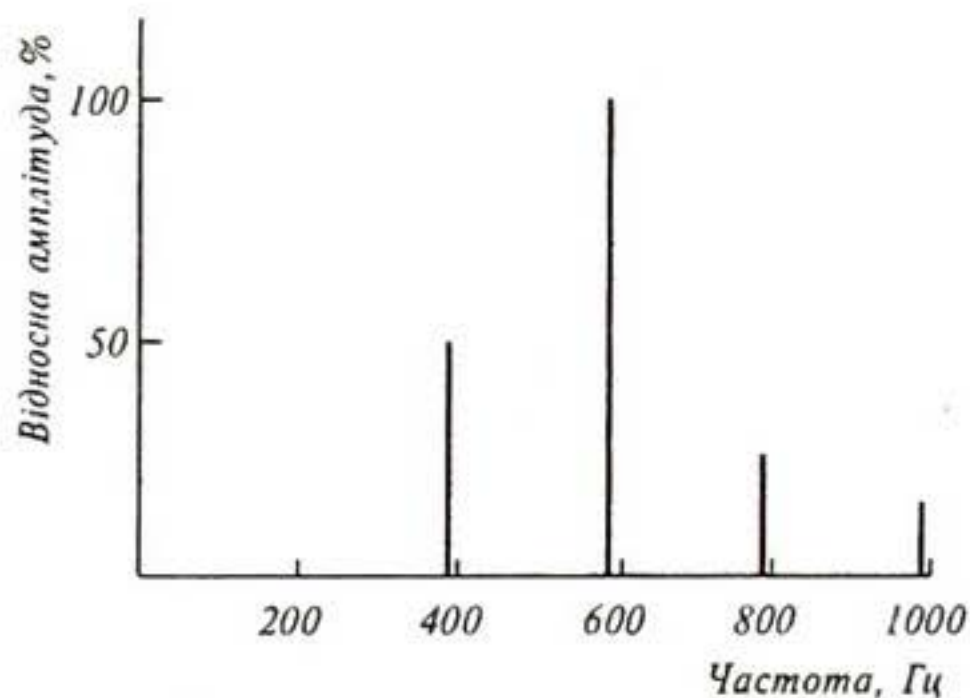


Рис. 8.7. Гармонічний спектр складного коливання

## 8.10. КОЛИВАЛЬНІ ПРОЦЕСИ В БІОЛОГІЇ

### 8.10.1. Кінетика біологічних процесів

Кінетика біологічних процесів вивчає поведінку у часі різноманітних процесів, властивих живій природі. Будь-яку кінетичну систему можна уявити як сукупність змінних параметрів. Змінними є величини, що змінюються з часом; параметри ж підтримують стале значення протягом часу спостереження. Опис характеру поведінки біологічних систем як об'єктів, що моделюються, зручно проводити за допомогою математичних моделей, яким відповідає диференціальне рівняння першого порядку:

$$\frac{dx}{dt} = f(x). \quad (8.34)$$

Наприклад, процес загибелі мікроорганізмів описується рівнянням:

$$\frac{dc}{dt} = -bc, \quad (8.35)$$

яке належить розуміти так: зміна концентрації мікроорганізмів  $\frac{dc}{dt}$  у часі пропорційна їх концентрації  $c$ ; тут  $b$  — коефіцієнт загибелі мікроорганізмів; знак «мінус» свідчить про зменшення кількості мікроорганізмів з часом.

Ще один приклад — процес розмноження мікроорганізмів. Оскільки швидкість розмноження пропорційна вірогідності зустрічі двох мікроорганізмів, доцільно описати цей процес рівнянням:

$$\frac{dc}{dt} = ac^2, \quad (8.36)$$

де  $a$  — коефіцієнт розмноження; знак «плюс» свідчить про зростання кількості мікроорганізмів з часом.

### 8.10.2. Екологічна модель Вольтера

В той же час у реальній ситуації більш широкий клас біологічних явищ описується двома диференціальними рівняннями першого порядку. Розглянемо класичний приклад моделі біологічної системи, що складається з двох диференціальних рівнянь — *екологічну модель Вольтерра*. Нехай у деякому замкненому районі мешкають жертви (зайці) та хижаки (вовки). Зайці живляться тільки рослинною їжею, якої завжди вдосталь; вовкам же потрібні тільки зайці.

Можна припустити, що зміна кількості зайців  $\left(\frac{dN_1}{dt}\right)$  пропорційна їх кількості  $N_1$ :

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1, \quad (8.37)$$

Зменшення кількості зайців пропорційна ймовірності зустрічі зайця з вовком, тобто добутку кількостей  $N_1 N_2$ . Таким чином, процес спадання кількості зайців описується рівнянням:

$$\frac{dN_1}{dt} = -bN_1 N_2 \quad (8.38)$$

У цілому, зміна кількості зайців з урахуванням їх розмноження та можливості зустрічі з вовками буде описуватися рівнянням:

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1 - bN_1 N_2 \quad (8.39)$$

Аналогічні міркування приводять до висновку, що кількість вовків буде зменшуватися (за природної смертності) пропорційно їх кількості  $N_2$  і зростати пропорційно ймовірності зустрічі з зайцями  $N_1 N_2$ . Зміна кількості вовків опишеться рівнянням:

$$\frac{dN_2}{dt} = -cN_2 + dN_1 N_2 \quad (8.40)$$

Всі ці міркування приводять до системи двох диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = aN_1 - bN_1 N_2; \\ \frac{dN_2}{dt} = -cN_2 + dN_1 N_2. \end{cases} \quad (8.41)$$

Слід зауважити, що кожному стану біологічної системи «зайці—вовки» відповідає певна пара змінних  $N_1$  і  $N_2$ ; у той же час будь-яка пара значень  $N_1$  і  $N_2$  описує певний стан системи.

Розглянемо можливість графічної інтерпретації вищезгаданого. Нехай є система координат, на осях якої відкладено значення змінних

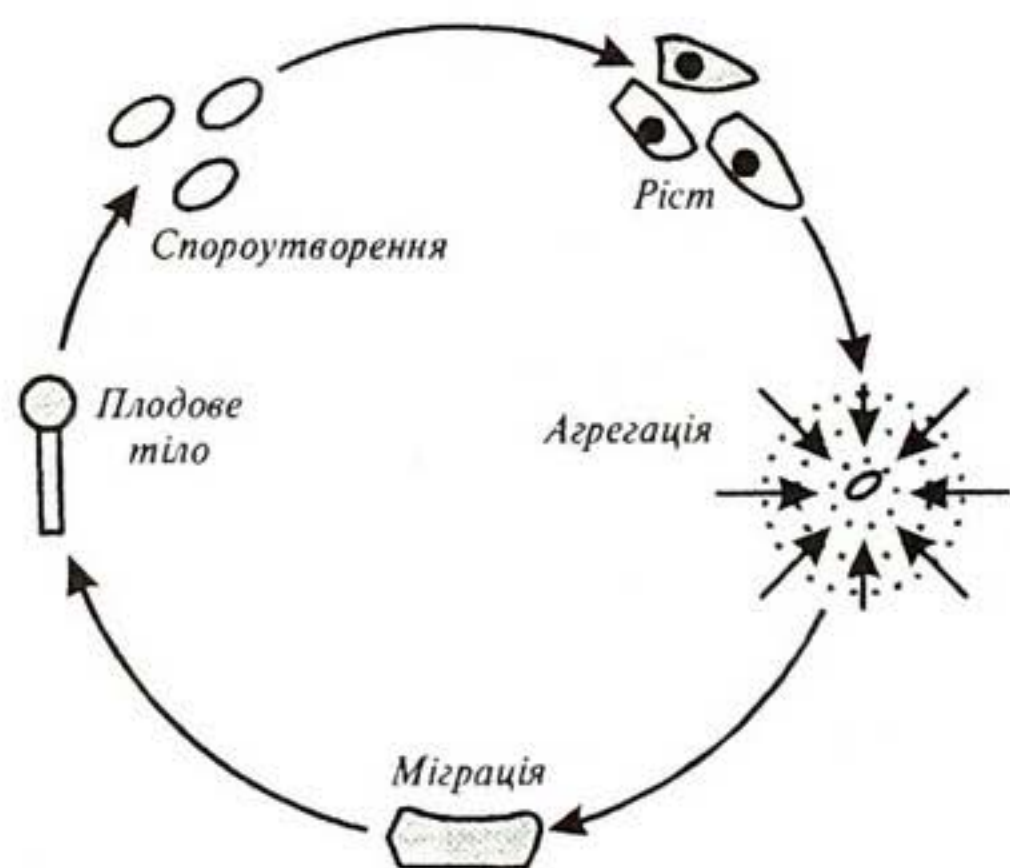


Рис. 8.8. Утворення колоній у колективних амеб

$N_1$  і  $N_2$ . Кожна точка  $M$  такої площини з координатами  $X$  і  $Y$  відповідає певному стану системи (рис. 8.9). Така площина називається *фазовою площиною*. Під час зміни стану системи у часі змінні  $X$  і  $Y$  змінюються відповідно до системи рівнянь (8.41). Процес зміни  $X$  і  $Y$  буде відповідати руху точки  $M(X, Y)$ ; сукупність можливих положень цієї точки на фазовій площині називають *фазовою траєкторією*.

Для того, щоб отримати рівняння, що зв'язує безпосеред-

ньо  $N_1$  і  $N_2$ , розділимо друге рівняння системи (8.41) на перше, виключивши час  $t$ :

$$\frac{dN_1}{dN_2} = \frac{Q(N_1, N_2)}{P(N_1, N_2)}. \quad (8.42)$$

Рішення цього рівняння дає родину інтегральних кривих (фазових траєкторій) на площині  $N_1, N_2$  (рис. 8.9). Точки, в яких похідні змінних  $\frac{dN_1}{dt}$  і  $\frac{dN_2}{dt}$  перетворюються в нуль, мають назву *особливих точок*. Особлива точка  $M$ , оскільки швидкості зміни  $\frac{dN_1}{dt}$  і  $\frac{dN_2}{dt}$  в ній дорівнюють нулю, відповідає *стаціонарному стану*.

Отже, зростання чисельності зайців відповідає рухові від точки  $a$  до точки  $b$  на фазовій площині (рис. 8.10); цей процес супроводжується збільшення чисельності вовків, що отримали сприятливі умови годівлі; але це зростання чисельності хижаків приводить до зменшення чисельності жертв (перехід  $b \rightarrow c$  на фазовій площині), що впливає на зменшення чисельності вовків (перехід  $c \rightarrow a$ ). Таким чином, біологічна система «вовки-зайці» здійснює коливання. Будь-який випадковий зовнішній вплив переводить систему на іншу фазову площину.

Поведінку змінних  $N_1$  і  $N_2$  у часі наведено на рис. 8.11. Очевидно, що максимум чисельності жертв завжди випереджає максимум чисельності хижаків. З цими кривими узгоджуються резуль-

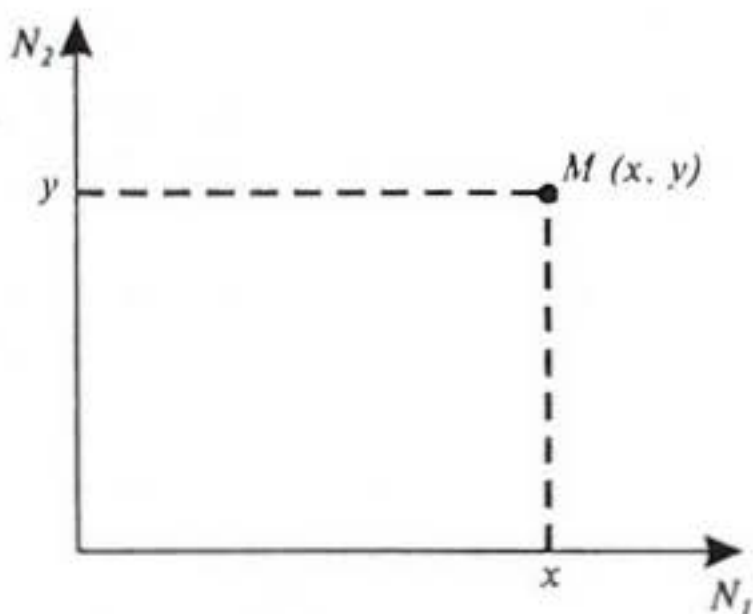


Рис. 8.9. Фазова площина

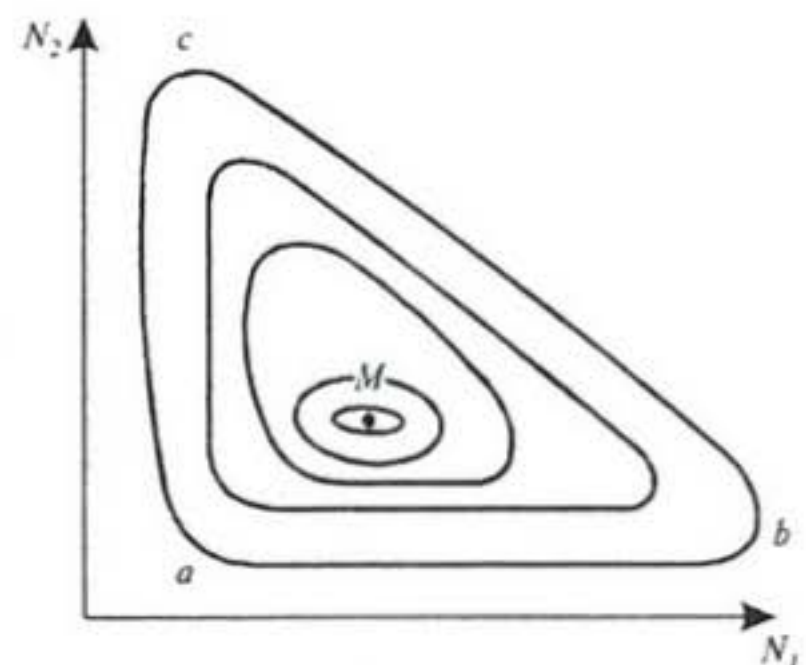


Рис. 8.10. Фазовий портрет системи «хижак-жертва» ( $M$  — особлива точка)

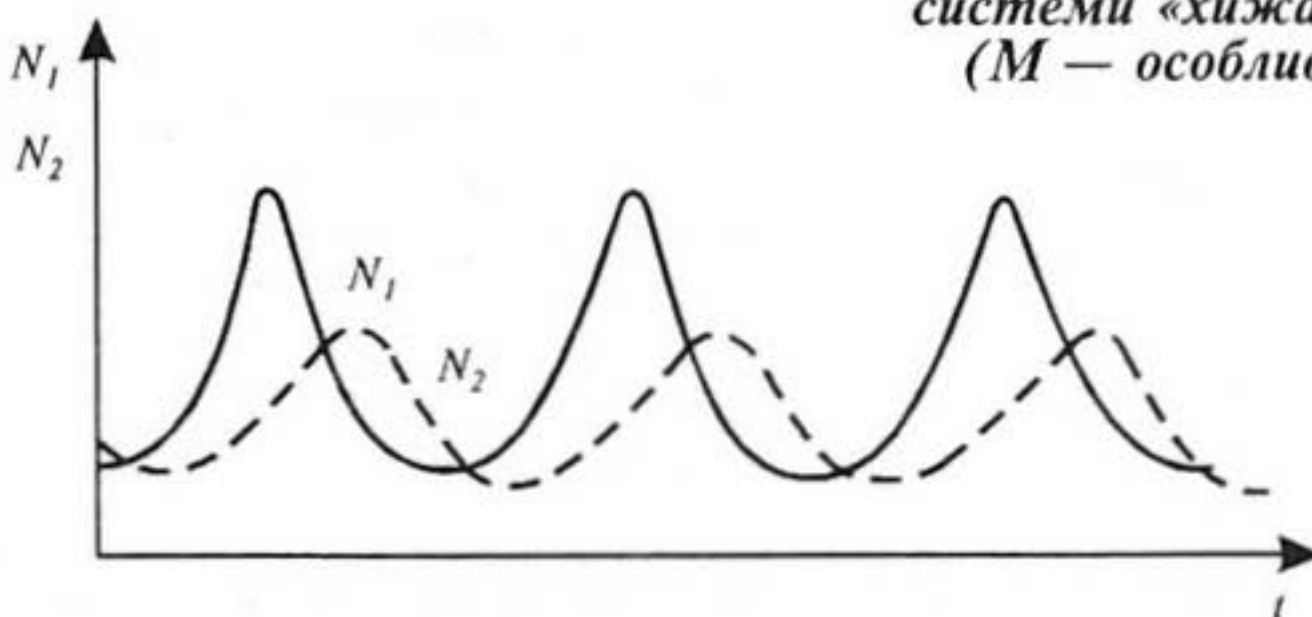
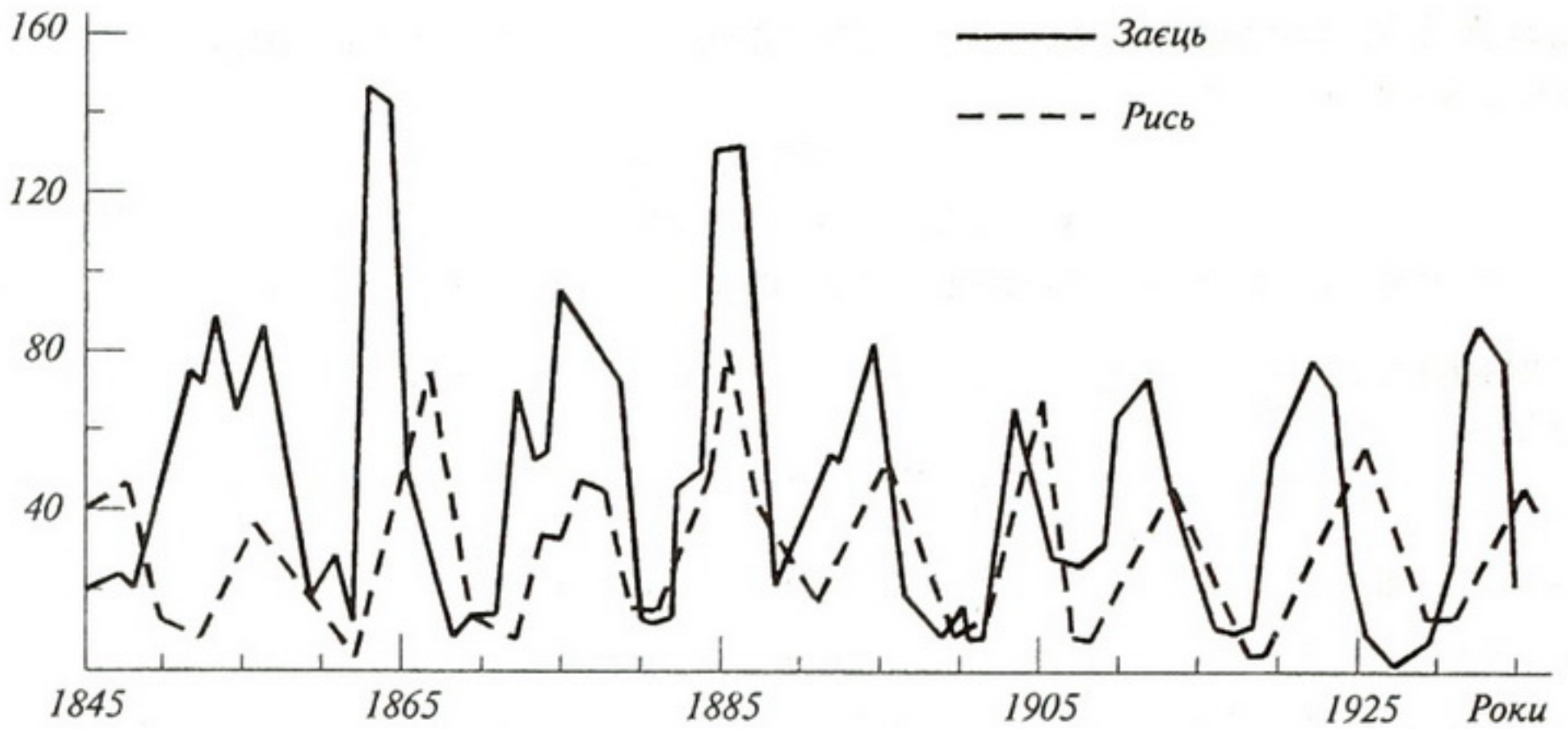


Рис. 8.11. Поведінка змінних  $N_1$  і  $N_2$  у часі





**Рис. 8.12.** Результати спостережень за змінами чисельності північноамериканського зайця та рисі в Канаді

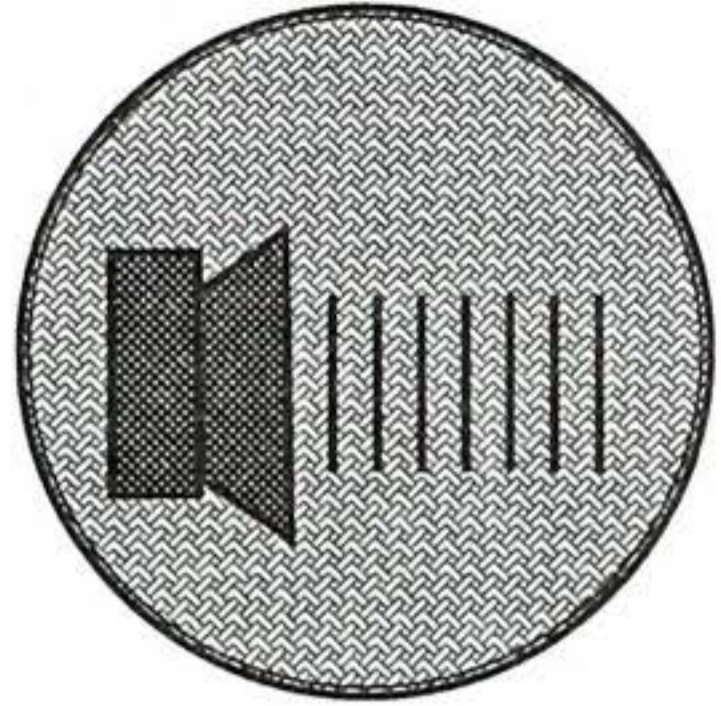
тати спостережень за коливаннями чисельності північноамериканського зайця та рисі в Канаді (рис. 8.12). Періоди коливань чисельності жертв та хижаків приблизно однакові і становлять 9—10 років, причому максимум чисельності зайців випереджає максимум чисельності рисей на один рік.

Коливальні процеси і хвилі є досить поширеними явищами живої природи. До коливальних можна віднести такі процеси як биття серця, рух легенів, роботу кишечника, вібрації голосових зв'язок, періодичну окисно-відновну реакцію Белоусова-Жаботинського, періодичні процеси при гліколізі та фотосинтезі, коливальну динаміку чисельності популяцій тварин, спіральні хвилі в міокарді та сітківці ока, поширення звукових коливань тощо.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке коливання?
2. Які коливання є вільними? вимушеними?
3. Які коливання називають гармонічними?
4. Записати і пояснити рівняння гармонічного коливання.
5. Дати визначення амплітуди, фази і початкової фази гармонічного коливання.
6. Що таке період коливань? частота коливань?
7. Довести, що вираз (8.6) є розв'язком рівняння (8.5).
8. Вивести рівняння (8.13).
9. Які коливання називають згасаючими? Навести рівняння і графік згасаючого коливання.
10. Що таке резонанс?
11. Яку хвилю називають біжучою? стоячою?
12. Охарактеризувати ряд Фур'є.
13. Навести приклади коливальних процесів, що спостерігаються в живій природі.

# 9. АКУСТИКА



## 9.1. ХВИЛІ В ПРУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Процес поширення коливань у суцільному середовищі називається *хвильовим процесом* або *хвилею*. Механічні збурення (деформації), що поширюються в пружному середовищі, називаються *пружними* (або *механічними*) *хвилями*. Пружні хвилі бувають *повздовжніми*, якщо частинки середовища коливаються у напрямку поширення хвилі, і *поперечними*, якщо частинки середовища коливаються в площинах, перпендикулярних напрямку поширення хвилі. Пружна хвиля називається *гармонічною*, якщо відповідні їй коливання частинок середовища є гармонічними.

Пружні хвилі, що мають частоту в діапазоні 20÷20000 Гц, називаються *звуковими*; з частотами > 20000 Гц — *ультразвуковими* і < 20 Гц — *інфразвуковими*. Шкалу механічних коливань, що складається зі звукових, ультразвукових та інфразвукових коливань, наведено на рис. 9.1.

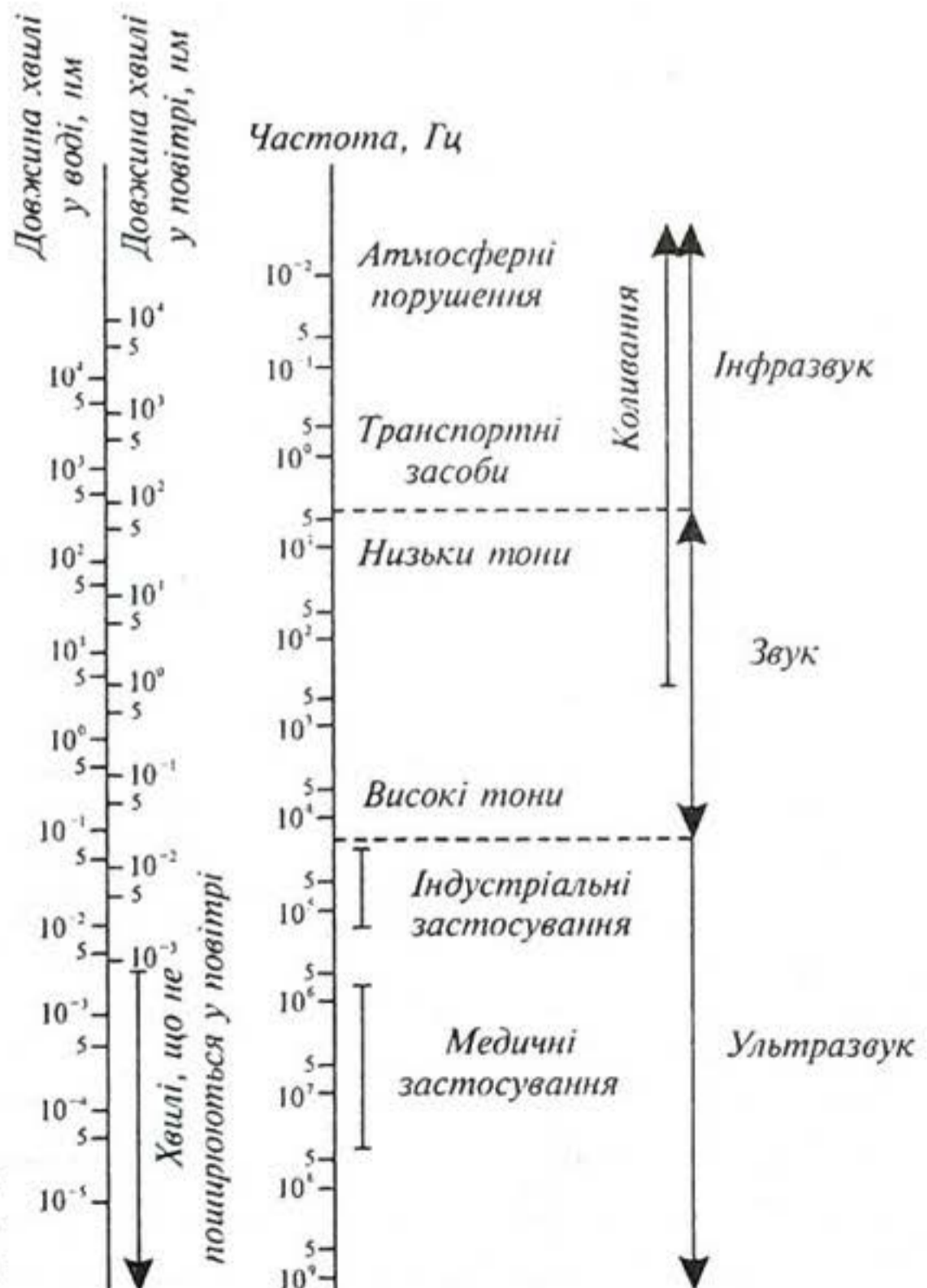


Рис. 9.1. Шкала механічних коливань звукового, ультразвукового та інфразвукового діапазонів

Галузь фізики, що досліджує пружні коливання та хвилі звукового, ультразвукового та інфразвукового діапазонів, процеси їх збудження та поширення, взаємодію їх з речовиною та різноманітні застосування, називається *акустикою*.

## 9.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ

Звукова хвиля характеризується коливальним зміщенням частинок, швидкістю поширення, енергією та інтенсивністю звукових коливань, а також звуковим тиском.

Розглянемо процес поширення звукової хвилі у повітрі. Зміщення молекул повітря можна описати рівнянням:

$$y = y_{max} \sin(2\pi x/\Lambda), \quad (9.1)$$

де  $y_{max}$  — амплітуда звукової хвилі (максимальне зміщення молекул),  $x$  — відстань уздовж поширення хвилі,  $\Lambda$  — довжина звукової хвилі.

Зміщення молекул повітря в момент часу  $t$  визначається так:

$$y = y_{max} \sin[2\pi/\Lambda (Vt - x)], \quad (9.2)$$

де  $V$  — швидкість поширення звукової хвилі.

Залежність зміщення молекул повітря від відстані до джерела звуку наведено на рис. 9.2. Швидкість  $V$  поширення звукової хвилі залежить від середовища (табл. 9.1).

Використовуючи співвідношення:

$$\Lambda = V \cdot T, \quad (9.3)$$

рівняння (9.2) можна переписати так:

$$\begin{aligned} y &= y_{max} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\Lambda}\right) = \\ &= y_{max} \sin 2\pi v \left(t - \frac{x}{V}\right) = y_{max} \sin \Omega \left(t - \frac{x}{V}\right), \end{aligned} \quad (9.4)$$

### 9.1. Основні акустичні параметри різних речовин

Речовина	Густина $\rho$ , кг·м <sup>-3</sup>	Швидкість звуку $V$ , м·с <sup>-1</sup>	Питомий хвильовий опір $\rho V$ , кг·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>
Повітря	1,29	$0,331 \cdot 10^3$	427
Вода	$1 \cdot 10^3$	$1,497 \cdot 10^3$	$1,497 \cdot 10^6$
Кров	$1,05 \cdot 10^3$	$1,56 \cdot 10^3$	$1,638 \cdot 10^6$
М'язи	$1,058 \cdot 10^3$	$1,568 \cdot 10^3$	$1,659 \cdot 10^6$
Жирова тканина	$0,928 \cdot 10^3$	$1,47 \cdot 10^3$	$1,364 \cdot 10^6$
Кістки черепа	$1,85 \cdot 10^3$	$3,36 \cdot 10^3$	$6,216 \cdot 10^6$

де  $y_{max}$  — максимальне зміщення молекул середовища, в якому поширюється звукова хвиля,  $T$  — період коливань,  $x$  — відстань уздовж напрямку поширення хвилі,  $\lambda$  — довжина звукової хвилі,  $V$  — швидкість поширення звукової хвилі,  $t$  — час,  $\nu$  — частота звукової хвилі,  $\Omega$  — колова частота звукової хвилі.

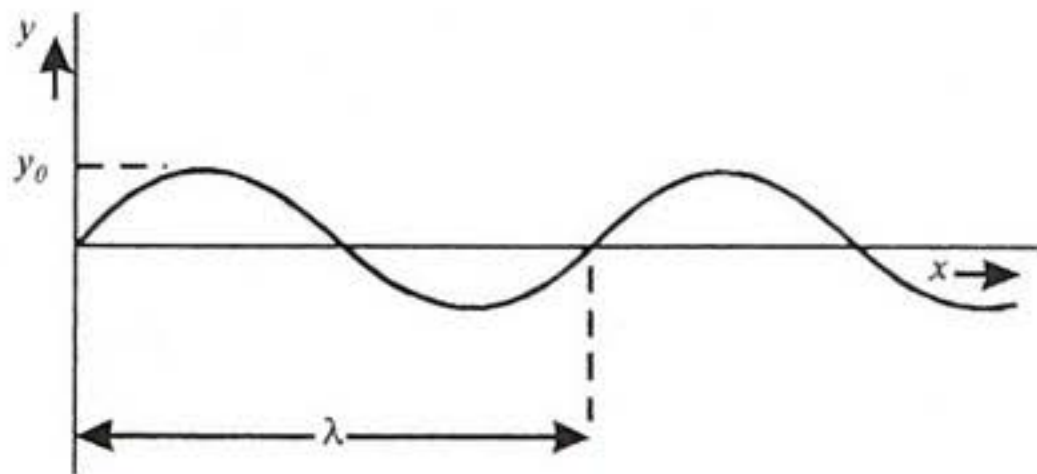


Рис. 9.2. Залежність зміщення молекул повітря від відстані до джерела звуку

Останнє рівняння описує поширення біжучої звукової хвилі, яка являє собою збурення середовища, що переносить енергію у просторі.

Енергія звукових коливань  $E$  складається з кінетичної енергії  $E_k$  молекул, що коливаються, і потенціальної енергії  $E_n$ , зміщених відносно положення рівноваги.

Кінетична енергія  $E_k$  однієї молекули визначається так:

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2, \quad (9.5)$$

де  $m$  — маса молекули,  $V$  — миттєва швидкість.

З урахуванням того, що  $V = \frac{dy}{dt}$ , можна отримати таке рівняння:

$$E_k = 2\pi^2 m y_{max}^2 \cdot \nu^2 \left[ \cos 2\pi \nu \left( t - \frac{x}{V} \right) \right]^2. \quad (9.6)$$

Максимального значення кінетична енергія набуде, коли

$$\cos 2\pi \nu \left( t - \frac{x}{V} \right) = 1, \text{ тобто:}$$

$$E_{k \max} = 2\pi^2 m y_{max}^2 \nu^2 = \Omega^2 m y_{max}^2. \quad (9.7)$$

Під час максимального зміщення молекули від стану рівноваги швидкість руху молекули і кінетична енергія дорівнюватимуть нулю, а максимальне значення потенціальної енергії однієї молекули визначиться так:

$$E_n = 2\pi^2 m y_{max}^2 \nu. \quad (9.8)$$

Об'ємна густина енергії, тобто повна енергія одиниці об'єму середовища, в якому поширюється звукова хвиля, дорівнює:

$$E_{max} / V = 2\pi^2 \rho y_{max}^2 \nu^2 = \Omega^2 \rho y_{max}^2, \quad (9.9)$$

де  $\rho$  — густина середовища, в якому поширюється звукова хвиля,  $V$  — об'єм.

Повна енергія, що переноситься звуковою хвилею, визначається так:

$$E_{max} = 2\pi^2 \rho \nu^2 y_{max}^2 V. \quad (9.10)$$

Потужність звукової хвилі (акустична потужність)  $P$  визначається як енергія  $E_{max}$ , що переноситься звуковою хвилею за одиницю часу  $t$ .

$$P = E_{max}/t. \quad (9.11)$$

Інтенсивність  $I$  звукової хвилі є відношенням потужності звукової хвилі до одиниці площі  $S$ , через яку переноситься енергія звуковою хвилею і яка перпендикулярна напрямку поширення цієї хвилі:

$$I = \frac{P}{S} = E_{max}/St. \quad (9.12)$$

Якщо припустити, що точкове джерело звуку зумовлює сферичну хвилю, то її інтенсивність  $I$  на відстані  $r$  від джерела визначається таким виразом:

$$I = P/(4\pi r^2). \quad (9.13)$$

Інтенсивність звуку пов'язана з амплітудою  $y_{max}$  максимального зміщення співвідношенням:

$$I = (E_{max}/N)V = 2\pi^2\rho v^2 y_{max}^2 V = \Omega^2 \rho y_{max}^2 V. \quad (9.14)$$

Рівень інтенсивності звуку  $L$  оцінюється так:

$$L = 10 \lg\left(\frac{I}{I_0}\right), \quad (9.15)$$

де  $I$  — інтенсивність звукової хвилі, що оцінюється,  $I_0$  — мінімальна інтенсивність (для повітря  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>). Тут  $L$  вимірюється у децибелах (дБ). Типові значення рівня інтенсивності звуку наведено в табл. 9.2.

Звуковим (або акустичним) тиском  $p_a$  називають додатковий тиск (надлишковий над середнім тиском навколишнього середовища), що утворюється в ділянках згущення частинок в акустичній хвилі:

$$p_a = \Omega \rho V y_0, \quad (9.16)$$

де  $\Omega$  — колова частота,  $y_0$  — амплітуда зміщення частинки, що коливається,  $\rho V$  — питомий хвильовий опір середовища.

Звуковий тиск пов'язаний з інтенсивністю хвилі:

$$I = p_a^2/2 \rho V. \quad (9.17)$$

## 9.2. Типові значення рівня інтенсивності звуку

Джерело звуку	Рівень інтенсивності, дБ
Пошкодження барабанної перетинки	160
Поріг болісних відчуттів	130
Постріл із рушниці	100
Автомобільний сигнал на відстані 6 км	90
Міська вулиця	75
Розмова	55
Шум у кімнаті	40
Відкрита місцевість	10

### 9.3. СУБ'ЄКТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

Звук, що є об'єктом звукових вражень, оцінюється живим організмом суб'єктивно.

*Висота звуку* відповідає якості звуку, що визначається суб'єктивно на слух і залежить в основному від частоти звукових коливань. Зі зростанням частоти висота звуку збільшується і — навпаки. Значно менше висота звуку залежить від інтенсивності і складності звуку.

*Гучність звуку* — це величина, що характеризує слухові відчуття для даного звуку. Гучність звуку залежить від інтенсивності звуку, акустичного тиску, частоти і форми звукових коливань.

*Тембр звуку* визначається спектральним складом звуку, тобто інтенсивністю і частотою обертонів відносно основного тону.

### 9.4. РЕЗОНАНСНІ ЯВИЩА

Розглянемо звукову хвилю, що поширюється в обмеженому просторі (наприклад, уздовж труби). За відбивання хвилі від закритого кінця труби створюються умови для поширення хвиль рівної амплітуди в протилежних напрямках. На кінці труби частинки середовища не спроможні рухатися в поздовжньому напрямку; тут зміщення частинок дорівнюватиме нулю. Точки, де зміщення частинок дорівнює нулю, відповідають вузлам, а зони максимального зміщення, які утворюються за взаємодії хвиль, що поширюються в протилежних напрямках, відповідають спученостям (див. розділ 8.7). Результуюча хвиля, що утворюється в такій замкнутій просторовій системі за рахунок взаємодії двох біжучих хвиль, являє собою стоячу хвилю.

Якщо труба заповнена повітрям, залежно від того, які кінці труби закриті чи відкриті, можуть створитися певні умови для виникнення резонансу (рис. 9.3). Резонансні частоти у цьому разі визначаються так:

1. Для труби, закритої з обох кінців:

$$\nu = \frac{(n+1)V}{2L}; \quad (9.18)$$

2. Для труби, відкритої з обох кінців:

$$\nu = \frac{(n+1)V}{2L}; \quad (9.19)$$

3. Для труби, закритої з одного кінця:

$$\nu = \frac{(2n+1)V}{4L}. \quad (9.20)$$

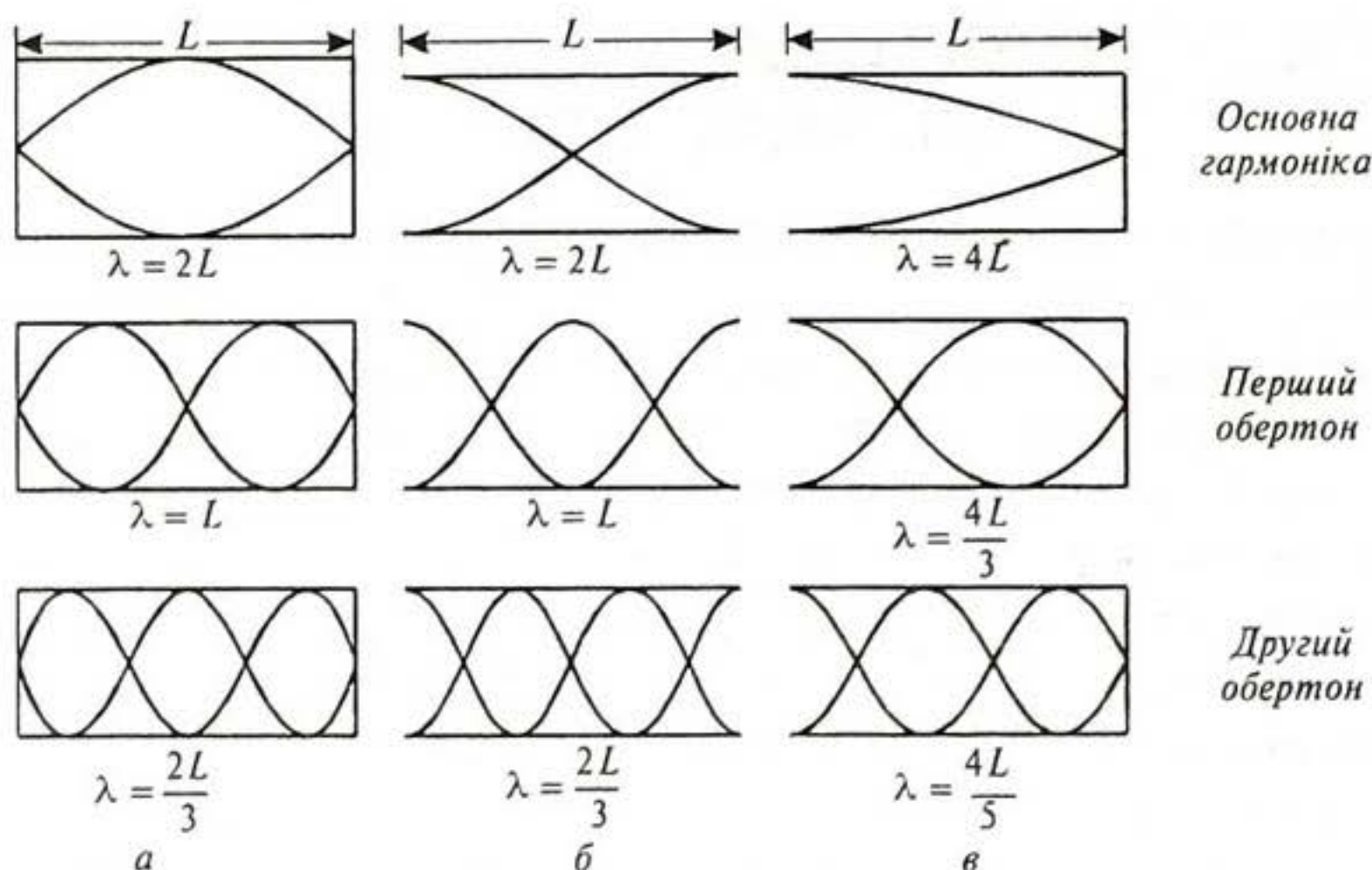


Рис. 9.3. Стоячі хвилі в трубі: а — закритої з обох кінців; б — відкритої з обох кінців; в — закритої з одного кінця

Частота, що відповідає максимальній довжині хвилі, яка зумовлює резонанс у трубі, називається *основною*; вищі резонансні частоти називаються *обертонами*.

## 9.5. ЕФЕКТ ДОППЛЕРА

Якщо приймач і джерело звуку нерухомі один відносно одного, має місце співвідношення:

$$\Lambda = \frac{V}{\nu}, \quad (9.21)$$

де  $\Lambda$  — довжина,  $V$  — швидкість,  $\nu$  — частота звукової хвилі.

Якщо джерело звуку наближається до приймача, довжина звукової хвилі визначається так:

$$\Lambda = \frac{V - V_a}{\nu}, \quad (9.22)$$

а частота звуку, що сприймається приймачем, так:

$$\nu_a = \frac{V}{V - V_a} \cdot \nu. \quad (9.23)$$

Таким чином, частота джерела звуку, що наближається, збільшується порівняно з частотою нерухомого джерела в  $\left(\frac{V}{V - V_a}\right)$  разів.

У випадку віддалення джерела звуку від приймача має місце співвідношення:

$$v_r = \left( \frac{V}{V + V_r} \right) \cdot v. \quad (9.24)$$

В цьому разі частота джерела, що віддаляється, зменшується в  $\left( \frac{V}{V + V_a} \right)$  разів.

Якщо джерело звуку нерухоме, а приймач наближається до нього, частота звукової хвилі, що сприймається приймачем, збільшується:

$$v'_a = \left( \frac{V + V'_a}{V} \right) \cdot v. \quad (9.25)$$

При віддаленні приймача від джерела частота звукової хвилі, що сприймається приймачем, зменшується:

$$v'_r = \left( \frac{V - V'_r}{V} \right) \cdot v. \quad (9.26)$$

Така зміна частоти (довжини звукової хвилі) в процесі руху джерела звуку (або приймача) називається *ефектом Доплера*.

## 9.6. ПАДІННЯ ЗВУКОВОЇ ХВИЛІ НА МЕЖУ ПОДІЛУ ДВОХ СЕРЕДОВИЩ

При поширенні звуку через межу поділу двох середовищ відношення інтенсивностей звукової хвилі, що пройшла, до тієї, що впала, визначається виразом:

$$I_t/I_i = 4\rho_1 V_1 \rho_2 V_2 / (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2)^2, \quad (9.27)$$

а відношення інтенсивностей відбитої звукової хвилі до падаючої — так:

$$I_r/I_i = [(V_2 \rho_2 - V_1 \rho_1) / (V_2 \rho_2 + V_1 \rho_1)]^2. \quad (9.28)$$

де  $\rho_1$  і  $\rho_2$  — густина середовищ,  $V_1$  і  $V_2$  — швидкість поширення звуку в обох середовищах.

## 9.7. УЛЬТРАЗВУК ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Пружні хвилі з частотами від  $2 \cdot 10^4$  Гц до  $10^9$  Гц називаються *ультразвуком*. Зазвичай у біомедичних ультразвукових приладах використовують частоти від 1 МГц до 10 МГц. Мінімальна межа цього частотного діапазону зумовлена погіршенням просторового розподілу; максимальна межа пов'язана зі зростанням ослаблення ультразвукової хвилі речовиною на великих частотах і, відповідно, малою часткою відбитої енергії.



До основних особливостей ультразвуку належить його властивість поширюватись по прямій, що дає підстави розглядати цей процес з позицій геометричної акустики (відбивання, заломлення, фокусування). Крім того, оскільки густина потоку енергії пропорційна квадрату частоти, ультразвукові хвилі характеризуються великою енергією.

## 9.8. ОСЛАБЛЕННЯ, ПОГЛИНАННЯ І РОЗСІЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ

Уявимо однорідний ультразвуковий промінь циліндричної форми, що проходить крізь тканину. Інтенсивність такого випромінювання зменшується з глибиною за експоненціальним законом:

$$I = I_0 e^{-2mx}, \quad (9.29)$$

де  $I$  — інтенсивність ультразвукового випромінювання в точці  $x$  (інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди тиску),  $I_0$  — початкова інтенсивність,  $m$  — коефіцієнт лінійного ослаблення, який являє собою ослаблення, що набуває випромінювання під час проходження однорідного об'єкта, поділене на довжину цього об'єкта:

$$m = \frac{D}{l}, \quad (9.30)$$

де  $D$  — ослаблення.

У реальній ситуації всі біологічні матеріали неоднорідні, оскільки складаються з клітин, кровоносних судин, сполучених тканин тощо. Отже, ослаблення  $D$  випромінювання відбувається не тільки внаслідок поглинання, але й розсіювання.

Якщо процеси розсіювання відсутні, вирази (9.29) і (9.30) перетворюються у такі:

$$I = I_0 e^{-2ax}, \quad (9.31)$$

$$a = \frac{A}{l}, \quad (9.32)$$

де  $a$  — лінійний коефіцієнт поглинання;  $A$  — поглинання.

Одиниця вимірювання коефіцієнтів  $m$  і  $a$  —  $m^{-1}$ .

Кількісною оцінкою ослаблення або поглинання є *логарифмічний декремент затухання*  $\delta$ , що дорівнює натуральному логарифму відношення двох послідовних амплітуд  $A(t)$  та  $A(t + T)$  (де  $T$  — період ультразвукового коливання):

$$\delta = \frac{A(t)}{A(t + T)}. \quad (9.33)$$

Типові значення коефіцієнта затухання наведено в табл. 9.3.

### 9.3. Коефіцієнт згасання ультразвуку ( $\nu = 10^6$ Гц) в деяких речовинах

Речовина	$\alpha$ , $\text{см}^{-1}$	$1/\alpha$ , $\text{см}$
Вода	0,0003	3000
Плазма крові	0,007	130
Кров	0,02	50
Скелетний м'яз	0,20÷0,25	4÷5
Печінка	0,17	6
Нирки	0,22	5
Жирова тканина	0,13	8

## 9.9. ГЛИБИНА ПРОНИКНЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ХВИЛІ В РЕЧОВИНУ

При збудженні ультразвукової хвилі у речовині за допомогою дискового перетворювача розподіл інтенсивності ультразвуку у ній характеризується циліндричною частиною, довжина якої  $x_{max}$ , і конусоподібною частиною з кутом розходження (розбіжністю)  $\beta$  (рис. 9.4).

Глибина  $x_{max}$  проникнення ультразвукової хвилі в тканину оцінюється так:

$$x_{max} \cong a^2/\Lambda, \quad (9.34)$$

де  $a$  — радіус ультразвукового перетворювача,  $\Lambda$  — довжина ультразвукової хвилі.

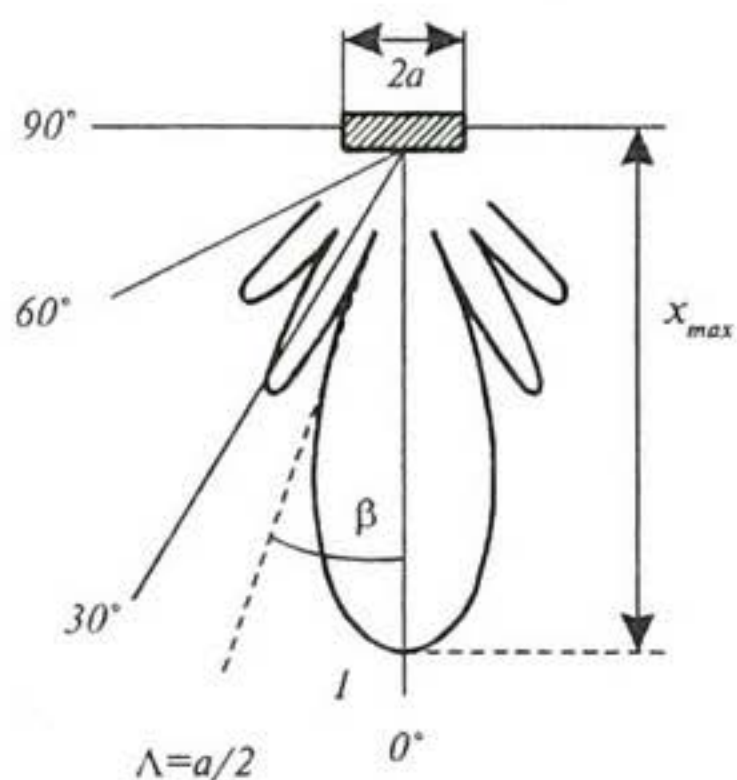


Рис. 9.4. Глибина проникнення і розбіжність ультразвукової хвилі в тканині

## 9.10. РОЗБІЖНІСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ХВИЛІ В СЕРЕДОВИЩІ

Розбіжність  $\beta$  ультразвукової хвилі в середовищі оцінюють за допомогою формули:

$$\sin\beta = 0,61\Lambda/a, \quad (9.35)$$

де  $\Lambda$  — довжина хвилі ультразвуку,  $a$  — радіус перетворювача.

Глибина проникнення і розбіжність ультразвукової хвилі в середовищі залежать від частоти (довжини хвилі) ультразвукового сигналу (табл. 9.4).

9.4. Залежність глибини проникнення і розбіжності ультразвукової хвилі в середовищі від частоти (довжини хвилі) ультразвукового сигналу

Частота $\nu$ , МГц	Довжина хвилі $\lambda$ , см	Глибина проникнення $x_{max}$ , см	Розбіжність $\beta$ , град.
1	0,15	2,4	8,8
2,5	0,06	6	3,5
5	0,03	12	1,75

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Інтенсивність звукової хвилі, створеної ріжком пастуха на відстані 320 м, дорівнює  $10^{-8}$  Вт  $\cdot$  м<sup>-2</sup>. Визначити величину звукового тиску.

### Розв'язок

Використовуючи співвідношення (9.17), маємо:

$$p_o = (2\rho VT)^{1/2}.$$

Підставляємо числові значення і дані табл.9.1:

$$p_o = (2 \cdot 427 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2})^{1/2} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2} = 2,92 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}.$$

### Контрольне завдання № 9.1

Кудкудакання курки створює додатковий тиск у межах 1 Н  $\cdot$  м<sup>-2</sup>. Використовуючи дані табл.9.1, розрахувати інтенсивність звуку, створеного куркою в повітрі.

Відповідь:  $10^{-3}$  Вт  $\cdot$  м<sup>-2</sup>.

### Приклад

Пастухи використовують ріжок для попередження овець про наявність поблизу небезпечних скель на морському узбережжі. На якій відстані можна почути звук ріжка, якщо інтенсивність звукової хвилі на відстані 1 м становить  $10^{-3}$  Вт  $\cdot$  м<sup>-2</sup>, а в морських умовах людина чує звук ріжка інтенсивністю  $10^{-8}$  Вт  $\cdot$  м<sup>-2</sup>.

### Розв'язок

Інтенсивність звукової хвилі визначається так:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2},$$

звідки

$$r^2 = \frac{P}{4\pi I}.$$

На відстані 1 м акустична потужність дорівнює:

$$P = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot (1^2) \cdot \text{м}^2 = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

Максимальна відстань визначається як:

$$r_{max}^2 = \frac{4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Вт}}{4\pi I_{min} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-8}} = 10^5 \text{ м}^2;$$

звідси

$$r_{max} = 3,2 \cdot 10^2 \text{ м.}$$

### Контрольне завдання № 9.2

Частота звукової хвилі, створеної ріжком пастуха, дорівнює 40 Гц. Визначити амплітуду максимального зміщення молекул повітря на відстані 320 м, якщо інтенсивність звуку становить  $10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

*Відповідь:*  $2,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ .

### Приклад

Інтенсивність звукового імпульсу, створеного кажаном у процесі ехолокації на відстані кількох сантиметрів, становить  $10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Оцінити рівень інтенсивності в децибелах.

### Розв'язок

Рівень інтенсивності звукового імпульсу визначимо за допомогою виразу:

$$L = 10 \lg \left( \frac{I_{imp}}{10^{-12}} \right),$$

звідки

$$L = 10 \lg \left( \frac{10^{-2}}{10^{-12}} \right) = 10 \lg 10^{10} = 10 \cdot 10 = 100 \text{ дБ.}$$

### Контрольне завдання № 9.3

Оцінити інтенсивність звуку, що викликає болісні відчуття, використовуючи дані табл. 9.2.

*Відповідь:*  $10 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

### Контрольне завдання № 9.4

Визначити, скільком децибелам відповідає шкала рівнів інтенсивностей звуку (використати формулу (9.15) та результати попередньої задачі).

*Відповідь:* 130 дБ.

### Приклад

Визначити частоту звукової хвилі, що сприймається комахою при наближенні до неї кажана зі швидкістю  $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Частота звукової хвилі, що генерується кажаном, дорівнює 60 кГц.

### Розв'язок

Частота звукової хвилі, що сприймається комахою, можна знайти з виразу:

$$v_a = \frac{V}{V - V_a} \cdot v = \frac{340}{340 - 5} \cdot 60 \cdot 10^3 = 60,9 \text{ кГц.}$$

### Контрольне завдання № 9.5

Визначити частоту звукової хвилі, відбитої комахою і сприйнятої кажаном, використовуючи дані попередньої задачі.

*Відповідь:* 61,8 кГц.

### Приклад

Показати, що на межі поділу «повітря-вода» тільки 0,1% падаючої енергії пропускається далі.

Тут:  $\rho_{\text{пов}} = 1,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\rho_{\text{води}} = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $V_{\text{пов}} = 3,3 \cdot 10^2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $V_{\text{води}} = 15 \cdot 10^2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

### Розв'язок

Підставимо у рівняння (9.27) числові дані:

$$I_t / I_i = \frac{4 \cdot 1,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 3,3 \cdot 10^2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 15 \cdot 10^2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{(1,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 3,3 \cdot 10^2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} + 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-3} \cdot 15 \cdot 10^2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})^2} = 1 \cdot 10^{-3} = 0,1\%.$$

### Контрольне завдання № 9.6

Користуючись даними табл. 9.1, визначити коефіцієнт відбивання (відношення інтенсивностей відбитої і падаючої хвиль) при переході звукової хвилі з повітря у воду.

*Відповідь:* 99,94%.

### Приклад

Визначити максимальне прискорення, з яким коливаються частинки тканини під дією ультразвуку з частотою  $10^6$  Гц та інтенсивністю  $4 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ .

### Розв'язок

Використовуючи табл. 9.1, визначимо питомий опір середовища для м'яза:

$$\rho V = 1,058 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 1,568 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} = 1,66 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Звуковий тиск знайдемо із виразу (9.17):

$$p_a = (2I\rho V)^{1/2} = \left( \frac{2 \cdot 4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot 1,66 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}}{10^{-4}} \right)^{1/2} = 3,64 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Рівняння гармонічних коливань має вигляд:

$$y = y_0 \sin \omega t.$$

Максимальна швидкість зміщення частинок речовини під дією ультразвуку дорівнює:

$$V_{max} = \frac{dy}{dt} = y_0 \Omega = y_0 2\pi\nu = 3,5 \cdot 10^{-8} \cdot 6,28 \cdot 10^6 = 22 \cdot 10^{-2} = 0,22 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Звідки максимальне прискорення можна визначити як:

$$a = \frac{d^2y}{dt^2} = -y_0 \Omega^2 = -y_0 (2\pi\nu)^2.$$

Підставляємо числові значення:

$$y_0 = \frac{p_0}{\omega \rho V} = \frac{3,64 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{с}^2}{2\pi \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} \cdot 1,66 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}} = 3,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}.$$

Тоді

$$a = 3,5 \cdot 10^{-8} \text{ м} (2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \text{ с}^{-2})^2 = 1,38 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Таким чином, прискорення, з яким коливаються частинки тканини, в 138000 разів перевищує прискорення вільного падіння.

### Приклад

Оцінити глибину проникнення ультразвукової хвилі в кров, якщо діаметр ультразвукового перетворювача дорівнює 2 см, а частота ультразвукових коливань — 1 МГц.

### Розв'язок

Довжину ультразвукової хвилі можна визначити за допомогою виразу:

$$\Lambda = \frac{V}{\nu},$$

де  $V = 1,5 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  — швидкість поширення ультразвуку,  $\nu$  — частота.

Таким чином

$$\Lambda = \frac{1,5 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{10^6 \text{ с}^{-1}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Підставляючи числові значення в рівняння (9.34), отримаємо:

$$x_{max} = (d/2)^2 / \Lambda = \left( \frac{0,02}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 0,067 \text{ м}.$$

### Контрольне завдання № 9.7

Визначити  $x_{max}$  за умовою попередньої задачі, якщо  $\nu = 20 \text{ кГц}$ .

*Відповідь:*  $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

### Контрольне завдання № 9.8

Визначити максимальне зміщення частинок і порівняти його з довжиною ультразвукової хвилі, що збуджується в кровоносній судині з частотою  $10^6 \text{ Гц}$  та інтенсивністю  $20 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ .

*Відповідь:*  $y_0 = 7,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ;  $\Lambda = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

### Приклад

Визначити розбіжність ультразвукової хвилі частотою 2 МГц, яка збуджується в тканині перетворювача діаметром 0,8 см.

### Розв'язок

Швидкість поширення ультразвуку в м'язовій тканині дорівнює  $1,568 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Довжина ультразвукової хвилі визначається із виразу (9.21) так:

$$\lambda = \frac{V}{\nu} = 1,568 \cdot 10^3 \text{ мс}^{-1} / 2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} = 0,784 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Розбіжність ультразвукової хвилі можна знайти з рівняння (9.35):

$$\sin\beta = 0,61 \cdot 10^{-3} \text{ м} / 0,004 \text{ м} = 0,1196.$$

Звідси

$$\beta = 6,87^\circ.$$

### Контрольне завдання № 9.9

Визначити, наскільки зміниться розбіжність ультразвукової хвилі, якщо в умові попередньої задачі частота збільшиться до  $4 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ .

*Відповідь:*  $\beta = 3,43^\circ$ .

### Приклад

Визначити товщину жирової тканини свині, яка б удвоє послабила інтенсивність ультразвукової хвилі з частотою  $10^6 \text{ Гц}$ .

### Розв'язок

Використовуючи рівняння (9.31), отримаємо:

$$I_0/I_x = e^{2\alpha x} = 2.$$

Логарифмуємо останній вираз:

$$2\alpha x = \ln 2.$$

Звідси

$$x = \frac{\ln 2}{2\alpha}.$$

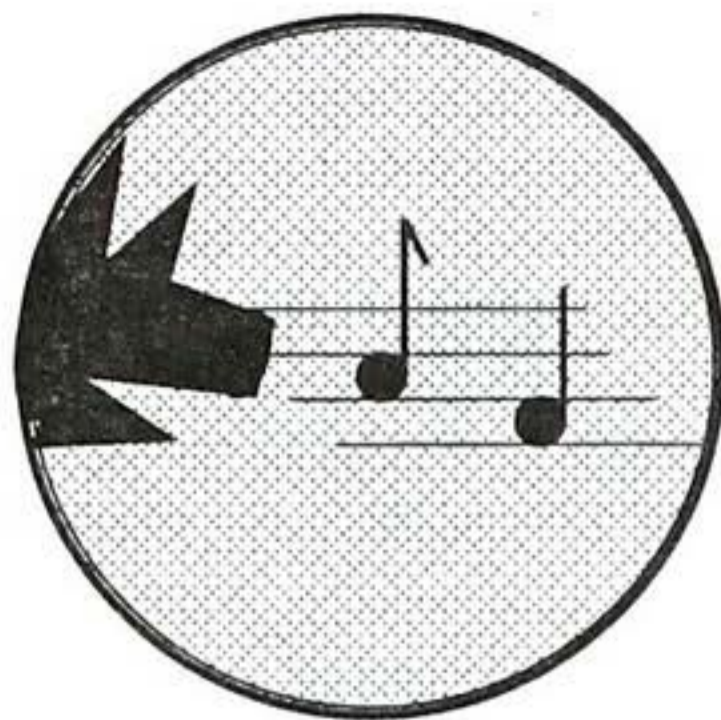
Використовуючи дані табл. 3.3, отримаємо:

$$x = \frac{0,693}{2 \cdot 0,13 \text{ см}^{-1}} = 2,7 \text{ см}.$$

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Назвати основні характеристики звукових коливань.
2. Що таке суб'єктивні характеристики звукових коливань?
3. В чому полягають резонансні явища, що супроводжують поширення звукової хвилі в обмеженому просторі?
4. Що таке «ефект Доплера»?
5. Назвати основні особливості ультразвуку.
6. Від чого залежать глибина проникнення та розбіжність ультразвукової хвилі в речовині?

## 10. БІОАКУСТИКА



Розділ біофізики, що вивчає процеси утворення звуків тваринами за допомогою голосової системи або стридуляційного апарату, звукову сигналізацію та спілкування тварин (біокомунікацію) в природі, їх орієнтацію у просторі за допомогою ехолокаторів, називається *біоакустикою*.

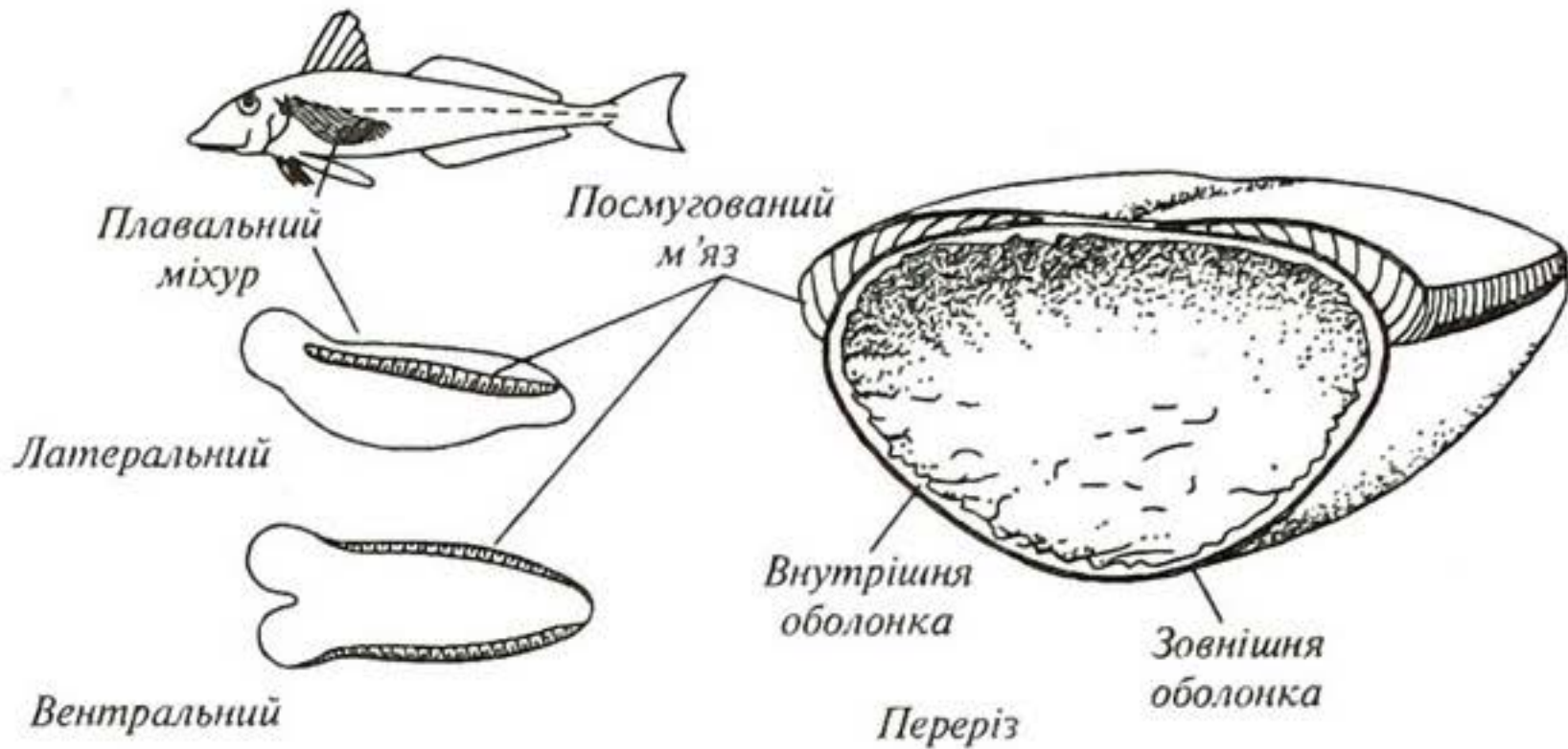
### 10.1. УТВОРЕННЯ ЗВУКІВ ТВАРИНАМИ

*Ссавці.* Первинним джерелом звукових коливань у високорозвинених тварин є гортань і пов'язані з нею голосові зв'язки, еластичні м'язові волокна яких можуть вібрувати. Звукові хвилі утворюються за дії коливальних структур, які у тварин характеризуються певними розмірами і частотним діапазоном м'язових скорочень. Більшість м'язів тварин, незважаючи на їх різноманіття, не здатні коливатися з частотою, що перевищує  $10^3$  Гц. У ссавців звуки утворюються верхньою гортанню, що являє собою хрящову трубку. Повітря, що проходить крізь цю трубку, змушує коливатися голосові зв'язки, розташовані у верхній частині гортані. Залежно від анатомічних особливостей голосового апарату тварини здійснюються коливання різної інтенсивності, частоти, тембру, часових інтервалів. Від цих характеристик залежать звуки, що утворюються свійськими тваринами: іржання, мукання, рохкання, мекання.

*Птахи.* В гортані, яка перетворює кінетичну енергію повітря, що рухається, в енергію звукової хвилі, містяться дві голосових мембрани — під час проходження повітря між мембранами з великою швидкістю статистичний тиск згідно з рівнянням Бернуллі зменшується і мембрани сходяться; отвір закривається, швидкість руху повітря зменшується і статичний тиск збільшується. Процес повторюється, в результаті чого виникають звукові сигнали, частота яких у птахів перебуває в діапазоні від 200 Гц до 12 кГц.



*Риби.* Механізми утворення звуків рибами різні — вони можуть виникати за *стридуляції* — взаємного тертя різних частин тіла, наприклад, складових частин ротового апарату в процесі живлення; гідродинамічної дії — утворення звуків під час плавання; взаємодії спеціалізованих м'язів з плавальним міхуром. Структуру м'язів, обладнаних вузькими борозенками, що взаємодіють з плавальним міхуром у риб *Eutrigla gurnadus* (*Triglidae*), наведено на рис. 10.1. Спектральна область звукових коливань риб становить від 20÷50 Гц до 10÷12 кГц.



**Рис. 10.1.** Структура м'язів з вузькими борозенками, що взаємодіють з плавальним міхуром

*Комахи.* Багато тварин мають настільки малі розміри, що процес утворення звуку завдяки тільки м'язовим волокнам виявлятиметься вкрай неефективним. Розв'язати цю проблему можна лише через помноження частоти звукового сигналу, що здійснюється у стридуляційному апараті комах. Незважаючи на різні анатомічні властивості стридуляційних апаратів, принципи їх дії майже однакові. Стрекотальний кантик, розміщений в одній частині апарату, рухається вздовж стрекотальної жилки, яка має періодичну структуру. Розміри елементів цієї структури — близько кількох мікрометрів. Протягом кожного м'язового скорочення кантик торкається сотні елементів жилки, утворюючи звуки високої частоти.

## 10.2. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО СУПРОВОДЖУЮТЬ ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ У НАВКОЛИШНЬОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Серед основних процесів, що характеризують взаємодію звукових хвиль з навколишнім середовищем, слід виділити поглинання, послаблення, відбивання, заломлення, дифракцію, розсіювання.

Послаблення звуку супроводжується зменшенням звукового тиску зі збільшенням відстані до джерела звуку. Залежно від структури звукового випромінювача тварини послаблення звуку при збільшенні відстані в 2 рази становить  $6 \div 12$  дБ.

Відбивання звуку має місце, коли розміри навколишніх поверхонь значно перевищують довжину звукової хвилі і коли розміри жорсткості поверхні менші за довжину звукової хвилі. Процес відбивання звуку реалізується на межах розподілу «повітря-грунт», «повітря-вода», а також між шарами повітря з різними рівнями температури або вологості. Під час утворення звуків тваринами може відбуватися взаємодія звукових хвиль: одна з них поширюється безпосередньо між випромінювачем і приймачем, а інша відбивається від поверхні землі (рис. 10.2). За інтерференції ці дві хвилі компенсують одна одну, оскільки відбита хвиля змінює свою фазу. Для запобігання процесу інтерференції тварина мусить підійматися над земною поверхнею. Наприклад, цвіркуни здатні чути один одного на відстані в кілька метрів на поверхні ґрунту; ця відстань збільшується до 50 м, якщо комахи підіймаються над поверхнею.

Поглинання звуку пов'язане з переходом звукової енергії у теплову та поширенням звуку в інші середовища. У повітрі і воді більше затухають високочастотні звукові сигнали; крім того, на поглинання звуку впливають температура і вологість повітря.

Заломлення звуку викликається різкими або поступовими змінами швидкості поширення звукової хвилі, що залежать від температури та густини середовища. В сонячний день температура зменшується з відстанню від земної поверхні, так само, як і швидкість поширення звуку. Це викликає заломлення звукової хвилі догори. Вночі ситуація змінюється і звук «знаходить» канали поширення вздовж земної поверхні.

Дифракція або розсіювання звуку пов'язані зі зміною напрямку поширення звукової хвилі під час її взаємодії з об'єктами. Якщо розміри об'єкта співмірні довжині хвилі, відбувається огинання об'єкта (дифракція) або зміна траєкторії поширення хвилі (розсіювання). Такі процеси відбуваються під час поширення звуку крізь рослинні покриви.

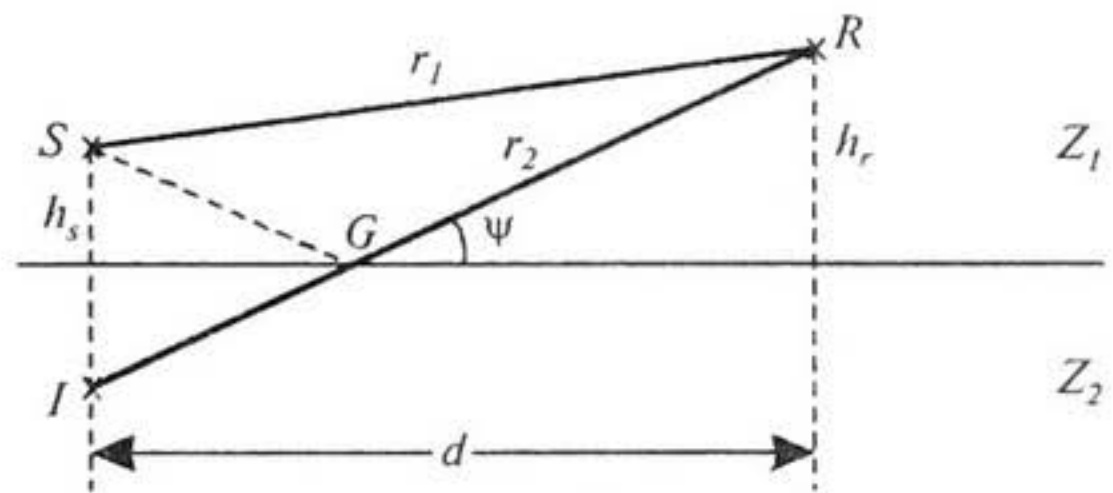


Рис. 10.2. Процес інтерференції звукових хвиль:  $S$  — джерело звуку;  $R$  — приймач звуку;  $h_s$  — висота розташування джерела звуку;  $h_r$  — висота розташування приймача звуку;  $Z_1$  — повітря;  $Z_2$  — ґрунт;  $r_1$  — відстань, яку проходить звукова хвиля у повітрі;  $r_2$  — відстань, яку проходить звукова хвиля до і після відбивання від земної поверхні;  $d$  — відстань між джерелом та приймачем звуку;  $90^\circ - \psi$  — кут відбивання;  $G$  — точка падіння звукової хвилі на земну поверхню

### 10.3. ПОШИРЕННЯ ЗВУКІВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Вода має багато відмінного від повітря з точки зору поширення звуку. Низькочастотні звукові сигнали під час поширення у воді зазнають меншого розсіювання або поглинання, завдяки чому відстань, на якій сприймаються ці сигнали, значна. Наприклад, низькочастотні звуки, що утворюються китом *Balaenoptera physalus*, можна чути на відстані у кілька десятків кілометрів.

Акустичні характеристики води і повітря значно відрізняються (табл. 9.1). Через це зміщення частинок води і швидкість цього зміщення приблизно в 3600 разів менші, ніж у повітрі. Саме тому межа розподілу «повітря-вода» відіграє роль своєрідного рефлектора звукових коливань. Наявність таких меж має важливе значення для акустичної комунікації водних організмів. На рис. 10.3 наведено структуру акустичних сигналів, що реєструються водними мешканцями безпосередньо від джерела звуку і після відбиття від межі розподілу.

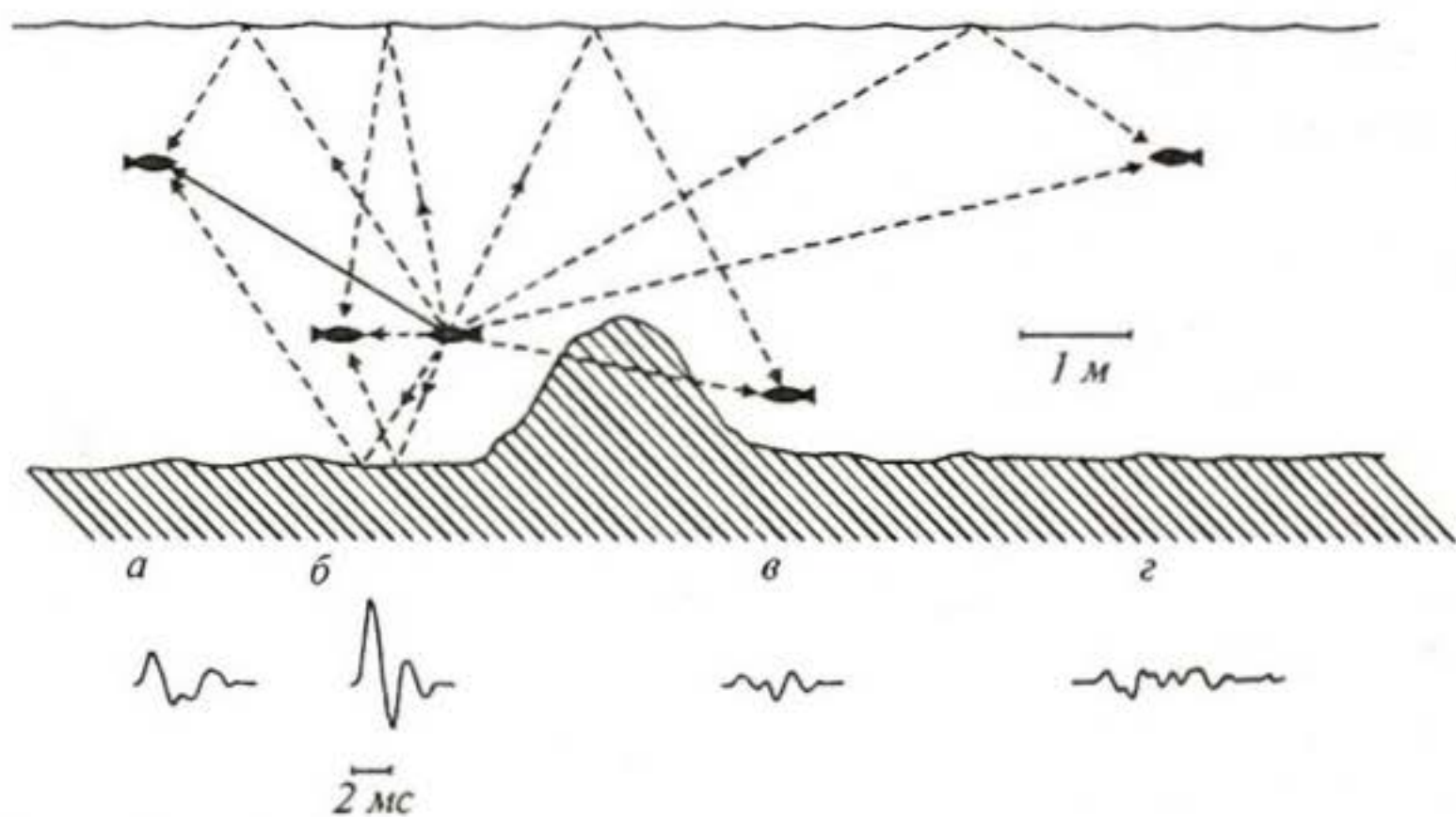


Рис. 10.3. Структура звукових хвиль у процесі їх поширення та взаємодії з навколишнім середовищем

### 10.4. АКУСТИЧНА КОМУНІКАЦІЯ ТВАРИН

Всі акустичні сигнали, що утворюються птахами, можна поділити на дві основних групи — *заклики* і *співи*. Заклик можна уявити як елемент більш складного акустичного сигналу — співу. Залежність частоти й інтенсивності звукових сигналів, що утворюються птахами, від часу називають *сонограмами*.

Пташині заклики відрізняються за змістом. Можливі варіації закликів двох видів птахів наведено на рис. 10.4. Тут заклики *a-d* використовуються для позначення території та відлякування інших

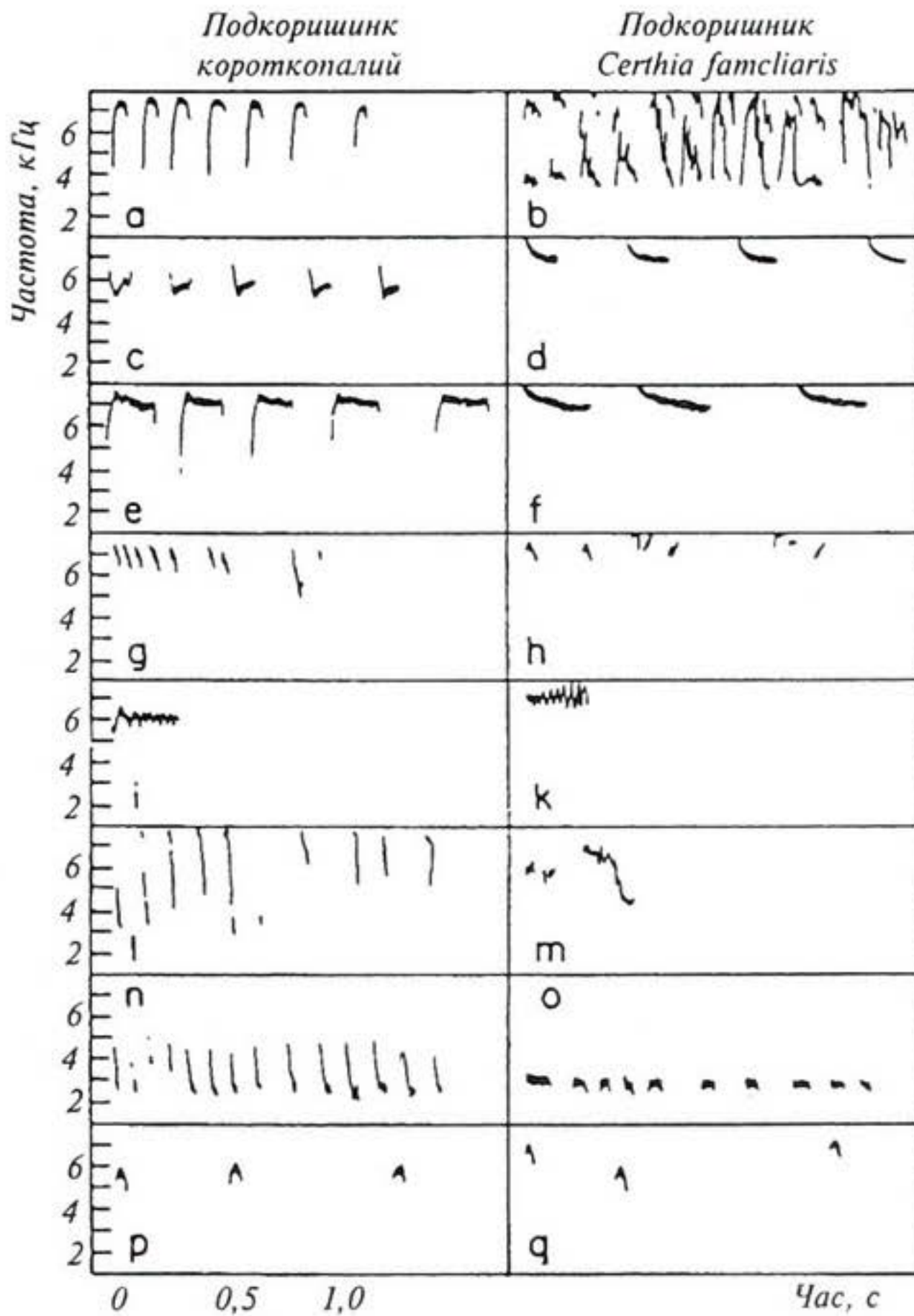


Рис. 10.4. Можливі варіації закликів двох видів птахів (пояснення в тексті)

самців — представників цього виду. Якщо птаха зловлено, він утворює звуки тривоги *e-f*. Звуки *g-k* призначені для налагодження контакту з родичем; звуки *l-m* використовують під час холодної погоди, щоб зібрати представників цього виду для сумісного сну; звуки *n-o* є сигналами годівлі пташенят, що спонукають останніх відкрити рота; звуки *p-q* закликають пташенят до сну. Крім того, пташині заклики використовуються для заохочення птахів до годівниці, у процесі висиджування, для впізнавання пташенят (якщо птахи мешкають у колоніях), під час міграції тощо.

Співи птахів виконують подвійну функцію. По-перше, вони інформують про власність певної території і попереджують небажаних візитерів. По-друге, спів призначений для привертання уваги статевого партнера з метою залицяння та спаровування. У деяких видів птахів вокальний дует допомагає налагодити тісний контакт між членами пари і синхронізувати взаємну поведінку у часі. На

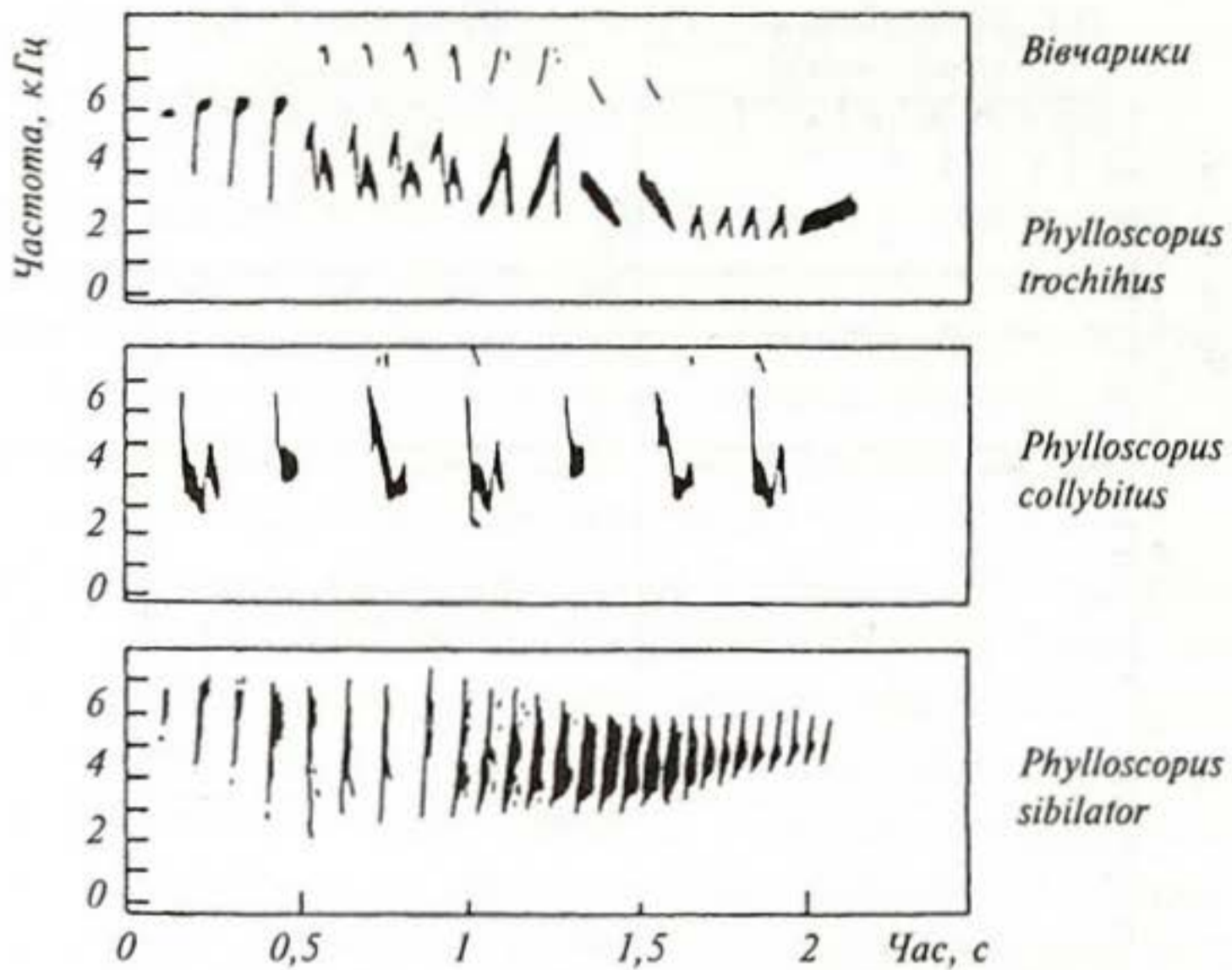


Рис. 10.5. Сонограми співів птахів — представників різних видів одного роду. Кожний спів триває п'ять секунд

рис. 10.5 наведено сонограми співів птахів — представників різних видів одного роду (вівчариків). Як бачите, три сонограми значно відрізняються. Характеристики цих сонограм можуть бути використані як таксономічні критерії.

Акустичні сигнали, утворювані птахами, відрізняються за інтенсивністю, частотою, часовою тривалістю. Птахи — представники певного виду — впізнають один одного завдяки *амплітудній модуляції*, що полягає в зміні інтенсивності акустичного сигналу у часі, та *частотній модуляції* — зміні частоти акустичних сигналів.

Акустичні сигнали риб поділяються на харчові, нерестові, агресивнооборонні, групові і пов'язані з турботою про нащадків. Стридуляційні звуки нагадують скрегіт і скрип; діапазонах їх частоти досить значний — від 20 Гц до 12 кГц. Гідродинамічні звуки складаються з низькочастотних сигналів (20 Гц÷5 кГц), що утворюються за руху плавців і тіла риби, і високочастотних звуків, що забезпечуються рухом внутрішніх органів. Звуки, що виникають за рахунок взаємодії м'язів з плавальним міхуром, займають область 40 Гц÷2,5 кГц і являють собою серію імпульсів.

Бджоли у процесі спілкування утворюють звуки, зумовлені діяльністю крилових пластин та тораксу. Спектр звуків бджоли займає область 8÷12 кГц, в якій можна виділити три максимуми — 75÷190 Гц, 210÷400 Гц і 450÷550 Гц. Інтенсивність і спектральне положення цих максимумів залежать від рівня вентиляції, пори року, температури, наявності корму. Одержано відомості, що бджоли здатні видавати ультразвукові (20÷22 кГц) коливання, в яких, можливо, беруть участь

високочастотні гармоніки або вихрові потоки, що виникають під час польоту бджоли. Звукові сигнали, утворювані бджолами, використовуються ними для повідомлення членів родини про виявлення корму. Частотна характеристика звуків, що їх утворюють бджоли під час своєрідного танку, містить у собі інформацію про відстань до корму. Тривалість звукового посилення, тривалість паузи між посиленнями, частота проходження посилення і кількість коливань у посиленні залежать від відстані до годівниці. Крім того, структура акустичного сигналу специфічна для бджіл — представниць різних рас. У період роїння бджоли також обмінюються звуковою інформацією, закладеною у спектральному складі акустичних сигналів: так, звукові сигнали, що сповіщають бджіл про можливе злітання, являють собою поодинокі імпульси з максимумом при  $300 \div 660$  Гц; рій, що вилетів з вулика і літає перед ним, утворює інтенсивні звуки, в спектрі яких є два максимуми — при  $185 \div 265$  Гц і  $430 \div 510$  Гц.

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Визначити відстань, яку проходять імпульси кажана, які він посилає з частотою 4 імпульси за секунду.

### Розв'язок

Звуковий імпульс, створений кажаном, проходить подвійну відстань  $d$  від кажана до об'єкта зі швидкістю  $V$  за проміжок часу  $t$ . Всі ці параметри пов'язані співвідношенням:

$$V = \frac{2d}{t}.$$

Звідси відстань, яку проходить імпульс, визначиться за виразом:

$$d = \frac{Vt}{2}.$$

Підставляємо числові дані:

$$d = \frac{340 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 0,25 \text{ с}}{2} = 43 \text{ м}.$$

### Контрольне завдання № 10.1

Визначити відстань, яку проходять імпульси кажана, які він посилає з частотою 200 імпульсів за секунду.

*Відповідь:* 0,85 м.

### Приклад

Типові імпульси, створювані кажанами в процесі ехолокації, характеризуються частотою  $5 \cdot 10^4$  Гц і тривалістю 60 мілісекунд (рис. 10.6). Визначити довжину звукової хвилі та амплітуду максимального зміщення молекул повітря, якщо об'ємна густина енергії становить  $2,5 \cdot 10^{-9}$  Дж  $\cdot$  м<sup>3</sup>.

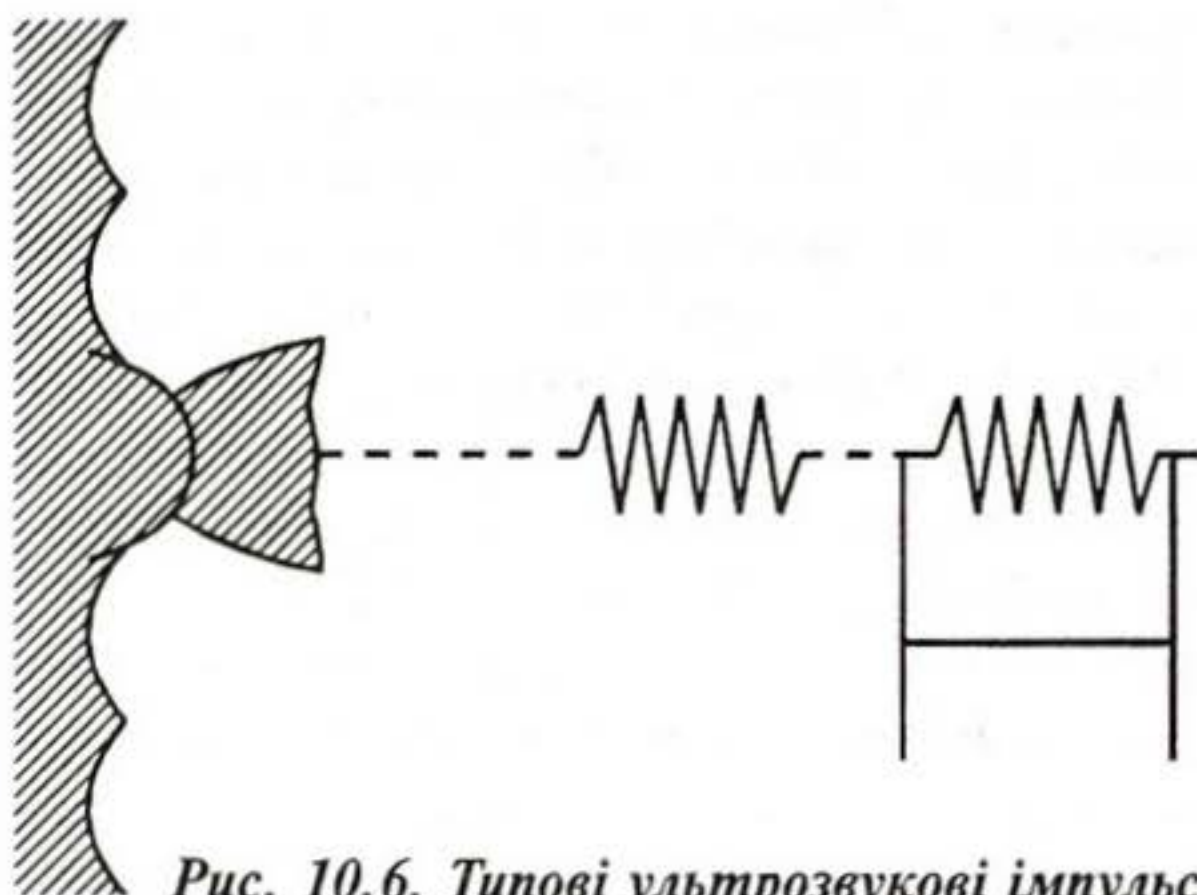


Рис. 10.6. Типові ультразвукові імпульси, що створює кажан під час ехолокації

### Розв'язок

Довжина  $L$  звукової хвилі пов'язана зі швидкістю  $V$  поширення звуку і тривалістю  $t$  звукового імпульса співвідношенням:

$$L = Vt.$$

Підставляємо числові значення:

$$L = 340 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 60 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 20,4 \text{ м}.$$

Амплітуду максимального зміщення  $y_{max}$  можна визначити зі співвідношення (9.10):

$$\begin{aligned} y_{max}^2 &= (E_{max}/N) / 2\pi^2 \rho v^2 = \\ &= \frac{2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}}{2 \cdot 3,14^2 \cdot 1,29 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} (5 \cdot 10^4)^2 \text{ с}} = 3,9 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Звідки

$$y_{max} = 2,0 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,20 \text{ нм}.$$

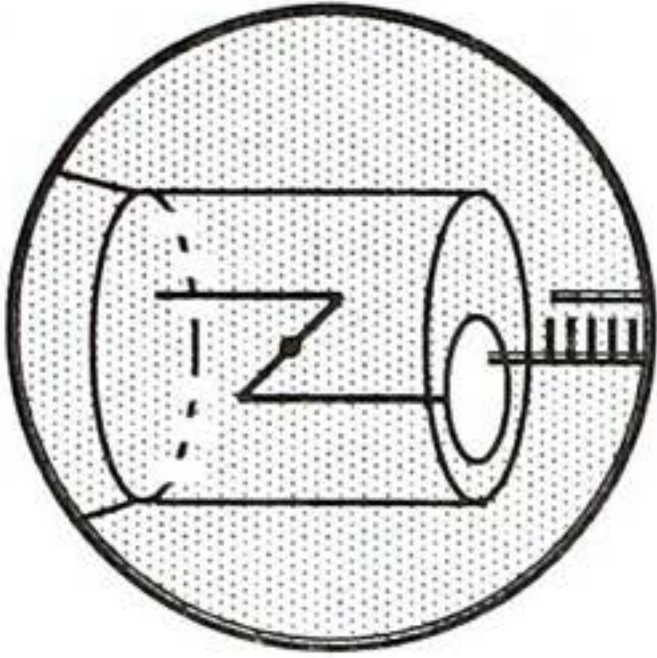
### Контрольне завдання № 10.2

Визначити акустичну потужність, що переноситься звуковим імпульсом кажана, якщо повна енергія становить  $2,5 \cdot 10^{-9}$  Дж, а тривалість імпульса 2,5 мс.

Відповідь:  $10^{-6}$  Вт.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як утворюються звуки ссавці? птахи? риби? комахи?
2. Назвати основні процеси, що супроводжують взаємодію звукових хвиль з навколишнім середовищем.
3. Чим відрізняються акустичні характеристики води і повітря?
4. Як здійснюється акустична сигналізація птахів? риб? бджіл?



## 11. АКУСТОБІОЛОГІЯ

озділ біофізики, що вивчає будову і фізичні принципи функціонування слухового аналізатора тварин, процеси акусторецепції і вплив акустичних сигналів на тварин, називається *акустобіологією*.

### 11.1. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В СЛУХОВОМУ АНАЛІЗАТОРІ ССАВЦІВ

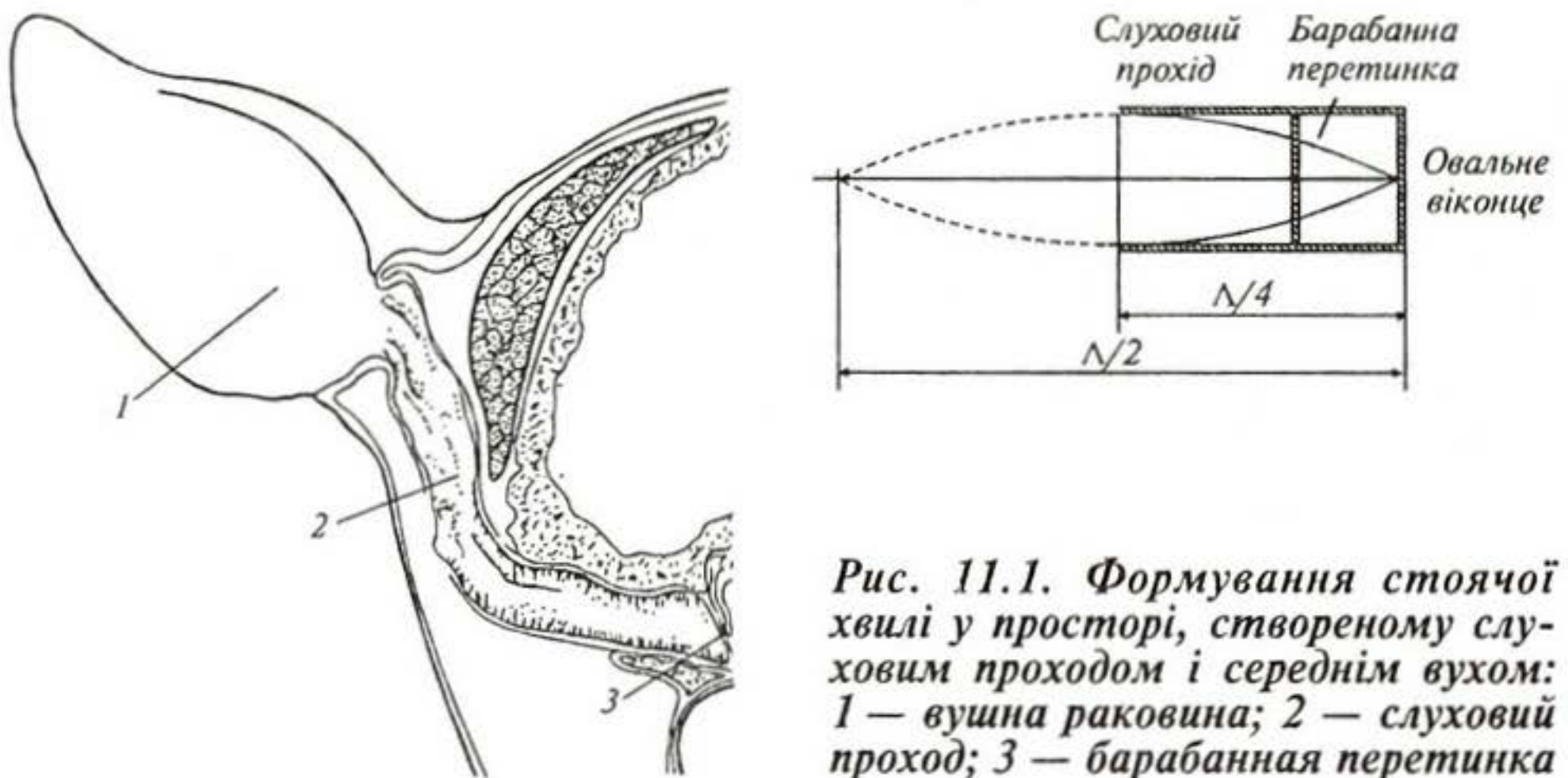
Слуховий аналізатор ссавців складається із зовнішнього, середнього і внутрішнього вух, пов'язаних з центральною слуховою нервовою системою.

*Зовнішнє вухо* тварини складається з *вушної раковини* (звуковловлювача) і *слухового проходу*. Вушна раковина служить рупором, що спрямовує звукові коливання в слуховий прохід. У багатьох тварин (коней, кіз тощо) вушні раковини рухливі; за скорочення м'язів тварина обертає вушні раковини відносно поздовжньої осі, нахиляє їх уперед, назад, убік з тим, щоб спрямувати раковини у бік розташування джерел звуку і забезпечити краще їх сприймання. Функції зовнішнього вуха полягають в оптимізації та підсиленні найважливіших звукових частот, що має сенс з точки зору комунікації тварин між собою та їх виживання.

У просторі, створеному слуховим проходом і середнім вухом, формується стояча хвиля (рис. 11.1). При рівності довжини цього простору чверті довжини хвилі звуку має місце *резонанс* — відносно великий селективний (вибірний) відгук коливальної системи на періодичний вплив з частотою, близькою до частоти її власних коливань. Під час резонансу відбувається різке зростання амплітуди вимушених коливань системи. Максимальна чутливість слухового аналізатора проявляється саме до резонансних частот.

*Середнє вухо* тварини, відокремлене від зовнішнього барабанною перетинкою, складається з *барабанної порожнини*, *слухових кісточок* (*молоточка*, *коваделка* і *стремінця*) та *слухової труби*. Функції середнього вуха обмежуються передачею звукових коливань від зовнішнього

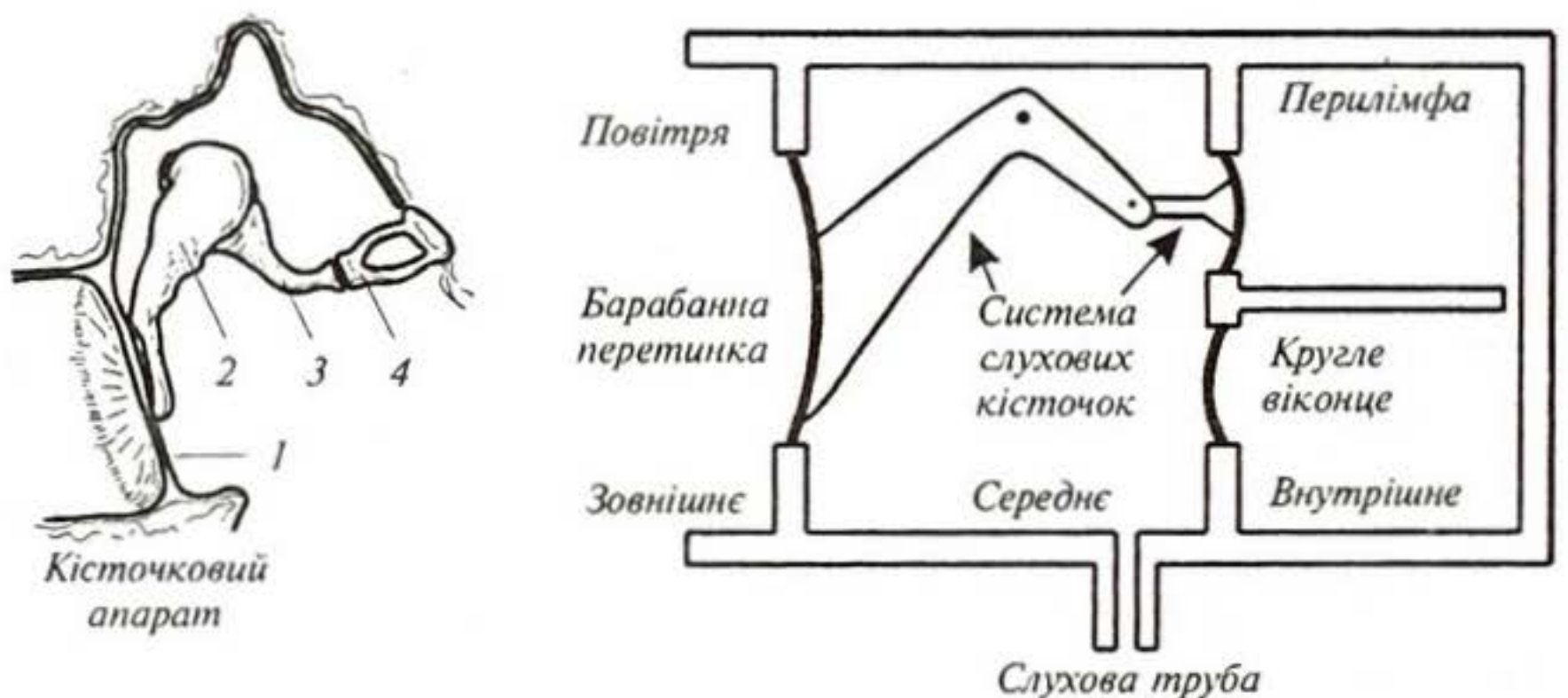




**Рис. 11.1.** Формування стоячої хвилі у просторі, створеному слуховим проходом і середнім вухом: 1 — вушна раковина; 2 — слуховий прохід; 3 — барабанна перетинка

середовища до ендолімфи, підсиленням слабких звукових сигналів і забезпеченням безпечного приймання інтенсивних сигналів. Процес підсилення реалізується за збільшення тиску, що пов'язано з відмінністю площі барабанної перетинки і овального віконця, яке зв'язане із стремінцем і відокремлює середнє вухо від внутрішнього; виграш у тиску становить близько 20÷25 разів. Крім того, кісточковий апарат виконує функції важеля, що забезпечує виграш у силі приблизно в 2,5 раза (рис. 11.2). Загальний рівень підсилення звукових коливань середнім вухом становить, таким чином, близько 50÷60 разів.

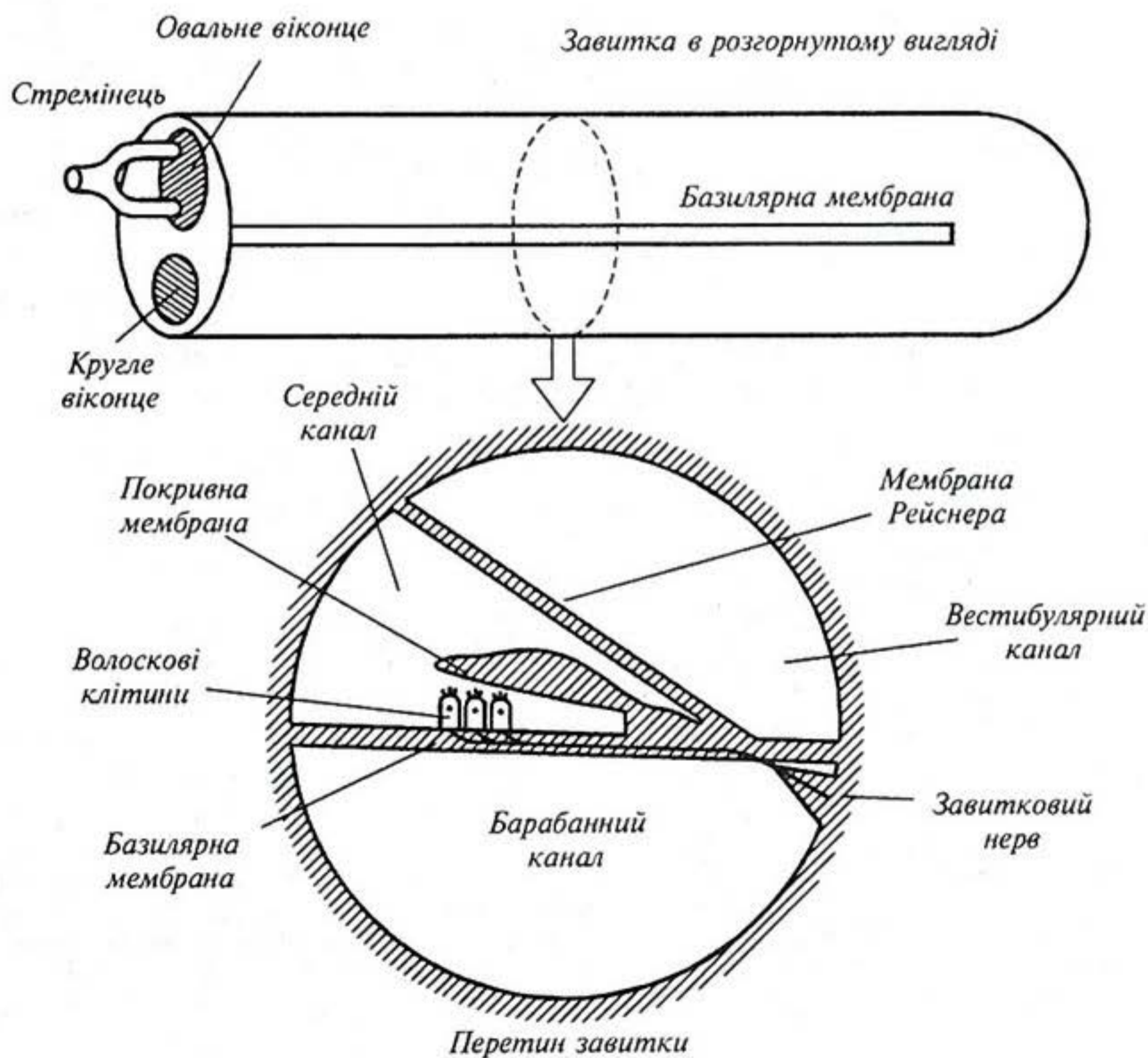
Внутрішнє вухо складається з трьох спіральних каналів — вестибулярного, середнього і барабанного, причому середній канал відмежований від вестибулярного мембраною Рейсснера, а від барабанного — базиллярною мембраною. На проксимальному кінці (що міститься ближче до осі тіла) барабанного каналу знаходиться кругле віконце,



**Рис. 11.2.** Кісточковий апарат середнього вуха та модель, що пояснює функціонування середнього вуха: 1 — барабанна перетинка; 2 — молоточок; 3 — коваделко; 4 — стремінець

що виконує функції демпфера. Акусторецепторами є *волоскові клітини*, зв'язані з базилярною мембраною; ці клітини оснащені *війками* (рис. 11.3). Базилярна і покривна мембрани, волоскові клітини, з'єднані з *нервовими волокнами*, утворюють *кортіїв орган*. Функції внутрішнього вуха полягають у частотному аналізі звукових сигналів. Згідно з сучасними уявленнями, коливання, збуджені стремінцем в овальному віконці, викликають хвильові рухи базилярної мембрани у вигляді біжучої хвилі (рис. 11.4).

Розташування максимуму біжучої хвилі залежить від частоти звукового сигналу — низькі частоти стимулюють верхівкові ділянки мембрани, тоді як високі — основу мембрани (рис. 11.5). Зміщення базилярної мембрани передаються волосковим клітинам, над якими розміщена покривна мембрана. За деформації базилярної мембрани покривна мембрана також починає рухатися, але за різних систем закріплення обох мембран (дві точки опори у базилярній мембрані і одна — у покривній) на війки волоскових клітин діє з боку покривної мембрани сила зміщення (рис. 11.6); вигин війок приводить до збудження зв'язаних з волосковими клітинами волокон слухового



**Рис. 11.3. Будова внутрішнього вуха (завиток у розгорнутому вигляді) та переріз завитки**

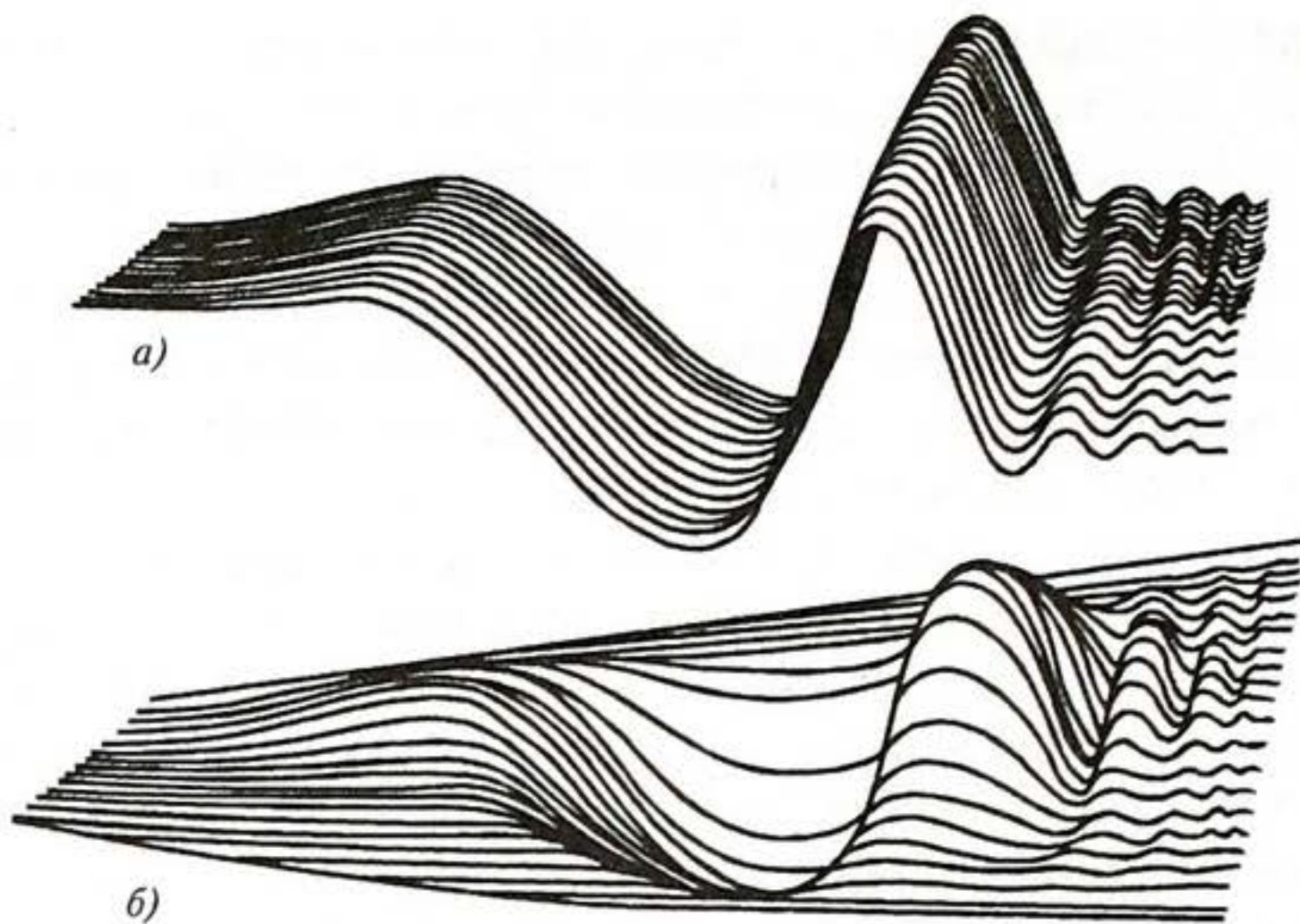


Рис. 11.4. а) хвильові рухи базильної мембрани у вигляді біжучої хвилі, що поширюється вздовж мембрани; б) реальніша ситуація, коли біжуча хвиля поширюється як в поздовжньому, так і в поперечному напрямках

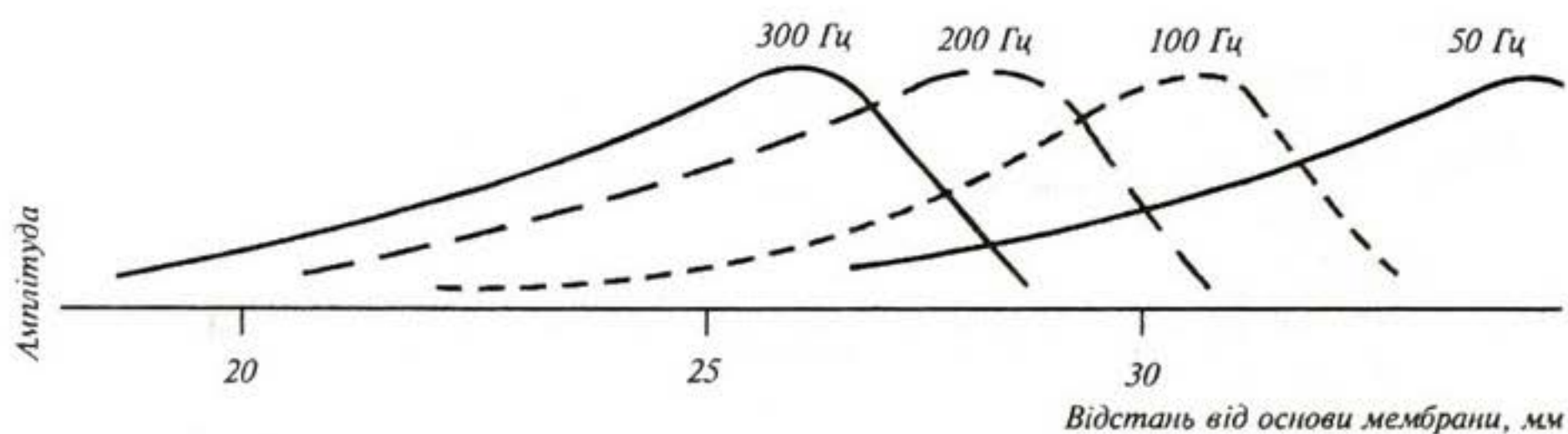


Рис. 11.5. Залежність розміщення максимуму біжучої хвилі від частоти звукового сигналу

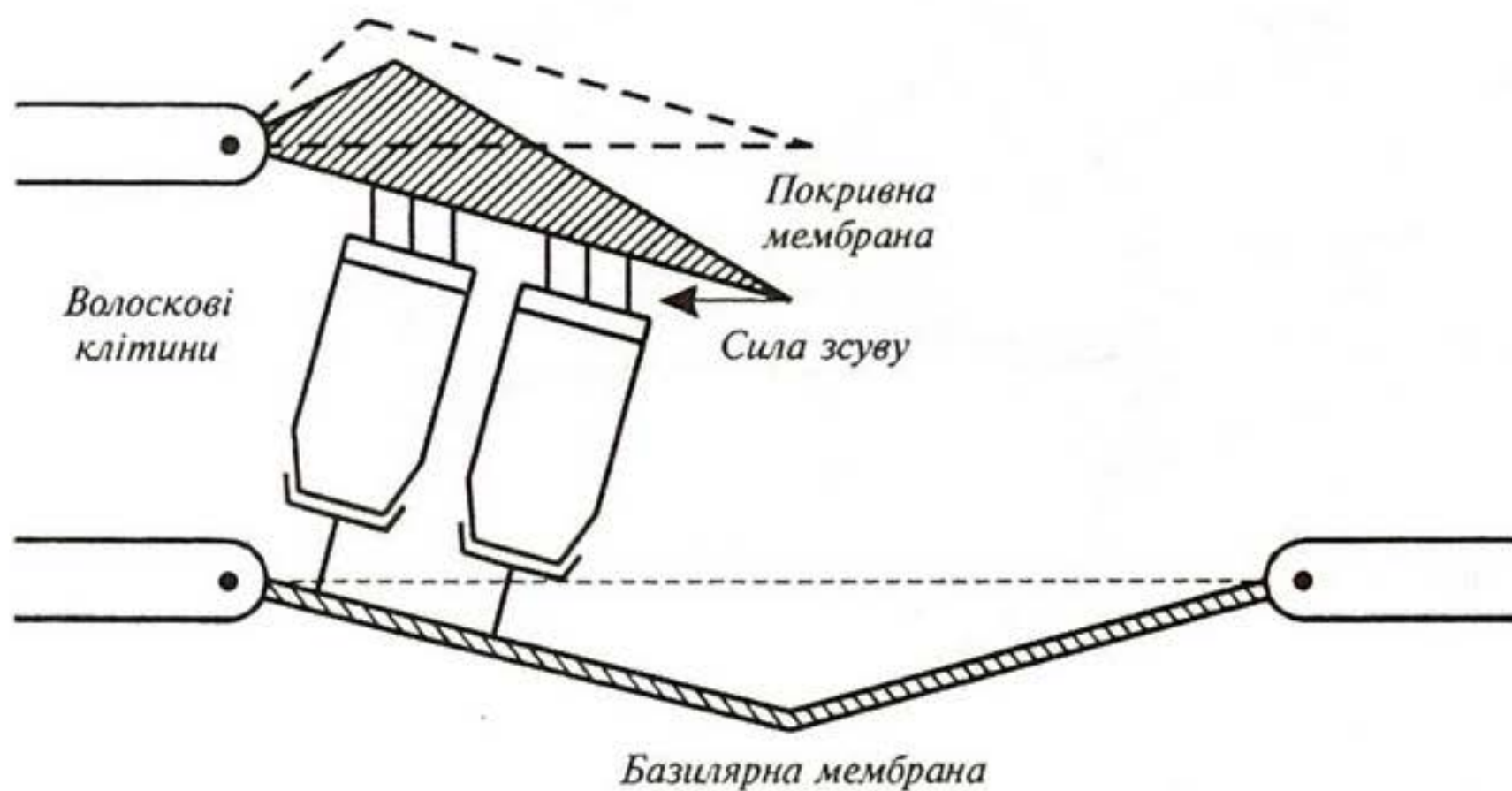


Рис. 11.6. Виникнення сили зсуву, що діє на волоскові клітини завдяки руху покривної та базильної мембран

нерва. Автору теорії біжучої хвилі Георгу фон Бекеші було присуджено в 1961 р. Нобелівську премію.

Таким чином, звукова хвиля зумовлює коливання базилярної мембрани з амплітудою, локалізованою в певних ділянках мембрани. При цьому відбувається локалізоване збудження волоскових клітин кортієвого органу залежно від частоти звукового сигналу.

Визначення місця джерела звуку базується на здатності тварини сприймати різницю фаз та інтенсивність звукових хвиль, що досягають лівого та правого вух. Явище визначення напрямку, звідки надходить звук, тваринами, називають *бінауральним ефектом*.

Внутрішнє вухо різних тварин характеризується певними морфологічними особливостями. Структуру завитки корови наведено на рис. 11.7 — загальна довжина її становить 38 мм, причому сама завитка скручена в 3,5 оберти. Реакція завитки корови починається з 50 Гц.

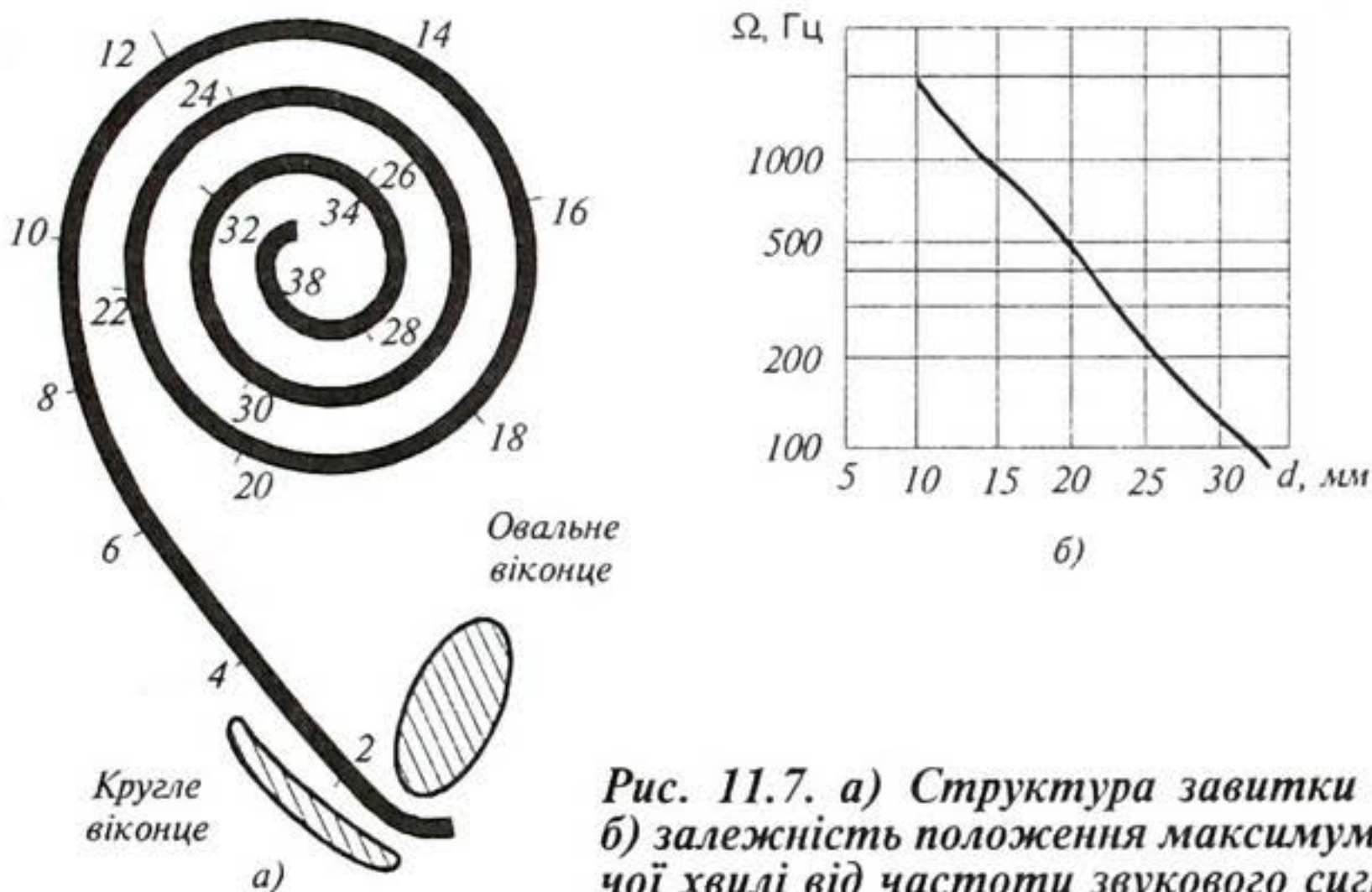


Рис. 11.7. а) Структура завитки корови; б) залежність положення максимуму біжучої хвилі від частоти звукового сигналу

## 11.2. АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ У ПТИЦІ

Слух відіграє значну роль у повсякденному житті птахів під час їх відпочинку або насиджування. Крім того, слух виконує важливі функції у процесі комунікації на довгих відстанях, у місцях з обмеженою видимістю. Особливий інтерес становлять співучі птахи у зв'язку зі складністю їх акустичних комунікаційних систем. Птахам, що ведуть нічний спосіб життя (наприклад, совам), властива надзвичайно висока слухова чутливість; у той же час комунікаційний репертуар їх відносно примітивний.

Слуховий апарат птиці характеризується певними відмінностями від слухового аналізатора ссавців. Зовнішнє вухо має короткий,

широкий і складний за рельєфом слуховий канал, що веде до барабанної перетинки. У багатьох птахів зовнішня частина слухового каналу оточена спеціальним пір'ям, що утворює своєрідне заглиблення, що виконує функції ефективного звукового колектора. Особливо розвинені такі заглиблення параболічної форми у сов. Середнє вухо складається з довгої тонкої кістки, що з'єднує барабанну перетинку з овальним віконцем. Внутрішнє вухо складається з короткої вигнутої завитки, довжина якої становить  $4 \div 10$  мм. Завитка курчати має довжину близько 5 мм. Залежність положення максимуму біжучої хвилі від частоти звукового сигналу наведено на рис. 11.8. Реакція завитки починається з 100 Гц.

Птахи здатні відрізнити амплітудно та частотно модульовані акустичні сигнали. Так, канарка в змозі розрізнити рівні інтенсивності звуку у 1,5 дБ, тоді як голуб — у 3 дБ. Дивує здатність птахів реагувати на незначні зміни частоти акустичних сигналів: частоти, з якими починають і закінчують своє акустичне спілкування птахи, становлять приблизно 10 Гц в області 500 Гц та близько 20 Гц в області  $1 \div 2$  кГц.

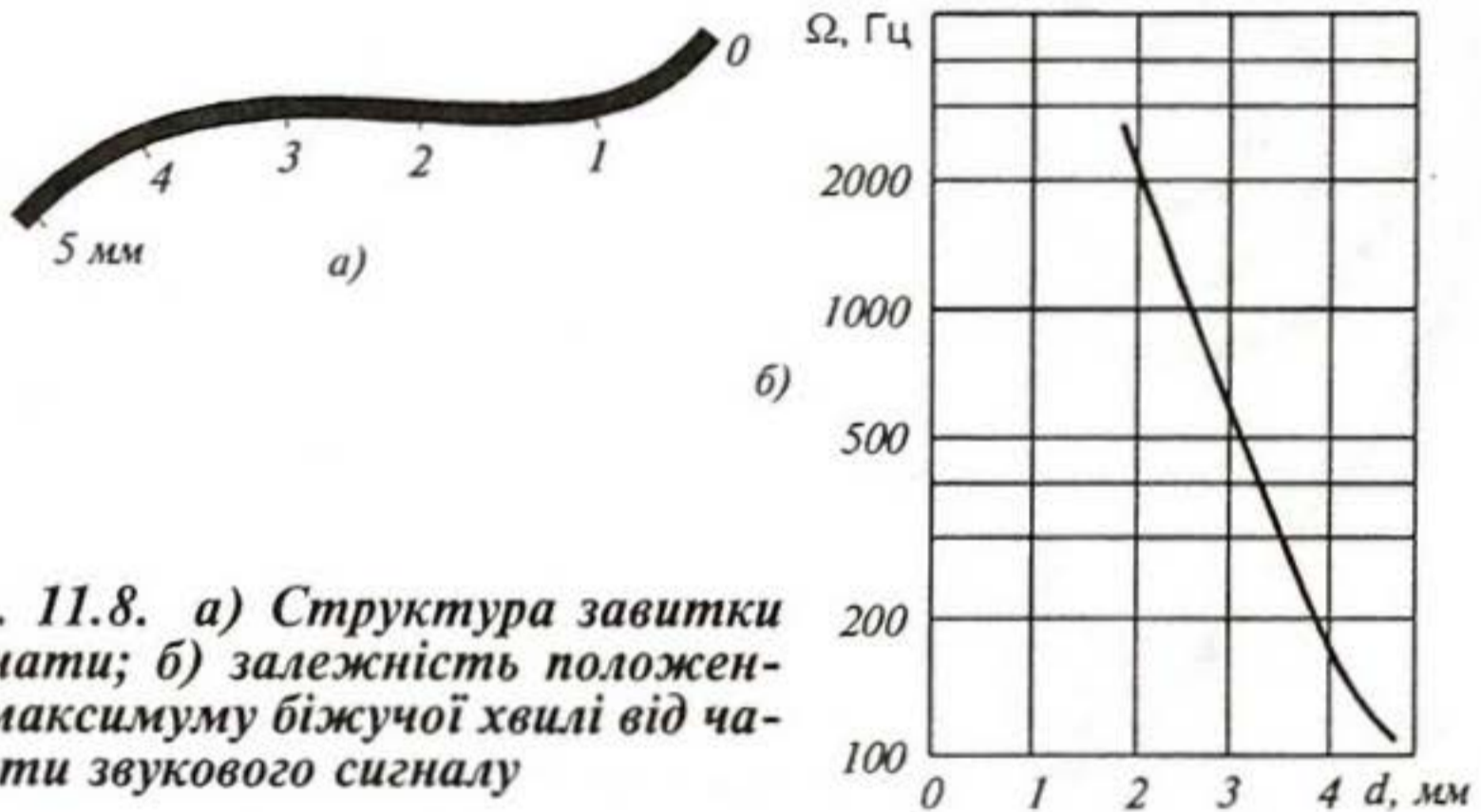
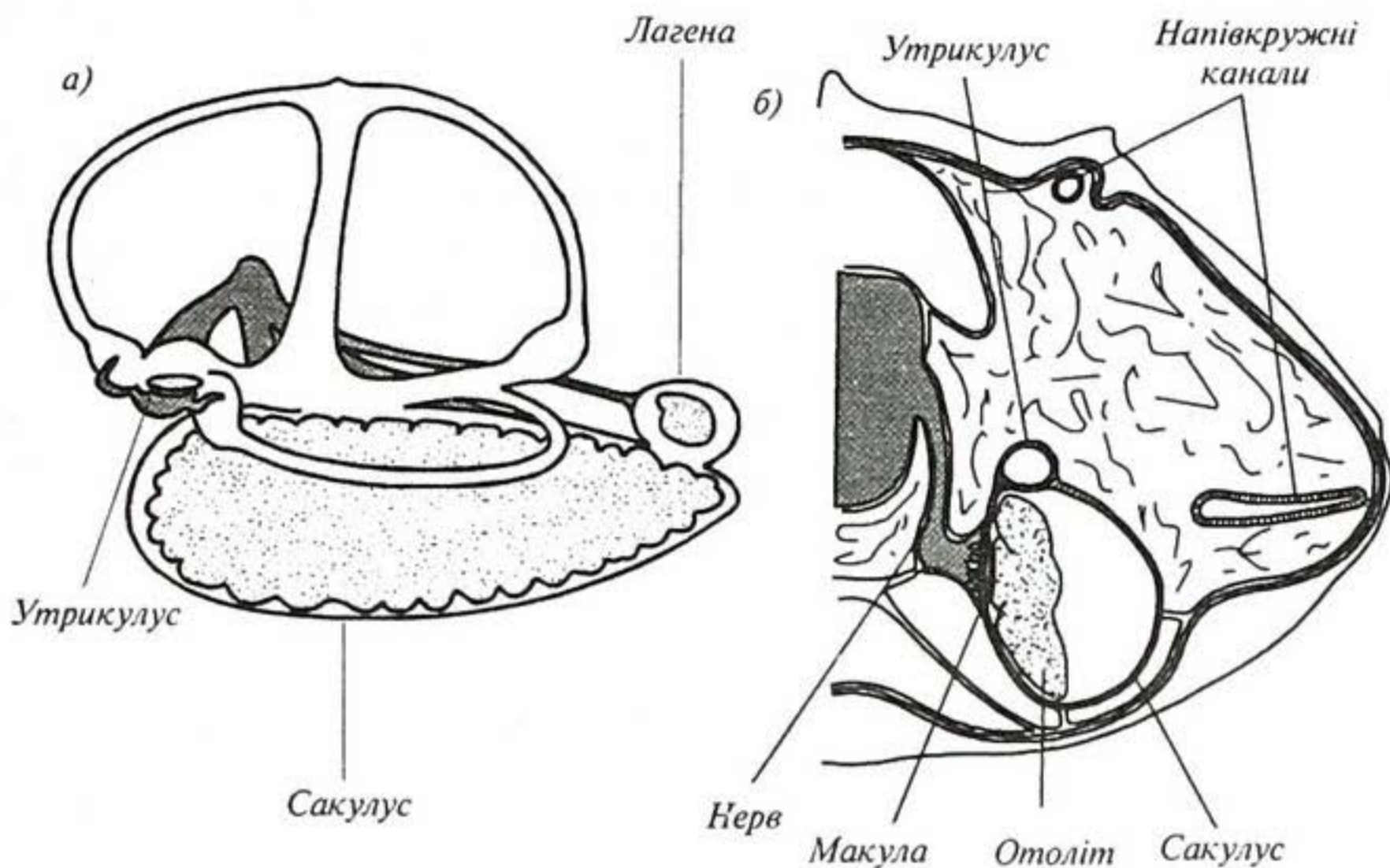


Рис. 11.8. а) Структура завитки курчати; б) залежність положення максимуму біжучої хвилі від частоти звукового сигналу

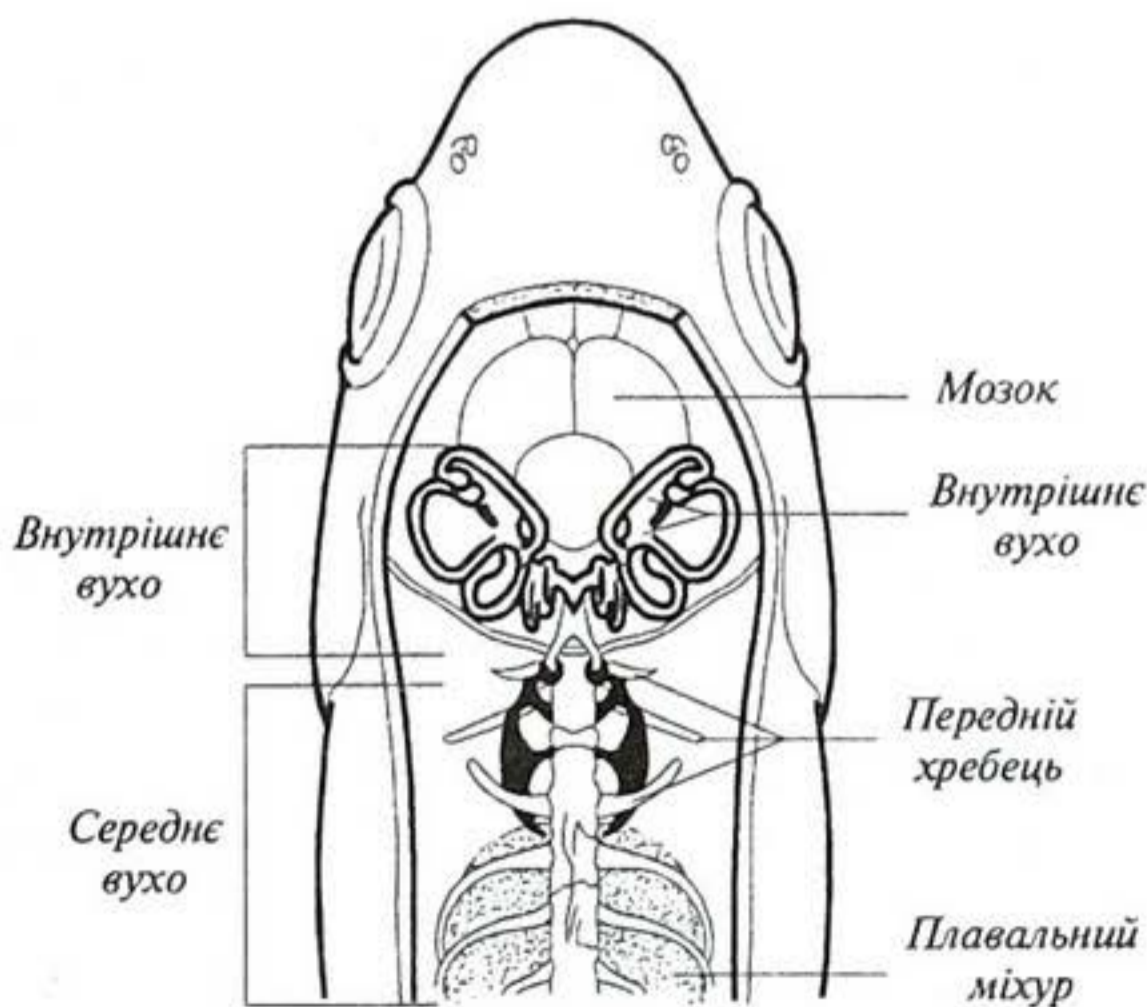
### 11.3. АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ У РИБ

Згідно із загальноприйнятими поглядами, слухову функцію несе орган рівноваги — лабіринт, зокрема його нижня частина (*Lagena* та *Sacculus*). Основним акусторецептором риб є отолітовий орган, що складається з отолітів і волоскових клітин (рис. 11.9). Звукові хвилі проходять через тіло риби з невеликим опором і викликають рух волоскових клітин. Оскільки отоліти мають більшу густину, ніж вода і тканини риби, реакція отолітів і волоскових клітин на звукові коливання відрізняється. Через різницю рухів отолітів і волоскових клітин відбувається деформація останніх, що надсилає в мозок інформацію щодо навколишньої звукової ситуації.



**Рис. 11.9.** Акусторецептор у риб: а) система трьох ортогональних напівкругних каналів; б) переріз черепа на рівні переднього сакулуса

Розрізняють два типи слухових аналізаторів у риб — пов'язаних і не пов'язаних із плавальним міхуром. Так, у кісткових риб плавальний міхур відзначається багатофункціональністю — за допомогою його риба відчуває гідростатичний тиск, підтримує рівновагу, утворює звуки, дихає. Плавальний міхур здатний розширюватися і скорочуватися у відповідь на звукові хвилі і передавати звукову інформацію через модифіковані хребці (чотири пари рухливо поєднаних кісточок) внутрішньому вуху (рис. 11.10). Така кісточкова система отримала назву *Веберова апарату*. Плавальний міхур виконує функцію своєрідного резонатора, настроєного на звукові сигнали певної частоти, що забезпечує їх підсилення. Риби, які не мають плавального міхура, використовують для перетворення звукових коливань у механічні повітряні порожнини, зв'язані з внутрішнім вухом. Важливу роль у сприйнятті звуку відіграє сейсмоденсорна система з точки зору



**Рис. 11.10.** Акусторецептор у кісткових риб (пояснення в тексті)

аналізу акустичної ситуації поблизу джерела звуку і рецепції зміщення частинок води.

Спектр сприймання звукових частот, чутливість до звукових коливань, здатність розпізнавати звукові тони відрізняються у різних видів риб. У цілому можна говорити про нижню межу  $16 \div 100$  Гц та верхню  $488 \div 8000$  Гц. У цьому діапазоні здатність сприймати більш високі ( $4000 \div 8000$  Гц) звукові частоти належить риbam, які мають плавальний міхур і апарат Вебера; їм же властива й вища абсолютна чутливість слуху ( $-70$  дБ) порівняно з рибами, що позбавлені плавального міхура ( $0 \div -50$  дБ).

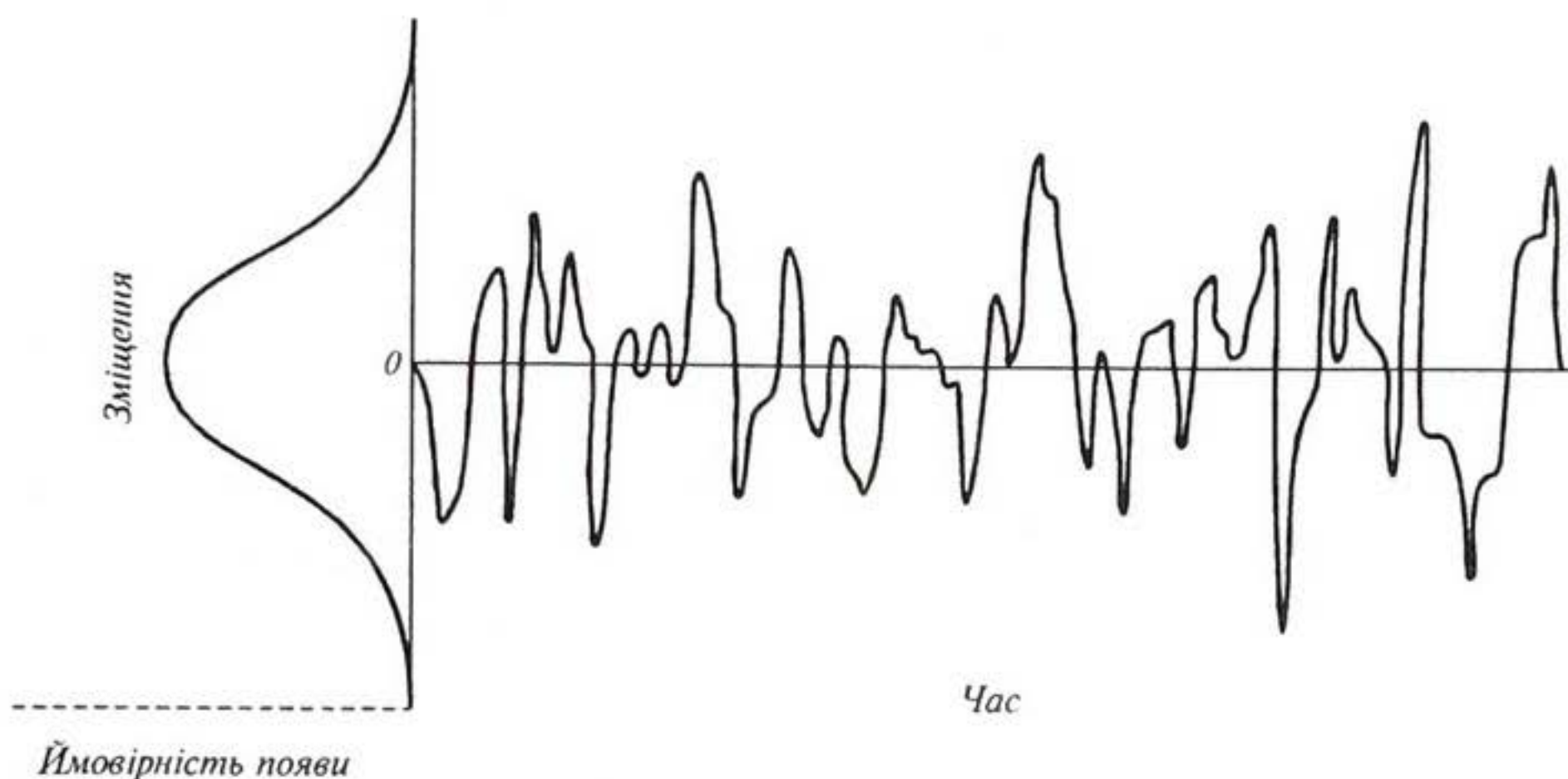
## 11.4. АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ У БДЖІЛ

Бджоли здатні реагувати на коливання частинок повітря завдяки чутливим органам *sensilla scolopophora*, розташованими в антенах та у верхніх частинах гомілок кінцівок. Під впливом звуку волоскові сенсори починають згинатися; кут згину залежить від частоти та інтенсивності звуку. У відповідь на звукові сигнали акусторецептори генерують електричні імпульси; кількість цих імпульсів і тривалість інтервалів між ними визначаються структурою акустичних стимулів. Впливає на кількість імпульсів і температура. Система акусторецепторів забезпечує бджолам бінауральний слух, тобто здатність визначати напрям до джерела звуку.

## 11.5. ВПЛИВ ШУМУ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

*Шум* — це звук, миттєва амплітуда якого змінюється несподівано. Величина миттєвої амплітуди описується нормальним (Гаусовим) розподілом (рис. 11.11). Якщо середня потужність (сума інтенсивностей всіх гармонік, що складають шум) є величиною сталою в певному частотному діапазоні, такий шум називають *білим*. Оскільки шум заважає процесу акусторецепції, він є небажаним звуком. Шум може сприяти розриву барабанної перетинки, бути причиною руйнування органу Корті, бо найбільш уразливими серед всіх елементів слухового аналізатора від дії шуму високої інтенсивності є волоскові клітини внутрішнього вуха. Причому, якщо волоскові клітини зазнають серйозного пошкодження, вони вже не здатні відновлювати своїх функцій і бути заміщеними іншими клітинами. Наслідком цього може бути часткова або повна втрата слуху.

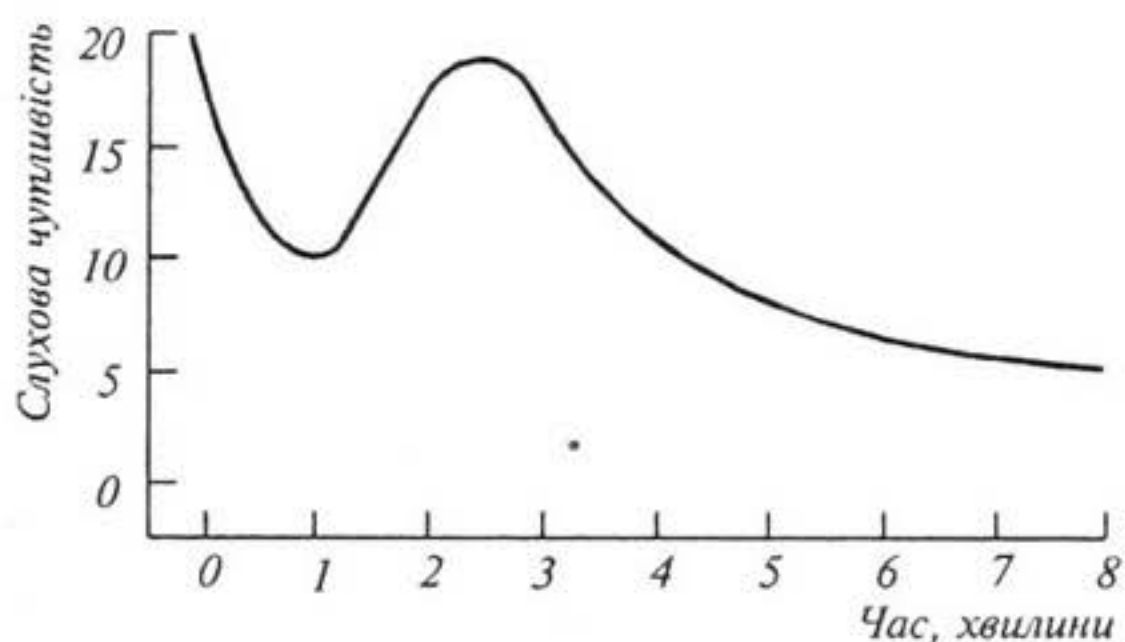
Для кількісної оцінки впливу шуму на слух використовують параметр, що характеризує зміну слухової чутливості — *індукований шумом пороговий зсув (ІШПЗ)*, який визначається шляхом вимірю-



**Рис. 11.11.** Гаусовий розподіл миттєвої амплітуди шуму

вання порогу слухової чутливості до і після дії шуму. Цей зсув може бути тимчасовим або постійним залежно від параметрів шуму (інтенсивності, тривалості, частотного складу). Зазвичай проміжку часу в чотири хвилини достатньо, щоб визначити характер ІШПЗ у тварин.

На рис. 11.12 наведено процес встановлення слухової чутливості, зменшеної під впливом шуму. Через 2 хвилини крива демонструє зростання в процесі встановлення; лише через 4 хвилини ця крива прямує до стаціонарного рівня слухової чутливості (5 дБ).



**Рис. 11.12.** Процес встановлення слухової чутливості, зменшеної під впливом шуму

Слух може відновлюватися після припинення дії шуму на рівнях інтенсивності, що не перевищують 30 дБ, вже через 16÷24 години. Для помірних рівнів шумового впливу процес відновлення слуху характеризується лінійною залежністю від часу у логарифмічному масштабі. Вплив вищих рівнів інтенсивності зумовлює безповоротні пошкодження волоскових клітин, що призводить до сталого порогового зсуву (рис. 11.13).

Експерименти на тваринах, які зазнали впливу акустичного шуму різної частоти, з подальшим гістологічним аналізом кількості пошкоджених або зниклих волоскових клітин у внутрішньому вусі свідчать про те, що поріг слухової чутливості зменшується в межах  $10^3 \div 10^4$  Гц. Кількість волоскових клітин, що залишились, може досягати у цьому разі лише 40 відсотків норми.



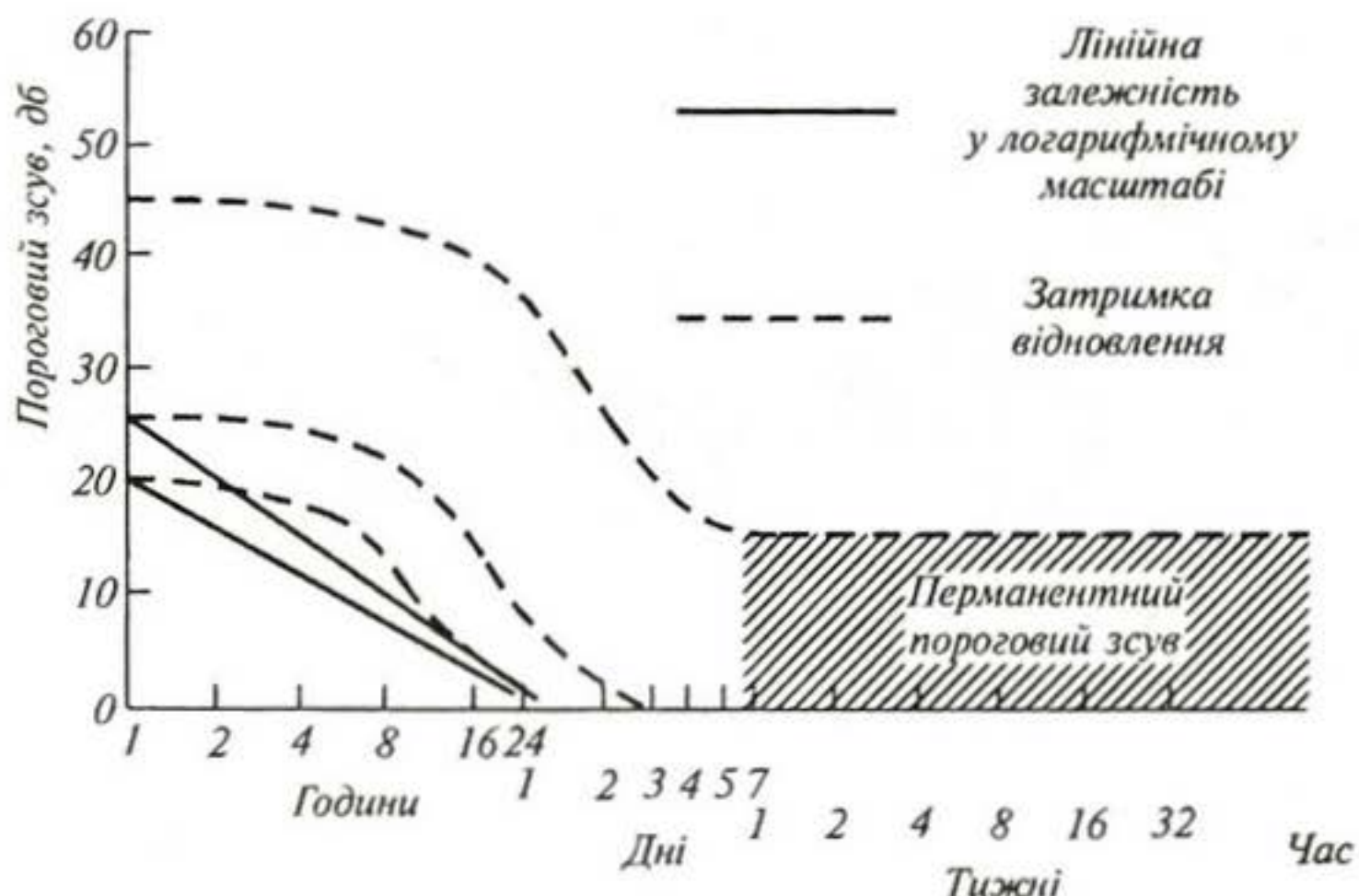


Рис. 11.13. Процес відновлення слуху після дії високих рівнів інтенсивності шуму: суцільні лінії відповідають залежності відновлення слуху від логарифму часу; преривчасті лінії відповідають затриманому відновленню, що може супроводжуватися під час дії високих інтенсивностей появою сталого порогового зсуву

## 11.6. МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ

Механічні ефекти зумовлюються періодичними коливаннями частинок середовища з частотою ультразвукової хвилі. Амплітуда коливань, згідно з рівнянням (9.14), пропорційна кореню квадратному з інтенсивності ультразвукового випромінювання. Загальні коливання макромолекулярних чи мембранних структур можуть спричинити їх утому або пошкодження.

Найзначнішим механічним фактором, що індукується ультразвуковим випромінюванням, є сили зсуву та ударні хвилі, які виникають за кавітації. Ультразвукова хвиля, що поширюється в рідині, викликає періодичні стискування і розрідження, які можуть призвести до розриву рідини та утворення бульбашок, заповнених паром цієї рідини. Це явище називається *кавітацією*.

При використанні циліндричного перетворювача, що генерує ультразвукові хвилі, величину шару  $\delta$  біля межі поділу, де виникають кавітаційні явища, оцінюють за допомогою виразу:

$$\delta = \left( \frac{2\eta}{\Omega\rho} \right)^{1/2}, \quad (11.1)$$

де  $\eta$  — в'язкість рідкого середовища,  $\Omega$  — колова частота,  $\rho$  — густина середовища.

Ще один механічний фактор, зумовлений ультразвуковим випромінюванням, пов'язаний з виникненням локальних тисків. Цей ефект особливо помітний при відбиванні ультразвукової хвилі від будь-яких структур і утворенні так званої стоячої хвилі, що призводить до порушення функціонування певних ділянок організму (наприклад, до блокади дрібних капілярів згустками еритроцитів).

Розглянемо фізичні процеси, що супроводжують взаємодію ультразвукової хвилі з частинками середовища. Згідно з рівнянням (9.14), для даної інтенсивності ультразвукового випромінювання амплітуда максимального зміщення  $y_{max}$  обернено пропорційна частоті  $\nu$  ультразвукових коливань. Так, для ультразвукової хвилі з параметрами  $\nu = 1$  МГц і  $I = 1$  Вт  $\cdot$  см<sup>-2</sup> амплітуда максимального зміщення становить  $y_{max} = 0,018$  мкм.

Визначимо швидкість руху частинок за впливу ультразвукового випромінювання через рівняння:

$$V_{max} = \frac{dy}{dt} = y_{max} 2\pi\nu \approx 0,11 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Крім того, частинка набуває прискорення, яке можна оцінити так:

$$a = \frac{d^2y}{dt^2} = -y_{max} (2\pi\nu)^2 \approx 7 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Легко переконатися, що основний вплив ультразвукового випромінювання полягає в набуванні частинками біологічної тканини величезних (близько  $10^5g$ ) прискорень.

*Теплові ефекти* пов'язані з процесом поглинання тканиною ультразвукового випромінювання, за якого частина енергії передається тканині. Поглинута енергія перетворюється у теплоту і сприяє підвищенню температури тканини. Швидкість продукції

теплоти  $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_\nu$  в одиниці об'єму тканини визначається так:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_\nu = 2AI, \quad (11.2)$$

де  $I$  — інтенсивність ультразвукової хвилі,  $A$  — поглинання.

Одиниця вимірювання швидкості продукції теплоти — Дж  $\cdot$  м<sup>3</sup>  $\cdot$  с<sup>-1</sup>.

Якщо теплота утворюється в тілі і не витрачається за перебігу процесів теплообміну, то температура тіла набуває зміни у часі, що визначається за формулою:

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{dQ}{dt}\right)_\nu / \rho c, \quad (11.3)$$

де  $\rho$  — густина тканини,  $c$  — питома теплоємність речовини.

У зв'язку з кавітацією у середовищі утворюються порожнини, що поглинають енергію ультразвукового випромінювання. Ця енергія частково ( $\approx 10\%$ ) перевипромінюється, тоді як більша її частина перетворюється в теплоту, ударні хвилі або гідродинамічні зсуви. Кавітація може бути «стабільною» під впливом помірних ультразвукових інтенсивностей, або «обвальною», що має вибуховий характер. Доведено, що останній тип кавітації супроводжується зростанням температури усередині порожнини до кількох тисяч градусів. Такі високі температури зумовлюють розрив ковалентних зв'язків у молекулах води і утворення вільних радикалів, що характеризуються значною реактивністю.

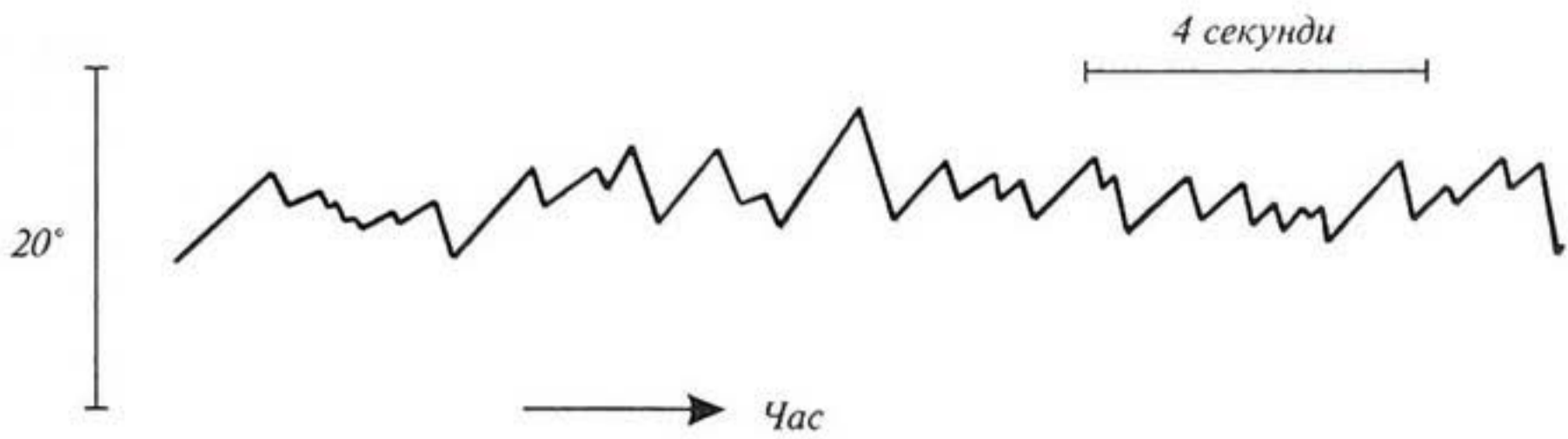
Таким чином, підвищення температури тканини за впливу ультразвукового випромінювання визначається рядом факторів, а саме: поглинанням тканини, її розмірами, інтенсивністю і частотою ультразвукового випромінювання, тривалістю опромінювання.

*Фізико-хімічні ефекти* зумовлені зміною проникності біологічних мембран і дифузійних процесів. Під впливом ультразвукових коливань у біологічних тканинах можливі зміни концентрації водневих іонів; встановлено вплив ультразвуку на високомолекулярні сполуки: ферменти, гормони, вітаміни. Ультразвук сприяє вивільненню з органів і тканин біологічно активних речовин.

## 11.7. ВПЛИВ ІНФРАЗВУКУ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

Биття серця, коливання легень, робота кишечника, вібрації голосових зв'язок — усе це супроводжується генерацією інфразвуку. У природі джерелами інфразвуку є рослини і дерева, що коливаються, мікросейсмічні коливання земної поверхні, землетруси, урагани, вулканічні виверження, шторми, грозові розряди. В індустріалізованому суспільстві до джерел інфразвуку слід віднести автомобільні, корабельні, авіаційні та ракетні двигуни, сільськогосподарські механізми. Інфразвукові коливання з рівнем інтенсивності  $< 120$  дБ вважаються помірними, більше — інтенсивними.

Основним наслідком дії інфразвуку на живий організм є порушення органів балансу, а саме функцій вестибулярного апарату. Для дослідження впливу інфразвуку на людину або тварину використовували спеціальні генератори та гучномовці, що працювали в діапазоні  $1\div 200$  Гц з рівнем інтенсивності до 146 дБ. Оцінку впливу інфразвуку здійснювали шляхом реєстрації характеру і ступеня мимовільного ритмічного тремтіння одночасно обох очей, яблука яких оберталися у протилежних напрямках з частотою  $0,7\div 1,5$   $s^{-1}$ . Це тремтіння під назвою *ністагм* свідчить про порушення вестибулярного апарату. Реєстрацію ністагму здійснюють через вимірювання корне-

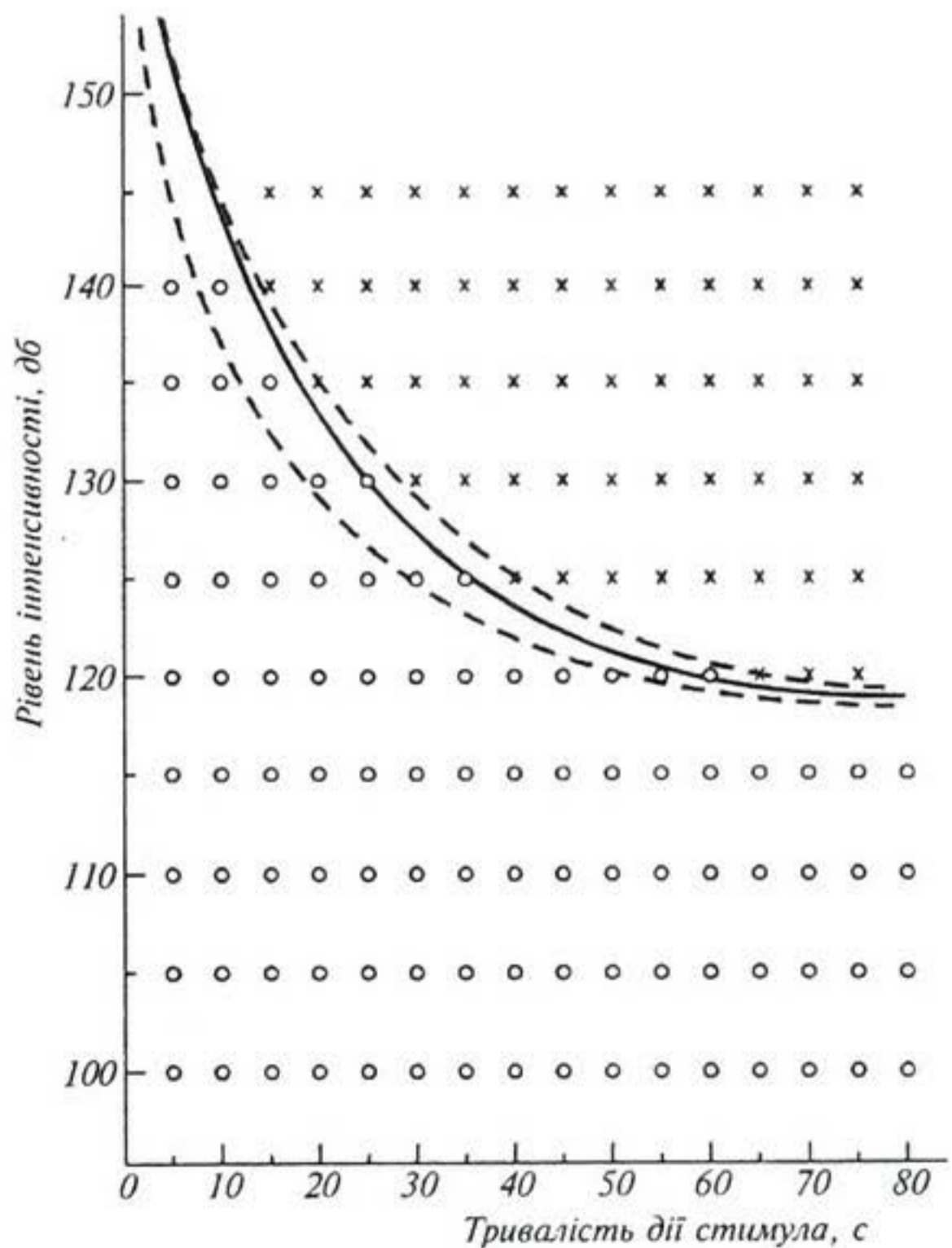


**Рис. 11.14.** Результати реєстрації ністагму через вимірювання корнеально-ретинового потенціалу

ально-ретинового потенціалу (рис. 11.14); техніка вимірювання цього потенціалу називається *електроністагмографією*.

Ністагматична реакція організму залежить від інтенсивності інфразвукового стимулу і тривалості дії його на організм (рис. 11.15), а також від частоти інфразвукових коливань (рис. 11.16). Можливим механізмом впливу інфразвуку на живі організми слід вважати зміщення перилімфи — рідини, що заповнює внутрішнє вухо, за періодичних змін тиску, що передаються цій рідині через овальне віконце. В свою чергу, зміщення перилімфи призводять до деформації волоскових клітин. Психологічний вплив інфразвуку пов'язаний з такими наслідками як сонливість, летаргія, почуття жаху або боязні.

Інфразвук значної інтенсивності здатний зумовлювати зміни слухової чутливості, реакцію барабанної перетинки, болісні відчуття, утруднення мовлення і модуляції голосу, порушення респіраторної активності, зміни  $\alpha$ -ритмів мозку.



**Рис. 11.15.** Залежність ністагматичної реакції організму від інтенсивності інфразвукового стимулу і тривалості дії його на організм

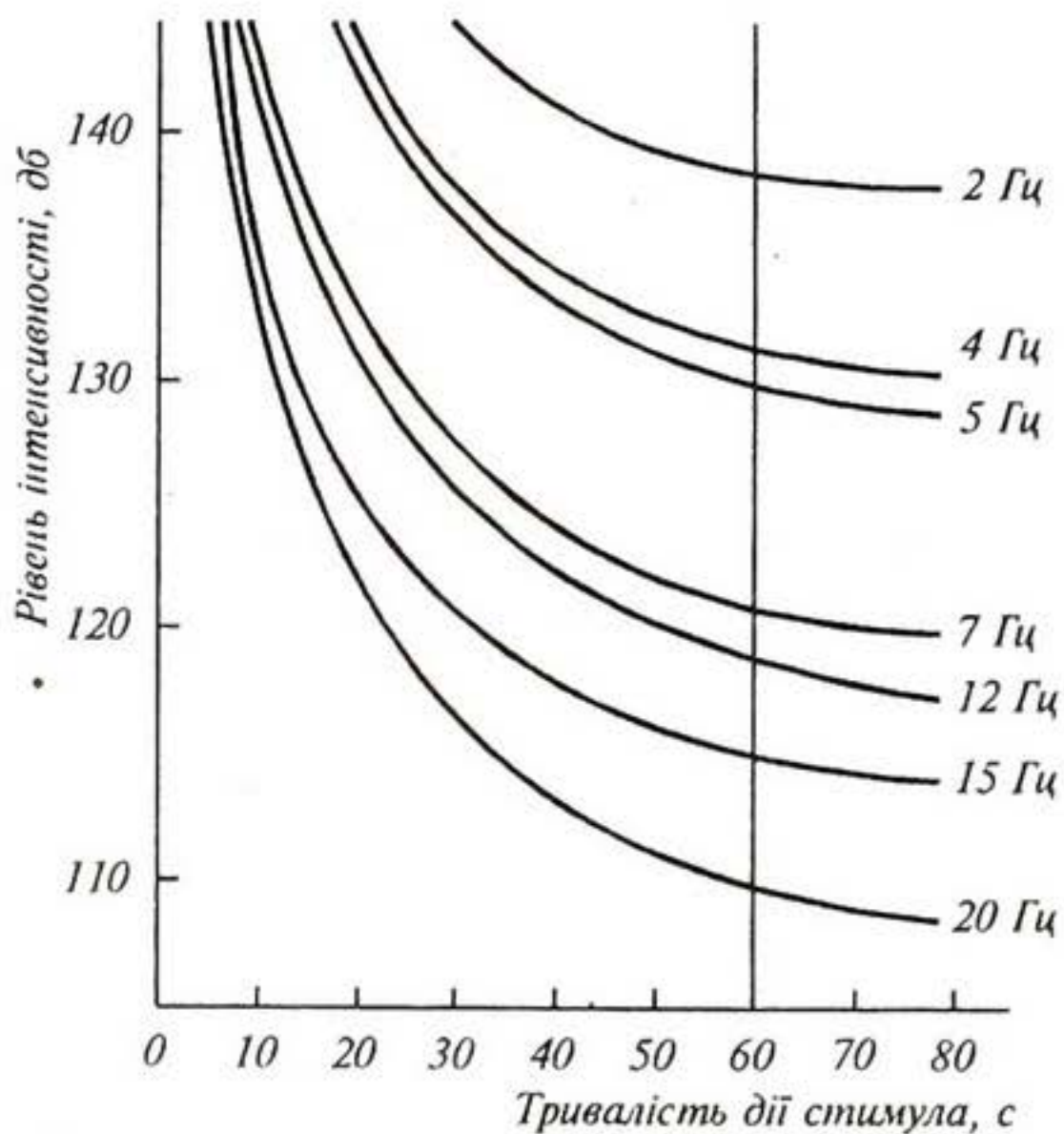


Рис. 11.16. Залежність ністагматичної реакції організму від частоти інфразвукових коливань

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Довжина слухового проходу і середнього вуха людини 2,5 см. Визначити резонансну частоту слухового аналізатора людини.

### Розв'язок

Частота звуку  $\nu$  пов'язана зі швидкістю поширення  $V$  та довжиною хвилі  $\Lambda$  співвідношенням (9.21). Підставляючи числові значення, маємо:

$$\nu = \frac{V}{\Lambda} = \frac{340 \text{ мс}^{-1}}{4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 3400 \text{ Гц.}$$

### Контрольне завдання № 11.1

Визначити резонансну частоту для слухового аналізатора слона, довжина слухового проходу і середнього вуха якого 20 см.

Відповідь: 425 Гц.

### Приклад

Оцінити рівень інтенсивності звукових сигналів у процесі підсилення слабких сигналів середнім вухом, якщо виграш у тиску становить 22.

### Розв'язок

Виграш в тиску пов'язаний з виграшем в силі в середньому вусі співвідношенням:

$$\frac{P_1^2}{P_2^2} = \frac{I_1}{I_2}$$

Звідки

$$L = 10 \lg\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = 20 \lg\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

Підставляємо числові значення:

$$L = 20 \lg 22 = 27 \text{ дБ.}$$

#### Приклад

Площа барабанної перетинки  $S_1 = 55 \text{ мм}^2$ , а площа овального віконця  $S_2 = 3,2 \text{ мм}^2$ . Виграш в силі важеля, утвореного системою слухових кісточок, становить 1,3. Оцінити рівень підсилення слабких акустичних сигналів при передачі середнім вухом зовнішнього звукового тиску внутрішньому вуху.

#### Розв'язок

На барабанну перетинку діє сила  $F_1$ , що створює звуковий тиск  $p_1$ :

$$F_1 = p_1 S_1$$

На овальне віконце внутрішнього вуха діє сила  $F_2$ , що спричинює звуковий тиск  $p_2$ :

$$F_2 = p_2 S_2$$

Важіль, створений системою слухових кісточок (рис. 11.2), дає виграш в силі, що дорівнює:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1}{l_2} = \frac{p_2 S_2}{p_1 S_1}$$

Звідки

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{S_1 l_1}{S_2 l_2} = \frac{55}{3,2} \cdot 1,3 = 22.$$

#### Приклад

Амплітуда коливань барабанної перетинки  $y_0$  під дією звукової хвилі з інтенсивністю  $I$  може бути визначена за допомогою співвідношення (9.14). Визначити амплітуду коливань барабанної перетинки при дії на неї звукової хвилі з частотою 4 кГц та інтенсивністю  $10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Густина повітря дорівнює  $1,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

#### Розв'язок

Підставляючи у рівняння (9.14) числові значення, отримаємо:

$$y_{\max} = \left( \frac{I}{2\pi^2 \rho v^2 V} \right) =$$

$$= \left( \frac{10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} (4 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1})^2 340 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}} \right) = 2,7 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ нм.}$$

### Контрольне завдання № 11.2

Визначити амплітуду коливань барабанної перетинки, що спричиняють болісні відчуття (див. контр. завдання № 9.5 і дані табл. 9.2).

*Відповідь:*  $2,7 \cdot 10^3$  нм.

### Приклад

Оцінити величину шару  $\delta$  у воді біля межі поділу, де виникають кавітаційні явища, при збудженні в ній ультразвукової хвилі з частотою 20 кГц.

### Розв'язок

Підставляємо у формулу (11.1) числові значення:

$$d = \left( \frac{2 \cdot 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}}{2 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 10^3 \text{с}^{-1} 10^3 \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}} \right)^{1/2} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 4 \text{ мкм.}$$

### Контрольне завдання № 11.3

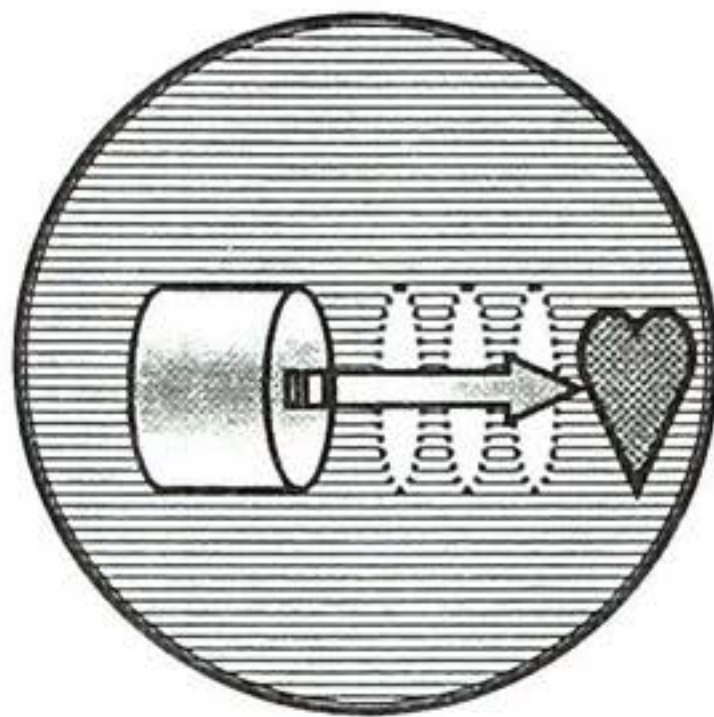
Оцінити величину шару  $\delta$  при збудженні у воді ультразвукової хвилі з частотою 1 МГц.

*Відповідь:*  $\delta = 0,56$  мкм.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягають функції зовнішнього вуха?
2. Завдяки чому підсилюються звукові сигнали в середньому вусі?
3. Як відбувається аналіз частоти звукових сигналів у внутрішньому вусі?
4. Пояснити основні механізми впливу ультразвуку на біологічні об'єкти.
5. Що називають кавітацією?
6. Як впливає інфразвук на людину?

## 12. ПРИКЛАДНА АКУСТИКА



### 12.1. ВИМІРЮВАННЯ СЛУХОВОГО СПРИЙМАННЯ ТВАРИНАМИ

Під час сприймання звукових сигналів тварина здатна: 1. детектувати звук, тобто визначити наявність об'єктів, що створюють звук; 2. локалізувати джерело звуку з тим, щоб наблизитися до нього або віддалитися від нього; 3. ідентифікувати біологічне значення або зміст звуку для необхідної реакції об'єкту, що утворює звук.

Процес детектування звуку полягає у вимірюванні абсолютної слухової чутливості тварини. Основне тестування тварин полягає у визначенні здатності тварини реагувати на чисті акустичні тони в межах діапазону чутливості. Тварину навчають відгукуватися на певний звуковий тон і реєструють ту інтенсивність, при якій реакція її зникає. Наприклад, тварину, яка відчуває спрагу, ставлять у стійло, оснащене гучномовцем, системою спостереження і системою звіту (рис. 12.1). Тварина повертає голову від першої системи на другу, коли чує звуковий тон. Така поведінка тварини заохочується порцією води. Поступове зменшення інтенсивності звукового стимулу дає змогу визначити поріг слухової

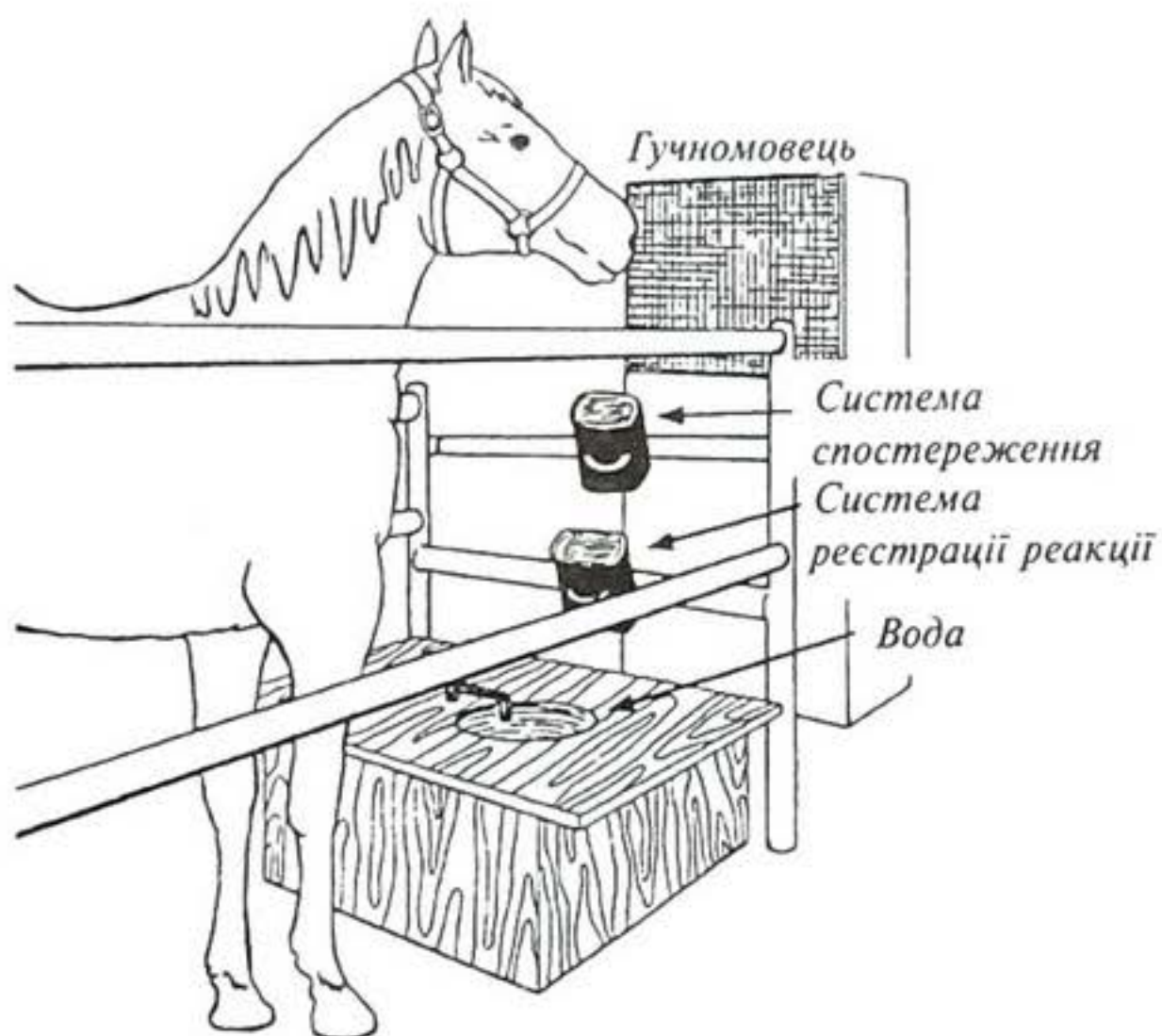
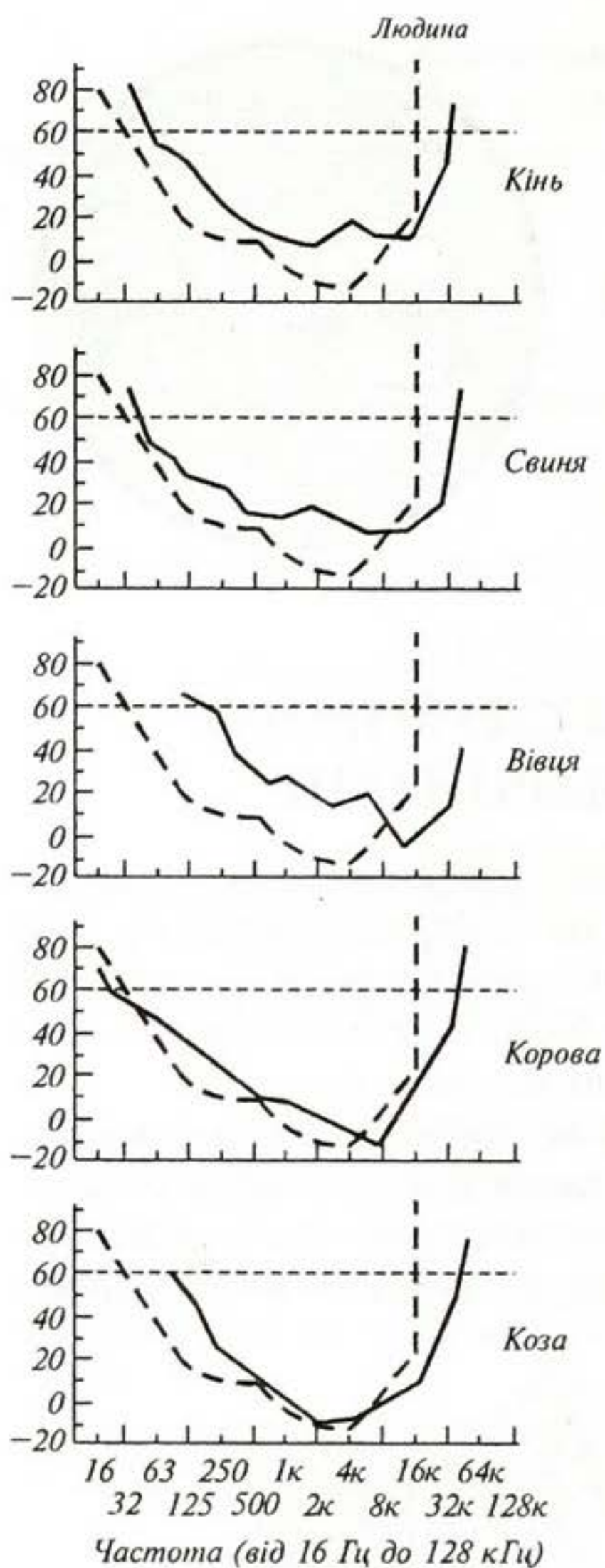


Рис. 12.1. Розміщення тварини у стійлі, оснащеному гучномовцем, системами спостереження і реєстрації реакції





**Рис. 12.2. Типові аудіограми сільськогосподарських тварин порівняно з аудіограмою людини**

чутливості тварини. Вимірювання залежності порогу чутливості від частоти звукового стимулу становить суть *аудиометрії*; криві спектральної чутливості тварини називають *аудиограмами*. Типові аудіограми сільськогосподарських тварин порівняно з аудіограмою людини наведено на рис. 12.2.

Кожна аудіограма характеризується областю найкращої чутливості (середня частина кривої); підвищення або зменшення частоти звукового стимулу зумовлює погіршення слухової чутливості. Аудіограми копитних тварин — коня (*Equus caballus*), вівці (*Ovis aries*), кози (*Capra hircus*), свині (*Sus scrofa*) і корови (*Bos taurus*) — свідчать про те, що низькочастотна межа слухової чутливості становить 23 Гц для корови і 125 Гц для вівці; верхня частотна межа слухової чутливості коливається від 33,5 кГц для коня до 42 кГц для вівці. Область найкращої чутливості змінюється від 2 кГц для коня і кози до 10 кГц для вівці. Величина найкращої чутливості становить -11 дБ для корови і кози (як у людини) і 9 дБ для свині. Таким чином, основна відміна аудіограм тварин від аудіограм людини зводиться до вищої чутливості тварин до високочастотних звукових стимулів (аж до ультразвукового діапазону).

Узагальнену аудіограму птахів наведено на рис. 12.3. Максимальна

чутливість відповідає частоті 2 кГц; низькочастотна межа становить 200 Гц, високочастотна — 8 кГц. Є відомості, що деякі птахи здатні реагувати на інфразвукові коливання.

Аудиометрія риб проводиться з використанням електричних ударів, яких завдають одночасно з подачею акустичного стимулу, або супроводжують процес годівлі риб акустичними сигналами. Аудіограми риб відрізняються частотною областю найкращої чутливості (рис. 12.4 і 12.5). Таку різницю в аудіограмах риб можна пояснити тим, що деякі види реагують на швидкість зміщення частинок середовища, тоді як інші — на зміну звукового тиску. Значною мірою реакції на

звуків стимулює залежать від анатомо-морфологічних особливостей будови слухового аналізатора риб. Бичок (*Gobius niger*) не має плавального міхура і не реагує на звук з частотою понад 400 Гц навіть на малих відстанях. Камбала (*Limanda limanda*) та лосось (*Salmo salar*) нечутливі до звуків і демонструють вузькі аудіограми (рис. 12.4); ці риби більше чутливі до зміщення частинок води, ніж до звукових тисків. Карп (*Cyprinus carpio*) вважається слуховим спеціалістом — чутливість його сягає декількох кілогерц (рис. 12.5). Тріска (*Gadus morhua*) має плавального міхура і її

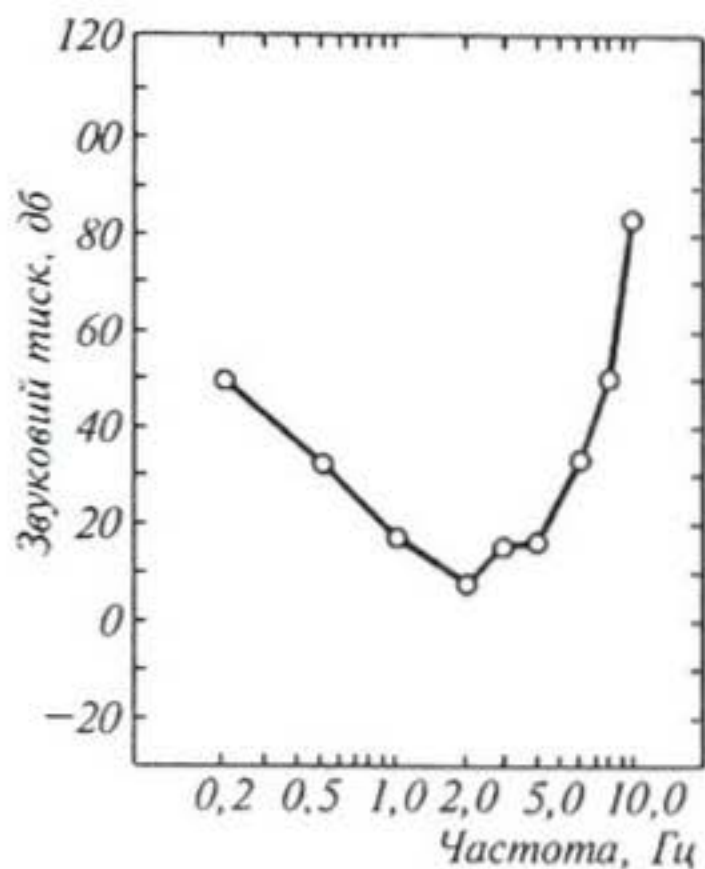


Рис. 12.3. Узагальнена аудіограма птахів

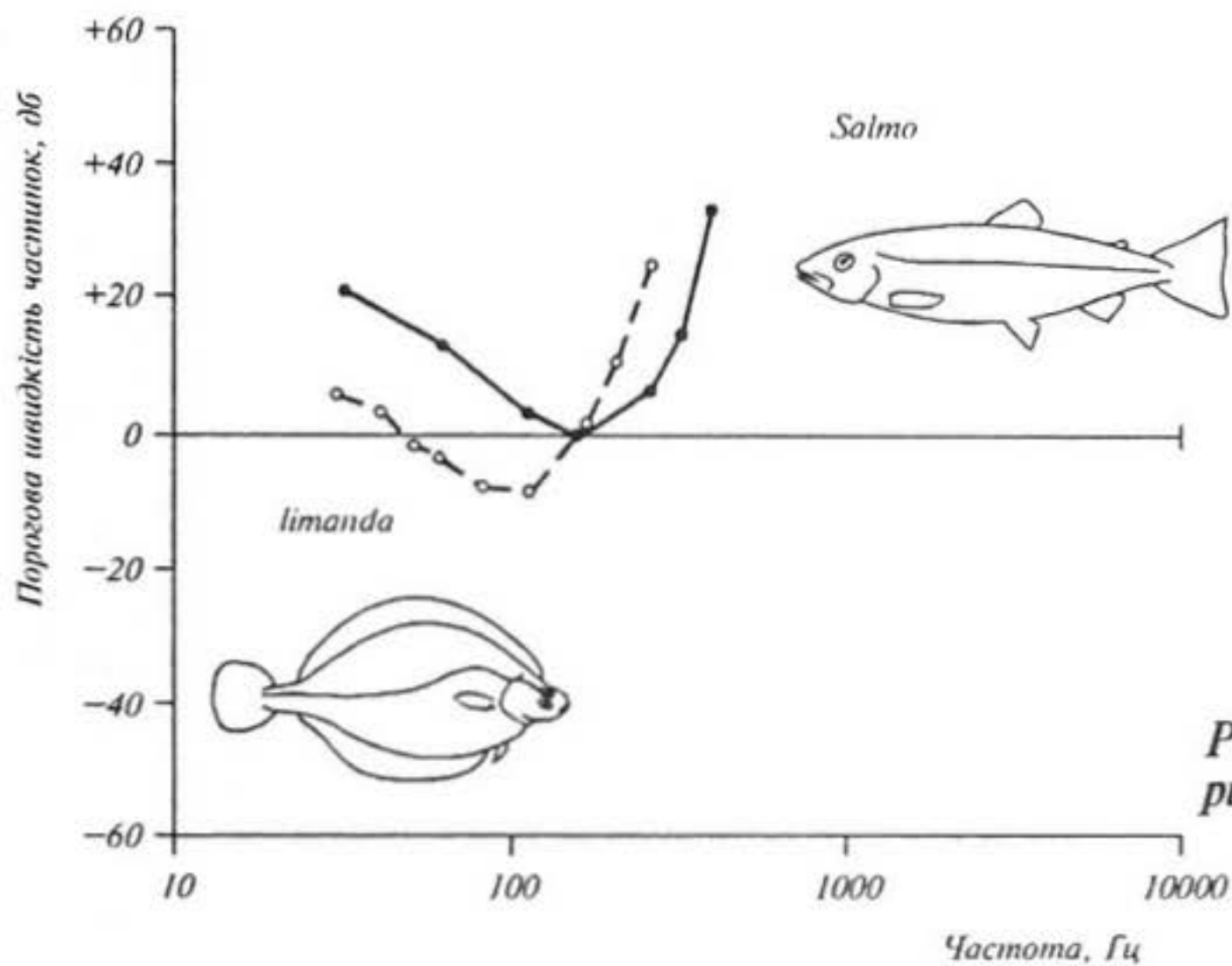


Рис. 12.4. Аудіограми риб, нечутливих до звуків

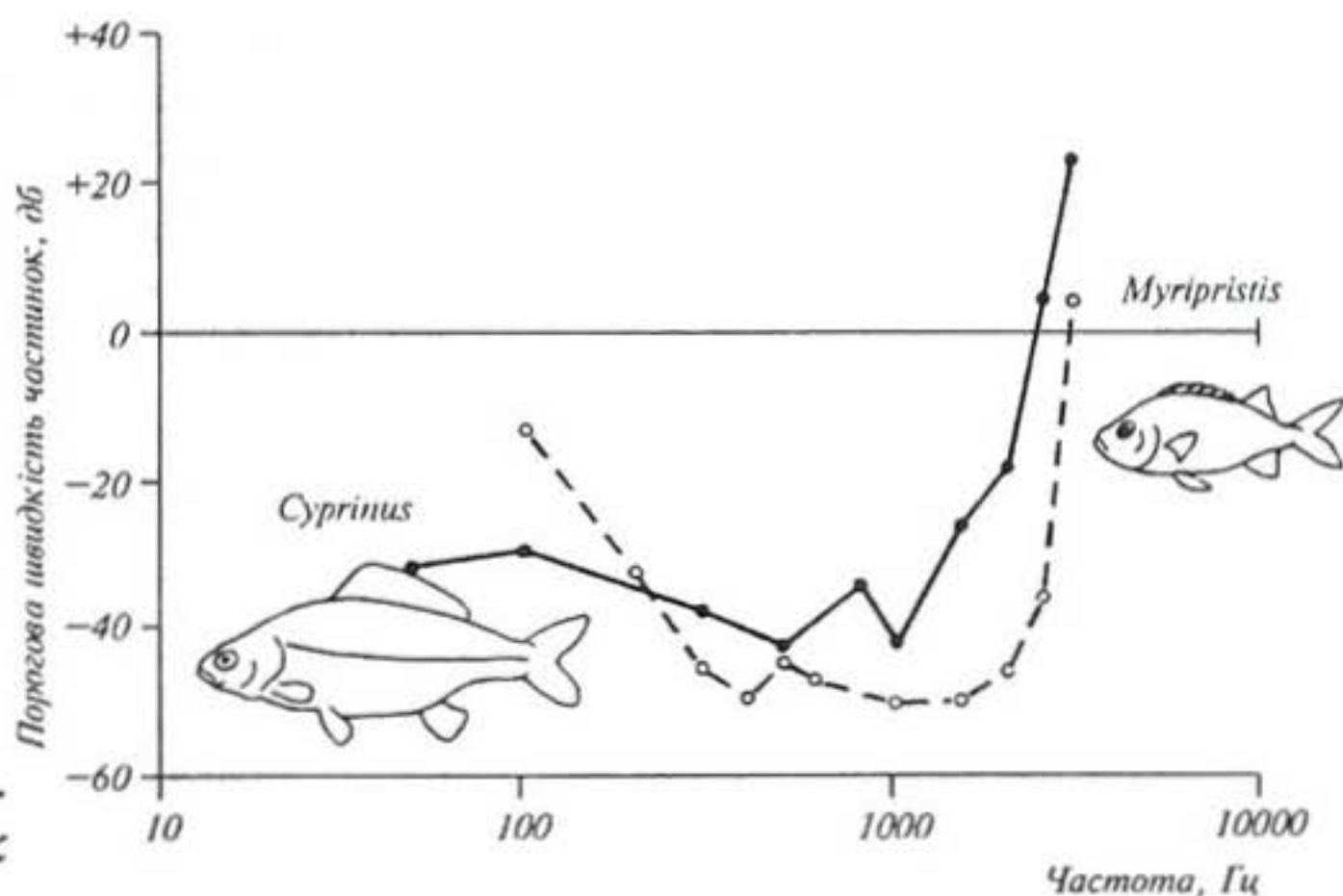


Рис. 12.5. Аудіограми риб — слухових спеціалістів

реакції на звуки з частотою менше 1000 Гц реєстрували на значних відстанях від джерела звуку. Оселедець (*Clupea*) має подвійного плавального міхура; реакції на подразнення порогової інтенсивності були отримані в діапазоні 13÷1200 Гц, а високої інтенсивності — аж до 4000 Гц.

Процес оцінки здатності тварини локалізувати звук складніший, ніж процес визначення слухової чутливості. По-перше, тварини точніше орієнтуються на джерело звуку в горизонтальній площині, ніж у вертикальній. По-друге, точність локалізації звуку тваринами значно краща, якщо джерело звуку знаходиться перед твариною, а не по боках. І, нарешті, слід враховувати спектральний склад звукового стимулу.

Виділимо два основних механізми, що пояснюють здатність тварини локалізувати звук. Перший механізм пов'язаний із бінауральним слухом, суть якого полягає в реєстрації різних інтенсивностей звуку двома вухами тварини, доки вона не оберне голови у напрямку до джерела звуку. Другий механізм полягає в тому, що високочастотні звукові сигнали не здатні обминати голову тварини на відміну від низькочастотних; таким чином, спектральний склад звукових сигналів, які досягають двох вух, відрізняється від того, що утворюється джерелом звуку.

Процес вимірювання здатності тварини локалізувати звук проілюстровано на рис. 12.6. Тварина торкається лівої чи правої пластини носом залежно від того, з якого боку посилається звуковий сигнал. Як заохочення тварині пропонується вода, якщо вибір пластини відповідає ввімкненому гучномовцю.

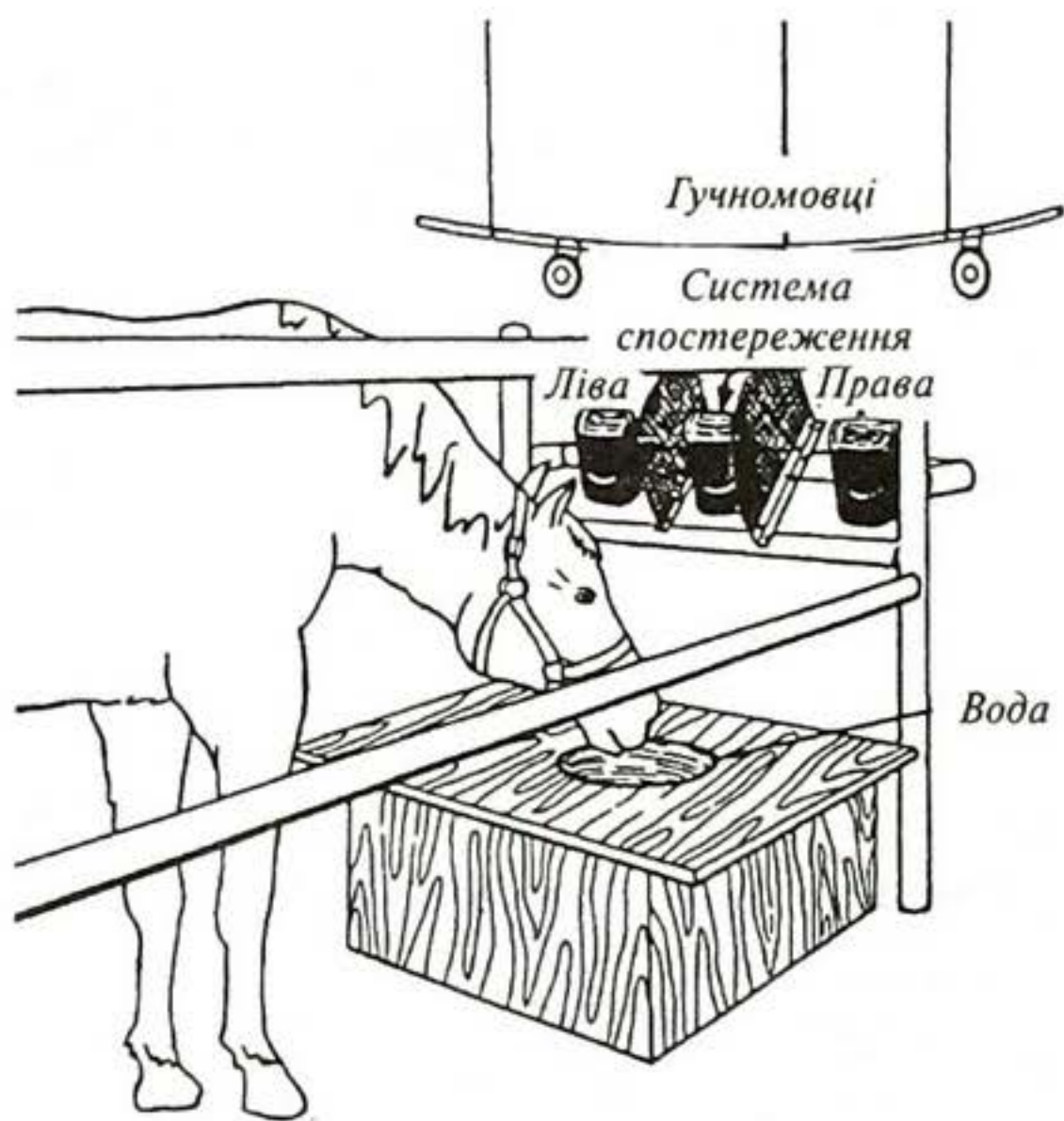
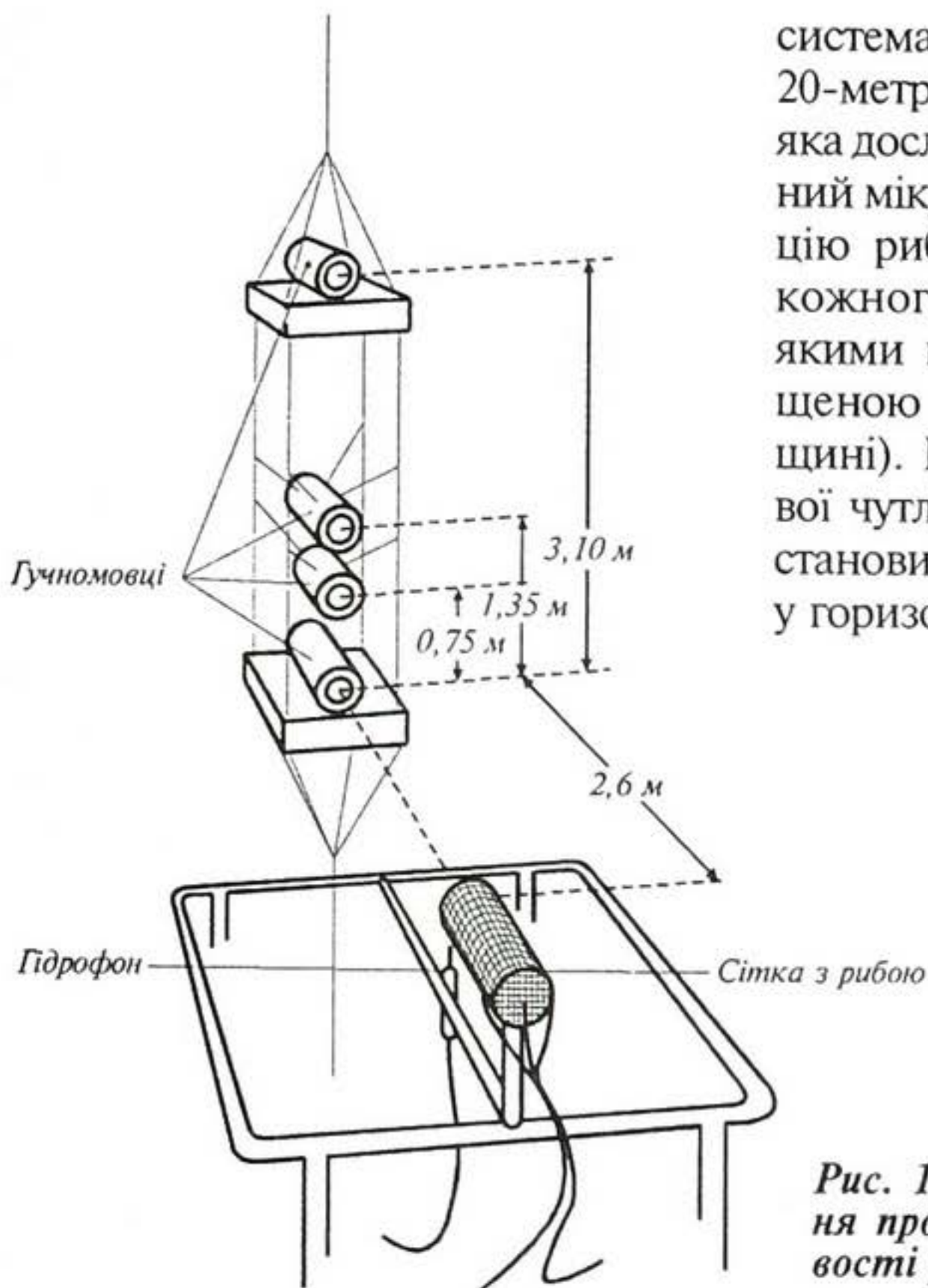


Рис. 12.6. Визначення здатності тварини локалізувати звук (пояснення в тексті)

звукової локалізації, що становить  $4,6^\circ$  для свині,  $18^\circ$  для кози,  $25^\circ$  для коня і  $30^\circ$  для корови.

Здатність птахів локалізувати джерело звуку залежить від способу життя. Поріг звукової локалізації для курчат становить  $4^\circ$ , тоді як сова, нічний хижак, здатна визначати джерело звуку з точністю  $2^\circ$  у вертикальній чи горизонтальній площинах.

Прилад для визначення просторової слухової чутливості риб (рис. 12.7) являє собою 6-метрову ферму, обладнану гучномовцями. Вся ця



система була занурена у воду на 20-метрову глибину. Біля риби, яка досліджувалася, був розміщений мікрофон. Реєстрували реакцію риби на звуковий сигнал з кожного гучномовця (ферма з якими могла також бути розміщеною і в горизонтальній площині). Поріг звукової просторової чутливості для риби (тріски) становив  $16^\circ$  у вертикальній і  $20^\circ$  у горизонтальній площинах.

Рис. 12.7. Прилад для визначення просторової слухової чутливості риб (пояснення в тексті)

## 12.2. ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ У ВЕТЕРИНАРНІЙ МЕДИЦИНІ

*Ультразвукова діагностика.* В основі ультразвукового зондування лежить генерування ультразвукових хвиль п'єзоелектричним перетворювачем, що перебуває у контакті з тілом пацієнта, і реєстрація відбитих від різних органів ультразвукових хвиль. Дія п'єзоелектричного перетворювача ґрунтується на використанні *прямого п'єзоелектричного ефекту*: деякі кристалічні речовини здатні під час стиску або розтягу утворювати на протилежних поверхнях електричні заряди. Якщо під впливом електричного поля, прикладеного до кристалу, останній відчуває механічні деформації, йдеться про *зворотний п'єзоелектричний ефект*.

Типовий п'єзоелектричний перетворювач являє собою диск (наприклад, з титанату барію) діаметром  $1 \div 1,5$  см і завтовшки  $0,1 \div 0,2$  мм. Інтенсивності ультразвуку, що використовуються в терапевтичній практиці, змінюються від  $80 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  для частоти 1 МГц до  $20 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  для частоти 5 МГц. Для запобігання тепловому нагріванню і руйну-

ванню тканини використовують імпульсний режим роботи. Якщо при цьому кількість імпульсів  $F$ , а тривалість одного імпульсу  $t$ , то повний час  $t$  взаємодії ультразвукової хвилі з тканиною становить:

$$t = F \cdot t. \quad (12.1)$$

Параметри ультразвукового генератора, що працює в імпульсному режимі, такі: частота коливань лежить в мегагерцовій області, тривалість імпульсу становить кілька мікросекунд, а частота поси- лань — сотні герц. Звуковий імпульс, створений генератором, про- ходить подвійну відстань  $d$  від генератора до об'єкта зі швидкістю  $V$  за проміжок часу  $t$ . Всі ці параметри пов'язані співвідношенням:

$$V = \frac{2d}{t}. \quad (12.2)$$

Ультразвукові хвилі проникають у тіло і відбиваються від меж тканин внутрішніх органів. Тканини, що мають більші значення хвильового опору, відбивають сильніше. Відбитий сигнал реєстру- ють тим самим або окремим перетворювачем. Принцип дії ультра- звукового зондування наведено на рис. 12.8.

Всі діагностичні ультразвукові прилади можна поділити на два основних типи — ті, що створюють зображення об'єкта, і ті, що використовують доплерівський ефект. До першого типу можна віднести ультразвукове зондування при діагностиці серця. Хоча серце перебуває в безперервному русі, цей рух дуже повільний порівняно зі швидкістю поширення ультразвукових імпульсів та реакції сис- теми реєстрації. Техніка дослідження діяльності серця за допомо- гою ультразвукового зондування називається *ехокардіографією*.

Якщо потрібно створити зображення будь-якої ділянки тіла па- цієнта, використовують ультразвукове сканування. Для цього засто- совують набір ультразвукових перетворювачів (кількість їх може до- сягати 100), на які послідовно подають електричні сигнали. Таким

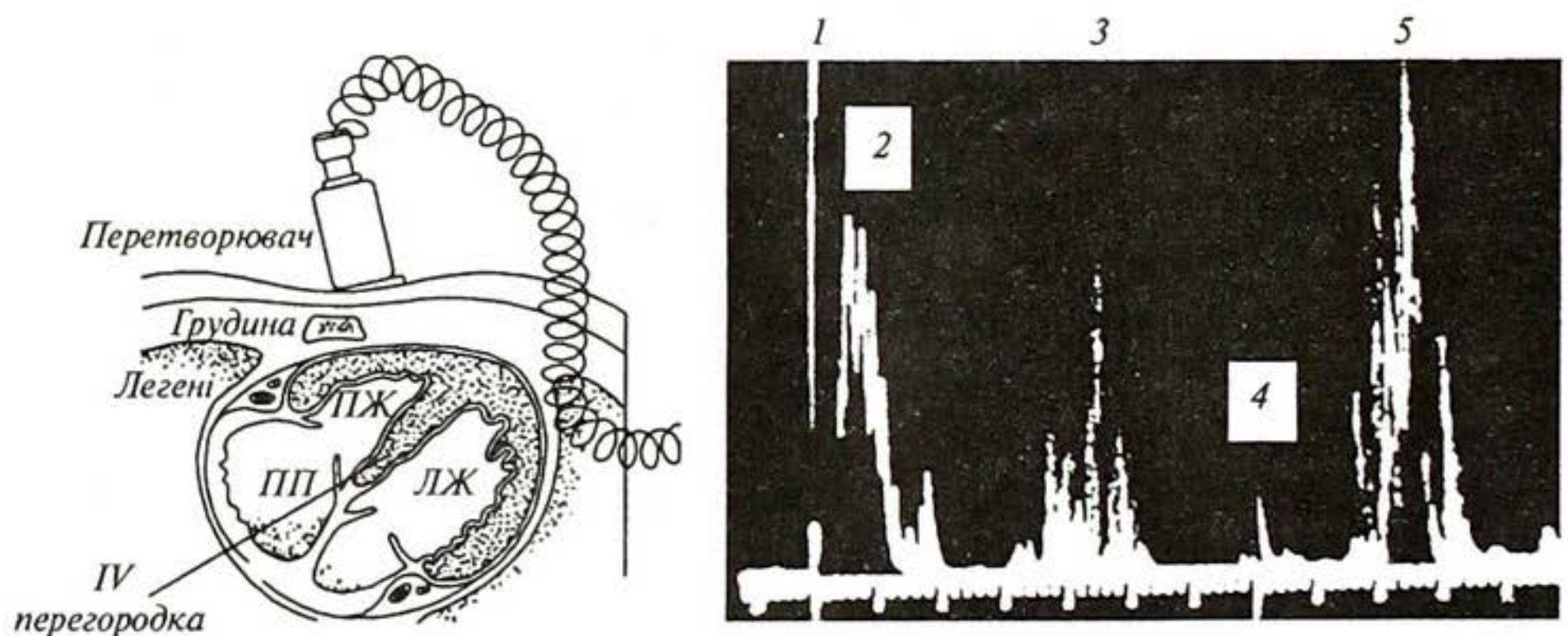


Рис. 12.8. Принцип ультразвукового зондування: 1 — положення перетво- рювача; 2 — луна від передньої стінки; 3 — луна від IV перегородки; 4 — луна від мітрального клапана; 5 — луна від задньої стінки

чином утворюється ультразвуковий промінь, що рухається в тому чи іншому напрямку. Таке послідовне зондування тіла на основі скануючого ультразвукового променя, який переміщується під різними кутами, дає можливість одержувати інформацію про різні зрізи досліджуваного тіла. Метод отримав назву *ультразвукова томографія*.

*Доплерівська ультразвукова спектроскопія*, принципи якої розглянуто в розділі 9.5, дає можливість визначати швидкість руху потоків крові в судинах, контролювати роботу серця плоду тощо.

*Ультразвукова терапія*. В основі ультразвукової терапії лежать всі вище розглянуті механізми впливу ультразвуку на біологічні об'єкти — механічні, теплові, фізико-хімічні. До перспективних застосувань ультразвукової терапії можна віднести: розпилення лікарських препаратів, вплив на біологічно активні точки, ультразвукову аутогемотерапію (лікування власною кров'ю), гемоліз (руйнування) еритроцитів, руйнівний вплив на мікроорганізми.

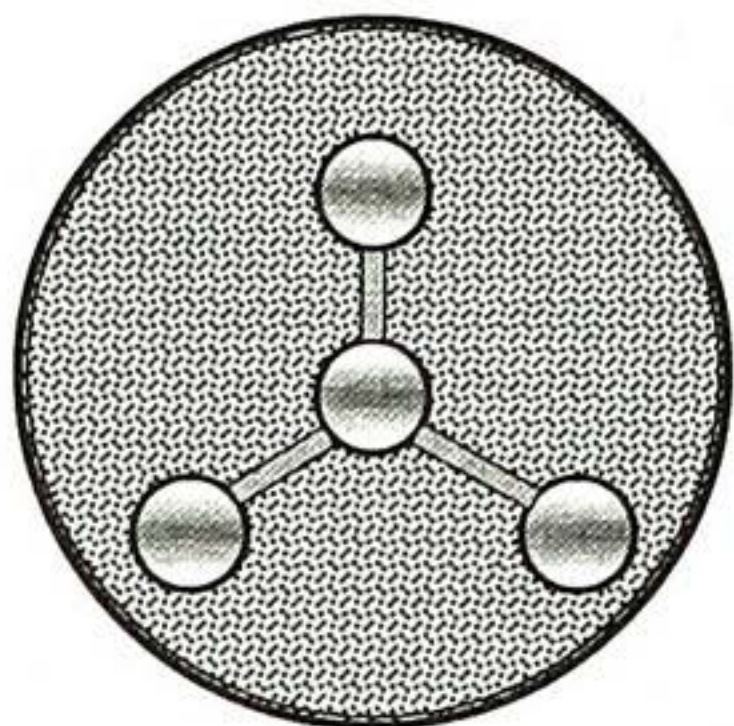
*Ультразвукова хірургія*. Сфокусоване ультразвукове випромінювання використовують для руйнування пухлин, зварювання кісток, операцій над структурами мозку тощо. Механізми хірургічної дії зумовлені кавітацією і нагріванням. Можливе поєднання хірургічних інструментів з ультразвуковими вібраторами.

### **12.3. ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ У ЗООІНЖЕНЕРІЇ**

До основних напрямів практичного використання ультразвукових коливань у зооінженерії належать діагностика вагітності тварин на ранніх стадіях; оцінка міцності кісток; обробка сперми ультразвуком для підвищення її активності під час кріоконсервації; стимулювання молочної залози; визначення товщини жирової та м'язової тканин; знищення мікрофлори на поверхні яєць перед інкубацією; обробка кормів і підвищення харчової цінності кормової сировини; визначення вмісту жиру і білка в молоці; гомогенізація молока (надання йому однорідної структури).

#### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. В чому полягає принцип аудіометрії?
2. Порівняти характер аудіограм тварини з аудіограмою людини.
3. Назвати можливі застосування ультразвуку у ветеринарній медицині.
4. Пояснити принцип ехокардіографії.
5. Пояснити принцип ультразвукової томографії.
6. Назвати можливі застосування ультразвуку у зооінженерії.



## 13. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

### 13.1. ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ

*Ідеальний газ* — це спрощена модель реального газу, в якій допускається наступне: 1. число молекул велике і розміри молекул набагато менші за відстані між ними; 2. молекули підпорядковуються законам руху Ньютона, але індивідуальні молекули рухаються хаотично; 3. зіткнення молекул між собою і зі стінками посудини абсолютно пружні; 4. сили взаємодії між молекулами газу відсутні, крім протягом зіткнень; 5. газ складається з ідентичних молекул; 6. газ перебуває в тепловій рівновазі зі стінками посудини.

Розглянемо газ масою  $m$ , який характеризується об'ємом  $V$ , тиском  $p$  і температурою  $T$ . Зв'язок між цими параметрами називається *рівнянням стану*. Реальні гази добре описуються моделлю класичного ідеального газу, якщо вони достатньо розріджені.

*Рівняння стану ідеального газу* має вигляд:

$$pV = nRT, \quad (13.1)$$

де  $n = \frac{m}{M}$  — кількість молей речовини,  $R = 8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  — універсальна газова стала,  $M$  — молярна маса речовини,  $m$  — маса газу.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газу:

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{Nm}{V} \cdot \bar{v}, \quad (13.2)$$

де  $N$  — кількість молекул в посудині об'ємом  $V$ ,  $\bar{v}$  — середня квадратична швидкість руху молекул,  $m$  — маса однієї молекули.

## 13.2. ІЗОПРОЦЕСИ

*Ізопроеесом* називається процес, при якому один з параметрів стану ( $p$ ,  $V$  або  $T$ ) залишаються сталими, а два інших змінюються при незмінній масі.

Процес, що відбувається в фізичній системі при постійній температурі, називається *ізотермічним*:

$$T = \text{const}; \quad (13.3)$$

$$pV = \text{const}. \quad (13.4)$$

Графік ізотермічного процесу в координатах ( $p, V$ ) являє собою гіперболу, що має назву *ізотерма* (рис. 13.1).

Процес, що відбувається в фізичній системі при постійному зовнішньому тиску, називається *ізобарним*:

$$p = \text{const}; \quad (13.5)$$

$$\frac{V}{T} = \text{const}. \quad (13.6)$$

Графік ізобарного процесу в координатах ( $p, V$ ) або *ізобара* наведено на рис. 13.2.

Процес, що відбувається в фізичній системі при постійному об'ємі, називається *ізохорним*:

$$V = \text{const}; \quad (13.7)$$

$$\frac{p}{T} = \text{const}. \quad (13.8)$$

Графік ізохорного процесу в координатах ( $p, V$ ) або *ізохора* наведено на рис. 13.3.

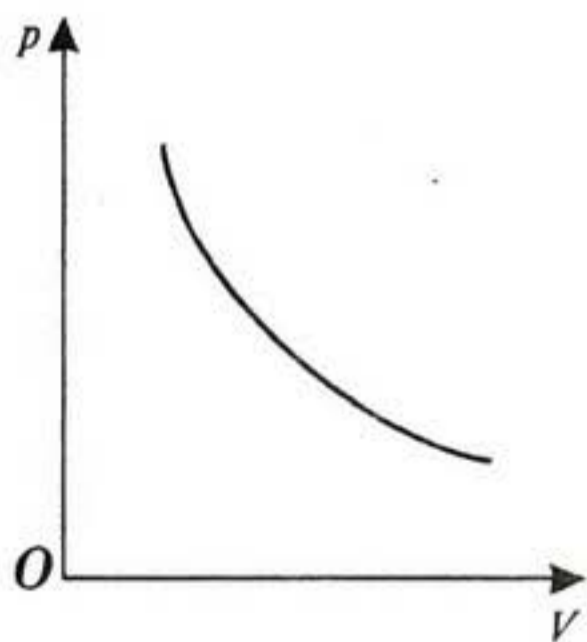


Рис. 13.1. Графік ізотермічного процесу в координатах ( $p, V$ )

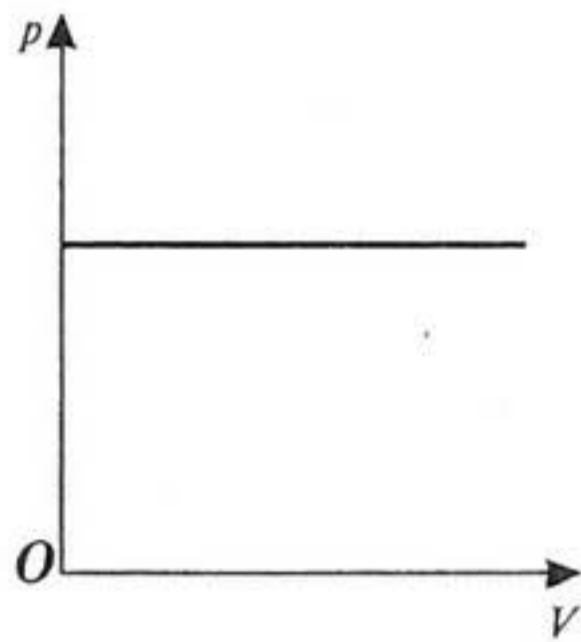


Рис. 13.2. Графік ізобарного процесу в координатах ( $p, V$ )

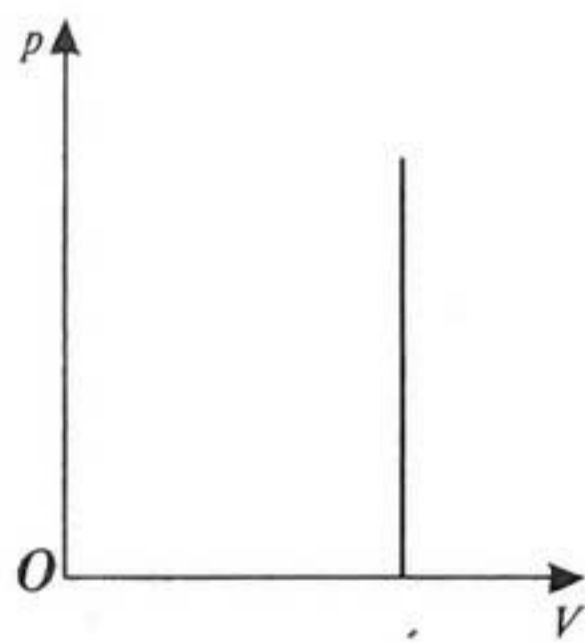


Рис. 13.3. Графік ізохорного процесу в координатах ( $p, V$ )



### 13.3. ВИПАРОВУВАННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЯ

Процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називають *пароутворенням*, а зворотний процес, тобто перехід з газоподібного стану в рідкий, — *конденсацією*.

Для перетворення рідини в пару потрібно надати певну кількість теплоти, яку називають *теплотою пароутворення*, що визначається за виразом:

$$Q = rt, \quad (13.9)$$

де  $r$  — питома теплота пароутворення,  $t$  — маса тіла.

Пароутворення відбувається двома способами — випаровуванням і кипінням.

*Випаровування* — це пароутворення лише з поверхні рідини, під час якого рідину залишають найшвидші молекули, завдяки чому рідина охолоджується. У відкритій ємності рідини випаровується, доки вся не перетвориться в пару. Якщо ж рідина міститься в закритій ємності, рано чи пізно настає *динамічна рівновага* — стан, при якому число молекул, що залишають рідину, дорівнює в середньому числу молекул пари, які повернулися за той же час в рідину.

Пароутворення, що відбувається одночасно як з поверхні, так і з усього об'єму рідини, називають *кипінням*. На відміну від випаровування, що відбувається за будь-якої температури, кипіння починається лише при певній температурі — *температурі кипіння*.

### 13.4. РЕАЛЬНИЙ ГАЗ

Газ, властивості якого (на відміну від ідеального газу) залежать від взаємодії молекул, називається *реальним*.

Молекули реального газу мають власний об'єм, завдяки чому фактичний вільний об'єм, в якому можуть рухатися молекули, становитиме  $V - b$ , де  $b$  — об'єм, що займають самі молекули. Крім того, дія сил притягання зумовлює збільшення тиску на величину

$p' = \frac{a}{V^2}$ , де  $a$  — константа. Таким чином, *рівняння стану реального газу (рівняння Ван-дер-Ваальса)* має вигляд:

$$(p + p')(V - b) = RT. \quad (13.10)$$

Ізотерми реального газу наведено на рис. 13.4. При високих температурах ізотерма реального газу не відрізняється від ізотерми ідеального газу. При певній температурі  $T_{кр}$  (*критична температура*) на ізотермі спостерігається перегин. Під штриховою лінією розміщується область двофазних станів  $P+\Pi$  (рідина і насичена пара), ліворуч від

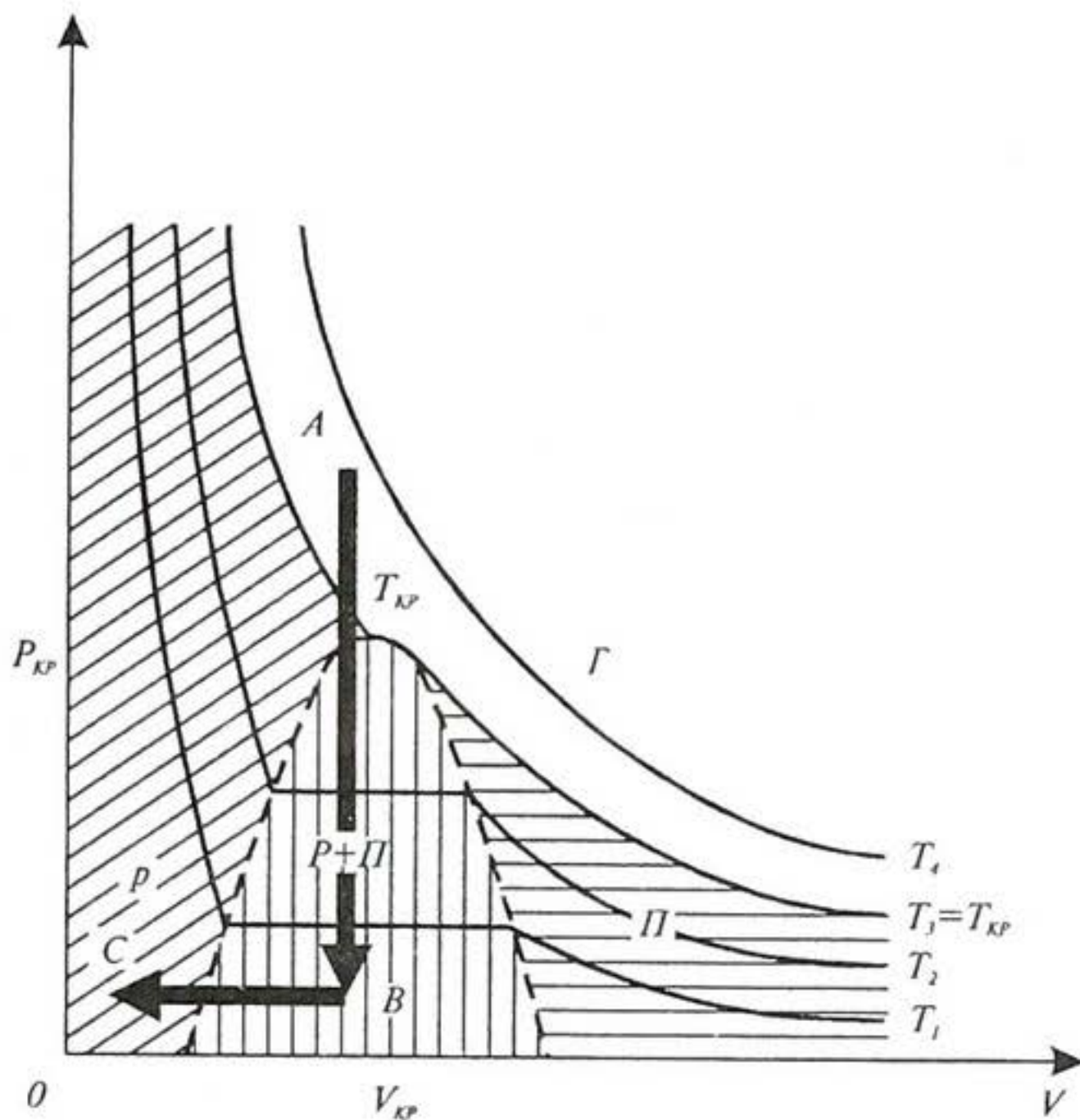


Рис. 13.4. Ізотерми реального газу ( пояснення в тексті )

неї — область рідкого стану  $P$ , а праворуч — область пари  $\Pi$ . Пара відрізняється від інших газоподібних станів  $\Gamma$  тим, що при ізотермічному стиску зазнає процесу скраплення. Газ  $\Gamma$  при температурі, вищій за критичну, не може бути перетворений у рідину.

Ізохорний перехід із точки  $A$  в точку  $B$  і далі ізобарний перехід із точки  $B$  в точку  $C$  дають можливість утворити рідину з газу. В цьому полягає принцип скраплення газів.

## 13.5. ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ

### 13.5.1. Вплив вологості на живі організми

Вологість відіграє значну роль у життєдіяльності наземних тварин. Втрати води живим організмом відбуваються з кінцевими продуктами обміну речовин. В процесі живлення та пиття організм забезпечується водою. Чим вища відносна вологість, тим менша різниця між зовнішнім та внутрішнім водними середовищами тварини і тим, відповідно, менша потреба в зниженні втрат води або в протидії їм. Істотно впливає вологість на поширення наземних тва-

рин, які через спосіб підтримання водного балансу залишаються «водними» — земноводних, наземних ракоподібних, нематод, дощових черв'яків, молюсків тощо.

### 13.5.2. Характеристики вологості повітря

Вода може існувати в атмосфері в трьох фазах — рідкій, газоподібній і твердій. Газоподібна фаза води називається *парою*. Пара, що перебуває в термодинамічній рівновазі з рідиною (тобто в стані, коли число молекул, що переходить із рідини в пару, дорівнює числу молекул, що повертаються в рідину за одиницю часу), називається *насиченою*.

Під *вологістю* повітря розуміють вміст водяної пари у повітрі. Повітря, що містить водяну пару, називають *вологим*, а те, що не містить — *сухим*. Розглянемо основні параметри вологості.

*Абсолютна вологість повітря*  $a$  — кількість водяної пари у грамах, що знаходиться в  $1 \text{ м}^3$  повітря ( $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$ ).

*Пружність (парціальний тиск) водяної пари*  $e$  — тиск, який матиме водяна пара, що знаходиться в газовій суміші, якщо б вона одна займала об'єм, що дорівнює об'єму суміші при тій же температурі.

Абсолютна вологість зв'язана з пружністю  $e$  водяної пари і абсолютною температурою  $T$  співвідношенням:

$$a = 217 e/T, \quad (13.11)$$

де  $e$  вимірюється в гектопаскалях.

*Пружність насиченої пари*  $E$  — граничне значення тиску, що відповідає рівновазі між парою і водою, тобто насиченому стану повітря при даній температурі. Пружність насиченої пари залежить від температури.

*Відносна вологість повітря*  $r$  — відношення пружності водяної пари  $e$  до пружності насиченої пари  $E$  при даній температурі:

$$r = \frac{e}{E} \cdot 100\%. \quad (13.12)$$

*Дефіцит вологості*  $d$  — різниця між пружністю насиченої пари  $E$  і пружністю водяної пари  $e$  при даній температурі:

$$d = E - e. \quad (13.13)$$

*Точка роси*  $T_d$  — температура, при якій повітря, якщо його охолодити при сталому тиску, стає насиченою водяною парою.

*Масова частка вологи*  $q$  — відношення маси водяної пари до маси вологого повітря в тому ж об'ємі ( $\text{г} \cdot \text{г}^{-1}$ ):

$$q = 0,622 \frac{e}{p - 0,378e} = \frac{m}{1 - m}, \quad (13.14)$$

де  $m$  — масове відношення вологи.

Масове відношення вологи  $m$  — кількість водяної пари в сухому повітрі ( $\text{г} \cdot \text{г}^{-1}$ ):

$$m = 0,622 \frac{e}{p - e} = \frac{q}{1 - q}. \quad (13.15)$$

Зв'язок пружності насиченої пари  $E$  з абсолютною температурою  $T$  має вигляд:

$$\lg E = 9,4 - \frac{2345}{T}, \quad (13.16)$$

де  $E$  — в мілібарах (гектопаскалях),  $T$  — в кельвінах.

### 13.5.3. Методи вимірювання вологості повітря

*Аспіраційний психрометр.* Прилад містить два термометри — сухий і змочений; ціна поділки термометрів становить  $0,2^\circ\text{C}$ . Термометри розміщені у металеві трубки, з'єднані в одну (рис. 13.5). Резервуар одного з термометрів обмотаний батистом, що змочується. При вимірюванні вологості психрометр встановлюють горизонтально і обдувають повітрям обидва термометри за допомогою вентилятора. З поверхні резервуара змоченого термометра відбувається випаровування води, що залежить від вологості оточуючого повітря. За допомогою аспіраційного психрометра можна оцінити парціальний тиск  $e$  за психрометричною формулою:

$$e = E_1 - A(t_c - t_{3M})p_A, \quad (13.17)$$

де  $E_1$  — пружність насиченої водяної пари, що відповідає температурі змоченого термометра;  $A = 6,62 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  — психрометричний коефіцієнт;  $t_c$  — температура сухого термометра;  $t_{3M}$  — температура змоченого термометра;  $p_A$  — атмосферний тиск (в мм рт.ст. або паскалях). Пружність насиченої водяної пари  $E_1$ , що відповідає температурі змоченого термометра, та пружність насиченої водяної пари  $E$ , яка відповідає температурі сухого термометра, визначають в мм рт.ст. або в паскалях за психрометричними таблицями (див. додаток).

*Волосяний гігрометр.* Дія приладу базується на здатності знежиреної волосини змінювати свою довжину при зміні

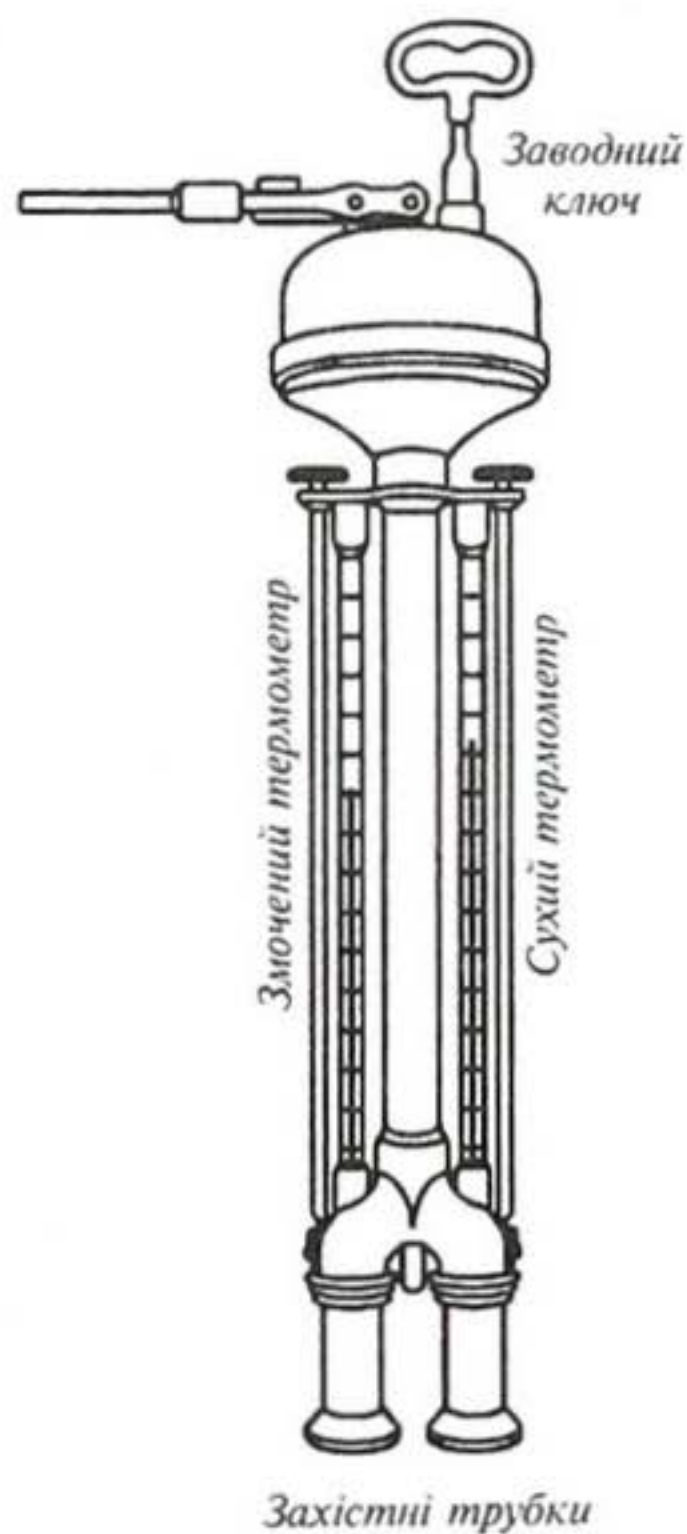


Рис. 13.5. Аспіраційний психрометр Асмана

вологості. Водяна пара здатна конденсуватися в капілярних порах людської волосини. Збільшення вологості призводить до зменшення угнутої менісків води в порах, завдяки чому волосина видовжується. Видовження волосини відбувається пропорційно логарифму відносної вологості. Пучок таких волосин використовують в *гігрографі* — приладі для безперервного запису відносної вологості повітря. Інші матеріали можуть бути застосовані як сенсори в гігрометрах — нейлон, бавовна, кишкова мембрана корови або свині.

*Ємнісний гігрометр.* Основу приладу становить гігроскопічна полімерна плівка, з обох боків якої становлено пористі металеві електроди, що утворюють конденсатор ємністю близько 500 пФ. За поглинання плівкою молекул води об'єм плівки збільшується, відстань між електродами також збільшується, що зумовлює зміни ємності конденсатора. Ємнісний гігрометр застосовується для вимірювання відносної вологості.

*Конденсаційний гігрометр.* Один з методів оцінки абсолютної вологості, принцип дії якого ґрунтується на вимірюванні точки роси. Якщо плоску гладеньку поверхню охолоджувати, можна спостерігати конденсацію вологи на ній. Температура поверхні в цей момент дуже близька до тієї, при якій повітря стає насиченою водяною парою, тобто до точки роси. Залишається тільки точно виміряти цю температуру.

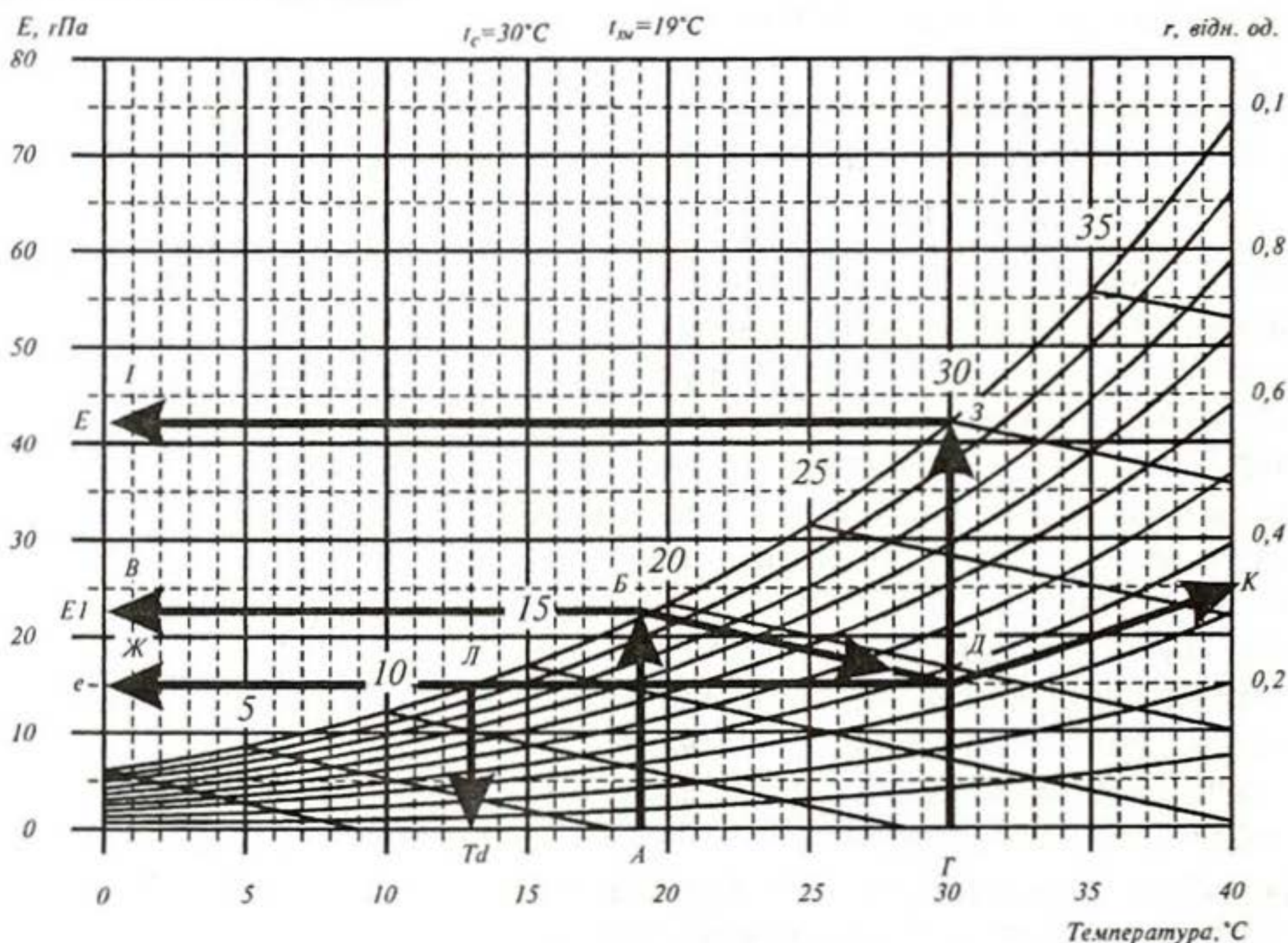


Рис. 13.6. Вимірювання вологості за допомогою номограми (пояснення в тексті)

*Сорбційний гігрометр.* В основу приладу покладено залежність електропровідності вологосорбуючої плівки від вологості середовища. Для цього використовується сіль  $LiCl$ .

*Вимірювання вологості за допомогою номограми.* Взаємозв'язок між параметрами вологості може бути поданий графічно за допомогою номограми (рис. 13.6).

*Вимірювання вологості за віртуальними психрометричними таблицями.* Використовуючи ці таблиці (для цього слід зайти в Інтернеті сайт <http://www.met.rdg.ac.uk/~swshargi/MicroMetSoft.html>), можна за даними атмосферним тиском, температурами сухого і змоченого термометрів визначити пружність водяної пари  $e$ , пружність насиченої пари  $E$ , абсолютну вологість  $a$ , відносну вологість повітря  $r$ , масову частку вологи  $q$  та точку роси  $T_d$ .

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Використовуючи психрометричне рівняння та таблиці (див. додаток), знайти пружність водяної пари  $e$ , максимальну пружність водяної пари  $E_s$  при температурі змоченого термометра, максимальну пружність водяної пари  $E$  при температурі сухого термометра, відносну вологість повітря  $r$  та дефіцит вологості  $d$ , якщо температура сухого термометра  $t_c = 25$  °С, а змоченого  $t_{zm} = 20$  °С. Атмосферний тиск становить 760 мм рт. ст.

### Розв'язок

У психрометричній таблиці (див. додаток) знаходимо, що температурі змоченого термометра  $t_{zm} = 20$  °С відповідає пружність насиченої пари  $E_s = 2337$  Па. Підставляємо значення  $E_s$  у психрометричне рівняння (13.17) і знаходимо пружність водяної пари  $e$ :

$$E = 2337 - 6,62 \cdot 10^{-4}(25 - 20) \cdot 1,01325 \cdot 10^5 = 2303 \text{ Па.}$$

У психрометричній таблиці знаходимо пружність насиченої пари при температурі  $t_c = 25$  °С сухого термометра:  $E = 3167$  Па. Використовуючи формулу (13.12), знаходимо відносну вологість:

$$r = 2303/3167 = 0,73 = 73 \text{ \%}.$$

### Контрольне завдання №13.1

Використовуючи психрометричне рівняння та таблиці (див. додаток), знайти пружність водяної пари  $e$ , пружність насиченої пари  $E_s$  при температурі змоченого термометра, пружність насиченої пари  $E$  при температурі сухого термометра, відносну вологість повітря  $r$  та дефіцит вологості  $d$  для заданих значень температури сухого та змоченого термометрів згідно з варіантом, встановленим викладачем. Атмосферний тиск становить  $10^5$  Па.

Варіант	Температура сухого термометра $t_c$ , °С	Температура змоченого термометра $t_{зм}$ , °С.
1	25	20
2	27	22
3	23	22
4	30	24
5	24	18
6	23	19

### Приклад

Визначити за допомогою номограми пружність  $e$  водяної пари, пружність  $E$  насиченої пари, що відповідає температурі сухого термометра, та пружність  $E_s$  насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра, відносну вологість  $r$ , дефіцит вологості  $d$  і точку роси  $T_d$ , якщо температура сухого термометра 30 °С, а температура змоченого термометра 19 °С.

### Розв'язок

1. На горизонтальній осі номограми (рис. 13.6) з точки, що відповідає температурі змоченого термометра 19 °С (точка  $A$ ), проводимо вертикальну лінію  $AB$  до перетину з кривою  $r = 1,0$  (точка  $B$ ).

2. З точки  $B$  проводимо горизонтальну лінію  $BB'$  до перетину з лівою вертикальною віссю номограми (точка  $B'$ ). На цій осі визначаємо пружність  $E_s$  насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра:  $E_s = 22,5$  гПа.

3. З точки  $B$  проводимо похилу лінію  $BD$  до перетину з вертикальною лінією  $GD$ , що відповідає температурі сухого термометра 30 °С (точка  $D$ ).

4. З точки  $D$  проводимо горизонтальну лінію  $DЖ$  до перетину з лівою віссю номограми (точка  $Ж$ ), яка дає значення пружності  $e$  водяної пари при даній температурі:  $e = 15$  гПа.

5. З точки  $G$ , що відповідає температурі сухого термометра, проводимо вертикальну лінію  $GЗ$  до перетину з кривою  $r = 1,0$  (точка  $З$ ).

6. З точки  $З$  проводимо горизонтальну лінію  $ЗI$  до перетину з лівою вертикальною віссю номограми (точка  $I$ ). На цій осі визначаємо пружність  $E$  насиченої пари, що відповідає температурі сухого термометра:  $E = 42,5$  гПа.

7. З точки  $D$  проводимо лінію  $ДК$ , паралельну найближчій кривій номограми, до перетину з правою вертикальною віссю номограми (точка  $К$ ), яка дає значення відносної вологості при даній температурі:  $r = 0,35$ .

8. На лівій вертикальній осі визначаємо різницю між значеннями  $E$  та  $E_s$  (відстань  $IB$ ), що відповідає дефіциту вологості:  $d = 42,5 - 22,5 = 20$  гПа.

9. Знаходимо точку  $Л$  перетину прямої  $ДЖ$  з кривою  $r = 1,0$  (точка  $Л$ ), і визначаємо на горизонтальній осі номограми точку роси:  $T_d = 12$  °С.

### Контрольне завдання №13.2

Визначити за допомогою номограми (рис. 13.7) пружність  $e$  водяної пари, пружність  $E$  насиченої пари, що відповідає температурі сухого термометра, та пружність  $E_s$  насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра, відносну вологість  $r$ , дефіцит волості  $d$  і точку роси  $T_d$ , якщо температура сухого термометра та температура змоченого термометра визначаються за таблицею згідно варіанту, що встановлений викладачем:

Варіант	Температура сухого термометра	Температура змоченого термометра
1	28	15
2	32	20
3	35	16
4	31	15
5	25	10
6	36	14

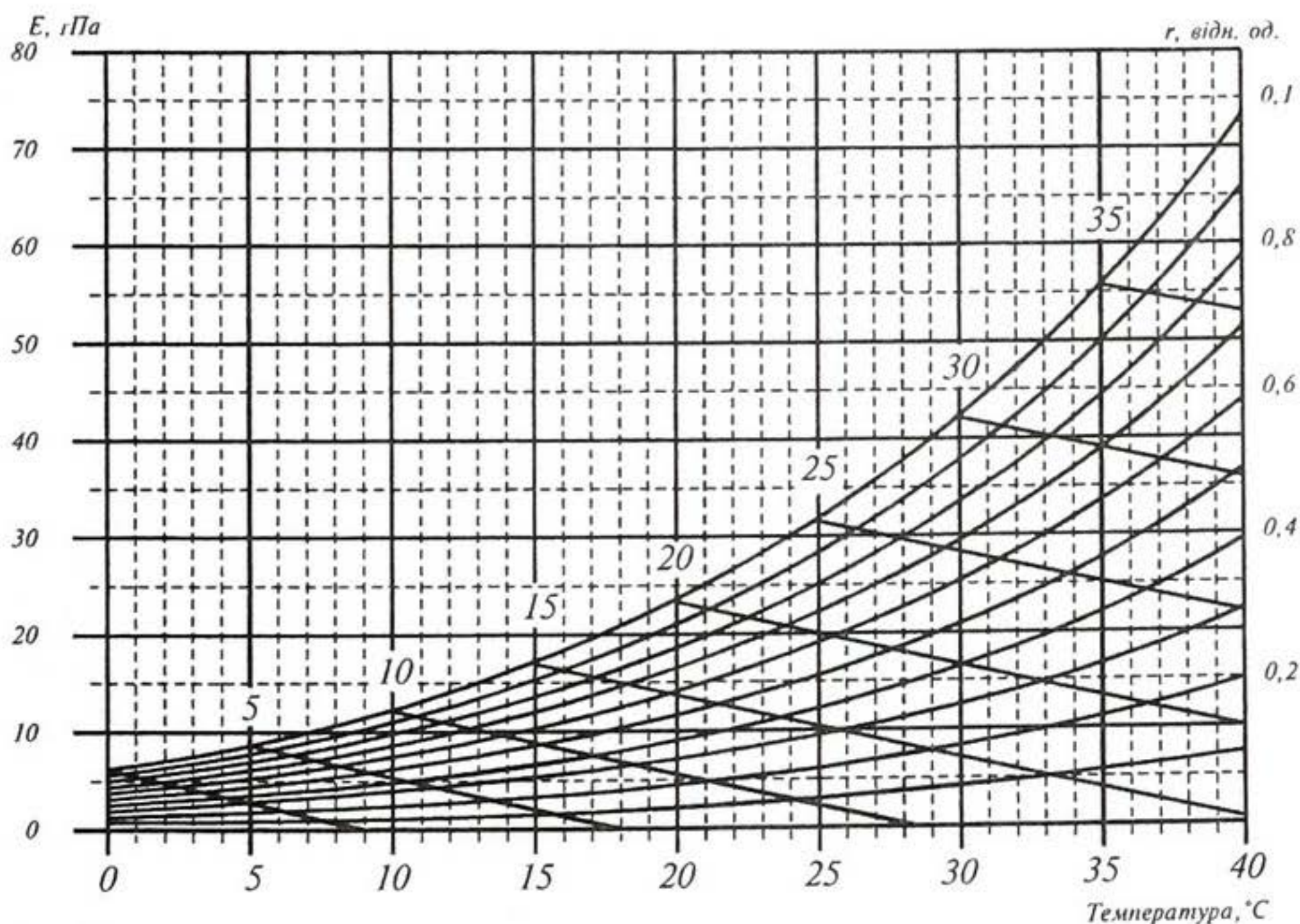


Рис. 13.7. Номограма для вимірювання вологості



### Приклад

Використовуючи віртуальні психрометричні таблиці (для цього слід зайти в Інтернеті сайт <http://www.met.rdg.ac.uk/~swshargi/MicroMetSoft.html>), визначити пружність водяної пари  $e$ , пружність насиченої пари  $E$ , абсолютну вологість  $a$ , відносну вологість повітря  $r$ , масову частку вологи  $q$  та точку роси  $T_d$ , якщо температура сухого термометра  $t_c = 30$  °С, а змоченого  $t_{zw} = 19$  °С. Атмосферний тиск становить 760 мм рт. ст.

### Розв'язок

Знаходимо віртуальні психрометричні таблиці, в яких задаються температури сухого ( $T_{dry}$ ) і змоченого ( $T_{wet}$ ) термометрів, атмосферний тиск в мілібарах (нагадуємо, що 760 мм рт.ст. = 1 атм =  $1,013 \cdot 10^5$  Па =  $1,013 \cdot 10^3$  гПа =  $1,013 \cdot 10^3$  мбар), а також психрометричний коефіцієнт  $A$ . Якщо використовувати в психрометричному рівнянні (13.17) одиниці пружності та атмосферного тиску в мілібарах (гектопаскалях), то це рівняння буде мати вигляд:

$$e = E_s(\text{гПа}) - A(t_c - t_{zw})p_A(\text{гПа}) = E_s(\text{гПа}) - 6,62 \cdot 10^{-4}(t_c - t_{zw})1,013 \cdot 10^3 (\text{гПа}) = E_s(\text{гПа}) - 6,7 \cdot 10^{-1}(t_c - t_{zw}).$$

Отже, в віртуальну психрометричну таблицю підставляємо значення психрометричного коефіцієнта при атмосферному тиску  $A = 0,67$ , а також температури сухого і зволоженого термометрів:  $T_{dry} = 30$  °С,  $T_{wet} = 19$  °С. Натискуємо на кнопку «Enter» і отримуємо: пружність водяної пари («vapor pressure»)  $e = 14,590$  гПа, пружність насиченої пари («saturation vapor pressure»)  $E = 42,456$  гПа, абсолютна вологість («absolute humidity»)  $a = 10,4$  г·м<sup>-3</sup>, відносна вологість («relative humidity»)  $r = 34,4$  %, масова частка вологи («specific humidity»)  $q = 9,0 \cdot 10^{-3}$  г·г<sup>-1</sup>, точка роси («dew point»)  $T_d = 12,6$  °С.

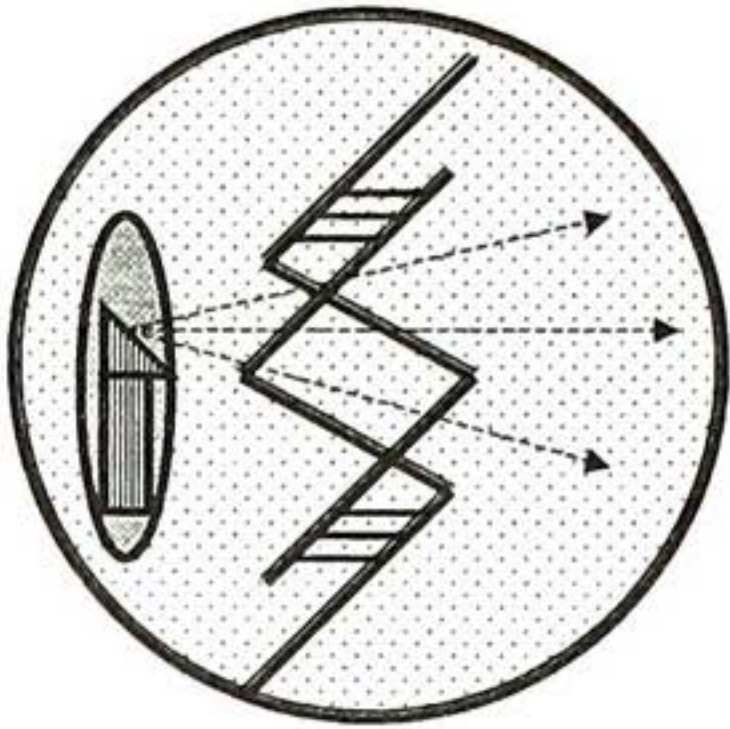
### Контрольне завдання №13.3

Використовуючи віртуальні психрометричні таблиці, визначити пружність водяної пари  $e$ , пружність насиченої водяної пари  $E$ , абсолютну вологість  $a$ , відносну вологість повітря  $r$ , масову частку вологи  $q$  та точку роси  $T_d$ . Температури сухого та змоченого термометрів визначають за таблицею з контрольного завдання 13.2 згідно з варіантом, встановленим викладачем. Атмосферний тиск становить 760 мм рт. ст.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке ідеальний газ? Написати рівняння стану ідеального газу.
2. Який процес називають ізотермічним? ізобарним? ізохорним?
3. Який вигляд мають графіки: ізобарного процесу в координатах  $(V, T)$ ? ізохорного процесу в координатах  $(p, T)$ ?

4. Дати визначення процесам пароутворення та конденсації. Яка різниця між випаровуванням і кипінням?
5. Яку пару називають насиченою?
6. Що таке реальний газ? Написати рівняння стану реального газу.
7. Який фізичний зміст констант  $a$  і  $b$  у рівнянні Ван-дер-Ваальса.
8. Які термодинамічні процеси в реальному газі слід здійснити, щоб перейти від газу до рідини?
9. Що називають вологістю повітря? Яке повітря називають вологим; сухим?
10. Що таке пружність водяної пари?
11. Що таке пружність насиченої водяної пари?
12. Дати визначення абсолютній і відносній вологості.
13. Назвати одиниці вимірювання абсолютної і відносної вологості.
14. Що називають дефіцитом вологості?
15. Що таке масова частка вологи?
16. Що таке точка роси?
17. В чому полягає принцип дії психрометра Асмана?
18. Чому температура змоченого термометра менша, ніж температура сухого?
19. В чому полягає принцип дії ємнісного гігрометра?
20. В чому полягає принцип дії конденсаційного гігрометра?
21. В чому полягає принцип дії сорбційного гігрометра?



## 14. МОЛЕКУЛЯРНА БІОФІЗИКА

*Молекулярна біофізика* — розділ біофізики, що вивчає фізичні та фізико-хімічні властивості і взаємодії макромолекулярних і молекулярних комплексів, що складають живі організми, а також структури біологічних систем на молекулярному рівні, процеси перетворення і міграції енергії.

### 14.1. БІОЛОГІЧНІ МАКРОМОЛЕКУЛИ

Молекулярна біофізика вивчає структуру біологічно важливих макромолекул і фізичні процеси, що лежать в основі їх функціонування.

Існує чотири основних типи біологічних макромолекул: *білки, нуклеїнові кислоти, полісахариди і ліпіди*. Перші три типи макромолекул є *полімери*, що являють собою довгі послідовності відносно малих молекул — амінокислот у білків, нуклеотидів у нуклеїнових кислот і цукрів у полісахаридів. Всі ці макромолекули характеризуються просторовою структурою, що визначається взаємодією компонентів макромолекул між собою та з довкіллям. Розрізняють кілька рівнів структурної організації макромолекул.

*Первинна структура* макромолекул являє собою послідовність ланок (амінокислот, нуклеотидів, цукрів) в ланцюзі біополімера, з'єднаних міцними ковалентними зв'язками (рис.14.1).

*Вторинна структура* утворюється за згортання поліпептидного ланцюга, як це відбувається в  $\alpha$ -спіралі білків, подвійній спіралі ДНК (рис.14.2).

*Третинна структура* пов'язана з просторовим укладанням усього ланцюга, що супроводжується утворенням глобул.

*Четвертинна структура* характеризується об'єднанням глобул (рис. 14.3).

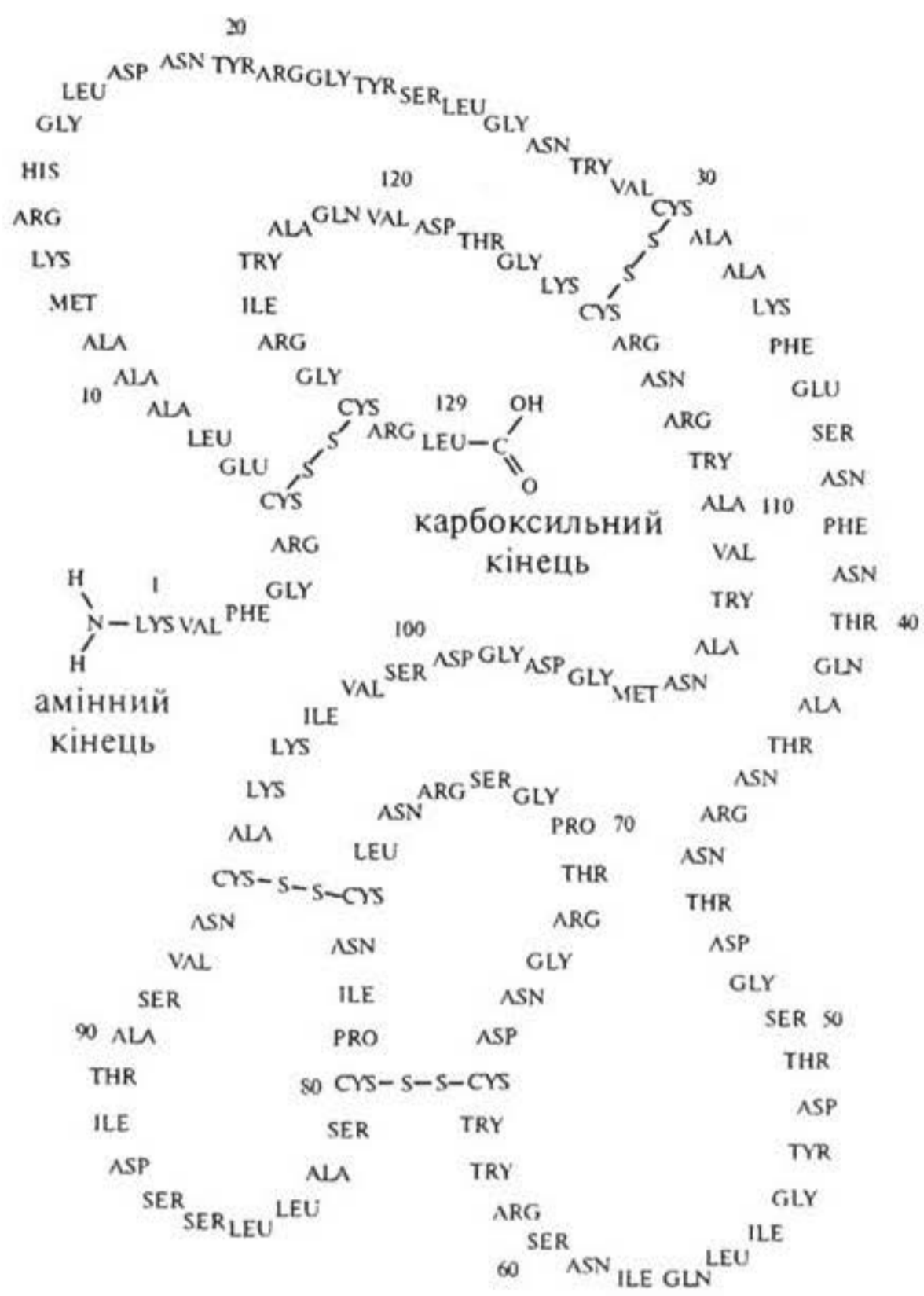


Рис. 14.1. Первинна структура макромолекул — білок, 129 амінокислотних залишків якого утворюють поліпептидний ланцюг

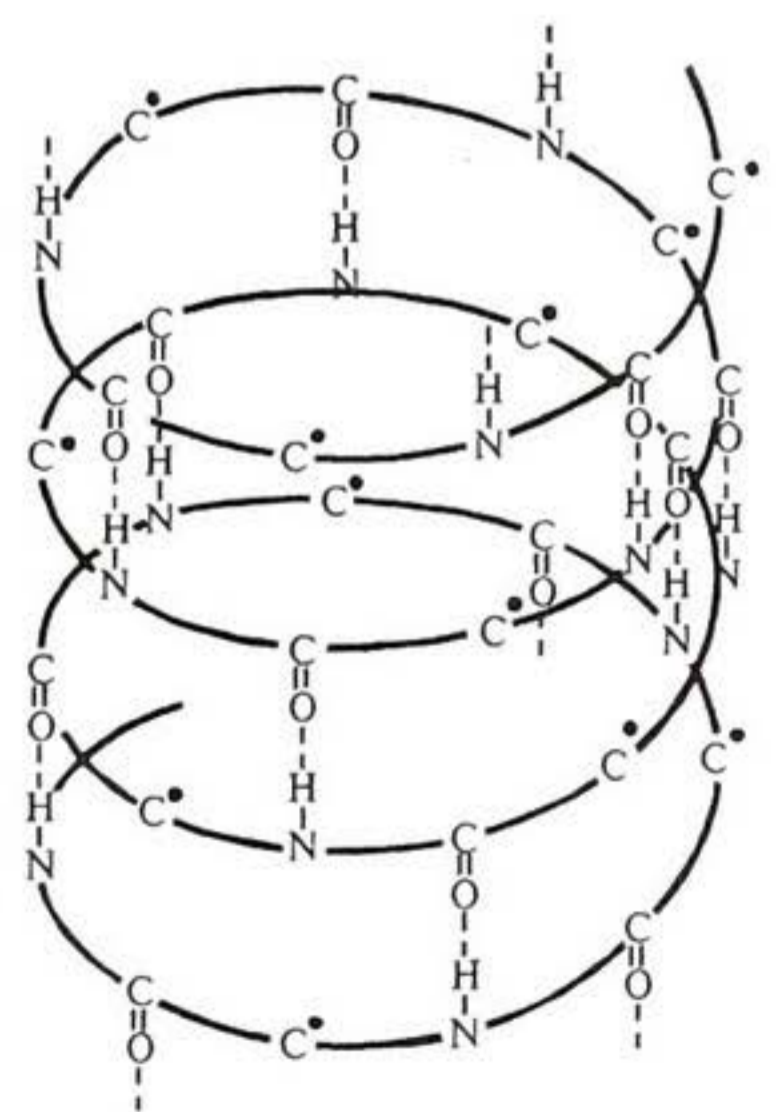


Рис. 14.2. Вторинна структура макромолекул — альфа-спіраль білка, що підтримується водневими зв'язками (пунктирні лінії)

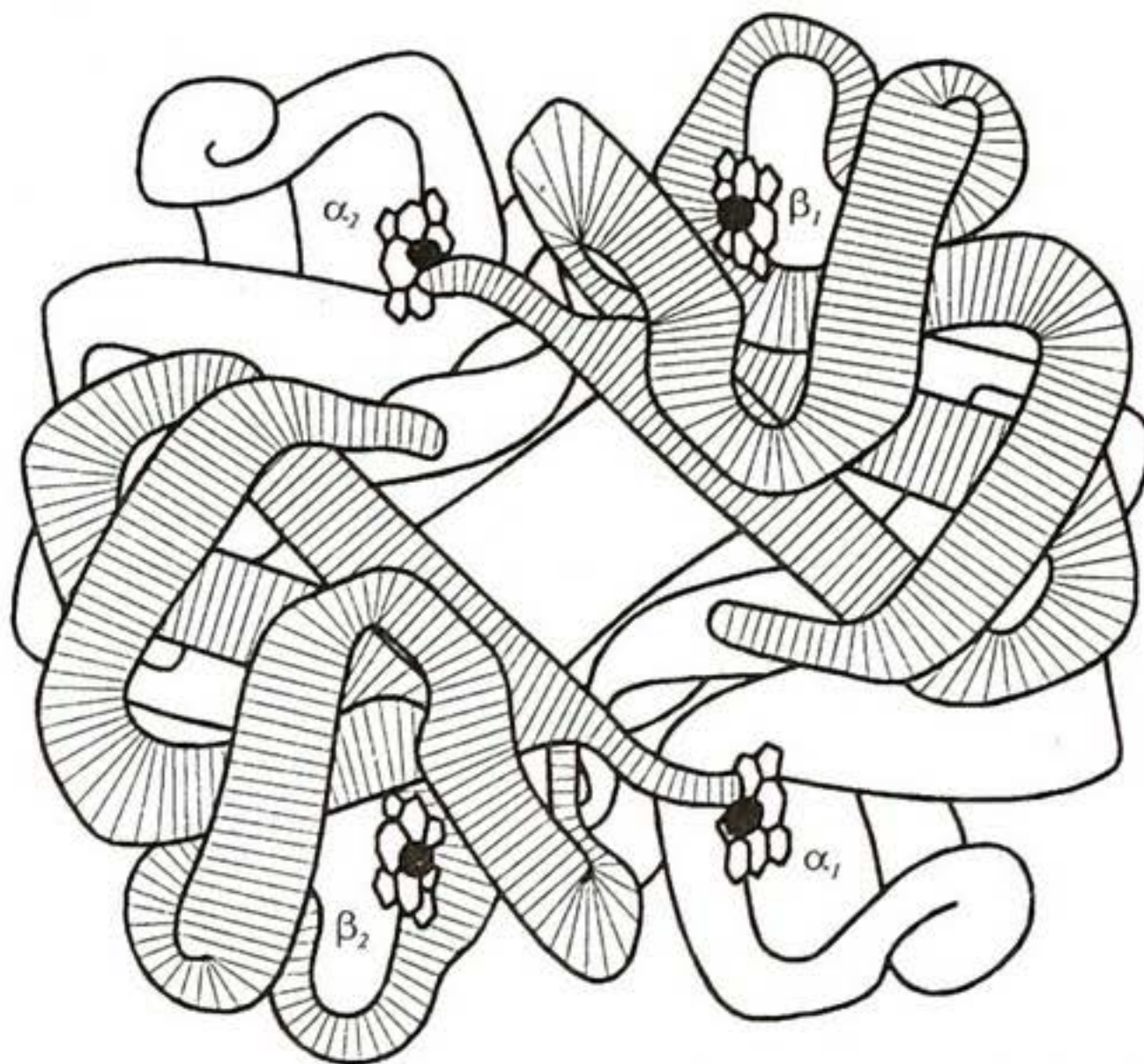


Рис.14.3. Четвертинна структура макромолекул — білок (гемоглобін коня)

### 14.1.1. Білки

Білки є важливим компонентом клітини; функції білків різноманітні: ферментативні реакції, перенесення речовини через мембрану, м'язове скорочення тощо.

Основною структурною одиницею білків є амінокислоти — відносно малі молекули, що складаються з карбоксильної групи (I) і аміногрупи (II), приєднаних до центрального атома вуглецю (так званого  $\alpha$ -вуглецю). Узагальнена форма амінокислоти має вигляд (III) (рис.14. 4). Тут  $R$  — залишок молекули, структура якої варіює у різних амінокислот, визначаючи їх індивідуальність. Деякі з амінокислот наведено на рис. 14.5. Всього до складу білків входить 20 амінокислот. Послідовність амінокислот, що є первинною структурою, називається *поліпептидом*. У клітині впорядковані поліпептидні ланцюги утворюють вторинні структури; одна з найбільш по-

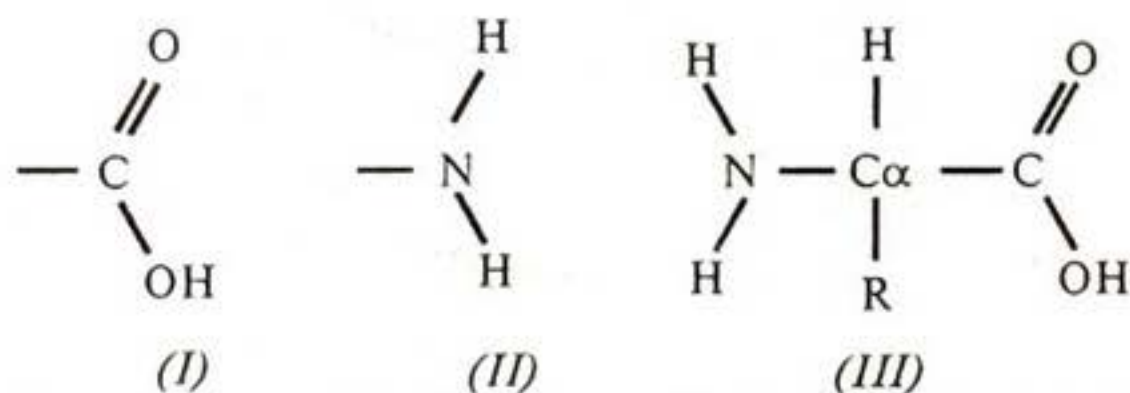
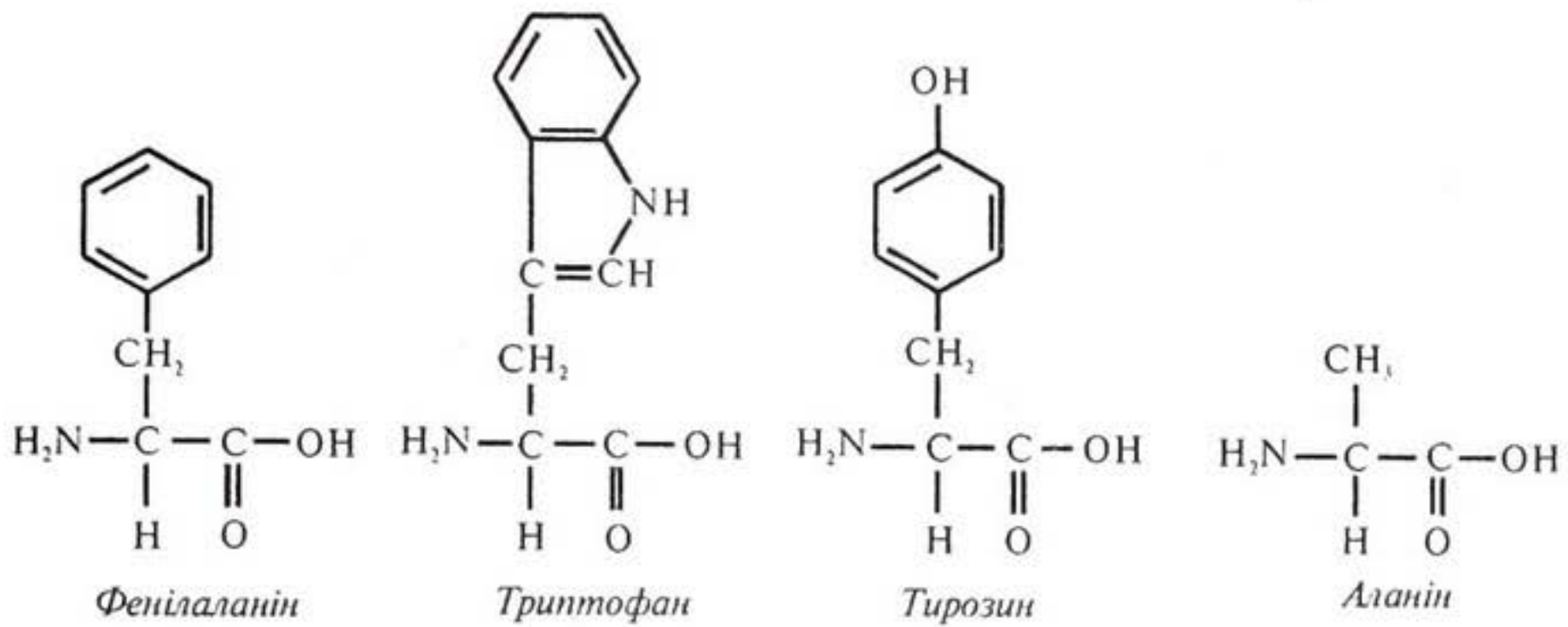


Рис. 14.4. Узагальнена форма амінокислоти

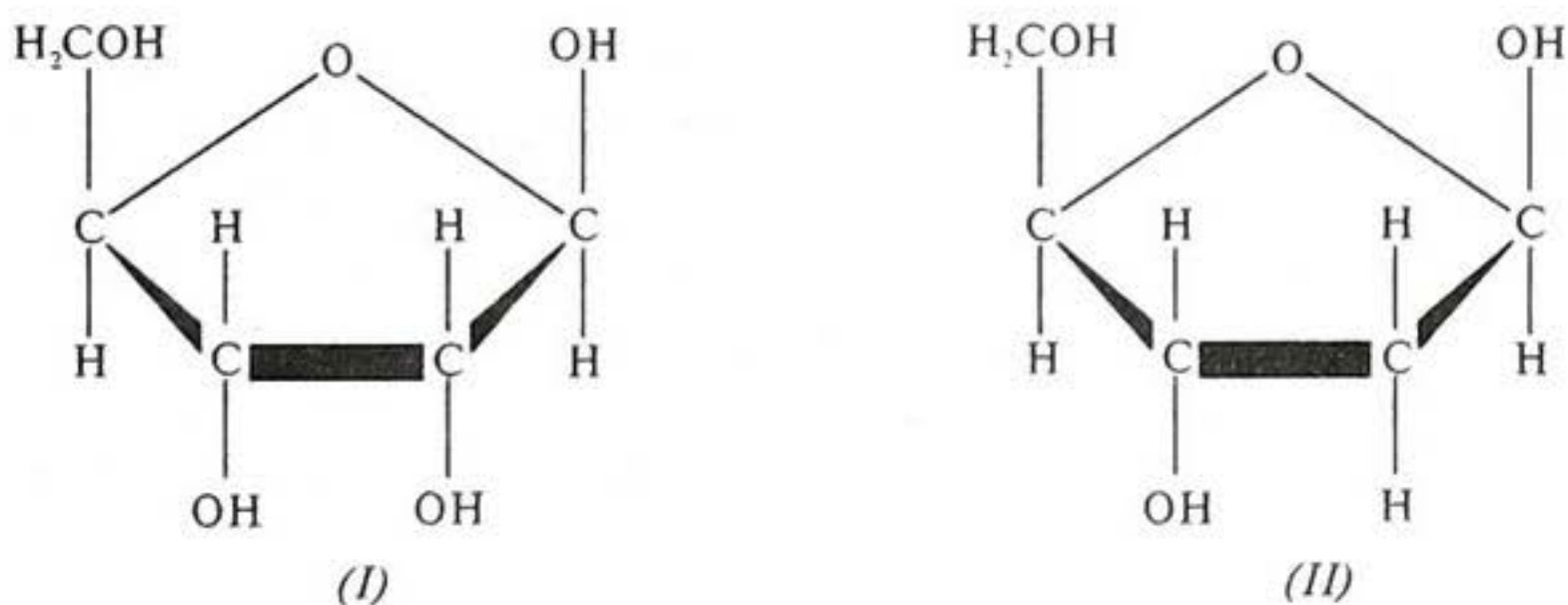


**Рис. 14.5. Структури деяких амінокислот**

ширених таких структур —  $\alpha$ -спіраль. Ця спіраль підтримується водневими зв'язками (переривчасті лінії на рис. 14.2). На кожний виток спіралі припадає 3,6 амінокислот.

### 14.1.2. Нуклеїнові кислоти

Нуклеїнові кислоти є полімерами, що відповідають за збереження біологічної ідентичності. Вони є носіями і переносниками інформації, щодо структури і поведінки живих систем. Нуклеїнові кислоти — це полімери нуклеотидів. Кожний нуклеотид складається з фосфатної групи, п'ятивуглецевого цукру (пентози) і азотистої основи. Послідовність нуклеотидів в полінуклеотидному ланцюзі являє собою первинну структуру нуклеїнових кислот. Залежно від конфігурації пентози (рис. 14.6) розрізняють два типи нуклеїнових кислот — дезоксирибонуклеїнову кислоту (ДНК) і рибонуклеїнову кислоту (РНК). ДНК відповідає за збереження, а РНК — за перенесення генетичної інформації. Азотисті основи діляться на два типи — піримідини (що мають одне кільце) і пурини (що мають два кільця).



**Рис. 14.6. Конфігурації пентози: I — D-рибоза; II — D-2-дезоксирибоза**

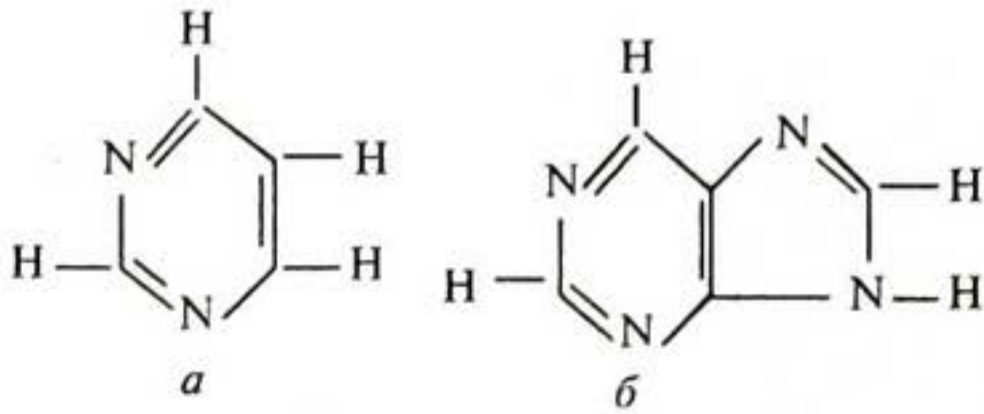


Рис. 14.7. Азотисті основи ДНК:  
а — піримідин; б — пурин

Структуру цих основ наведено на рис. 14.7. До складу ДНК входять два піримідини — тимін і цитозин; до складу РНК — цитозин і урацил. До обох молекул, ДНК та РНК, входять два пурини — аденін і гуанін.

Більшість молекул ДНК характеризується вторинною структурою — так званою *подвійною спіраллю*, «сходінками» якої є азотисті основи. Кожна «сходінка» утворюється двома основами, з'єднаними водневими зв'язками (рис. 14.8). Причому, аденін може утворювати пару тільки з тиміном, а гуанін — з цитозином.

Відносний вміст чотирьох азотистих основ в ДНК може змінюватися від одного виду до іншого, але кількість пуринових основ завжди дорівнюватиме кількості піримідинових:

$$[A]/[T] = [G]/[C] = 1. \quad (14.1)$$

Молекула РНК зазвичай має одноланцюгову структуру. Властивості цієї молекули інші, ніж ДНК.

### 14.1.3. Полісахариди

Ці полімери являють собою послідовності цукрів. Представниками полісахаридів є *крохмаль*, що міститься у рослинах; *глікоген*, що знаходиться у крові і переважно — у печінці тварин, а також *целюлоза*, що виконує функції структуроутворюючого матеріалу для рослин. Усі ці полісахариди складаються з глюкозних кілець, зв'язаних різноманітними способами у ланцюги. Одним з найважливіших полісахаридів тваринного світу є *хітин*, що формує зовнішній покрив комах та ракоподібних.

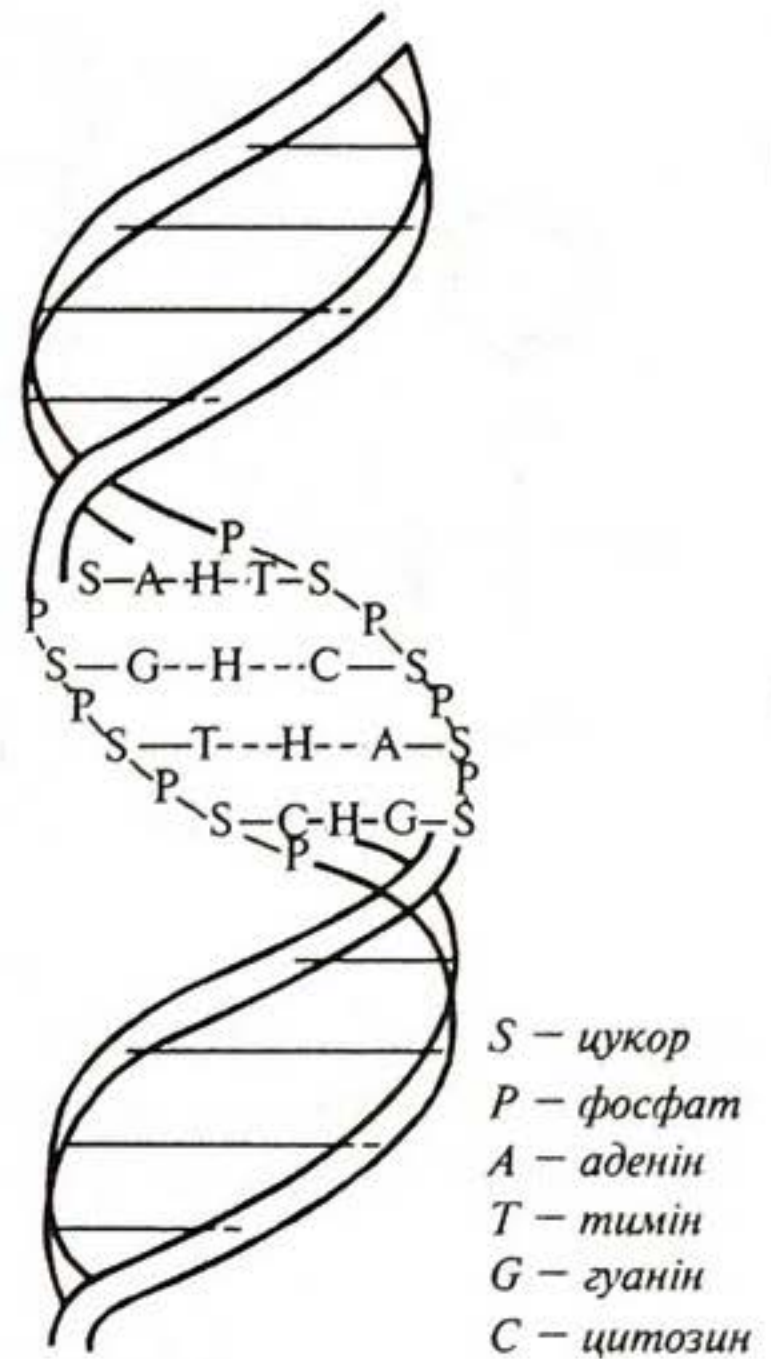


Рис. 14.8. Подвійна спіраль молекули ДНК

## 14.1.4. Ліпіди

*Ліпіди* — це жири та жироподібні речовини, що характеризуються гідрофобністю (тобто вони «бояться» води) і наявністю великої кількості вуглеце-водневих зв'язків. У процесі їх окислювання вивільнюється енергія. Ліпіди відіграють роль структурних компонентів та джерел енергії.

До жирів близькі й *фосфоліпіди*. Фосфатний кінець молекули фосфоліпіду є гідрофільним (тобто «любить» воду) і розчиняється у воді. При додаванні до води фосфоліпіди прагнуть утворити плівку на її поверхні (рис. 14.9,а). У водному середовищі клітин фосфоліпіди формують подвійні шари (бішари). Такі конфігурації (рис. 14.9,б) займають важливе місце у структурі клітинних мембран.

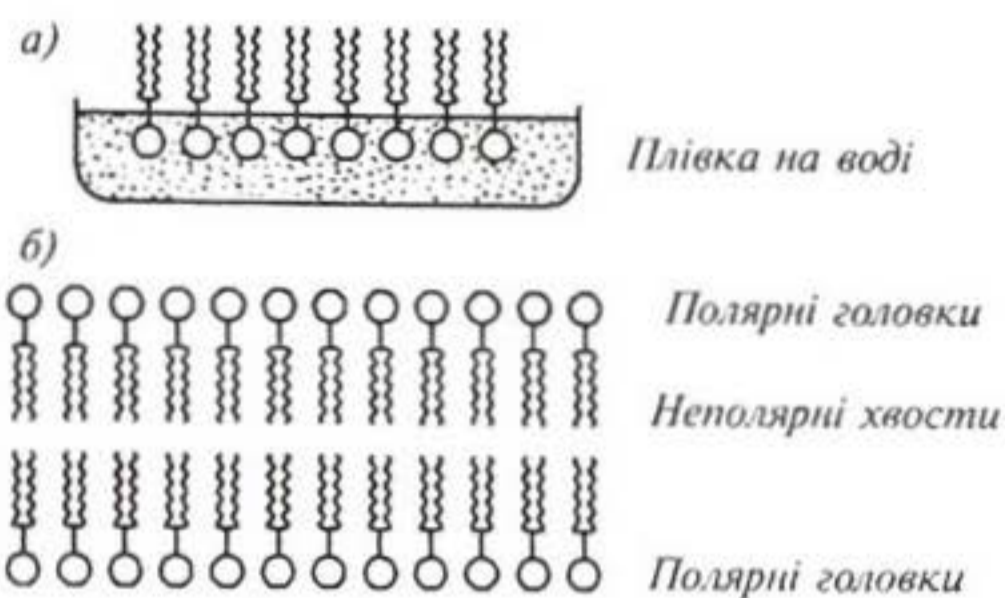


Рис. 14.9. Подвійний шар, що утворюється на поверхні води фосфоліпідами

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Назвати можливі рівні структурної організації макромолекул.
2. З чого складаються білки?
3. Що називають поліпептидом?
4. Пояснити первинну і вторинну структури ДНК.
5. Як співвідносяться кількості пуринових та піримідинових основ в ДНК?
6. Назвати представників полісахаридів.
7. Що таке ліпіди? Яку роль вони відіграють?
8. Що називають ліпідним бішаром?

## 14.2. НЮХ І СМАК У ТВАРИН

### 14.2.1 Нюх та нюховий аналізатор тварин

Для багатьох тварин важливим і навіть вирішальним способом комунікації є посилення хімічних сигналів. Хімічні леткі речовини, що створюються твариною і зумовлюють специфічну реакцію в інших представників того ж самого виду, називаються *феромонами* або *одорантами*. Тварини здійснюють і реалізують такий нюховий зв'язок для проголошення права на ту чи іншу територію, прокладання сліду, пошуків корму, утворення сигналу тривоги, спілкування з потомством, привертання уваги статевих партнерів для спаровування і роз-



множення, орієнтації у просторі та навігації, підтримання певної соціальної ієрархії. Хімічні сигнали характеризуються незначним різноманіттям, але вони діють у значному просторовому і часовому інтервалах завдяки ґрунту та рослинам, на яких відкладає тварина феромони як маркери. Параметри поширення феромонів часто залежать від швидкості вітру: так, при швидкості вітру  $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  область поширення феромона має довжину 215 м, ширину 4560 м і висоту 108 м, тоді як при швидкості вітру  $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  ці параметри становлять: довжина — 1820 м, ширина — 97 м, висота — 48,5 м.

*Нюх* — це процес сприйняття запаху твариною. Нюхові клітини безхребетних розміщені на шкіряному покриві; у членистоногих ці клітини утворюють особливі органи — сенсили; у нижчих хребетних нюхові клітини розміщені в нюхових мішках, у вищих тварин і людини вони утворюють рецепторний шар нюхової порожнини.

*Хімічна комунікація комах* здійснюється завдяки феромонам, серед яких найбільш поширеними є статеві атрактанти. Розглянемо один з таких ідентифікованих феромонів шовкопряда *Bombyx mori*. Самець шовкопряда не здатний літати, через що йому важко шукати самку. Він має на голові пару великих антен (рис. 14.10), які збирають *бомбікол* — атрактант, що висилає самка. Цей атрактант є сумішшю (10:1) саме бомбіколу (складного спирту) та його альдегідної форми бомбікалу. Кожна антена метелика складається з основного стрижня і великої кількості волосинкоподібних органів, серед яких знаходяться нюхові волоски. Вартою уваги є здатність антен селективно збирати молекули бомбіколу за допомогою клітин-рецепторів, розміщених на нюхових волосках антени. Волосок разом з рецептором називається *сенсилою* (*sensilla trichodea*). Кількість сенсил на кожній антені досягає 17000. Завдяки цим рецепторам самка здатна привертати самців на відстані близько одного кілометра. Клітина-рецептор шовкопряда містить два волоконних закінчення, що називаються *дендритами* (рис. 14.11).

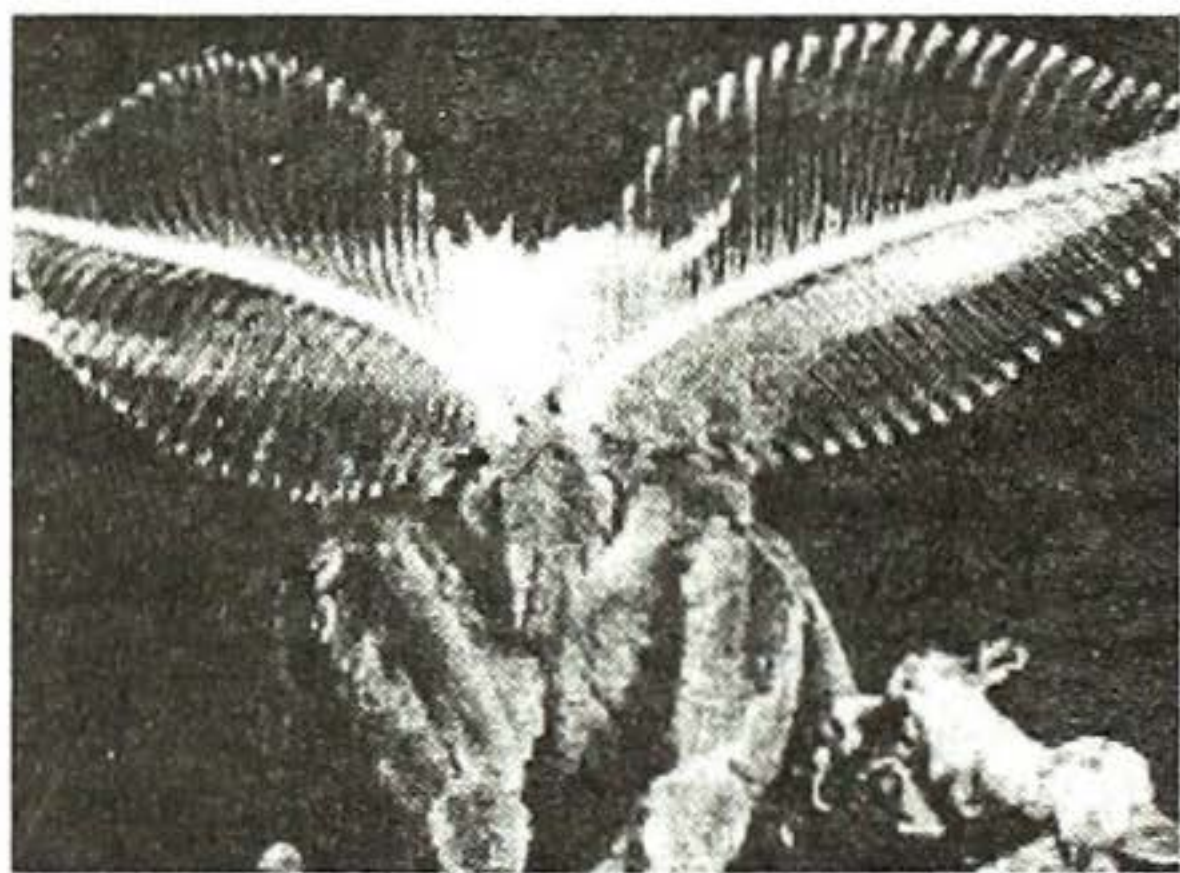


Рис. 14.10. Антена шовкопряда *Bombyx mori*

Контакт дендритів з навколишнім середовищем відбувається через пори оболонки; діаметр кожної пори дорівнює 15 нм, а кількість пор на сенсилі становить 3200. Згідно з сучасним уявленням, рецептори фактично рахують молекули, що збуджують клітину біля основи дендриту; коли кількість імпульсів від ан-

тени перевищує  $200 \text{ c}^{-1}$ , самець реагує і рухається до джерела бомбіколу. Механізм хімічної рецепції шовкопряда пов'язаний з поєднанням дифузійних процесів з високоефективною фільтрацією в антенах.

Вивчення процесу нюху комах є актуальною проблемою з точки зору боротьби зі шкідниками. Так, великий сосновий довгоносик (*Hylobius abietis*) завдає значних матеріальних збитків в лісовому господарстві Європи, живлячись корою саджанців хвойних дерев. Слід зазначити, що хвойні дерева утворюють складні суміші кількох летких речовин; в свою чергу, довгоносик має близько 30 типів нюхових клітин. Отже, проблема полягає в з'ясуванні того, які саме запахи приваблюють комаху з тим, щоб знайти засоби боротьби з нею. Ще одного шкідника — жука-короїда (*Ipididae*) — майже повністю знищили завдяки пасткам, що містили феромони цього жука та інсектициди.

Проблема боротьби з малярійним комарем (*Anopheles*) також пов'язана з пошуками та ідентифікацією тих атрактантів, які висилаються людиною або твариною і привертають увагу комара.

*Нюх у риб* відіграє значну роль у пошуках корму, виявлення хижаків, статевих партнерів, досягнення місць для нересту та орієнтації. Використання нюху дуже добре доведено у лосося, який починає своє життя в прісних водах річок, де мешкає від кількох місяців до двох років залежно від виду; за цей проміжок часу він «вводить в свою пам'ять» запах рідної водойми. Далі лосось прямує вздовж течії до океану, де проводить від одного до чотирьох років, досягаючи статевої зрілості. Після цього проходить близько 1500 км океанського простору, щоб досягти річки, у верхів'ях якої він народився, для викидання кав'яру. Процес навігації лосося в океані ще не з'ясований достатньо; вважається, що він використовує цілий комплекс факторів — географічні риси місцевості, температуру, магнітні поля, небесні та хімічні орієнтири. Але міграція у річці відбувається завдяки нюху.

*Нюх у птахів* як наукова проблема обговорюється протягом останніх десятиріч. Тривалий час вважалося, що нюх є прерогативою винятково ссавців. Недавні дослідження довели, що птахи використовують нюх у пошуках та розпізнаванні харчів, для вибору зручних для насиджування місць та під час навігації. У більш ніж 150 видів птахів було виміряно розміри нюхової цибулини (відділу головного мозку, що відповідає за нюх); доведено, що не маса цієї цибулини, а відношення її маси до загальної маси мозку (яке коли-

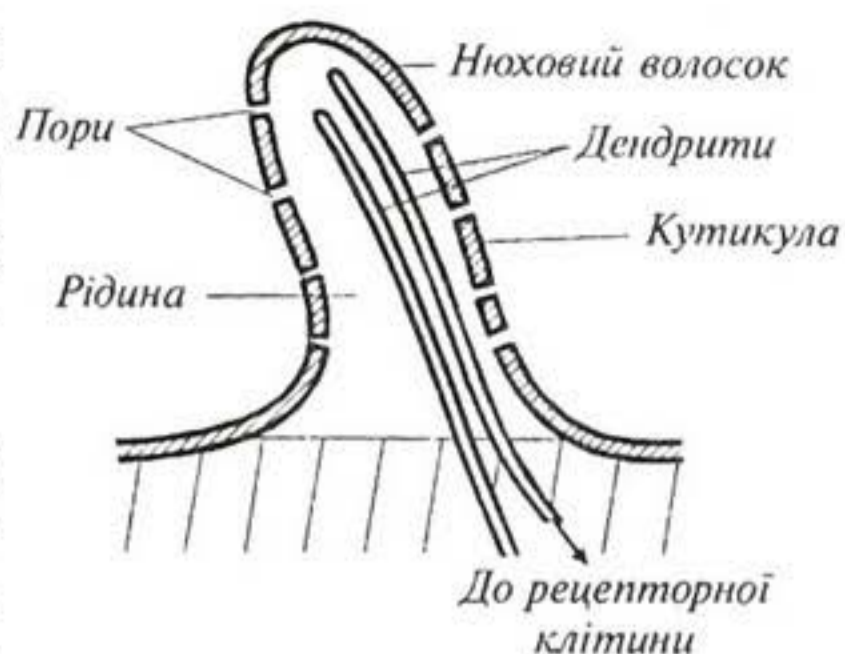
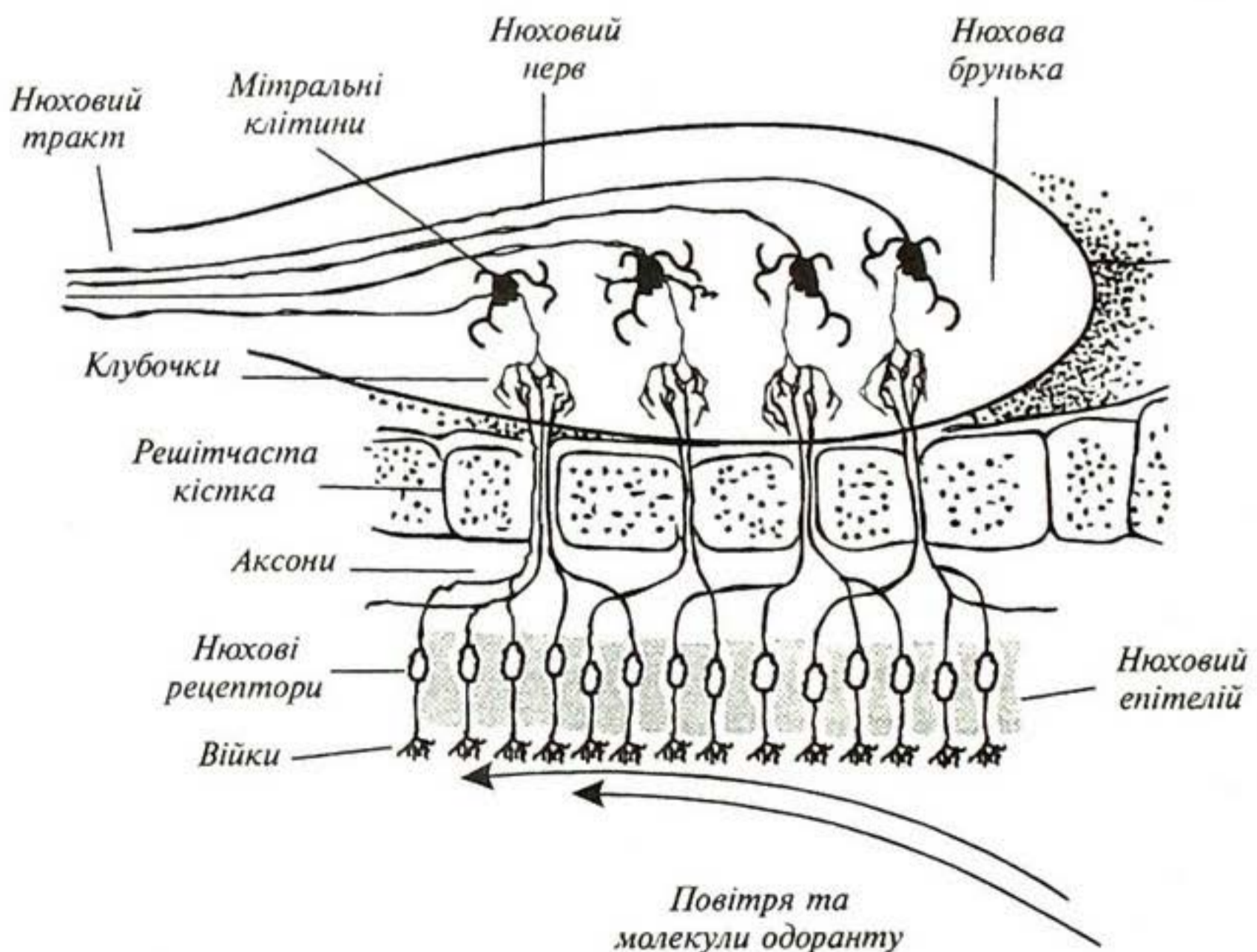


Рис. 14.11. Рецептор бомбікола самця шовкопряда

вається від 3 до 37%) впливає на нюхові здатності птаха. Серед птахів з розвиненим відчуттям запахів можна відзначити голубів, деяких морських птахів, шпаків, курей.

Цікавим можна вважати метод застосування нюху у птахів. Промислові кампанії з транспортування газу з метою виявлення дефектів у стінках труб накачували в останні такий одорант як кадаверин (трупна отрута); в тому місці, де труба мала отвір, збиралася велика кількість грифів.

*Нюховий аналізатор* вищих тварин і людини — морфофізіологічна система, що забезпечує сприйняття різних пахучих речовин, аналіз та обробку виниклих при цьому аферентних (від периферії до центральної нервової системи) збуджень. Складається нюховий аналізатор з нюхових рецепторних клітин (нейронів), розміщених у слизовому шарі товщиною близько 60 мкм (рис. 14.12). Рецепторний шар складається з нюхових і опорних клітин. З одного боку рецепторний нейрон закінчується війками, що мають контакт з зовнішнім повітрям через слизовий шар; з другого — відростками (аксонами). Дзгугти з 10÷100 аксонів проходять через отвори в решітчастій кістці і утворюють клубочки, що в свою чергу з'єднуються з мітральними (двостулковими) клітинами, і через них — з мозком. Така структура нюхового рецептора підвищує його чутливість. Під час вдихання через нюхову щілину носа протікає близько 5÷10% загальної кількості повітря. Пахучі речовини у пароподібному стані входять у контакт з нюховими рецепторами, завдяки чому останні



**Рис. 14.12. Нюховий аналізатор**

збуджуються. Для того, щоб тварина отримала відчуття запаху, достатньо збудження лише 40 рецепторних клітин, причому на кожну з них повинна діяти одна молекула пахучої речовини. Унікальною властивістю нюхових рецепторів є їх постійна замінюваність (протягом близько 60 днів). Чутливість нюху людини можна оцінити як близько  $10^{-11}$  (йдеться про пару ефіру меркаптану), тоді як чутливість нюху собаки на три порядки вища.

*Механізми нюху* пов'язані з потраплянням молекул летких органічних сполук у нюховий аналізатор та зв'язуванням їх з рецепторними білками, здатними деполяризуватися (тобто утворювати потенціал дії); електричні сигнали передаються від рецепторних клітин через аксони (довгі відростки клітин нервової системи) до гіпоталамуса — відділу мозку, що являє собою скупчення нервових клітин; саме в ньому утворюється відчуття запаху, його класифікація та ідентифікація.

Деякі тварини (наприклад, коти) мають специфічний орган *Джакобсона*, призначений для детектування феромонів та низьких концентрацій хімічних сполук природного походження. Використовують тварини цей орган для спілкування між представниками свого виду. Коли кіт відкриває верхню губу для того, щоб спрямувати феромони на цей орган, здається, що він посміхається (реакція Феймана).

### 14.2.2. Методи аналізу запахів

*Ольфактометрія* — це метод вимірювання гостроти нюху. Ця техніка може застосовуватися з метою визначення порогу нюху, рівня нюхової адаптації та відновлення нюхової функції (*кількісна ольфактометрія*), а також для визначення здатності людини сприймати і розрізняти запахи (*якісна ольфактометрія*). Для практичної реалізації ольфактометрії використовують *дегустаторів запахів* — людей, які відзначаються підвищеною чутливістю до запахів (число таких серед звичайного населення становить близько 10%). Ці дегустатори тренуються визначати певні запахи; в кожній оцінці запаху беруть участь від 6 до 12 експертів, після чого результати оцінки усереднюються. Під час процедури визначаються пороговий рівень, інтенсивність, стійкість, гедонічний тон та характерні ознаки запаху. Пороговий рівень запаху визначається шляхом поступового збільшення концентрації пахучої речовини, доки дегустатор не зреагує на неї. Інтенсивність запаху вимірюється шляхом порівняння запаху, що оцінюється, з опорним запахом (звичайно, *n*-бутанола), зразки якого місять різні концентрації газу. Деякі дегустатори мають чутливість до *n*-бутанолу на рівні  $(20 \div 80) \cdot 10^{-9}$ . Для оцінки інтенсивності запаху використовують 5-бальну систему: від

0 (відсутність запаху) до 5 (дуже сильний запах). Стійкість запаху відповідає кореляції інтенсивності запаху з концентрацією пахучої речовини. Гедонічний тон характеризує, як людина сприймає той чи інший запах з точки зору відчуття приємних вражень. Характерні ознаки визначаються шляхом порівняння запаху, що оцінюється, з добре відомими запахами.

*Автоматизовані системи типу «електронний ніс»* позбавлені суб'єктивних підходів до оцінки запахів. Ці системи складаються з набору хімічних сенсорів, в основі яких лежить полімерна плівка. Коли газ, що оцінюється, проходить крізь плівку, він зумовлює згинання плівки; ці механічні згинання перетворюються в електричні сигнали, пропорційні рівню деформації плівки і, отже, концентрації газу. Оскільки різні хімічні сполуки викликають різні рівні згинання плівки, відбувається реакція такого сенсора на кожен сполуку. Автоматизована система такого типу містить набір з 20÷50 сенсорів, що створюють специфічну картину відгуків усіх сенсорів, характерну для певного запаху.

До сучасних методів кількісної та якісної оцінки запахів слід також віднести комбінований метод газової хроматографії та мас-спектрометрії.

*Метод хроматографії* передбачає поділ, виявлення і визначення речовин завдяки неоднаковості їх поведінки в системі із двох фаз, що не змішуються — рухомій і нерухомій. Рухомою фазою при використанні методу газової хроматографії є газ (суміш газів), нерухомою — тверда речовина або рідина. Під час руху рухомої фази вздовж нерухомої кожна компонента суміші осідає на нерухомій фазі (сорбенті) відповідно до матеріалу сорбенту і вповільнює свій рух. Через те, що різні компоненти мають різну спорідненість, відбувається просторовий поділ цих компонентів.

*Мас-спектрометричний метод* базується на створенні іонних пучків у вакуумі з їх подальшим поділом за масою в електричному та магнітному полях. Застосування комбінованої техніки газової хроматографії та мас-спектрометрії дає можливість оцінити 70÷100 летких компонентів, що містяться у повітрі тваринницьких приміщень.

### ***14.2.3. Запахи у тваринництві***

Неприємні запахи в тваринницьких приміщеннях створюють серйозну проблему для працівників та мешканців довкілля, які скаржаться на роздратування очей, носа, горла, головний біль, нудоту, пронос, кашель, хрипоту, порушення дихання, сонливість тощо. Активність мікроорганізмів в анаеробних умовах призводить до розкладання органічних компонентів гною, що зумовлює появу близько двохсот пахучих газів. Серед них — пара-крезол, фенол, індол,

скатол та сірководень. Всі ці гази з неприємним запахом поширюються у атмосфері; швидкість поширення залежить від концентрації певного газу, температури, швидкості вітру, сонячного освітлення. Для запобігання впливу неприємних запахів застосовують хімічні методи, електромагнітні засоби руйнування мікроорганізмів, аероіонізацію або озонування повітря, біологічні фільтри, накриття гною, підбір кормової дієти для тварин, гігієнічні заходи в приміщеннях.

#### 14.2.4 Смак та смаковий аналізатор тварин

*Смак* — це відчуття, що виникає при дії хімічних речовин на рецепторні апарати язика і порожнини рота. За пережовування їжі вивільнюються різноманітні за величиною, формою та складністю молекули, що діють на молекули мембрани смакових рецепторів. У комах хеморецептори, що відповідають за смак і нюх, розміщені на ротових органах, а також на лапках або антенах. У риб і амфібій хеморецептори на поверхні тіла. У вищих тварин і людини функції хеморецепції звужуються до сприйняття запаху та смаку розчинених речовин.

*Смаковий аналізатор* — морфофізіологічна система, яка забезпечує сприйняття й аналіз хімічних речовин, що перебувають у порожнині рота. Основою смакового аналізатора є *смакові сосочки* — структури язика, що містять смакові рецептори. Сосочки можуть мати грибоподібну (на кінці язика), листоподібну (на бокових поверхнях язика) та жолобчасту (на межі задньої та двох передніх третин язика) форми. Кожний сосочок в свою чергу містить *смакові бруньки*, що складаються з епітеліальних смакових клітин, зв'язаних з кінцевими розгалуженнями смакових нервових клітин (рис. 14.13). Кількість бруньок може досягати 10000. На поверхні сосочка язика міститься *смакова пора*, через яку смакова брунька сполучається з порожниною рота. Смакова брунька побудована зі смакових (кількість їх становить  $10 \div 20$  на одну бруньку) і опорних клітин; смакова клітина має смакові волоски, що виходять через пору в рідке середовище на поверхні язика.

Людина здатна відрізнити чотири основні типи смаку — *солодкий* (багато органічних сполук, зокрема цукри, сахарин), *солоний* (багато неорганічних сполук, зокрема хлорид натрію, йодид калію), *кислий* (кислоти, йони водню, зокрема оцет, лимонна кислота) та *гіркий* (багато алкалоїдів,

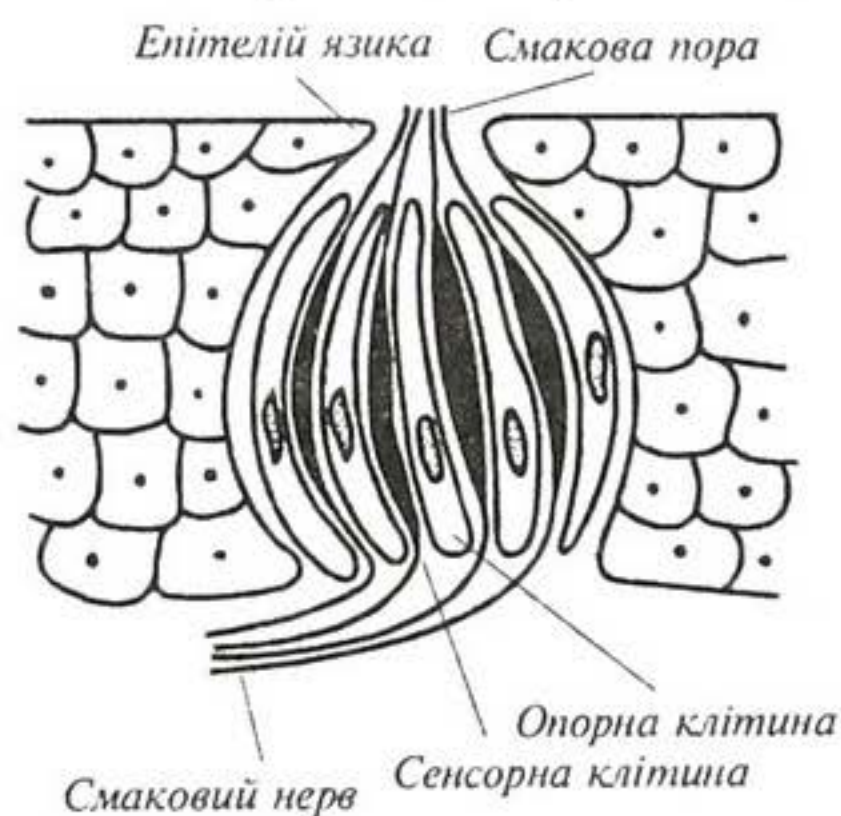


Рис. 14.13. Смакова брунька

зокрема кофеїн, нікотин, хінін, стрихнін). Сільськогосподарські тварини відрізняють ці чотири типи смаку, але можуть демонструвати надання переваги певному смаковому враженню: свині — солодкому, велика рогата худоба і коні — солоному. Смакова чутливість залежить від типу смаку — людина здатна реагувати на  $10^{15}$  молекул стрихніну на язиці або на  $10^{20}$  молекул цукру.

Можливим механізмом смакової рецепції можна вважати сполуки смакових речовин з молекулами особливих білків рецепторних клітин, що супроводжується виникненням рецепторних потенціалів. Рецепторна клітина вивільняє хімічний медіатор (високоактивну хімічну речовину), що збуджує закінчення смакового нерва.

### 14.2.5. Методи дослідження смакового аналізатора

Є кілька методів дослідження смакового аналізатора.

1. Вивчення впливу розчинів відомої концентрації (цукор, сіль, кислота) при певній температурі на ротову порожнину та визначення мінімальної концентрації розчину, що створює відчуття смаку.

2. Локальна вибіркова дія на окремі сосочки маленьких пензликів або олівців, виготовлених із смакових речовин.

3. Електрофізіологічні методи передбачають збудження сосочків за допомогою мініатюрних електродів та спостереження зміни електросмаку залежно від частоти подразнень та кількості стимулів.

#### Контрольне завдання №14.1

В таблиці наведено результати вимірювання методом газової хроматографії запахів газів у повітрі свинарника при застосуванні трьох кормових дієт.

Летка компонента	Дієта № 1		Дієта № 2		Дієта № 3	
	4 день	7 день	4 день	7 день	4 день	7 день
Концентрація в $10^{-9}$						
Оцтова кислота	176818	166366	113415	143290	174579	147701
Пропіонова кислота	52278	67679	49667	55765	63669	59840
Ізомасляна кислота	23115	55220	25779	38105	24585	25811
Масляна кислота	27850	31758	27259	27901	32060	29289
Ізовалеріанова кислота	17706	26444	20221	26123	21151	22371
Валеріанова кислота	8289	12895	9859	10859	9296	11188
Фенол	2601	6171	2196	5483	2817	5222

Летка компонента	Дієта № 1		Дієта № 2		Дієта № 3	
	4 день	7 день	4 день	7 день	4 день	7 день
4-метил-фенол	24075	24956	20925	30033	26729	28038
3-метил-фенол	3659	5528	2711	3446	3447	4146
4-етилфенол	1368	3517	1266	1643	1925	1665
3-етилфенол	491	639	344	338	759	566
2,6-біс (1,1-диметил) фенол		247			64	127
Індол	411	477	596	1186	416	668
3-метил індол	250	120	6925	8689	1475	2460

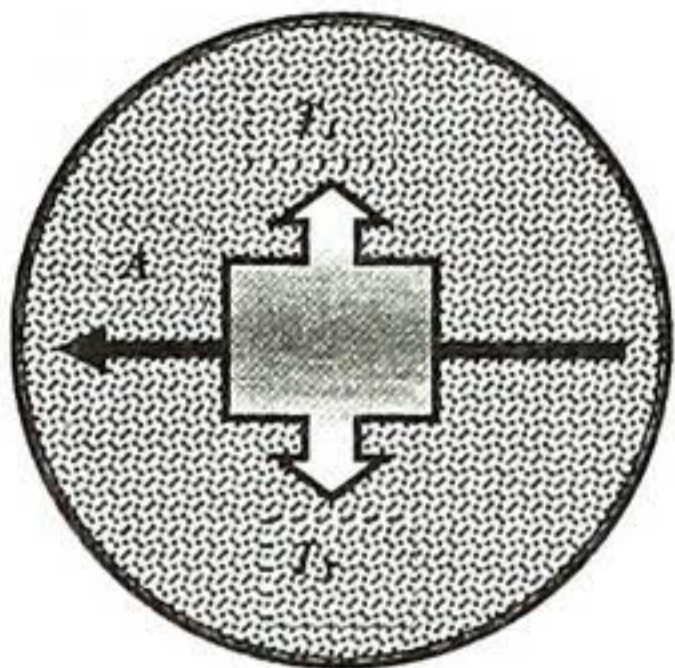
Визначити:

1. Чи впливає впровадження кормової дієти на зменшення неприємних запахів, що утворюються пахучими газами?
2. Яка дієта, на Ваш погляд, є ефективнішою з точки зору зменшення неприємних запахів?
3. Чому концентрації деяких газів зростають протягом часу вимірювань?

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як використовують тварини хімічні сигнали?
2. Як впливає вітер на поширення феромонів?
3. Дати визначення нюху.
4. Як здійснюється хімічна комунікація комах?
5. Назвати методи боротьби з комахами-шкідниками.
6. Як використовують риби нюх?
7. Чи є нюх у птахів?
8. З чого складається нюховий аналізатор вищих тварин і людини?
9. Розповісти про сучасні уявлення щодо механізмів нюху.
10. Назвати основні методи аналізу запахів. Порівняти ці методи.
11. Дати визначення смаку.
12. З чого складається смаковий аналізатор вищих тварин і людини?
13. Розповісти про сучасні уявлення щодо механізмів смаку.
14. Назвати основні методи дослідження смакового аналізатора.





## 15. ТЕРМОДИНАМІКА

*Термодинаміка* — розділ фізики, що вивчає найбільш загальні властивості макроскопічних фізичних систем, які перебувають у стані термодинамічної рівноваги, та процеси переходу між цими системами.

### 15.1. ТЕМПЕРАТУРА І ТЕПЛОВЕ РОЗШИРЕННЯ ТІЛ

#### 15.1.1. Температура

*Температура* — фізична величина, що характеризує стан термодинамічної рівноваги макроскопічної системи. Кількісне вимірювання температури можливе завдяки впровадженню температурних шкал. Одна з них, *міжнародна стоградусна температурна шкала (Цельсія)*, використовує як  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  температуру плавлення льоду і як  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  температуру кипіння води при нормальному ( $101325\text{ Па} = 760\text{ мм рт. ст.}$ ) тиску. Інша — *термодинамічна температурна шкала (Кельвіна)* — використовує потрійні точки речовин — точки на діаграмі стану, що відповідають рівноважному існуванню трьох фаз речовини. Так, потрійна точка води дорівнює  $273,16\text{ К}$ , а температура кипіння води становить  $373,15\text{ К}$ . Між двома шкалами існує зв'язок:

$$t^{\circ}\text{C} = T - 273,15. \quad (15.1)$$

#### 15.1.2. Теплове розширення тіл

Будь-які тіла складаються з атомів. Розглянемо кристалічне тіло, яке можна подати як механічну модель у формі куба, складеного з атомів. Відстань між атомами близько  $10^{-10}\text{ м}$ . Кожний атом при

звичайних температурах коливається відносно свого положення з амплітудою  $\sim 10^{-11}$  м і частотою  $\sim 10^{13}$  Гц. Звичайно з підвищенням температури амплітуда коливань атомів збільшується і середня відстань між ними також збільшується. Завдяки цьому тверде тіло набуває *теплого розширення* при зростанні температури, що супроводжується відповідним зростанням будь-яких розмірів (довжини, ширини, товщини). Слід зауважити, що це зростання залежить *лінійно* від температури.

Нехай тіло має довжину  $l$  при деякій температурі. При збільшенні температури на величину  $\Delta T$  довжина тіла збільшується на  $\Delta l$ . Зв'язок між усіма цими параметрами описується рівнянням:

$$\Delta l = \alpha l \Delta T, \quad (15.2)$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт лінійного розширення.

Одиниця вимірювання коефіцієнта лінійного розширення —  $K^{-1}$ .

Оскільки лінійні розміри тіла змінюються з температурою, відбувається відповідна зміна й об'єму тіла, що описується рівнянням:

$$\Delta V = \beta V \Delta T = 3\alpha V \Delta T, \quad (15.3)$$

де  $\beta$  — коефіцієнт об'ємного розширення.

Типові значення коефіцієнтів  $\alpha$  і  $\beta$  наведено в табл. 15.1.

### 15.1. Типові значення коефіцієнтів $\alpha$ і $\beta$

Матеріал	$\alpha, K^{-1}$	Матеріал	$\beta, K^{-1}$
Свинець	$29 \cdot 10^{-6}$	Повітря при $0^\circ C$	$36,7 \cdot 10^{-4}$
Сталь	$11 \cdot 10^{-6}$	Гліцерин	$4,85 \cdot 10^{-4}$
Скло звичайне	$9 \cdot 10^{-6}$	Бензин	$1,24 \cdot 10^{-4}$
Інвар (сплав Ni-Fe)	$0,9 \cdot 10^{-6}$	Етиловий спирт	$1,12 \cdot 10^{-4}$

Рідини теж збільшують свій об'єм при зростанні температури; для ізотропних твердих тіл (для яких коефіцієнт лінійного розширення однаковий у всіх напрямках) коефіцієнт об'ємного розширення майже втриє більший за коефіцієнт лінійного розширення ( $\beta \sim 3\alpha$ ). Особливе місце серед рідин займає вода, густина якої залежить від температури, причому ця залежність характеризується максимумом при температурі близько  $4^\circ C$  (рис. 15.1).

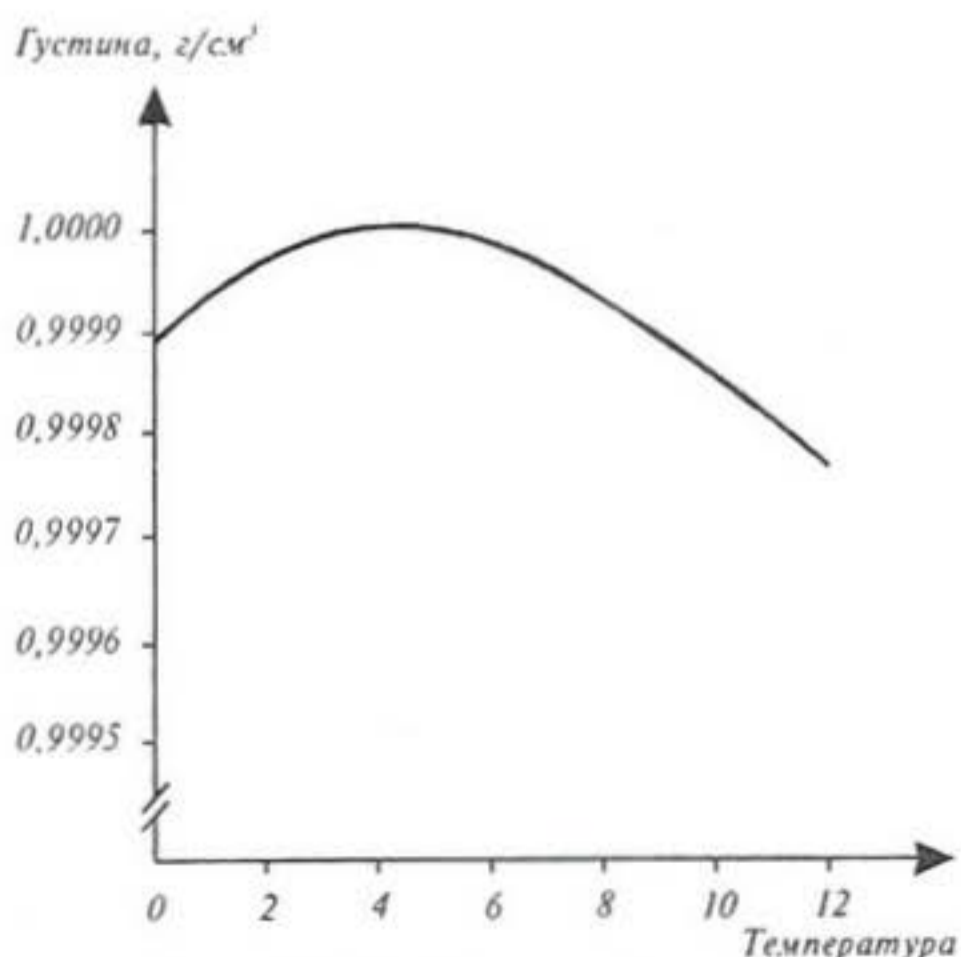


Рис. 15.1. Залежність густини води від температури

## 15.2. ТЕРМОДИНАМІКА РІВНОВАЖНИХ СТАНІВ

### 15.2.1. Параметри термодинамічної системи

*Термодинамічна система* — сукупність макроскопічних тіл, що можуть взаємодіяти між собою та з іншими тілами (зовнішнім середовищем) шляхом обміну з ними енергією та речовиною.

Є три типи термодинамічних систем: 1. *Ізольована система*, яка не обмінюється з зовнішнім середовищем ні енергією, ні речовиною; 2. *Замкнута система*, яка обмінюється з зовнішнім середовищем енергією, але в ній відсутній обмін речовиною; 3. *Відкрита система*, в якій відбувається обмін із зовнішнім середовищем енергією, речовиною і взагалі інформацією.

Будь-яка термодинамічна система характеризується *термодинамічними параметрами* — такими як тиск  $p$ , об'єм  $V$ , температура  $T$ , маса  $m$ , молярна концентрація  $n$ . Сукупність цих параметрів визначає *термодинамічний стан* системи. Зміна хоча б одного з параметрів призводить до зміни термодинамічного стану системи. Якщо параметри термодинамічної системи мають цілком певні значення і не змінюються з часом при незмінних зовнішніх умовах, то така система перебуває у *рівноважному стані*. Перехід системи з одного стану в інший, що супроводжується зміною термодинамічних параметрів, називається *термодинамічним процесом*.

### 15.2.2. Внутрішня енергія системи

*Внутрішня енергія*  $U$  включає енергію хаотичного (теплого) руху всіх мікрочастинок системи (молекул, атомів, іонів) та енергію взаємодії цих частинок. Внутрішня енергія характеризує стан термодинамічної системи, тобто є *функцією стану системи*.

### 15.2.3. Теплоємність та питома теплоємність

Коли тіло має температуру, відмінну від температури навколишнього середовища, воно або віддає, або набуває теплової енергії, достатньої для досягнення теплової рівноваги або стаціонарного стану.

*Теплоємність тіла*  $C$  — величина, чисельно рівна кількості теплоти, яку необхідно надавати даному тілу для нагрівання на 1К:

$$C = Q/\Delta T, \quad (15.4)$$

де  $Q$  — кількість теплоти, передана тілу для нагрівання на  $\Delta T$  градусів.

Одиниця вимірювання теплоємності — Дж · К<sup>-1</sup>.

Питома теплоємність речовини  $c$  — величина, чисельно рівна кількості теплоти, яку необхідно надати даній речовині масою 1 кг для нагрівання на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}, \quad (15.5)$$

Одиниця вимірювання питомої теплоємності — Дж · кг<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>.

Зв'язок питомої теплоємності тіла  $C$  з питомою теплоємністю речовини  $c$  виражається формулою:

$$C = c \cdot m. \quad (15.6)$$

Кількість теплоти, необхідна для зміни температури тіла масою  $m$  на величину  $\Delta T$ , визначається так:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (15.7)$$

де  $c$  — питома теплоємність.

Значення питомої теплоємності води та деяких біологічних тканин наведено в табл. 15.2.

### 15.2. Питома теплоємність води та біологічних тканин

Речовина або тканина	Питома теплоємність, Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>
Вода	4186
Кров	3894
Молоко	3891
Мед	2229
Тканина риби	3500
Суша тканина	1674
Кісткова тканина	1256+1675

### 15.2.4. Робота і енергія

Обмін енергією між закритою термодинамічною системою і зовнішніми тілами може здійснюватися двома різними способами: шляхом виконання роботи та завдяки теплообміну.

Енергія, що передається при цьому термодинамічній системі зовнішніми тілами, називається *роботою*, яка виконується над системою. Енергія, яка передається системі зовнішніми тілами шляхом теплообміну, називається *теплотою*, що отримується системою від зовнішнього середовища; цей термін може бути використаний для опису переносу енергії з одного місця в інше.

Одиниці вимірювання теплоти — Дж.

Розглянемо циліндр, заповнений газом і обладнаний поршнем. В стані рівноваги газ утворює тиск  $p$  на поршень; під час руху на відстань  $dx$  виконується робота:

$$dA = Fdx = pSdx = pdV, \quad (15.8)$$

де  $S$  — площа поршня,  $F$  — сила, з якою газ діє на поршень.

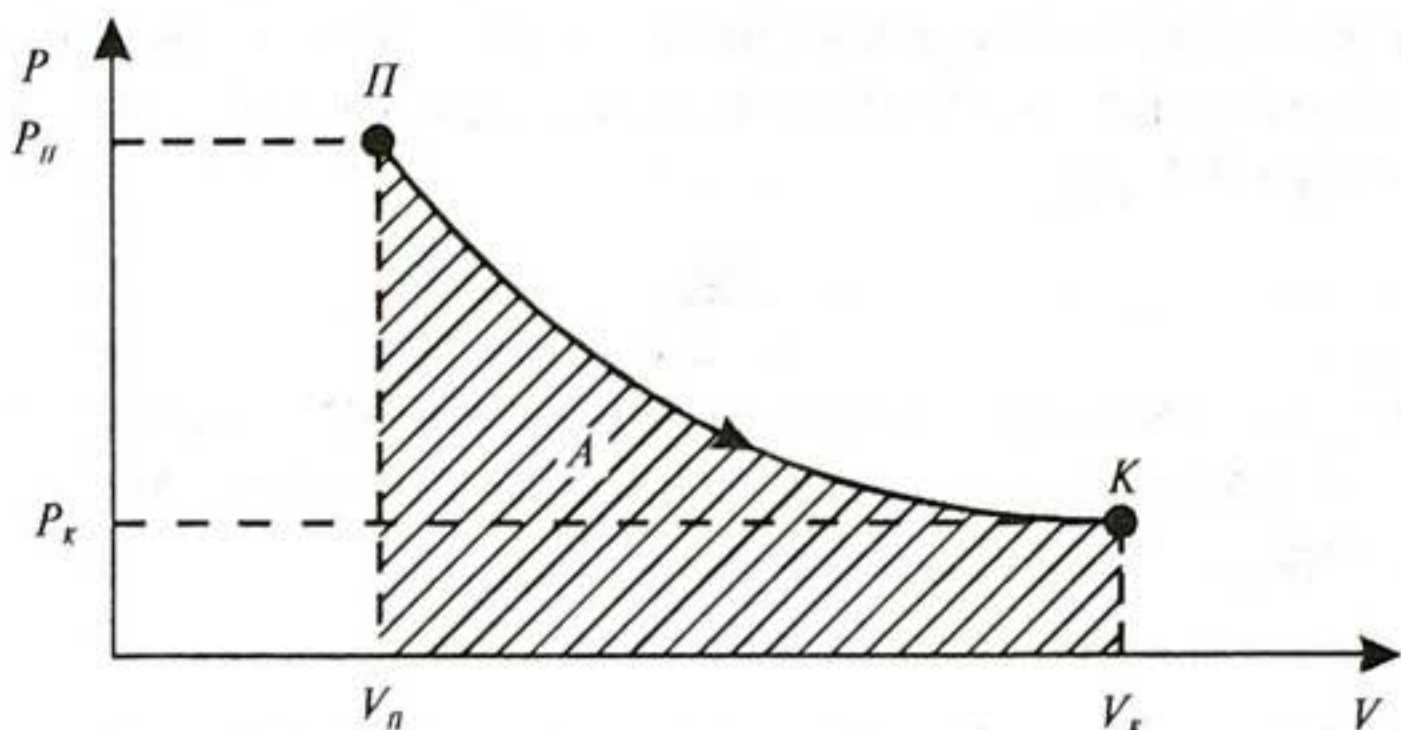
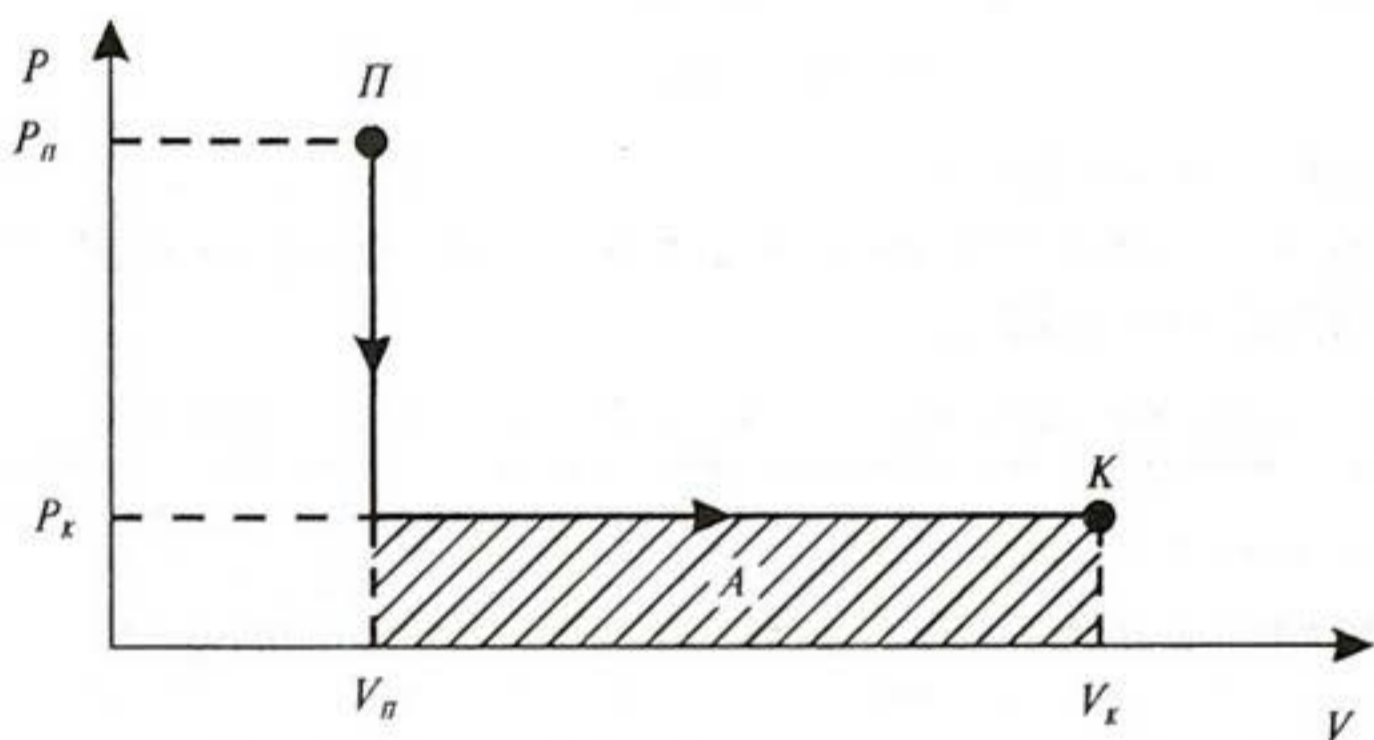
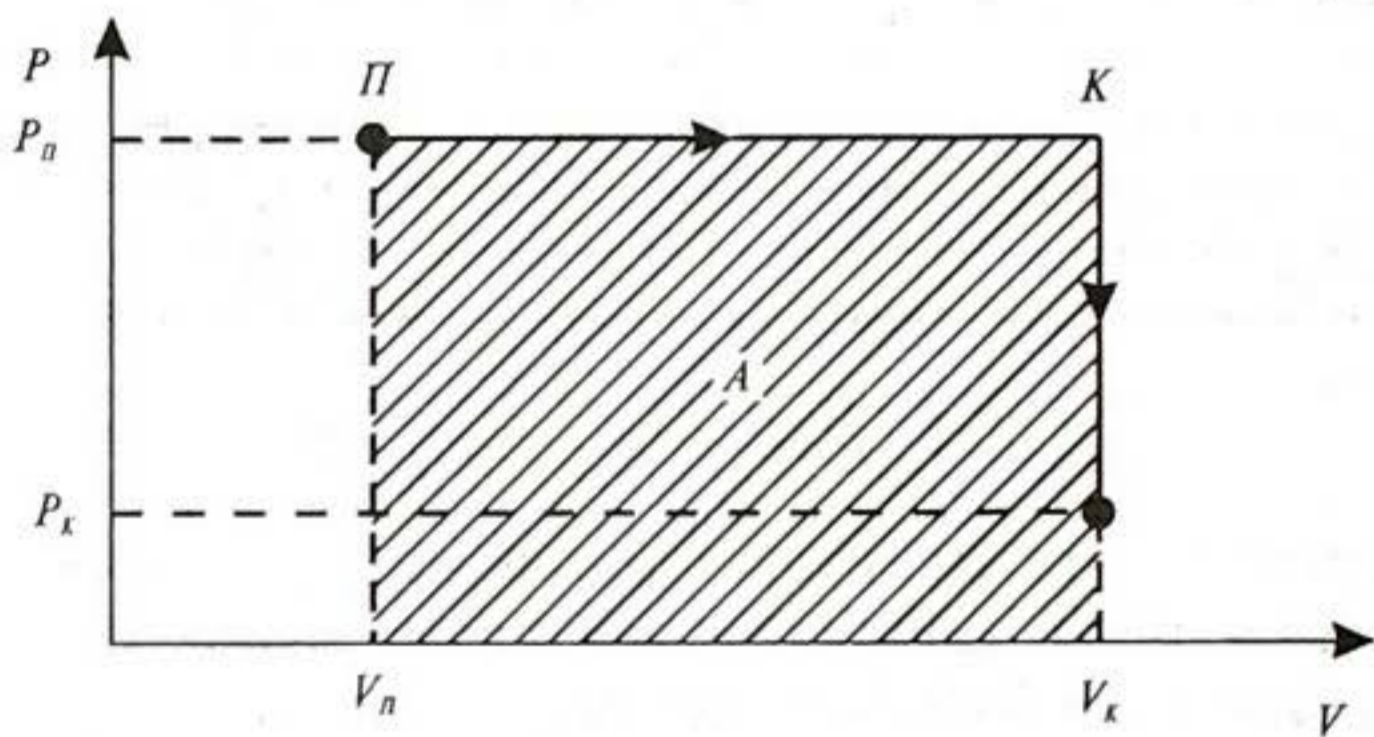


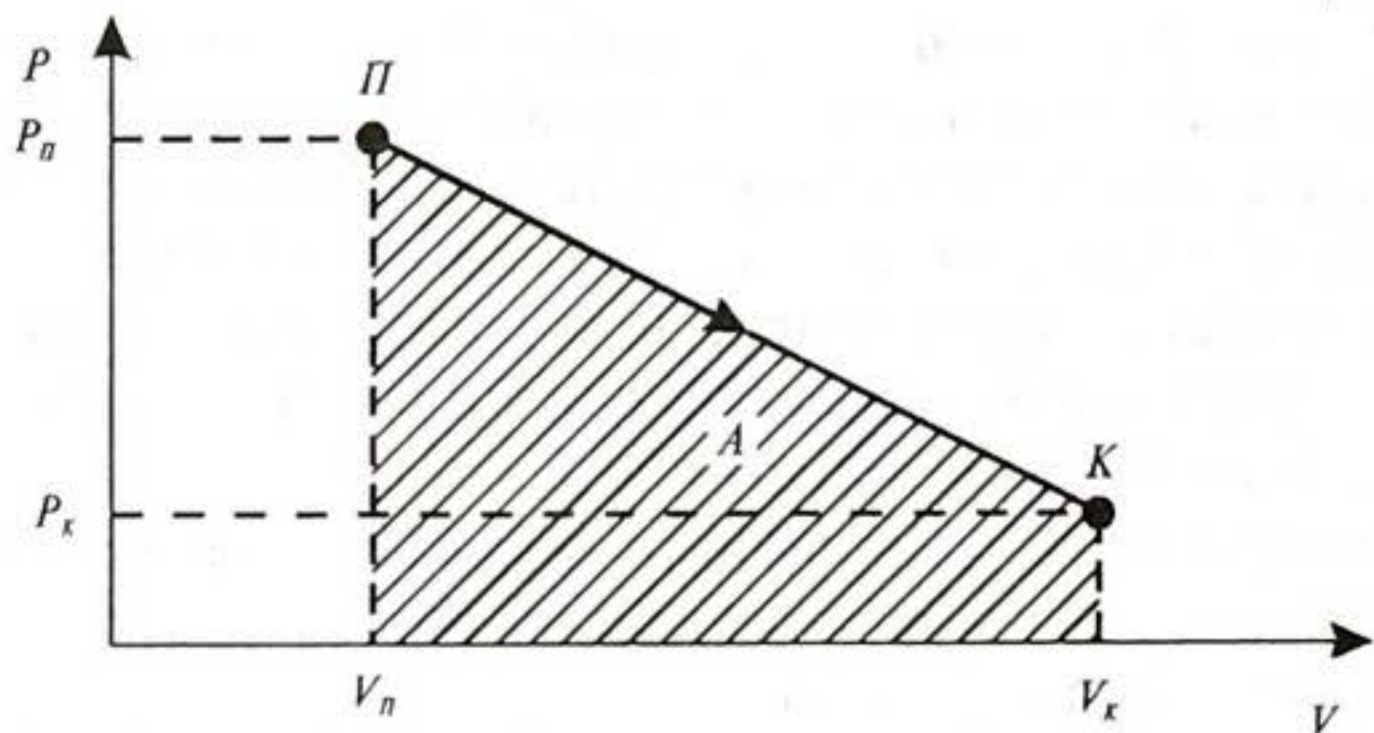
Рис.15.2. Робота, яку виконує газ при розширенні



a



б



в

Рис. 15.3. Залежність роботи, виконуваної газом при розширенні, від процесу, в якому бере участь система

Загальна робота, що виконується поршнем під час зміни об'єму від  $V_1$  до  $V_2$ , дорівнює:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV. \quad (15.9)$$

Робота, яку виконує газ при розширенні від початкового до кінцевого стану, дорівнює площі під кривою в системі координат  $p, V$  (рис. 15.2). Причому, робота, що виконується системою, залежить від процесу, в якому бере участь система від початкового до кінцевого стану (рис. 15.3). Те ж саме можна сказати і про теплоту.

### 15.2.5. Перший закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки являє собою узагальнення закону збереження енергії і враховує можливі зміни внутрішньої енергії.

Розглянемо термодинамічну систему, що перебуває в процесі переходу від початкового стану до кінцевого, під час якого теплота  $Q$  поглинається (або виділяється) і робота  $A$  виконується системою (або над системою). Прикладом такої термодинамічної системи може бути газ, що переходить з початкового стану  $p_n, V_n$  до кінцевого стану  $p_k, V_k$ . Якщо вимірювати різницю  $Q - A$  на різних етапах даного термодинамічного процесу, можна помітити, що вона не змінюється протягом всього термодинамічного процесу. Отже, величина  $Q - A$  визначається повністю початковим і кінцевим станами; називається ця величина *змінною внутрішньої енергії системи*  $\Delta U$ :

$$\Delta U = U_k - U_n = Q - A. \quad (15.10)$$

Тут  $A > 0$ , коли робота виконується над системою, і  $A < 0$ , коли робота виконується системою проти зовнішніх сил.

Перехід системи з одного стану в інший супроводжується зміною  $\Delta U$  внутрішньої енергії. Зміну  $\Delta U$  внутрішньої енергії можна оцінювати шляхом вимірювання теплоти  $Q$ , що поглинається або виділяється системою, та виконаною роботою  $A$ . На основі останнього рівняння можна сформулювати перший закон термодинаміки: *теплота, що надається системі, витрачається на зміну внутрішньої енергії системи та на виконання системою роботи проти зовнішніх сил*

$$\Delta U = Q \pm A. \quad (15.11)$$

Коли система набуває нескінченно малих змін стану, перший закон термодинаміки записується так:

$$dU = dQ \pm dA. \quad (15.12)$$

(В літературі можна зустріти таку форму запису першого закону термодинаміки як  $dU = \delta Q \pm \delta A$ , де символи  $\delta$  означають, що теплота  $Q$  і робота  $A$  не є функціями стану і, отже, не можуть бути повними диференціалами).

Розглянемо кілька спеціальних випадків.

1. *Ізольована система* не взаємодіє з навколишнім середовищем; тепловий потік відсутній ( $Q = 0$ ), робота дорівнює нулю ( $A = 0$ ); отже,  $\Delta U = 0$ , тобто внутрішня енергія ізольованої системи залишається сталою ( $U = \text{const}$ ).

2. *Циклічний процес*, що починається з одного стану і закінчується тим самим станом, характеризується зміною внутрішньої енергії  $\Delta U = 0$ , отже,  $Q = A$ .

### 15.2.6. Застосування першого закону термодинаміки до певних термодинамічних процесів

1. *Адіабатичний процес* — термодинамічний процес, при якому система не обмінюється теплотою з навколишнім середовищем. Для такої ситуації  $dQ = 0$ , отже  $dU = -dA$ .

2. *Ізобарний процес* проходить при сталому тиску ( $p = \text{const}$ ). Під час цього процесу відбувається передача теплоти і виконання роботи, що визначається добутком тиску на зміну об'єму, а саме:  $A = p(V_2 - V_1)$ .

3. *Ізохорний процес* відбувається при сталому об'ємі ( $V = \text{const}$ ). Робота при такому процесі дорівнює нулю, отже, з першого закону термодинаміки виходить, що  $\Delta U = Q$ .

4. *Ізотермічний процес* проходить при сталій температурі ( $T = \text{const}$ ). Внутрішня енергія ідеального газу залежить тільки від температури; отже, для ізотермічного процесу ідеального газу маємо  $\Delta U = 0$ .

### 15.2.7. Ентальпія. Закон Гесса

При дослідженні процесів, що відбуваються при сталому тиску ( $p = \text{const}$ ), доцільно замість внутрішньої енергії  $U$  використовувати іншу функцію стану, яка буде добре описувати термодинамічну систему. Пригадаємо вираз для роботи при зміні об'єму при ізобаричному процесі:

$$A = p\Delta V. \quad (15.13)$$

З врахуванням цього виразу можна записати рівняння для першого закону термодинаміки так:

$$Q = \Delta U + A = \Delta U + p\Delta V = \Delta(U + pV) = \Delta H. \quad (15.14)$$

Тут функція  $H = U + pV$  називається *ентальпією*. Як і внутрішня енергія, ентальпія є також функцією стану термодинамічної системи.

Розглянемо, наприклад, хімічну реакцію як термодинамічний процес. Якщо під час реакції тепло поглинається з навколишнього середовища, то  $\Delta H > 0$ , і навпаки.

Закон Гесса: тепловий ефект  $Q$  хімічної реакції не залежить від шляху реакції від вихідних речовин до продуктів реакції, а визначається лише різницею ентальпій кінцевих і початкових речовин

$$Q = \sum H_k - \sum H_p. \quad (15.15)$$

Тут  $\sum H_k$  і  $\sum H_p$  — сума ентальпій продуктів реакції та вихідних речовин відповідно.

### 15.2.8. Тепловий обмін

Обмін енергією між закритою термодинамічною системою і зовнішніми тілами шляхом теплообміну здійснюється завдяки теплопровідності, конвекції та тепловому випромінюванню.

Теплопровідність — перенесення тепла від більш нагрітих тіл до менш нагрітих, що приводить до вирівнювання температури.

Закон Фур'є: кількість перенесеного шляхом теплопровідності тепла прямо пропорційна градієнту температури

$$\Delta Q = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot \Delta t, \quad (15.16)$$

де  $\Delta Q$  — кількість теплоти, що переноситься,  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ),  $S$  — площа,  $\frac{\Delta T}{\Delta x}$  — градієнт температури,  $\Delta t$  — проміжок часу.

Типові значення коефіцієнта теплопровідності деяких речовин наведено в табл. 15.3.

15.3. Значення коефіцієнта теплопровідності деяких речовин

Речовина	Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	Температура, $^{\circ}\text{C}$
Метали		
Алюміній	238	25
Золото	314	25
Залізо	80	25
Свинець	35	25
Срібло	427	25
Гази		
Повітря (сухе)	0,0237	-10
«	0,0243	0
«	0,0250	10
«	0,0257	20
«	0,0264	30
«	0,0270	40
«	0,0277	50



Речовина	Коефіцієнт теплопровідності, Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	Температура, °С
Гелій	0,138	20
Водень	0,172	20
Азот	0,0234	20
Кисень	0,0238	20
Неметали		
Вода	0,565	0
«	0,599	20
«	0,627	40
Бетон	2,43	20
Дерево	0,126	20
Пластик	0,04	20

Температуропровідність  $\chi$  — параметр, що характеризує швидкість зміни температури в нестационарних теплових процесах; є мірою теплоінерційних властивостей речовини. Чисельно дорівнює відношенню коефіцієнта теплопровідності речовини до добутку його питомої теплоємності при сталому тиску на густину:

$$\chi = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (15.17)$$

Одиниця вимірювання температуропровідності — м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Конвекція — процес теплообміну, що супроводжується перемішуванням нагрітих і холодних шарів рідини або газів.

Теплове випромінювання — електромагнітне випромінювання, що утворюється речовиною і виникає за рахунок її внутрішньої енергії. Слід виділити такі закони теплового випромінювання абсолютно чорного тіла:

Закон випромінювання Планка подає спектральну залежність (залежність від частоти  $\nu$  або довжини хвилі  $\lambda = c/\nu$ ) об'ємної густини випромінювання  $\epsilon$  (енергії випромінювання в одиниці об'єму) і пропорційну їй випромінювальну здатність абсолютно чорного тіла  $R = \frac{c}{4} \cdot \epsilon$  (енергії випромінювання, що висилається одиницею її поверхні за одиницю часу); функції  $\epsilon_{\nu,T}$  і  $R_{\nu,T}$  (або  $\epsilon_{\lambda,T}$  і  $R_{\lambda,T}$ ), віднесені до інтервалу частот (або довжин хвиль), мають вигляд:

$$\epsilon_{\nu,T} = \frac{4}{c} \cdot R_{\nu,T} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}; \quad (15.18)$$

$$\epsilon_{\lambda,T} = \frac{4}{c} \cdot R_{\lambda,T} = \frac{8\pi h c}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \quad (15.19)$$

де  $h$  — стала Планка;  $\nu$  — частота;  $\lambda$  — довжина хвилі;  $c$  — швидкість світла;  $T$  — абсолютна температура;  $k$  — стала Больцмана;  $e$  — основа натурального логарифма.

Із рис. 15.4 видно, що повна енергія, яка випромінюється, представлена площею під кривою і збільшується швидко зі зростанням температури. Частота  $\nu_{max}$ , на якій знаходиться максимум випромінюваної здатності, також збільшується зі збільшенням температури.

Закон зміщення Віна: довжина хвилі  $\lambda_{max}$ , на яку падає максимум енергії в спектрі рівноважного випромінювання, обернено пропорційна абсолютній температурі  $T$  тіла, що випромінює

$$\lambda_{max} = 2,897756 \cdot 10^{-3} \cdot T^{-1}(\text{м}); \quad (15.19)$$

частота  $\nu_{max}$  при цьому визначається як  $\nu_{max} = 1,03 \cdot 10^{11} \cdot T$  (Гц).

Закон Стефана-Больцмана: повна випромінювальна здатність  $R$  абсолютно чорного тіла прямопропорційна четвертому степеню температури

$$R = \sigma T^4, \quad (15.20)$$

де  $R$  вимірюється в  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ .

### 15.2.9. Тепловий двигун

Тепловий двигун — це пристрій, що перетворює теплову енергію в інші форми енергії (наприклад, в механічну). Тепловий двигун складається з таких основних компонентів:

1. *робочого тіла* (пари, газу), яке, нагріваючись при згорянні палива і розширюючись, здатне виконати роботу;
2. *нагрівача* — тіла або середовища з температурою, вищою, ніж її має робоче тіло;
3. *холодильника* — тіла або середовища з температурою, нижчою, ніж у робочого тіла.

Необхідною умовою роботи теплового двигуна є використання *колового процесу (циклу)*, тобто замкненого термодинамічного процесу, в результаті якого система повертається до початкового стану. Схему теплового двигуна наведено на рис. 15.5.

Ефективність роботи теплового двигуна характеризується його *коефіцієнтом корисної дії (ККД)*, що дорівнює відношенню кількості

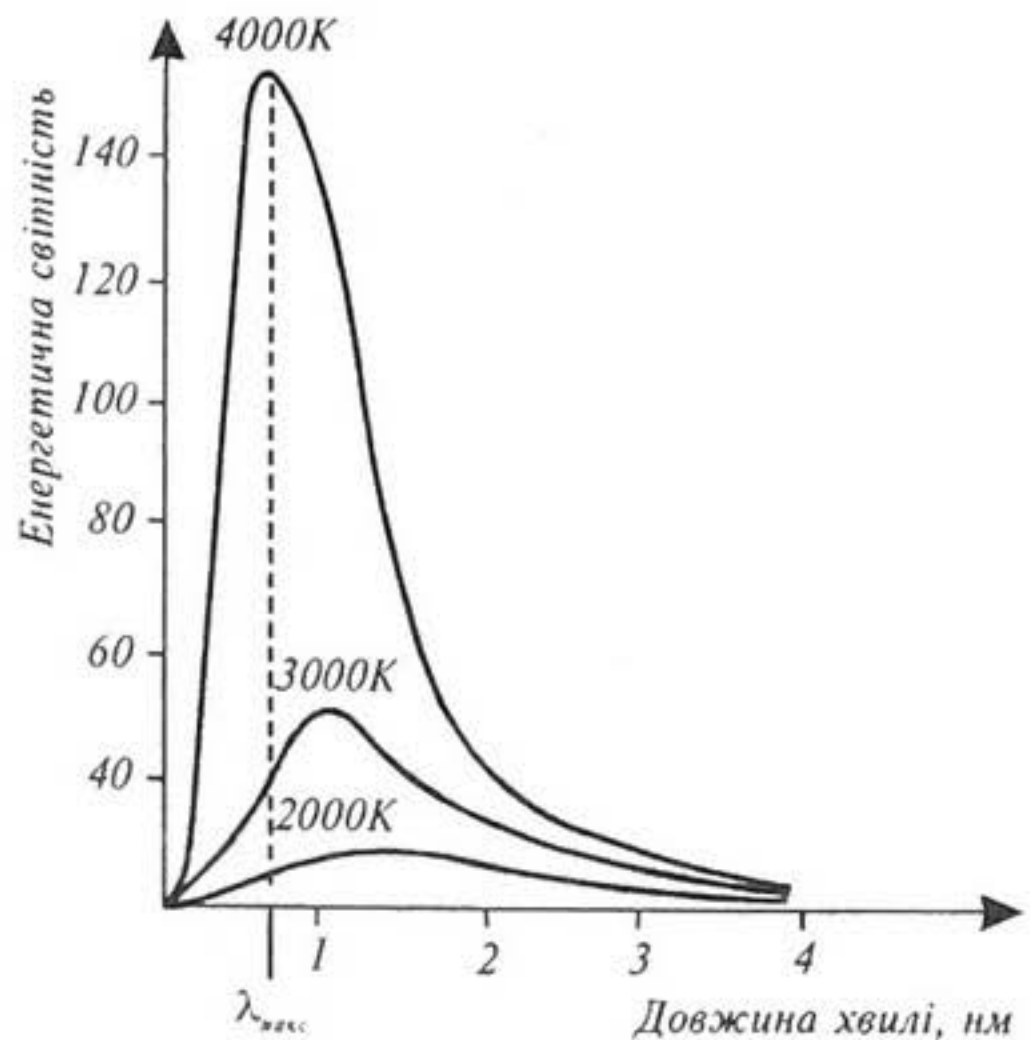


Рис. 15.4. Залежність повної енергії випромінювання абсолютно чорного тіла від температури

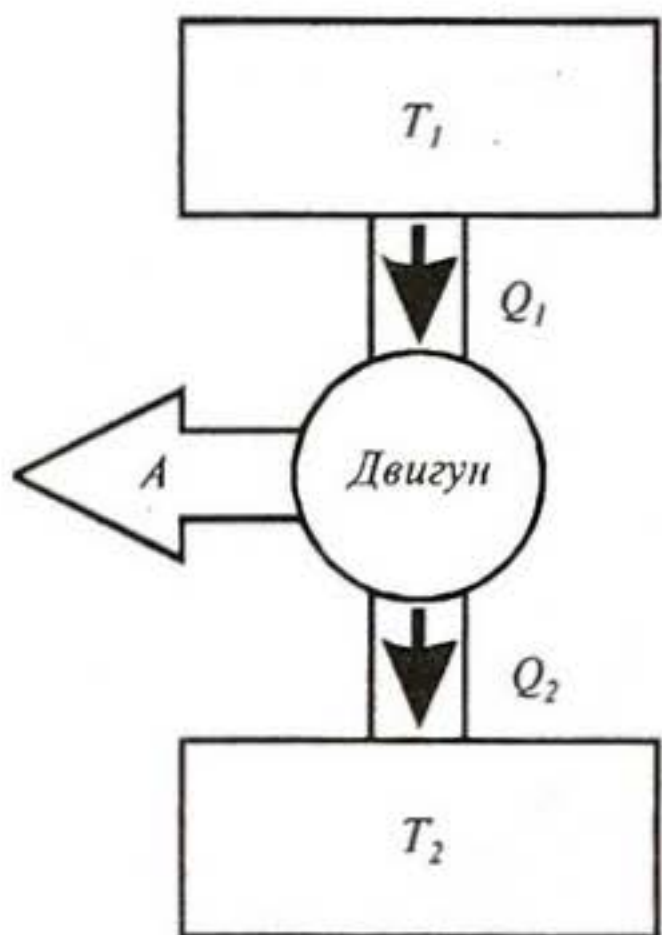


Рис. 15.5. Схема теплового двигуна

теплоти, перетвореної двигуном у механічну роботу  $A$ , до кількості теплоти  $Q_1$ , отриманої від нагрівача:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (15.21)$$

де  $Q_2$  — кількість теплоти, яку робоче тіло віддає холодильнику ( $Q_2 > 0$ ).

На практиці всі теплові двигуни перетворюють лише незначну частину поглинутої теплоти в механічну роботу. Так, ККД двигуна внутрішнього згоряння становить близько 25%, дизельного двигуна — від 35 до 40%.

### 15.2.10. Цикл Карно

*Оборотним* називають процес переходу термодинамічної системи з одного стану в інший, що допускає можливість повернення системи у початковий стан через ту ж саму послідовність проміжних станів, що й у прямому процесі, але які відбуваються у зворотному порядку (рис. 15.6).

*Необоротним* називають процес, який може мимовільно відбуватися лише в одному певному напрямку. До необоротних процесів можна віднести дифузю, теплопровідність, в'язку течію тощо, тобто процеси, при яких відбувається спрямоване просторове перенесення речовини, теплоти, імпульсу. Всі необоротні процеси є *нерівноважними*. Якщо в термодинамічній системі існують градієнти концентрацій, температури або швидкостей, то нерівноважні процеси будуть сприяти встановленню рівноваги.

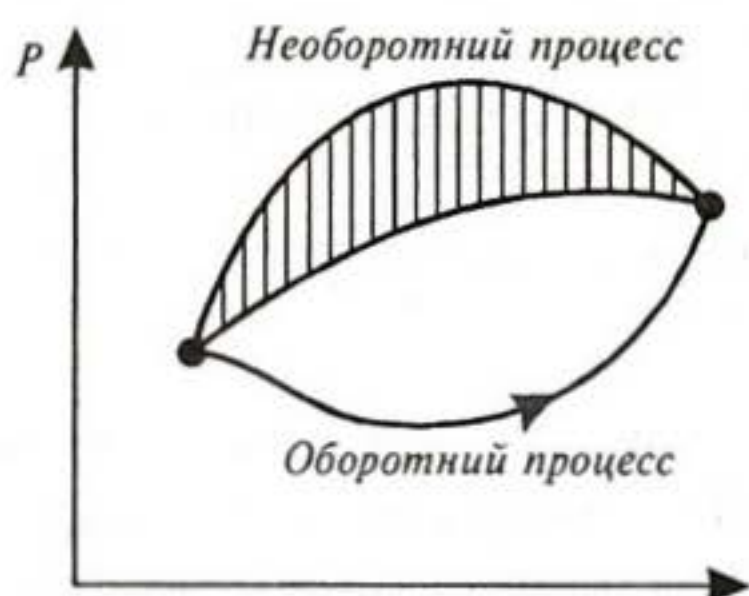


Рис. 15.6. Графіки оборотного і необоротного процесів

Всі реальні процеси в природі супроводжуються втратами енергії і є необоротними. Процес теплообміну внаслідок кінцевої різниці температур також є необоротним. Термодинамічні функції стану системи (такі як внутрішня енергія  $U$ , ентальпія  $H$ , ентропія  $S$  тощо) за колових процесів знову набувають первісних значень; отже їх зміни при колових процесах дорівнюють нулю ( $\Delta U = 0$ ,  $\Delta H = 0$ ,  $\Delta S = 0$  тощо).

Розглянемо ізотермічний процес (рис. 15.7,а). Робота  $A$ , що виконується системою під час її розширення при постійній температурі  $T_1$  (процес  $AB$ ), визначається площею фігури  $ABCD$ . Для повернення системи в вихідний стан (якщо, наприклад, стискувати її ізотермічно при тій же температурі) необхідно затратити роботу ( $-A$ ), яка дорівнює роботі  $A$  при розширенні (процес  $BA$ ). Робота  $-A$ , що виконується системою при стисненні системи при постійній температурі  $T_1$ , визначається тією ж самою площею фігури  $ABCD$  (рис. 15.7,б). Сумарна робота під час прямого ( $AB$ ) і зворотного ( $BA$ ) термодинамічних процесів дорівнює нулю. Для того, щоб отримати корисну роботу, треба «зійти» з ізотерми  $AB$ . Це можна зробити за адіабатичним процесом  $BK$  шляхом переходу на іншу ізотерму  $T_2$  (рис. 15.7,в). Робота, що виконується системою під час прямого процесу ( $ABK$ ), що складається з ізотермічного і адіабатичного розширень системи, визначається площею фігури  $ABKMNA$ ;

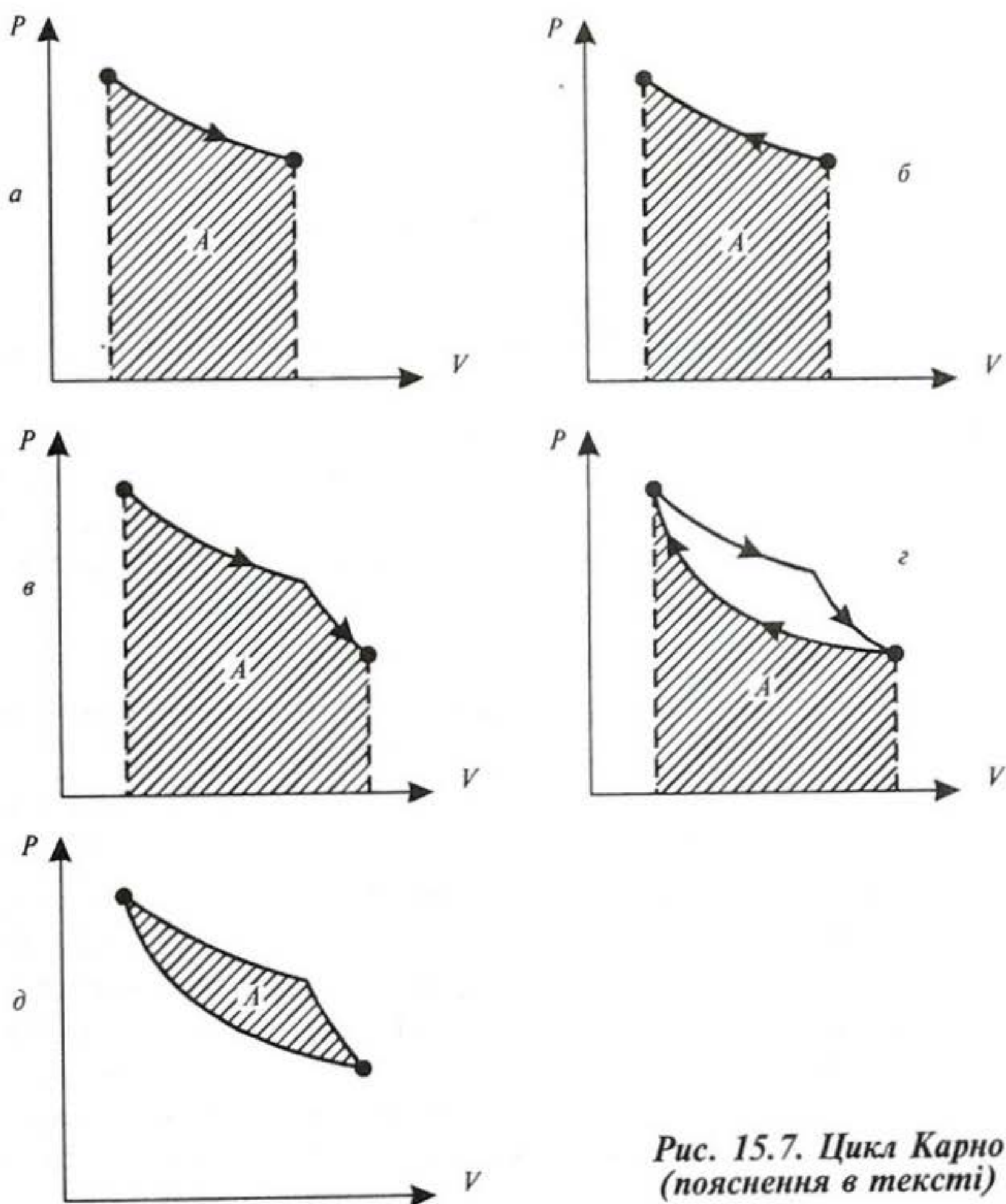


Рис. 15.7. Цикл Карно (пояснення в тексті)

робота, що виконується над системою під час зворотного процесу ( $KLA$ ), визначається площею фігури  $ALKMNA$  (рис. 15.7, з).

Коловий процес, що складається з двох ізотермічних і двох адіабатичних процесів, і в якому відбувається перетворення теплоти в роботу, називається *циклом Карно*. Корисна робота, що отримується протягом циклу, графічно зображується площею фігури  $ABKLA$  (рис. 15.7, д).

Під час колового процесу система може отримувати теплоту ( $Q_1$ ) і віддавати її ( $Q_2$ ); з урахуванням цього вводять поняття *термічного коефіцієнта корисної дії* для колового процесу:

$$\eta_k = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (15.22)$$

З іншого боку, термічний коефіцієнт корисної дії не залежить від природи робочого тіла і визначається лише температурами  $T_1$  нагрівача і  $T_2$  холодильника:

$$\eta_k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (15.23)$$

### 15.2.11. Другий закон термодинаміки

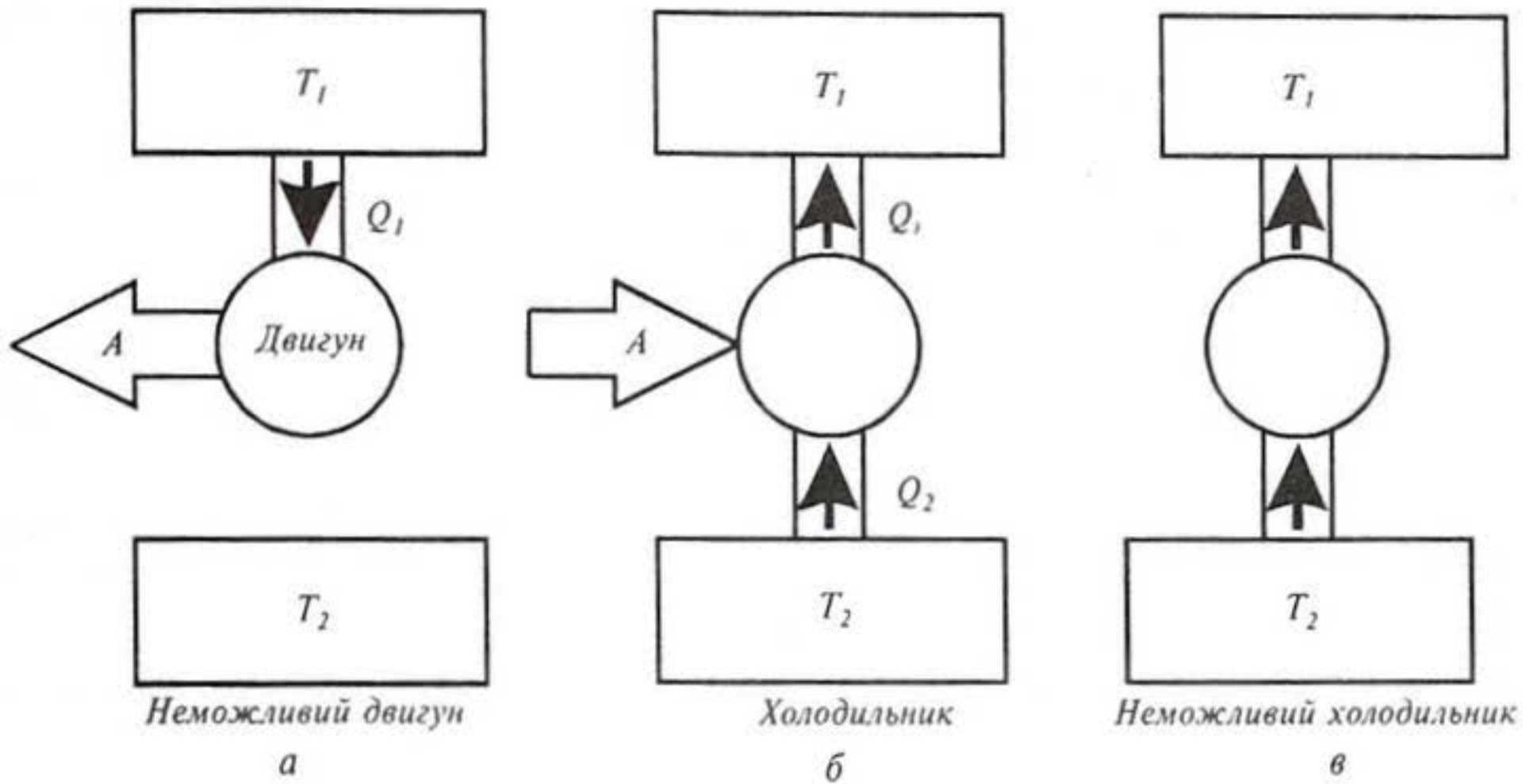
Перший закон термодинаміки виражає загальний закон збереження і перетворення енергії, але він не здатний визначити напрям перебігу процесів.

Нагадаємо, що всі реальні процеси мають переважні напрями. Наприклад, тепловий потік прямує від нагрітого тіла до холодного, яке перебуває з ним у контакті, але не навпаки. Поява другого закону термодинаміки зумовлена необхідністю відповісти на запитання, які процеси в природі можливі, а які — ні.

Другий закон термодинаміки має кілька формулювань:

1. Р.Клаузіус, 1850 р.: *неможливий процес, єдиним результатом якого є передача теплоти від холодного тіла до гарячого;*
2. У.Томсон, 1851 р.: *неможливий процес, єдиним результатом якого є виконання роботи завдяки охолодженню теплового резервуара.*

На рис. 15.8, а-г наведено графічні ілюстрації теплових двигунів, можливість або неможливість дії яких диктується другим законом термодинаміки. Другому закону термодинаміки відповідає тепловий двигун, зображений на рис. 15.5, а. Не можливий тепловий двигун, який би перетворював теплоту, отриману від нагрівача, в еквівалентну їй роботу (рис. 15.8, б). Для передачі теплоти від холодильника нагрівачу потрібно виконати роботу над робочим тілом (рис. 15.8, в); така ситуація реалізується в холодильних установках. Не



*Рис. 15.8. Графічні ілюстрації теплових двигунів, можливість або неможливість дії яких диктується другим законом термодинаміки*

можливий і такий тепловий двигун, в якому б здійснювалася передача теплоти від холодильника нагрівачу без виконання роботи (рис. 15.8,в).

### 15.2.12. Ентропія та її властивості

Кількісне формулювання другого закону термодинаміки має вигляд:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (15.24)$$

де  $Q_1$  — кількість теплоти, яку нагрівач віддає робочому тілу,  $Q_2$  — кількість теплоти, яку забирає холодильник,  $T_1$  — температура нагрівача,  $T_2$  — температура холодильника. Тут знак «=» відповідає зворотним, а знак «<» — незворотним процесам.

Розглянемо оборотний цикл Карно, для якого вираз (15.25) можна записати так:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (15.25)$$

або

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (15.26)$$

звідки:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0. \quad (15.27)$$

Оскільки  $Q_2$  віддається робочим тілом холодильнику, то  $Q_2 < 0$ , і останнє рівняння можна записати:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{(-Q_2)}{T_2} = 0, \quad (15.28)$$

або

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0. \quad (15.29)$$

Відношення теплоти до абсолютної температури називається *приведеною теплотою*. Таким чином, сума приведених теплот під час зворотного циклу Карно дорівнює нулю.

Будь-який коловий процес можна уявити як велику кількість елементарних циклів Карно (рис. 15.9):

$$\sum_i \frac{\Delta Q_{1i}}{T_{1i}} + \sum_i \frac{\Delta Q_{2i}}{T_{2i}} = 0. \quad (15.30)$$

Якщо перейти до нескінченної кількості елементарних циклів Карно, то суми в останній формулі перетворюються в інтеграли:

$$\int_{AaB} \frac{dQ}{T} + \int_{AbB} \frac{dQ}{T} = 0, \quad (15.31)$$

або

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0. \quad (15.32)$$

Необоротний цикл Карно описується нерівністю:

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0. \quad (15.33)$$

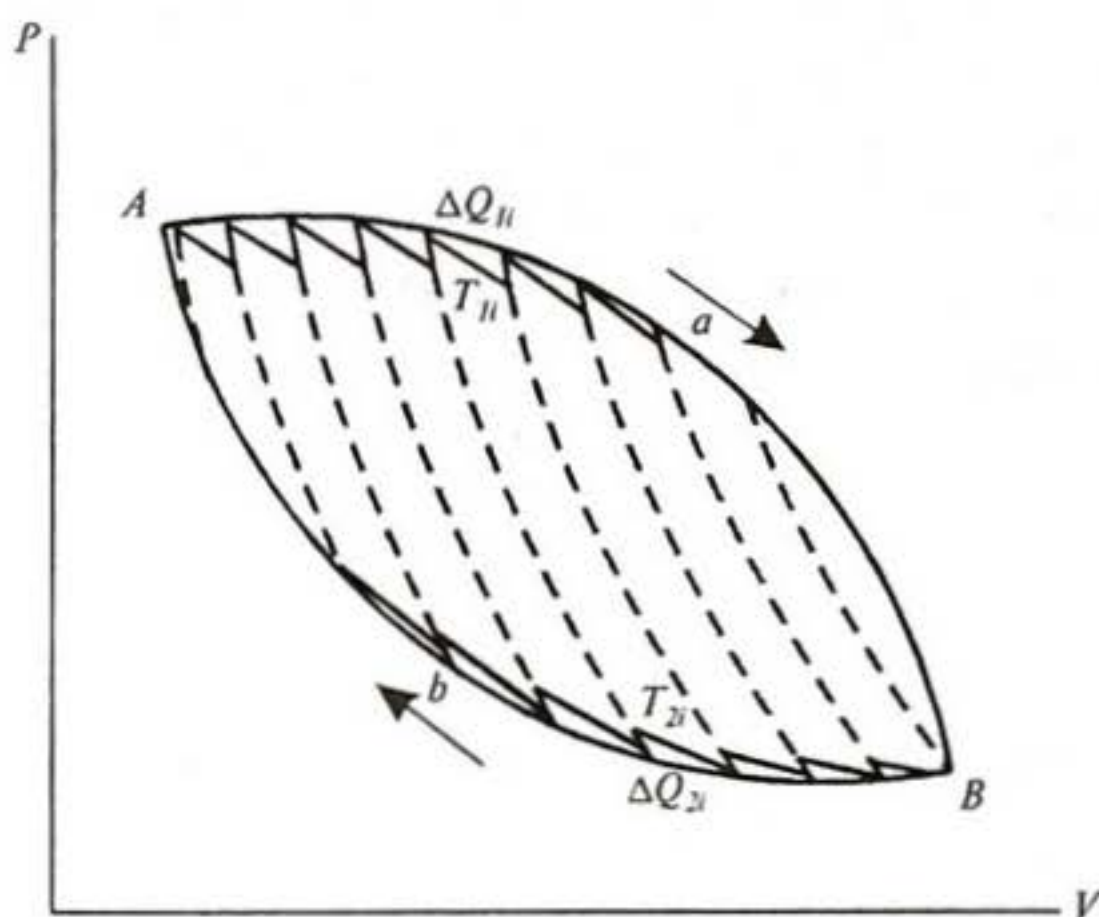


Рис. 15.9. Коловий процес як нескінченна кількість елементарних циклів Карно

Підінтегральний вираз  $\frac{dQ}{T}$  являє собою повний диференціал функції  $S$ , що залежить від стану системи і не залежить від шляху, яким система прийшла в цей стан:

$$\frac{dQ}{T} = dS. \quad (15.34)$$

Ця функція  $S$  називається *ентропією*.

Зміна ентропії визначається сумарним значенням поглинутих системою приведених теплот. При нескінченно малих змінах стану системи зміна ентропії  $dS$  дорівнює (під час зворотних процесів) або перевищує (під час незворотних процесів) значення поглинутої системою елементарної приведеної теплоти:

$$dS \geq \frac{dQ}{T}. \quad (15.35)$$

Для ізольованої системи, яка не здійснює теплообмін з оточуючим середовищем  $dQ \geq 0$ ; отже, зміна ентропії визначиться нерівністю:

$$dS \geq 0. \quad (15.36)$$

Таким чином, основні тенденції зміни ентропії можна сформулювати так:

1. В ізольованій системі, в якій проходять зворотні процеси, ентропія зберігає сталі значення:

$$dS = 0; S = \text{const}. \quad (15.37)$$

2. В ізольованій системі, в якій проходять незворотні процеси, ентропія зростає:

$$dS > 0. \quad (15.38)$$

3. Під час термодинамічної рівноваги ентропія прямує до максимального значення:

$$S \rightarrow S_{\text{max}}. \quad (15.39)$$

Другий закон термодинаміки для незворотних процесів показує напрямок процесу: незворотні процеси завжди відбуваються у напрямку зростання ентропії. Отже, можна ввести ще одне визначення ентропії: це така функція стану системи, яка визначає напрямок перебігу довільного процесу: в ізольованій системі ентропія зростає з наближенням до стану рівноваги, а у рівноважному стані вона прямує до максимального значення.

### 15.2.13. Термодинамічні потенціали

Лінійні комбінації функцій, що характеризують стан термодинамічної системи, також можуть бути використані для характеристики цієї системи; ці комбінації називають *термодинамічними по-*



тенціалами. До основних термодинамічних потенціалів можна віднести внутрішню енергію  $U$ , ентальпію  $H$ , вільну енергію Гельмгольца  $F$  та вільну енергію Гіббса  $G$ . Розглянемо властивості цих термодинамічних потенціалів.

Ентальпія  $H$  пов'язана з внутрішньою енергією співвідношенням:

$$H = U + pV. \quad (15.40)$$

Звідси можна отримати вираз:

$$dH = dU + pdV + Vdp. \quad (15.41)$$

Ця функція має перевагу в ситуаціях, коли тиск є сталим ( $p = const$ ); в цьому разі:

$$dH = dU + pdV. \quad (15.42)$$

Якщо в системі здійснюється тільки робота по зміні об'єму  $pdV$ , застосування першого закону термодинаміки приводить до рівняння:

$$dQ = dU + pdV = d(U + pV) = dH. \quad (15.43)$$

Таким чином, зміна ентальпії дорівнює отриманому або відданому теплу під час ізобаричного процесу.

Вільна енергія Гельмгольца  $F$  визначається як різниця між внутрішньою енергією термодинамічної системи  $U$  і добутком її ентропії  $S$  на температуру  $T$ :

$$F = U - T \cdot S. \quad (15.44)$$

В диференційній формі зміна вільної енергії Гельмгольца має вигляд:

$$dF = dU - TdS - SdT. \quad (15.45)$$

Цей потенціал доцільно використовувати для опису ізотермічних процесів ( $T=const$ ); в цьому випадку зміна вільної енергії Гельмгольца визначається так:

$$dF = dU - TdS. \quad (15.46)$$

Вільна енергія Гіббса  $G$  — функція, зручна для описування процесів, що відбуваються при постійній температурі ( $T=const$ ) і сталому тиску ( $p=const$ ):

$$G = F + pV = U - TS + pV. \quad (15.47)$$

В диференційній формі зміна вільної енергії Гіббса запишеться так:

$$dG = dU - TdS + pdV = dH - TdS. \quad (15.48)$$

Величини термодинамічних потенціалів  $F$  і  $G$  постачають інформацію щодо напрямку мимовільних процесів і встановлення рівноваги в системі. Так, при відсутності корисної роботи  $dF \leq 0$ ;  $dG \leq 0$ . Таким чином,  $F$  і  $G$  зменшуються при нерівноважних процесах; при рівновазі вони залишаються сталими, досягаючи при цьому мінімальних значень:

$$F \rightarrow F_{min}; dF = 0; G \rightarrow G_{min}; dG = 0. \quad (15.49)$$

### 15.2.14. Хімічний і електрохімічний потенціали

Біологічні системи є відкритими — речовина вноситься чи виходить за процесів перенесення або хімічних реакцій. Опис таких відкритих систем зручно проводити за допомогою *хімічного потенціалу*  $\mu$ , який являє собою зміну будь-якої термодинамічної функції  $U$ ,  $H$ ,  $F$ ,  $G$ , віднесених до кількості молів речовини:

$$\mu_i = \left( \frac{\partial U}{\partial n_s} \right)_{S,V} = \left( \frac{\partial H}{\partial n_s} \right)_{S,p} = \left( \frac{\partial F}{\partial n_s} \right)_{T,V} = \left( \frac{\partial G}{\partial n_s} \right)_{T,p}. \quad (15.50)$$

У разі зміни ентропії маємо:

$$\mu_i = -T \left( \frac{dS}{dn_i} \right)_{U,V}. \quad (15.51)$$

Зміна внутрішньої енергії термодинамічної системи  $dU$  являє собою суму добутків *екстенсивних* параметрів (які переносяться завдяки різниці потенціалів) на *інтенсивні* параметри (що утворюють різницю потенціалів):

$$dU = TdS - pdV + fdl + \psi de + \sum \mu_i dn_i + \dots \quad (15.52)$$

де  $dS$ ,  $dV$ ,  $dl$ ,  $de$ ,  $dn_i$  — можливі зміни екстенсивних параметрів (ентропії, об'єму, довжини, заряду, кількості молей),  $T$ ,  $p$ ,  $f$ ,  $\psi$ ,  $\mu_i$  — інтенсивні параметри (температура, тиск, механічна сила, електричний потенціал, хімічний потенціал). Останнє співвідношення отримало назву *рівняння Гіббса*.

Зміна вільної енергії Гіббса  $dG$  при сталій температурі і сталому тиску визначається за виразом (15.48). Якщо підставити в цей вираз рівняння Гіббса, знехтавши усіма вкладками в функцію, крім роботи, затраченої на розширення системи, і хімічної роботи, отримуємо:

$$dG = Vdp - SdT + \sum_i \mu_i dn_i. \quad (15.53)$$

Зміна вільної енергії за додавання (або віддалення)  $i$ -тої компоненти системи, якщо температура, тиск і кількість компонентів є сталі, визначається за виразом:

$$\left. \frac{\partial G}{\partial n_i} \right|_{T,p,n_{j \neq i}} = \mu_i. \quad (15.54)$$

Для багатоконпонентної системи при даних температурі і тиску загальна вільна енергія становить:

$$G = \sum_i n_i \mu_i. \quad (15.55)$$

Робота з розширення ідеального газу визначається так:

$$dA = pdV. \quad (15.56)$$

З урахуванням рівняння стану ідеального газу ( $pV = RT$ ) можна навести вираз для зміни хімічного потенціалу:

$$d\mu_g = -pdV. \quad (15.57)$$

Диференціювання рівняння стану ідеального газу приводить до співвідношення (при сталій температурі):

$$d(pV) = pdV + Vdp = d(RT) = 0. \quad (15.58)$$

Звідси

$$PdV = -Vdp, \quad (15.59)$$

або

$$d\mu_g = Vdp. \quad (15.60)$$

Комбінуючи останній вираз з рівнянням стану ідеального газу, отримуємо:

$$d\mu_g = RT(dp/p). \quad (15.61)$$

Інтегрування цього виразу приводить до рівняння:

$$\mu_g - \mu_g^0 = RT \ln(p/p_0). \quad (15.62)$$

Для газів вибирають тиск  $p_0 = 1 \text{ атм} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$  як стандартне значення;  $\mu_g = \mu_g^0$ , коли тиск газу дорівнює  $p_0$ .

Визначити хімічний потенціал для розчиненої речовини у розчині можна за допомогою рівняння:

$$\pi_i = c_i RT, \quad (15.63)$$

де  $\pi_i$  — осмотичний тиск,  $c_i$  — концентрація розчину.

Робота, що виконується осмотичним тиском над одним молем, дорівнює:

$$dA = \pi_i d(1/c_i). \quad (15.64)$$

Звідки

$$d\mu_i = -\pi_i d(1/c_i) = c_i RT d(1/c_i) = RT d(\ln c_i). \quad (15.65)$$

Інтегрування останнього виразу приводить до рівняння:

$$\mu_i - \mu_i^0 = RT \ln(c_i/c_0). \quad (15.66)$$

Для розчинів вибирають тиск  $c_0 = 1 \text{ моль}$  як стандартне значення.

Якщо у розчині відбувається перенесення електричних зарядів, то цей процес супроводжується виникненням різниці потенціалів. Здатність системи виконувати роботу характеризується як хімічним потенціалом (пов'язаним з концентрацією), так й електричним потенціалом (пов'язаним з електричним зарядом). Для такого розчину введемо поняття *електрохімічного потенціалу*:

$$\tilde{\mu}_k = \mu_k + z_k F \varphi = \mu_k^0 + RT c_k + z_k F \varphi, \quad (15.67)$$

де  $z_k$  — валентність іона;  $\varphi$  — електричний потенціал;  $F$  — стала Фарадея ( $9,64846 \cdot 10^4 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$ ).

## 15.2.15. Зміна стандартної вільної енергії і константа рівноваги

Зміна вільної енергії Гіббса  $\Delta G$  залежить від багатьох факторів, що характеризують перебіг хімічної реакції, а саме — тиску, температури, концентрації реагуючих речовин. Саме через це доцільно прив'язувати зміну вільної енергії до стандартних умов (для 1М водних розчинів ці умови становлять  $p = 1 \cdot 10^2$  кПа,  $pH = 7,0$  і  $T = 298$  К); у такому разі цю величину називають *зміною стандартної вільної енергії*  $\Delta G_0$ .

При досягненні рівноваги в процесі хімічної реакції зміна стандартної вільної енергії становитиме:

$$\Delta G_0 = -R \cdot T \cdot \ln \frac{[B]_{\text{рівн}}}{[A]_{\text{рівн}}}, \quad (15.68)$$

де  $\frac{[B]_{\text{рівн}}}{[A]_{\text{рівн}}}$  — відношення рівноважних концентрацій речовин, яке називають *константою рівноваги*  $K_p$ .

Тоді з останнього виразу можна отримати *рівняння Вант-Гоффа*:

$$\Delta G_0 = -RT \ln K_p. \quad (15.69)$$

Це рівняння дає змогу, вимірюючи експериментально  $K_p$ , визначити величину  $\Delta G_0$ .

### ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

#### Приклад

Ртутний термометр має капіляр діаметром 0,004 см та колбу діаметром 0,25 см. Знайти зміну висоти стовпчика ртуті в капілярі, якщо температура змінилася на 30 °С. Тепловим розширенням скла знехтувати. Коефіцієнт об'ємного розширення ртуті дорівнює  $1,82 \cdot 10^{-4}$  (°С)<sup>-1</sup>.

#### Розв'язок

Об'єм колби знайдемо з виразу:

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D}{2} \right)^3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot \left( \frac{0,25}{2} \right)^3 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3.$$

Зміна об'єму з температурою описується рівнянням (15.3):

$$\Delta V = \beta V \Delta T = 1,82 \cdot 10^{-4} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 436,8 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3.$$

Об'єм капіляра дорівнює:

$$V_{\text{цил}} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h.$$

Звідки знайдемо зміну висоти стовпчика ртуті:

$$\Delta h = \frac{\Delta V \cdot 4}{\pi D^2} = \frac{436,8 \cdot 10^{-7} \cdot 4}{3,14 \cdot 0,004^2} = 3,4 \text{ см.}$$

### Контрольне завдання № 15.1

Стальна залізнична рейка мала довжину 30 м при температурі 0 °С. Чому стала дорівнювати довжина рейки в спекотливий день, якщо температура становить 40°?

*Відповідь:* 30,013 м.

#### Приклад

Один грам води займає об'єм 1 см<sup>3</sup>. Під час кипіння води з неї вийшло 1671 см<sup>3</sup> пари. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії в цьому процесі?

#### Розв'язок

Оскільки питома теплота випаровування води дорівнює  $22,6 \cdot 10^5$  Дж · кг<sup>-1</sup> при атмосферному тиску, теплота, необхідна для перетворення у пару 1 г води, визначиться так:

$$Q = mL_{\text{вип}} = (1 \cdot 10^{-3} \text{ кг})(22,6 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}) = 2260 \text{ Дж}.$$

Робота, що виконується системою, дорівнює:

$$A = p(V_n - V_0) = (1,013 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2})(1671 - 1) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 169 \text{ Дж}.$$

Звідси зміна внутрішньої енергії становить:

$$\Delta U = Q - A = 2260 \text{ Дж} - 169 \text{ Дж} = 2091 \text{ Дж}.$$

#### Приклад

Кожен день раціон корови масою 500 кг, необхідний для підтримання життя та отримання надою 10 кг, включає 940 г перетравного протеїну, 290 г жирів, 800 г цукру та 3700 г сирової клітковини. Знайти зміну внутрішньої енергії при такому щоденному раціоні, якщо корова піднялась на пагорб заввишки 500 м.

Калоричні еквіваленти харчових продуктів:  $Q_p^* = 17000$  кДж · кг<sup>-1</sup>;  $Q_{\text{ж}}^* = 39000$  кДж · кг<sup>-1</sup>;  $Q_{\text{ц}}^* = 17000$  кДж · кг<sup>-1</sup>;  $Q_{\text{кл}}^* = 17000$  кДж · кг<sup>-1</sup>.

#### Розв'язок

Зміну внутрішньої енергії можна знайти відповідно до першого закону термодинаміки:

$$\Delta U = Q - A.$$

Робота, яку виконала корова під час випасання:

$$A = F \cdot h = mgh = 500 \cdot 10 \cdot 500 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Теплота, що була виділена за згорання продуктів живлення, визначається так:

$$Q = m_p \cdot Q_p^* + m_{\text{ж}} \cdot Q_{\text{ж}}^* + m_{\text{ц}} \cdot Q_{\text{ц}}^* + m_{\text{кл}} \cdot Q_{\text{кл}}^*.$$

Підставляємо числові дані:

$$Q = 0,94 \cdot 17000 + 0,29 \cdot 39000 + 0,8 \cdot 17000 + 3,7 \cdot 17000 = \\ = 15980 + 11310 + 13600 + 62900 = 103790 \text{ кДж} = 103,79 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Таким чином, зміна внутрішньої енергії дорівнює:

$$\Delta U = 103,79 \cdot 10^6 - 2,5 \cdot 10^6 = 101,29 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

### Контрольне завдання № 15.2

Знайти зміну внутрішньої енергії для корови масою 500 кг, якщо щоденний раціон, необхідний для підтримки життя і отримання надою 20 кг, включає 1460 г перетравних білків, 465 г жирів, 1315 г цукру і 413 г сирової клітковини. Корова під час випасання піднялась на пагорб заввишки 500 м.

*Відповідь:*  $69,831 \cdot 10^6$  Дж.

#### Приклад

Визначити теплоємність риби масою 2 кг.

#### Розв'язок

Використовуючи вираз (15.6) та дані табл. 15.2, отримаємо:

$$C = 3500 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 2 \text{ кг} = 7000 \text{ Дж} \cdot \text{кг}.$$

### Контрольне завдання № 15.3

Визначити питому теплоємність сиру, якщо для нагрівання 2 кг на 1 К необхідно  $3,4 \cdot 10^3$  Дж.

*Відповідь:*  $c = 1,7 \cdot 10^3$  Дж  $\cdot$  кг $^{-1}$   $\cdot$  К $^{-1}$

#### Приклад

Ентальпія закритої системи визначається співвідношенням (15.40). Як змінюється ентальпія в процесі розширення системи при сталому тиску?

#### Розв'язок

Приріст ентальпії при  $p = \text{const}$  запишеться у вигляді:

$$\Delta H = \Delta U + p(V_1 - V_2) = \Delta U + p\Delta V.$$

Згідно з першим законом термодинаміки:

$$\Delta U = Q - A = Q - p\Delta V.$$

Звідси:

$$\Delta H = Q - p\Delta V + p\Delta V = Q.$$

Отже, приріст ентальпії при сталому тиску дорівнює теплоті, переданій закритій системі.

### Контрольне завдання № 15.4

Як зміниться ентальпія в процесі розширення системи при сталій температурі ?

*Відповідь:*  $\Delta H = p\Delta V + V\Delta p$ .

#### Приклад

Знайти зміну ентропії при плавленні 2 кг льоду, що має температуру 0 °С.

#### Розв'язок

Зміна ентропії визначається виразом:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T},$$

де  $S_1$  і  $S_2$  — значення ентропії в початковому і кінцевому станах.

Плавлення льду масою  $m$  при температурі  $T$  супроводжується зміною ентропії:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \frac{m\lambda}{T},$$

де  $\lambda$  — питома теплота плавлення ( $3,35 \cdot 10^5$  Дж · кг<sup>-1</sup>).

Звідси

$$\Delta S = \frac{2 \text{ кг} \cdot 3,35 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}}{273 \text{ К}} = 2454 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}.$$

### Приклад

Визначити зміну ентропії при нагріванні та плавленні 0,1 кг олова, якщо початкова температура олова становить 20 °С, питома теплоємність 230 Дж · кг<sup>-1</sup>Т<sup>-1</sup>, питома теплота плавлення 60,2 кДж · кг<sup>-1</sup>, а температура плавлення 231,9 °С.

### Розв'язок

Зміна ентропії під час ізобаричного нагрівання від температури  $T_1$  до температури  $T_2$  визначається за виразом:

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = cm \ln \frac{T_2}{T_1},$$

де  $dQ = cmdT$ ,  $c$  — питома теплоємність при сталому тиску.

Зміна ентропії під час плавлення маси  $m$  кристалічної речовини дорівнює:

$$\Delta S = \frac{m\lambda}{T_{пл}},$$

де  $Q = m\lambda$  — теплота плавлення,  $\lambda$  — питома теплота плавлення,  $T_{пл}$  — температура плавлення.

Отже, зміна ентропії під час нагрівання та плавлення олова визначається так:

$$\Delta S = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_n} + \frac{m\lambda}{T_{пл}}.$$

де  $T_n$  — початкова температура речовини.

Підставляємо числові дані в останнє рівняння:

$$\Delta S = 230 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}\text{Т}^{-1} \cdot 0,1 \text{ кг} \cdot \ln(505,05 / 293,15) + (0,1 \text{ кг} \cdot 60,2 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}) / (505,05 \text{ К}) = 24,37 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

### Контрольне завдання № 15.5

Визначити зміну ентропії під час плавлення 0,3 кг свинцю, якщо питома теплота плавлення 24,7 кДж · кг<sup>-1</sup>, а температура плавлення 327,4 °С.

Відповідь:  $\Delta S = 12,24$  Дж · кг<sup>-1</sup>.

### Приклад

Визначити зміну вільної енергії Гіббса при стисканні одного моля ідеального газу при постійній температурі ( $T=293$  К), під час якого тиск збільшився на 10 %.

### Розв'язок

Ентальпія  $H$  пов'язана з внутрішньою енергією співвідношенням (15.40):

$$H = U + pV.$$

Диференціюємо цей вираз:

$$dH = dU + pdV + Vdp.$$

З урахуванням першого закону термодинаміки ( $dQ = dU + pdV$ ) отримуємо:

$$dH = dQ + Vdp.$$

Для зворотних процесів  $dQ = TdS$ , отже:

$$dH = TdS + Vdp.$$

Для ізотермічного процесу справедливий вираз:

$$dG = dH - TdS.$$

Комбінуючи два останніх рівняння, отримуємо:

$$dG = Vdp.$$

З урахуванням рівняння стану ідеального газу ( $pV=nRT$ ) отримуємо вираз для зміни вільної енергії Гіббса:

$$dG = \frac{nRT}{p} dp.$$

Інтегрування останнього виразу дає:

$$G_1 - G_2 = \int_1^2 nRT dp/p = nRT \ln(p_2/p_1).$$

Підставляємо числові значення:

$$G_1 - G_2 = 8,314551 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 293 \text{ К} \cdot \ln(1,1 / 1,0) = 232,2 \text{ Дж}.$$

### Приклад

Визначити хімічний потенціал газу, тиск якого змінюється від  $p_1 = 1$  атм до  $p_2 = 0,1$  атм, якщо температура газу дорівнює 273,15 К.

### Розв'язок

Хімічний потенціал газу знайдемо за допомогою співвідношення (15.62):

$$\begin{aligned} \mu_g - \mu_g^0 &= RT \ln(p/p^0) = \\ &= 8,314551 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 273,15 \text{ К} \cdot \ln(0,1 / 1) = -5,23 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$



### Контрольне завдання № 15.6

Визначити хімічний потенціал газу, якщо при температурі 25 °С та тиску 0,1 атм його концентрація становить  $c = 2,45$  моль · дм<sup>-1</sup>. Стандартне значення концентрації становить  $c_0 = 1$  моль · дм<sup>-1</sup>.

Відповідь: 2,22 кДж · моль<sup>-1</sup>.

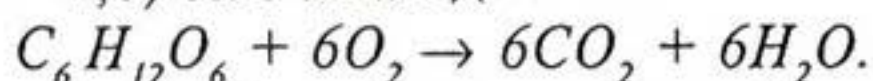
### Контрольне завдання № 15.7

В посудині, де температура дорівнює  $T=293$  К, а тиск  $p = 1,01325 \cdot 10^5$  Па, відбувається рівновага між рідкою та паровою фазами водного розчину. Визначити різницю між хімічними потенціалами води у розчині та чистої води, якщо відносна вологість становить 98 %.

Відповідь:  $\Delta\mu = \mu_p - \mu_g = 49,2$  Дж · моль<sup>-1</sup>.

### Приклад

Рівняння окислення молекули глюкози в процесі дихання в стандартних умовах (водний розчин з концентрацією  $C = 1$  М, температурою  $T = 298$  К,  $pH = 7,0$ ) має вигляд:



Визначити константу рівноваги, якщо зміна стандартної вільної енергії становить  $\Delta G_0 = -2870$  Дж · моль<sup>-1</sup>.

### Розв'язок

Використаємо співвідношення (15.69). Звідси

$$\ln K_p = \frac{\Delta G_0}{-RT} = \frac{-2870 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}}{-2478 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}} = 1,158,$$

звідки

$$K_p = 3,18.$$

### Контрольне завдання № 15.8

Визначити зміну стандартної вільної енергії Гіббса для реакції  
*глюкозо-1-фосфат*  $\Rightarrow$  *глюкозо-6-фосфат*,  
якщо константа рівноваги  $K_p = 17$  при  $pH = 7,0$  і температурі  $T = 298$  К.

Відповідь: 7,02 кДж · моль<sup>-1</sup>.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Пояснити принципи утворення температурних шкал.
2. Охарактеризувати типи термодинамічних систем. Які ознаки ізольованої, замкнутої та відкритої термодинамічних систем?
3. Що таке термодинамічні параметри? термодинамічний процес?
4. Дати визначення внутрішній енергії.
5. Що називають теплоємністю тіла? питомою теплоємністю речовини?
6. Дати визначення роботи; теплоти.
7. Сформулювати перший закон термодинаміки.
8. Охарактеризувати шляхи теплообміну між термодинамічною системою і зовнішніми тілами.
9. З чого складається тепловий двигун? Від чого залежить коефіцієнт корисної дії теплового двигуна?

10. Сформулювати другий закон термодинаміки.
11. Які процеси називають оборотними? необоротними?
12. Дати визначення ентропії.
12. Охарактеризувати основні тенденції зміни ентропії.
13. Назвати основні термодинамічні потенціали.
14. Що таке хімічний потенціал?
15. Що таке електрохімічний потенціал?
16. Що таке зміна стандартної вільної енергії? константа рівноваги?

## 15.3. ТЕРМОДИНАМІКА НЕОБОРОТНИХ ПРОЦЕСІВ

### 15.3.1. Стаціонарний стан

В попередніх розділах було розглянуто застосування законів класичної термодинаміки стосовно замкнутих та ізольованих систем. Основним критерієм спрямовування мимовільних змін в ізольованій системі є збільшення ентропії, а кінцевим результатом — досягнення стану рівноваги.

Біологічні системи є відкритими термодинамічними системами, оскільки вони обмінюються з оточуючим середовищем енергією і речовиною. Живі організми отримують із зовнішнього середовища поживні речовини і енергію, виділяють продукти метаболізму і теплоту, виконують роботу. Такий безперервний обмін супроводжується зміною нерівноважних станів; життєдіяльність організму, таким чином, являє собою сукупність різних нерівноважних процесів. Результатом такого обміну організму з оточуючим середовищем є досягнення *стаціонарного стану*, в якому, незважаючи на відсутність термодинамічної рівноваги, зберігаються незмінними протягом тривалого проміжку часу деякі фізичні і хімічні властивості термодинамічної системи. Моделі стаціонарного та нерівноважного станів наведено на рис. 15.10, а, б. Тут є вхідний потік, вихідний потік, але рівень води в резервуарі залишається сталим чи ні.

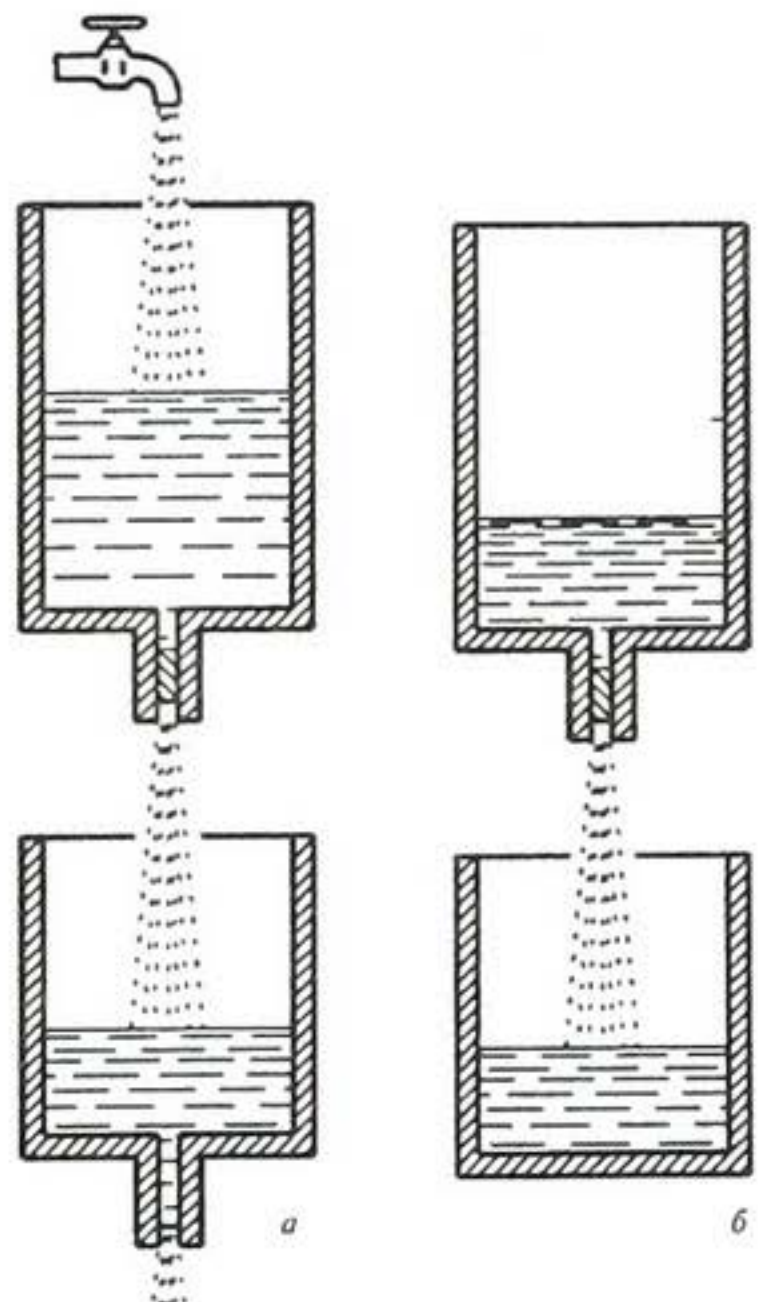


Рис. 15.10. Моделі стаціонарного (а) та нерівноважного (б) станів

Принципові відміни рівноважного і стаціонарного станів можна простежити в табл. 15.4.

#### 15.4. Порівняння термодинамічних функцій для термодинамічних систем

Термодинамічна функція	Замкнуті системи (рівноважний стан)	Відкриті системи (стаціонарний стан)
Вільна енергія Гіббса	$\Delta G = 0$	$\Delta G = const$
Ентропія	$S \rightarrow S_{max}$	$S \neq S_{max}$

### 15.3.2. Зміна ентропії у відкритих системах

Зміна ентропії у відкритій системі може відбуватися завдяки або взаємодії системи з оточуючим середовищем ( $d_e S$ ), або зміні ентропії у самій системі ( $d_i S$ ):

$$dS = d_e S + d_i S. \quad (15.56)$$

Якщо в системі відбуваються оборотні процеси, зміна ентропії дорівнює нулю ( $d_i S = 0$ ). Реальні системи характеризуються перебігом необоротних процесів, завдяки яким відбувається позитивна зміна ентропії ( $d_i S > 0$ ). Процеси зміни ентропії за взаємодії з оточуючим середовищем можуть бути пов'язані з припливом ентропії в систему ( $d_e S > 0$ ) або відтоком з останньої ( $d_e S < 0$ ).

Стаціонарним станом з точки зору зміни ентропії називається такий стан системи, при якому ентропія  $S$  всієї відкритої системи зберігається, тобто повна зміна ентропії дорівнює нулю ( $dS = 0$ ).

З рівняння (15.56) виходить, що  $d_e S + d_i S = 0$ , або  $d_e S = -d_i S$ . Оскільки  $d_i S > 0$ , зміна ентропії  $d_e S$  за взаємодії з оточенням має бути від'ємною ( $d_e S < 0$ ) і дорівнювати за модулем  $d_i S$ . Ця умова виконується, якщо ентропія, що виробляється всередині системи, повністю розсіюється в довкілля. Можна, таким чином, стверджувати, що відкриті системи в стаціонарному стані живляться *не-ентропією* (від'ємною ентропією).

Одним з найважливіших понять термодинаміки необоротних процесів є зміна ентропії у часі. Диференціювання останнього рівняння приводить до такого виразу:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_e S}{dt} + \frac{d_i S}{dt}. \quad (15.70)$$

Тут  $\frac{dS}{dt}$  називають *швидкістю продукції ентропії*.

В стаціонарному стані баланс ентропії визначається за виразом:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_e S}{dt} + \frac{d_i S}{dt} = 0, \quad (15.71)$$

що свідчить про те, що ентропія не змінюється.

Таким чином, швидкість продукції ентропії  $\frac{dS}{dt}$  дорівнює сумі швидкості обміну ентропією між системою і оточуючим середовищем  $\frac{d_e S}{dt}$  та швидкості продукції ентропії  $\frac{d_i S}{dt}$  всередині системи.

Позитивна величина  $\frac{d_e S}{dt} > 0$  пов'язана із збільшенням ентропії системи за обміном речовиною і енергією з зовнішнім середовищем. Від'ємна величина  $\frac{d_e S}{dt} < 0$  відповідає тому, що відтік позитивної ентропії від системи у зовнішнє середовище перевищує приплив позитивної ентропії ззовні. В реальній ситуації розвиток живих організмів супроводжується зменшенням загальної величини їх ентропії, але слід враховувати, що в інших ділянках зовнішнього середовища відбуваються процеси, що характеризуються утворенням позитивної ентропії.

Хоча відкрита система в цілому нерівноважна, кожна з підсистем, що утворюється в елементарному об'ємі, перебуває у стані рівноваги (*принцип локальної рівноваги*). В зв'язку з цим вводиться нове поняття — *локальна швидкість продукції ентропії*  $\sigma$  в елементарному об'ємі  $dV$ .

### 15.3.3. Дисипативна функція

Реальні біологічні системи не перебувають у стані рівноваги, оскільки в них протікають процеси, що супроводжуються *дисипацією* енергії — переходом частини енергії упорядкованого процесу в енергію невпорядкованого процесу, наприклад, в теплоту або випромінювання.

Універсальною характеристикою будь-якого процесу є *дисипативна функція*  $T \frac{dS}{dt}$ , яка являє собою добуток двох величин — узагальненої сили  $X$  (причина) на узагальнений потік  $I$  (швидкість процесу):

$$T \frac{dS}{dt} = \sum_i X_i I_i, \quad (15.72)$$

якщо у відкритій системі проходить  $i$  процесів. Добуток  $\sum_i X_i I_i$  називають *потужністю процесу*. В конкретному випадку хімічних реакцій узагальненою силою є хімічна спорідненість  $A$ , а узагальненим потоком — швидкість реакції  $v$ :

$$T \frac{dS}{dt} = Av, \quad (15.73)$$

### 15.3.4. Основні положення лінійної нерівноважної термодинаміки

Як було згадано у попередніх розділах, будь-який необоротний процес можна охарактеризувати узагальненою силою  $X$  (причина) і узагальненим потоком  $I$  (швидкість процесу).

Лінійний закон являє собою узагальнення відомих емпіричних фактів, які встановлюють лінійні співвідношення між потоком і силою:

$$I = \sum_i L_i X_i, \quad (15.74)$$

де  $I$  — потік;  $L_i$  — кінетичний коефіцієнт;  $X_i$  — сила.

Так, у випадку дифузії  $I_c = \frac{dm}{dt}$ ,  $L_c = -DS$ ,  $X_c = \frac{dc}{dx}$ , де  $\frac{dm}{dt}$  — потік речовини,  $D$  — коефіцієнт дифузії,  $S$  — площа переносу речовини,  $\frac{dc}{dx}$  — градієнт концентрації; в процесі теплопровідності  $I_T = \frac{dQ}{dt}$ ,  $L_T = -\lambda S$ ,  $X_T = \frac{dT}{dS}$ , де  $\frac{dQ}{dt}$  — потік тепла,  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності,  $S$  — площа переносу тепла,  $\frac{dT}{dS}$  — градієнт температури.

Загальний випадок зв'язку потоку  $I_k$  з  $n$  потоками описується рівнянням:

$$I_k = \sum_n L_{kn} X_n. \quad (15.75)$$

Тобто, кожний потік являє собою лінійну комбінацію термодинамічних сил.

### 15.3.5. Принцип симетрії кінетичних коефіцієнтів

Складна біологічна система характеризується одночасним перебігом кількох процесів, які можуть бути взаємозв'язаними. Наприклад, у водному розчині сахарози, який знаходиться в двох відсіках, розділених мембраною, встановлюються два потоки — розчиненої речовини  $I_p$  і води  $I_v$ .

Розглянемо два взаємозв'язаних потоки  $I_k$  і  $I_n$ . Якщо б потік  $I_k$  не був сполученим з потоком  $I_n$ , він би залежав тільки від узагальненої сили  $X_k$ :

$$I_{kk} = L_{kk} X_k. \quad (15.76)$$

Але оскільки цей потік сполучений з потоком  $I_n$ , він залежить й від сили  $X_n$ ; цей зв'язок установлює лінійний коефіцієнт взаємозв'язку  $L_{kn}$ .

Для двох спряжених потоків маємо:

$$I_k = L_{kk}X_k + L_{kn}X_n; \quad (15.77)$$

$$I_n = L_{nk}X_k + L_{nn}X_n. \quad (15.78)$$

Отже, наведемо формулювання *принципу симетрії кінетичних коефіцієнтів — теорему Онзагера*: при повному виборі термодинамічних сил і потоків матриця кінетичних коефіцієнтів є симетричною, тобто

$$L_{kn} = L_{nk}. \quad (15.79)$$

### 15.3.6. Теорема Пригожина

Найважливішим результатом лінійної нерівноважної термодинаміки є визначення критерію установлення стаціонарного стану. Відповідь на це запитання пропонує *теорема Пригожина*: в стаціонарному стані при фіксованих зовнішніх параметрах локальна продукція ентропії у відкритій системі прямує до мінімального значення

$$\sigma \rightarrow \sigma_{\min}, \quad (15.80)$$

або для кінцевого об'єму  $V$  продукція ентропії в системі прямує до мінімального значення:

$$\frac{d_i S}{dt} \rightarrow \left( \frac{d_i S}{dt} \right)_{\min}. \quad (15.81)$$

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Теплопродукція живого організму становить 6670 кДж, в той час як втрата тепла за добу на випаровування дорівнює 2000 кДж. Температура організму 37 °С. Визначити загальну зміну ентропії в системі.

### Розв'язок

Зміна ентропії відкритої системи відбувається за рахунок обміну системи з навколишнім середовищем ( $d_e S$ ) та завдяки внутрішнім незворотнім змінам у самій системі, викликаним, наприклад, хімічними реакціями ( $d_i S$ ):

$$dS = d_e S + d_i S = dQ_e/T + dQ_i/T.$$

Підставляємо числові дані в останнє рівняння:

$$\Delta S = \frac{2000 \text{ кДж}}{310 \text{ К}} + \frac{6670 \text{ кДж}}{310 \text{ К}} = \frac{2 \cdot 10^6 + 6.67 \cdot 10^6}{310} = \frac{8.67 \cdot 10^6}{310} = 2.8 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

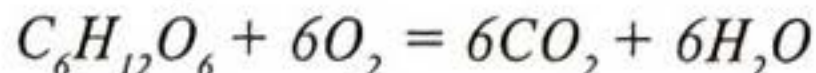
### Контрольне завдання № 15.9

Визначити кількість теплоти, якою обмінюється з навколишнім середовищем відкрита система, якщо в самій системі виділяється теплота 3000 кДж, а загальна зміна ентропії становить  $1,8 \cdot 10^4$  кДж/моль. Температура системи 300 К.

*Відповідь:* 2400 кДж.

### Приклад

У системі відбувається реакція окислення глюкози:



зі швидкістю  $0,5$  моль  $\cdot$  с $^{-1}$ . Визначити дисипативну функцію для такої системи, якщо зміна стандартної вільної енергії  $\Delta G_0$  дорівнює  $-2870$  кДж  $\cdot$  моль $^{-1}$ .

### Розв'язок

Дисипативну функцію можна визначити за формулою:

$$T \frac{dS}{dt} = A \cdot V,$$

де  $A$  — хімічна спорідненість реакцій,  $V$  — швидкість процесу.

Оскільки в реакції бере участь один компонент, можна записати:

$$A = -G_0.$$

Звідси

$$T \frac{dS}{dt} = -\Delta G_0 \cdot V.$$

Підставляємо числові значення:

$$T \frac{dS}{dt} = -(-2870 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}) \cdot 0,5 \text{ моль} \cdot \text{с}^{-1} = 1435 \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1}.$$

### Контрольне завдання № 15.10

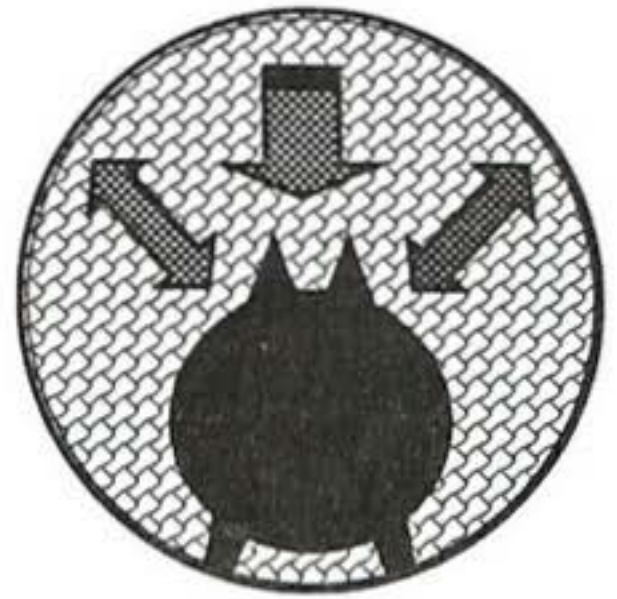
З якою швидкістю накопичується ентропія в системі, якщо хімічна спорідненість реакції дорівнює  $1660$  кДж  $\cdot$  моль $^{-1}$ , а швидкість реакції при температурі  $27$  °С становить  $5 \cdot 10^{-3}$  моль  $\cdot$  с $^{-1}$ ?

*Відповідь:*  $27,7 \cdot 10^{-3}$  Дж  $\cdot$  К $^{-1}$   $\cdot$  с $^{-1}$ .

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. До якого типу термодинамічних систем належать живі організми?
2. Що таке стаціонарний стан?
3. Порівняти рівноважний і стаціонарний стани.
4. Завдяки яким процесам відбувається зміна ентропії в живих системах?
5. Що називають швидкістю продукції ентропії?
6. Що таке дисипативна функція?
7. Сформулювати теорему Пригожина.

# 16. ТЕРМОРЕГУЛЯЦІЯ У ТВАРИН



*Терморегуляція* — це процес рефлекторної зміни теплопродукції і тепловіддачі організму, спрямований на підтримання постійності оптимального за даних умов рівня його теплового балансу з середовищем, що забезпечує відносну сталість температури тіла.

## 16.1. ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ТВАРИНИ

*Теплообмін* — це обмін тепловою енергією між організмом та оточуючим середовищем, що відбувається завдяки *обміну речовин* та *процесів тепловіддачі*, що складаються з процесів теплового випромінювання, випаровування, конвекції і теплопровідності.

Загальний тепловий баланс тварини в стаціонарному стані описується рівнянням:

$$M + R_n - \lambda E - C - G = 0, \quad (16.1)$$

де  $M$  — швидкість продукції теплоти завдяки обміну речовин;  $R_n$  — сумарне постачання теплоти завдяки теплового випромінювання,  $\lambda E$  — втрати теплоти через пароутворення,  $C$  — втрати теплоти за конвекції,  $G$  — втрати теплоти через теплопровідність при контакті тварини з підлогою, на якій вона стоїть або лежить. Всі ці компоненти вимірюються в  $Вт \cdot м^2$ .

*Обмін речовин* бажано оцінювати, коли тварина позбавлена корму і перебуває в стані спокою. Основний обмін речовин  $M_o$  (що вимірюється в  $Вт$ ) пов'язаний з масою  $M_m$  тіла тварини співвідношенням:

$$M_o = a M_m^n, \quad (16.2)$$

де  $a$  і  $n$  — константи, причому  $a = 3,4 \text{ Вт} \cdot \text{кг}^{-0,75}$  при порівнянні тварин одного виду, тоді як  $a = 1,8 \text{ Вт} \cdot \text{кг}^{-0,75}$  при порівнянні тварин різних видів для мас тварин, що лежать в інтервалі  $0,01 \div 10$  кг. Типо-



ве значення середньої швидкості основного обміну речовин, що припадає на одиницю площі поверхні тіла тварини, становить близько  $50 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Швидкість основного обміну речовин гомойотермних тварин (тих, що зберігають постійну температуру за допомогою волосяного покриву, підшкірного жиру, оперення тощо) змінюється від  $10^{-4} \div 10^{-2} \text{ Вт}$  для комах та дрібних тварин до  $10^2 \text{ Вт}$  для великих тварин. Прогулянка потребує близько 30 % додаткової метаболічної енергії. Для пойкилотермних тварин (не здатних підтримувати температуру тіла на постійному рівні) ці інтервали на порядок менші. Швидкість обміну речовин у цих тварин більш повільна, на зміни температурних умов вони реагують поведінковими відгуками.

*Обмін через випромінювання.* Протягом дня на тварину діє пряме ( $800 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ) та розсіяне сонячне випромінювання ( $100 \div 250 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ), а також довгохвильове випромінювання земної поверхні ( $320 \div 370 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ). Випромінювання, що досягає тіла тварини, поглинається, відбивається або пропускається твариною. Якщо випромінювання повністю поглинається, таке тіло називають *абсолютно чорним*; якщо поглинається лише частина зовнішнього випромінювання, таке тіло називають *сірим*. Реальні тіла є джерелами сірого випромінювання, однакового за складом з випромінюванням абсолютно чорного тіла, але з меншою енергетичною яскравістю. Тварини характеризуються поглинальною і випромінювальною здатністю.

Кількість поглинутої твариною енергії визначається за законом Стефана-Больцмана:

$$Q_a = Sa\sigma T_s^4, \quad (16.3)$$

де  $S$  — площа поверхні тіла тварини,  $a$  — поглинальна здатність тварини,  $\sigma$  — стала Стефана-Больцмана,  $T_s$  — температура поверхні тіла тварини.

Кількість енергії, що випромінюється твариною, визначається за виразом:

$$Q_e = S\epsilon\sigma T_e^4, \quad (16.4)$$

де  $\epsilon$  — випромінювальна здатність тіла тварини,  $T_e$  — температура сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні.

Поглиналину та випромінювальну здатність сільськогосподарських тварин та людини наведено в табл. 16.1.

Таким чином, випромінювальний баланс тварини визначається за виразом:

$$R_n = Q_a - Q_e = S\sigma (aT_s^4 - \epsilon T_e^4). \quad (16.5)$$

Поглиналина здатність тварини залежить від кольору шкіряного покриву — тварини білої масті поглинають меншу кількість сонячного випромінювання, ніж тварини з чорним забарвленням.

**16.1. Поглинальна та випромінювальна здатність  
сільськогосподарських тварин та людини**

Об'єкт	Поглиналина здатність $\alpha$	Випромінювальна здатність $\epsilon$
Корова		
Біла	0,50	0,95
Бура	0,80	0,95
Чорна	0,90	0,95
Свиня		
Біла	0,50	0,95
Чорна	0,90	0,95
Вівця		
без вовни	0,60	0,95
з вовною	0,75	0,95
Людина	0,65+0,80	0,95

Відбивання сонячного випромінювання від тварини відбувається в видимій та інфрачервоній областях спектра; рівень відбивання залежить від кута падіння сонячного випромінювання і забарвлення тварини. Так, наприклад, в видимій області спектра (400÷750 нм) криві відбивання волосяного покриву великої рогатої худоби характеризуються монотонним зростанням від 25 до 70 % для тварин світлої та від 1,6 до 4,3 % — для тварин темної масті. Максимум відбивання поверхні тварини припадає на 1÷2 мкм.

Крім того, оптичне випромінювання, що проходить крізь шкіру тварини, зазнає розсіювання на структурних елементах тканини. Характер розподілу розсіяного випромінювання залежить від довжини хвилі оптичного випромінювання, що падає на поверхню тіла тварини, розмірів та форми біологічних структур, що беруть участь у розсіюванні.

*Втрати теплоти через пароутворення  $\lambda E$*  визначається процесами втрати теплоти через дихання та потовиділення (тут  $\lambda = 2,43 \cdot 10^6$  Дж · кг<sup>-1</sup> — прихована теплота пароутворення,  $E$  — втрати вологи за дихання або потовиділення). У процесі випаровування молекули рідини з найбільшою швидкістю і кінетичною енергією залишають поверхню тіла тварини, в результаті чого температура поверхні знижується. Цей процес відбувається тоді, коли температура повітря вища, ніж температура тіла. Типові значення втрат енергії через випаровування змінюються від 7,0 до 20,9 Вт · м<sup>-2</sup>.

Якщо потовиділення відсутнє, втрати теплоти через пароутворення залежать лише від процесів дихання та дифузії водяної пари крізь шкіру і становлять лише 8÷10 % втрат теплоти за обміну речовин при помірних (20÷30 °С) температурах. Зростання температури навколишнього середовища призводить до монотонного збільшен-

ня втрат теплоти через випаровування. При високих (43÷45 °С) температурах процес випаровування може перевищувати втрати теплоти за обміну речовин.

Процес потовиділення вдвоє збільшує втрати теплоти (людина спроможна виділити близько 1,5 кг вологи за годину, що еквівалентно 600 Вт · м<sup>2</sup>). Вівці та собаки здатні компенсувати неспроможність потіти важким диханням, тоді як велика рогата худоба втрачає велику кількість теплоти саме через потовиділення. Швидкість випаровування залежить від поверхні тіла тварини. Процес виділення поту потовими залозами тварин відбувається рефлекторно. Кількість потових залоз у різних тварин становить: 25 см<sup>2</sup> у свині, 250 см<sup>2</sup> у вівці, 800 см<sup>2</sup> у корови, 1600 см<sup>2</sup> у зебу. Максимальна швидкість потовиділення протягом години змінюється від 30 г · м<sup>2</sup> (вівця) до 200 г · м<sup>2</sup> (корова). Одним зі способів, який використовують деякі тварини (корови і свині) для підвищення втрат теплоти, є намагання викачатися в болоті. Потік теплоти через випаровування в цьому разі у свині може досягати 800 г · м<sup>2</sup> за годину.

У птахів втрати вологи через випаровування залежать від маси тіла відповідно до співвідношення:

$$E = 0,432M^{0,585}, \quad (16.6)$$

де  $E$  — втрати вологи через випаровування в грамах протягом дня,  $M$  — маса птаха в грамах.

*Конвекція* — перенесення теплоти в рідинах, газах або сипких середовищах потоками речовини. Є різні види конвекції залежно від причин, що її породжують. *Вільна конвекція* виникає в полі сили тяжіння через неоднорідності густини, що спричинюються різницею температур. Нагріта речовина під впливом архімедової сили переміщується відносно менш нагрітої речовини у напрямку, протилежному напрямку сили тяжіння. *Вимушена конвекція* викликається зовнішнім механічним впливом на середовище (наприклад, вентилятором).

Розглянемо, як можна оцінити обмін теплотою тваринами через *конвекцію*. Кількість теплоти  $Q$  (Вт · м<sup>2</sup>), якою обмінюється тварина з навколишнім середовищем за одиницю часу з одиниці поверхні тіла (густина потоку теплоти) завдяки конвекції, можна оцінити, припускаючи, що тіло тварини являє собою циліндр діаметром  $D$ , за допомогою виразу:

$$Q = \frac{K_{нов}(T_s - T_a)}{R \cdot \ln\left(\frac{R + \delta}{R}\right)}, \quad (16.7)$$

де  $K_{нов}$  — коефіцієнт теплопровідності повітря,  $R = D/2$  — радіус циліндра,  $\delta$  — товщина поверхневого шару, в межах якого має місце

конвекція,  $T_s$  і  $T_a$  — температура відповідно поверхні тіла тварини і навколишнього середовища.

Величина  $\delta$  оцінюється для тіл циліндричної форми за допомогою співвідношення:

$$\delta(\text{мм}) = 5,8 \cdot \sqrt{\frac{D(\text{м})}{V(\text{м/с})}}, \quad (16.8)$$

де  $V$  — швидкість руху повітря вздовж поверхні тіла тварини.

Крім того, можна застосовувати для оцінки густини конвекційного потоку теплоти такий вираз:

$$C = h_c(T_s - T_a) = k_1 V^{0,5} D^{-0,5} (T_s - T_a), \quad (16.9)$$

де  $h_c = k_1 V^{0,5} D^{-0,5}$  — коефіцієнт конвекції,  $k_1 = 3,89 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{0,5} \cdot \text{°C}^{-1}$  — коефіцієнт пропорційності (для тіл циліндричної форми),  $V (\text{м} \cdot \text{с}^{-1})$  — швидкість руху повітря вздовж поверхні тіла тварини (швидкість конвекційного потоку),  $D (\text{м})$  — характеристичний розмір тварини,  $T_s$  — температура поверхні тіла тварини,  $T_a$  — температура повітря.

*Теплопровідність* доцільно розглядати як шлях передачі теплоти від внутрішніх ділянок тіла навколишньому середовищу та під час контакту тварини з підлогою. Швидкість перенесення теплоти залежить від різниці температур тіла тварини і навколишнього середовища, площі поверхні тіла та коефіцієнта теплопровідності. Типові значення коефіцієнта теплопровідності деяких елементів покриву тварини наведено в табл. 16.2.

**16.2. Значення коефіцієнта теплопровідності деяких елементів покриву тварини (при температурі 20 °C)**

Речовина	Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Жир	0,205
Шкіра	0,502
М'язи	0,4
Хутро:	
собака, вовк	0,054
білий ведмідь	0,063
лисиця, бобер	0,052
заєць	0,039
єнот	0,048
олень	0,036

В процесі передачі теплоти навколишньому середовищу відіграють певну роль ізолюючі властивості шкіряного, волосяного покриву, жирового прошарку тварини, оперення птиці. Ізолюючі властивості зовнішнього покриву тварин характеризуються значеннями коефіцієн-

та ізоляції, що визначається як величина, обернена потоку теплоти, що припадає на одиницю площі та одиницю різниці температур.

Вимірюється коефіцієнт теплоізоляції в  $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ . Значення цього коефіцієнту для тканинного або волосяного покривів наведено в табл. 16.3.

### 16.3. Ізолюючі властивості зовнішнього покриву тварин

Теплоізоляційний матеріал	Коефіцієнт теплоізоляції, $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$
Жир	38
Тканина	14
Шерсть корови	50
Вовна вівці	102
Шерсть лайки	157
Хутро рисі	170
Оперення гуски	122

Аналіз даних цієї таблиці свідчить, що більш високими теплоізоляційними властивостями характеризується шерсть та хутро тварин. Це можна пояснити участю розміщеного між волосинами повітря, що має невеликий коефіцієнт теплопровідності ( $0,0257 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ). Спробуємо вирахувати ізоляційні властивості зовнішнього покриву тварини (вовни, хутра, оперення). Швидкість потоку теплоти обернено пропорційна рівню  $I$  ізоляції покриву і обернено пропорційна різниці внутрішньої температури  $T_m$  і зовнішньої температури  $T_s$  поверхні тіла тварини:

$$M - \lambda E = (T_m - T_s)/I. \quad (16.10)$$

Розв'язуючи останнє рівняння відносно  $T_s$ , отримуємо:

$$T_s = T_m - I(M - \lambda E). \quad (16.11)$$

Комбінуючи рівняння (16.1) і (16.11) з урахуванням рівнянь (16.5) і (16.9), можна отримати вираз:

$$M - \lambda E + Q_a - \varepsilon \sigma [T_m - I(M - \lambda E)]^4 - k_1 V^{0.5} D^{-0.5} (T_s - T_a) [T_m - T_s - I(M - \lambda E)] - G = 0. \quad (16.12)$$

Передача теплоти твариною під час її контакту з підлогою залежить від матеріалу підлоги та температури оточуючого середовища (табл. 16.4).

Цікаво порівняти ситуації, що характеризують утримання сільськогосподарських тварин у приміщеннях: згідно з даними табл. 15.3, бетон має майже в 20 разів більшу теплопровідність ніж дерево. Отже, тварина, яка лежить на бетонній підлозі, віддає в 20 разів більшу теплоту, ніж тоді, коли її утримують на дерев'яній

#### 16.4. Втрати теплоти через теплопровідність тваринами залежно від матеріалу

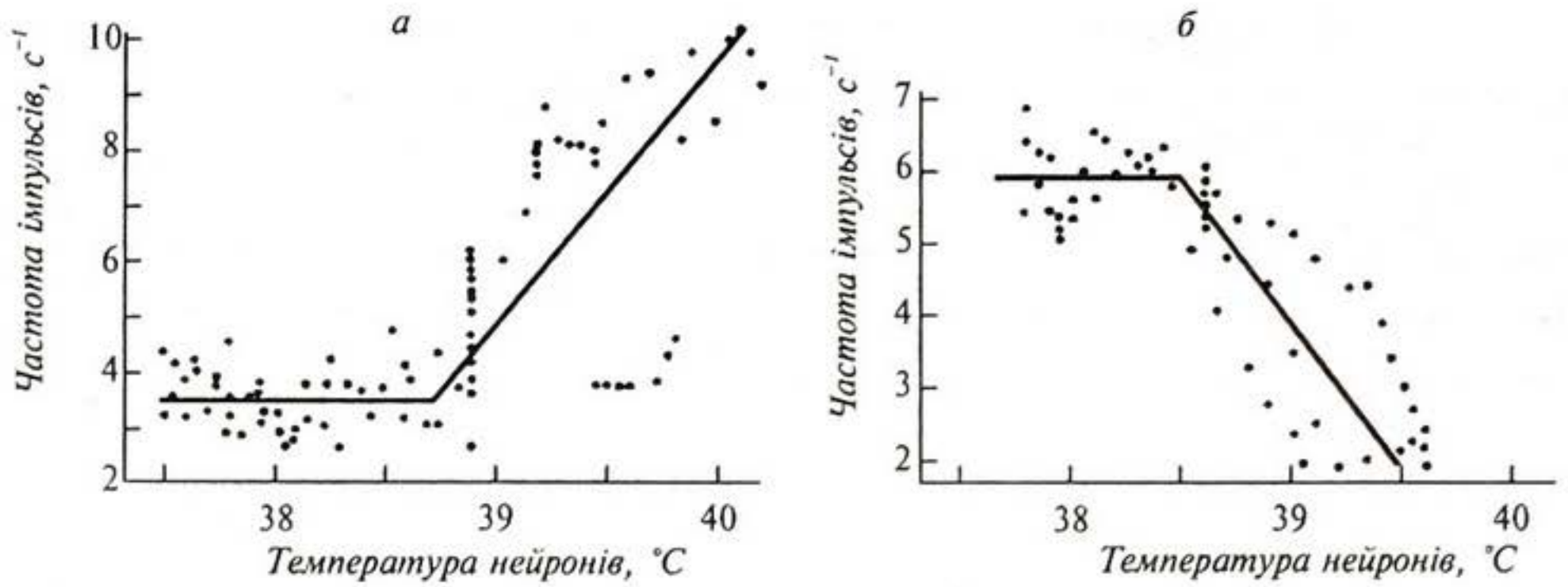
Температура навколишнього середовища, °С	Потік теплоти, Дж·с <sup>-1</sup>		
	Бетон	Дерево	Полістирол
20	2,20	1,16	0,35
30	1,28	0,70	0,12

підлозі. Якщо ж, наприклад, бетонну підлогу, на якій утримують порося при температурі 10 °С, вкрити 10-ти сантиметровим шаром соломи (нагадаємо, що теплопровідність повітря, що заповнює соломі, в 95 разів менша, ніж бетону), то це призводить до ефекту, еквівалентному підвищенню температури до 20 °С.

Ще одна важлива теплофізична характеристика тварини — *коефіцієнт температуропровідності* (формула 15.17). Низька температуропровідність приводить до повільного прогрівання або охолодження тканин, що в свою чергу супроводжується обмеженим поширенням тепла всередині організму. Тварини, що мають велику тканинну масу, повільно нагріваються або охолоджуються. Таким чином, коефіцієнт температуропровідності характеризує теплову інерційність тварини.

## 16.2. ТЕРМОСТАТИЧНА РЕГУЛЯЦІЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТІЛА

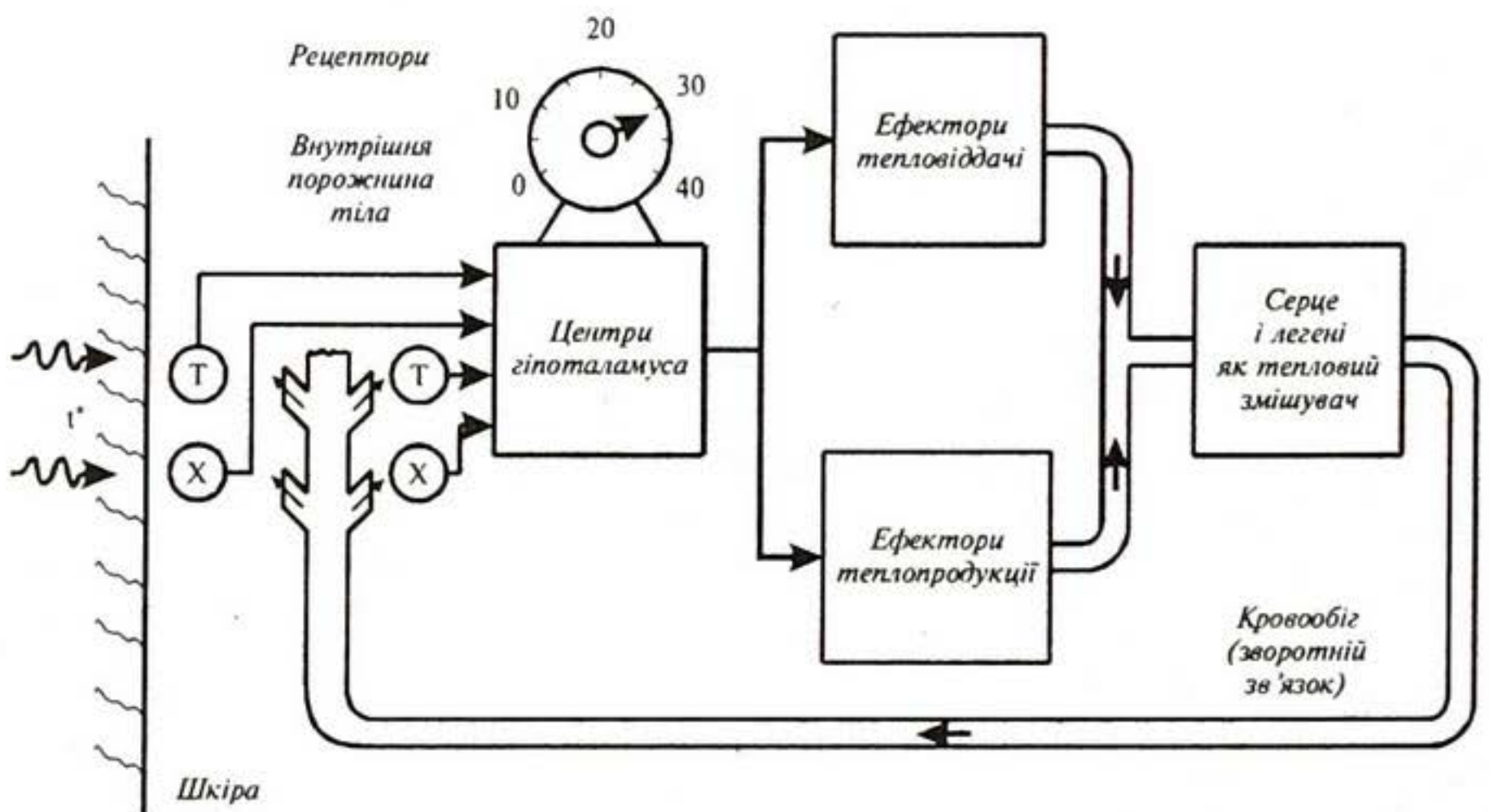
Всі живі організми діляться на *ендотермів*, які регулюють температуру тіла за рахунок внутрішньої теплопродукції, та *ектотермів*, які покладаються на зовнішні джерела тепла. Наприклад, ссавці і птахи є ендотермами, а інші тварини — ектотермами. Температура тіла у ендотермів та деяких ектотермів регулюється нейронним термостатом. В основі системи термостатичної регуляції лежить терморегуляторний центр, розміщений в *гіпоталамусі*. В передній частині гіпоталамуса містяться нейрони, що різко збільшують частоту імпульсів при підвищенні температури; саме ці нейрони активізують реакції, спрямовані на відведення надлишкового тепла (наприклад, розширення судин, потовиділення). Інші нейрони здатні зменшувати частоту імпульсів після того, як температура гіпоталамуса збільшується і є більше певної (опорної) величини (рис. 16.1). Крім того, є й такі нейрони, які збільшують частоту імпульсів, якщо температура гіпоталамуса стане меншою опорної температури. Ці нейрони активізують реакції, спрямовані на підвищення температури (тремтіння, обмін бурюю жирною тканиною)



**Рис. 16.1.** Залежність електричної активності нейронів гіпоталамуса від температури: *а* — збільшення частоти імпульсації; *б* — зменшення частоти імпульсації

і збереження тепла в організмі завдяки піднімання волосся (піломоторні реакції).

Фізичну схему терморегуляції у ссавців, побудовану на принципі зворотного зв'язку, наведено на рис. 16.2. Центри гіпоталамуса узагальнюють інформацію, що подається від розкиданих по організмі центральних і периферійних терморецепторів, порівнюють її з опорною температурою і діють у відповідному напрямку на механізми або тепловіддачі, або теплопродукції. Охолоджена чи нагріта таким чином кров розподіляється по організмі, постачаючи інформацію (зворотний зв'язок) терморецепторам і гіпоталамічним центрам. Активація термoeфекторів (бурої жирової тканини, м'язів, поверхні, з якої випаровується волога) припиняється, коли температура тіла досягає опорної температури.



**Рис. 16.2.** Терморегуляторний центр, розміщений в гіпоталамусі (пояснення в тексті)

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Оцінити кількість поглинутої птахом кардиналом (*Richmondena cardinalis*) енергії  $Q_a$  з такими характеристиками теплообміну: швидкість продукції теплоти за рахунок обміну речовин  $M = 106,8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ , втрати теплоти через пароутворення  $\lambda E = 3,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ , рівень ізоляції  $I = 0,573 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , внутрішня температура тіла  $T_m = 38,5 \text{ }^\circ\text{С}$ . Втратами теплоти за конвекції і теплопровідності знехтувати.

### Розв'язок

Рівняння теплового балансу за умовами задачі має вигляд:

$$M - \lambda E + Q_a - es[T_m - I(M - \lambda E)]^4 = 0.$$

Звідки

$$Q_a = -(M - \lambda E) + es[T_m - I(M - \lambda E)]^4.$$

З урахуванням того, що  $M - \lambda E = 106,8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} - 3,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} = 103,3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ , підставляємо числові дані в останнє рівняння:

$$Q_a = -103,3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} + 0,95 \cdot 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4} \times \\ \times [(38,5 \text{ }^\circ\text{С} + 273,15 - 0,573 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{Вт}^{-1} (103,3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}))^4] = 115,29 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

### Приклад

Теля чорної масті утримують у приміщенні з температурою  $22 \text{ }^\circ\text{С}$ . Визначити втрати теплоти через випромінювання, якщо температура поверхні тіла теляти  $39,5 \text{ }^\circ\text{С}$ , а площа поверхні тіла дорівнює  $2 \text{ м}^2$ .

### Розв'язок

Використовуючи табл. 16.1, підставляємо числові дані у рівняння (16.5):

$$R_n = Q_a - Q_e = R_n = Q_a - Q_e = Ss(aT_s^4 - eT_e^4) = \\ = 2 \text{ м}^2 \cdot 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4} \cdot [0,9 \cdot (39,5 + 273,15)^4 - \\ - 0,95 \cdot (22 + 273,15)^4] = 15,88 \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}.$$

### Контрольне завдання № 16.1

Визначити втрати теплоти через випромінювання коровою бурої масті, якщо температура поверхні тіла  $27 \text{ }^\circ\text{С}$ , температура повітря  $-3 \text{ }^\circ\text{С}$ , а площа поверхні тіла дорівнює  $4 \text{ м}^2$ .

Відповідь:  $325 \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}$ .

### Приклад

Терморегуляційні процеси у бджіл відбуваються в інтервалі температур  $0 \div 50 \text{ }^\circ\text{С}$ . Визначити довжину хвилі  $\lambda_{\text{max}}$ , на яку припадає максимум випромінювальної здатності тіла бджоли при температурі  $0 \text{ }^\circ\text{С}$ .

### Розв'язок

Використовуючи співвідношення (15.19), знайдемо:

$$\lambda_{\text{max}} = 2,897756 \cdot 10^{-3} \cdot 273,15^{-1} = 10,6 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 10,6 \text{ мкм}.$$



### Контрольне завдання № 16.2

Розрахувати  $\lambda_{max}$  бджоли при 50 °С.

Відповідь:  $\lambda_{max} = 8,97$  мкм.

#### Приклад

Визначити втрати вологи протягом дня через випаровування у курки масою 1,5 кг.

#### Розв'язок

Підставляємо числові значення в рівняння (16.6):

$$E = 0,432M^{0,585} = 0,432 \cdot 1500^{0,585} = 31 \text{ г.}$$

### Контрольне завдання № 16.3

Визначити втрати вологи протягом дня через випаровування у гуски масою 5 кг.

Відповідь: 63 г.

#### Приклад

Розрахувати густоту потоку теплоти, яким обмінюється завдяки конвекції вівця з навколишнім середовищем, якщо тіло вівці можна апроксимувати циліндром діаметром 60 см. Температура поверхні тіла 38 °С, температура навколишнього середовища 20 °С, швидкість руху повітря 80 см · с<sup>-1</sup>.

#### Розв'язок

Визначимо товщину поверхневого шару, в межах якого відбувається конвекція, за допомогою формули (16.8):

$$\delta = 5,8 \cdot \sqrt{\frac{D}{V}} = 5,8 \cdot \sqrt{\frac{0,6}{0,8}} = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Підставимо числові дані у формулу (16.7) з урахуванням того, що коефіцієнт теплопровідності повітря при температурі 20 °С рівний 0,0257 Вт · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>.

$$Q = \frac{K_{\text{нов}}(T_s - T_a)}{R \cdot \ln\left(\frac{R + \delta}{R}\right)} = \frac{0,0257 \cdot (38 - 20)}{0,3 \cdot \ln\left(\frac{0,3 + 0,005}{0,3}\right)} = 93 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2.$$

### Контрольне завдання № 16.4

Використовуючи дані попередньої задачі, визначити густину конвекційного потоку теплоти за допомогою формули (16.9). Порівняти результати.

### Контрольне завдання № 16.5

Розрахувати густину потоку теплоти, яким обмінюється завдяки конвекції з навколишнім середовищем тварина діаметром 0,20 м, якщо температура тіла 40 °С, швидкість руху повітря 5 м · с<sup>-1</sup>.

Відповідь: 446,96 Вт · м<sup>-2</sup>.

### Приклад

Оцінити кількість теплоти, що переноситься за одиницю часу свинею, яка лежить на бетонній підлозі товщиною 8 см при температурі 0 °С. Площа тіла свині 3000 см<sup>2</sup>; теплопровідність бетону 2,43 Вт · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>, температура тіла 30 °С.

### Розв'язок

Використовуємо формулу (15.16):

$$\begin{aligned}\Delta Q &= -\lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\Delta X} \cdot \Delta t = \\ &= -2,43 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \cdot 3000 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 (0 - 30) \text{ К} / 8 \cdot 10^{-2} \text{ м} = \\ &= -2,43 \cdot 3 \cdot 10^{-1} \cdot (-30) / 8 \cdot 10^{-2} = 273,37 \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}.\end{aligned}$$

### Контрольне завдання № 16.6

Оцінити кількість теплоти, що переноситься за одиницю часу, згідно з даними попередньої задачі, якщо свиня лежить на дерев'яній підлозі.

*Відповідь:* 14,17 Дж · с<sup>-1</sup>.

### Контрольне завдання № 16.7

Цегляна стінка тваринницької ферми має розміри 4 м × 10 м × 0,15 м. Визначити кількість теплоти, що пройде протягом 12 годин крізь стінку, якщо зовнішня температура дорівнює 5 °С, внутрішня температура 20 °С. Коефіцієнт теплопровідності цегли становить 0,8 Вт · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>.

*Відповідь:* 138,24 · 10<sup>6</sup> Дж.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називають терморегуляцією? Назвати основні процеси терморегуляції у тварин.
2. З яких процесів складається теплообмін тварини?
3. Як оцінити обмін речовин?
4. Від чого залежать втрати теплоти через випаровування?
5. Від чого залежать втрати теплоти через пароутворення?
6. Що таке конвекція? Назвати основні види конвекції.
7. Від чого залежать втрати теплоти через теплопровідність?
8. Як пов'язані теплопровідність та теплоізоляційні властивості зовнішнього покриву тварини?
9. Пояснити механізми термостатичної регуляції температури тіла тварини.

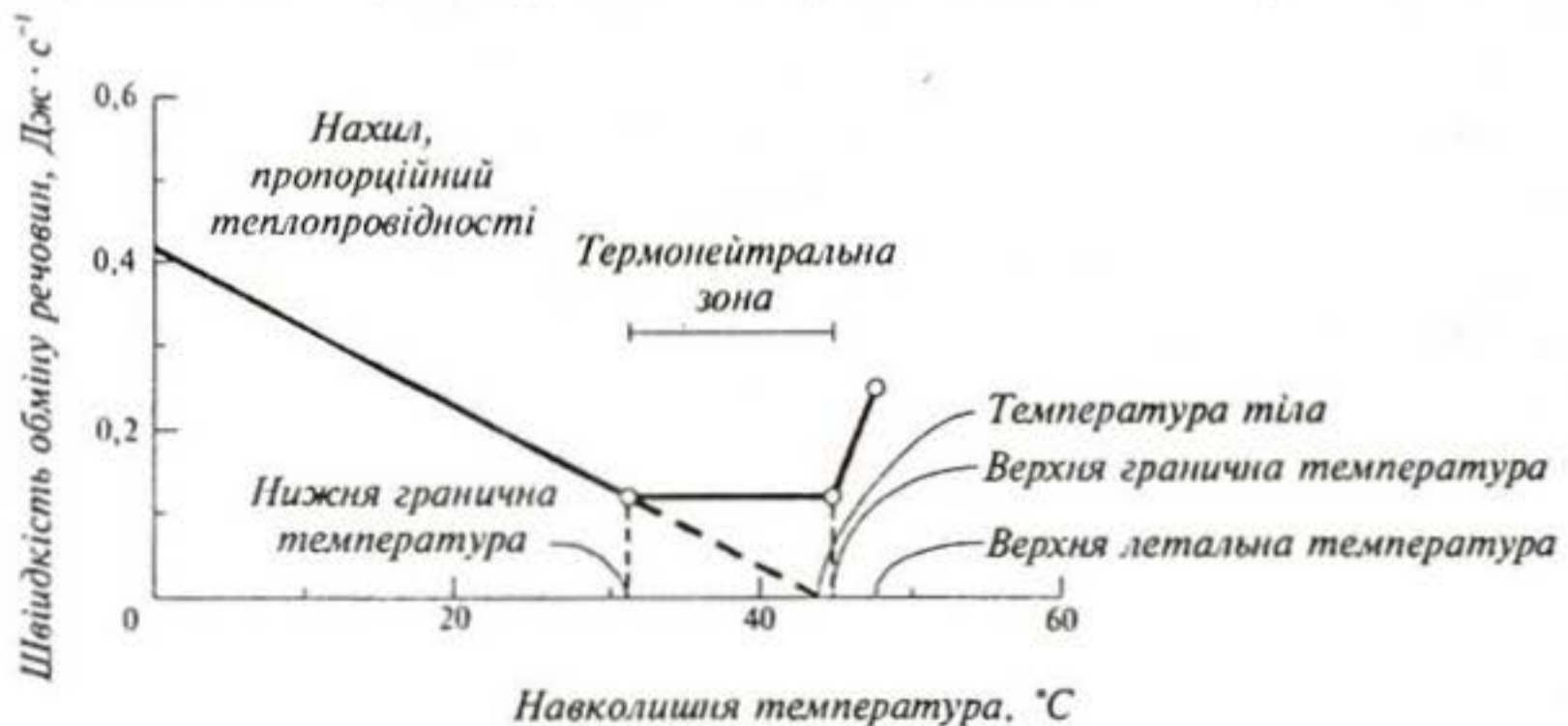


## 17. ТЕРМОБІОЛОГІЯ

*Термобіологія* — розділ біофізики, що вивчає механізми впливу зовнішніх теплових факторів на живі організми та реакцію організмів на ці фактори (терморцепцію).

### 17.1. ВПЛИВ ТЕПЛОВИХ ФАКТОРІВ НА ТВАРИН

Ендотермні організми здатні підтримувати температуру тіла на постійному ( $35\div 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) рівні; саме через це вони віддають теплоту навколишньому середовищу. Втрати тепла вповільнюються завдяки теплоізоляції, функції якої виконують волосяний покрив, підшкірний жир, оперення, а також за допомогою регуляції кровообігу під поверхнею шкіри. Слід зазначити, що незважаючи на високу теплоізоляцію, процес збереження тепла в ендотермних тварин досягається завдяки інтенсивним метаболічним затратам. До теплопродукції ендотермних тварин можна застосувати концепцію *термонеutralної зони* (зони температурного комфорту) — області температур навколишнього середовища, в межах якої швидкість обміну речовин і, отже, теплопродукція не змінюється. В цих межах температур тварина не відчуває ні тепла, ні холода; для різних тварин ця область різна. Залежність



**Рис. 17.1.** Вплив навколишньої температури на швидкість обміну речовин ендотермних тварин

швидкості обміну речовин від навколишньої температури для ссавців або птахів наведено на рис. 17.1. При температурах, менших, ніж нижня гранична, ця швидкість збільшується лінійно; в межах термонеїтральної зони температура не змінюється; при температурах, що перевищують верхню граничну температуру, швидкість обміну речовин збільшується, доки температура не досягне летальних значень.

### 17.1.1. Вплив високих температур на ендотермних тварин

В умовах спекотного і сухого клімату ендотермні тварини мають перевагу, зумовлену невеликим значенням відношення «поверхня-маса» і високою теплоємністю. Через те, що тканини більшістю складаються з води, теплоємність цих тканин становить  $c_v = 4186,8 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  для інтервалу температур  $0-40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Отже, чим більша тварина, тим більшу кількість теплоти містить її тіло при даній температурі. Важливу роль в процесі тепловіддачі відіграє регуляція кровообігу: при високих температурах кровеносні судини шкіри розширюються і тепловіддача збільшується. Такі судини знаходяться, наприклад, у вухах слонів та мешканців пустелі Сахари — лисицеподібних фенеків (*Fennecus zerda*).

Якщо температура зовнішнього середовища перевищує верхню межу термонеїтральної зони, тепло активно розсіюється за допомогою процесу випаровування: або потовиділення, або пришвидшення дихання — *поліпноє*. Процес потовиділення не завжди супроводжується випаровуванням вологи. Ефективним способом збереження в організмі тепла і води є дихання через рот (а не тільки через ніс). Тварина (наприклад, собака), яка страждає від перегрівання, вдихає через ніс, а видихає через рот, забезпечуючи додаткове випаровування з поверхні язика. Із рис. 17.2 видно, що підвищення температури зовнішнього середовища впливає на інтенсивність процесів тепловіддачі. Так, кількість теплоти, якою обмінюється тварина завдяки випромінюванню або конвекції,

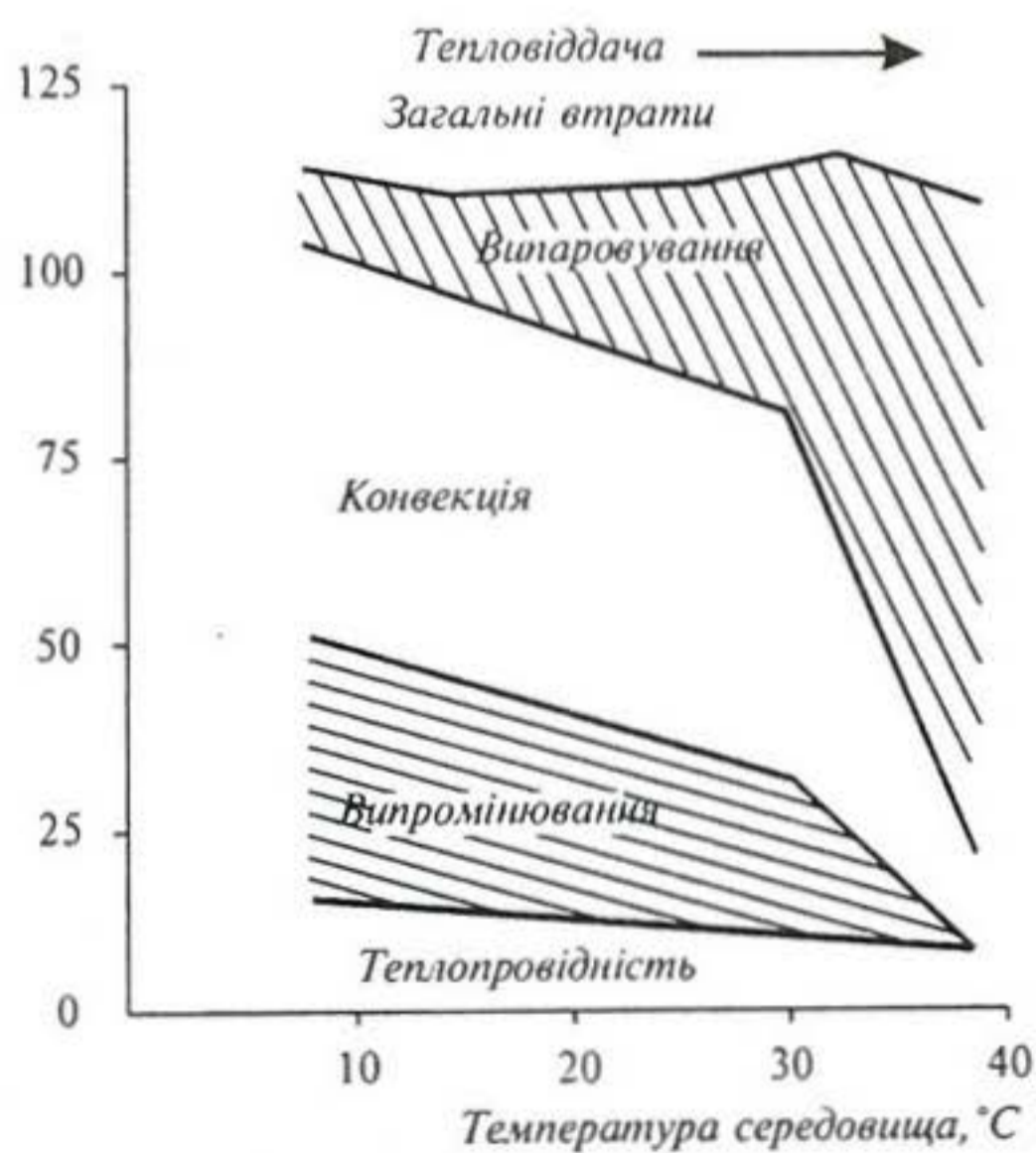


Рис. 17.2. Кількісні параметри втрати тепла твариною при різних температурах повітря

прямує до нуля, якщо температури тіла тварини і навколишнього середовища однакові (див. формули (16.5), (16.7), (16.9)). В той же час процес випаровування активізується зі зростанням температури.

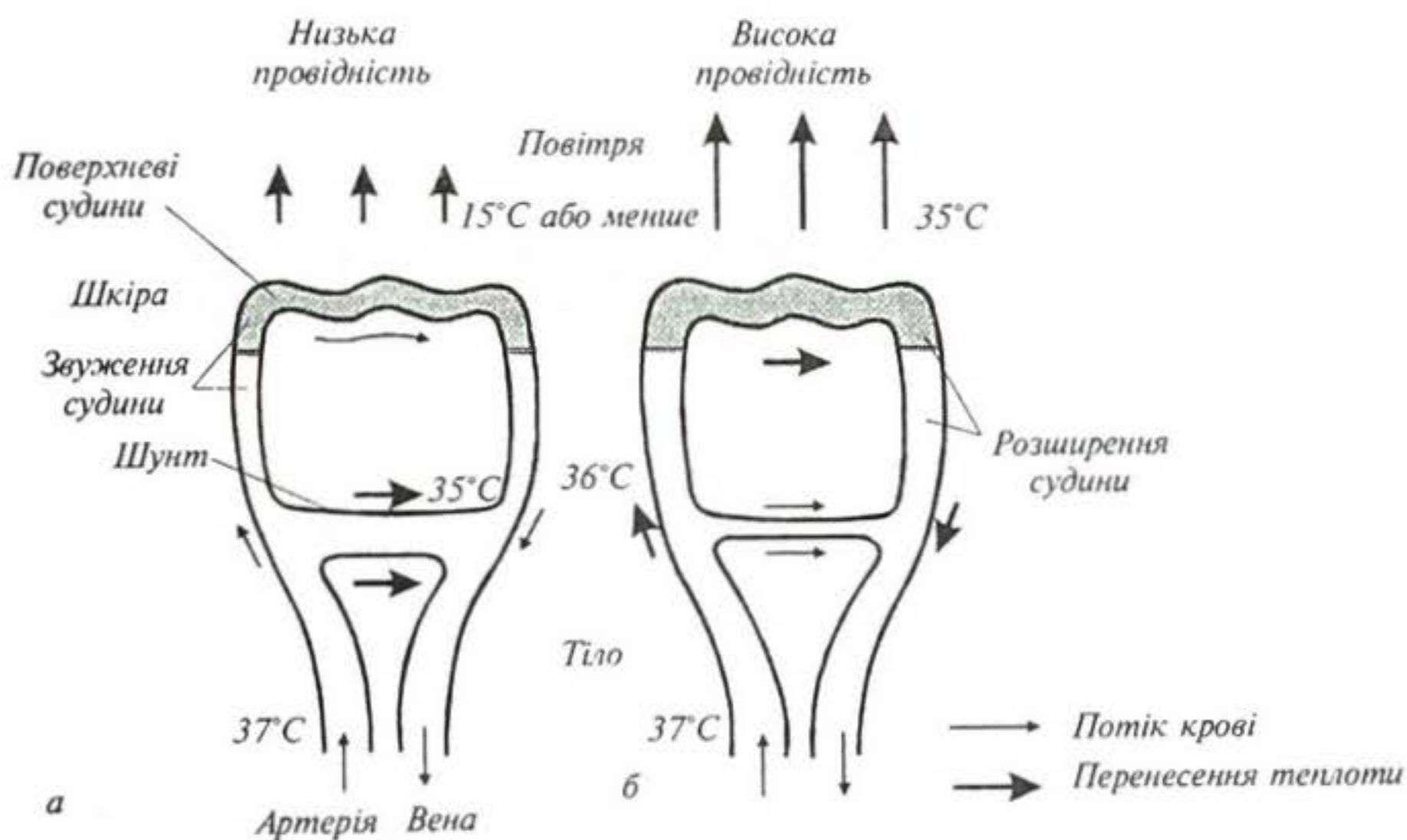
Високі температури викликають збільшення швидкості обміну речовин, що сприяє підвищенню продукції теплоти. Крім того, процеси дихання і випаровування спричиняють зневоднення організму. Стан організму, зумовлений підвищеною температурою тіла, називається *гіпертермією*. Коли сільськогосподарських тварин, мешканців європейських країн, транспортують у тропічні або субтропічні зони, вони стикаються з тепловими стресами. Втрата апетиту, зниження здатності споживати, перетравлювати та використовувати корми, порушення терморегуляції та обміну речовин — все це призводить, в свою чергу, до вповільнення розвитку тварин та зменшення тваринницької продукції. Розміри тварини впливають на її здатність протистояти гіпертермії. Так, дрібні (110÷250 г) гризуни, що мешкають в пустелі, можуть перебувати при температурах, що перевищують температуру тіла  $T_m$ , протягом 15÷30 хвилин, після чого вони ховаються в нору. Така велика тварина як верблюд (250 кг) може знаходитися в таких умовах цілий день, доки не віддасть залишки тепла вночі. В спекотну зволожену погоду тваринам важко віддавати теплоту через те, що процеси випаровування неефективні. Фізична робота, яку змушені виконувати тварини, призводить до небезпечного підвищення температури тіла. Аналогічна ситуація складається, коли собаку закривають в машині на сонці: продукти дихання насичують повітря водяною парою і подальші втрати теплоти стають неможливими. Перевищення значень температури 41,5÷42,5 °C призводить до серйозного порушення функціонування організму і втрати свідомості, тобто до *теплового удару*. Несприятливий вплив високих температур пов'язаний з відносною вологістю повітря — чим менша відносна вологість, тим вища вірогідність зневоднення організму. Безумовно, істотну роль відіграє тривалість дії високих температур.

Ще один спосіб уникнути впливу високих температур — *літня сплячка*, яку використовують дводишні риби, ропухи, пустельні змії.

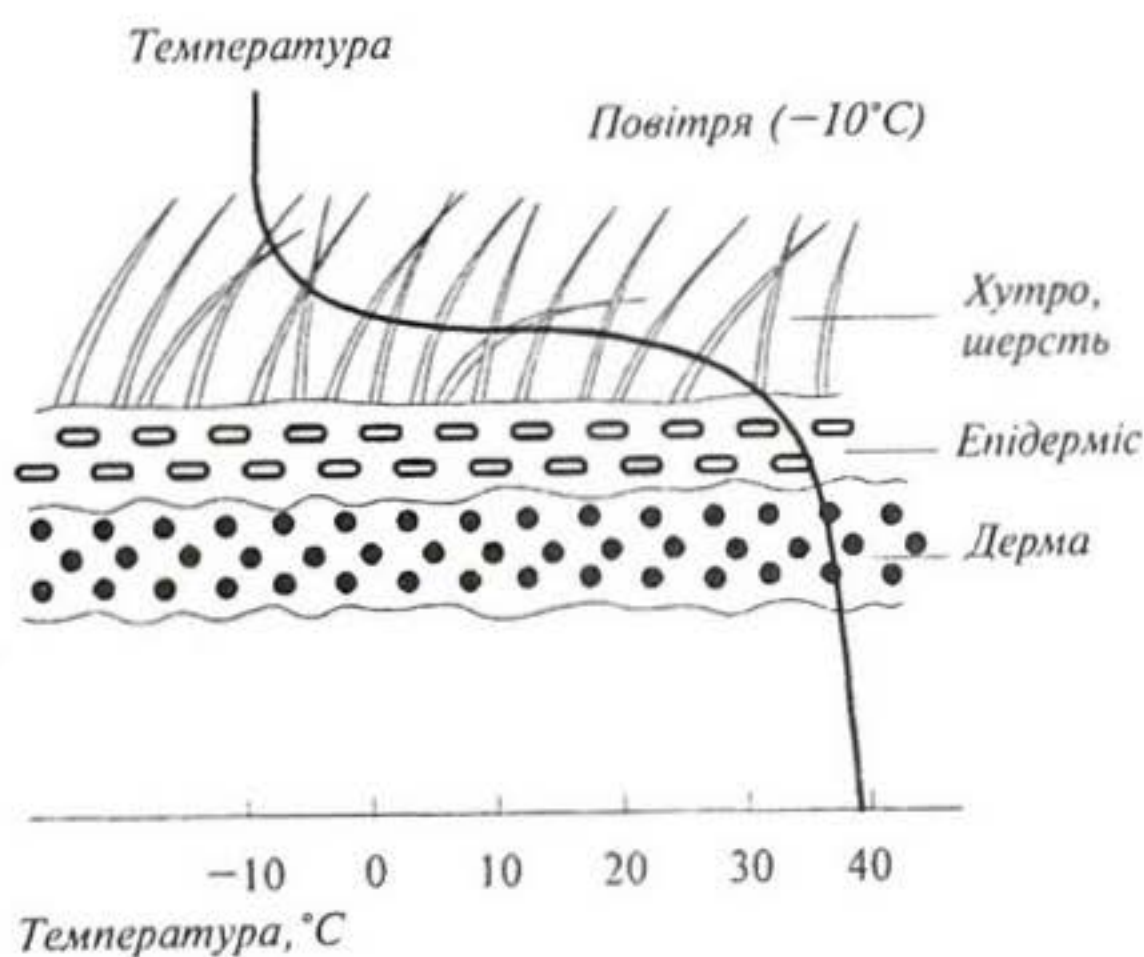
### **17.1.2. Вплив низьких температур на ендотермних тварин**

Ефективним способом протидії низьким температурам в ендотермних організмів є волосяний покрив або підшкірна жирова тканина, які виконують функції теплоізолятора (теплопровідність хутра та жиру, як можна впевнитися з табл. 16.2, невисока). Зміна теплопровідності під час тепловіддачі здійснюється завдяки інтенсивності периферійного кровообігу, або теплоізоляційної ефектив-

ності волосяного покриву чи оперення. Регуляція підшкірного кровообігу забезпечується шунтуванням артеріальної крові (рис. 17.3): в шкірі судини звужуються, тоді як потоки крові внутрішніх органів збільшуються. Те ж саме відбувається у підшкірному жирі. Шерсть позбавлена кровопостачання, тому її теплоізоляційні властивості змінюються при зміні кута нахилу волосся і товщини волосяного покриву тварини (рис. 17.4). Так, наприклад, корова чорно-рябої породи реагує на зменшення температури від  $+11,0^{\circ}\text{C}$  до  $-24,5^{\circ}\text{C}$  збільшенням кута нахилу волосу від  $28^{\circ}$  до  $63^{\circ}$  відповідно. Зволо-



**Рис. 17.3.** Роль підшкірного кровообігу в регуляції теплопровідності поверхневих тканин організму (пояснення в тексті)



**Рис. 17.4.** Градієнт температури, що встановлюється на волосяному та шкіряному покривах тварини північних широт

ження зовнішнього покриву призводить до зміни його теплоізоляційних властивостей. Так, наприклад, теплоізоляція гагари в повітрі становить  $1,6 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$ , тоді як в воді лише  $0,8 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Крім того, теплоізоляційні властивості тварин залежать від ареалу мешкання та пори року (рис. 17.5).

Якщо температура зовнішнього середовища менша за нижню межу термонеutralної зони, в процес включається *термогенез*. Відрізняють два типи термогенезу — через активацію ферментативних систем обміну жирів в організмі і завдяки тремтінню. Перший спосіб базується на тому, що під час розщеплення або окислення жирів виділяється тепло. У деяких тварин, які реалізують цей спосіб теплопродукції, є спеціалізована бура жирова тканина, що міститься в області шиї та між лопатками. В цій тканині, насиченій кровоносними судинами, де міститься багато мітохондрій, відбувається процес окислення жирів, що супроводжується виділенням тепла. Другий спосіб передбачає можливість нагрівання організму за м'язових скорочень. Нервова система активізує різні групи скелетних м'язів, в результаті чого виникають дрібні результуючі рухи — тремтіння. Хімічна енергія, що утворюється через гідроліз АТФ, вивільняється у вигляді тепла. Втрати тепла у таких тварин зменшуються також завдяки невеликому значенню відношення  $S/V$ , де  $S$  площа поверхні тіла, а  $V$  — об'єм тіла тварини. Така реакція на низькі температури властива свійським тваринам (свиням, худобі, вівцям) та птахам.

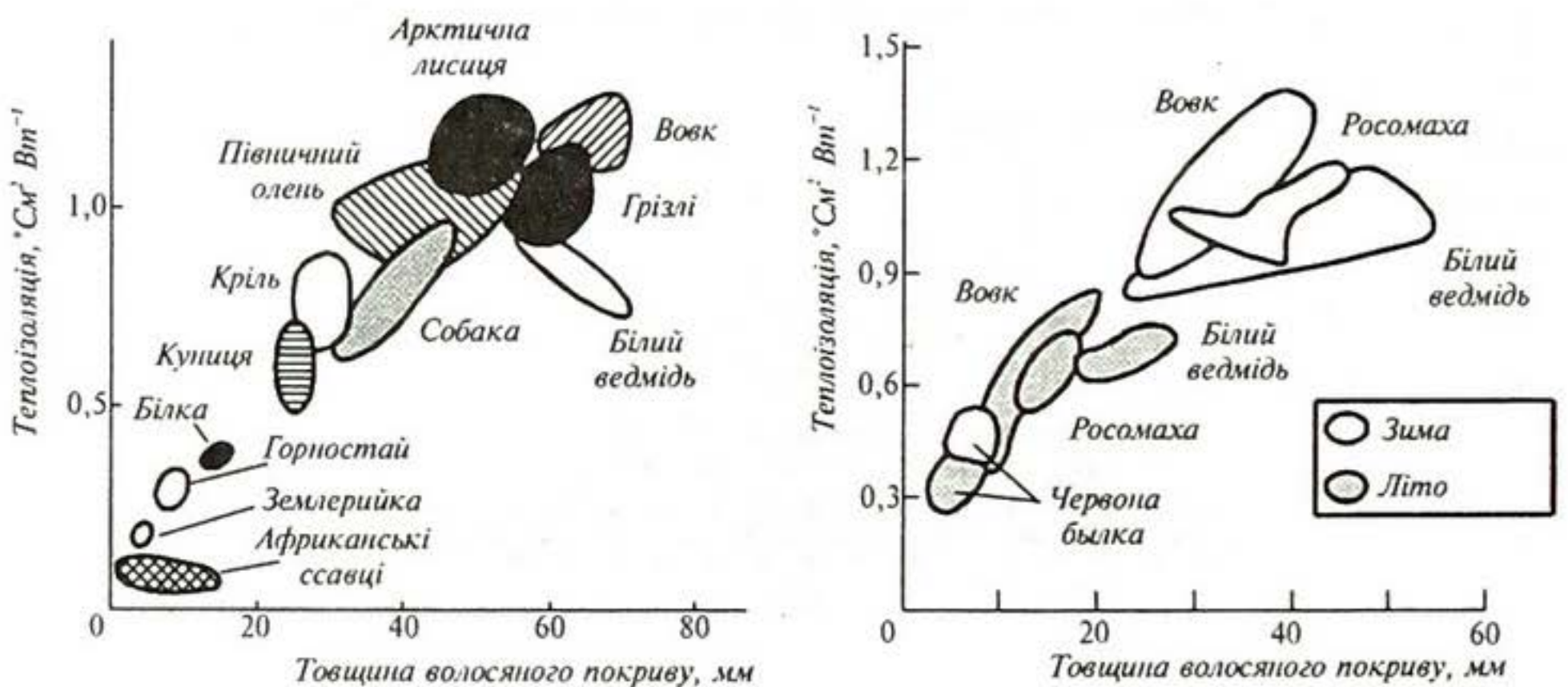


Рис. 17.5. Залежність теплоізоляційних властивостей волосяного покриву від його товщини:  
а — у тварин різних широт; б — у тварин в різні пори року

### 17.1.3. Вплив теплових факторів на ектотермних тварин

Ектотермні організми отримують теплоту з навколишнього середовища завдяки сонячному (прямому, розсіяному і відбитому) випромінюванню, атмосферному випромінюванню; теплообмін здійснюється шляхом теплопровідності, конвекції, випаровування і випромінювання.

У ектотермних організмів теплопровідність тіла висока, оскільки вони погано ізольовані. Внаслідок цього тепло, яке виділяється через обмінні процеси, швидко переходить в оточуюче середовище. З іншого боку, висока теплопровідність дає змогу легко поглинати тепло з довкілля. У ектотермів протягом еволюційного розвитку розвинулася певна стратегія виживання в стресових температурних умовах. Деякі ектотермні організми спроможні змінювати частоту серцевих скорочень або кровообміну в поверхневих тканинах, завдяки чому нагрівання тіла проходить значно швидше, ніж охолодження. Ектотерми, що мешкають в умовах холодного клімату, мають в клітинах речовини — *антифризи*, що дають змогу витримувати температури нижче нуля; інші використовують тремтіння або скорочення м'язів, або регулюють підшкірний кровообіг. Невеликі тварини використовують можливість зміни мікроклімату за таких поведінкових заходів як перехід з освітлених зон в затінок, обертальних рухів, вертикальних переміщень, використання гнізда чи нори. До поведінкової стратегії тварин можна віднести *зимову сплячку* або *заціпеніння* амфібій, рептилій. Комахам властива *діапауза* — період припиненого розвитку, що зумовлює синхронізацію життєвого циклу комахи з умовами навколишнього середовища. Під час діапаузи комахи значно зменшують швидкість дихання, збільшують в'язкість внутрішньої рідини або підвищують рівень антифризу (гліцерину). У деяких трав'яїдних комах діапауза триває близько 10 місяців; активність комах підвищується лише в період цвітіння рослин.

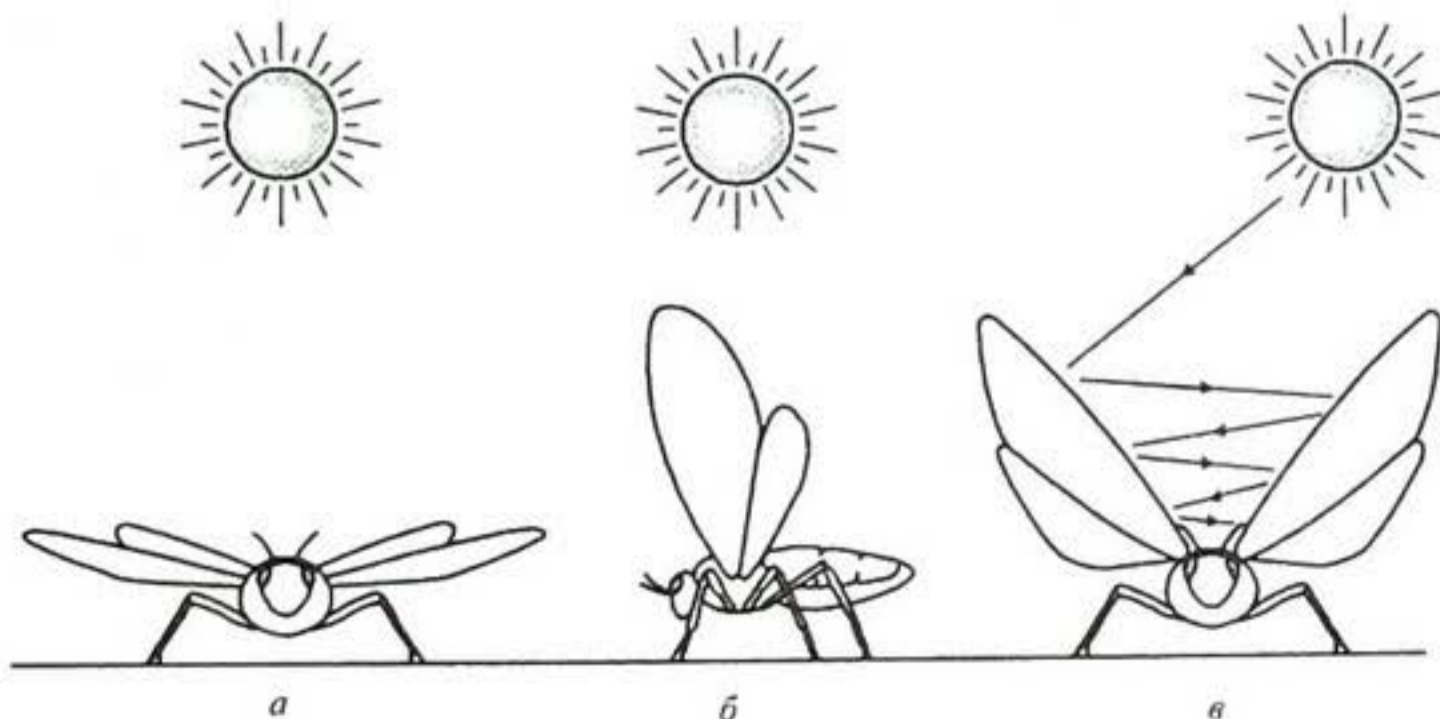


Рис. 17.6. Три положення, які може приймати комаха під сонячним опромінюванням: а — дорсальне; б — латеральне; в — при якому відбувається багаторазове відбивання сонячного випромінювання



### **17.1.4. Вплив теплових факторів на рибу**

Температура навколишнього середовища є важливим зовнішнім фактором для риби, більшість з яких нерестяться весною. Оптимальна для нересту і ембріонального розвитку температура не перевищує 8 °С. Молодь і дорослі риби мають інші діапазони оптимальних температур: 20÷21 °С для лососевих, 22÷23 °С для сигових тощо. Підвищення температури на 2 °С порівняно з нормальною для осені і зими може несприятливо позначитися на нересті сивих, а підвищення на 5÷6 °С температури води може викликати смертність ембріонів лососевих і затримки у розвитку молоді.

### **17.1.5. Забарвлення тварин**

Забарвлення зовнішнього покриву або масть відіграють важливу роль у процесі теплообміну тварини. Деякі ендотермні тварини характеризуються набором світлих і темних плям на зовнішньому покриві. Так, антилопи савани мають білі морди, крижі та черевні поверхні, що зменшує поглинання короткохвильового випромінювання, відбитого від світлих піщаних ґрунтів та під час обертання голови до Сонця.

Ектотермні тварини, такі як ящірки та ропухи, здатні змінювати своє забарвлення при зміні навколишньої температури. Так, тростинна ропуха *Hyperolius viridiflavus*, що мешкає в африканській савані, здатна змінювати з початком сухого сезону свій колір від жовто-коричневого до яскраво-білого; в цьому процесі беруть участь іридофорні клітини, які містять кристали, що викликають інтерференцію оптичного випромінювання з подальшим його послабленням. У комах (сарани, жуків, бабок) забарвлення змінюється завдяки фазовим змінам ліпідів кутикули від майже чорного до металевосинього або зеленого при підвищенні температури. Рівень забарвлення впливає на відбивання сонячного випромінювання. Комаха з білим або світлим забарвленням нагрівається повільніше, ніж ті, що мають темний колір. Через це активність темнозабарвлених комах збільшується на світанку або в сутінках, тоді як світлозабарвлених комах — опівдні. В той же час рівень відбивання сонячного випромінювання зовнішнім покривом у ектотермних тварин залежить від температури — деякі види ропух під час нагрівання змінюють відбивання від 35% до 60%, а хамелеон *Chamaeleo dilepis* — від 31% при 20 °С до 46% при 35 °С.

### **17.1.6. Міграція тварин**

*Міграція* — це регулярне переміщення тварин між альтернативними ареалами мешкання в різні пори року, які характеризуються

зміною температурних умов. Основні фактори, що ініціюють міграцію — зміна тривалості дня, ендогенні (внутрішні) ритми, несприятливі умови мешкання — погода для птахів, припливи та відливи для риб, перенаселеність для комах, температурна ситуація для попелиць. Міграція може здійснюватися на невеликі відстані (ропухи та черепахи переходять на більшу глибини водойм, павуки, змії, кажани та ведмеді шукають нори), або на великі відстані в межах материків чи між ними (рис. 17.7).

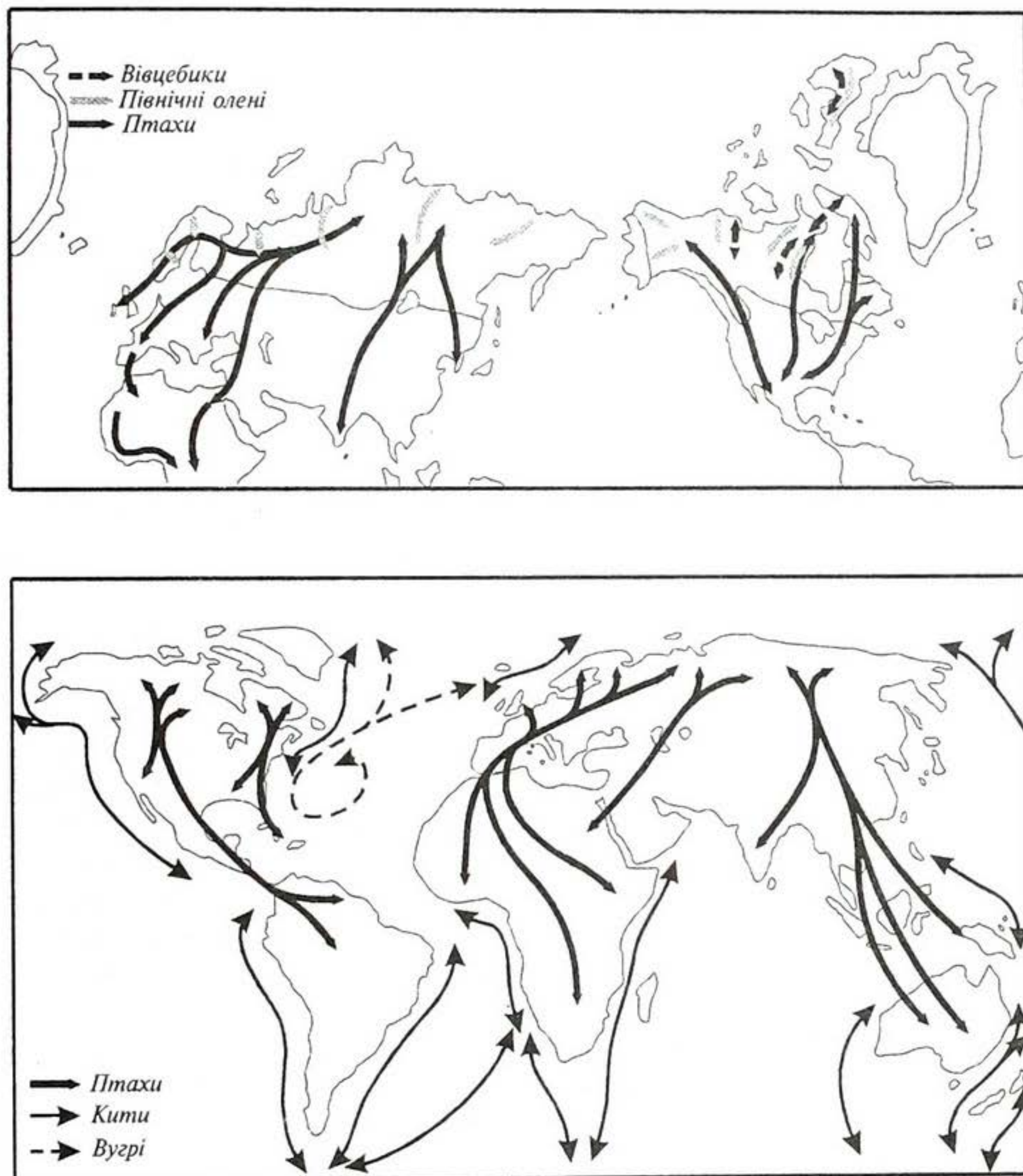


Рис. 17.7. Основні маршрути міграції наземних та морських тварин

## 17.2. ТЕРМОРЕЦЕПЦІЯ У ТВАРИН

*Терморцепція* — це сприймання зміни температури нервовими утвореннями (терморцепторами), що специфічно чутливі до змін температури оточуючого середовища.

### 17.2.1. Механізми терморцепції

Щодо механізмів терморцепції живих організмів не існує єдиної думки. Згідно з однією гіпотезою (Frey M.), терморцепторна система складається з окремих рецепторів, що сприймають тепло і холод і розміщені у тільцях Руффіні та колбах Краузе відповідно. Інша гіпотеза (Nafe J.) припускає сприймання температури єдиними терморцепторами, якими є нервові закінчення стінок маленьких артеріол, що містяться у шкірі. При цьому холод спричиняє звуження, а тепло — розширення кровоносних судин; механічні переміщення, таким чином, перетворюються на сигнали нервової системи. Жодна із запропонованих теорій не є вичерпною; деякі експериментальні факти знаходять пояснення, інші — ні.

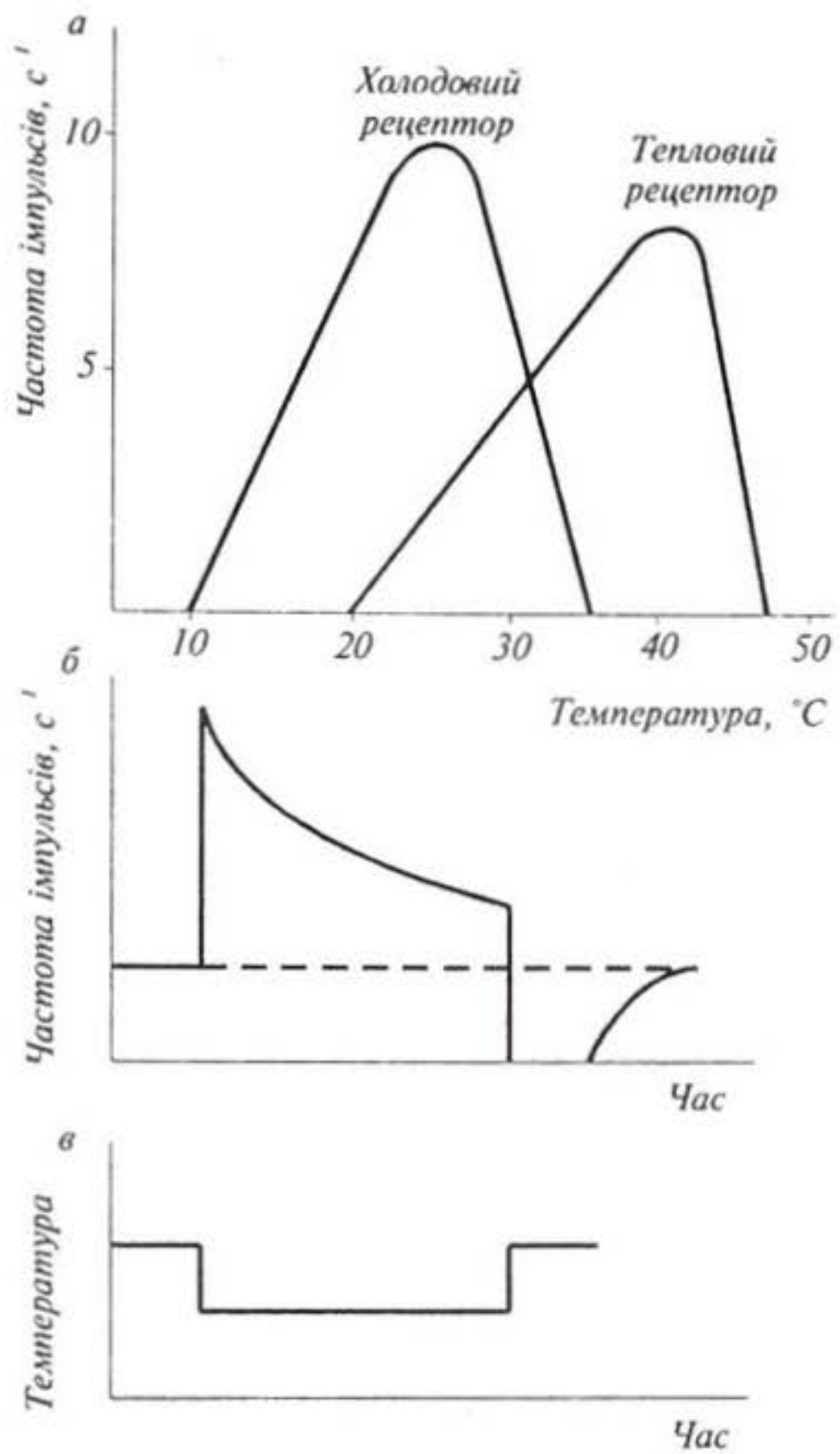
### 17.2.2. Терморцептори у тварин

Терморцептори ссавців розміщені в шкірному покриві та на зовнішньому боці язика. Згідно з результатами досліджень глибина розміщення теплових рецепторів становить  $0,28 \div 0,30$  мм, а холододових —  $0,10 \div 0,17$  мм.

Терморцептори шкіри являють собою модулятори частоти — вони перетворюють певну інтенсивність теплового подразнення у певну частоту електричних імпульсів. Нервові волокна, що йдуть від теплових рецепторів, активні в межах  $20 \div 47$  °С, причому максимальна частота спостерігається при  $38 \div 43$  °С; волокна від холододових рецепторів активні в діапазоні  $10 \div 35$  °С з максимальною частотою імпульсів близько  $25$  °С (рис. 17.8,а). В проміжній області імпульси виникають з боку як теплових, так і холододових рецепторів; ця ситуація відповідає нейтральному стану, коли не відчувається ні тепло, ні холод. Максимальний сталий розряд теплових рецепторів становить  $3,7$  імп · с<sup>-1</sup>, а холододових —  $10$  імп · с<sup>-1</sup>.

Раптове підвищення температури шкіри приводить до різкого короткочасного підсилення частоти імпульсів протягом  $1 \div 2$  с, після чого відбувається повернення частоти до сталого рівня). Зниження температури також викликає збільшення частоти імпульсів (до  $140$  імп · с<sup>-1</sup>) з подальшим встановленням нової частоти імпульсів, вищої, ніж при початковій температурі (рис. 17.8,б,в).

**Рис. 17.8.** Терморцептори шкіри як модулятори частоти: *а* — залежність частоти електричних імпульсів, що виникають в холодних і теплових терморцепторах, від температури; *б* — часова динаміка частоти імпульсів при зниженні температури; *в* — зниження температури з часом



У риб є шкіряні терморцептори; крім того, сейсмо-сенсорні системи і мозок також чутливі до температури. Акули і скати мають на поверхні голови ампули Лоренціні, які реагують серед різних подразників й на температуру.

Температурна рецепція добре розвинена у ямкоголових змій та у деяких удавів. Ямкоголова змія має специфічні ямки на голові, на дні кожної з яких є перетинка, що містить безліч нервових закінчень. Тварина здатна реагувати на зміни зовнішньої температури близько 0,003 °С; підвищення температури на 0,4 °С викликає збільшення частоти електричних імпульсів з 18 до 68 Гц. Крім того, змія здатна визначати напрямок до джерела тепла. Все це дає можливість їй знаходити в темряві здобич — теплокровну тварину, яка висилає інфрачервоне випромінювання в межах 10 мкм; спектральна чутливість терморцепторів змії становить 0,5÷15 мкм.

Цвіркуни і багатоніжки сприймають температуру повітря антенами, а ґрунту — лапками. Терморцептори розміщені на антенах також у бджоли, сарани, клопа.

### 17.3. ПОВЕДІНКОВА РЕАКЦІЯ ТВАРИН НА ТЕМПЕРАТУРУ

Реакція живого організму на інтенсивність температури, її зміну або температурні градієнти називається *термотаксисом*. Тварини здатні вибирати оптимальну для їх існування температурну зону

шляхом переміщення та накопичення в цій зоні, а також виявляти адаптивну поведінку щодо температурних градієнтів. Нематоди, які паразитують на теплокровних тваринах, переміщуються до більш високих температур. Слимаки також рухаються у бік температури, якій віддається перевага. Селективне накопичення в зонах оптимальних температур спостерігається у риб, рептилій, найпростіших та водоростей. Очевидно, термотаксис дає можливість кліщу вароа знаходити бджолу.

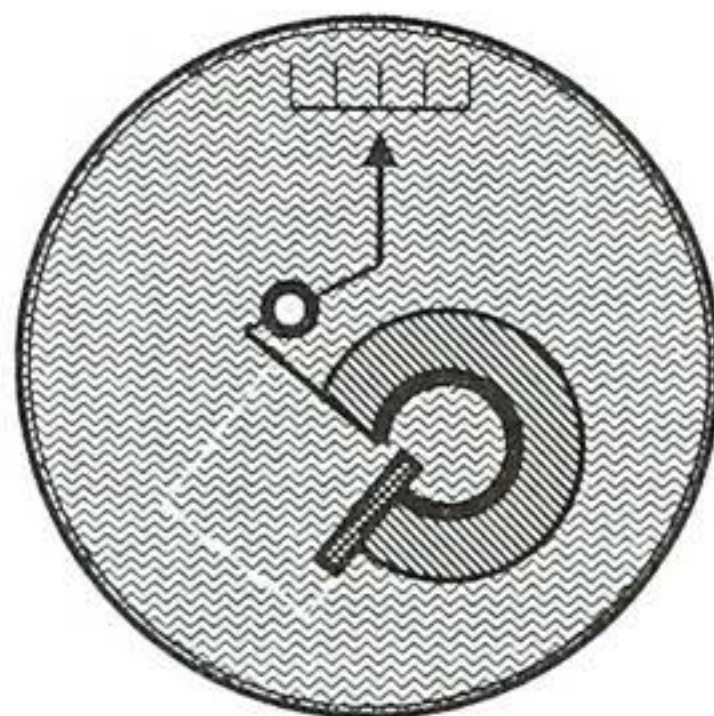
Ще одна можливість поведінкової адаптації тварин — орієнтування тіла відносно сонячних променів, як це робить пустельна сарана: вранці (при  $17\div 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) вона розміщує своє тіло перпендикулярно до сонячних променів, тоді як опівдні (при  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) — паралельно так, щоб поглинання світлової енергії було мінімальним (рис. 17.6).

Велику роль відіграє у наземних комах та рептилій рівень пігментації зовнішнього покриву — світлозabarвлені істоти поглинають меншу енергію, ніж темнозabarвлені. Деякі комахи (метелики, бджоли, мурашки тощо) розігріваються за допомогою рухів, виробляючи тепло завдяки м'язовій активності.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як впливають високі температури на ендотермних тварин?
2. Що таке поліпное?
3. Що таке гіпертермія?
4. Як впливають низькі температури на ендотермних тварин?
5. Як реагують ектотермні тварини на стресові температурні умови?
6. Назвати гіпотези щодо механізмів терморцепції у тварин.
7. Пояснити роботу терморцепторів тварин.
8. Як здійснюють тварини поведінкову реакцію на температуру?

# 18. ПРИКЛАДНА ТЕРМОДИНАМІКА



## 18.1. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

*Рідинний термометр* — прилад для вимірювання температури, що ґрунтується на тепловому розширенні рідини. Складається з скляного резервуара, з'єданого з капіляром і шкалою. Робочою речовиною є спирт ( $-80\text{ }^{\circ}\text{C} \div +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) або ртуть ( $-35\text{ }^{\circ}\text{C} \div +750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Явище теплового розширення рідини описується рівнянням (15.3).

*Термометри опору* — прилади, принцип яких ґрунтується на властивості матеріалів змінювати електричний опір під впливом температури.

Для провідників залежність опору від температури має вигляд:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (18.1)$$

де  $R$  — опір провідника при температурі  $t$ ,  $R_0$  — опір при температурі  $t_0$ ,  $\alpha$  — температурний коефіцієнт опору провідника,  $\Delta T = t - t_0$

Для напівпровідників опір спадає з підвищенням температури за формулою:

$$R = R_0 e^{\Delta E/2kT}, \quad (18.2)$$

де  $\Delta E$  — ширина забороненої зони напівпровідника,  $T$  — температура,  $k$  — стала Больцмана.

Провідники в таких вимірюваннях називаються *терморезисторами*, а напівпровідники — *термісторами*.

У *термоелектричних термометрах* використовують термоелектричні явища, що проявляються у взаємозв'язку теплових та електричних процесів у твердих тілах. Одним з таких термоелектричних явищ є *ефект Зеебека* — виникнення електрорушійної сили (*е.р.с.*) в електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників (термопар), контакти яких мають різну температуру (рис. 18.1). Температурна залежність *е.р.с.* визначається за формулою:

$$\mathcal{E} = \alpha(T_1 - T_2), \quad (18.3)$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт Зеебека (термоелектрична властивість пари провідників),  $T_1$  і  $T_2$  — температури місць з'єднання провідників.

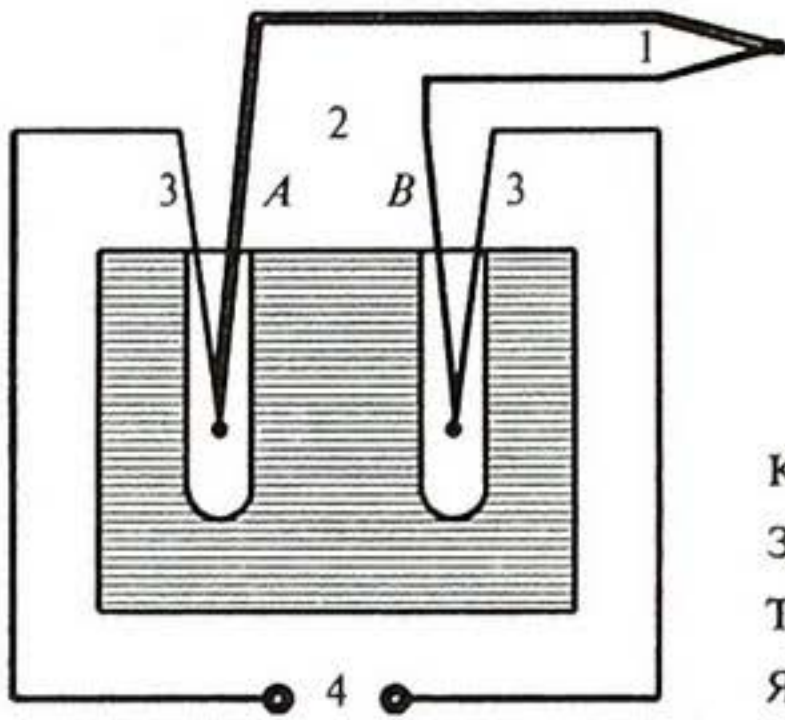


Рис. 18.1. Термоелектричний термометр: 1 — вимірювальне з'єднання; 2 — термопара, що складається з провідників А і В; 3 — мідні провідники; 4 — вхід потенціометра

Оптична пірометрія базується на використанні залежності випромінювальної здатності розжареного тіла від температури. Отже, визначити температуру будь-якого тіла можна шляхом порівняння інтенсивності його випромінювання на

певній довжині хвилі з інтенсивністю стандартного випромінювання. Оптичний пірометр складається з джерела випромінювання і оптичної системи, до якої входить мікроскоп, калібрована лампа та фільтр з вузькою смугою пропускання. Процедура вимірювання температури передбачає порівняння яскравості тіла, що досліджується, та каліброваної лампи. Вимірювання проводять на довжині хвилі 655 нм. Шляхом регулювання струму, що проходить через нитку електролампи, зрівноважують яскравості тіла і лампи. В результаті зображення нитки зникає на фоні яскравості тіла (рис. 18.2). Ручка потенціометра, що регулює величину струму, прокалібрована в одиницях температури.

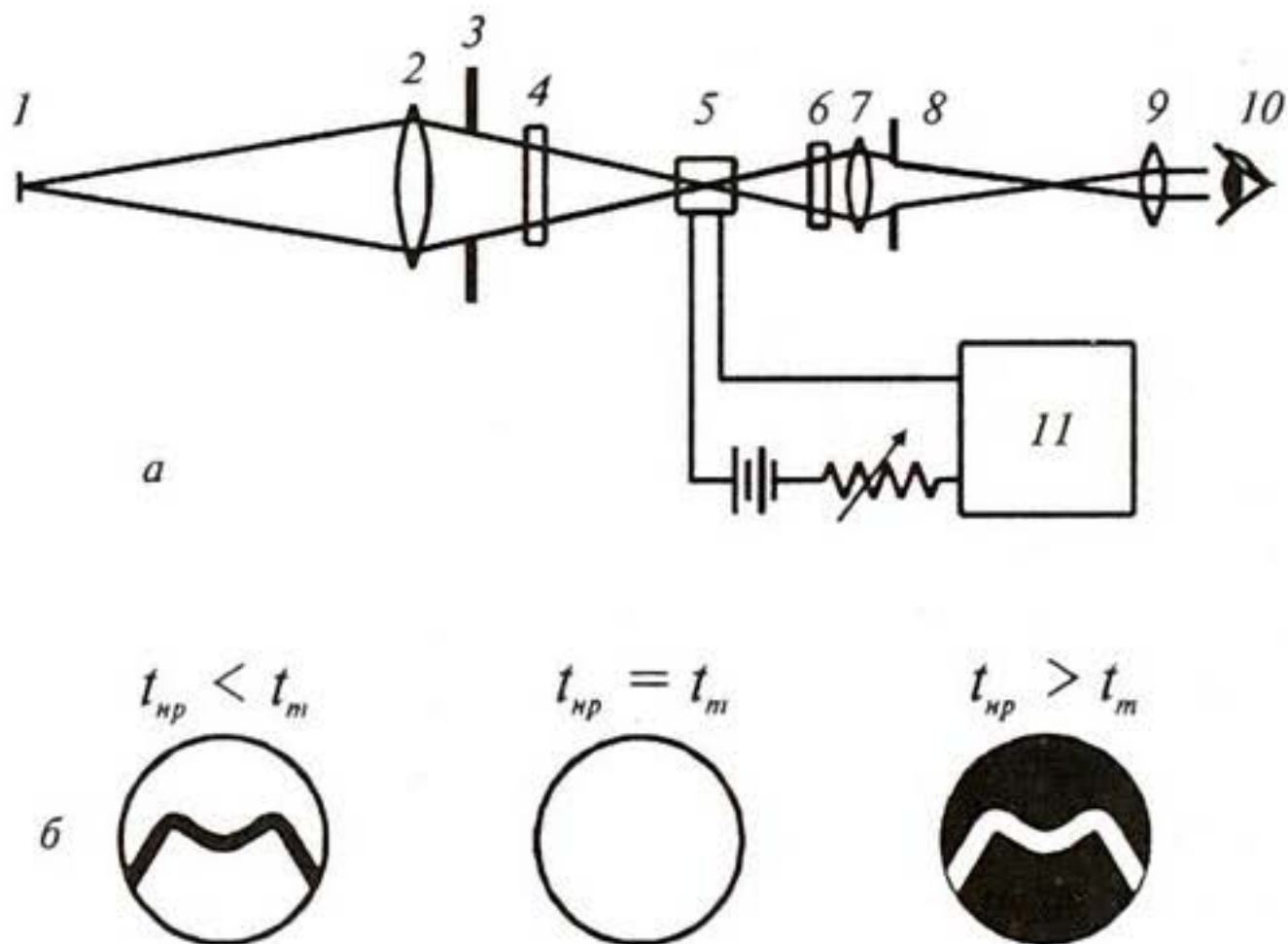


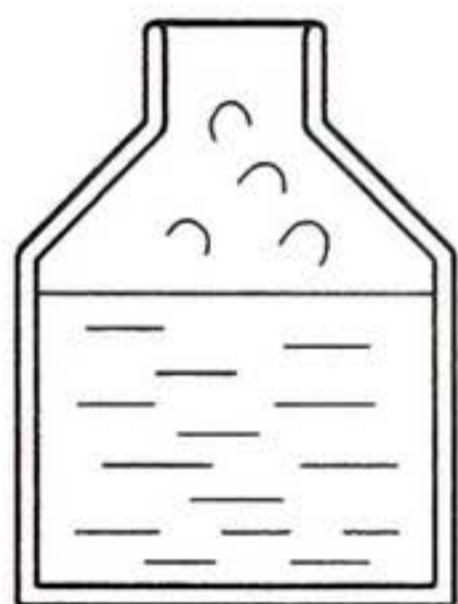
Рис. 18.2. а) Схема оптичного пірометра: 1 — джерело світла; 2 — лінза; 3 — діафрагма; 4 — фільтр; 5 — лампа пірометра; 6 — червоний фільтр; 7 — лінза; 8 — діафрагма; 9 — окуляр; 10 — око спостерігача; 11 — амперметр; б) Зображення нитки електролампи пірометра та тіла, що досліджується, залежно від співвідношення температури  $t_{np}$  нитки і температури тіла  $t_m$

*Радіотермометри* можна використовувати для дистанційного вимірювання температури. В основі дії приладів цього типу — залежність енергетичної яскравості тіла, що досліджується, від випромінювальної здатності поверхні тіла і температури цієї поверхні. На практиці вимірюють енергетичну яскравість у смузї довжин хвиль  $8\div 13$  мкм, де випромінюють живі організми. Звичайно радіометри складаються з оптичної системи, яка фокусує потік випромінювання певної довжини хвилі на детектор — термістор або термобатарей.

*Кварцовий п'єзоелектричний термометр* являє собою цифровий прилад, в основі якого лежить вимірювання резонансної частоти п'єзокристалу. Кожний кристал має свою власну резонансну частоту, яка залежить від температури. Прилади такого типу характеризуються високою чутливістю та роздільною здатністю ( $10^{-4}$  °С).

## 18.2. ПОСУДИНА ДЬЮАРА

Контейнер, в якому витрати теплоти зведені до мінімуму, називається *посудиною Дьюара*. Такий контейнер призначений для зберігання холодних чи нагрітих рідин протягом тривалих проміжків часу.



**Рис. 18.3.**  
*Посудина Дьюара*

Типова конструкція такої ємності являє собою конструкцію з двома стінками, внутрішні поверхні яких вкриті сріблом (рис. 18.3). Срібні поверхні не допускають витрат теплоти завдяки тепловипромінюванню, оскільки вони відбивають більшість цього випромінювання. Повітря у просторі між стінками відсутнє, тобто цей проміжок виконує функції теплоізолятора. Такі посудини Дьюара застосовуються для зберігання рідкого азоту, який використовують у технології штучного запліднення.

## 18.3. ТЕРМОЛІКУВАННЯ ТВАРИН

*Термолікування* — це дозований вплив з лікувальною метою тепла, що віддається будь-якими теплоносіями або утворюється в тканинах організму при поглинанні ними енергії електромагнітних хвиль.

### 18.3.1. Застосування високих температур

*Термодіагностика.* Виявлення і окреслення локальних зон з підвищеною температурою є важливим завданням клінічної практики. Такі зони свідчать про активізацію обміну речовин і потоків



крові, що можна пов'язувати з наявністю інфекції, закупорюванням кровоносних судин. Загальне підвищення температури надає інформацію щодо цілої низки можливих захворювань, наприклад, бактеріальної або вірусної інфекції.

Техніка реєстрації температури тіла тварини називається *термографією*. На рис. 18.4 наведено термограму корови чорно-рябої масті. Ділянки поверхні чорного кольору поглинають більше випромінювання і, таким чином, мають вищу температуру. Різниця температур темних і світлих ділянок становить близько 8 °С.

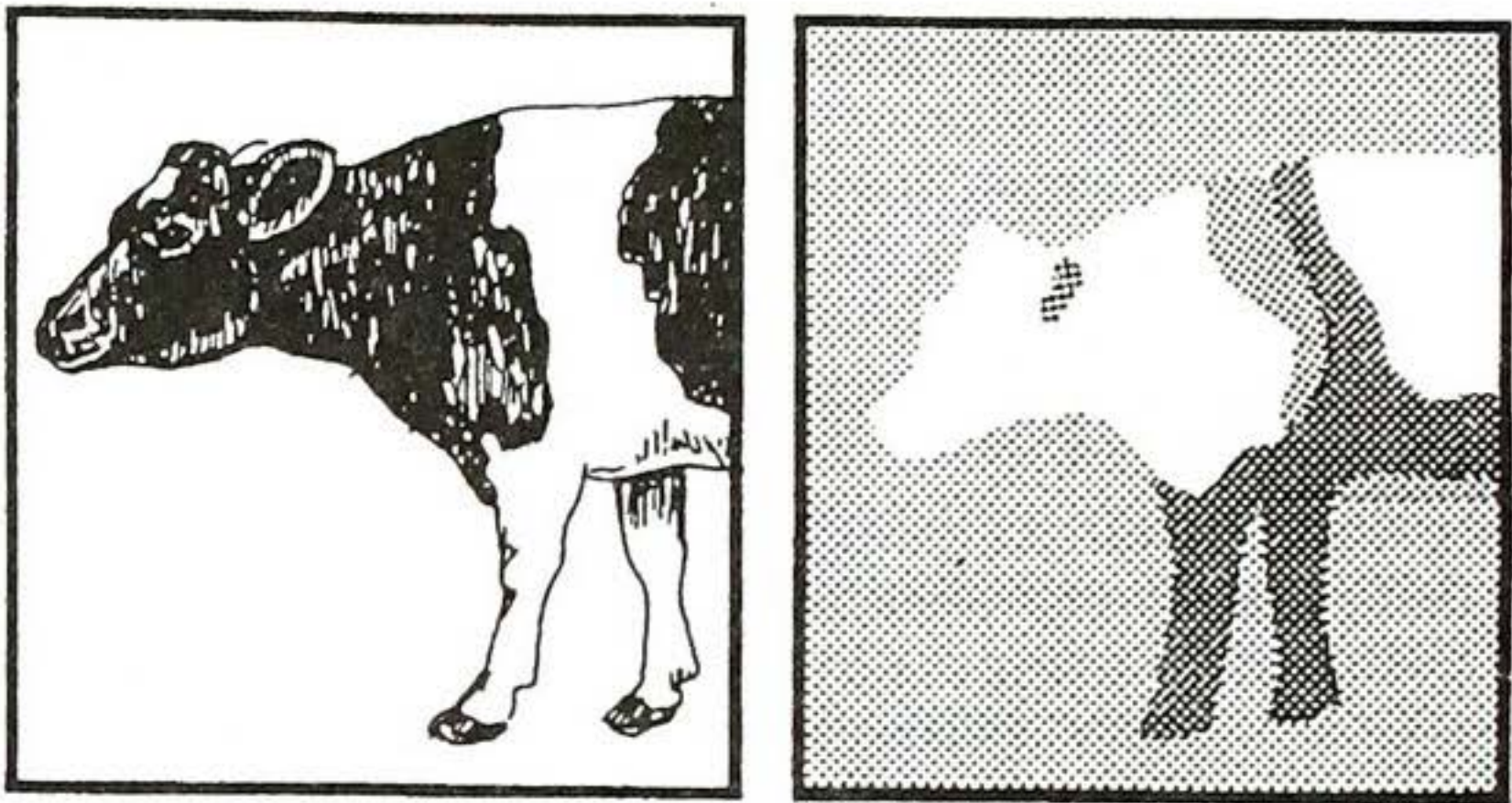


Рис. 18.4. Термограма корови чорно-рябої масті

*Термотерапія.* Застосування тепла для лікування запальовальних процесів використовується людством ще з античних часів. В сучасну епоху методи термотерапії реалізують у вигляді інфрачервоного випромінювання, високочастотної діатермії, парафінових ванн або припарок. Ці процедури стимулюють активізацію локальних потоків крові в зонах запальних процесів і тим самим прискорюють їх зведення нанівець. Сухе тепло використовують при лікуванні сильних опіків завдяки випотіванню плазми крові внаслідок її дегідратації. Потоки теплого повітря або кисню варто застосовувати при лікуванні респіраторних захворювань.

*Термохірургія.* Найбільш поширеним застосуванням теплових ефектів у хірургії можна вважати проведення безкровних і стерильних операцій за допомогою CO<sub>2</sub>-лазера, який характеризується потужним випромінюванням в інфрачервоній області спектра. Як приклад використання лазерного скальпеля можна навести операції з видалення некротизованих тканин при опіках різного ступеня свиней, зруйнування невеликих злоякісних пухлин шкіри й слизових оболонок, метастазів у печінці, дрібних пухлин сечового міхура, шийки матки, розтин тканин стопи у коней.

### 18.3.2. Використання низьких температур

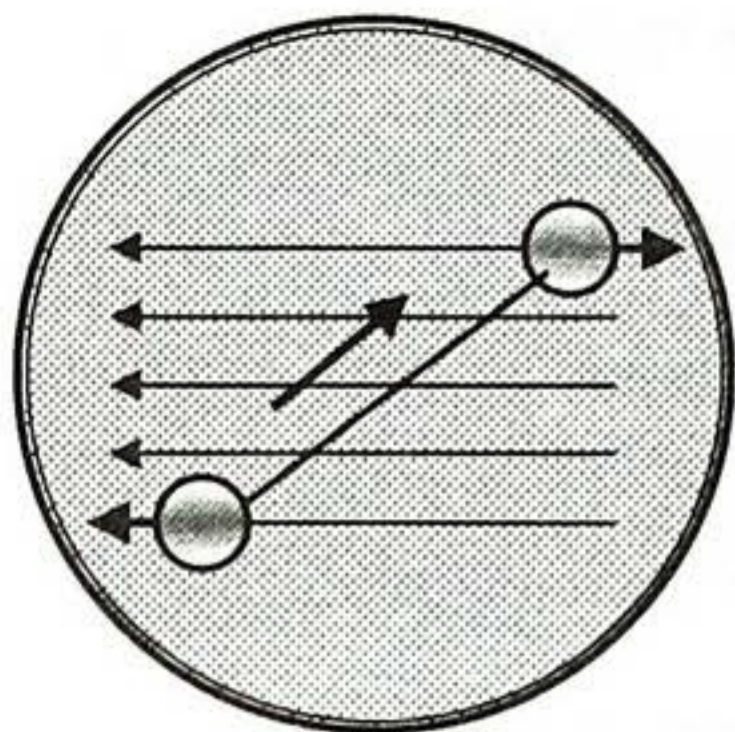
Низькі температури, використовувані в клінічній практиці, отримують за допомогою твердого двоокису вуглецю ( $-79^{\circ}\text{C}$ ) або рідкого азоту ( $-196^{\circ}\text{C}$ ). Властивість біологічних тканин зберігатися при таких температурах протягом від однієї години до року знайшла застосування у технології *криоконсервації* цих тканин з метою їх подальшого використання при трансплантації. Шкіра, кістки, рогова оболонка, серцеві клапани є об'єктами трансплантації, що зберігаються при низьких температурах.

*Гіпотермія* (локальна і загальна) може супроводжувати радіотерапію злоякісних пухлин; цей процес пов'язаний з блокуванням постачання кисню тканинами і зменшенням їх радіочутливості. Нормальні тканини витримують опромінювання, тоді як злоякісні тканини з більшою чутливістю приречені на ураження.

Застосування низьких температур перспективне при нейрохірургічних операціях, оскільки холод забезпечує локальну анестезію.

#### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Пояснити принципи дії:
  - а) рідинного термометра;
  - б) термометра опору;
  - в) термоелектричного термометра;
  - г) оптичного пірометра;
  - д) радіотермометра;
  - е) кварцового п'єзоелектричного термометра.
2. Як зберігає тепло посудина Дьюара?
3. Пояснити принцип термографії.
4. В чому полягає суть термотерапії? термохірургії?
5. Де використовуються низькі температури в тваринництві?



## 19. ЕЛЕКТРИКА

*Електрика* — розділ фізики, що вивчає сукупність явищ, зумовлених існуванням, рухом і взаємодією електрично заряджених тіл або частинок. Електрика ділиться на електростатику і електродинаміку.

*Електростатика* вивчає взаємодію нерухомих електричних зарядів.

*Електродинаміка* розглядає явища і процеси, зумовлені рухом електричних зарядів або заряджених тіл.

### 19.1. ЕЛЕКТРОСТАТИЧНЕ ПОЛЕ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між електрично зарядженими тілами, називається *електромагнітним полем*, що складається з двох взаємозв'язаних полів — *електричного* і *магнітного*. Електричне поле нерухомих зарядів, що здійснює взаємодію між ними, називається *електростатичним полем*.

Дослідження електричних полів дасть можливість зрозуміти механізми виникнення електричних зарядів у спеціалізованих клітинах тварин, які створюють власні електричні поля для орієнтації у просторі, пошуків корму, виявлення в оточуючому середовищі об'єктів, біокомунікації, а також більш детально ознайомитися з процесами електрогенезу в біологічних клітинах, що зумовлюють електричну активність організму.

#### 19.1.1. Електричний заряд. Властивості електричних зарядів

*Електричний заряд* — це джерело електромагнітного поля, пов'язане з матеріальним носієм; характеристика елементарної час-

тинки, що визначає її електромагнітну взаємодію. Заряди можуть бути *позитивними* (заряд наелектризованої скляної палички) і *негативними* (заряд бурштинової палички). Різнойменні заряди притягуються один до одного, однойменні — відштовхуються.

Електричний заряд має дискретний характер — існує мінімальний елементарний електричний заряд  $q_0$ , якому кратні всі електричні заряди тіл або частинок. Якщо  $q_0 = 1,60217733 \cdot 10^{-19}$  Кл, то будь-який заряд  $q$  дорівнює  $nq_0$ , де  $n = 1, 2, 3, \dots$

### 19.1.2. Закони електричного поля

Система тіл або частинок називається *електричною ізолюваною системою*, якщо між нею і зовнішніми тілами відсутній обмін електричними зарядами.

Закон збереження заряду: алгебраїчна сума електричних зарядів довільної замкнутої (електрично ізолюваної) системи залишається незмінною, незважаючи на будь-які процеси, що відбуваються в цій системі

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const.} \quad (19.1)$$

Закон Кулона: два точкових заряди  $q_1$  і  $q_2$  взаємодіють один з одним в вакуумі з силою  $F$ , величина якої пропорційна добутку зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}, \quad (19.2)$$

де  $\epsilon$  — діелектрична проникність середовища,  $\epsilon_0$  — електрична стала ( $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup> · Н<sup>-1</sup> · м<sup>-2</sup> =  $8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф · м<sup>-1</sup>).

### 19.1.3. Напруженість електричного поля

*Напруженість електричного поля* є векторною величиною  $\vec{E}$ , яка є основною кількісною характеристикою електричного поля; визначається відношенням сили  $\vec{F}$ , що діє з боку поля на точковий пробний електричний заряд  $q_0$ , розміщений в даній точці поля, до величини цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (19.3)$$

*Пробний електричний заряд* має бути малим, щоб не спотворювати помітно поле, яке досліджується.

*Точковим* називають заряд, зосереджений на тілі, розміри якого малі порівняно з відстанню до інших заряджених тіл, з якими він взаємодіє.

Одиниця вимірювання напруженості електричного поля —  $\text{Н} \cdot \text{Кг}^{-1}$ .

Розглянемо взаємодію довільного точкового заряду  $q$  з пробним точковим зарядом  $q_0$ . Між ними діятиме сила, що визначається за законом Кулона:

$$F = \frac{q \cdot q_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}, \quad (19.4)$$

звідки модуль вектора напруженості дорівнює:

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}. \quad (19.5)$$

Графічно електричне поле зображують за допомогою *силових ліній* електричного поля — ліній, дотичні до яких збігаються з напрямом вектора напруженості електричного поля (рис. 19.1).

Поле, напруженість якого в усіх точках однакова за модулем і напрямом, називають *однорідним електростатичним полем*; в протилежному випадку поле є *неоднорідним* (рис. 19.2).

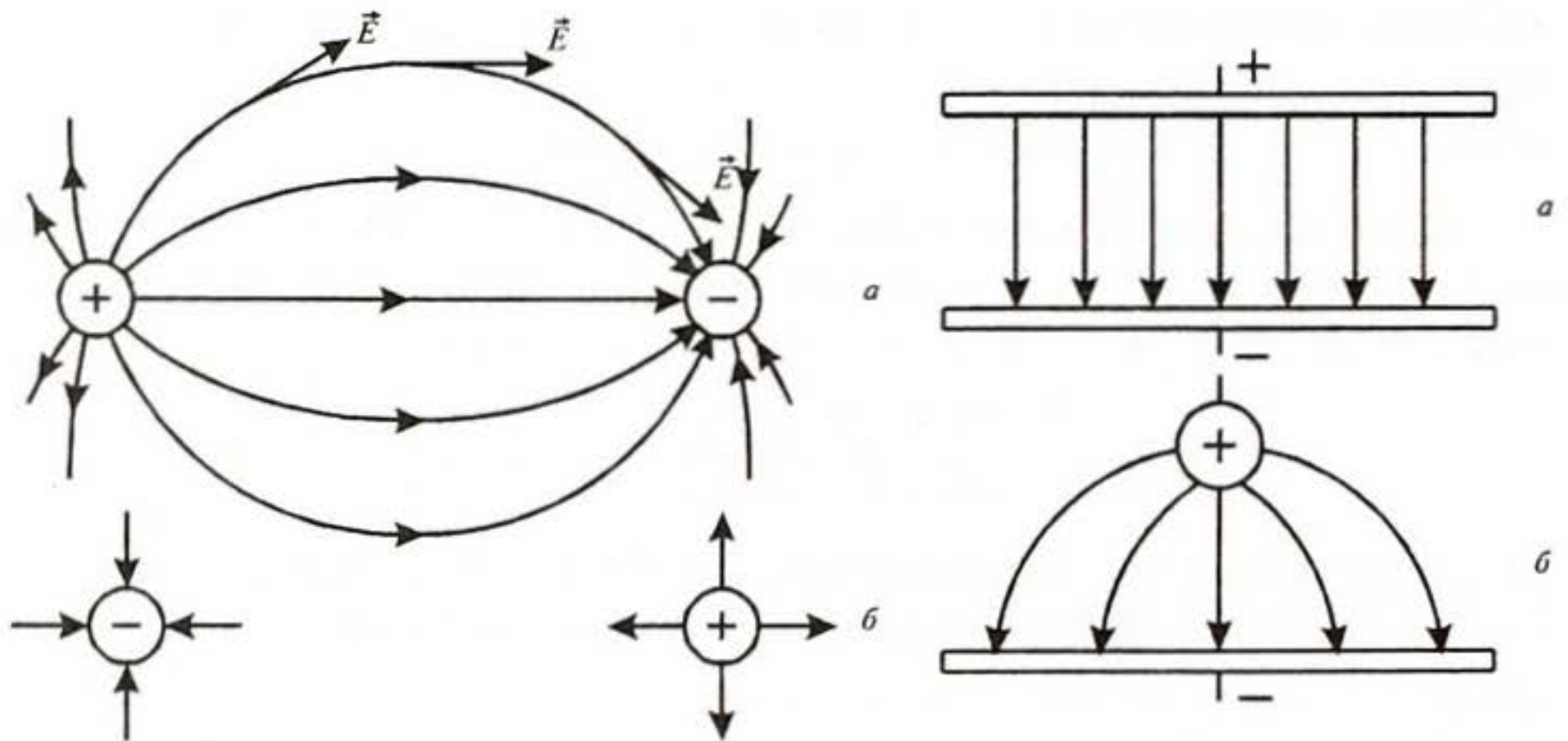


Рис. 19.1. Графічне зображення електричного поля: а — між двома зарядами; б — поодиноких зарядів

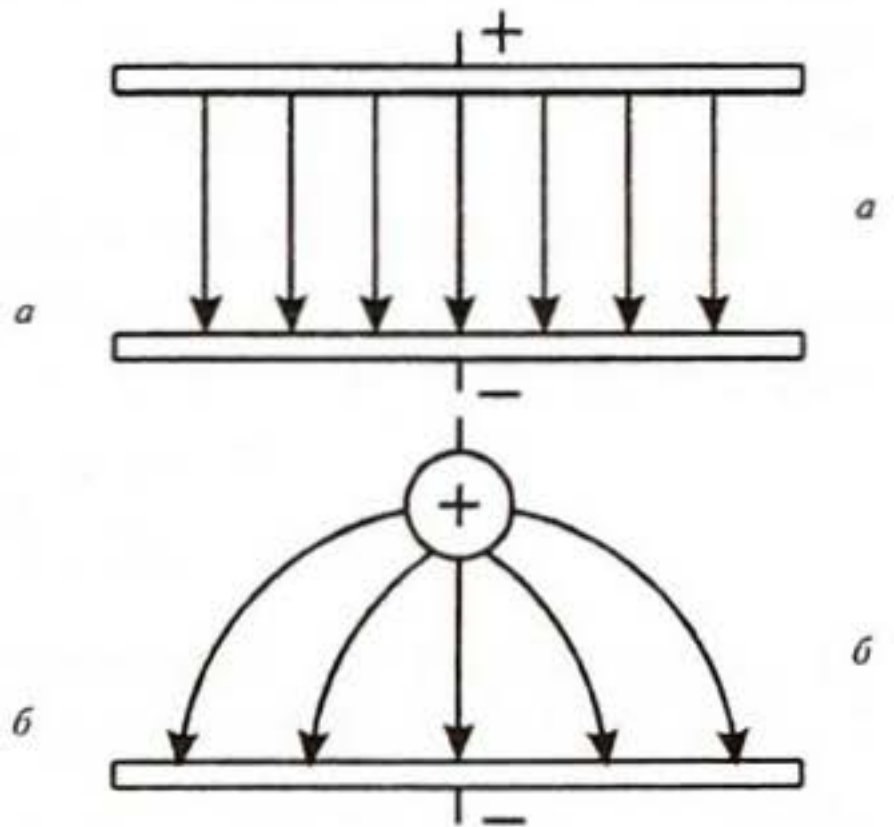


Рис. 19.2. Однорідне (а) і неоднорідне (б) електричне поле

#### 19.1.4. Потенціал електричного поля

Розглянемо пробний точковий заряд  $q_0$  в електричному полі, з боку якого на заряд діє сила:

$$\vec{F} = q_0 \vec{E}, \quad (19.6)$$

де  $\vec{E}$  — напруженість електростатичного поля.

Робота, що виконується силою  $\vec{F}$  для переміщення пробного точкового заряду  $q_0$  на нескінченно мале переміщення  $d\vec{x}$ , дорівнює:

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{x} = q_0 \vec{E} \cdot d\vec{x}. \quad (19.7)$$

Ця робота дорівнює спаду потенціальної енергії  $\Delta U$  заряду  $q_0$  в полі, що розглядається:

$$dA = -dU. \quad (19.8)$$

Звідси

$$dU = -q_0 \vec{E} \cdot d\vec{x}. \quad (19.9)$$

Для скінченних переміщень пробного точкового заряду від точки  $A$  до точки  $B$  зміна потенціальної енергії дорівнюватиме:

$$U = U_B - U_A = -q_0 \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{x}. \quad (19.10)$$

Останнє рівняння можна записати так:

$$\Delta\varphi = \varphi_B - \varphi_A = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{x}, \quad (19.11)$$

де

$$\Delta\varphi = \varphi_B - \varphi_A = \frac{U_B}{q_0} - \frac{U_A}{q_0}. \quad (19.12)$$

Величина, що дорівнює відношенню потенціальної енергії пробного точкового електричного заряду, розміщеного в даній точці поля, до величини цього заряду, називається *потенціалом електростатичного поля*:

$$\varphi = \frac{U}{q_0}, \quad (19.13)$$

де  $U$  — потенціальна енергія,  $q_0$  — пробний точковий електричний заряд. Потенціал — це скалярна енергетична характеристика електростатичного поля.

Одиниця вимірювання потенціалу —  $B$ .

Таким чином,  $\Delta\varphi$  за формулою (19.12) є *різниця потенціалів* між двома точками ( $A$  і  $B$ ) електричного поля, яка вимірюється роботою, що здійснюється силами поля при переміщенні одиничного позитивного заряду з точки з більшим потенціалом у точку з меншим потенціалом.

Зв'язок потенціалу з напруженістю електричного поля визначається так:

а) в однорідному електростатичному полі, спрямованому по осі  $x$ , напруженість електричного поля дорівнює відношенню різниці потенціалів  $\Delta\varphi$  між двома точками, до відстані  $d$  між цими точками

$$\vec{E} = -\frac{\Delta\varphi}{d}, \quad (19.14)$$

де знак мінус свідчить про те, що вектор напруженості спрямований протилежно зростанню потенціала.

б) в неоднорідному полі напруженість електричного поля дорівнює за величиною і протилежна за напрямком градієнту потенціалу

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dx}. \quad (19.15)$$

В кожній точці поля проекції вектора  $\vec{E}$  на осі декартової системи координат пов'язані з частковими похідними від потенціалу по цих координатах співвідношеннями:

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}. \quad (19.16)$$

Останні формули свідчать про те, що одиницею вимірювання напруженості може бути  $V \cdot m^{-1}$ .

Геометричне місце точок електростатичного поля, в яких значення потенціалу однакові, називається *еквіпотенціальною поверхнею*.

Силкові лінії електричного поля перпендикулярні еквіпотенціальним поверхням.

### 19.1.5. Електричний диполь

*Електричним диполем* називається система, що складається з двох рівних за абсолютною величиною різнойменних точкових зарядів ( $+q$ ,  $-q$ ), які знаходяться на деякій відстані  $l$  один від одного.

*Плечем диполя* є вектор  $\vec{l}$ , спрямований вздовж осі диполя від негативного заряду до позитивного і за модулем рівний відстані між ними.

Основною характеристикою електричного диполя є його *дипольний момент* — вектор  $\vec{p}$ , який чисельно дорівнює добутку заряду диполя на плече:

$$\vec{p} = q\vec{l}. \quad (19.17)$$

Вектор  $\vec{p}$  збігається за напрямком з плечем диполя. Розглянемо диполь, розміщений в однорідному зовнішньому електричному полі (рис. 19.3).

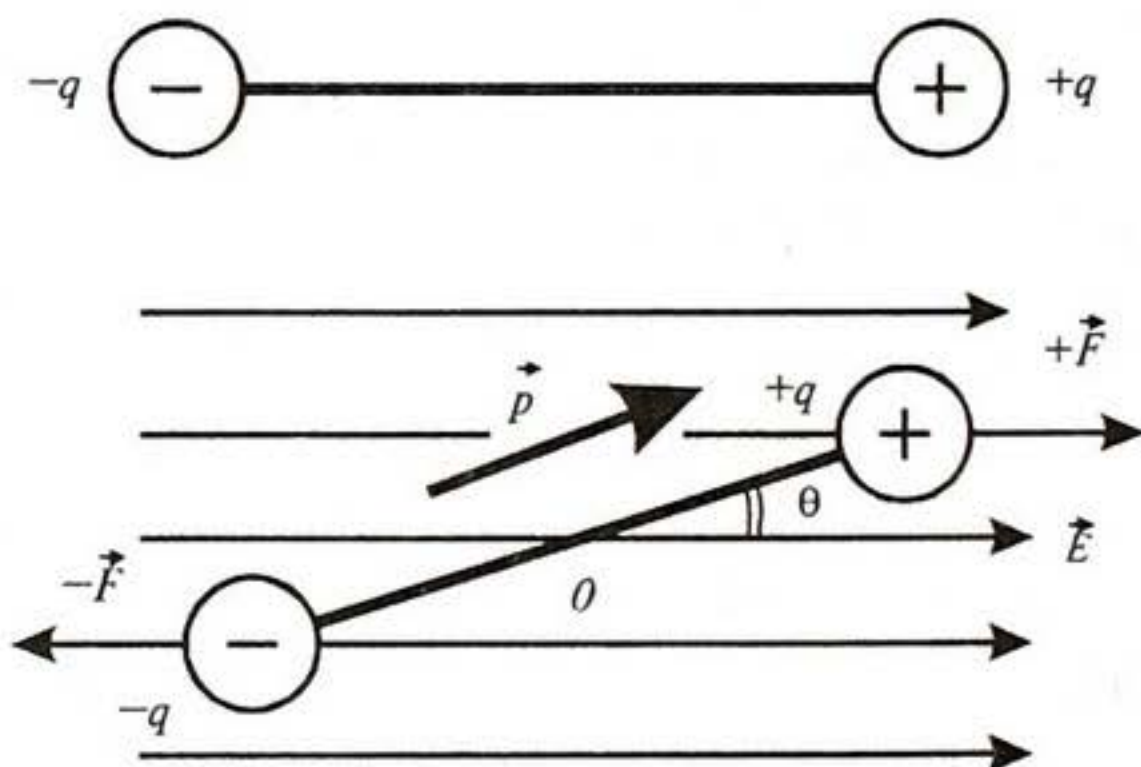


Рис. 19.3. Диполь, розміщений в однорідному зовнішньому електричному полі

Припустимо, що вектор  $\vec{p}$  і вектор  $\vec{E}$  спрямовані під кутом  $\theta$ . Сили, що діють на заряди з боку електричного поля, рівні за величиною і протилежні за напрямком; величина кожної сили дорівнює:

$$F = qE. \quad (19.18)$$

Обидві сили утворюють *обертальний момент*  $\vec{M}$ :

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}, \quad (19.19)$$

або

$$M = pE \sin\theta, \quad (19.20)$$

який намагається повернути диполь вздовж поля.

### 19.1.6. Діелектричні властивості речовини

Діелектрична проникність  $\epsilon$  характеризує поляризацію діелектриків під впливом електричного поля  $E$  (рис. 19.4). Діелектрична проникність середовища показує, у скільки разів сила взаємодії між зарядами у вакуумі більша за силу взаємодії між тими ж зарядами в даному середовищі (див. формулу (19.2)). Ослаблення взаємодії виникає через екранізацію вільних зарядів зв'язаними, що утворюються внаслідок поляризації середовища.

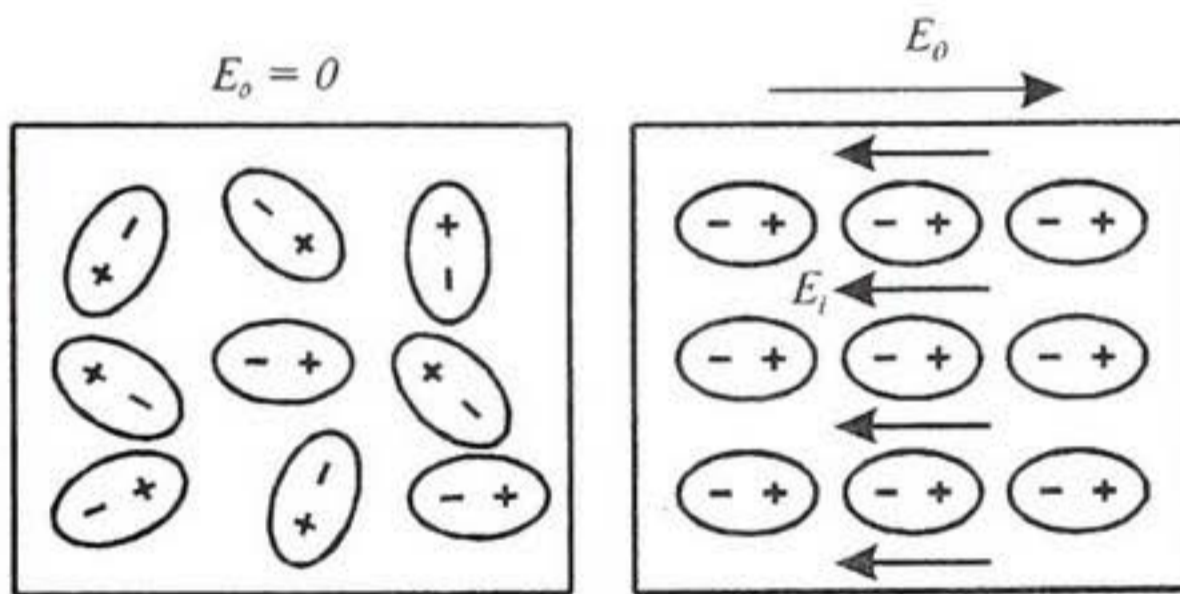


Рис. 19.4. Поляризація діелектриків під впливом електричного поля

Величина, що характеризує здатність середовища до поляризації, називається *діелектричною сприйнятливістю*  $\epsilon$ . Вона являє собою коефіцієнт пропорційності в співвідношенні:

$$\vec{P} = \epsilon \vec{E}, \quad (19.21)$$

де  $\vec{E}$  — напруженість електричного поля,  $\vec{P}$  — дипольний момент одиниці об'єму.

Зв'язок діелектричної проникності  $\epsilon$  і діелектричної сприйнятливості ж має вигляд:

$$\epsilon = 1 + 4\pi\epsilon. \quad (19.22)$$

Якщо поле  $\vec{E}$  швидко змінюється з часом, поляризація діелектрика не встигає слідкувати за ним; через це між коливаннями  $\vec{E}$  і  $\vec{P}$



виникає різниця фаз. Діелектрична проникність  $\epsilon(\omega)$  є комплексною величиною:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + i\epsilon''(\omega), \quad (19.23)$$

тобто характеризується двома величинами  $\epsilon'(\omega)$  і  $\epsilon''(\omega)$ , що залежать від частоти  $\omega$  змінного електричного поля. Відношення  $\epsilon'(\omega)/\epsilon''(\omega)$  визначає *діелектричні втрати* — частину енергії змінного електричного поля  $E$ , що перетворюється в теплоту. В постійному електричному полі  $\epsilon'(\omega) = \epsilon$ , а  $\epsilon''(\omega) = 0$ .

### 19.1.7. Електричний струм

*Електричний струм* — це впорядкований (спрямований) рух електричних заряджених частинок або заряджених макроскопічних тіл.

За напрямок електричного струму прийнято напрямок руху позитивних зарядів. *Силою струму*  $I$  називається скалярна величина, що дорівнює відношенню заряду  $dq$ , перенесеного через поперечний переріз провідника за малий проміжок часу  $dt$ , до значення цього інтервалу:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (19.24)$$

Одиниця вимірювання сили струму —  $A$ .

*Постійним* називають струм, сила якого з часом не змінюється:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (19.25)$$

*Густина струму*  $\vec{j}$  — це векторна характеристика струму, яка дорівнює за модулем електричному заряду, що проходить за одиницю часу через одиничну площу, перпендикулярну впорядкованому руху заряджених частинок.

Густина струму  $\vec{j}$  визначається так:

$$\vec{j} = nq\langle \vec{V} \rangle, \quad (19.26)$$

де  $n$  — концентрація зарядів, що рухаються,  $q$  — електричний заряд,  $\langle \vec{V} \rangle$  — середня швидкість упорядкованого руху зарядів.

При рівномірному розподілі густини електричного струму по перерізу провідника величина густини сили струму визначається за виразом:

$$j = \frac{I}{S}, \quad (19.27)$$

де  $I$  — сила струму,  $S$  — площа поперечного перерізу провідника.

Одиниця вимірювання густини струму —  $A \cdot m^{-2}$ .

### 19.1.8. Електричне коло

Замкнуте коло складається з джерела струму, з'єднувальних провідників, по яких переміщуються носії струму — електрони, і споживачів струму (рис. 19.5).

Джерело струму — пристрій, в якому заряди переміщуються від одного полюса до іншого в напрямку, протилежному напрямку електричного поля. Ці переміщення виконуються під впливом сторонніх сил.

Електрорушійна сила (е.р.с.)  $\mathcal{E}$  — фізична величина, що характеризує дію сторонніх сил в джерелах струму; вона дорівнює відношенню роботи  $A$  сторонніх сил з переміщення позитивного заряду  $q$  вздовж кола до значення цього заряду:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q}. \quad (19.28)$$

Одиниця вимірювання електрорушійної сили —  $B$ .

Електричний опір  $R$  — величина, що характеризує протидію провідника або електричного кола електричному струму.

Одиниця вимірювання електричного струму —  $Om$ .

Електричний опір залежить від матеріалу провідника, довжини провідника, площі поперечного перерізу та від температури.

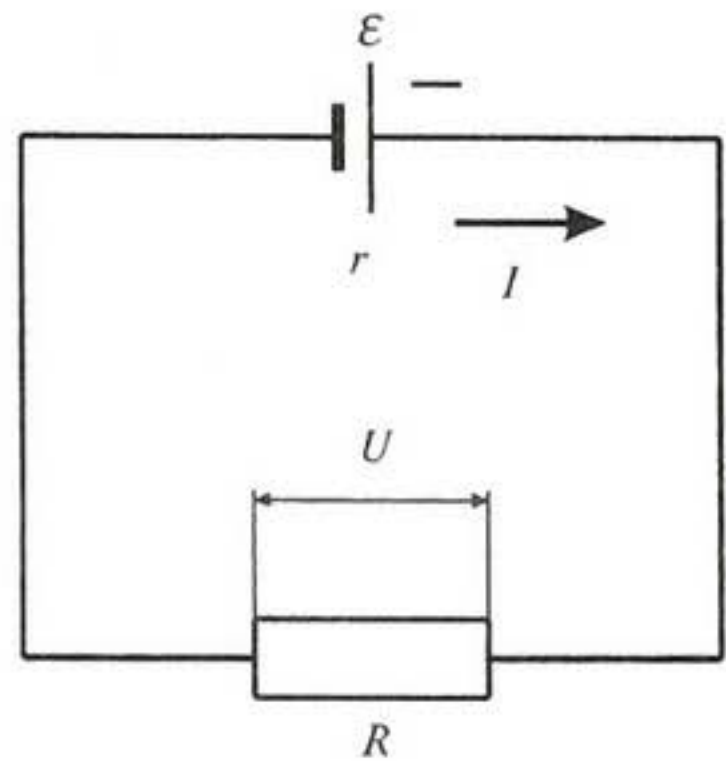


Рис. 19.5. Замкнене електричне коло

### 19.1.9. Закони постійного струму

Закон Ома для ділянки кола: сила струму  $I$  в провіднику прямо пропорційна напрузі  $U$  між двома фіксованими точками провідника і обернено пропорційна опорі  $R$  провідника

$$I = \frac{U}{R}. \quad (19.29)$$

Закон Ома для повного кола: сила струму  $I$  в замкнутому колі прямо пропорційна електрорушійній силі джерела  $\mathcal{E}$  і обернено пропорційна сумі зовнішнього  $R$  та внутрішнього  $r$  опорів

$$I = \mathcal{E} / (R + r). \quad (19.30)$$

Закон Ома застосовується для простих кіл. У випадку складних кіл, які містять замкнуті контури та вузли розгалуження (рис. 19.6), використовують правила Кірхгофа.

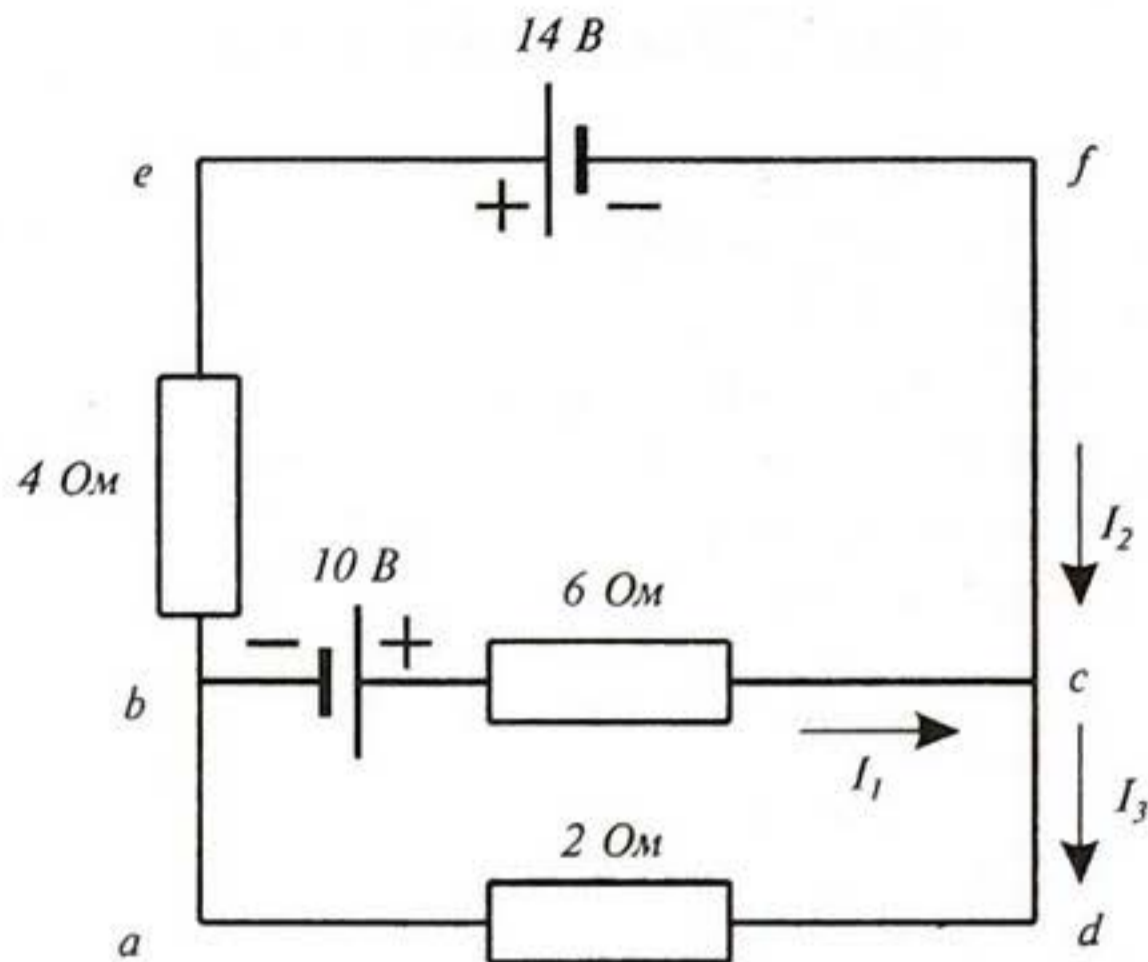


Рис. 19.6. Складне електричне коло

Перше правило Кірхгофа: алгебраїчна сума струмів, що збігаються у вузлі, дорівнює нулю

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0. \quad (19.31)$$

Струми, що входять у вузол, умовно вважають додатними, а струми, що виходять з вузла — від'ємними.

Друге правило Кірхгофа: у будь-якому замкнутому контурі розгляненого кола алгебраїчна сума добутків струмів на опори відповідних ділянок цього контуру дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що є в цьому контурі

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i. \quad (19.32)$$

Напрямки електричних струмів та електрорушійних сил вважаються додатними, якщо напрямок струму збігається з напрямком обходу контура за годинниковою стрілкою, а е.р.с. збільшує потенціал у напрямку цього обходу.

Закон Джоуля-Ленца: кількість теплоти  $Q$ , яка виділяється в провіднику під час проходження ним електричного струму, прямо пропорційна квадрату сили струму  $I$ , опору провідника  $R$  і часу  $t$  проходження струму

$$Q = I^2 R t. \quad (19.33)$$

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Середня відстань між електроном і протоном атома водню становить  $5,3 \cdot 10^{-11}$  м. Визначити силу, з якою взаємодіють ці частинки.

### Розв'язок

Використовуємо значення фізичних сталих (див. додаток), які разом з даними задачі підставляємо в рівняння (19.2):

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} = \\ = (1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2 / (4 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}) \times \\ \times (5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м})^2 = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ Н.}$$

### Контрольне завдання № 19.1

Заряд бджоли у стані спокою становить  $+2,9$  пКл, а заряд кліща *Varroa Jacobsoni* дорівнює  $-1,3$  пКл. Визначити силу, з якою взаємодіють бджола і кліщ на відстані  $1$  см.

Відповідь:  $3,39 \cdot 10^{-10}$  Н.

### Приклад

Протон рухається вздовж силової лінії електричного поля, що утворюється між двома паралельними пластинами. Знайти різницю потенціалів між двома точками *A* і *B* на траєкторії руху протона, якщо напруженість електричного поля  $8 \cdot 10^4$  В·м<sup>-1</sup>, а відстань між точками *A* і *B* дорівнює  $0,5$  м.

### Розв'язок

Використовуємо рівняння (19.11), в яке підставляємо числові значення:

$$\Delta\varphi = \varphi_B - \varphi_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{x} = -E \cdot x = \\ = -(8 \cdot 10^4 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1})(0,5 \text{ м}) = -4 \cdot 10^4 \text{ В.}$$

Знак «мінус» свідчить про те, що електричний потенціал зменшується від точки *A* до точки *B*.

### Контрольне завдання № 19.2

Використовуючи дані попередньої задачі, визначити зміну потенціальної енергії протона протягом його руху.

Відповідь:  $-6,4 \cdot 10^{-15}$  Дж.

### Контрольне завдання № 19.3

Електричне коло характеризується електрорушійною силою джерела струму  $\mathcal{E} = 12$  В, зовнішнім опором  $R = 3$  Ом, внутрішнім

опором  $r = 0,05$  Ом. Визначити: а. силу струму; б. напругу; в. потужність, що розсіюється на зовнішньому опорі.

Відповіді: а. 3,93 А; б. 11,8 В; в. 46,3 Вт.

### Приклад

Використовуючи правила Кірхгофа, знайти сили струмів  $I_1$ ,  $I_2$  та  $I_3$  в електричному колі, що зображено на рис. 19.6.

### Розв'язок

Згідно з першим правилом Кірхгофа маємо:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

В даному колі є три контури:  $abcd$ ,  $befcb$  та  $aefda$ . Застосовуємо друге правило Кірхгофа до перших двох контурів  $abcd$  і  $befcb$ :

$$abcd: \quad 10 \text{ В} - (6 \text{ Ом})I_1 - (2 \text{ Ом}) I_3 = 0.$$

$$befcb: \quad -14 \text{ В} - 10 \text{ В} + (6 \text{ Ом})I_1 - (4 \text{ Ом}) I_2 = 0.$$

Виключаємо  $I_3$  з першого рівняння, використовуючи перше правило Кірхгофа:

$$10 \text{ В} - (6 \text{ Ом})I_1 - (2 \text{ Ом}) (I_1 + I_2) = 0.$$

Звідки:

$$10 = 8I_1 + 2I_2$$

З другого рівняння отримуємо:

$$-12 = -3I_1 + 2I_2$$

Розв'язок системи двох останніх рівнянь дає можливість визначити струми:

$$I_1 = 2 \text{ А}; \quad I_2 = -3 \text{ А}.$$

З рівняння, що описує перше правило Кірхгофа, знаходимо:  $I_3 = -1 \text{ А}$ .

### Контрольне завдання № 19.4

Довести, що закон Ома є частковим випадком другого правила Кірхгофа.

## 20. БІОЕЛЕКТРИКА



*Біоелектрика* — розділ біофізики, що вивчає електричні властивості клітин, тканин та органів, а також електричні явища, які відбуваються в них.

### 20.1. СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ МЕМБРАН

#### 20.1.1. Функції біологічних мембран

*Мембрани* — це високоорганізовані клітинні структури, що відмежовують клітину від зовнішнього середовища і беруть участь у формуванні численних внутрішньоклітинних органел. Мембрани виконують важливі функції, забезпечують цілісність клітини та її активність. Одним з призначень мембран є їх участь в утворенні ізольованих замкнених структур — відсіків. Крім того, мембрани характеризуються вибірковою проникністю; вони служать селективними бар'єрами як для самої клітини, так і для клітинних структур. Мембрана, що оточує клітину, називається *поверхневою мембраною* (клітинною мембраною, плазматичною мембраною, плазмалемою). Ця мембрана формує селективний бар'єр, який підтримує постійними різноманітні фізико-хімічні властивості клітини; через поверхневі мембрани здійснюється транспорт речовин і енергії між клітинами та її оточенням, а також процеси міжклітинної взаємодії. *Внутрішньоклітинні мембрани* виділяють всередині клітини окремі органели, такі як ядро клітини, апарат Гольджі, ендоплазматичний ретикулум, мітохондрії. За допомогою внутрішньоклітинних мембран здійснюються різні енергетичні перетворення, виконується робота ферментів. Порушення функцій мембран призводить до різноманітних патологій — злоякісних пухлин, тканинної гіпоксії тощо.

## 20.1.2. Будова і склад біологічних мембран

Мембрани містять в основному ліпіди, білки та вуглеводи. Згідно з сучасними уявленнями, структура мембрани описується на основі *рідинно-мозаїчної моделі*, за якою мембрана складається з бішару (подвійного шару) ліпідів. Мембранні ліпіди являють собою фосфоліпідні молекули, кожна з яких має *полярну гідрофільну головку* та *неполярний гідрофобний хвіст*. В ліпідний бішар занурені глобулярні білки (рис. 20.1). Ці білки, що вишиковуються в бішарі і навіть перетинають його, називаються *інтегральними*. Перетинаючи бішар, інтегральні білки утворюють канал, через який можуть проходити іони. На поверхні ліпідного шару знаходяться *периферійні білки*. Вважається, що мембранні білки здатні пересуватися у площині мембрани. Ліпіди теж здатні до латеральної дифузії та переміщення між шарами.

На зовнішній поверхні мембрани містяться коротколанцюгові вуглеводи, які відіграють важливу роль в міжклітинних взаємодіях та модифікації поверхні клітини. Вуглеводи приєднуються до білків та ліпідів, утворюючи глікопротеїни та гліколіпіди відповідно.

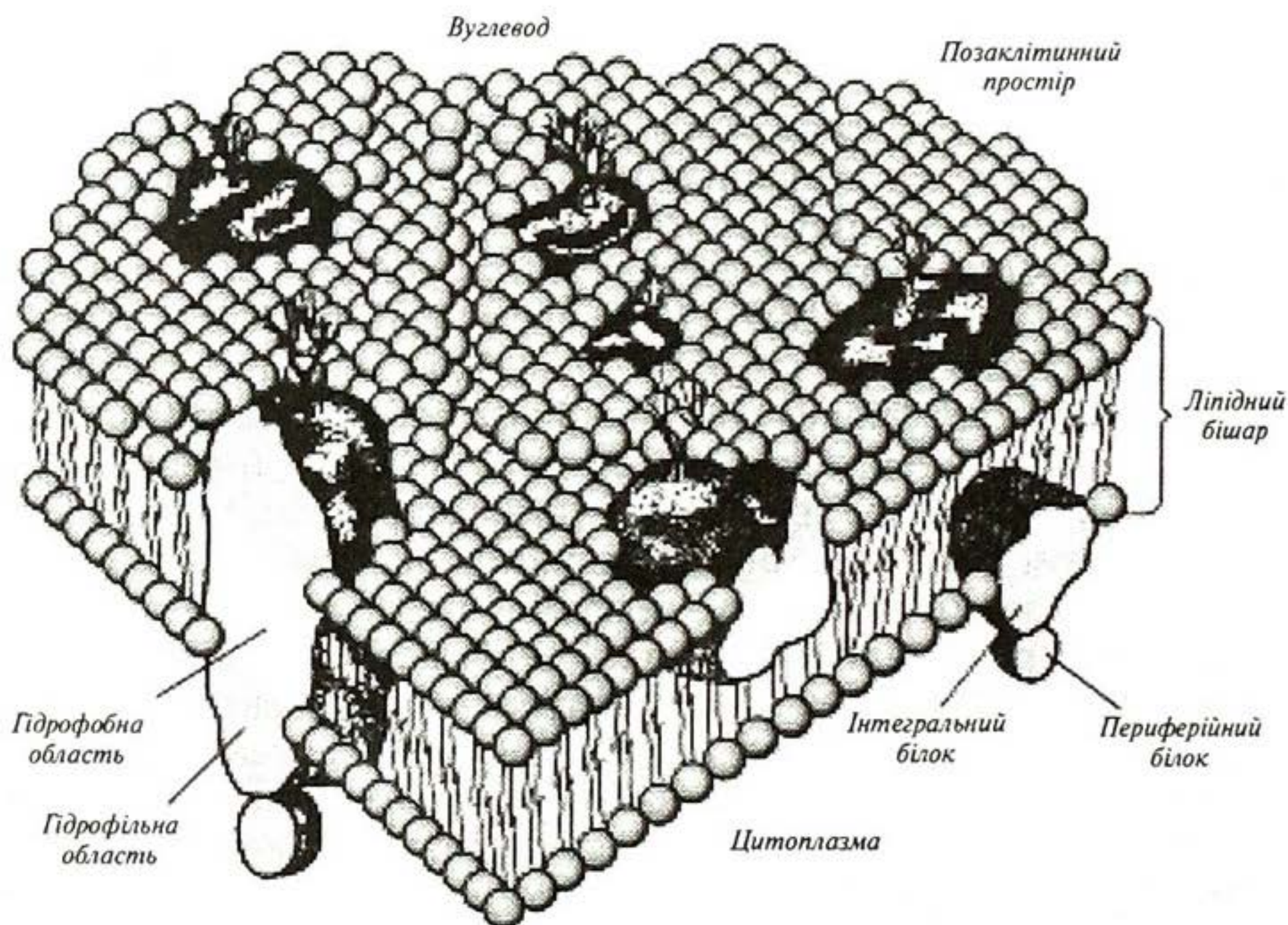


Рис. 20.1. Рідинно-мозаїчна модель мембрани, що складається з подвійного шару ліпідних молекул, інтегральних та периферійних білків

### 20.1.3. Фізичні властивості мембран

Мембрани мають товщину близько  $6 \div 10$  нм; в'язкість мембранної рідини становить  $0,1 \div 1,0$  Па · с, коефіцієнт поверхневого натягу —  $10^{-3} \div 10^{-5}$  Н · м<sup>-1</sup>. Електричні властивості біологічних мембран характеризуються такими параметрами: ємність (на одиницю площі)  $C/S = 0,5 \div 1,3$  мкФ · см<sup>-2</sup>; опір (на одиницю площі)  $R/S = 10^2 \div 10^5$  Ом · см<sup>-2</sup>; різниця потенціалів у стані спокою  $\Delta\varphi = 60 \div 90$  мВ; напруженість електричного поля  $E = 10^6 \div 10^7$  В · м<sup>-1</sup>. До оптичних параметрів мембран можна віднести показник заломлення  $n = 1,6$ .

Розглянемо основні пасивні електричні властивості клітинних мембран, зумовлені структурними особливостями. По-перше, ліпідний шар є непроникним для іонів, через що він здатний розділяти заряди і виконувати функції ємності. По-друге, ліпідний шар оснащений іонними каналами, через які можуть проходити неорганічні іони. Перенесення електричних зарядів через мембрану можна уявити у вигляді еквівалентного електричного ланцюга, який складається з паралельно з'єднаних конденсатора  $C_m$  і опору  $R_m$  (рис. 20.2). Функції конденсатора виконує ліпідний бішар, а опір є аналогом провідності, зумовленої іонними каналами.

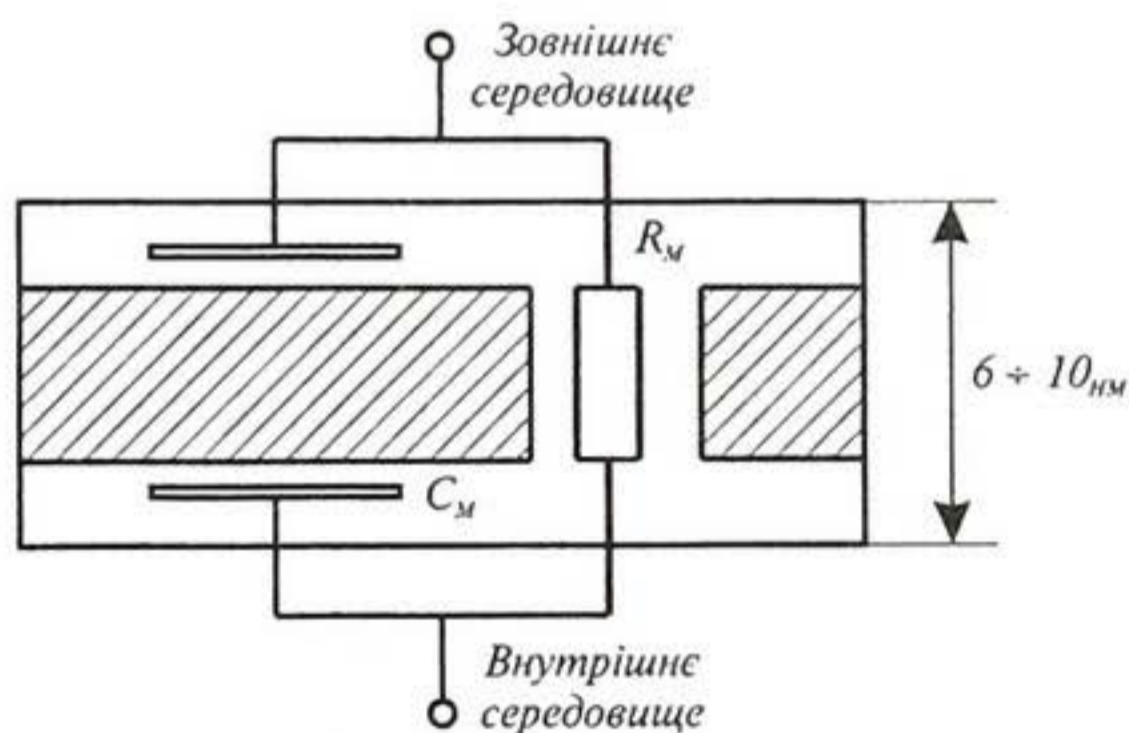


Рис. 20.2. Мембрана як еквівалентний електричний ланцюг

## 20.2. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПРОНИКНОСТІ МЕМБРАН

### 20.2.1. Дифузія

Розчинені речовини і розчинник переміщуються через напівпроникні мембрани завдяки *дифузії* — взаємного проникнення речовин, що стикаються одна з одною за теплового руху частинок речовини. Дифузія відбувається у напрямку зменшення концентрації речовини і



приводить до її рівномірного розподілу по об'єму, який вона займає (тобто до вирівнювання хімічного потенціалу).

Швидкість дифузії розчиненої речовини можна визначити завдяки рівнянню дифузії Фіка:

$$\frac{dN}{dt} = -DS \frac{dC}{dx}, \quad (20.1)$$

де  $N$  — кількість частинок речовини,  $S$  — площа перерізу, крізь який дифундує речовина,  $D$  — коефіцієнт дифузії,  $dC/dx$  — концентраційний градієнт (зміна концентрації частинок з відстанню). Одиниця вимірювання коефіцієнта дифузії —  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

Коефіцієнт дифузії  $D$  залежить від природи і молекулярної маси речовини і розчинника. Напрямок потоку частинок і градієнта концентрації (який спрямований у бік зростання концентрації) протилежні; саме через це в останній формулі присутній знак «мінус».

### 20.2.2. Проникність мембрани

Проникність мембрани  $J$  для даної речовини характеризує швидкість, з якою ця речовина пасивним шляхом (тобто завдяки дифузії) проходить крізь мембрану в певних умовах. Визначається проникність за формулою:

$$J = P(C_I - C_{II}), \quad (20.2)$$

де  $J = \frac{1}{S} \cdot \frac{dN}{dt}$  — кількість речовини в молях, що перетинає одиницю площі мембрани за одиницю часу ( $\text{моль} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ),  $C_I$  і  $C_{II}$  — концентрації речовини в відсіках  $I$  і  $II$  відповідно ( $\text{моль} \cdot \text{см}^{-3}$ ),  $P$  — коефіцієнт проникності речовини ( $\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

### 20.2.3. Осмотичний тиск

Розглянемо штучну систему, в якій мембрана  $M$  розмежовує два розчини з різною концентрацією (рис. 20.3), причому концентра-

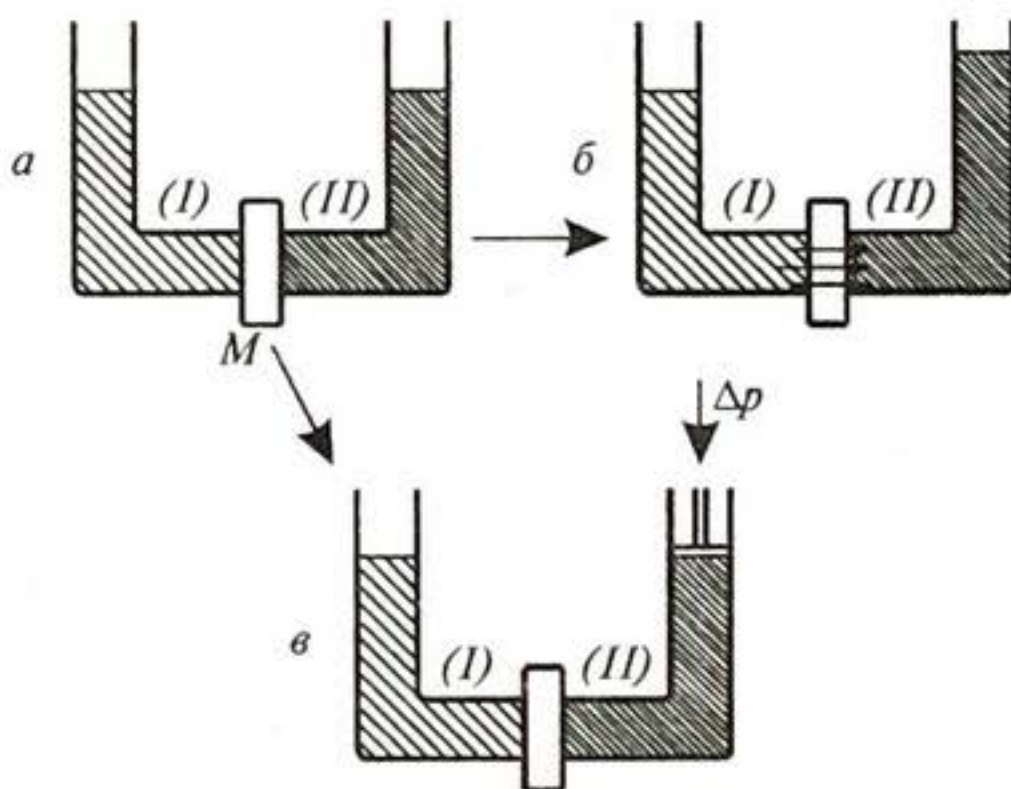


Рис. 20.3. Мембрана, що розмежовує два розчини з різною концентрацією (пояснення в тексті)

ція розчину *II* перевищує концентрацію розчину *I*. Мембрана характеризується напівпроникністю і пропускає розчинник, але не молекули розчиненої речовини. В результаті відбувається перенесення води з лівої частини системи в праву, що супроводжується збільшенням об'єму рідини в правій частині і підніманням її рівня до тих пір, доки гідростатичний тиск  $p$  стовпчика води не стане протидіяти подальшому зростанню об'єму розчину. Гідростатичний тиск в цьому випадку відповідає *потенціальному осмотичному тиску*, який визначається за формулою:

$$p = \frac{\nu}{V} RT \ln \frac{C_1}{C_2}, \quad (20.3)$$

де  $\nu$  — кількість молів речовини в об'ємі розчину,  $V$  — об'єм,  $R$  — універсальна газова стала,  $T$  — абсолютна температура,  $C_1$  і  $C_2$  — концентрації речовини в відсіках *I* і *II*.

#### 20.2.4. Осмотична рівновага

Біологічна мембрана являє собою бар'єр, який характеризується селективною вибірковістю для певних іонів. Розглянемо мембрану, яка розмежовує два відсіки *I* та *II* (рис. 20.4). У відсіку *I* міститься розчинник *S*, а у відсіку *II* — речовина *A*, розчинена у розчиннику *S*. Уявимо, що мембрана є проникною лише для розчинника. В такій ситуації молекули розчинника рухаються з відсіку *I* до відсіку *II* завдяки концентраційному градієнту. Поток молекул розчиненої речовини протидіє тиску, який встановився у відсіку *II*. Розглянемо цей процес з позицій термодинаміки.

При переміщенні одного моля розчинника через мембрану зміна вільної енергії буде дорівнювати:

$$\Delta G = \mu_S^I - \mu_S^{II}, \quad (20.4)$$

де  $\mu_S^I$  та  $\mu_S^{II}$  — хімічні потенціали розчинника у відсіках *I* і *II* відповідно. При рівновазі  $\Delta G=0$ .

Якщо прийняти за  $X_S$  відношення числа молів розчинника  $n_S$  до загального числа молів розчинника і розчиненої речовини  $n_S + n_A$ , то рівняння (20.4) може бути приведено до такого вигляду:

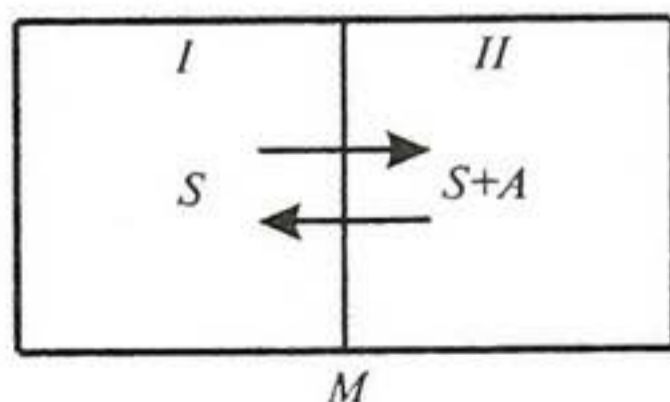


Рис. 20.4. Мембрана, що розмежовує два відсіки

$$\mu_s^{0II} + RT \ln X_s^{II} - \mu_s^{0I} - RT \ln X_s^I = 0 \quad (20.5)$$

або

$$\mu_s^{0II} - \mu_s^{0I} + RT \ln X_s^{II} = 0, \quad (20.6)$$

оскільки  $X_s^I = 1$  (розчинена речовина відсутня у відсіку I). Слід зауважити, що  $\mu_s^0$  залежить лише від тиску. Використовуючи вираз (15.60), можна записати:

$$d\mu_s = v_s dp, \quad (20.7)$$

де  $v_s$  — молекулярний об'єм розчинника.

Інтегруючи останній вираз, отримаємо:

$$\int_{\mu_s^{0I}}^{\mu_s^{0II}} d\mu_s = \int_{p^I}^{p^{II}} v_s dp, \quad (20.8)$$

звідки

$$\mu_s^{0II} - \mu_s^{0I} = v_s (p^{II} - p^I). \quad (20.9)$$

Підстановка рівняння (20.6) у (20.9) приводить до виразу:

$$p^{II} - p^I = p_{осм} = -\frac{RT}{v_s} \ln X_s^{II}, \quad (20.10)$$

де  $p_{осм}$  — осмотичний тиск.

Запишемо вираз для загальної молекулярної частки розчиненої речовини  $X_A$ :

$$X_A = \frac{n_A}{n_s + n_A} \approx \frac{n_A}{n_s}. \quad (20.11)$$

Тут взято до уваги, що для розбавлених розчинів  $X_A \ll X_s$ .

З врахуванням того, що  $n_s \cdot v_s$  є об'єм  $V$  розчинника, можна записати:

$$\frac{n_A}{n_s} = v_s C_A, \quad (20.12)$$

де  $C_A$  — концентрація розчиненої речовини.

Логарифм у правій частині виразу (20.10) можна розкласти в такий ряд:

$$\ln X_s^{II} = -\ln(1 - X_A^{II}) = -X_A^{II} - \frac{(X_A^{II})^2}{2} - \frac{(X_A^{II})^3}{3} - \dots, \quad (20.13)$$

який для розбавлених розчинів набуває вигляду:

$$\ln X_s^{II} = -X_A = -v_s C_A. \quad (20.14)$$

Таким чином, осмотичний тиск визначається виразом, що називається *рівнянням Вант-Гоффа*:

$$p_{осм} = RTC_A. \quad (20.15)$$

Отже, осмотичний тиск — це тиск розчину на напівпроникну мембрану, що відмежовує його від розчинника або від розчину з меншою концентрацією. Осмотичний тиск в живому організмі — один з найважливіших факторів, що впливають на розподіл води і розчинених речовин у тканинах.

## 20.3. МЕМБРАННИЙ ТРАНСПОРТ

### 20.3.1. Електрохімічний потенціал

Розглянемо деяку ємність, розділену на два відсіки мембраною, проникну тільки для іонів калію. Якщо концентрація розчинів  $KCl$  в обох відсіках однакова, то кількість іонів  $K^+$ , що переходять з відсіку  $I$  у відсік  $II$  і навпаки, буде однаковою. Через це різниця потенціалів, що встановлюється на мембрані, дорівнює нулю (рис. 20.5,а).

Якщо концентрація розчину  $KCl$  у відсіку  $I$  перевищує концентрацію у відсіку  $II$ , буде мати місце дифузія іонів (рис. 20.5,б), за якої кількість позитивних зарядів у відсіку  $II$  збільшиться. Таким чином, на мембрані встановлюється різниця потенціалів (рис. 5.11,в).

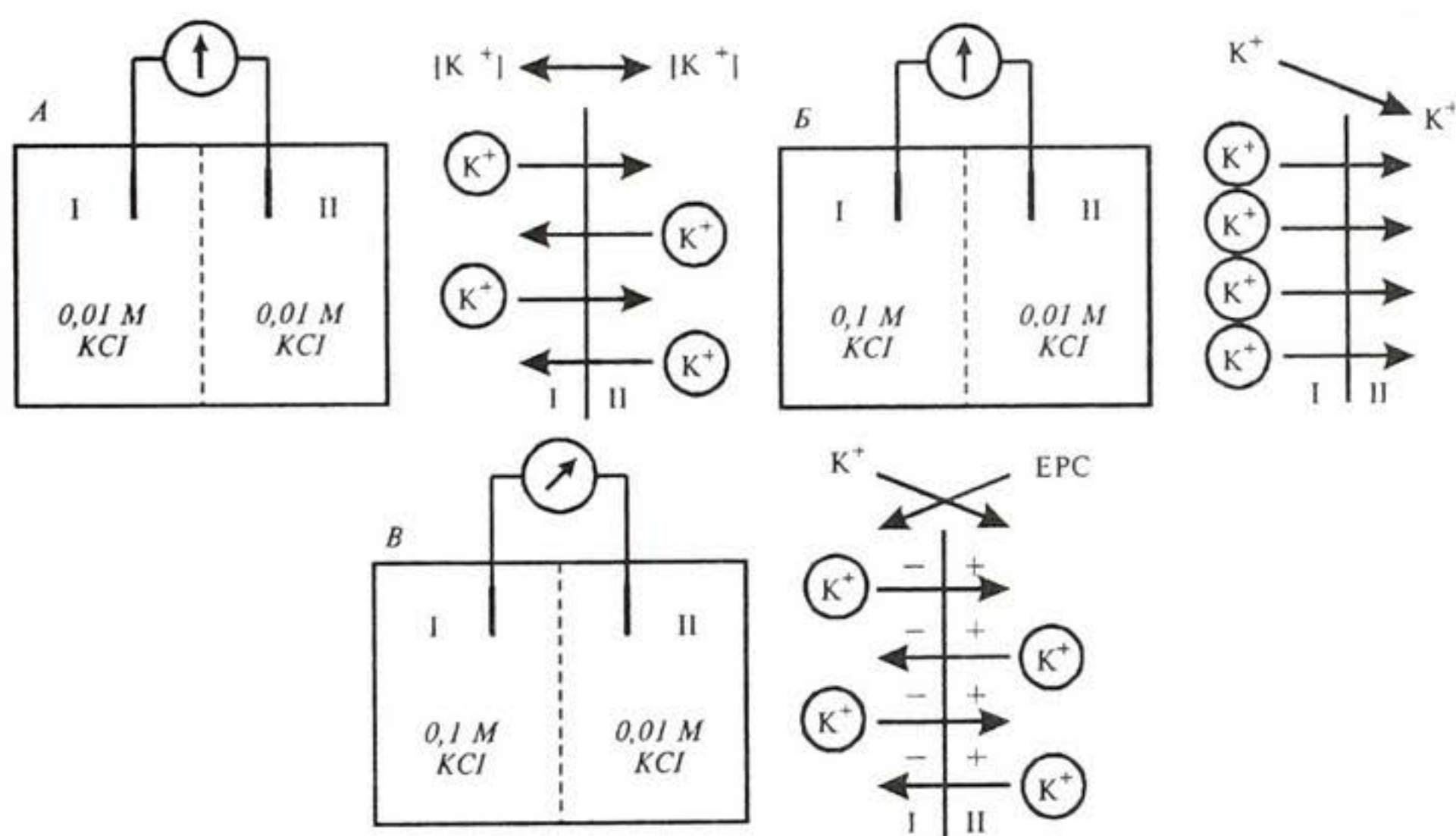


Рис. 20.5. Електрохімічна рівновага: А. в обох відсіках однакова концентрація  $KCl$ ; Б. збільшення концентрації  $KCl$  у відсіку  $I$  приводить до виникнення потоку іонів  $K^+$  у розчин  $II$ , доки  $EPC$  не зрівноважить концентраційний градієнт; В. після досягнення рівноваги сумарний потік іонів  $K^+$  через мембрану дорівнює нулю

Отже, різниця концентрацій іонів  $K^+$  між відсіками являє собою *хімічний градієнт* (або хімічну різницю потенціалів), що зумовлює дифузійний потік іонів крізь мембрану з відсіку  $I$  у відсік  $II$ .

В той же час, накопичення позитивних зарядів у відсіку  $II$  сприяє утворенню *електричного градієнта* (або електричної різниці потенціалів), який змушує іони  $K^+$  рухатися в протилежному напрямку — з відсіку  $II$  у відсік  $I$ .

В цілому наявність концентраційного (хімічного) і електричного градієнтів зумовлює стан *електрохімічної рівноваги* іонів  $K^+$ . Різниця потенціалів, що виникає на мембрані при такому стані, називається *електрохімічним (рівноважним) потенціалом*.

### 20.3.2. Іонна рівновага

Осмотичний тиск зумовлений зниженням хімічного потенціалу розчинника в присутності розчиненої речовини. Аналогічна ситуація має місце, коли мембрана розмежовує заряджені частинки — іони. Розглянемо мембрану, що ділить два відсіки  $I$  та  $II$  з різною концентрацією електроліту  $C^+A^-$  і характеризується односторонньою проникністю для катіонів  $C^+$ .

Для системи з двох відсіків, розділених мембраною, хімічна різниця потенціалів  $\Delta\mu = \mu_I - \mu_{II} \neq 0$ , якщо концентрації розчинів у відсіках різні. Втім,  $\Delta t = 0$ , якщо концентрації однакові.

Рівновага настає, коли при переході одного моля цих катіонів з відсіку  $I$  у відсік  $II$  зміна вільної енергії дорівнює нулю:

$$\Delta G = \tilde{\mu}_c^{II} - \tilde{\mu}_c^I = 0, \quad (20.16)$$

де  $\tilde{\mu}_c$  — електрохімічний потенціал.

Електрохімічний потенціал  $\tilde{\mu}$  враховує хімічний потенціал  $\mu$  та електричну роботу  $W_{el} = zF\varphi$  з перенесення заряджених частинок:

$$\tilde{\mu} = \mu + W_{el} = \mu + zF\varphi. \quad (20.17)$$

де  $Z$  — валентність іона,  $F$  — число Фарадея ( $9,64846 \cdot 10^4$  Кл · моль),  $\varphi$  — потенціал на мембрані.

У разі перенесення іонів або незаряджених часток з відсіку  $I$  у відсік  $II$  крізь мембрану зміна електрохімічного потенціалу визначається за виразом:

$$\Delta\tilde{\mu} = \Delta\mu + W_{el} = \mu_{II}^0 - \mu_I^0 + RT \ln \frac{C_{II}}{C_I} + ZF\Delta\varphi. \quad (20.18)$$

Умова рівноваги має вигляд:

$$\Delta\tilde{\mu} = 0, \quad (20.19)$$

звідки

$$\mu_i^0 + RT \ln C_i + ZF\varphi_i = \mu_{ii}^0 + RT \ln C_{ii} + ZF\varphi_{ii}. \quad (20.20)$$

Припускаючи, що хімічні потенціали за відсутності розчиненої речовини і електричного поля рівні ( $\mu_i^0 = \mu_{ii}^0$ ), отримуємо вираз:

$$\Delta\varphi = \varphi_{ii} - \varphi_i = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_i}{C_{ii}}. \quad (20.21)$$

Для клітинної мембрани, що розмежовує зовнішнє ( $C_e$ ) і внутрішнє ( $C_i$ ) середовища, останній вираз можна переписати так:

$$\Delta\varphi = \varphi_e - \varphi_i = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_i}{C_e}. \quad (20.22)$$

Цей вираз отримав назву *рівняння Нернста*. Внутрішньо- та зовнішньоклітинні концентрації іонів наведено в табл. 20.1.

### 20.1. Внутрішньо- та зовнішньоклітинні концентрації іонів

Концентрація (ммоль/л)	Гігантський аксон кальмара	Кравецький м'яз жаби
Внутрішньоклітинне середовище $C_i$		
Na <sup>+</sup>	78	13
K <sup>+</sup>	392	138
Ca <sup>2+</sup>	0,4	30
Mg <sup>2+</sup>	11	16
Cl <sup>-</sup>	104	2
Зовнішньоклітинне середовище $C_e$		
Na <sup>+</sup>	462	108
K <sup>+</sup>	22	2,5
Ca <sup>2+</sup>	11	2
Mg <sup>2+</sup>	56	1
Cl <sup>-</sup>	286	

### 20.3.3. Рівновага Гіббса-Доннана

Більшість біологічних мембран проникні для малих іонів (наприклад, Na<sup>+</sup> або Cl<sup>-</sup>), але здатні не пропускати в той же час великих іонів. У випадку, коли мембрана проникна для іонів обох знаків (така ситуація може виникнути, коли в розчин солі, іони якої пропускає мембрана, додають великі молекули, наприклад, білки, для яких мембрана непроникна), в системі встановлюється *рівновага Гіббса-Доннана*:

$$\Delta\varphi = \frac{RT}{F} \ln r, \quad (20.23)$$

де

$$r = C''(A^-) / C''(C^+) = C''(A^-) / [C''(A^-) - Z_0 C_0]. \quad (20.24)$$

Тут  $C''(A^-)$  та  $C''(C^+)$  — концентрації малих аніонів та катионів у відсіці II;  $C_0$  — концентрація великих іонів.

### 20.3.4. Види транспорту

Є такі типи транспорту (перенесення) речовин крізь мембрани:

- ♦ *пасивний транспорт*, що викликається градієнтом хімічного потенціалу (для незаряджених молекул або частинок) або градієнтом електрохімічного потенціалу (для іонів або заряджених частинок); цей вид транспорту здійснюється завдяки *дифузії* через ліпідний бішар (переміщення молекул з області високої концентрації в область низької концентрації за самодостатнього руху) або *полегшеної дифузії* (транспорту, що здійснюється за допомогою переносників або каналів) і не потребує затрат хімічної енергії;

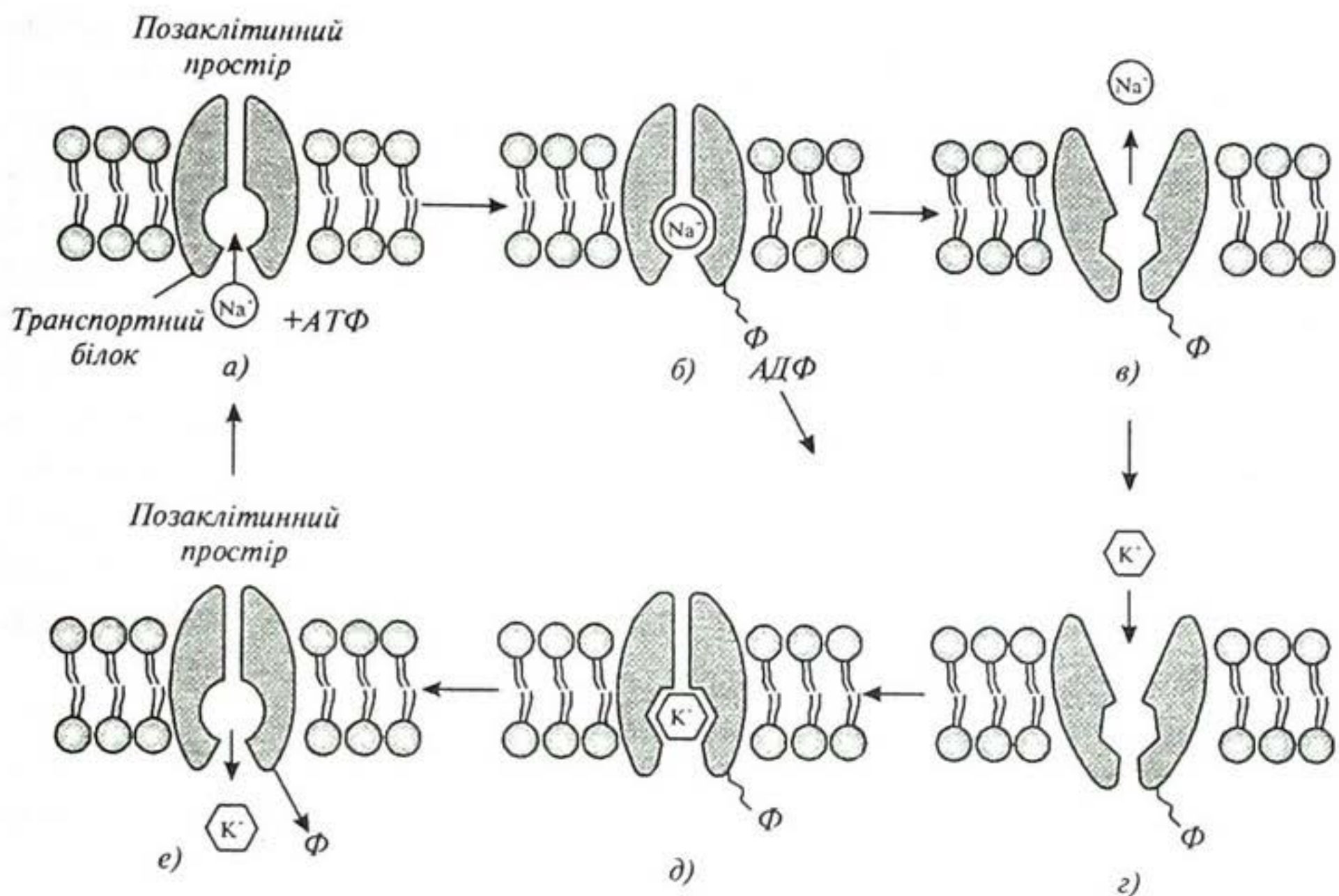
- ♦ *активний транспорт* передбачає перенесення незаряджених молекул або частинок та іонів проти градієнта хімічного або електрохімічного потенціалу. Цей вид транспорту пов'язаний з енергетичними затратами.

Якщо пасивний транспорт приводить до вирівнювання градієнтів, то активний відновлює ці градієнти. Транспортні системи, що утворюють необхідний концентраційний градієнт, називаються *насосами* або *АТФазами*.

Прикладом системи активного транспорту є  $Ca^{2+}$  насос (або  $Ca^{2+}$ -АТФаза), який являє собою фермент, локалізований в саркоплазматичному ретикулумі, що створює градієнт концентрації  $Ca^{2+}$  в м'язах (див. розділ 3.3) і активізує м'язове скорочення.

Транспорт  $Ca^{2+}$  відбувається завдяки гідролізу АТФ, під час якого виділяється достатньо енергії для перенесення двох іонів  $Ca^{2+}$ .

Ще одним прикладом активного транспорту є робота  $Na^+$ - $K^+$  насоса. Звичайно в тваринній клітині низька концентрація  $Na^+$  і висока —  $K^+$ . Енергія, необхідна для роботи цього насоса, також забезпечується молекулами АТФ. Транспорт іонів  $Na^+$  і  $K^+$  здійснюється спеціальними білками, здатними отримувати дві модифікації своєї форми (рис. 20.6). Одна з них характеризується наявністю порожнини, в яку може ввійти іон  $Na^+$  з середини клітини. Інша модифікація має порожнину, відкриту для іона  $K^+$ , і дефосфорилується (залишок фосфорної кислоти відщеплюється від фосфоровмісних органічних сполук), набуваючи первісної форми. Іон  $K^+$ , таким чином, потрапляє всередину клітини. Врешті решт, упоперек мембрани утворюються градієнти іонів  $Na^+$  і  $K^+$ .



**Рис. 20.6.** Модель роботи натрієво-калієвого насоса: а) — іон  $\text{Na}^+$  в цитоплазмі з'єднується з молекулою транспортного білка; б) — реакція за участю АТФ, що супроводжується вивільненням АДФ; в) — зміна конфігурації білка і вихід іона  $\text{Na}^+$  з клітини; г) — перехід іона  $\text{K}^+$  із зовнішнього середовища в клітину; д) — зв'язування іона  $\text{K}^+$  з транспортним білком; е) — відщеплення фосфатної групи від білка, вивільнення іона  $\text{K}^+$  в цитоплазму і відновлення первинної конфігурації білка

### 20.3.5. Ендо- та екзоцитоз

Плазматична мембрана здатна транспортувати всередину клітини чи з неї деякі речовини у складі маленьких міхурців — *везикул*. В цьому разі ділянка плазматичної мембрани охоплює речовину і утворює везикулу, що потрапляє в клітину. Такий процес називають *ендоцитозом*.

Є три типи ендоцитозу — якщо поглинається тверда речовина, кажуть про *фагоцитоз*; якщо рідина — процес називають *піноцитозом*. Третій тип ендоцитозу здійснюється за допомогою рецепторів — мембранних білків, з якими зв'язуються *ліганди* — молекули або частинки, що включають різні плазматичні білки, гормони, токсини тощо, не здатні проходити по мембранних каналах. За зв'язування рецептора з лігандом утворюється комплекс «рецептор-ліганд», який накопичується в заглибленні мембрани з подальшим відривом везикули від поверхні мембрани (рис. 20.7).



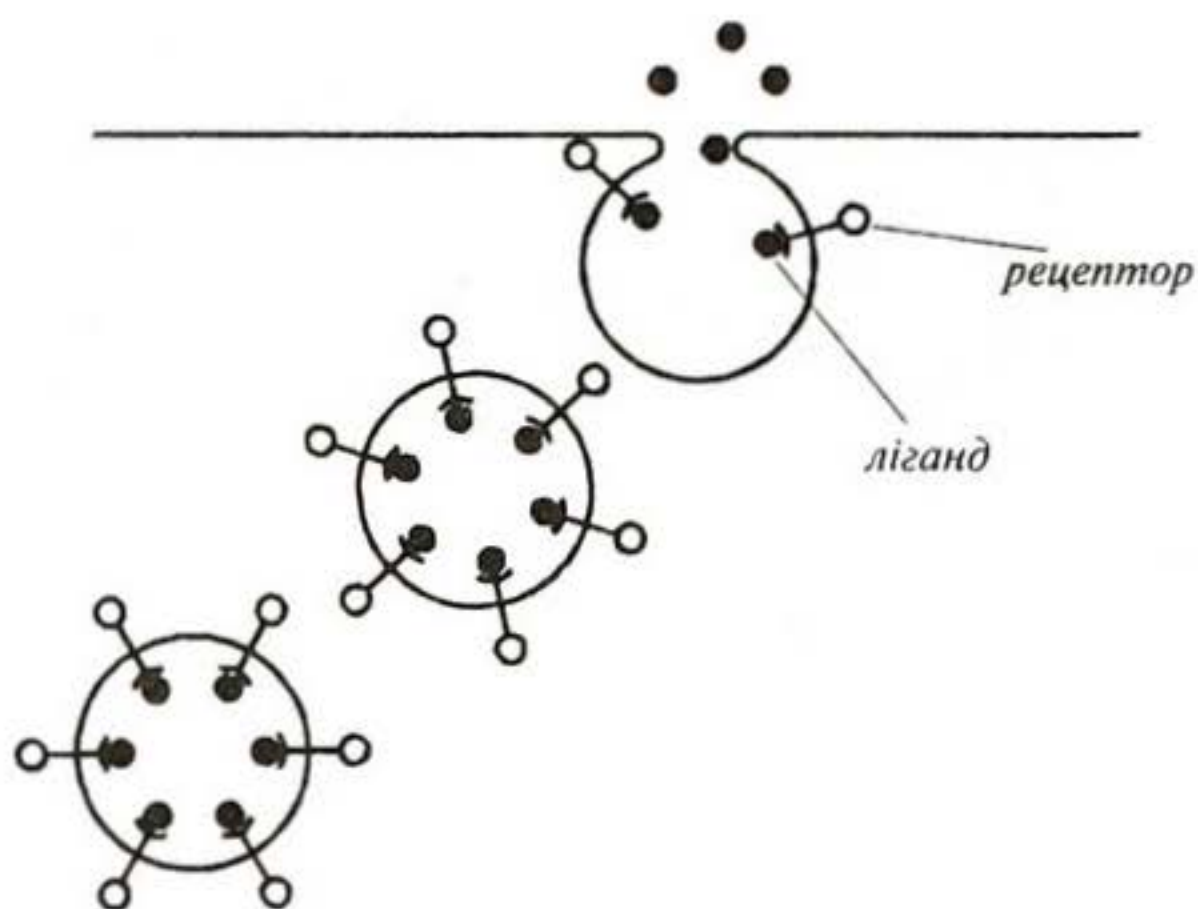


Рис. 20.7. Накопичення комплексів «рецептор-ліганд» у везикулі клітини з подальшим відривом везикули від поверхні мембрани

Процес злиття везикул з плазматичною мембраною і вивільнення їхнього вмісту у зовнішньоклітинний простір називається екзоцитозом. Завдяки цьому процесу нервові закінчення виділяють медіаторні речовини, клітини травних залоз — ферменти, ендокринні клітини — відповідні гормони.

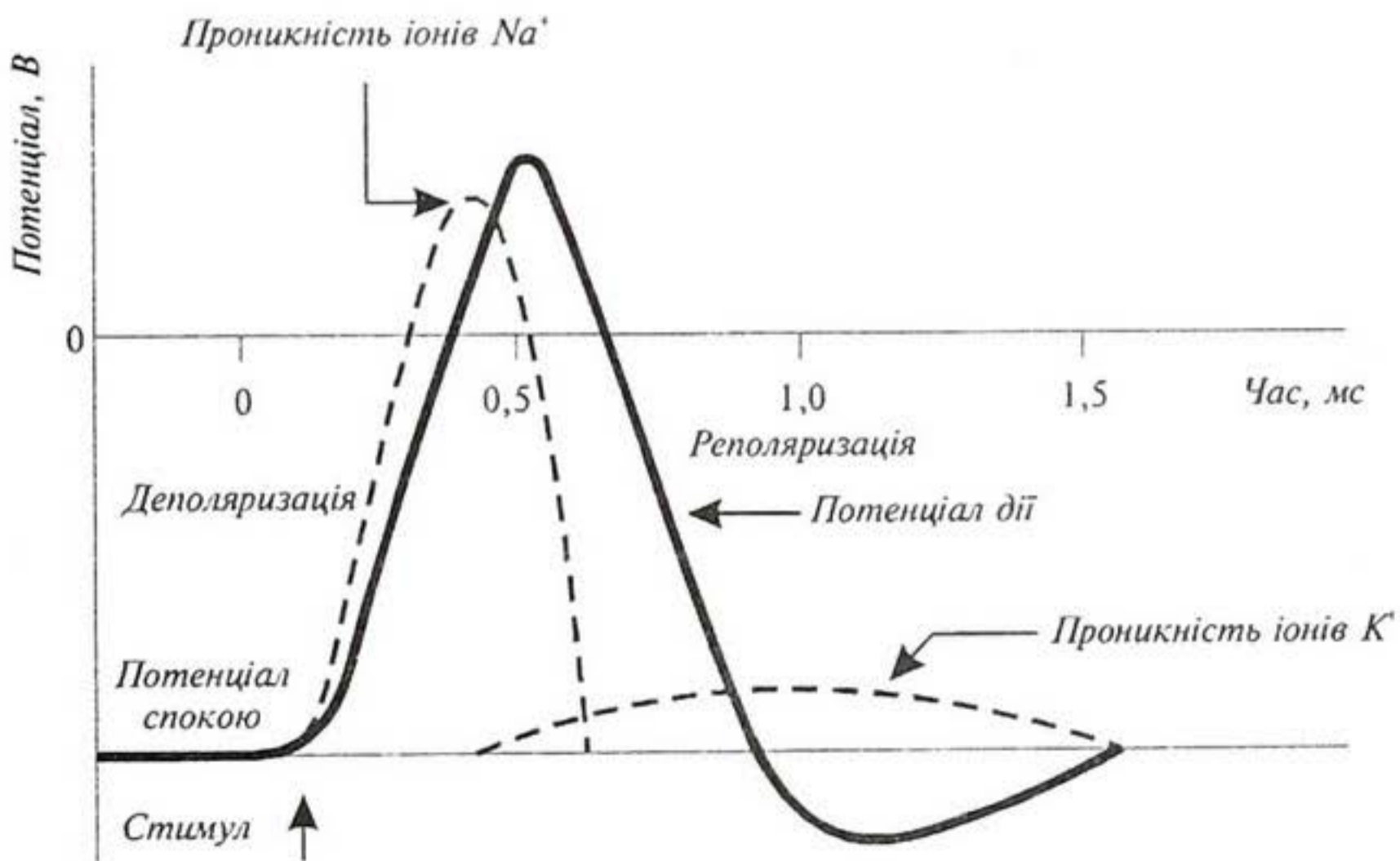
### 20.3.6. Мембранний потенціал

Внутрішнє і зовнішнє середовища клітини характеризуються нерівномірним розподілом певних іонів. Так, основним іоном у зовнішньому середовищі клітини є натрій — його концентрація в зовнішньому середовищі клітини в 5÷15 разів перевищує концентрацію у внутрішньому середовищі. В самій клітині переважають іони калію, концентрація яких в 20÷40 разів більша, ніж у зовнішньоклітинному. Крім того, клітинна мембрана характеризується селективною іонною проникністю, зумовленою наявністю іонних каналів. Мембрана збудженої клітини легко пропускає іони калію, але блокує проходження іонів натрію. При цьому концентрація іонів натрію всередині клітини стає значно меншою, ніж у зовнішньому середовищі. Оскільки ці іони несуть позитивний заряд, зовнішнє середовище заряджається позитивно відносно внутрішнього. Крім того, іони калію, які теж позитивні, намагаються зрівноважити електричний заряд і входять в клітину, що приводить до збільшення концентрації всередині клітини. В решті-решт, на клітинній мембрані утворюється так званий *потенціал спокою*. Величина його коливається для різних клітин від  $-60$  до  $-90$  мВ. Про клітину у стані спокою кажуть, що вона *поляризована*.

Під час дії на мембрану зовнішнього стимулу (наприклад, механічної, хімічної або електричної природи) електричний баланс порушується, що супроводжується проникненням іонів натрію всередину клітини і виникненням швидкої зміни мембранного потенціалу. В той же час іони калію залишають клітину, хоча й не так

швидко, як іони натрію. На мембрані встановлюється позитивний потенціал дії (близько  $20\div 30$  мВ). Цей потенціал виникає не на всій мембрані, а лише в тій ділянці, до якої був прикладений зовнішній стимул. Процес збудження мембрани, що супроводжується появою потенціалу дії, називається *деполяризацією*. Мембрана повертається до первинного стану рівноваги, який характеризується блокуванням проходження іонів натрію всередину клітини. Цей процес транспорту іонів натрію назовні, що викликає поляризацію клітини, називається *реполяризацією*.

Основними властивостями потенціалу дії є: 1. типова величина амплітуди становить близько 130 мВ і не залежить від амплітуди зовнішнього стимулу; потенціал дії триває кілька мілісекунд (рис. 20.8); 2. полярність потенціалу дії протилежна полярності потенціалу спокою; 3. під час деполяризації і на початку фази реполяризації відповідна ділянка мембрани тимчасово стає незбуджуваною, несприйнятливою (*рефрактерною*); 4. потенціал дії поширюється клітинною мембраною від місця збудження наче біжуча хвиля зі швидкістю  $50\div 150$  м/с (для хребетних). У випадку нервової клітини потенціал дії, що поширюється вздовж аксона, являє собою *нервовий імпульс*.



**Рис. 20.8.** Утворення потенціалу дії: після прикладання стимулу відбувається швидке зростання проникності мембрани для іонів натрію і повільне — для іонів калію, в результаті чого іони натрію входять у клітину, а іони калію виходять з неї, утворюючи результуючий потенціал

## 20.4. ПРОЦЕСИ МІЖКЛІТИННОЇ ВЗАЄМОДІЇ

Основне призначення нервової системи організму полягає в швидкій передачі інформації. Функціональними одиницями нервової системи є клітини, що називається *нейронами*. Кожний нейрон складається з клітинного тіла, з якого виходять невеликі розгалужені відростки — *дендрити*, а також один довгий відросток — *аксон* (рис. 20.9). Аксон оснащений *мієліновою оболонкою*, що складається з кількох шарів ліпідної мембрани, яка періодично перекривається, утворюючи *вузли Ранвє*. Закінчується нейрон *нервовими закінченнями*. Пучки клітинних тіл називають *гангліями*, а пучки аксонів — *нервами*.

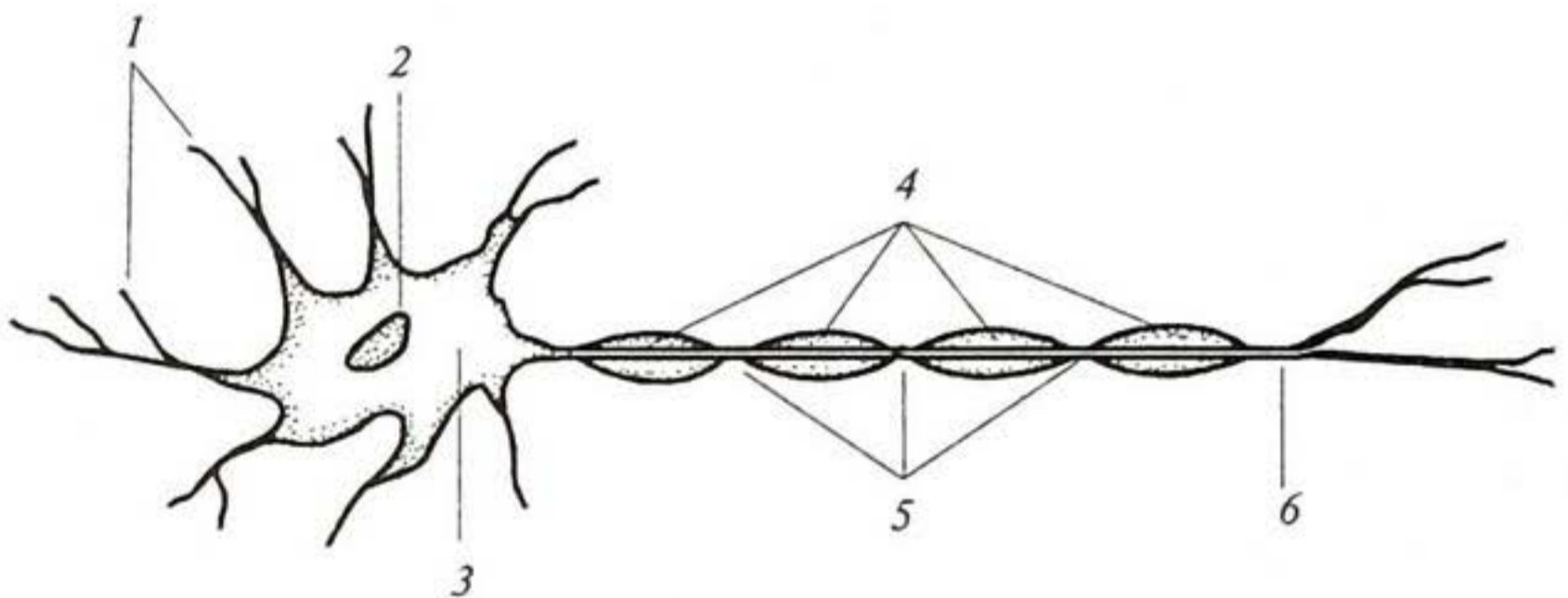


Рис. 20.9. Структура нервової клітини — нейрона: 1 — дендрити; 2 — ядро; 3 — клітинне тіло; 4 — мієлінова оболонка; 5 — вузол Ранвє; 6 — аксон

Завдяки нервовим клітинам здійснюється хімічна сигналізація — електричний сигнал у вигляді потенціалу дії поширюється вздовж нервового волокна, у нервовому закінченні якого відбувається хімічний процес, що супроводжується виділенням *нейромедіатора*. Останній досягає клітини-мішені за дифузії.

Передача збудження з нервової клітини на м'язові клітини відбувається за допомогою спеціалізованого структурного утворення — *синапсу*, що складається з пресинаптичної частини (нервового закінчення), синаптичної щілини і постсинаптичної частини (рис. 20.10). У пресинаптичній структурі містяться внутрішньоклітинні синаптичні пухирці з високою концентрацією медіаторів.

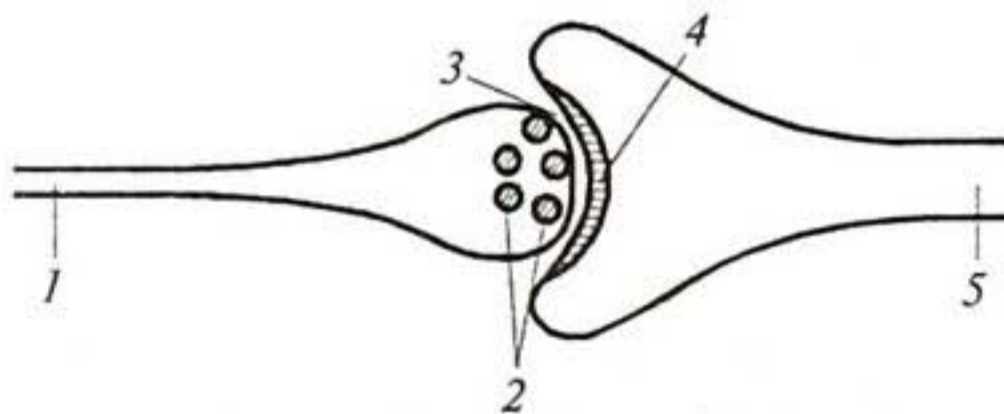


Рис. 20.10. Синапс: 1 — пресинаптична структура; 2 — везикули з молекулами медіатора; 3 — синаптична щілина; 4 — поверхня, чутлива до молекул медіатора; 5 — постсинаптична структура

Як тільки потенціал дії наближається до пресинаптичної структури, з останньої виділяються молекули медіатора (ацетилхоліну), що швидко (близько 1 мс) дифундують крізь синаптичну щілину (розміри якої становлять 10÷50 нм) і досягають закінчення постсинаптичної частини — мембрани, в якій міститься білок-рецептор (холінорецептор). Об'єднання ацетилхоліну з холінорецептором приводить до зміни структури і проникності постсинаптичної мембрани для іонів натрію, що викликає деполяризацію постсинаптичної мембрани і виникнення у м'язовому волокні потенціалу дії, що поширюється.

## 20.5. ЕЛЕКТРИЧНА АКТИВНІСТЬ ОРГАНІЗМУ

### 20.5.1. Техніка вимірювання мембранних струмів

Іони, що проникають крізь мембрани, несуть електричний заряд, завдяки чому в мембрані утворюються електричні струми величиною порядку  $10^{-12}$  А. Вимірювати ці струми можна за допомогою мікроелектродів з витягнутих тонких скляних трубок. Один з перших підходів до реалізації таких вимірювань передбачав безпосереднє занурення мікроелектрода в клітину (рис. 20.11). Але така техніка могла застосовуватися лише до великих клітин; крім того, мікроелектрод перетинав і плазматичну, і вакуолярну мембрани, що ускладнювало процес вимірювань внаслідок впливу струмів через обидві мембрани.

Ці проблеми були успішно розв'язані за допомогою *петч-клемп-методу*, який полягає в установленні тісного контакту відполірованого скляного мікроелектрода (мікропіпетки) діаметром 0,5÷1 мкм з мембраною, що оточує ізольований протопласт (клітину, без клітинної оболонки). Такий тісний контакт досягався завдяки легкому всмоктуванню. Назва цієї техніки походить від англійських слів «patch» — латка, пластир (невелика область в зоні контакту мікропіпетки з мембраною) та «clamp» — скріплювати. Вимірювання проводять або з прикріпленою цілою клітиною, або лише з тією її частиною, що залишається в отворі мікропіпетки (рис. 20.12). В останньому випадку латку розміщують у фізіологічному розчині, який оточує її зовні, та подається через піпетку. Малі діаметри мікропіпетки да-

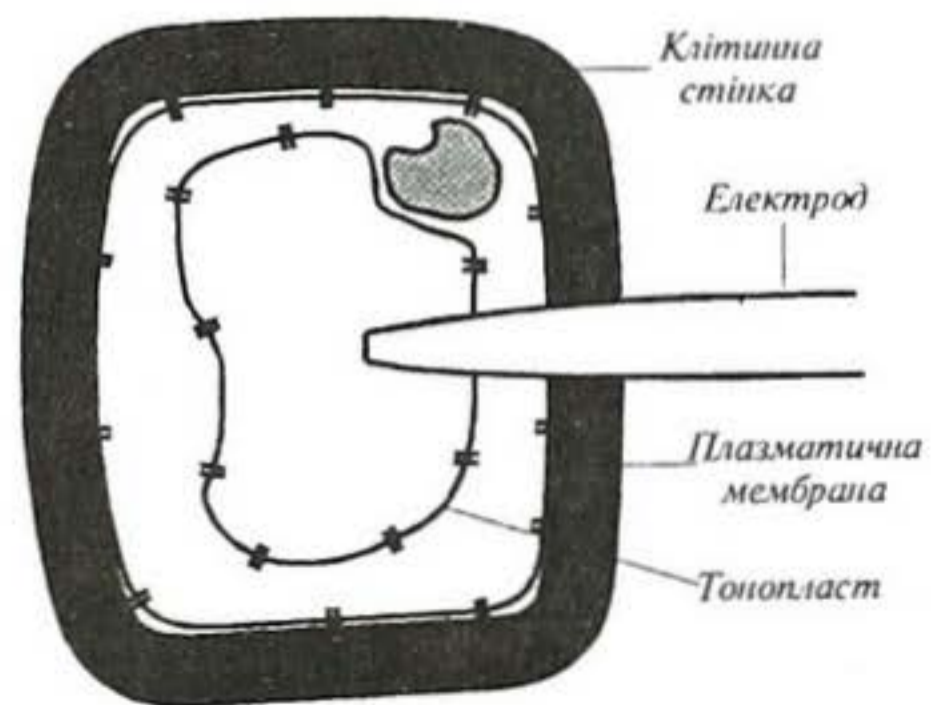


Рис. 20.11. Безпосереднє занурення електрода в клітину



**Рис. 20.12.** Принцип кетч-клемп-методу реєстрації мембранних струмів (пояснення в тексті)

ють змогу вимірювати струми через окремі іонні канали. Оскільки протопласт має сферичну форму, можна виміряти його об'єм і оцінити потік зарядів через одиницю площі мембрани. Ще одна перевага методу полягає в можливості відрізнити електричні події, що відбуваються на плазматичній і вакуолярній мембранах, і контролювати склад зовнішнього і внутрішнього середовищ.

### 20.5.2. Електрична активність серцевої клітини

Електрична активність серця може бути розглянута на основі уявлень про серце як *електричний диполь*, що знаходиться у провідному середовищі. Диполь являє собою пару різнойменних електричних зарядів, розділених певною відстанню. Дипольний електричний момент одиниці об'єму є векторною величиною. Розглянемо як приклад диполя серцеву клітину у сольовому розчині (рис. 20.13). Вимірювання різниці потенціалів в такій клітині буде здійснюватися між точками *A-B* та *C-D* (рис. 20.13,а).

Точка 1 на рис. 20.13б відповідає потенціалу спокою на клітинній мембрані. Цьому стану клітини відповідає негативно заряджена внутрішня частина і позитивно заряджена зовнішня частина клітини. Різниця потенціалів між точками *A-B*, як і між точками *C-D*, дорівнює нулю.

Точка 2 відповідає виникненню потенціалу дії в лівій частині клітини та його поширенню у бік правої її частини. При цьому на лівій ділянці клітини змінюються знаки зарядів на зовнішній і внутрішній частинах клітини, а на правій частині нічого не відбувається. В цих умовах клітина перетворюється у диполь, спрямований від позитивно зарядженої лівої до негативно зарядженої правої частини клітини. В цьому разі в точці *A* виникає позитивний потенціал відносно точки *B*; різниця потенціалів між точками *C-D* дорівнює нулю.

Точка 3 відповідає стану клітини, коли зовнішня частина заряджена негативно, а внутрішня — позитивно. Різниця потенці-

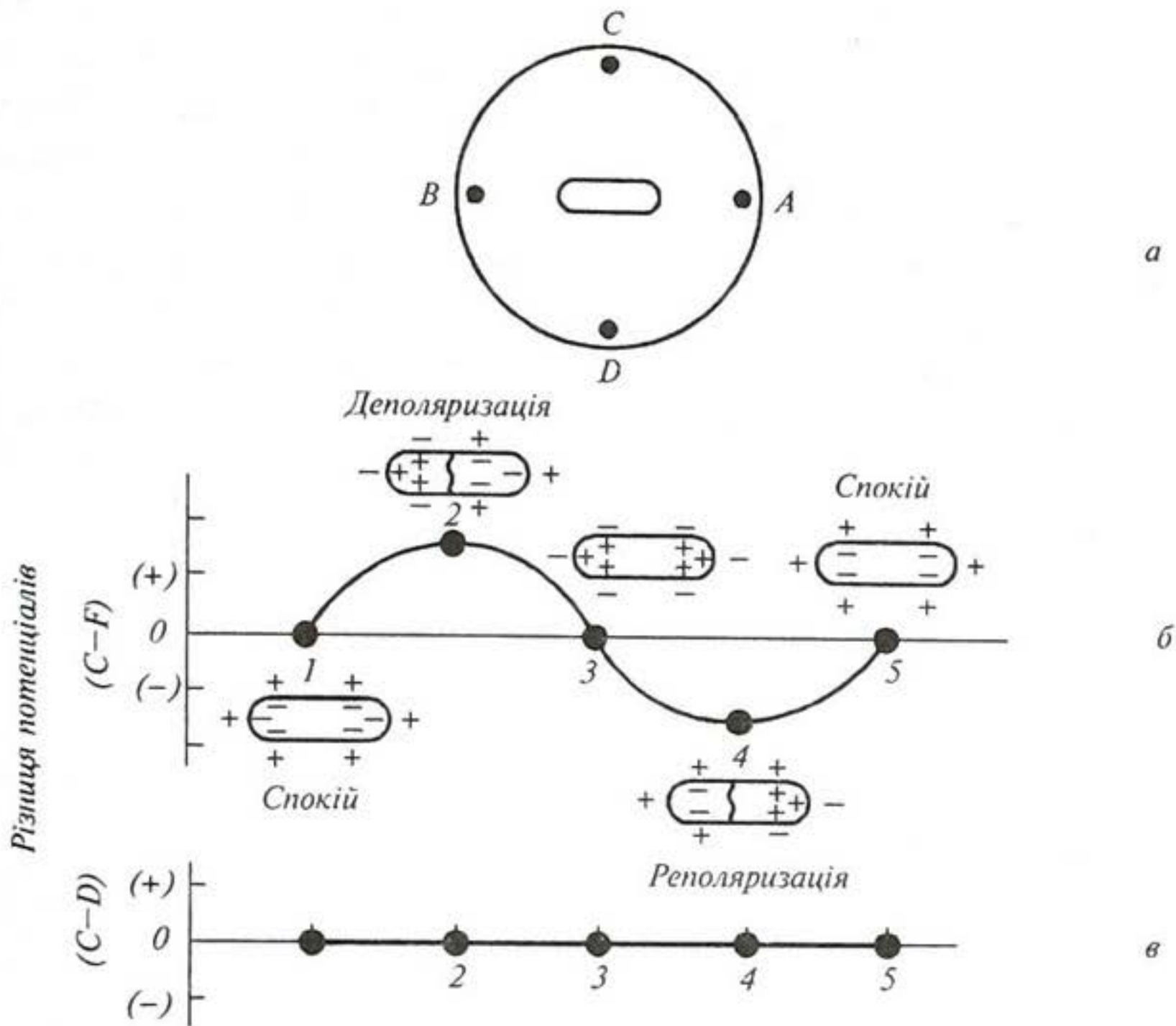


Рис. 20.13. Окрема серцева клітина у сольовому розчині: а — клітина як диполь і точки, між якими вимірюється різниця потенціалів; б — характер зміни різниці потенціалів між точками А-В протягом збудження та поширення потенціалу дії; в — характер зміни різниці потенціалів між точками С-Д протягом збудження та поширення потенціалу дії

алів, що реєструється між точками А-В і С-Д, дорівнює нулю; така ситуація відповідає деполяризації клітини.

Точка 4 відповідає процесу реполяризації клітини — зміні знаків зарядів порівняно зі станом, що відповідає точці 2. В цьому разі ліва частина клітини перебуває у стані спокою, а права відповідає максимуму потенціалу дії. В точці А виникає негативний відносно точки В потенціал. Вектор диполя змінює напрямок на протилежний.

Точка 5 відповідає стану спокою клітини: різниця потенціалів між точками А-В дорівнює нулю. Протягом усього процесу різниця потенціалів між точками С-Д залишається рівною нулю.

### 20.5.3. Електрична активність серця

Щось схоже відбувається в усьому серці, яке можна уявити як одну велику клітину. Розглянемо результати реєстрації різниці потенціалів, розміщених уздовж периметра басейну (точки В, А, С на рис. 20.14,а), в якому перебуває серце. В цілому, серце заряджене

позитивно зовні і негативно — всередині. Різниця потенціалів між точками  $B-A$ ,  $A-C$ ,  $C-B$  дорівнює нулю. Процес збудження серця починається в межах синусового вузла, клітини якого утворюють потенціал дії, що поширюється від вузла назовні. Як видно з рис. 20.14,а, потенціал дії поширюється донизу правого передсердя і досягає лівого передсердя. Система двох передсердь утворює електричний диполь: праве передсердя заряджене негативно, а ліве — позитивно. Даній ситуації відповідає різниця потенціалів між точками  $A-B$  (рис. 20.14,б). Оскільки нижні частини передсердя заряджені позитивно відносно верхніх частин, в точці  $C$  реєструється позитивний потенціал відносно точок  $B$  і  $A$  (рис. 20.14,в,г).

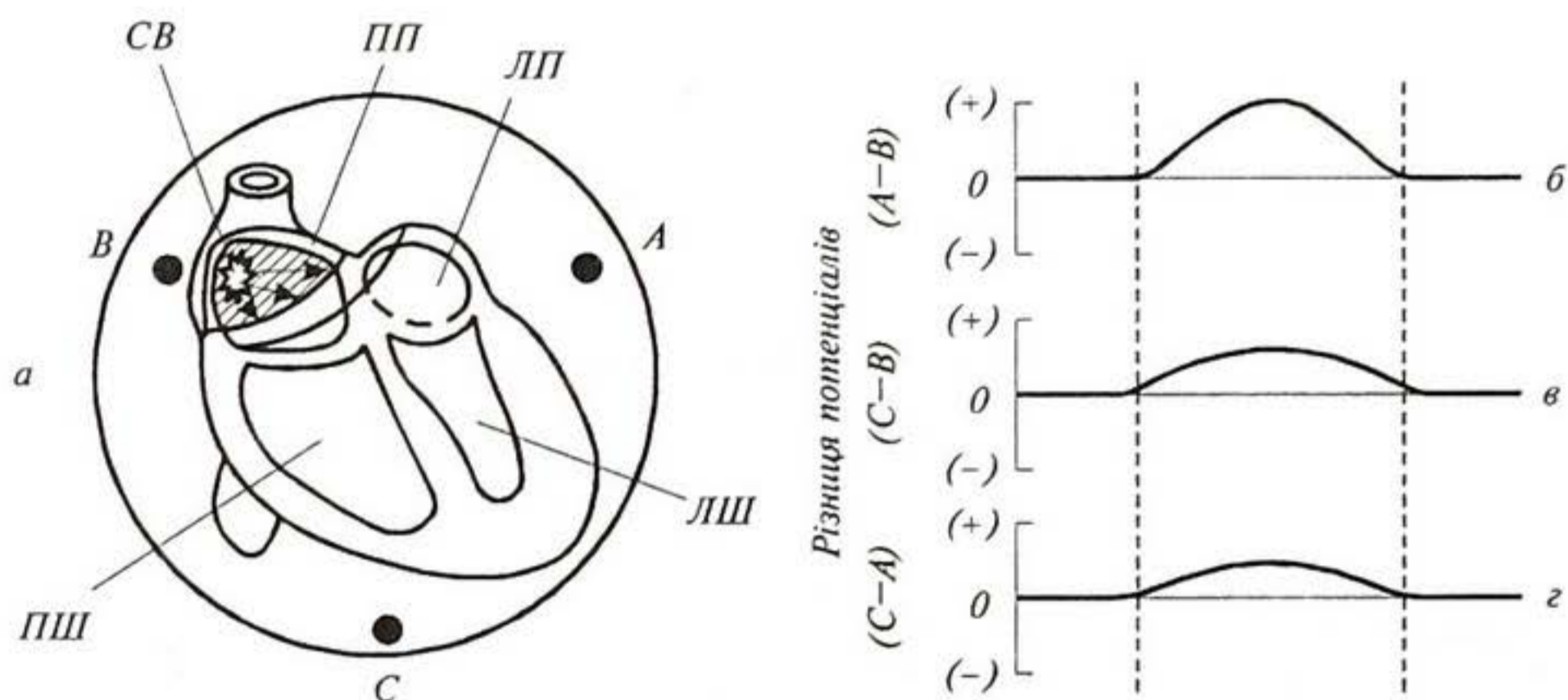


Рис. 20.14. Розвиток електрокардіограми серця у сольовому розчині: а — реєстрація різниці потенціалів по периметру басейна; б—г — зміна різниці потенціалів між точками  $A-B$ ,  $C-B$ ,  $C-D$  при переході від стану спокою через стан, що характеризується утворенням диполя, до стану деполяризації

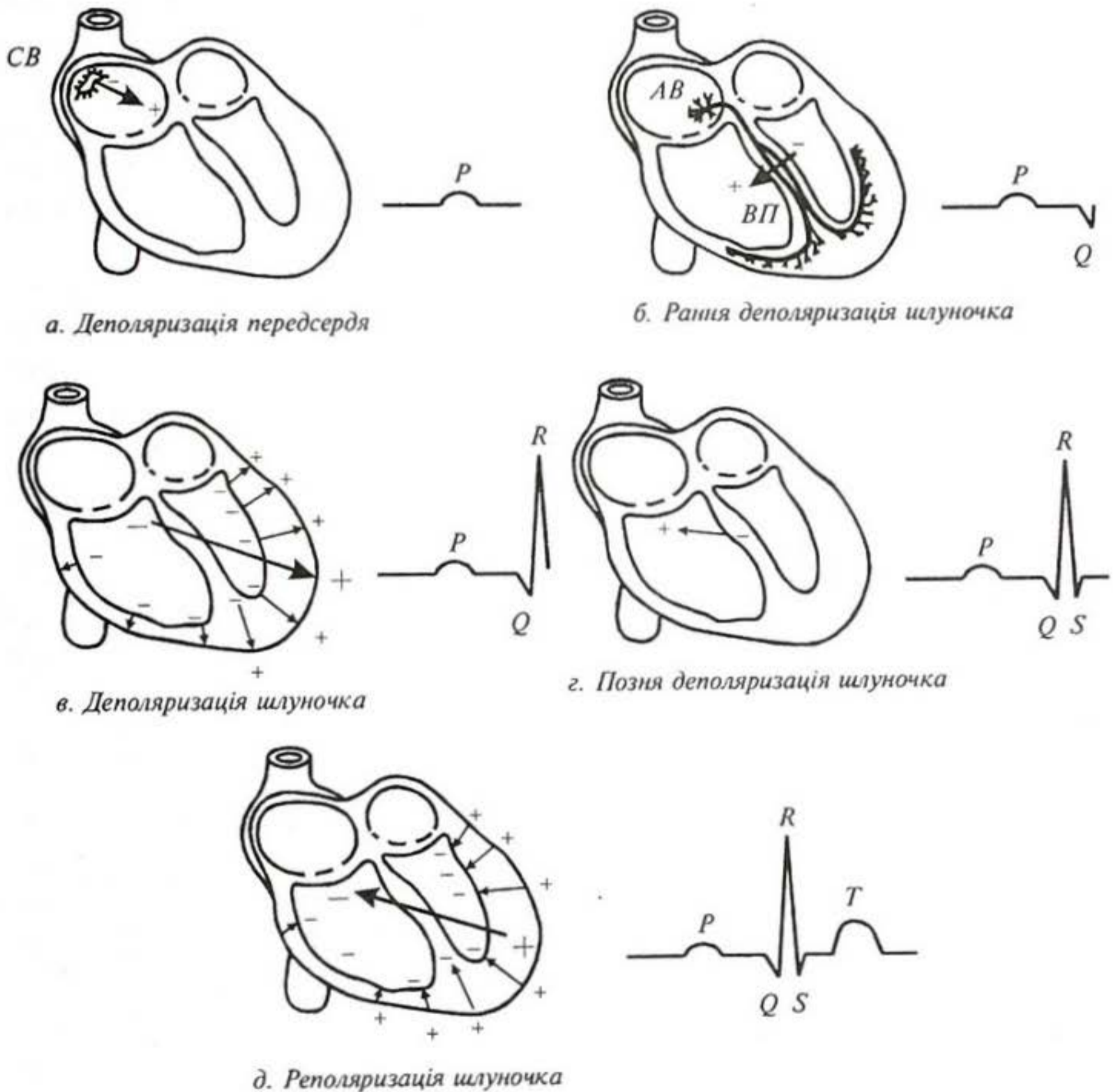
#### 20.5.4. Принципи електрокардіографії

**Електрокардіографія.** Процедура вивчення механізмів електричної активності серця, її характеристики в нормі і при патологічних процесах, а також техніка реєстрації електричної активності міокарду впродовж серцевого циклу називається *електрокардіографією*. Залежність електричного потенціалу на поверхні тіла тварини від часу називається *електрокардіограмою (ЕКГ)*.

Розглянемо характерні риси електрокардіограми. За поширення потенціалу дії ліва передня кінцівка (їй відповідає точка  $A$  на рис. 20.14) заряджається позитивно відносно правої (точка  $B$  на рис. 20.14). Першою характерною ділянкою електрокардіограми є

так звана *P*-хвиля (або *атріальна хвиля*), якій відповідає початок деполяризації передсердя (рис. 20.15а). Ця позитивна хвиля *P* поширюється досить повільно — близько 0,08-0,10 с.

Потенціал дії досягає атріовентрикулярного (пов'язаного з передсердями та шлуночками) вузла *AB* і переходить на систему субендокардіальних (внутрішніх) волокон Пуркіньє *ВП* (рис. 20.15,б). Ці тканини настільки дрібні, що не створюють будь-якого електричного потенціалу на поверхні тіла. Наступна ділянка електрокардіограми пов'язана з деполяризацією шлуночків серця. Стрілка на рис. 20.15 показує напрямок поширення процесу деполяризації, який характеризується виникненням невеликої від'ємної різниці потенціалів між лівою і правою передніми кінцівками — так званої *Q*-хвилі. Подальший етап — утворення великого позитивного максимуму, який називається *R*-хвилею. Цей процес супроводжується по-



**Рис. 20.15.** Поширення потенціалу дії до передсердь та шлуночків і відповідне формування різниці потенціалів між лівою та правою передніми кінцівками тварини (пояснення в тексті)



ширенням деполяризації до стінок обох шлуночків. Сумарним результатом цього процесу є формування електричного диполя, спрямованого по діагоналі донизу (рис. 20.15,в). *R*-хвиля є одним з найважливіших діагностичних компонентів електрокардіограми.

Закінчується процес деполяризації шлуночків формуванням невеликого негативного максимуму — *S*-хвилі (рис. 20.15,г). Фізичний зміст походження цієї хвилі ще не зовсім з'ясовано.

Процес реполяризації шлуночків супроводжується виникненням позитивного потенціалу — так званої *T*-хвилі (рис. 20.15,д).

Звичайно ці вимірювання проводять за допомогою трьох електродів, які розміщують на передніх та задніх кінцівках тварини (рис. 20.16). Типову електрокардіограму наведено на рис. 20.17. Аналіз величини максимумів та часових інтервалів між ними дає можливість аналізувати активність серця та виявляти різноманітні патологічні процеси.

*Гіпотеза Ейнтховена.* У 1908 р. Ейнтховен, який є автором ідеї реєстрації ЕКГ, запропонував розглядати серце як вектор, розміщений в рівнобічному трикутнику. Проекції цього вектора на сторони трикутника відповідають різницям потенціалів, що реєструються між кінцівками (кожна така різниця потенціалів називається «відведенням»). Амплітуди і полярності проєкцій цього вектора на сторони трикутника свідчать про стан роботи серця.

У нормі напрямок вектора коливається в межах між  $0^{\circ}$ – $+90^{\circ}$  (рис. 20.18,а); відхилення вектора в область  $0^{\circ}$ – $-90^{\circ}$  свідчить про зміщення анатомічної осі серця вліво (рис. 20.18,б). Розташування вектора в секторі  $+90^{\circ}$ – $+180^{\circ}$  відповідає можливим патологіям серця (рис. 20.18,в).

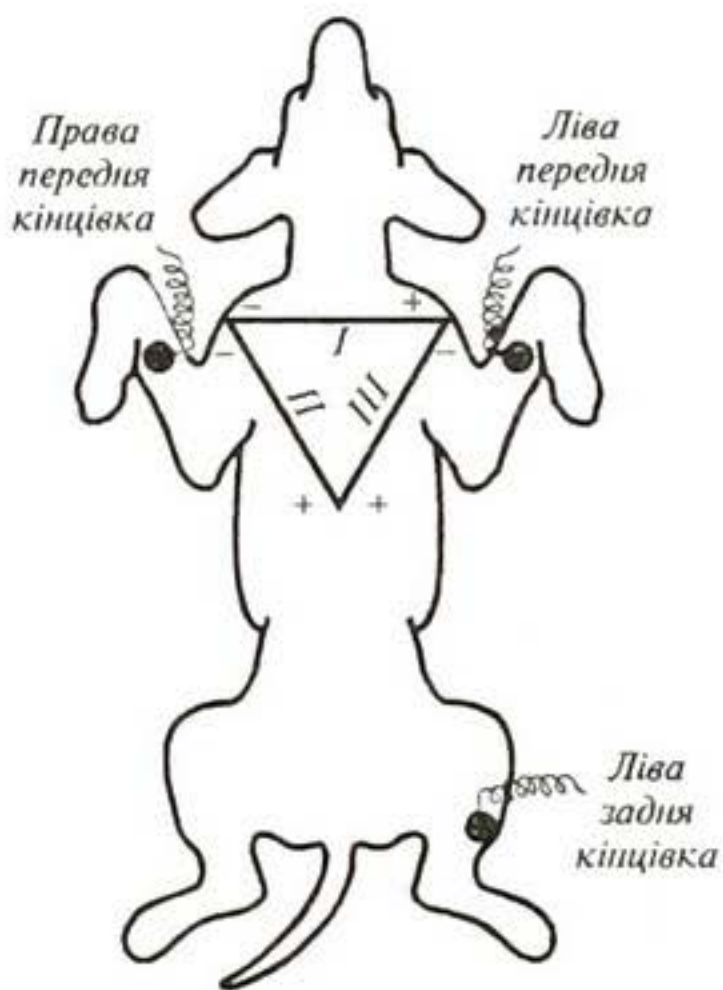


Рис. 20.16. Вимірювання електрокардіограми у тварини за допомогою трьох електродів

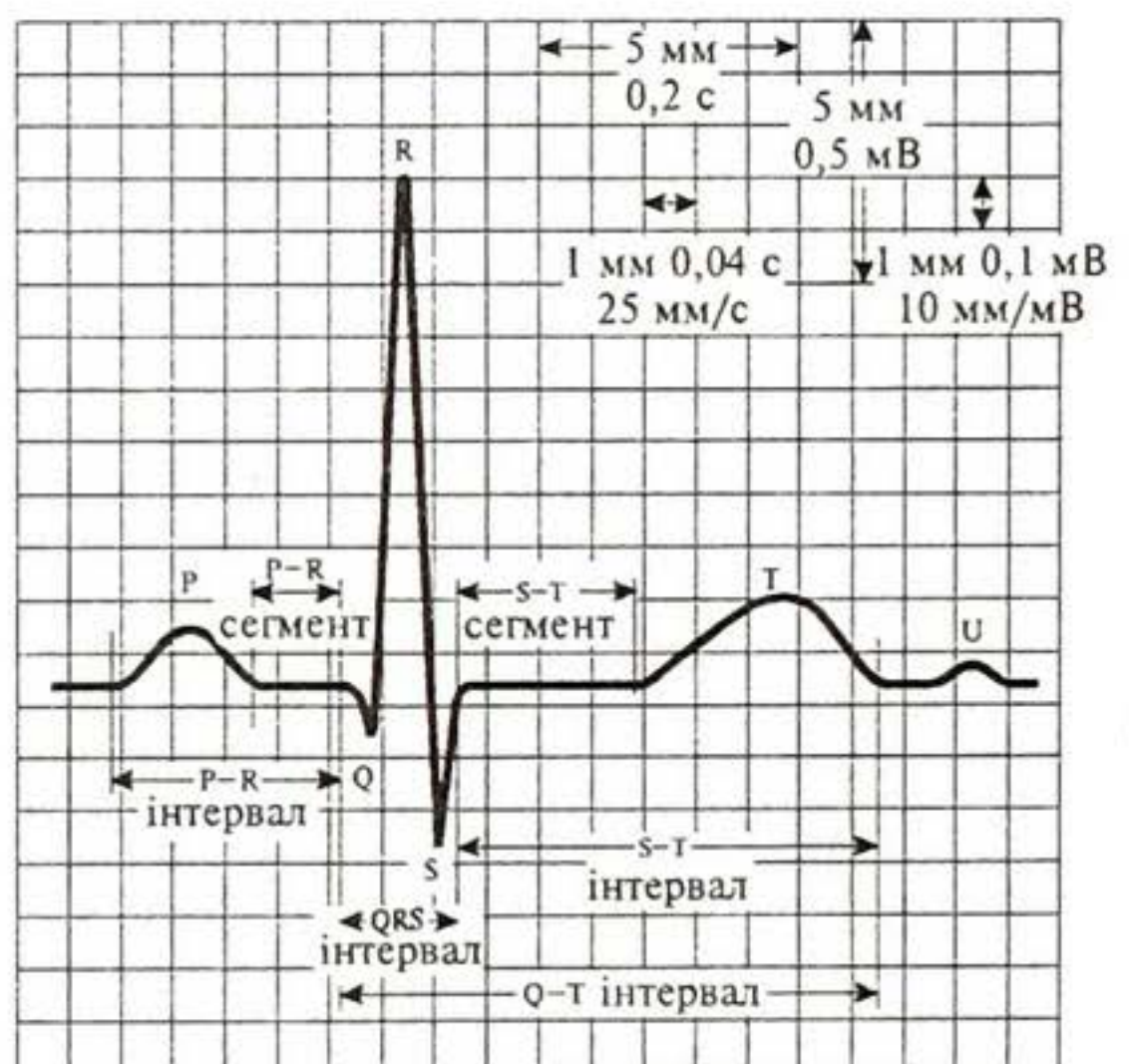
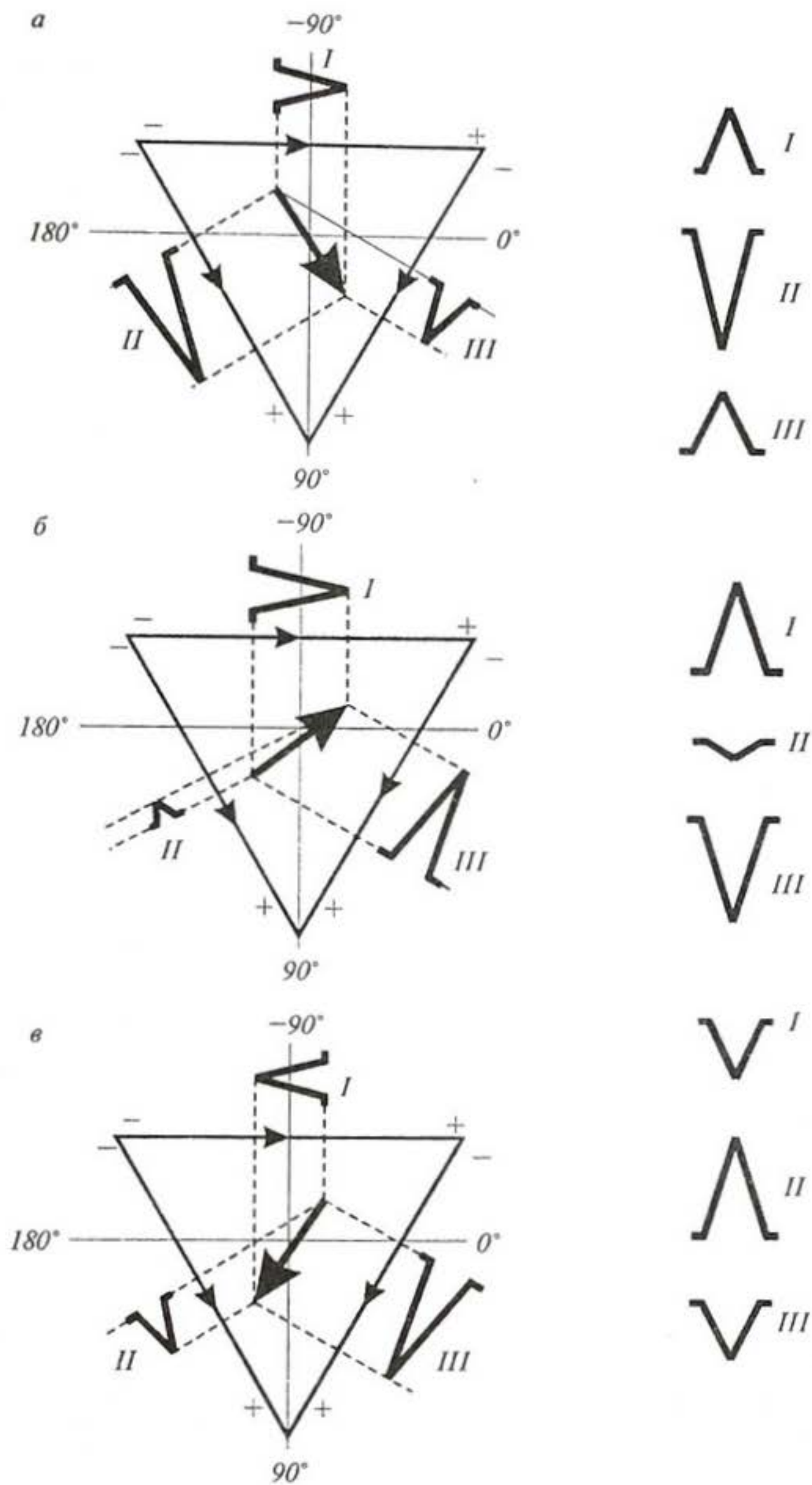
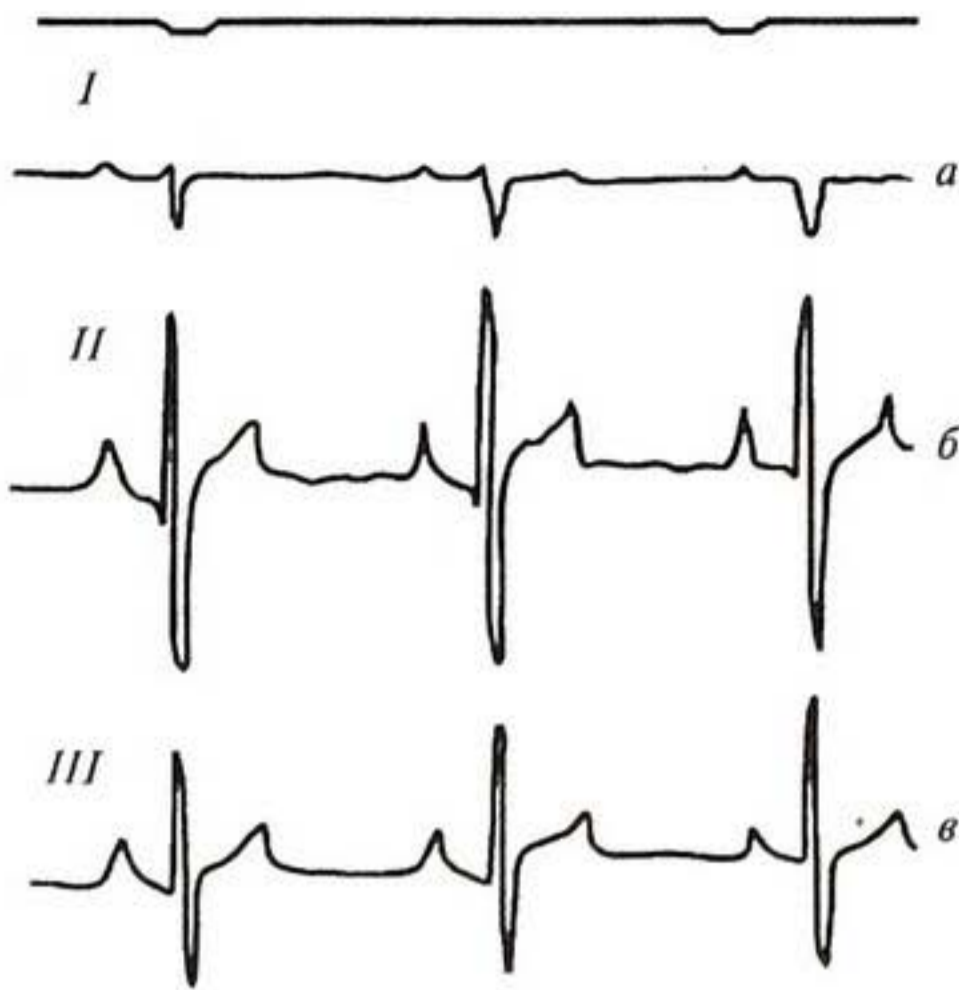


Рис. 20.17. Структура електрокардіограми з позначеннями максимумів (зубців) та часових інтервалів



**Рис. 20.18.** Напорямок вектора, що відповідає електричній осі серця в нормі (а), зміщеного відносно анатомічної осі (б) і за патології (в)

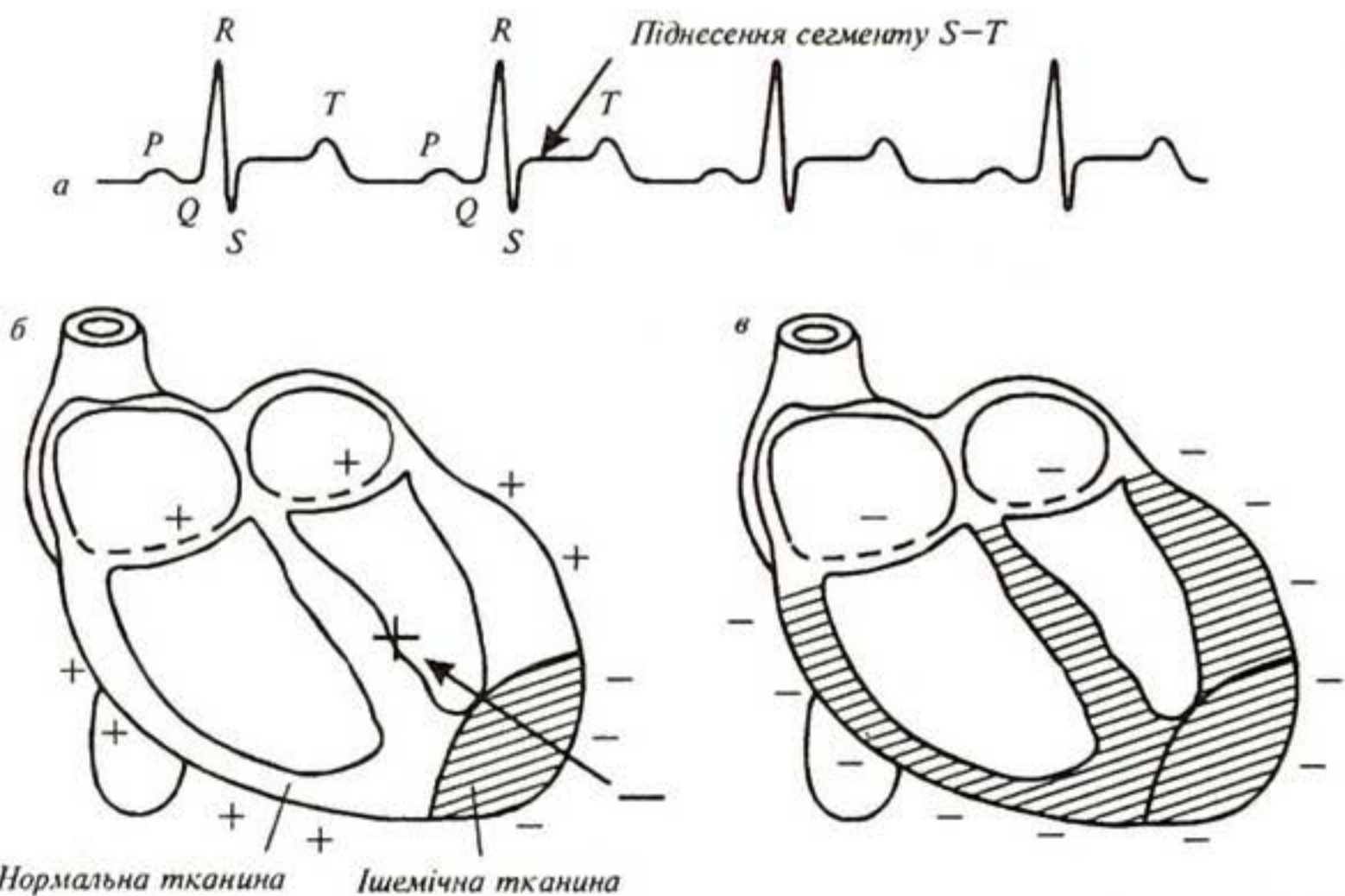
Розглянемо зміни, що відбуваються в електрокардіограмі при різних патологіях. Електрокардіограма тварини, що хворіє на гіпертрофію правого шлуночка, подана на рис. 20.19. Гіпертрофія правого шлуночка пов'язана з такими дефектами як збільшення об'єму крові, що накачується правим шлуночком, або тиску, створююва-



**Рис. 20.19.** Електрокардіограма тварини, що страждає гіпертрофією правого шлуночка серця: наявність від'ємної полярності *QRS*-комплексів у відведенні *I* (а); збільшення амплітуди *QRS*-комплексів у *II* (б) та *III* (в) відведеннях

ного цим шлуночком в процесі скорочення. Відмітною рисою ЕКГ в даній ситуації є наявність негативної полярності *QRS*-максимуму (замість позитивного в нормі) у відведенні *I*. Зміна полярності цього максимуму викликається зсувом осі серця або збільшенням маси правого шлуночка. Крім того, спостерігається аномально високий рівень *QRS*-максимумів у *II* та *III* відведеннях.

Ішемічна хвороба серця або інфаркт викликають такі зміни в ЕКГ як зсув догори інтервалу *S-T* (рис. 20.20,а). Таку ситуацію можна пояснити тим, що уражена ділянка серця не зберігає потенціалу спокою; ця область деполяризована відносно здорової тканини, що призводить до утворення диполя (рис. 20.20,б) під час інтервалу *T-P*. Протягом *S-T*-інтервалу весь шлуночок, в тому числі й ішемічна область, деполяризується, внаслідок чого диполь зникає. *S-T*-інтервал зростає відносно більш негативного потенціалу, властивого стану спокою шлуночка.



**Рис. 20.20.** Зсув догори інтервалу *S-T* внаслідок ішемічної роботи серця (а); виникнення диполя між ішемічною та здоровою тканинами (б); зникнення диполя через деполяризацію всього шлуночка (в)

Передчасне скорочення шлуночка призводить до такої картини (рис. 20.21): після п'яти нормальних максимумів виникає аномальний максимум, який характеризується зникненням *P*-хвилі та зростанням *R*- і *S*-максимумів. Пауза між аномальним та наступним максимумами теж збільшується.

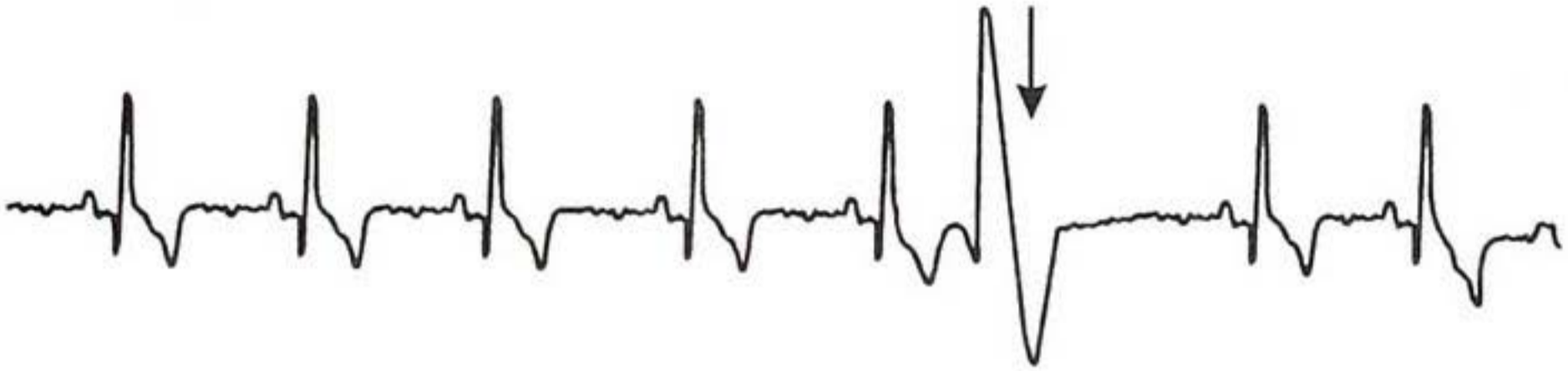


Рис. 20.21. Виникнення аномального максимуму після п'яти нормальних максимумів внаслідок передчасного скорочення шлуночка

Приклади електрокардіограм, що відповідають *тахікардії* (збільшенню пульсу до 235 ударів за хвилину) і *брадикардії* (зменшенню пульсу до 55 ударів за хвилину) наведено на рис. 20.22.

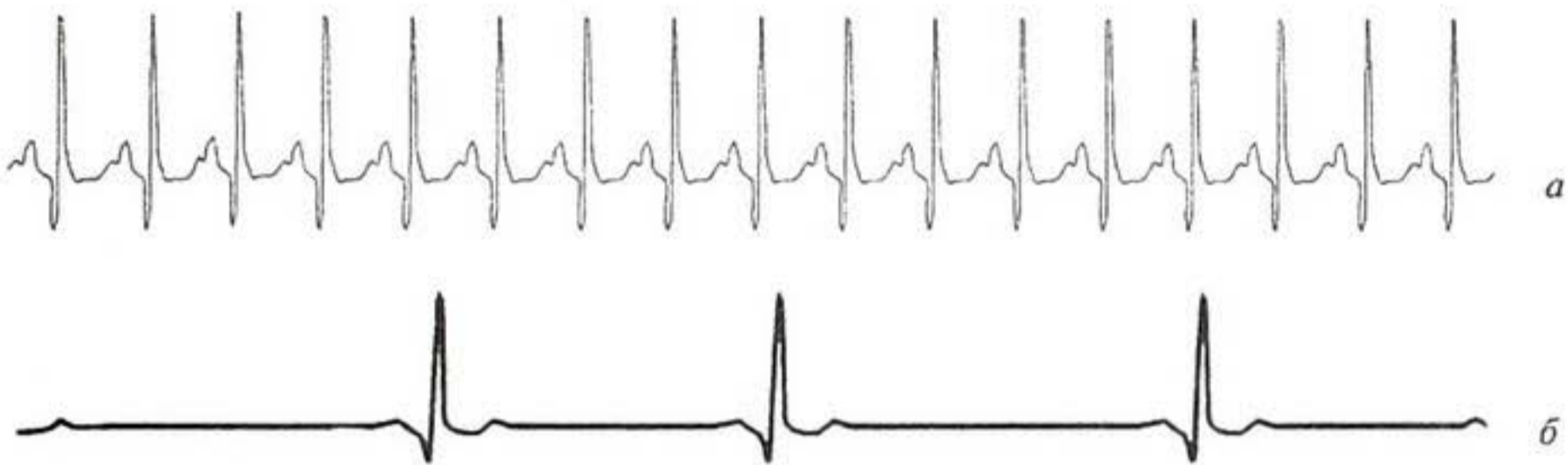
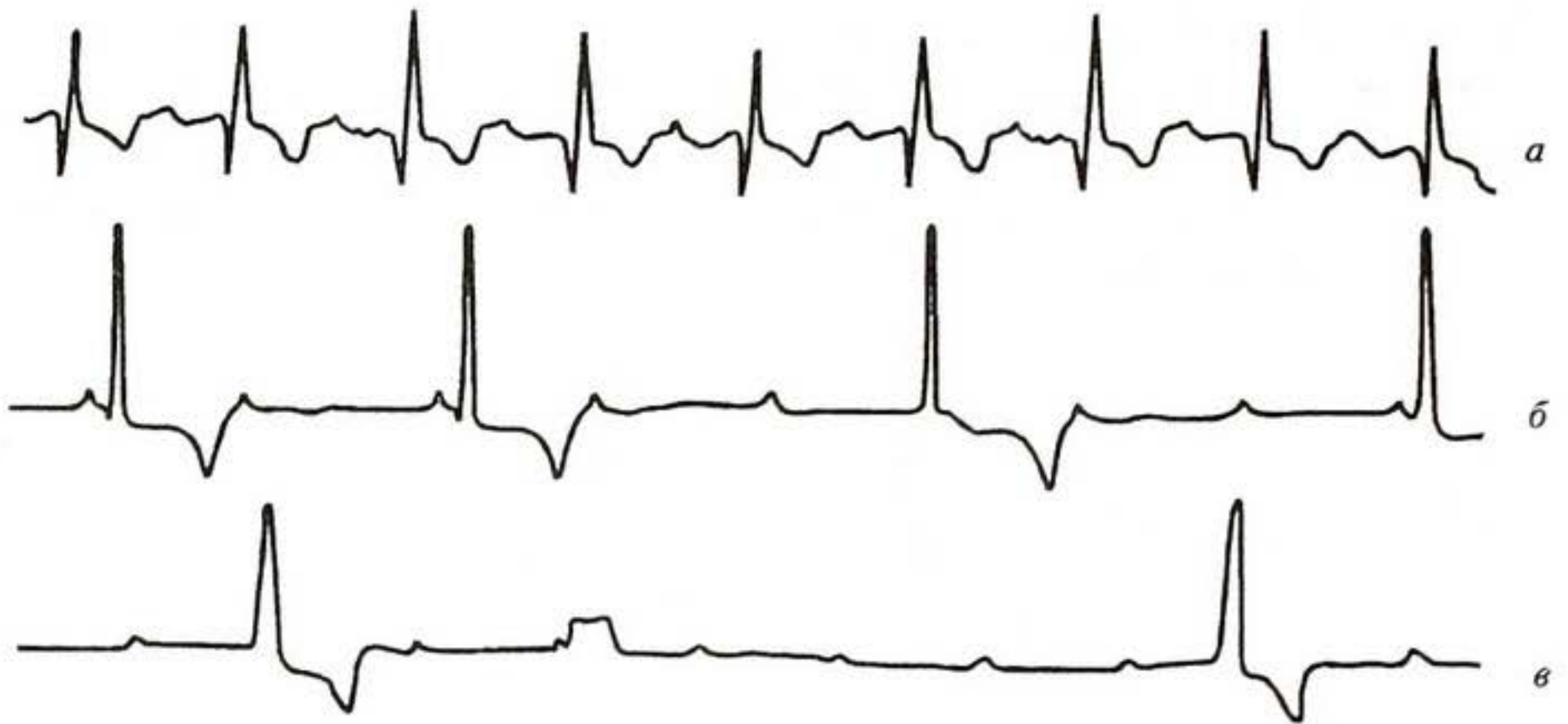


Рис. 20.22. Електрокардіограми, що відповідають *тахікардії* (а) та *брадикардії* (б)

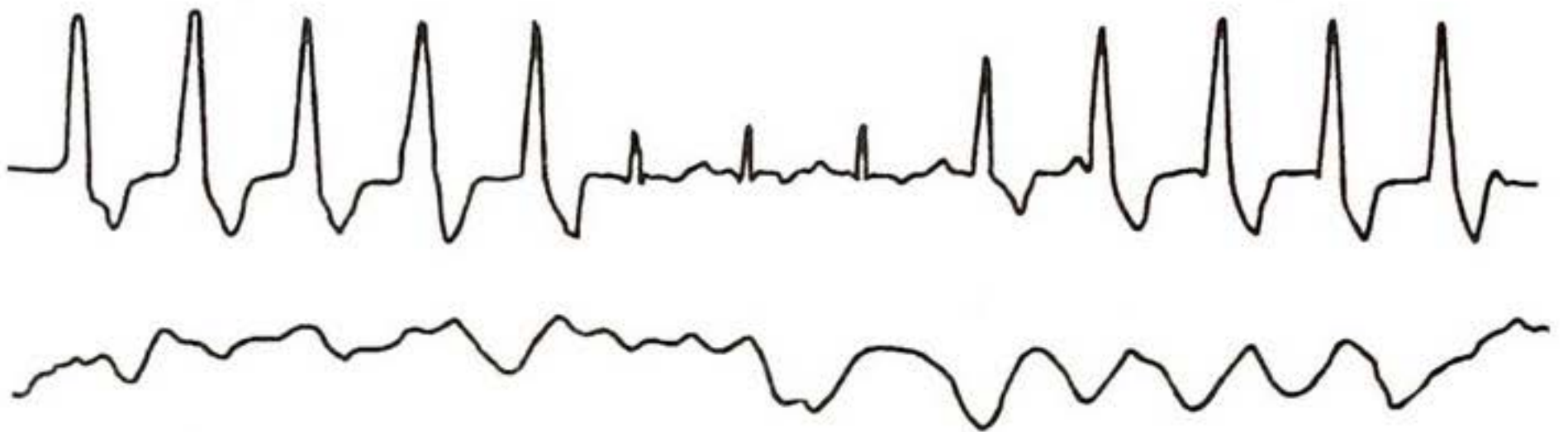
Блокування атриовентрикулярного вузла викликає зростання *P-R*-інтервалу (рис. 20.23,а), часткове зникнення *QRS*-комплексів (рис. 20.23,б) або утрату синхронізації між *P*-максимумами та *QRS*-комплексами (рис. 20.23,в).

На рис. 20.24,а подано електрокардіограму тварини, що хворіє на *вентрикулярну тахікардію* (вентрикулярна — така, що стосується шлуночка серця). Перші п'ять хвиль є аномальними за формою; *P*-хвилі відсутні. Далі йдуть нормальні *QRS-T* послідовності з попередніми *P*-хвилями, а потім вентрикулярна тахікардія поновлюється.

Вентрикулярна тахікардія часто перетворюється у *вентрикулярну фібриляцію* (рис. 20.24,б), що характеризується несподіваними флуктуаціями без будь-якої помітної структури.



*Рис. 20.23. Електрокардіограми, що відповідають блокуванню атріовентрикулярного вузла: зростання  $P-R$  – інтервалу (а); часткове зникнення  $QRS$  – комплексів (б); втрата синхронізації між  $P$  – максимумами та  $QRS$  – комплексами (в)*



*Рис. 20.24. Електрокардіограма тварини, що хворіє на шлуночкову тахікардію: поява перших п'яти аномальних хвиль і відсутність  $P$ -хвиль ( а ); перетворення шлуночкової тахікардії у вентрикулярну фібриляцію ( б )*

### **20.5.5. Електрична активність мозку. Принципи електроенцефалографії**

Процедура вивчення біоелектричних процесів, пов'язаних з виникненням активності в структурах мозку, з переходом їх від відносного спокою до активного або гальмівного стану з метою дослідження функціонального стану головного мозку на основі реєстрації біопотенціалів, називається *електроенцефалографією*. Типова *електроенцефалограма (ЕЕГ)* являє собою комбінований ефект нейронних потенціалів, що фіксуються на значній ділянці кори головного мозку (рис. 20.25).

У процесі електроенцефалографії реєструють біоелектричні сигнали. Залежно від частоти  $f$  та амплітуди  $A$  цих сигналів розрізняють такі типи хвиль (рис. 20.26):  $\alpha$  – хвиля,  $f = 8 \div 13$  Гц,  $A = 100$  мкВ,

синусоїдна форма;  $\beta$  — хвиля,  $f = 20 \div 50$  Гц, менша амплітуда, нерегулярна форма;  $\gamma$  — хвиля,  $f < 3,5$  Гц;  $\theta$  — хвиля,  $f = 3,5 \div 8$  Гц. Рівень шумів, що реєструються, дорівнює близько 2 мкВ. Датчиками електричних полів мозку є диски  $Ag-AgCl$ , кількість яких досягає близько двох десятків. Структуру електроенцефалограм, знятих у процесі сну пацієнта, наведено на рис. 20.27. Чутливий уві сні пацієнт демонструє несинхронізовані високочастотні коливання (рис. 20.27,а). Пацієнт, що дрімає із заплющеними очима, створює велику кількість ділянок з  $\alpha$ -хвилями (рис. 20.27,б); легкий сон викликає збільшення амплітуди коливань (рис. 20.27,в); глибокий сон сприяє появі повільних хвиль з великою амплітудою (рис. 20.27,г), яка збільшується в процесі сну (рис. 20.27,д). Сон, що супроводжується швидким рухом очей (парадоксальний сон), характеризується високочастотними сигналами з малою амплітудою (рис. 20.27,е).

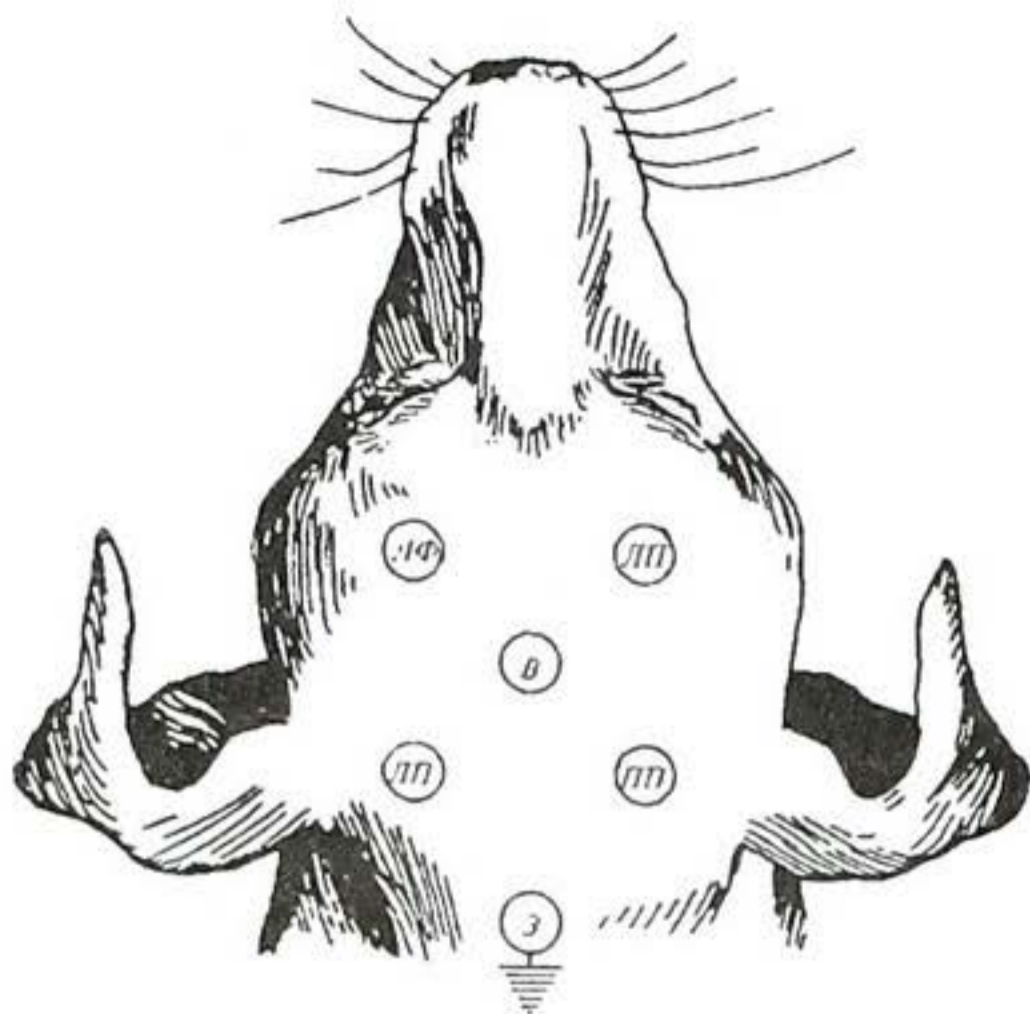


Рис. 20.25. Точки зондування під час реєстрації ЕЕГ: ЛФ — ліва фронтальна; ЛП — права фронтальна; В — верхівка; ЛП — ліва потилична; ПП — права потилична; З — заземлення

Техніка дослідження кори півкуль великого мозку шляхом реєстрації її біопотенціалів за допомогою електродів, розміщених безпосередньо на її поверхні, називається *електрокортикографією*.

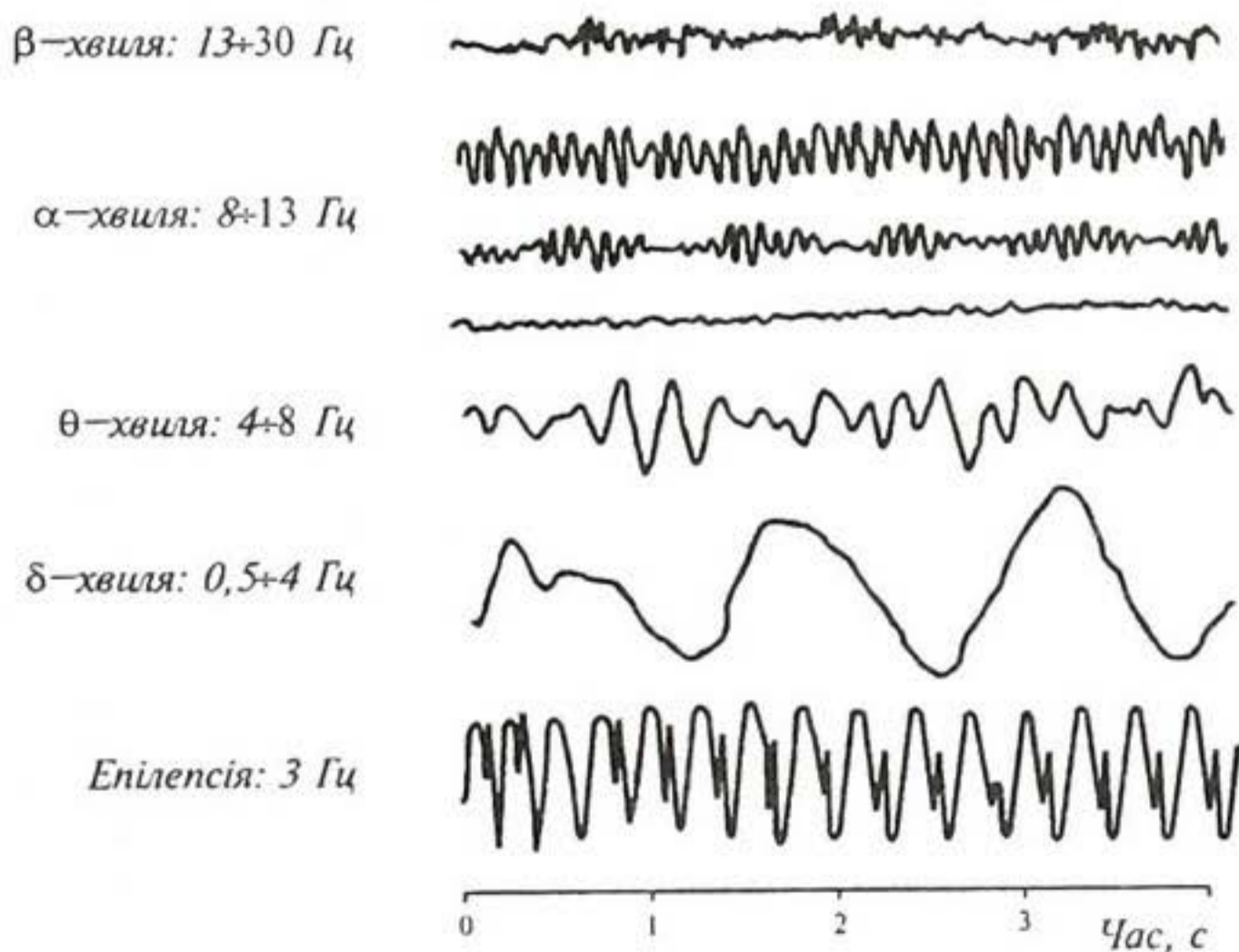


Рис. 20.26. Приклади електроенцефалограм

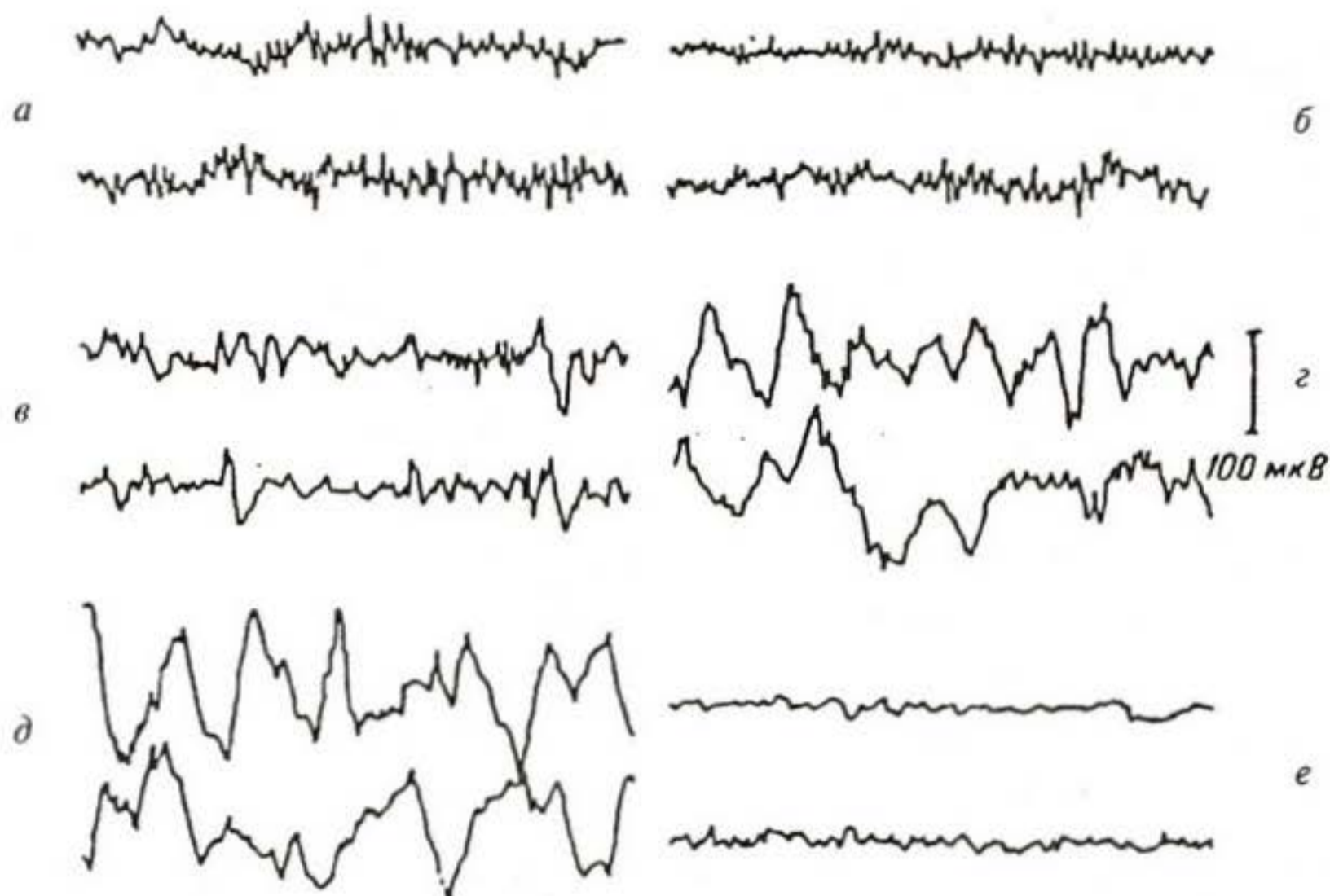


Рис. 20.27. Структура електроенцефалограм, знятих у процесі сну пацієнта: а — чутливий сон; б — дрімота; в — легкий сон; г — глибокий сон; д — тривалий сон; е — сон, що супроводжується рухом очей

### 20.5.6. Принципи електроміографії

Техніка дослідження функціонального стану скелетних м'язів на основі реєстрації біоелектричних потенціалів називається *електроміографією*. Реєстрацію та аналіз *електроміограм (ЕМГ)* проводять за допомогою голчастих або поверхневих електродів, прикладених до м'яза, або занурених в нього. Оскільки м'яз складається з набору м'язових волокон, електроміограма являє собою суперпозицію окремих потенціалів дії, властивих кожному волокну. Причому, всі ці потенціали відрізняються за знаком, через що вони можуть або підсилюватися, або компенсувати один одного. Через це форма електроміограми має характер випадкового шумового сигналу, енергія якого залежить від м'язової активності та місця встановлення електроду. Блок-схему системи, призначеної для реєстрації електроміограм (електроміографа), наведено на рис. 20.28, а типові структури електроміограми, що реєструється голчастим електродом, — на рис. 20.29 та поверхневим електродом — на рис. 20.30. Електроміографія використовується для діагностики нервово-м'язових порушень та оцінки м'язової активності.

*Електрогастрографією* називається техніка реєстрації потенціалів, викликаних перистальтичною (пов'язаною з ритмічними скороченнями стінок) діяльністю шлунково-кишкового тракту. *Електроінтестинографія* — вимірювання біопотенціалів кишечника з метою дослідження його моторної (рухової) діяльності. *Електроміомастикаціографія* — одночасна графічна реєстрація біопотенціалів жувальних м'язів і рухів нижньої щелепи.

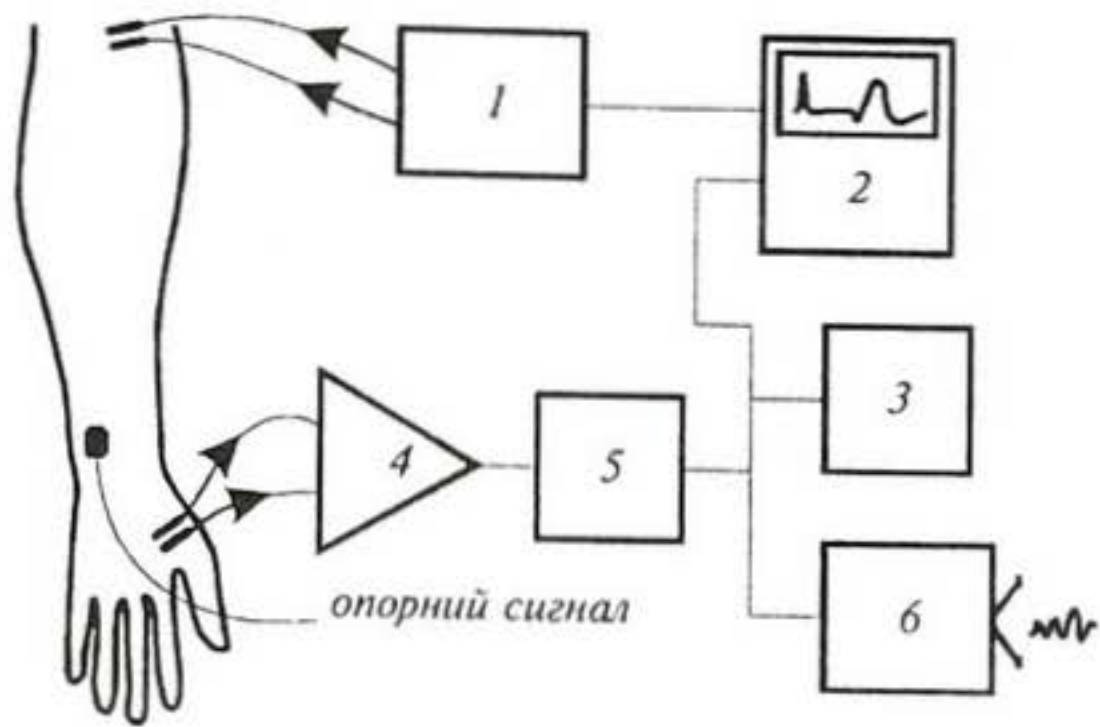


Рис. 20.28. Блок-схема електроміографа: 1 — стимулятор; 2 — комп'ютер; 3 — принтер; 4 — попередній підсилювач; 5 — основний підсилювач; 6 — гучномовець

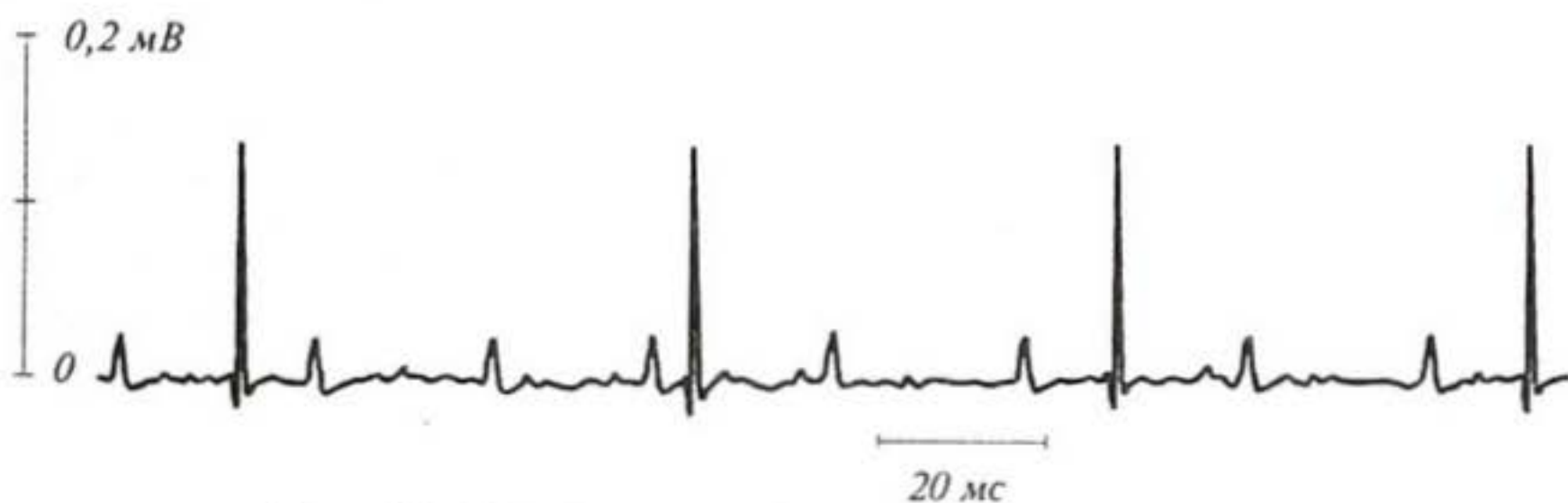


Рис. 20.29. Електроміограма, зареєстрована за допомогою голчастого електрода

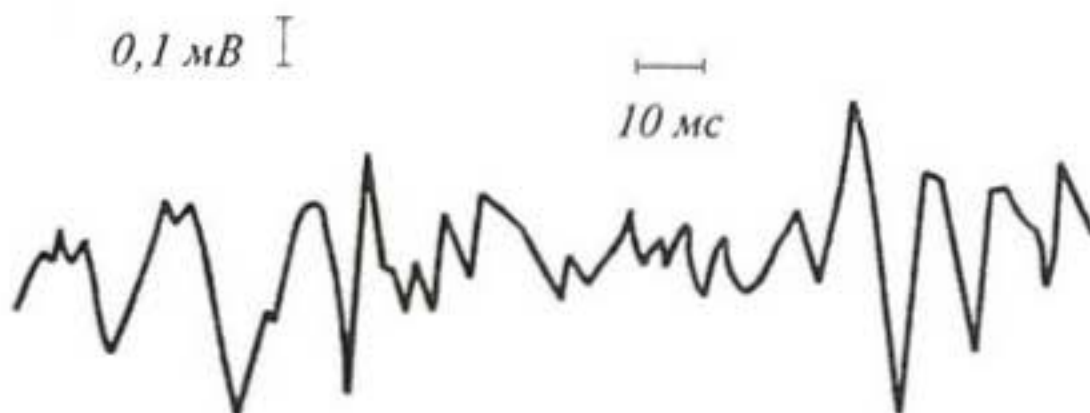


Рис. 20.30. Електроміограма, зареєстрована за допомогою поверхневого електрода

### 20.5.7. Утворення електричних полів рибами

Близько 300 видів риб здатні генерувати власні електричні поля — слабкі, напруженістю від кількох мілівольт до кількох вольт, для електролокації і комунікації та сильні, напруженістю до кількох сот вольт, для відлякування хижаків або оглушення жертви. Сильноелектричні види риб володіють спеціалізованими електричними органами, тоді як слабкоелектричні види мають морфологічно ви-



ражені тканини. Утворюються електричні поля за допомогою так званого *електричного органу*, що генерує електричні розряди. Складається електричний орган з клітин *електроцитів*, з'єднаних по-спідовно або паралельно. Форма, кількість та порядок розташування електроцитів залежить від виду. Так, електричний орган ската *Torpedo* містить 500÷1000 з'єднаних паралельно стовпчиків електроцитів, по 1000 клітин в кожному стовпчику; діаметр клітин становить 5÷7 мм, а товщина — 10÷30 мкм; ще один представник скатів, *Narcine*, має близько 400 стовпчиків з 300÷500 клітин діаметром 2 мм і товщиною 7 мкм; крім основного органу є додатковий, що містить 10 стовпчиків по 200 клітин кожний (рис. 20.31). Електричний орган слабкоелектричних риб складається з електроцитів, які простягаються вздовж латерального пучка тіла риби (рис. 20.32). Кількість електроцитів у електричного вугра *Electrophorus* досягає 6000. Електричні розряди риб характеризуються такими параметрами як інтенсивність (амплітуда), тривалість, хвильова форма, частота повторення. Величина цих параметрів залежить від виду та способу життя риби. Так, електричний вугор в стані пошуку генерує імпульси напругою до 50 В, тривалість яких становить близько 2 мс, тоді як в момент виявлення здобичі він створює імпульси напругою 300÷600 В тривалістю 0,6 ÷ 2 с.

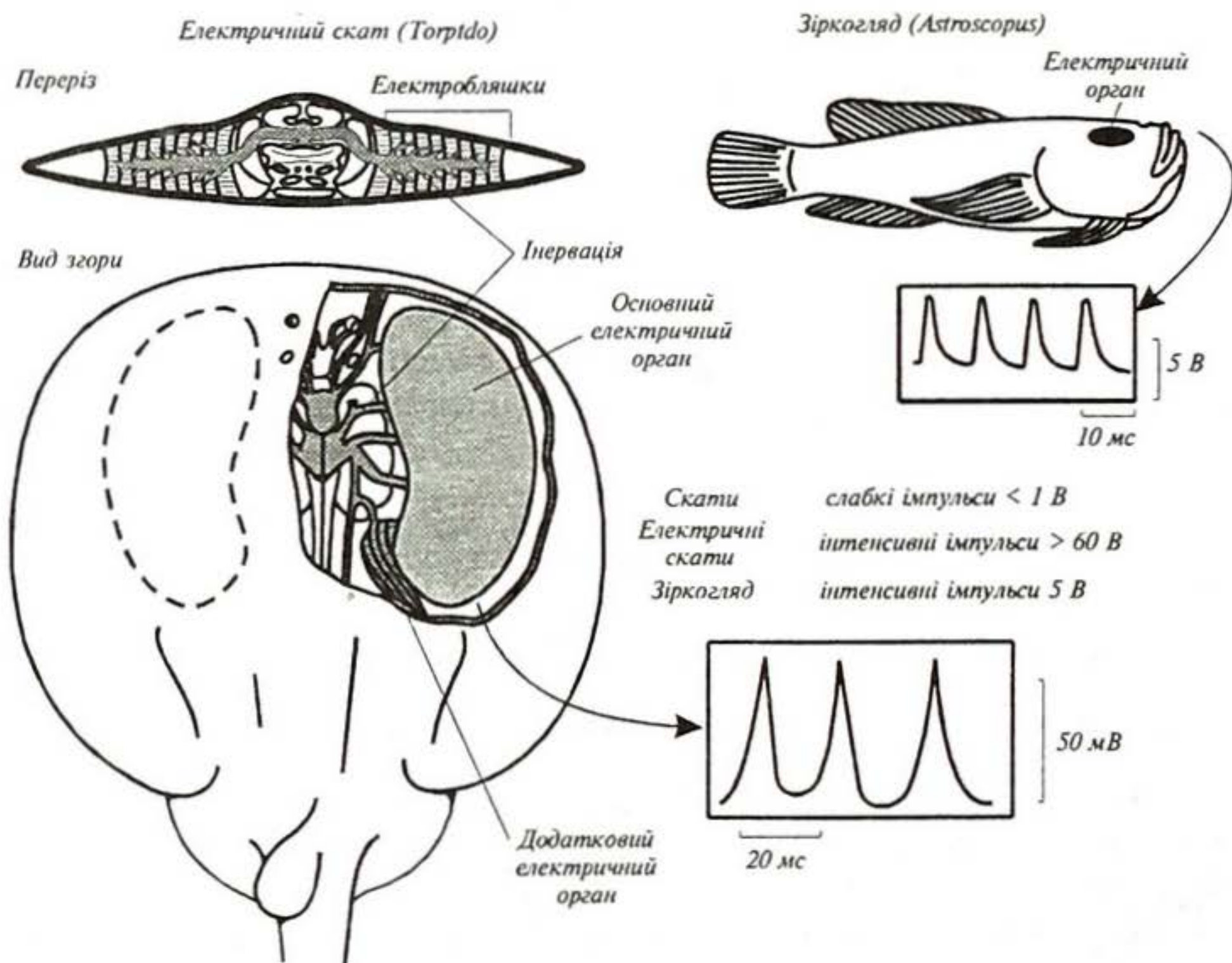


Рис. 20.31. Електричні органи морських риб та структура електричних розрядів

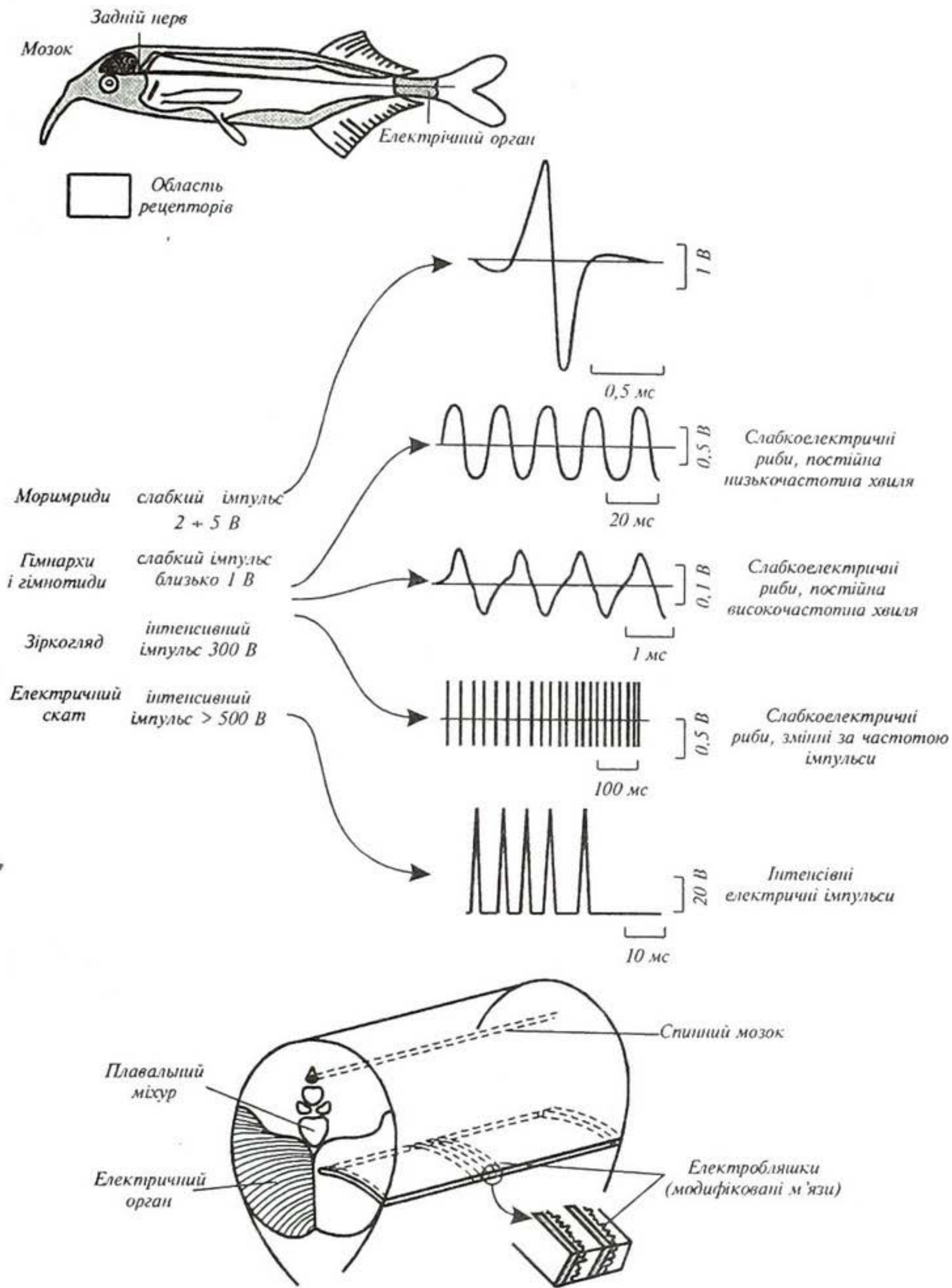


Рис. 20.32. Електричні органи прісноводних риб та структура електричних розрядів

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Використовуючи табл.20.1, визначити рівноважний натрієвий потенціал, що виникає в гігантському аксоні кальмара.

### Розв'язок

Рівноважний потенціал визначимо за допомогою рівняння Нернста (вираз (20.22)). Підставляємо в це рівняння числові дані, враховуючи, що  $RT/F = 25,3$  мВ (див. додаток):

$$\Delta\varphi = 23,3 \text{ мВ} \cdot \ln \frac{462}{78} = 45 \text{ мВ}.$$

### Контрольне завдання № 20.1

Визначити потенціал рівноваги, що встановився на мембрані клітини кравецького м'яза жаби для іонів калію. Використовувати дані табл. 20.1.

*Відповідь:* — 101,48 мВ.

### Контрольне завдання № 20.2

Якому напрямку вектора електричної осі серця відповідають амплітуди проєкцій вектора, зображені на рис. 20.33?



Рис. 20.33.

### Контрольне завдання № 20.3

Знайдіть в електрокардіограмах, поданих на рис. 20.34, приклади таких захворювань: *брадикардія, тахікардія, аритмія, шлуночкова фібриляція.*

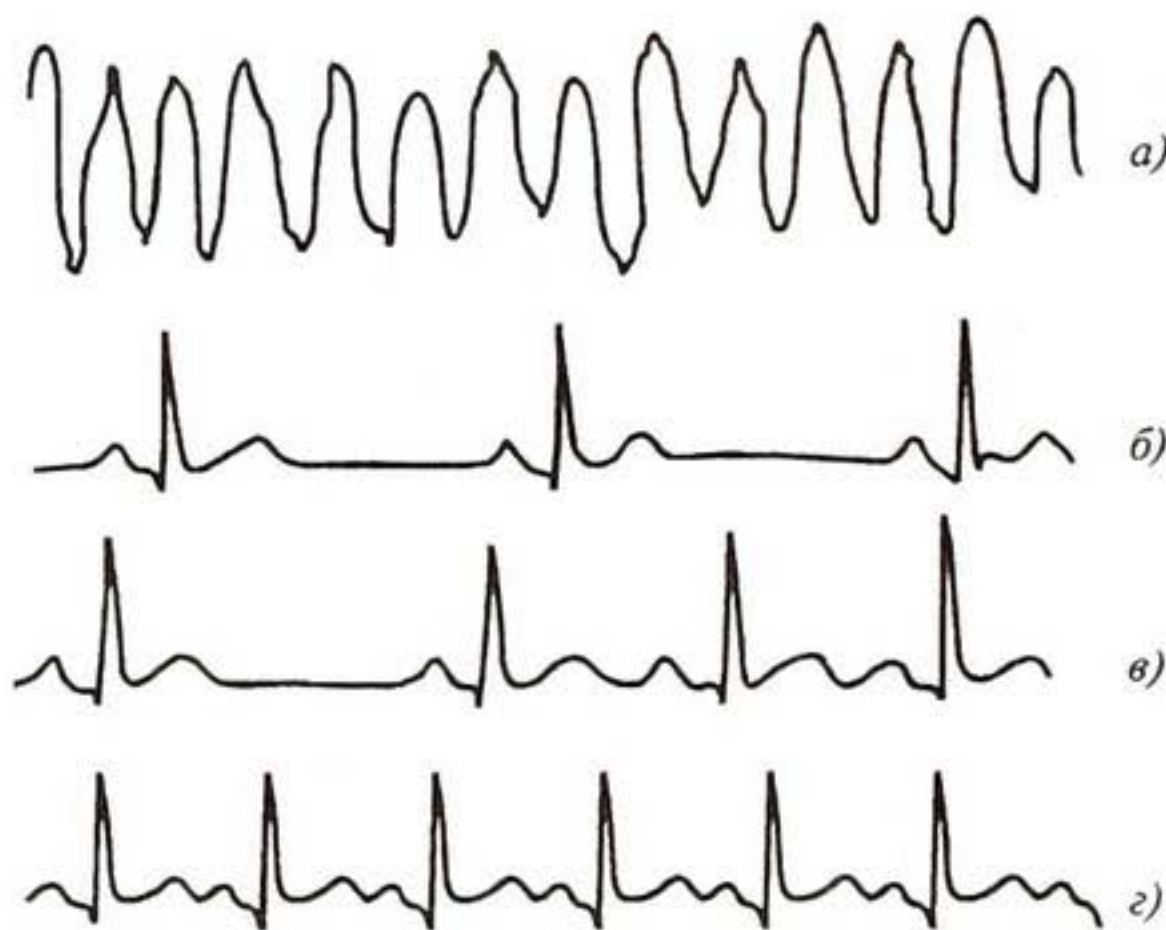


Рис. 20.34.

### Контрольне завдання № 20.4

Визначити, які енцефалограми вівці, подані на рис. 20.35, відповідають активному стану, легкому та глибокому сну.

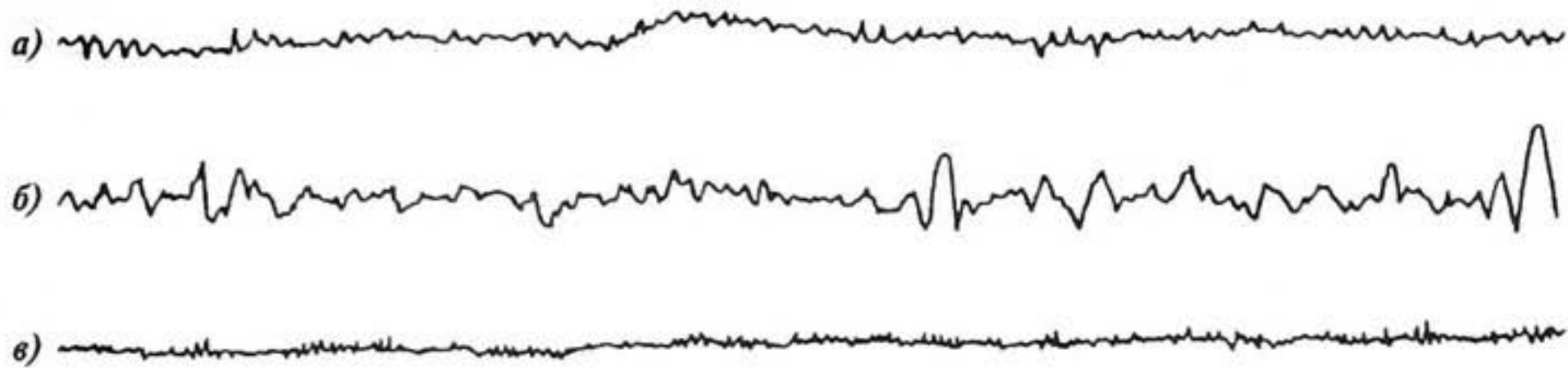


Рис. 20.35.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке біологічна мембрана? В чому полягають її функції?
2. Назвати основні типи біологічних мембран.
3. Пояснити суть рідинно-мозаїчної моделі мембрани.
4. Що таке дифузія? Від чого залежить коефіцієнт дифузії?
5. Що таке проникність мембрани?
6. Пояснити механізми виникнення осмотичного тиску.
7. Пояснити механізми виникнення різниці потенціалів на мембрані.
8. Записати рівняння Нернста.
9. Охарактеризувати потенціал спокою і потенціал дії.
10. Назвати основні типи транспорту речовин через мембрани.
11. Що таке ендоцитоз та екзоцитоз?
12. Як передається збудження від нервової клітини до м'язової?
13. Що становить суть електрокардіографії?
14. В чому полягає гіпотеза Ейнтховена?
15. Які типи хвиль можна реєструвати в процесі електроенцефалографії?
16. В чому полягає суть електроміографії?
17. Пояснити суть петч-клемп-методу та його переваги.



## 21. ЕЛЕКТРОБІОЛОГІЯ

*Електробіологія* — це розділ біофізики, що вивчає механізми впливу електричних струмів та полів на живі організми, а також реакцію цих організмів на зовнішні електричні фактори (електрорецепцію).

### 21.1. ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА МАКРОМОЛЕКУЛИ

*Електрофорезом* називається спрямоване переміщення електрично заряджених макромолекул, частинок дисперсної фази в дисперсному середовищі, або іонів в електропровідному розчині під впливом зовнішнього електричного поля.

*Дисперсні системи* — неоднорідні системи, що складаються з неперервного газоподібного, рідкого або твердого середовища, в якому розміщені частинки подрібненої речовини.

Розглянемо молекулу, що характеризується сумарним електричним зарядом  $q$ , яку помістили в електричне поле з напруженістю  $E$ . На цю молекулу з боку поля діє сила:

$$F_1 = qE. \quad (21.1)$$

Під дією цієї сили молекула набуває прискореного руху. В рідкому середовищі в результаті такого руху виникає сила тертя  $F_2$ , що дорівнює і протилежна силі  $F_1$ :

$$F_1 = F_2, \quad (21.2)$$

або

$$qE = \mu V, \quad (21.3)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт тертя, який залежить від розмірів і форми молекули, а також від в'язкості середовища.

Для сферичних молекул коефіцієнт тертя визначається законом Стокса:

$$\mu = 6\pi\eta r, \quad (21.4)$$

де  $r$  — радіус молекули,  $\eta$  — коефіцієнт в'язкості середовища.

Звідси можна визначити відношення швидкості руху  $V$  до напруженості електричного поля  $E$  як електрофоретичну рухливість  $U$ :

$$U = \frac{V}{E} = \frac{q}{6\pi\eta r} = \frac{ze}{6\pi\eta r}, \quad (21.5)$$

де  $z$  — кількість електронів;  $e$  — заряд електрона.

На практиці техніка електрофорезу використовується для визначення молекулярної маси білків в присутності додецилсульфата натрію в поліакриламідному гелі — в цих умовах електрофоретична рухливість залежить від молекулярної маси, але не від загального заряду макромолекули.

Встановлено, що електрофоретична рухливість  $U$  білків лінійно залежить від логарифму молекулярної маси  $M$ :

$$U = b - a \lg M, \quad (21.6)$$

де  $a$  і  $b$  — сталі, що залежать від концентрації та властивостей поліакриламідного гелю.

Калібрувальну криву для визначення молекулярної маси білків наведено на рис. 21.1.

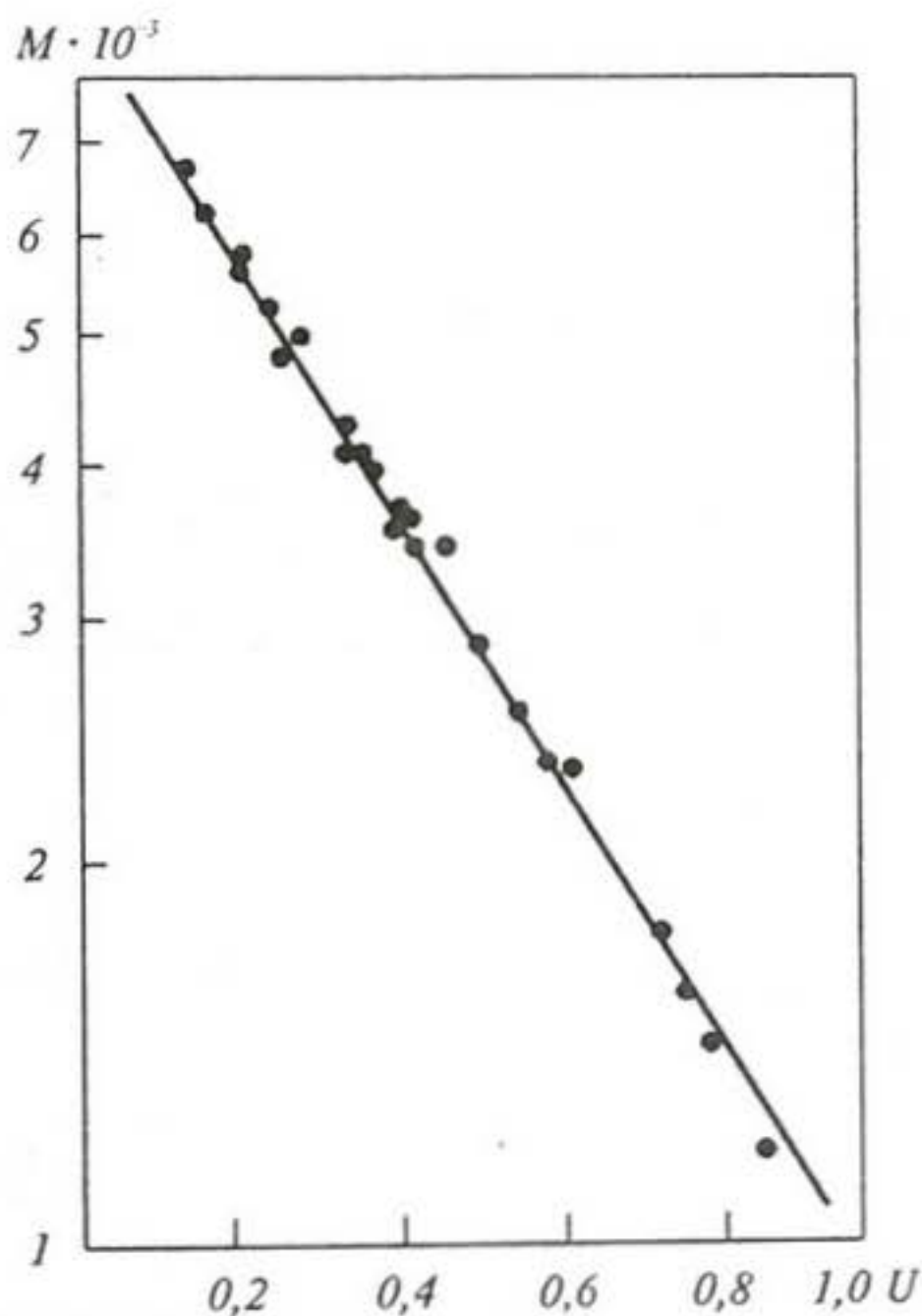


Рис. 21.1. Калібрувальна крива для визначення молекулярної маси білків:  $M$  — молекулярна маса;  $U$  — електрофоретична рухливість

## 21.2. ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

*Електричні властивості тканини.* Якщо прикласти електроди до черевної порожнини і вимірювати залежність електричного опору від частоти, можна помітити, що крива цієї залежності спадає зі зростанням частоти (рис. 21.2). З точки зору електричних властивостей всі речовини поділяються на діелектрики (електропровідність  $G < 10^{-10}$  см · м<sup>-1</sup>) та провідники ( $G > 10^4$  См · м<sup>-1</sup>). Шар діелектрика товщиною  $d$  і площею  $S$  можна уявити як конденсатор, ємність якого становить  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$  (де  $\epsilon$  — діелектрична проникність речовини,  $\epsilon_0$  — електрична стала). Біологічна тканина характеризується властивостями як діелектрика, так і провідника (рис. 21.3). В тка-

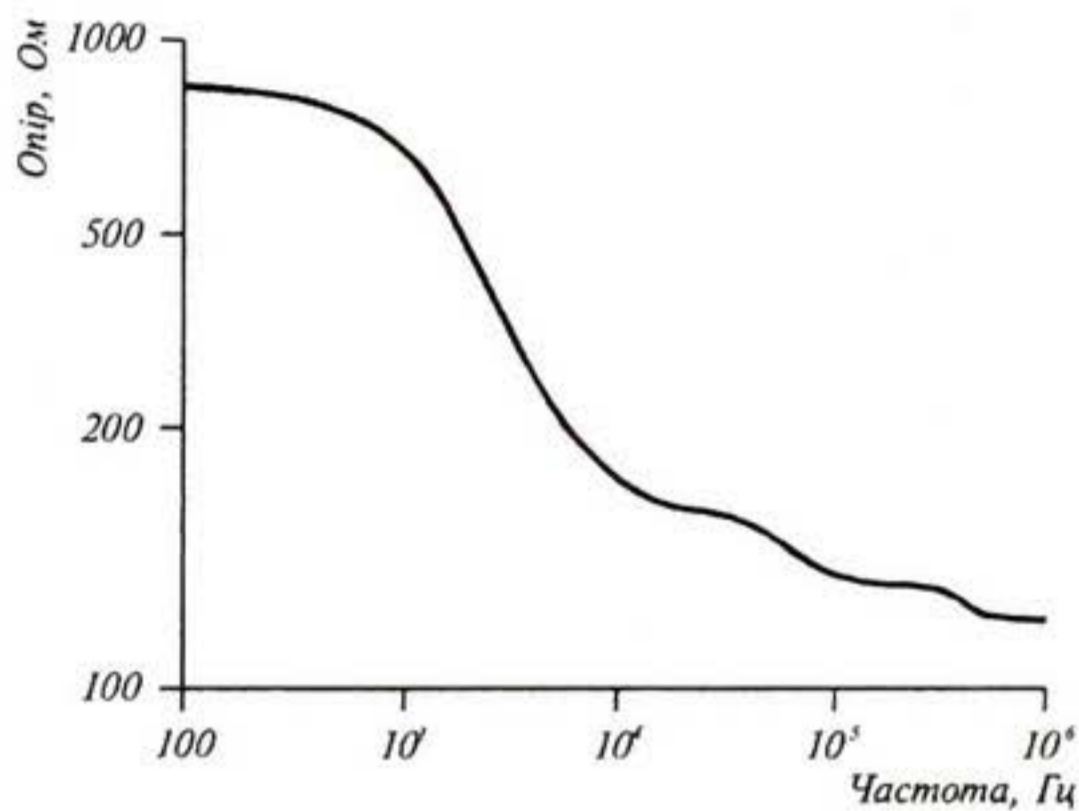


Рис. 21.2. Залежність електричного опору тканини від частоти

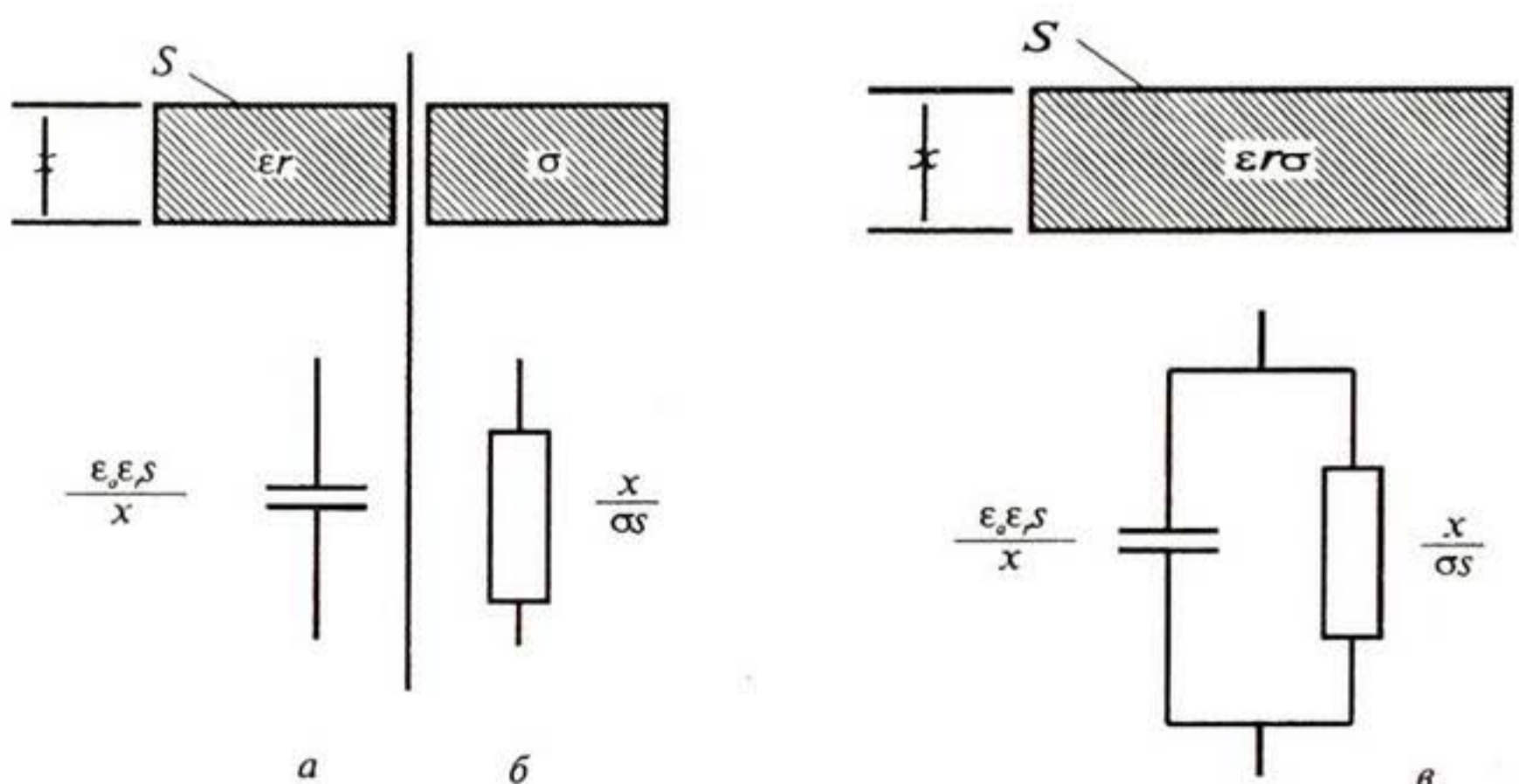


Рис. 21.3. Шар діелектрика з ємнісними властивостями (а) та провідника з провідними властивостями (б), а також біологічна тканина як паралельне поєднання ємності та провідника (в)

нині присутні вільні електричні заряди, що надають їй властивостей провідника; крім того, є й зв'язані заряди, здатні зміщуватися під впливом прикладеного електричного поля і утворювати електричний диполь. Якщо вільні заряди впливають на провідність тканини, зв'язані заряди пов'язані з діелектричною проникністю тканини. У тканині під впливом прикладеного електричного поля  $\vec{E}$  вільні електричні заряди переміщуються: позитивні — вздовж поля, негативні — проти поля, тобто виникає електричний струм, що називається *струмом провідності*:

$$I_{np} = \sigma ES, \quad (21.7)$$

де  $\sigma$  — питома провідність тканини,  $S$  — площа зразка тканини.

*Густина струму провідності* визначається за виразом:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (21.8)$$

Крім того, в тканині (що є діелектриком) на електростатичне поле вільних зарядів накладається додаткове поле зв'язаних зарядів, здатних викликати перерозподіл вільних зарядів. Електростатичне поле вільних зарядів характеризується вектором *електричної індукції* (*електричного зміщення*):

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}. \quad (21.9)$$

Одиниця вимірювання електричної індукції — Кл · м<sup>-2</sup>.

Зміщення зв'язаних зарядів характеризується *струмом зміщення*:

$$I_{zm} = \epsilon \epsilon_0 S \frac{dE}{dt} = S \frac{dD}{dt}. \quad (21.10)$$

та *густиною струму зміщення*:

$$\vec{j} = \epsilon \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}. \quad (21.11)$$

У випадку змінного електричного поля синусоїдної форми ( $E = E_0 \sin \omega t$ ) струм зміщення визначається так:

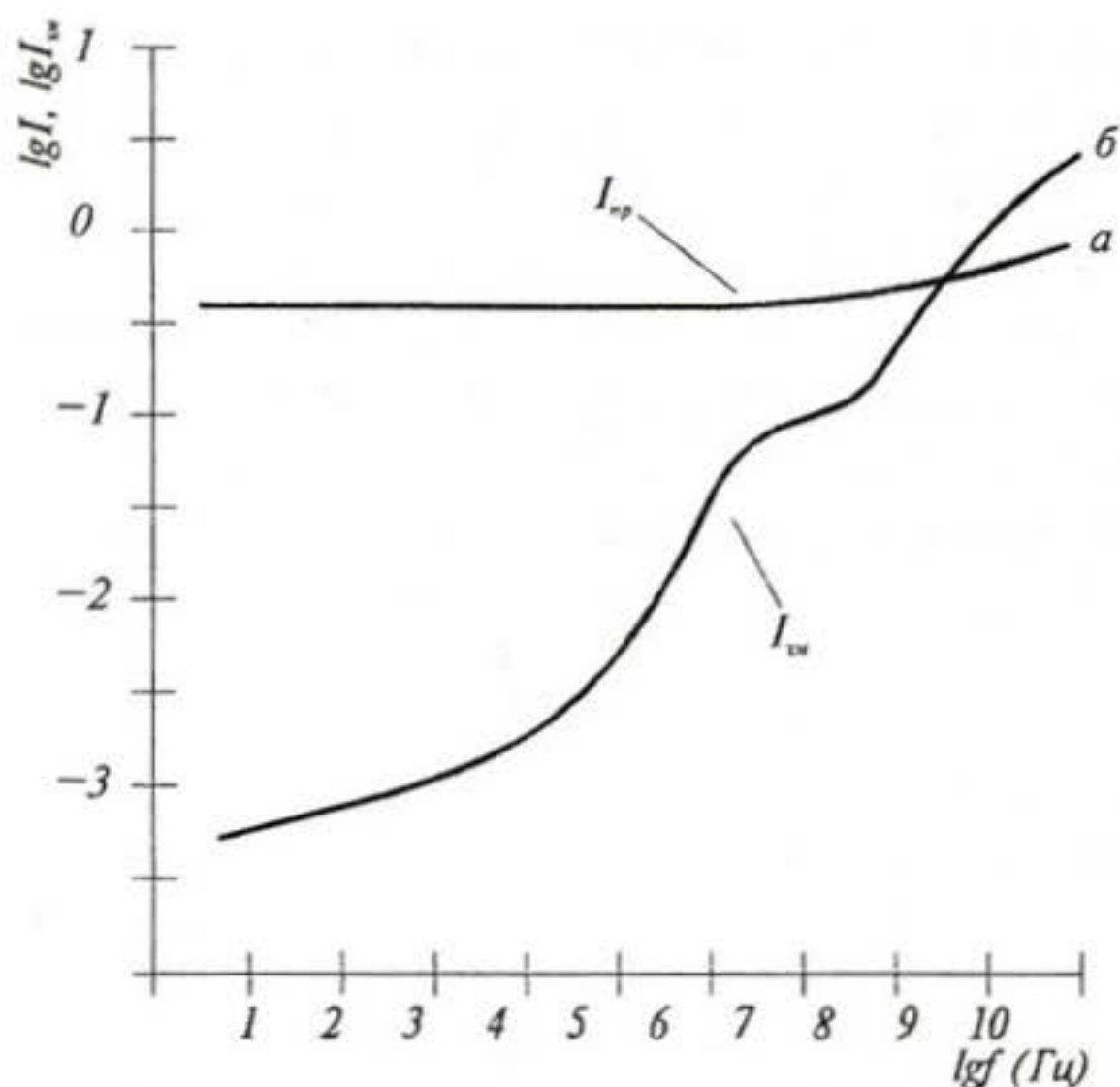
$$\vec{j}_{zm} = \epsilon \epsilon_0 S \omega E_0 \cos \omega t, \quad (21.12)$$

де  $\omega$  — частота змінного електричного поля.

Типову залежність  $I_{np}$  та  $I_{zm}$  від частоти для біологічних тканин наведено на рис. 21.4. Очевидно, що  $I_{np}$  майже не змінюється з частотою (до 100 кГц), тоді як  $I_{zm}$  збільшується з частотою і при частотах понад 10<sup>7</sup> Гц перевищує  $I_{np}$ . Таким чином, при низьких частотах домінує провідність, а при високих — діелектрична проникність речовини.

*Вплив електричних полів на живі організми.* Одними з основних антропогенних джерел електричних полів є лінії електропередачі надвисокої напруги. Сучасна енергетика базується на лініях електро-





*Рис. 21.4. Залежність струму провідності (а) та струму зміщення (б) в біологічній тканині від частоти*

передачі (ЛЕП) з напругою 220, 500, 750, і 1150 кВ. Підготовка трас для ЛЕП, вирубування просік, установка опор, монтаж проводів і подальша експлуатація ЛЕП зумовлює відповідну реакцію з боку екосистем. Будівництво і експлуатація ЛЕП викликає необоротні зміни в видовому складі, фітомасі, просторовій і часовій структурі рослинності на просіках, особливо в зонах тундри, лісотундри і північної тайги. Відновлення рослинного покриву вкрай повільне, що сприяє ерозійним процесам. Утворення просік супроводжується також значними змінами тваринного компонента екосистем: зникають тварини, що мешкають в кронах дерев; змінюється видовий склад, численність і різноманіття птахів; збільшується концентрація гризунів.

Без сумніву, впливають ЛЕП й на людський організм. Розростання міст до рівнів мегаполісів супроводжується наближенням ЛЕП до новобудов. Допустимі норми електричного поля потребують віддалення опор ЛЕП на 30÷40 метрів від жилих кварталів.

Крім того, джерелами електромагнітних полів є електротехнічне обладнання житлових приміщень, побутові електроприлади, теле- та радіостанції, системи супутникового та сотового радіотелефонного зв'язку, персональні комп'ютери, медичні прилади. Згідно з накопиченими даними, вплив електромагнітних полів на людину призводить до негативних змін стану здоров'я, викликаючи зсуви в функціонуванні серцево-судинної, ендокринної, гематологічної, імунної систем, а також збільшує ризик розвитку онкопатології.

Для риб характерні певні реакції на зовнішні електричні поля.

Під час вмикання джерела поля риба демонструє рухливу реакцію: зі збільшенням напруженості поля вона пробує вийти із зони дії поля; при подальшому підвищенні напруженості прямує до аноду (так званий *гальванотаксис*). Змінні електричні поля викликають *осцилотаксис* — розміщення риби впоперек силових ліній поля. Реакція риб на імпульсні електричні поля залежить від амплітуди, частоти і тривалості імпульсів.

Личинки американського вугра *Anguilla rostrata* мігрують з районів нересту в Саргасовому морі до північноамериканського узбережжя Атлантичного океану на відстань близько 1000 км. Цілком можливо, що при цьому вони використовують для навігації геоелектричні поля, що створюються в океані течіями (такими як Гольфстрім). Нагадаємо, що напруженість таких полів становить  $0,5 \text{ мкВ} \cdot \text{см}^{-1}$ , а чутливість вугра —  $0,002 \text{ мкВ} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Планарії здатні визначати наявність і відрізнити географічний напрямок горизонтальних електростатичних градієнтів, що не перевищують  $0,1 \text{ мкВ} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Бджоли проявляють здатність реагувати на зовнішні електричні поля. Максимум чутливості бджолиної сім'ї, що складається з 10000 особин, на електричні поля становить  $4\text{--}5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ . Під впливом електричних полів відбувається зміна параметрів мікроклімату всередині вулика.

### 21.3. ЕЛЕКТРОРЕЦЕПЦІЯ

Процес отримання живим організмом через чутливі органи біологічно значущої інформації про природні електричні поля або поля біологічного походження називається *електрорецепцією*.

Електрорецепція використовується тваринами (рибами, амфібіями та примітивними ссавцями) для пошуків здобичі, уникнення хижаків, внутрішньовидової комунікації, розмноження, просторової орієнтації і навігації, попередження щодо природних явищ — землетрусів, штормів, ураганів тощо. Інтенсивність електричних полів, на які здатні реагувати тварини, становить від  $5 \cdot 10^{-9} \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$  до понад  $10^{-4} \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ ; частотний діапазон електричних полів змінюється від 0 до понад 15 кГц для різних видів.

Серед 4,5 тисяч видів ссавців електрорецепцію виявлено лише у качконоса *Ornithorhynchus anatinus*. Дзьоб тварини вкритий шкірою; в протоці шкіряної слизової залози дзьоба містяться електрорецептори. Слиз захищає електрорецепторні клітини від висихання під час виходу тварини на сушу, а в воді завдяки низькому опору забезпечує підведення електричного струму до рецепторних клітин. Електрочутливість качконоса —  $50\text{--}80 \text{ мкВ} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Риби живуть у водному середовищі, яке характеризується високою електропровідністю; саме риби здатні створювати електричні поля й розпізнавати об'єкти у воді (рис. 21.5). Можна розділити риб на таких, які мають електрорецепторні системи і сприймають електричні поля, і таких, які їх не мають. Деякі види риб мають електрорецептори, розміщені поблизу бокових сенсорних органів; такі електрорецептори називають *ампулами Лоренціні*. Ці органи складаються з епідерміальної ампули, яка містить сенсорний епітелій і з'єднана з поверхнею тіла тонким каналом (рис. 21.6,а). Канал заповнений мукополісахаридною желеподібною речовиною, що має високу електропровідність. Між основою та закінченням каналу виникає різниця потенціалів. *Ампуларний орган* відрізняється від ампули Лоренціні довжиною каналу (рис. 21.6,б). *Бульбовий орган* не має сполучного каналу (рис. 21.6,в).

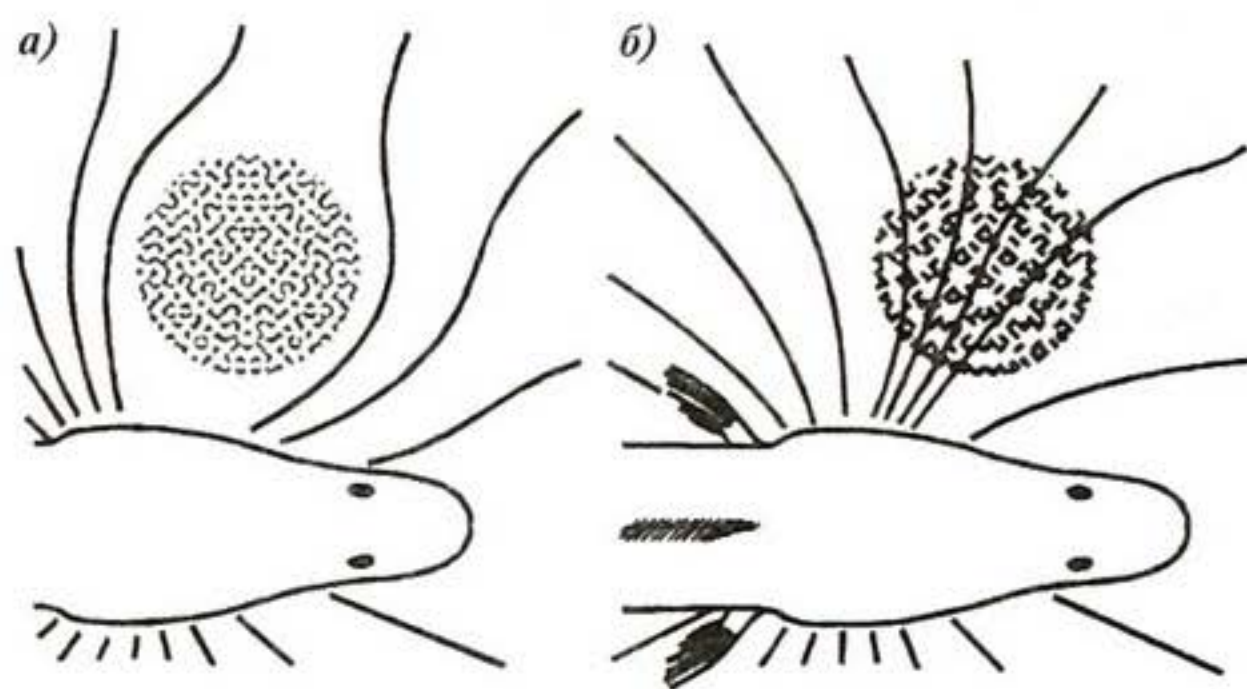


Рис. 21.5. Здатність риби (*Gymnarchus*) реєструвати наявність діелектрика (а) або провідника (б) у водному середовищі за допомогою електричного поля

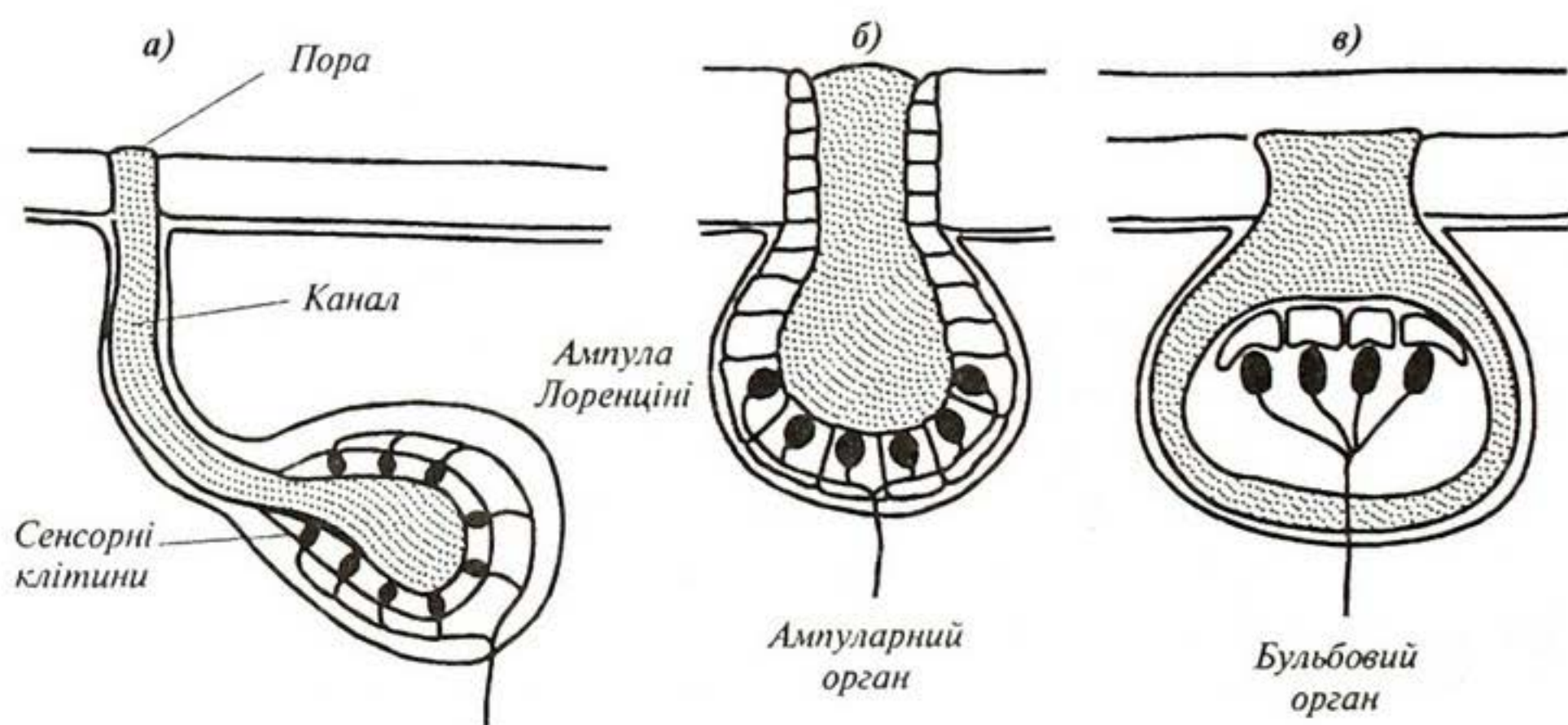


Рис. 21.6. Загальна структура електрорецепторних органів риб

Електрорецепторні системи виявлено у сомових риб, акул і скатів. Мембрана електрорецепторної клітини спрямована до зовнішнього середовища і має менший електричний опір, ніж мембрана на базальному боці клітини. Струм, що входить в клітину ззовні, викликає деполяризацію мембрани, яка активізує кальцієві канали в цій частині клітини. Результатом цього є збільшення частоти нервових імпульсів в сенсорному волокні, зв'язаному з рецептором. Чутливість риб, які мають електрорецептори, коливається від  $0,01 \div 0,02 \text{ мкВ} \cdot \text{см}^{-1}$  у акул і скатів до  $1 \div 2 \text{ мкВ} \cdot \text{см}^{-1}$  у гімнотидів та мормиридів.

Хоча електрорецепторів у комах поки ще не виявлено, можна казати про універсальність механізмів сприймання ними електричних полів. Проаналізуємо існуючі припущення. Згідно з однією з гіпотез, у процесі електростатичної індукції у тканинах комах (які мають опір  $10^2 \div 10^3 \text{ Ом}$ ) відбувається перерозподіл зарядів. Електричні струми, що виникають при цьому, достатні для сприймання нервовою системою. Інша теорія припускає нагромадження на екзоскелеті комахи під час механічних взаємодій із навколишнім середовищем електричних зарядів; завдяки електростатичній взаємодії, що виникає при цьому, можуть мати місце механічні деформації окремих структурних елементів. Так, антени бджоли притягуються до заряджених тіл, і вона змушена відводити ці органи. Кут відхилення залежить від величини заряду. Під впливом електромагнітних полів антени здійснюють коливання, амплітуда яких залежить від параметрів поля.

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Визначити молекулярну масу невідомого білка, якщо його електрофоретична рухливість дорівнює 0,7. Два інших білки мають молярні маси  $M_A = 40000 \text{ D}$  і  $M_B = 22000 \text{ D}$  та електрофоретичні рухливості  $U_A = 0,4$  і  $U_B = 0,6$  відповідно.

### Розв'язок

Запишемо рівняння (21.6) для білків  $A$  і  $B$ :

$$0,4 = b - a \lg 40000;$$

$$0,6 = b - a \lg 22000.$$

Віднявши перше рівняння від другого, отримаємо:

$$0,6 - 0,4 = -a \lg 22000 + a \lg 40000.$$

Звідси

$$0,2 = a (\lg 40000 - \lg 22000) = a (4,6020 - 4,3424) = a 0,2596;$$

$$a = \frac{0,2}{0,2596} = 0,7704.$$

Визначимо сталу  $b$ :

$$b = U + a \lg M = 0,6 + 0,7704 \lg 22000 = 3,9454.$$

Визначивши сталі  $a$  і  $b$ , можна знайти молекулярну масу невідомого білка з рівняння:

$$U = b - a \lg M.$$

$$\lg M = \frac{b - U}{a} = \frac{3,9454 - 0,7}{0,7704} = 4,2125.$$

$$M = 16316 \text{ D.}$$

### Контрольне завдання № 21.1

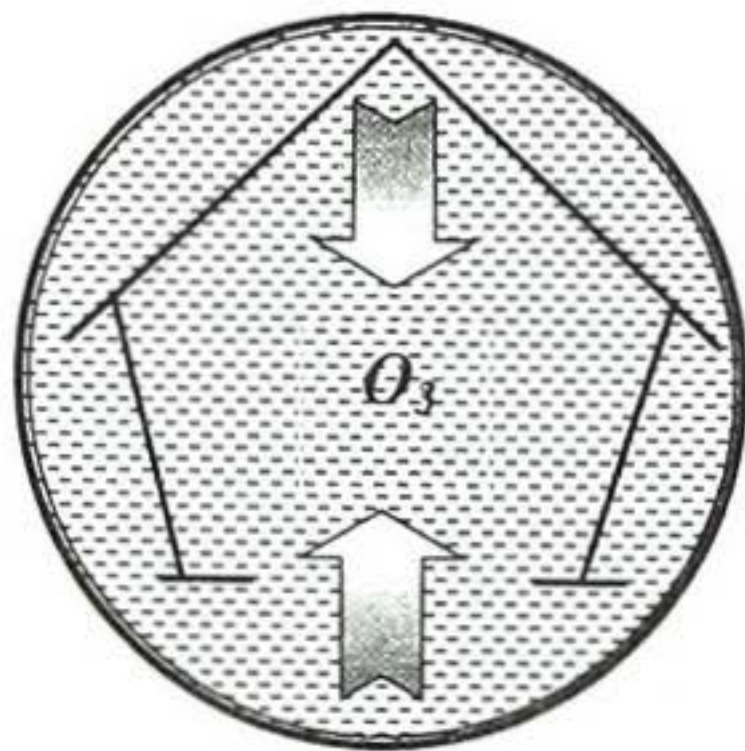
Використовуючи величини сталих  $a$  і  $b$  із попередньої задачі, визначити рухливість білка, якщо його молекулярна маса дорівнює 50000 D. Порівняти отриманий результат з тим, який можна отримати із залежності  $M = f(U)$ , поданої на рис. 21.1.

*Відповідь:* 0,325.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке електрофорез?
2. Які сили діють на частинку в рідкому середовищі під впливом електричного поля?
3. Від чого залежить електрофоретична рухливість макромолекул?
4. Назвати електричні характеристики біологічних тканин. Як вони залежать від частоти?
5. Пояснити механізми виникнення струму зміщення в біологічній тканині.
6. Як впливають лінії електропередачі на живі організми?
7. У яких тварин і як відбувається електрорецепція?

## 22. ПРИКЛАДНА ЕЛЕКТРИКА



### 22.1. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ У ТВАРИННИЦТВІ

*Аеронізація.* У повітряному просторі тваринницького приміщення під впливом електричних полів можуть утворюватися легкі і важкі іони. Згідно з висновками, отриманими видатним біофізиком О.Л.Чижевським, вплив аероіонів на організм відбувається через кров та нервову систему. В першому випадку іони впливають на еритроцити, які змінюють електричні властивості крові. У свою чергу, кров омиває тканини і органи, обмінюючись з ними електричними зарядами. У другому випадку іони впливають на периферійну та центральну нервові системи шляхом дії на нервові рецептори шкіри або за перенесення елементами крові електричних зарядів до інтерорецепторів кровоносних судин та до головного мозку. В цілому процес аероіонізації повітря в тваринницьких приміщеннях сприяє збільшенню живої маси, поліпшенню гематологічних показників, зниженню рівня захворювань тварин.

*Озонування.* Озон є одним із найважливіших природних окислювачів. Застосування технології озонування повітря у птахівництві зумовлює підвищення виводу курчат, позитивні зрушення у показниках крові, зменшення інфекційних захворювань, знищення шкідливої мікрофлори. Періодичне озонування приміщень запобігає пліснявінню та псуванню яєць. Крім того, озонування можна застосовувати для знезараження питної води, стічних вод, кормів тощо.

*Електростимуляція.* Дія серії електричних імпульсів на вим'я корів приводить до підвищення молоковіддачі. Електростимуляція може бути використана для інтенсифікації жуйного процесу корів. Є дані про позитивний вплив змінних електричних полів на туші

тварин після забою — яскравіше забарвлення м'яса, кращі показники якості.

*Електрочутливість риб.* Здатність риб реагувати на електричні поля знайшла застосування в промисловому риболовстві. Можна нагадати використання електротралів для вилову риб поблизу дна, електроневоди і бортові пастки, електрорибозагороджувачі, електропристрої для відлякування риб у зонах гідростанцій, електронасоси. З урахуванням того, що з 1 га поверхні океану можна брати вдвоє більше риби, ніж м'яса з 1 га пасовища, проблема пошуку, обліку і відлову риби за допомогою електричних методів є справді актуальною.

## 22.2. ЕЛЕКТРОЛІКУВАННЯ ТВАРИН

*Електролікування* — це сукупність методів лікування, що базуються на використанні дозованої дії на організм електричних струмів, а також електричних та електромагнітних полів. Розглянемо основні методи електролікування.

*Гальванізація.* Ця техніка передбачає використання постійних електричних полів шляхом прикладання електродів до тіла тварини. В цьому разі напруга становить близько 80 В, а сила струму — до 50 мА. Механізми дії пов'язані з перетворенням електричної енергії у теплову завдяки великому опорі епідермісу; в цьому разі активізуються кровообіг і біохімічні процеси.

*Лікарський електрофорез* — метод електролікування, що полягає в комплексній дії на організм постійного струму і введених за його допомогою лікарських речовин. Лікарські речовини, здатні дисоціювати в розчині на позитивні негативні іони, спрямовано переміщуються в полі постійного електричного струму і здатні надходити в іонізованому стані в організм через шкіру або слизову оболонку. Одночасний вплив на організм постійного електричного поля і лікарської речовини сприяє більш ефективному використанню ліків. Слід зауважити, що традиційні способи введення ліків (ін'єкції, інгаляції) забезпечують надходження в організм лише 2÷5% лікарської речовини.

*Дарсонвалізація* — застосування змінних (або імпульсних) струмів (сила струму дорівнює 10-20 мА) та високих значень напруги (до 20 кВ) і частоти (100÷1000 кГц). Використання цієї техніки призводить до активізації кровоносних судин.

*Франклінізація* — метод, в основі якого лежить використання постійного електричного поля, що виникає під впливом високої (30÷50 кВ) напруги, завдяки чому утворюється своєрідний «електростатичний душ» для тварини. Механізми дії слід пов'язати з виникненням мікрострумів, зміною співвідношення іонів, аероіонізацією повітря.

*Діатермія* — метод, що полягає в дії на тіло тварини змінного електричного струму (сила струму  $1\div 3$  А, густина струму  $10$  А · см<sup>-2</sup>) з високою ( $0,4\div 2,4$  МГц, інколи  $27$  МГц) частотою. Тварину розміщують між електродами, розмір і форма яких відповідають ділянці тіла, що лікується. Основні механізми дії — теплові, причому тепло проникає крізь жирову, м'язову та кісткову тканини. Діатермія характеризується десенсибілізуючою, спазмолітичною та болезаспокійливою дією. Якщо застосувати голковий електрод, то між ним і тканиною виникає електрична дуга, що приводить до нагрівання до  $1000$  °С. Така техніка, що називається *хірургічною діатермією*, дає змогу забезпечувати розтин біологічних тканин та їх коагуляцію — укрупнення дрібних частинок, зокрема білків.

*Кардіостимуляція* — лікування порушень серцевого ритму шляхом впливу на міокард шлуночків електричних струмів відповідної сили і частоти. Відомо, що порогова чутливість живого організму до електричного струму становить близько  $1$  мА; збільшення сили струму на поверхні тіла до  $70\div 100$  мА може викликати вентрикулярну фібриляцію — аритмію серця, що характеризується хаотичним, розрізненим і різночасним скороченням окремих волокон шлуночків серця. Електричний струм силою в декілька ампер призводить до паралічу дихання і летального кінця. Але короткочасне застосування інтенсивного електричного струму зупиняє фібрилярні скорочення серця або передсердь для відновлення синусового ритму скорочень серця та ефективної скорочувальної діяльності шлуночків. Ця техніка називається *дефібриляцією*.

*Електромагнітна терапія*. Ця техніка передбачає застосування електромагнітних полів метрового ( $l=10\div 1$  м,  $f=30\div 300$  МГц), дециметрового ( $l=10\div 1$  дм,  $f=300\div 3000$  МГц), сантиметрового ( $l=10\div 1$  см,  $f=3\div 30$  ГГц) та міліметрового ( $l=10\div 1$  мм,  $f=30\div 300$  ГГц) діапазонів. Механізми дії електромагнітних полів метрового і дециметрового діапазонів слід пов'язати з переміщенням іонів під впливом поля і виникненням внутрішньотканинного тепла. Високочастотні коливання метрового діапазону характеризуються високою проникністю через кістковий мозок, суглоби, жирові прошарки; проникність коливань дециметрового діапазону становить  $10\div 25$  см. Механізми дії електромагнітних полів сантиметрового діапазону пояснюються поглинанням енергії тканинами, що містять воду, і перетворенням цієї енергії у тепло. Глибина проникнення становить  $3\div 5$  см. Механізми впливу електромагнітних хвиль міліметрового діапазону на живий організм ще не вивчено достатньо. Є гіпотези щодо резонансних ефектів, які полягають в реакції на зовнішні опромінювання міліметрового діапазону білкових молекул та нуклеїнових кислот, яким притаманні власні коливання саме у міліметровому діапазоні.

*Електродерматометрія* — вимірювання змін електричного опору шкіри у часі для дослідження функціонального стану вегетатив-



ної нервової системи (що регулює діяльність внутрішніх органів, залоз, судин та гладких м'язів) і емоційної сфери.

*Електролетизмографія* — дослідження кровонаповнення органа або ділянки тіла на основі реєстрації їх електричного опору або діелектричних властивостей, що змінюються в процесі кровообігу.

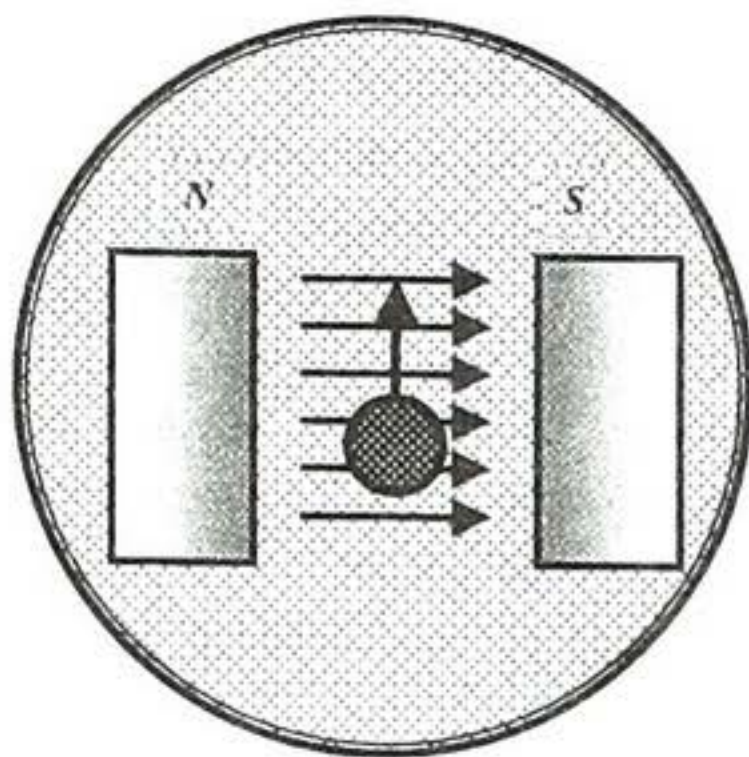
*Електропунктура* — метод рефлексотерапії, що базується на дії електричних імпульсів за допомогою спеціального електрода на біологічно активні точки, розміщені на поверхні тіла.

*Електроімпедансна томографія* — техніка утворення зображень розподілу електричного імпедансу по тілу пацієнта. Імпеданс — це комплексний опір, який чинить жива тканина змінному струму. В найпростішому випадку до тіла прикладають чотири електроди: через першу пару пропускають електричний струм, за допомогою другої пари реєструють напругу; співвідношення між струмом і напругою дає можливість оцінити імпеданс тканини. В реальній ситуації на тіло накладають 16 або 32 електроди для отримання тривимірних зображень. Отриману інформацію обробляють за допомогою Фур'є-аналізу. Слід зауважити, що ця техніка поки що перебуває в стадії експериментальних досліджень.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Пояснити принципи гальванізації. Які електричні режими використовуються під час гальванізації?
2. Що таке лікарський електрофорез? Чим він відрізняється від звичайного електрофорезу?
3. Пояснити принципи дарсонвалізації та франклінізації. Чим відрізняються ці методи лікування?
4. Що таке діатермія? хірургічна діатермія?
5. Пояснити принципи кардіостимуляції.
6. В чому полягають принципи електромагнітної терапії?

## 23. МАГНЕТИЗМ



*Магнетизм* — це розділ фізики, що вивчає взаємодію між електричними струмами, між струмами і магнітами (тілами з магнітним моментом) та між магнітами, а також властивості речовин, в яких проявляється ця взаємодія.

### 23.1. МАГНІТНЕ ПОЛЕ. МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

*Магнітне поле* — силове поле, що діє на рухомі електричні заряди і намагнічені тіла. Магнітне поле характеризується вектором *магнітної індукції*  $\vec{B}$ . Магнітна індукція визначає силу, з якою магнітне поле діє на електричний заряд, що рухається в даній точці поля.

Одиниця вимірювання магнітної індукції — *Тл*.

Для однорідного ізотропного середовища вектор магнітної індукції пов'язаний з вектором напруженості магнітного поля співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (23.1)$$

де  $\mu_0$  — магнітна стала ( $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}$ ),  $\mu$  — магнітна проникність середовища.

Одиниця вимірювання напруженості магнітного поля —  $\text{А} \cdot \text{м}^{-1}$ .

### 23.2. СИЛА ЛОРЕНЦА

Сила  $\vec{F}_M$ , що діє з боку магнітного поля на рухомі заряджені частинки, підпорядковується таким закономірностям: 1. сила  $\vec{F}_M$  пропорційна заряду  $q$  і швидкості руху  $\vec{V}$  частинки; 2. величина і

напрямок сили  $\vec{F}_M$  залежить від величини і напрямку швидкості руху частинки та магнітного поля; 3. коли заряджена частинка рухається вздовж магнітного поля, сила  $\vec{F}_M$  дорівнює нулю; 4. якщо вектор швидкості утворює кут  $\theta$  з напрямком магнітного поля, сила  $\vec{F}_M$  діє у напрямку, перпендикулярному площині, що утворюється векторами  $\vec{V}$  і  $\vec{B}$ ; 5. напрямки сил  $\vec{F}_M$  з боку магнітного поля, що діють на позитивні і негативні заряди, протилежні; 6. якщо вектор швидкості утворює кут  $\theta$  з напрямком магнітного поля, величина сили  $\vec{F}_M$  пропорційна  $\sin\theta$ .

Всі ці закономірності можна сумувати у такій формі:

$$\vec{F}_M = q[\vec{V} \times \vec{B}], \quad (23.2)$$

де  $[\vec{V} \times \vec{B}]$  — векторний добуток векторів  $\vec{V}$  і  $\vec{B}$ .

Сила  $\vec{F}_M$ , що описується останнім рівнянням, називається *силою Лоренца*.

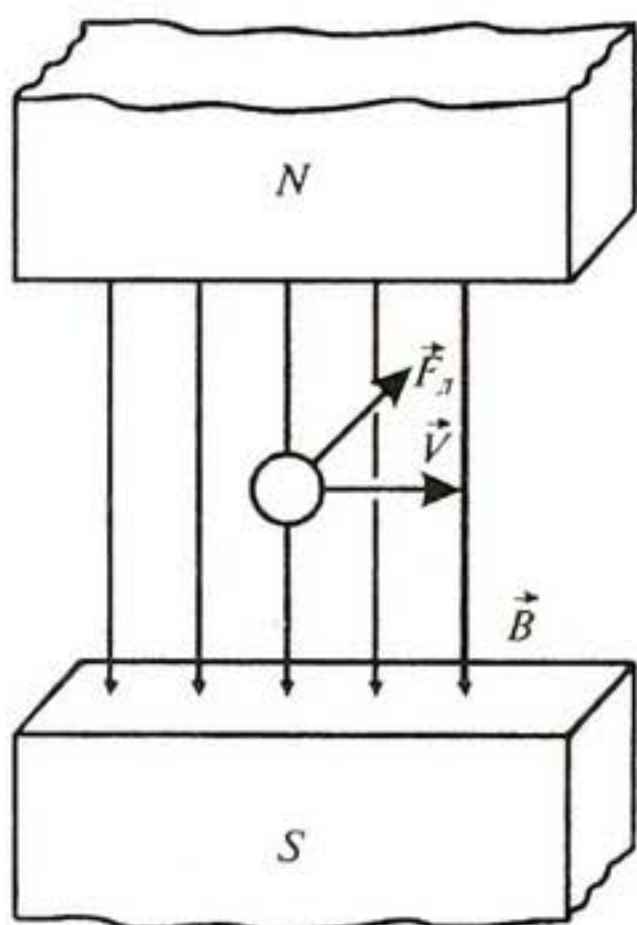


Рис. 23.1. Сила Лоренца

Напрямок сили Лоренца визначається за *правилом лівої руки*: якщо ліву руку розташувати так, щоб вектор магнітної індукції входив в долоню, а витягнуті чотири пальці збігалися з напрямком вектора швидкості, то відігнутий великий палець вкаже напрямок сили, що діє на позитивний заряд (рис. 23.1).

Якщо на рухомий електричний заряд крім магнітного поля з індукцією  $\vec{B}$  діє й електричне поле напруженістю  $\vec{E}$ , то результуюча сила  $\vec{F}_M$ , прикладена до заряду, дорівнюватиме векторній сумі сил — сили, що діє з боку електричного поля, і сили Лоренца (рис. 23.2):

$$\vec{F}_M = q\vec{E} + q[\vec{V} \times \vec{B}]. \quad (23.3)$$

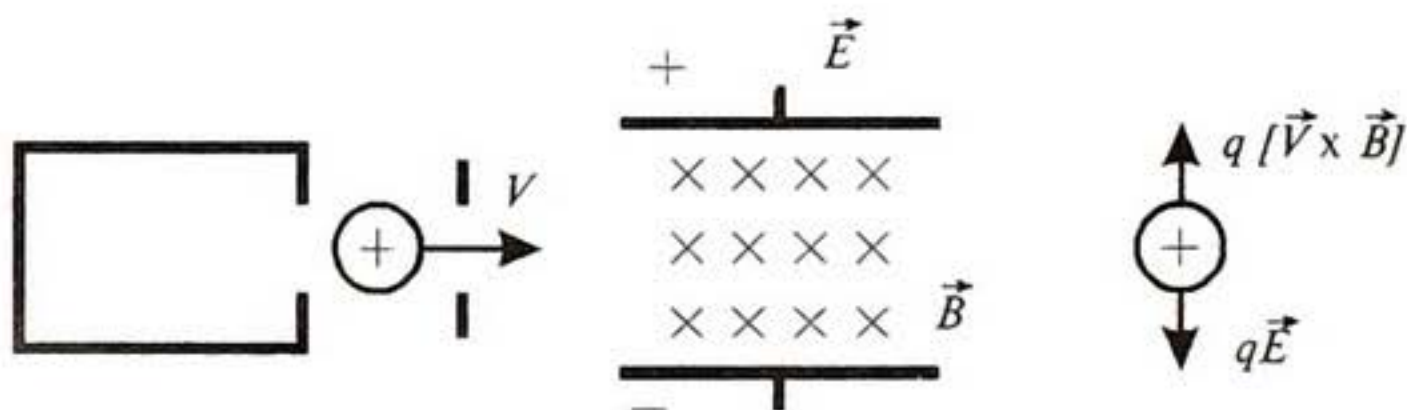


Рис. 23.2. Дія електричного та магнітного полів на електричний заряд, що рухається

### 23.3. ЗАКОН АМПЕРА

Дія магнітного поля на електричний струм описується законом Ампера: сила  $d\vec{F}$ , з якою магнітне поле діє на елемент провідника  $d\vec{l}$  зі струмом, що знаходиться в магнітному полі, прямо пропорційна силі струму  $I$  в провіднику і векторному добутку елемента провідника довжиною  $d\vec{l}$  на магнітну індукцію  $\vec{B}$ :

$$d\vec{F} = I[d\vec{l} \times \vec{B}]. \quad (23.4)$$

Напрямок дії сили Ампера можна знайти за правилом лівої руки: якщо ліву руку розташувати так, щоб вектор магнітної індукції входив в долоню, а витягнуті чотири пальці збігалися з напрямком струму, то відігнутий великий палець вкаже напрямок сили, що діє на провідник з боку поля (рис. 23.3).

Модуль сили Ампера визначається за формулою:

$$dF = IBdl\sin\alpha, \quad (23.5)$$

де  $\alpha$  — кут між векторами  $d\vec{l}$  і  $\vec{B}$ .

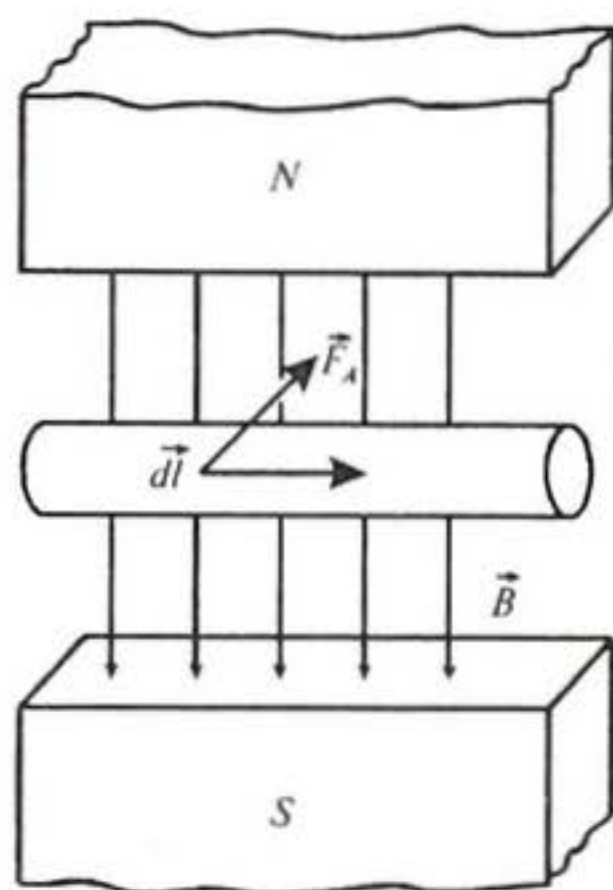


Рис. 23.3. Сила Ампера

### 23.4. МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИНИ

Під час руху електронів в атомі по орбіталі утворюються замкнуті орбітальні струми, що викликають власні магнітні поля. Якщо зовнішнє магнітне поле відсутнє, ці власні магнітні поля зорієнтовані хаотично і загальне внутрішнє магнітне поле речовини дорівнює нулю. Якщо прикласти до речовини зовнішнє магнітне поле, то в речовині створюється внутрішнє магнітне поле. Будь-яка речовина, здатна намагнічуватися під впливом магнітного поля, називається *магнетиком*. Речовини, що намагнічуються в зовнішньому магнітному полі у напрямку, протилежному напрямку вектора магнітної індукції поля, називаються *діамагнетиками* (рис. 23.4,а); речовини, які намагнічуються в зовнішньому магнітному полі у напрямку вектора магнітної індукції, називаються *парамагнетиками* (рис. 23.4,б).

Вектор магнітної індукції  $\vec{B}$  у магнітному полі дорівнює сумі векторів магнітної індукції зовнішнього поля  $\vec{B}_0$  та магнітної індукції власного магнітного поля магнетика  $\vec{B}_s$ :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_s. \quad (23.6)$$

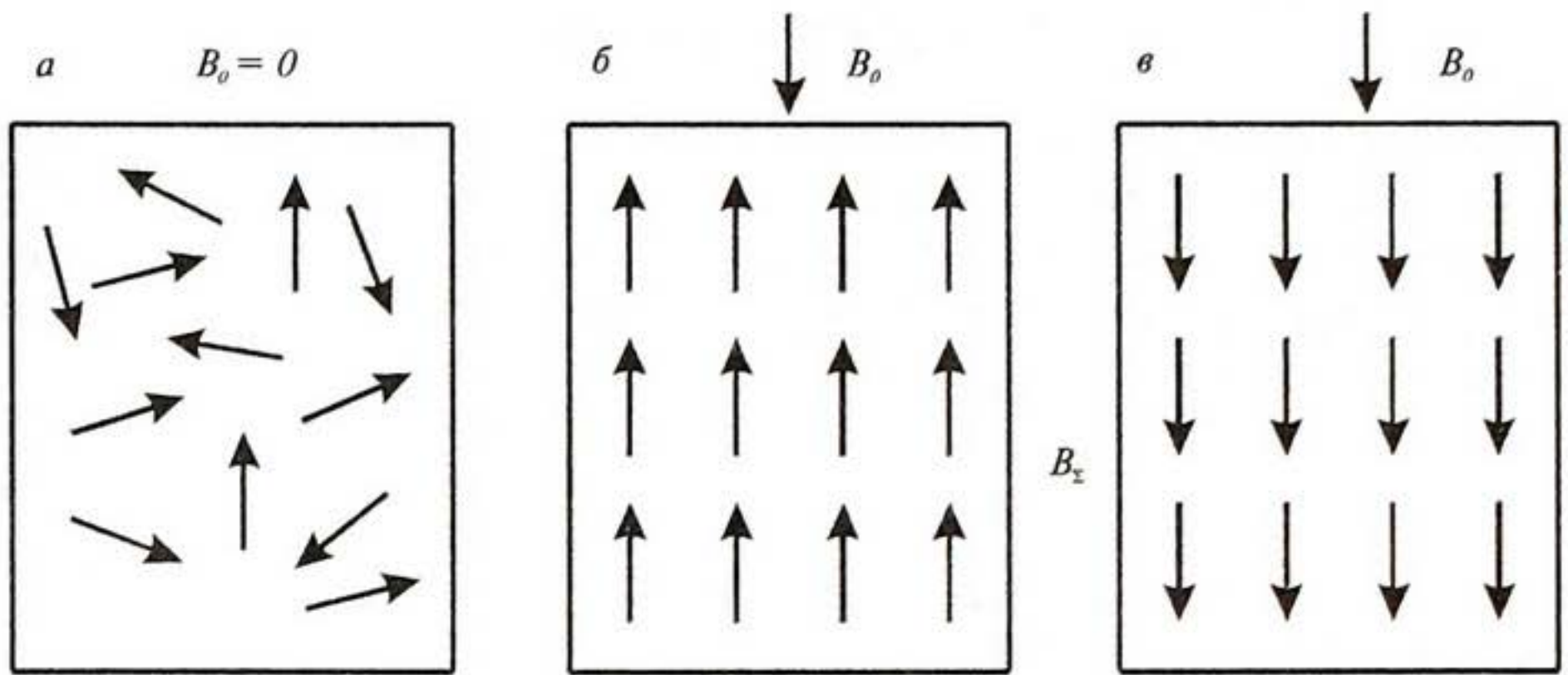


Рис. 23.4. Магнітні властивості речовини: а — хаотична орієнтація власних магнітних полів електронів речовини за відсутності зовнішнього магнітного поля; б — намагнічування речовини (діамагнетика) у напрямку, протилежному зовнішньому магнітному полю; с — намагнічування речовини (парамагнетика) у напрямку зовнішнього магнітного поля

Останній вираз можна подати так:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}, \quad (23.7)$$

де  $\chi$  — магнітна сприйнятливість.

Для діамагнетиків  $\chi < 0$ , для парамагнетиків  $\chi > 0$ . Значення магнітної сприйнятливості становить для діамагнетиків і парамагнетиків близько  $10^{-4} \div 10^{-6}$ .

Крім розглянутих двох класів речовин є ще й *феромагнетики* — речовини, що характеризуються спонтанною намагніченістю (здатністю намагнічуватися у відсутності зовнішнього магнітного поля). Причому, внутрішнє власне магнітне поле може в сотні й тисячі разів перевищувати зовнішнє магнітне поле, що його спричинило. Характерною властивістю феромагнетиків є наявність малих областей, яким притаманне однорідне спонтанне намагнічування. Ці області назива-

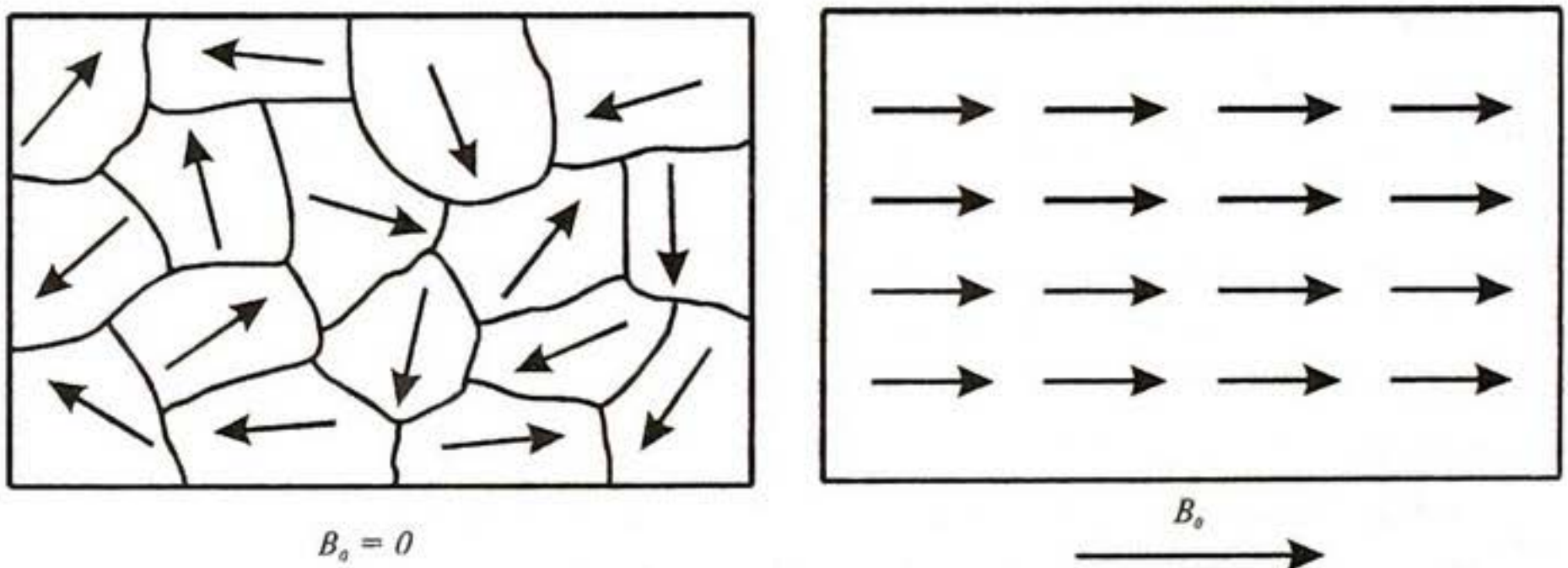


Рис. 23.5. Феромагнетики: а — хаотична орієнтація магнітних полів доменів за відсутності зовнішнього магнітного поля; б — орієнтація магнітних полів доменів у зовнішньому магнітному полі

ються *доменами*, розміри їх досягають  $10^{-2} \div 10^{-3}$  см (рис. 23.5). За відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні поля доменів зорієнтовані хаотично, тоді як зовнішнє магнітне поле орієнтує власні поля доменів. Значення магнітної сприйнятливості для феромагнетиків становлять від декількох десятків до багатьох тисяч одиниць.

## 23.5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

У 1831 р. М.Фарадей відкрив явище *електромагнітної індукції*, яке полягає в тому, що в замкнутому провідному контурі під час зміни потоку магнітної індукції, який охоплюється цим контуром, виникає електричний струм, що отримав назву *індукційного* (рис. 23.6). Виникнення індукційного струму свідчить про наявність в колі *електрорушійної сили електромагнітної індукції*.

*Магнітним потоком*  $d\Phi$  через елементарну поверхню  $dS$  називають скалярну величину, що дорівнює добутку проекції  $B_n$  вектора магнітної індукції на нормаль  $n$  до елемента поверхні на площу цього елемента:

$$d\Phi = B_n dS. \quad (23.8)$$

Повний магнітний потік через поверхню  $S$  знайдемо зі співвідношення:

$$\Phi = \int_S B_n dS. \quad (23.9)$$

Для однорідного магнітного поля і пласкої поверхні  $S$ , перпендикулярної до  $\vec{B}$ , потік визначається так:

$$\Phi = BS. \quad (23.10)$$

Одиниця вимірювання магнітного потоку — *Вб*.

Подальші дослідження привели до формулювання закону Фарадея: *електрорушійна сила електромагнітної індукції в замкнутому провідному контурі чисельно дорівнює і протилежна за знаком швидкості зміни магнітного потоку крізь поверхню, обмежену цим контуром*

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (23.11)$$

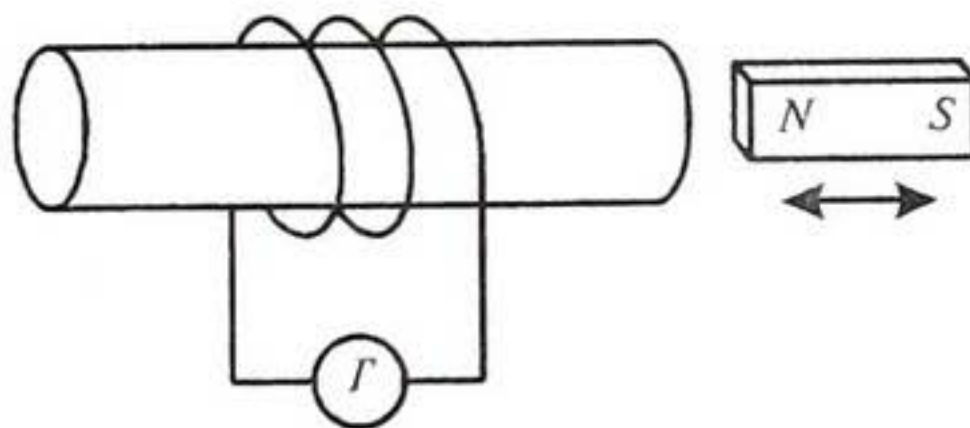


Рис. 23.6. Електромагнітна індукція

Напрямок індукційного струму визначається за правилом Ленца: *напрямок індукційного струму завжди такий, що його магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку, що спричинює цей струм.*

## 23.6. ЗАКОН БІО-САВАРА-ЛАПЛАСА

Магнітна індукція поля постійного електричного струму  $I$  у вакуумі підпорядковується закону Біо-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^3} [d\vec{l} \times \vec{r}], \quad (23.12)$$

де  $d\vec{l}$  — вектор елемента провідника, проведений у напрямку електричного струму,  $\vec{r}$  — радіус-вектор, проведений із цього елемента провідника в точку  $C$ , де розглядається магнітне поле,  $\mu_0$  — магнітна стала,  $r$  — відстань від елемента провідника до точки  $C$ .

Модуль вектора  $d\vec{B}$  визначається за виразом:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin\alpha}{r^2}, \quad (23.13)$$

де  $\alpha$  — кут між векторами  $d\vec{l}$  і  $\vec{r}$ .

Магнітне поле прямого струму визначається за виразом:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (23.14)$$

Магнітне поле в центрі кругового витка зі струмом описується виразом, який можна отримати після інтегрування попереднього рівняння:

$$B = \int_0^{2\pi} \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r^2} dl = \frac{\mu\mu_0 I}{2r}. \quad (23.15)$$

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Протон рухається зі швидкістю  $8 \cdot 10^6$  м · с<sup>-1</sup> вздовж осі  $X$ . Він потрапляє в магнітне поле, магнітна індукція якого 2,5 Тл. Поле спрямоване під кутом  $60^\circ$  до осі  $X$  і лежить в площині  $XU$ . Визначити силу Ампера.

### Розв'язок

Використовуємо табличні дані (див. додаток) і підставляємо числові значення у формулу (23.5):

$$\begin{aligned} dF &= IBdl\sin\alpha = \\ &= (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})(8 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})(2,5 \text{ Тл})(\sin 60^\circ) = 2,77 \cdot 10^{-12} \text{ Н}. \end{aligned}$$

### Контрольне завдання №23.1

Використовуючи дані попередньої задачі, визначити прискорення, з яким рухається протон у магнітному полі. Маса протона  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг.  
Відповідь:  $1,66 \cdot 10^{15}$  м · с<sup>-2</sup>.

### Контрольне завдання №23.2

Провідник масою 0,5 г і довжиною 1 см розміщений з півночі на південь. Визначити величину та напрямок дії сили Ампера, якщо сила струму в провіднику дорівнює 2 А.

Відповідь: 0,245 Тл, на схід.

### Приклад

Електромагнітний метод вимірювання швидкості кровотоку ґрунтується на відхиленні зарядів, що рухаються в кровоносних судинах, в магнітному полі (рис. 23.7). Визначити об'ємну швидкість кровотоку, якщо магнітна індукція 2,5 Тл, різниця потенціалів, що реєструється, 500 мкВ, зазор між полюсами магніта  $10^{-3}$  м, поперечний переріз судини  $10^{-5}$  м<sup>2</sup>.

### Розв'язок

Робота з переміщення заряду в провіднику визначається як:

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{x},$$

або, з урахуванням закону Ампера:

$$dA = I[\vec{l} \times \vec{B}] \cdot d\vec{x}.$$

Потужність пов'язана з роботою виразом:

$$P = \frac{dA}{dt} = I[\vec{l} \times \vec{B}] \frac{d\vec{x}}{dt} = I[\vec{l} \times \vec{B}] \cdot \vec{V}.$$

У той же час:

$$P = I \cdot U,$$

де  $U$  — різниця потенціалів, що вимірюється на електродах, прикладених до судини.

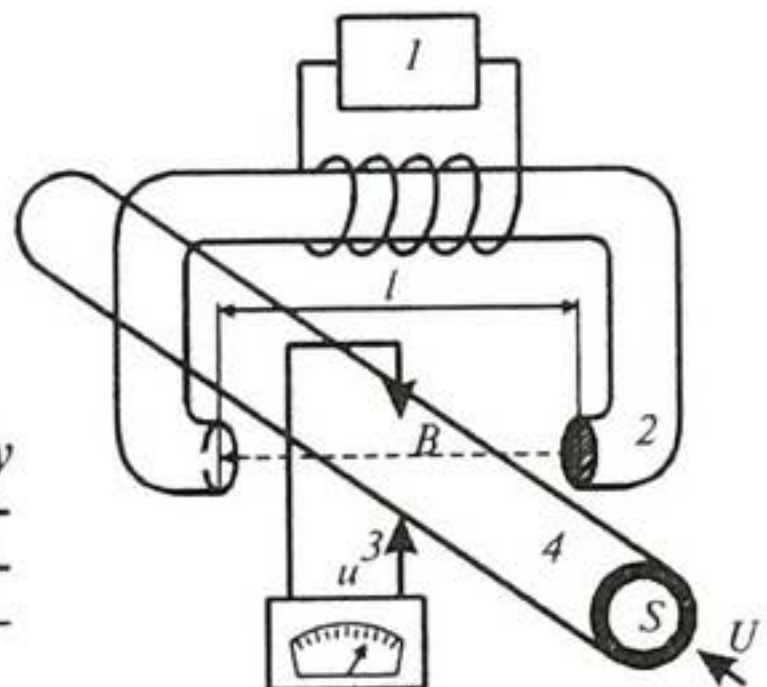
Таким чином:

$$IU = I[\vec{l} \times \vec{B}] \cdot \vec{V},$$

або

$$U = [\vec{l} \times \vec{B}] \cdot \vec{V}.$$

Рис. 23.7. Принцип електромагнітного методу вимірювання швидкості кровотоку: 1 — джерело змінного струму; 2 — магніт; 3 — прилад для вимірювання різниці потенціалів; 4 — кровоносна судина





У скалярній формі:

$$U = IBV.$$

Звідси швидкість руху кровотоку становить:

$$V = \frac{U}{IB}.$$

Тоді об'ємна швидкість кровотоку визначиться за виразом:

$$Q = V \cdot S,$$

де  $S$  — поперечний переріз судини.

Комбінуючи два останніх рівняння, отримаємо:

$$Q = \frac{US}{IB}.$$

Підставляючи числові дані в останнє рівняння, маємо:

$$Q = \frac{500 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot 10^{-5} \text{ м}^2}{10^{-3} \text{ м} \cdot 2,5 \text{ Тл}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}.$$

### Контрольне завдання №23.3

Заряд тіла бджоли змінюється від  $-1,8$  пКл в момент вильоту з вулика до  $+2,9$  пКл в момент повернення з медозбору. Швидкість польоту бджоли  $0 \div 60$  км  $\cdot$  г $^{-1}$  без корму і  $20 \div 30$  км  $\cdot$  г $^{-1}$  з кормом. Визначити максимальні значення сили Лоренца, що діє на бджолу в момент вильоту і повернення, якщо індукція магнітного поля Землі  $45000$  нТл.

*Відповідь:*  $1,35 \cdot 10^{-15}$  Н і  $1,09 \cdot 10^{-15}$  Н.

### Контрольне завдання №23.4

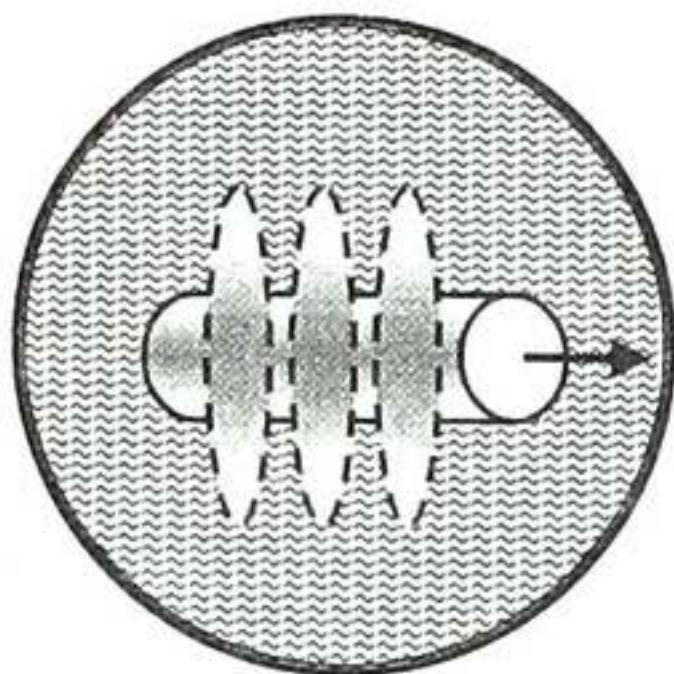
Визначити магнітну індукцію на відстані  $4$  см від провідника, по якому проходить струм  $5$  А.

*Відповідь:*  $2,5 \cdot 10^{-5}$  Тл.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке сила Лоренца? Яким закономірностям вона підпорядковується?
2. Записати закон Ампера.
3. Сформулювати правило лівої руки для визначення напрямку дії сили Лоренца і сили Ампера.
4. Які речовини називають діамагнетиками, парамагнетиками, феромагнетиками?
5. Дати визначення магнітної сприйнятливості.
6. В чому полягає явище електромагнітної індукції?
7. Сформулювати правило Ленца.
8. Записати закон Біо-Савара-Лапласа.

## 24. БІОМАГНЕТИЗМ



*Біомагнетизм* — це розділ біофізики, що вивчає магнітні властивості клітин, тканин та органів, а також магнітні поля біологічного походження.

### 24.1. ДЖЕРЕЛА МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ЖИВОМУ ОРГАНІЗМІ

У процесі життєдіяльності організму м'язові та нервові клітини виявляють електричну активність. Результатом такої активності є виникнення біомагнітних полів, зумовлених електричними струмами. Наприклад, клітинна мембрана проявляє здатність пропускати через себе іони речовин. При неоднорідній поляризації мембрани по всій клітинній поверхні можуть виникати позаклітинні струми, які замикаються всередині клітини і є джерелами біомагнітних полів. Біомагнітні явища можуть виникати під час роботи або руху окремих органів (серця, очей тощо), при проходженні нервових імпульсів, у результаті взаємодії організму або його частин із зовнішнім середовищем. Крім того, джерелами магнітних полів можуть бути магнітні включення, що містяться в живому організмі.

### 24.2. МАГНІТНА АКТИВНІСТЬ ОРГАНІЗМУ

Зміни електрофізіологічних процесів у серцевому м'язі викликають відповідні зміни магнітних характеристик серця; аналіз їх є суттю *магнітокардіографії*. При цьому вимірюються компоненти вектора магнітної індукції, перпендикулярні до поверхні грудної клітки. Кількість вимірювань варіює від 30 до 50; зондовані ділянки

розміщені на однакових інтервалах (близько 5 см) по вертикалі та горизонталі. Магнітну індукцію реєструють за допомогою приймальних котушок; криві зміни у часі компоненти магнітної індукції називають *магнітокардіограмами*.

Електрична активність головного мозку зумовлює появу магнітного поля, реєстрація якого лежить в основі *магнітоенцефалографії*.

Реєстрація власного магнітного поля скелетного м'яза становить суть *магнітоміографії*. Під дією імпульсу збудження, що проходить по аксону, у м'язовому волокні виникає електричний імпульс досить складної форми. Саме зміні електричного сигналу відповідає виникнення магнітного поля.

**24.1. Значення магнітних полів, що реєструються методами магнітографії**

Біомагнітний сигнал	Магнітна індукція, пТл
Магнітокардіографія	50
Магнітоенцефалографія	1+10
Магнітоміографія	10
Магнітоокулографія	10

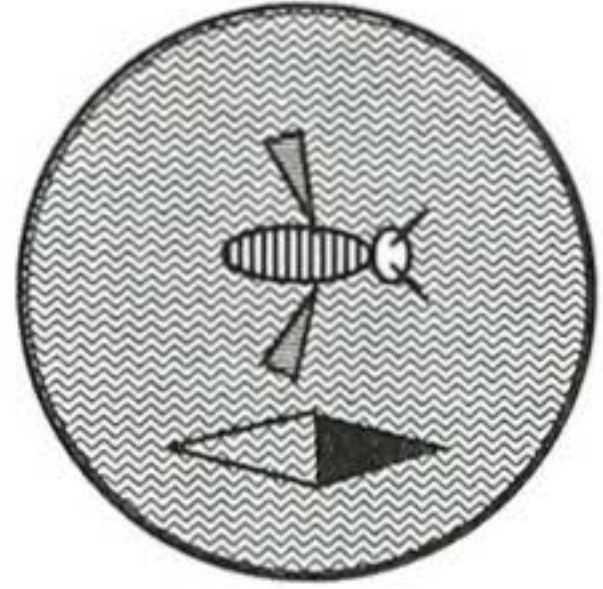
Магнітні поля можуть бути індуковані у процесі електричної активності сітчастої оболонки ока; реєстрація відповідних магнітних полів лежить в основі *магніторетинографії*. При дії зовнішніх подразників на зоровий аналізатор виникають магнітні поля на роговій оболонці ока, вимірювання яких називають *магнітоокулографією*.

Реальні значення магнітних полів, що реєструються методами магнітографії, наведено в табл. 24.1.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Назвати джерела магнітного поля біологічного походження.
2. В чому полягає суть методу: магнітокардіографії? магнітоенцефалографії? магнітоміографії? магніторетинографії? магнітоокулографії?

## 25. МАГНІТОБІОЛОГІЯ



*Магнітобіологія* — це розділ біофізики, що вивчає вплив зовнішніх магнітних полів на стан та діяльність живих організмів, а також їх здатність реагувати на зовнішні магнітні фактори (здійснювати магніторецепцію).

### 25.1. ВПЛИВ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

Під впливом корпускулярних потоків Сонця відбуваються короткочасні зміни магнітного поля Землі — так звані *магнітні бурі*, що супроводжуються стиском магнітосфери, підсиленням в ній електричних струмів і виникненням на поверхні Землі іррегулярних магнітних збурень. Протягом магнітних бур збільшується кількість серцево-судинних захворювань, погіршується стан хворих, які на гіпертонію тощо. Крім того, магнітні бурі викликають полярні сяйва, іоносферні збурення, рентгенівське та низькочастотне випромінювання.

Лінії електропередачі є джерелами не тільки електричних, але й магнітних полів. В 90-х роках учені Швеції, Данії, США провели масштабні епідеміологічні дослідження, які довели, що вплив магнітних полів ЛЕП на здоров'я мешканців може проявитися в коридорах завширшки 400÷800 м уздовж ліній електропередачі. В 1996 р. величина індукції магнітного поля в 0,2 мкТл була рекомендована як гранично допустимий рівень магнітного поля промислової частоти. Перевищення цієї норми призводить до раку крові і мозку.

Відомо, що морські істоти — акули, скати, вугрі, черепахи, кити, дельфіни — здатні використовувати магнітне поле Землі в пошуках кращих умов існування.

Птахи орієнтуються під час міграції не тільки за зірками, положенням Сонця, але й за магнітним полем Землі.

Печерна саламандра здатна знаходити шлях у повній темряві, орієнтуючись за магнітним полем.

Експериментальні дослідження з равликами і планаріями показали, що тварини здатні реагувати на близькі за величиною до геомагнітного поля магнітні поля. Так, равлик *Nassarius* відрізняє полюси магніта. Планарія *Dugesia*, коли віддаляється від джерела світла, завжди відхиляється від прямолінійної траєкторії; величина і напрям відхилення залежать від орієнтації і напруженості зовнішнього магнітного поля. Чутливість планарії до магнітного поля становить  $4 \cdot 10^{-6}$  Тл.

Магнітне поле Землі використовують бджоли для орієнтації. Магнітна орієнтація проявляється у бджіл в процесі будівництва нових стільників. Можна казати про амплітуди  $1 \div 10$  нТл, що відповідають чутливості бджіл до магнітних полів.

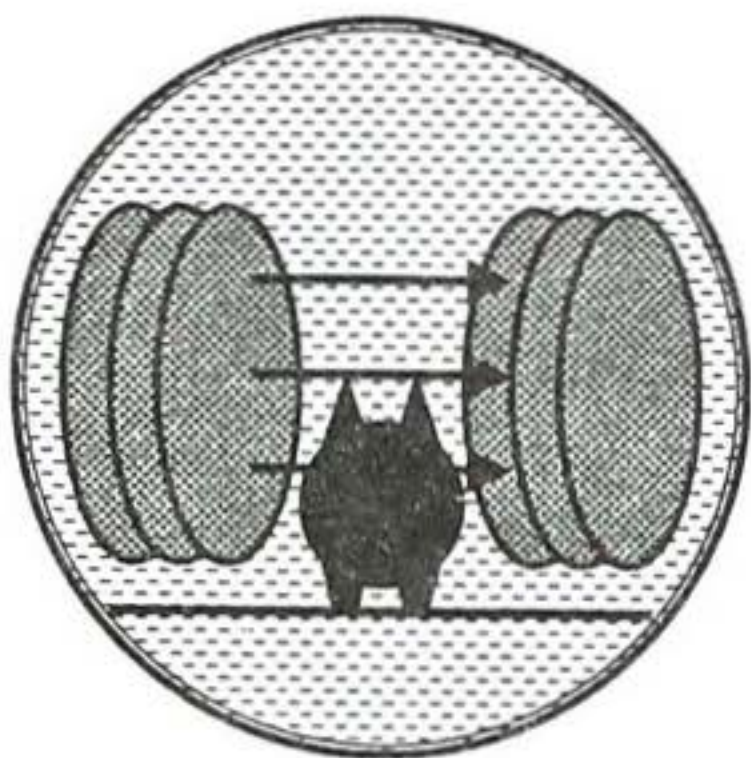
## 25.2. МАГНІТОРЕЦЕПЦІЯ

Здатність живих організмів сприймати та використовувати зовнішні магнітні поля називається *магніторецепцією*. На сучасному рівні найвірогіднішою є гіпотеза магніторецепції, що ґрунтується на концепції *магнетиту* — специфічної неорганічної сполуки заліза (оксиди, сульфати, сульфіді і фосфати заліза). У тварин основною сполукою заліза, що відповідає за магніторецепцію, є феригідрит  $5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$ ; у бджіл —  $Fe_3O_4$ . Магнетит знайдено у голубів, пелагічних китів, деяких молюсків та бактерій, що мешкають в мулі. Мінімальна структурна одиниця магнетиту з постійними магнітними властивостями називається *доменом*. Уміщений у магнітне поле, цей домен проявляє себе як стрілка компаса, орієнтуючись вздовж поля. Цілком можлива сумарна орієнтація всіх доменів при накладанні зовнішнього магнітного поля (так званий *суперпарамагнетизм*).

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що вивчає магнітобіологія?
2. Охарактеризувати сучасні уявлення щодо магніторецепції у тварин.
3. Як реагують живі організми на магнітне поле Землі?

## 26. ПРИКЛАДНИЙ МАГНЕТИЗМ



### 26.1. МЕТОДИ РЕЄСТРАЦІЇ БІОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

*Котушковий детектор.* Використання котушки для вимірювання біомагнітних полів є найпростішим методом, що застосовувався у роки народження магнітографії. Слід зазначити, що цей метод може бути використаний лише для реєстрації змін магнітних полів.

Електрорушійна сила електромагнітної індукції оцінюється за виразом:

$$\varepsilon = N\pi r^2 \frac{dB}{dt}, \quad (26.1)$$

де  $N$  — кількість витків,  $r$  — радіус котушки,  $\frac{dB}{dt}$  — зміна магнітної індукції.

Використовуючи типові значення  $N = 10^3$ ,  $r = 5$  см,  $B = 50$  пТл,  $dt = 100$  мс, можна отримати  $\approx 4 \cdot 10^{-9}$  В. Збільшити величину можна шляхом використання феритових осердь або збільшення кількості витків (до  $10^4$ ).

*Градiометр.* Процесу магнітографії заважає вплив зовнішніх магнітних полів. Дійсно, якщо магнітограма характеризується магнітною індукцією близько  $10 \div 50$  пТл, то зовнішні магнітні поля, які утворюються сучасним обладнанням в будинках, спричиняють магнітну індукцію  $5 \cdot 10^5$  пТл. Для запобігання впливу цих полів слід екранізувати робочі приміщення, в яких проводиться реєстрація магнітограм феромагнітними або алюмінієвими матеріалами, хоча це зовсім не дешевий спосіб. Метод, що передбачає зменшення впливу зовнішніх магнітних полів, базується на використанні *градіометра* — приладу, здатного вимірювати просторовий градієнт магнітного поля. Індукція  $B$  магнітного поля, яке створюється серцем, обернено пропорційна відстані  $r$  від серця:

$$B = \frac{ID\mu_0}{4\pi r^2}, \quad (26.2)$$

де  $D$  — розміри серця ( $\approx 5$  см).

В той же час просторовий градієнт магнітного поля обернено пропорційний  $r^3$  (щоб впевнитися в цьому, достатньо взяти похідну  $dB/dr$ ): наприклад, якщо на відстані 2000 см індукція зовнішнього магнітного поля становить 1250 пТл (порівняно з 125 пТл магнітограми), то просторовий градієнт цього поля оцінюється як 1,25 пТл/см (порівняно з 12,5 пТл·см<sup>-1</sup> — градієнтом магнітного поля серця). Схематичне зображення градіометра наведено на рис. 26.1. В основі його лежить використання двох котушок для оцінки просторового градієнта магнітного поля.

*Детектор на основі ефекту Холла.* В основі детектора лежить вимірювання різниці потенціалів  $\Delta\varphi$ , що виникає у провіднику із струмом, розміщеним у магнітному полі. Ця різниця потенціалів вимірюється перпендикулярно до напрямків електричного струму і магнітного поля (рис. 26.2) і визначається за формулою:

$$\Delta\varphi = R_x \frac{I \cdot B}{d}, \quad (26.3)$$

де  $I$  — електричний струм,  $B$  — магнітна індукція,  $d$  — товщина провідника,  $R_x$  — стала Холла. Детектор такого типу здатний оцінювати біомагнітні поля в діапазоні 10 мкТл ÷ 1 Тл.

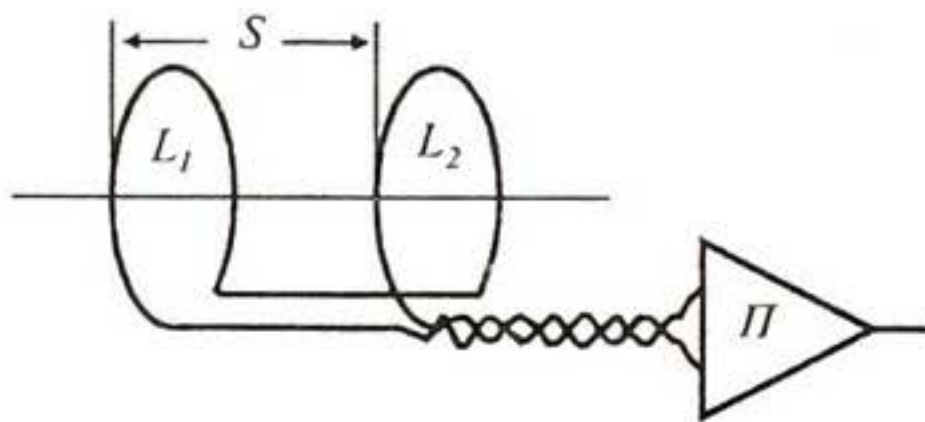


Рис. 26.1. Схематичне зображення радіометра:  $L_1$  та  $L_2$  — котушки, розміщені на відстані  $S$ ;  $\Pi$  — підсилювач

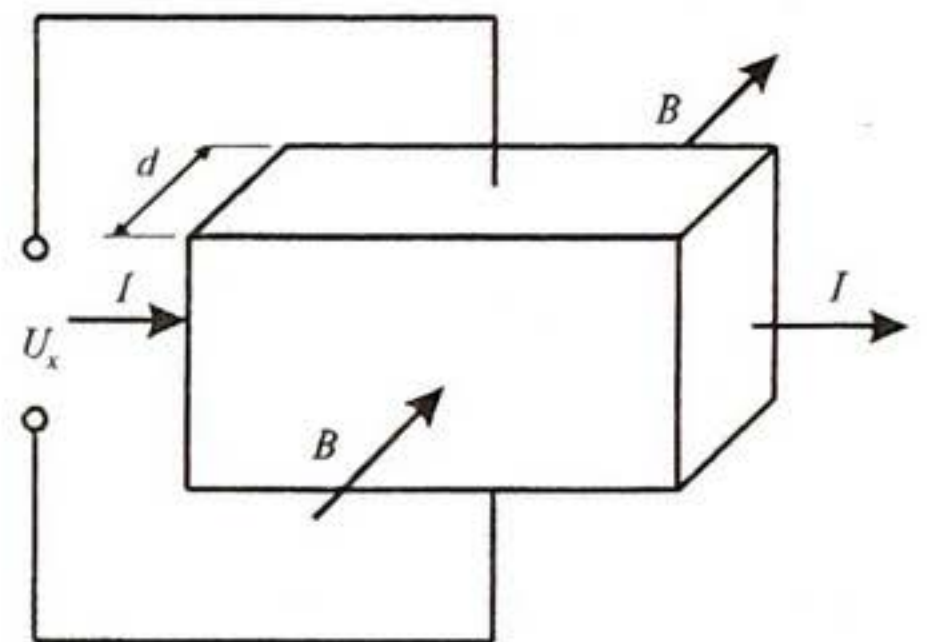


Рис. 26.2. Ефект Холла:  $I$  — електричний струм;  $B$  — магнітна індукція;  $U_x$  — різниця потенціалів;  $d$  — товщина кристалу

## 26.2. МЕТОДИ МАГНІТОТЕРАПІЇ

*Низькочастотна магнітотерапія.* В основі цієї техніки лежить застосування змінних магнітних полів з частотою 50 Гц та індукцією до 35 мТл. Механізми дії пов'язані зі збудженням змінними магнітними полями вихрових струмів, які викликають теплові ефекти, що впливають на окислювально-відновні та ферментативні процеси. Крім того, магнітні поля змінюють концентрацію іонів на поверхні мембран і впливають на функціональний стан клітини.

*Індуктотермія.* Ця техніка базується на використанні змінних магнітних полів високої частоти. Кількість теплоти  $Q$ , що виділяється в одиниці об'єму тіла тварини, визначається за формулою:

$$Q \sim \frac{\omega^2 B_0^2}{\rho} \sim \sigma \omega^2 B_0^2, \quad (26.4)$$

де  $\omega$  — частота змінного магнітного поля,  $\rho$  — питомий опір тканини,  $\sigma$  — питома електропровідність тканини,  $B_0$  — амплітуда індукції магнітного поля.

Отже, підвищення частоти магнітного поля до десятків мегагерц сприяє нагріванню тканини.

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Визначити величину магнітної індукції, що створюється серцем на відстані 20 см, припускаючи, що струм, який проходить через серце, становить 1 мА, а розміри серця — 5 см.

### Розв'язок

Використовуємо формулу (26.2), в яку підставляємо числові дані:

$$B = \frac{ID\mu_0}{4\pi r^2} = (1 \cdot 10^{-3} \text{ А})(5 \cdot 10^{-3} \text{ м}) \times \\ \times (1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}) / (4 \cdot 3,14)(0,2 \text{ м})^2 = 1,25 \text{ пТл.}$$

### Контрольне завдання № 26.1

Визначити різницю потенціалів, що виникає в результаті ефекту Холла у мідному провіднику товщиною 0,1 см при проходженні струму 5 А, якщо стала Холла становить  $7,4 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$ , магнітна індукція дорівнює 1,2 Тл.

*Відповідь:* 0,444 мкВ.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Пояснити принципи дії: котушкового детектора; градіометра; детектора на основі ефекта Холла.
2. Охарактеризувати основні методи магнітотерапії.





## 27. ОПТИКА

*Оптика* — розділ фізики, в якому вивчається оптичне випромінювання (світло), процеси його поширення та явища, що спостерігаються при взаємодії світла і речовини.

### 27.1. ПРИРОДА СВІТЛА

*Оптичним випромінюванням* називаються електромагнітні хвилі, довжина  $\lambda$  яких в вакуумі лежить в діапазоні від 10 нм до 1 мм. Розрізняють ультрафіолетове ( $\lambda \ll 400$  нм), видиме ( $\lambda = 400 \div 700$  нм) та інфрачервоне ( $\lambda \gg 700$  нм) випромінювання (табл. 27.1).

#### 27.1. Діапазони спектра оптичного випромінювання

Діапазон довжин хвиль, нм	Назва
Ультрафіолетова область	
100+280	УФ-С
280+315	УФ-В
315+380	УФ-А
Видима область	
380+440	фіолетове світло
440+495	синє світло
495+580	зелене світло
580+640	жовте світло
640+760	червоне світло
Інфрачервона область	
760+2500	ближня
2500+25000	середня
25000+500000	далека

Світло має подвійну природу — в деяких випадках діє як хвиля, в інших — як частинка. В одних оптичних явищах, таких як інтерференція, дифракція, поляризація, дисперсія, проявляються *хвильові* властивості світла; такі явища як фотоефект переконують в тому, що світло має *корпускулярну* (дискретну) природу. Прояв світлом як хвильових, так і корпускулярних властивостей називають *корпускулярно-хвильовим дуалізмом*.

## 27.2. ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА

*Геометрична оптика* — це розділ оптики, що використовує уявлення про поширення незалежно один від одного світлових променів, що заломлюються та відбиваються на межах середовищ з різними оптичними властивостями і прямолінійних в оптично однорідному середовищі.

Розрахунки на основі геометричної оптики застосовують при розробці та створенні оптичних приладів — лінз, призм, мікроскопів тощо.

### 27.2.1. Основні закони геометричної оптики

На межі поділу двох середовищ світло зазнає відбивання і заломлення (рис. 27.1). Висновки геометричної оптики будуються на основі кількох простих законів, встановлених дослідним шляхом:

1. Закон прямолінійного поширення світла: в однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно. Лінія, вздовж якої переноситься світлова енергія, називається променем. В однорідному середовищі промені світла є прямі лінії;

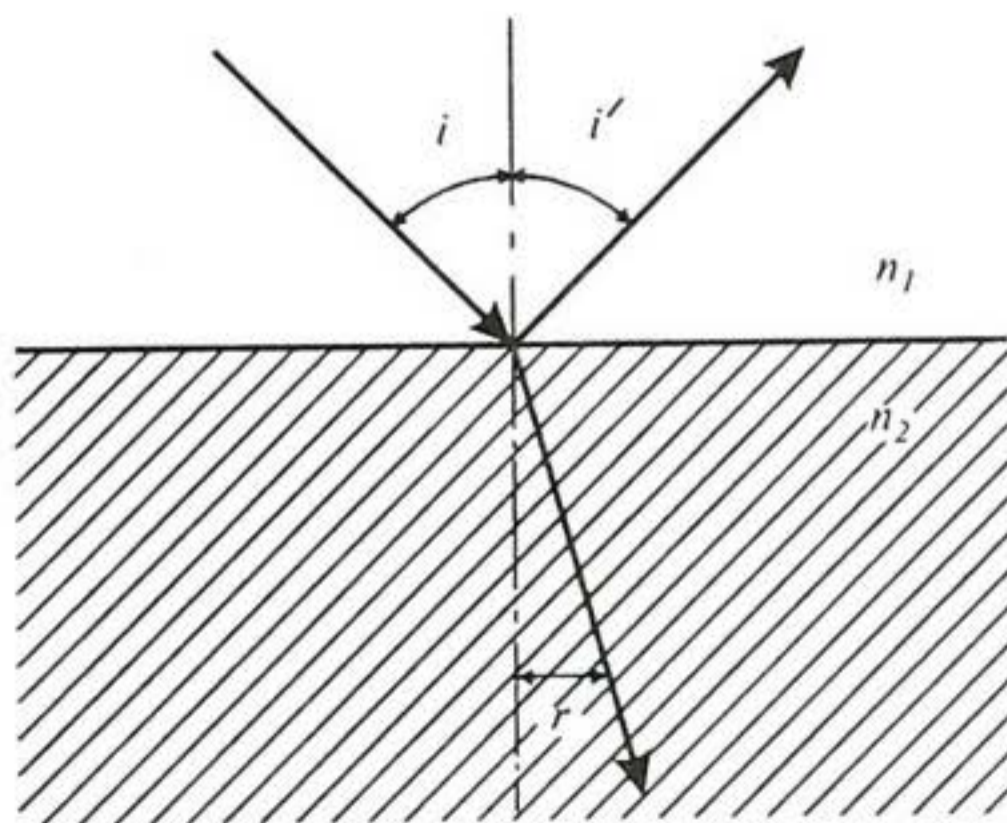


Рис. 27.1. Відбивання та заломлення світла на межі поділу двох середовищ

2. Закон незалежного поширення променів: окремі промені не впливають один на одного і поширюються незалежно;

3. Закони відбивання світла: падаючий промінь, відбитий промінь і перпендикуляр до межі поділу двох середовищ, проведений у точці падіння променя, лежать у одній площині; кут відбивання дорівнює куту падіння

$$i = i'. \quad (27.1)$$

4. Закони заломлення світла: падаючий промінь, заломлений промінь і перпендикуляр до межі поділу середовищ, проведений у точці падіння променя, лежать у одній площині; відношення синусів кутів падіння і заломлення є сталим і дорівнює відносному показнику заломлення даних середовищ

$$\sin i / \sin r = n_{21} \quad (27.2)$$

Абсолютним показником заломлення середовища називається величина  $n$ , що дорівнює відношенню швидкості  $c$  поширення світла у вакуумі до швидкості  $V$  в даному середовищі:

$$n = \frac{c}{V}. \quad (27.3)$$

Відносним показником заломлення  $n_{21}$  одного середовища відносно іншого називається відношення швидкостей світла в першому  $V_1$  та другому  $V_2$  середовищах:

$$n_{21} = \frac{V_1}{V_2}. \quad (27.4)$$

На основі останніх двох рівнянь можна записати:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (27.5)$$

### 27.2.2. Повне внутрішнє відбивання

Внутрішнє відбивання має місце, коли світловий промінь з більш густого середовища падає на межу поділу з менш густим середовищем (рис. 27.2). Залежно від кута падіння може відбуватися або відбивання та заломлення, або *повне відбивання*, коли все світло відбивається в те саме середовище, звідки воно поширювалось. Кут падіння  $i_{cp}$ , при якому починається повне відбивання, називається *граничним кутом повного відбивання*, що визначається з співвідношення:

$$\sin i_{cp} = \frac{1}{n}, \quad (27.6)$$

де  $n$  — відносний показник заломлення першого середовища (оптично більш густого) відносно другого.

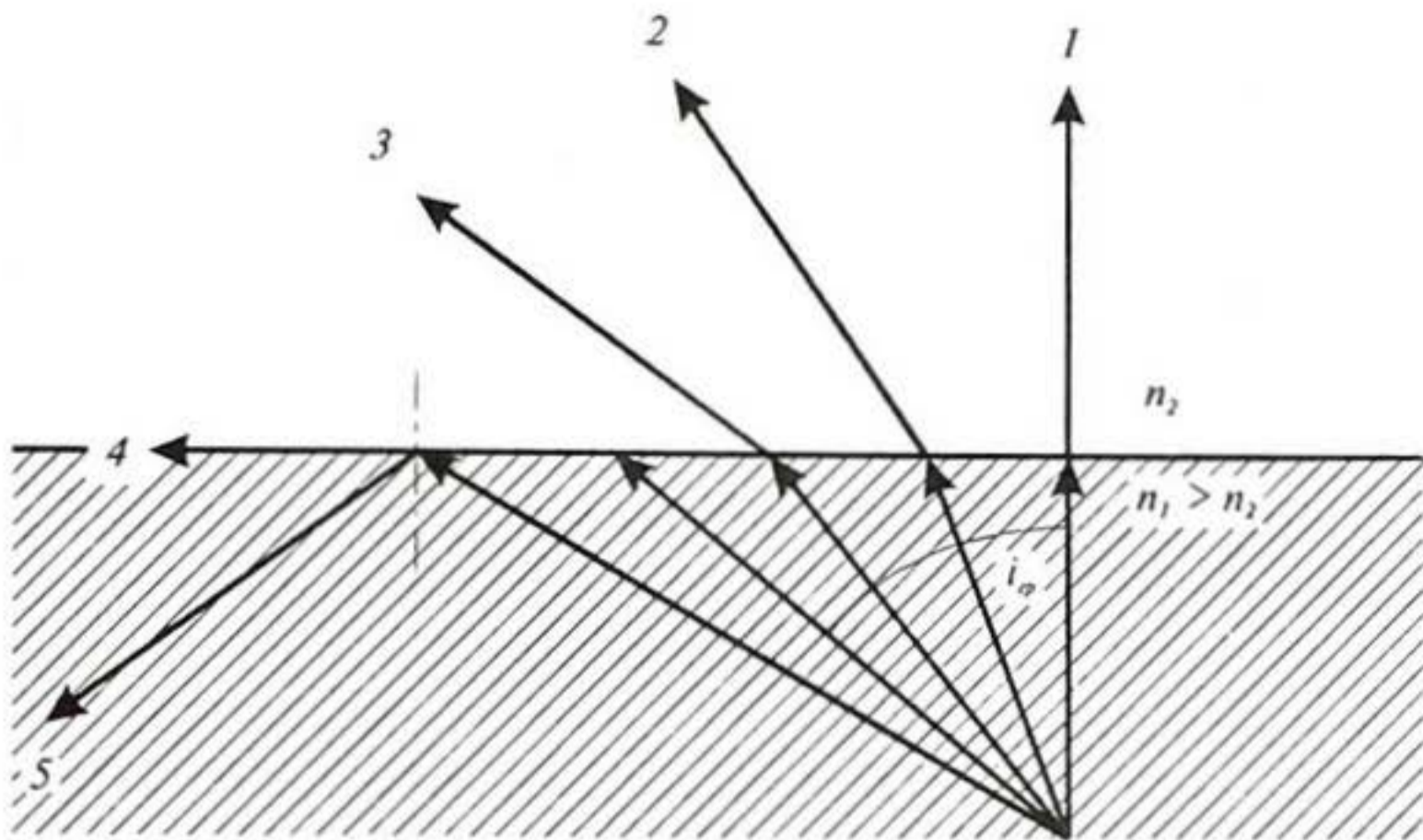


Рис. 27.2. Повне внутрішнє відбивання

Розглянемо приклади практичного застосування повного відбивання.

*Принципи дії світловода.* Тонкі прозорі нитки, виготовлені зі скла, кварцу або пластмаси, можуть бути використані для спрямованої передачі (каналізації) світла. Якщо серцевина такої нитки має показник заломлення більший, ніж показник заломлення зовнішньої оболонки, відбувається повне відбивання променів, що поширюються під кутами, достатньо малими відносно осі нитки (рис. 27.3). Така нитка називається *світловодом*.

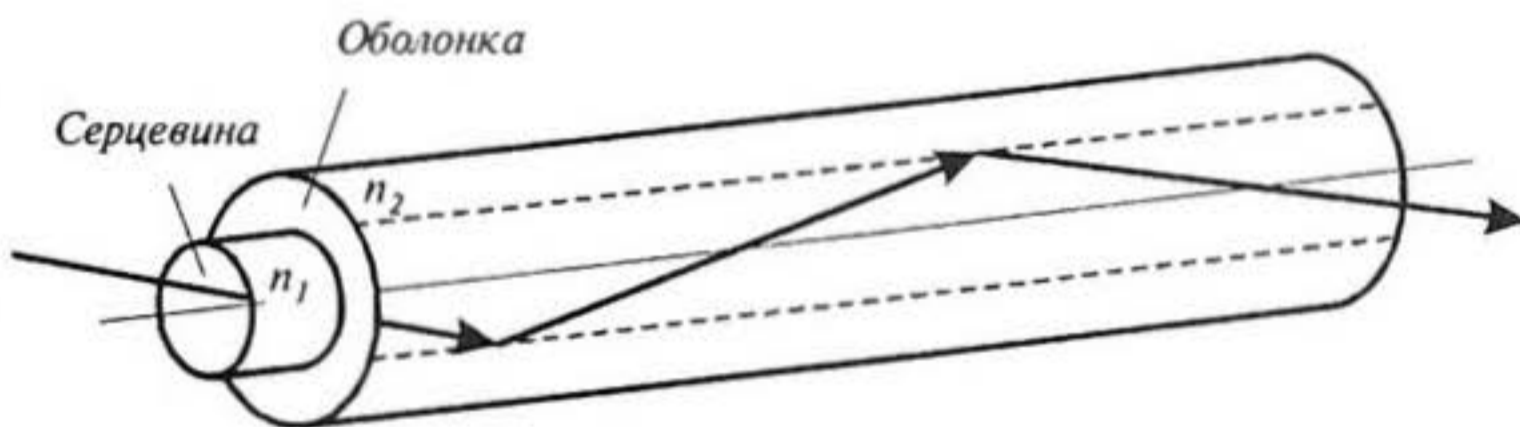


Рис. 27.3. Принцип дії світловода

Комбінація двох світловодів утворює *фіброскоп* — один світловід використовують для освітлення об'єкта, а інший для передачі зображення цього об'єкта (рис. 27.4).

*Збільшення числової апертури мікроскопа.* Важливою характеристикою мікроскопа є його роздільна здатність. Найменша лінійна (або кутова) відстань між двома точками, при якій їх зображення зливаються, називається *лінійною (або кутовою) межею розділення*, що обернено пропорційна апертурі мікроскопа.

Збільшити числову апертуру мікроскопа  $A = n \sin \theta / 2$  можна за збільшення показника заломлення  $n$  середовища між

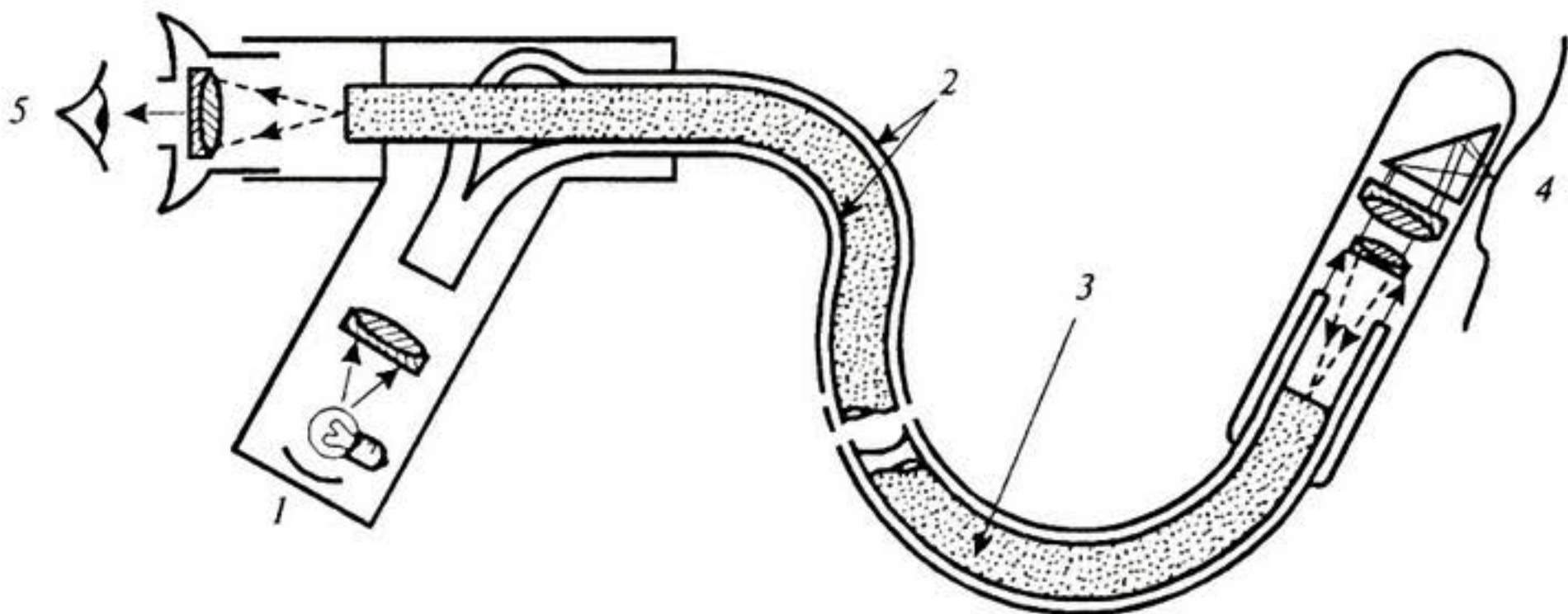


Рис. 27.4. Фіброскоп: 1 — джерело світла; 2 — зовнішній світловід, що забезпечує освітлення об'єкта; 3 — внутрішній світловід, призначений для передачі світлової інформації спостерігачу; 4 — об'єкт; 5 — око спостерігача

об'єктом і об'єктивом, або апертурного кута  $\theta$  (кута між крайніми променями конічного світлового пучка, що виходить із точки об'єкта і входить в об'єктив). Якщо апертурний кут дуже великий, крайні промені можуть не потрапити в об'єктив, що погіршує зображення об'єкта. Для запобігання цьому треба використовувати *імерсійні*

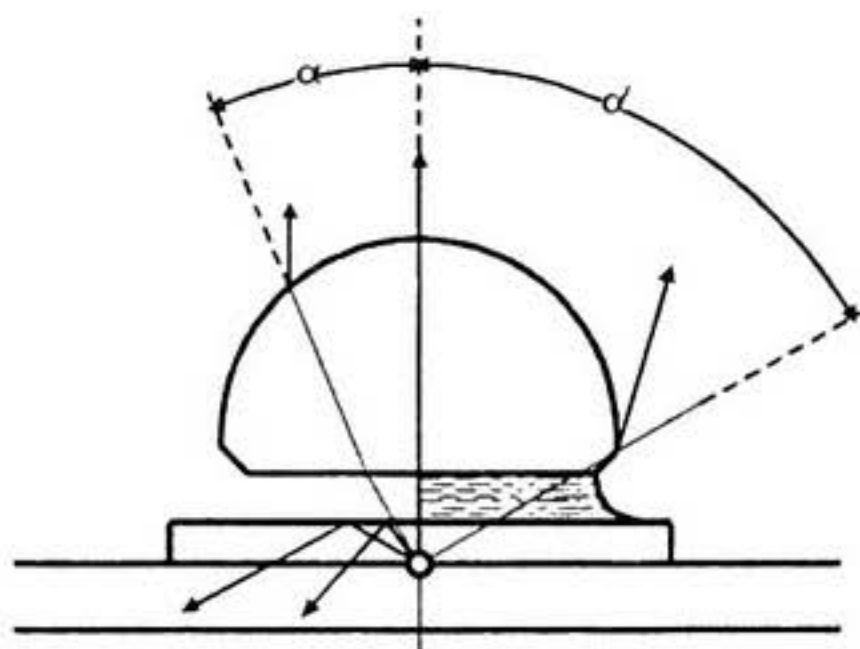


Рис. 27.5. Використання імерсійної рідини у мікроскопії

рідини, якими заповнюють проміжок простору між покривним склом і об'єктивом (рис. 27.5). Через те, що показник заломлення імерсійної рідини високий (наприклад, кедрова олія має  $n = 1,515$ ), апертура мікроскопа збільшується. Так, наприклад, для звичайного «сухого» об'єктива  $n = 1$ ;  $\theta/2 = 72^\circ$ ;  $A = 0,95$ , тоді як для об'єктива з імерсійною олією  $n = 1,515$ ;  $\theta/2 = 67,5^\circ$ ;  $A = 1,40$ .

## 27.3. ХВИЛЬОВА ОПТИКА

### 27.3.1. Світло як електромагнітна хвиля

*Хвильова оптика* вивчає сукупність явищ, у яких виявляється хвильова природа світла. Згідно з уявленнями хвильової оптики, що ґрунтуються на результатах великої кількості експериментальних досліджень інтерференції, дифракції, поляризації та дисперсії, світло являє собою електромагнітну хвилю. Така хвиля поширюється у про-

сторі у вигляді взаємозв'язаних коливань електричних і магнітних полів, вектори напруженості яких  $\vec{E}$  і  $\vec{H}$  завжди перпендикулярні один до одного і до напрямку поширення хвилі (рис. 27.6). Тобто, світло — це є *поперечна електромагнітна хвиля*. Швидкість поширення світла у вакуумі становить  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  (точне значення  $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

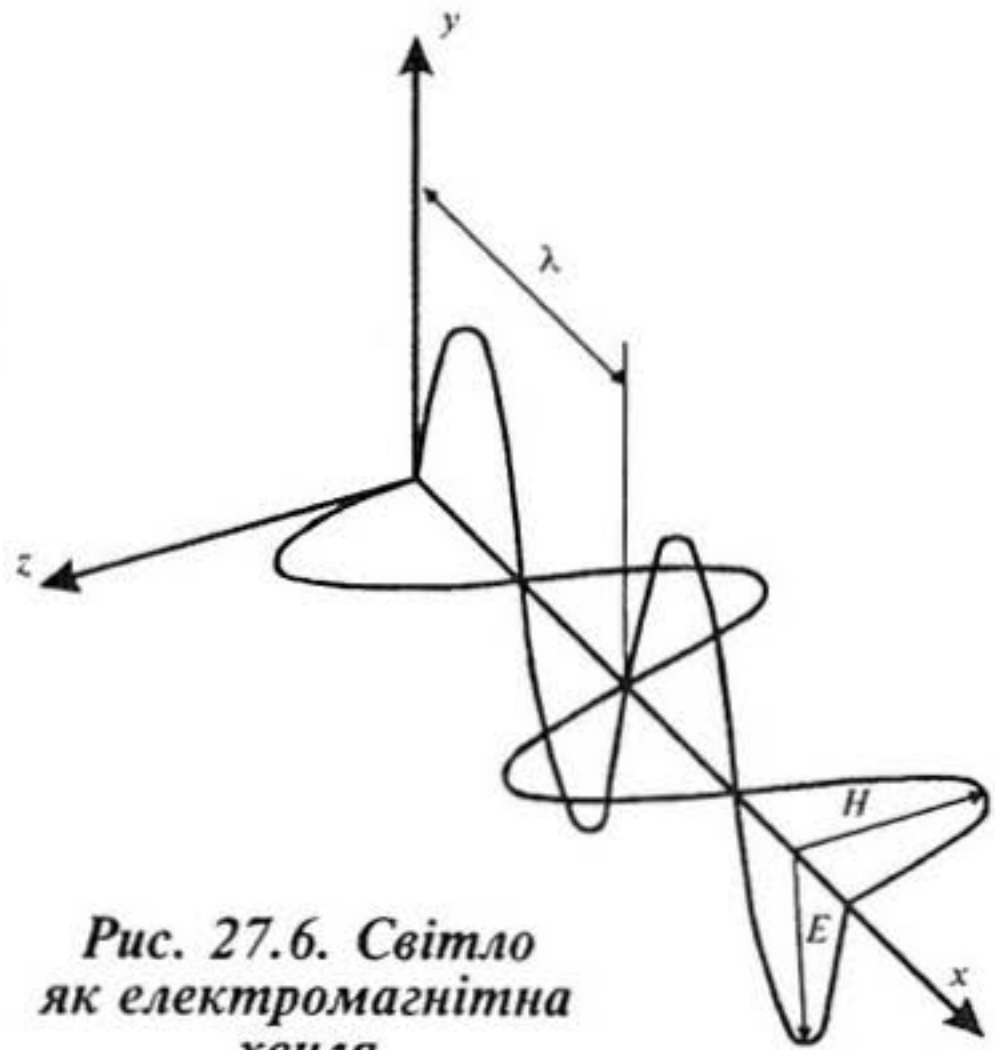


Рис. 27.6. Світло як електромагнітна хвиля

### 27.3.2. Інтерференція світла

*Інтерференція світла* — це просторовий перерозподіл енергії світлового випромінювання при накладанні двох або кількох світлових хвиль.

Необхідною умовою інтерференції світлових хвиль є їх *когерентність* — узгоджений перебіг у часі і просторі кількох хвильових процесів. Хвилі, які мають однакові довжини (такі хвилі називають *монохроматичними*) і стали різницю фаз у будь якій точці простору, є *когерентними*. Типову інтерференційну картину наведено на рис. 27.7.

*Дослід Юнга.* У 1801 р. Томас Юнг уперше спостерігав явище інтерференції за допомогою такого досліду (рис. 27.8): джерелом світла є яскраво освітлена щілина  $S_0$ , від якої світлова хвиля падає на дві вузькі рівновіддалені щілини  $S_1$  і  $S_2$ , які відіграють роль джерел когерентних коливань. На екрані спостерігають інтерференційну картину. Видно, що промені про-

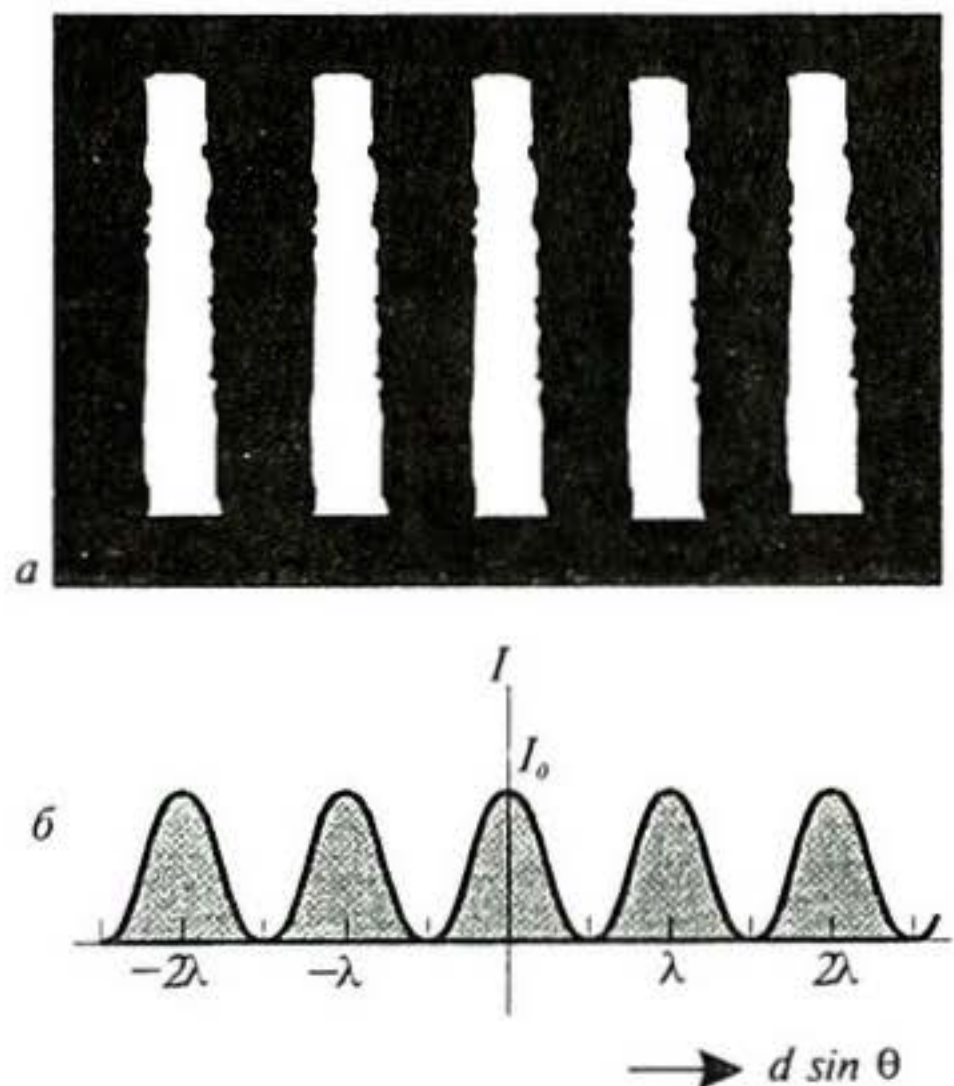


Рис. 27.7. Інтерференція світла: а — інтерференційна картина; б — розподіл інтенсивності світла під час інтерференції (пояснення в тексті)

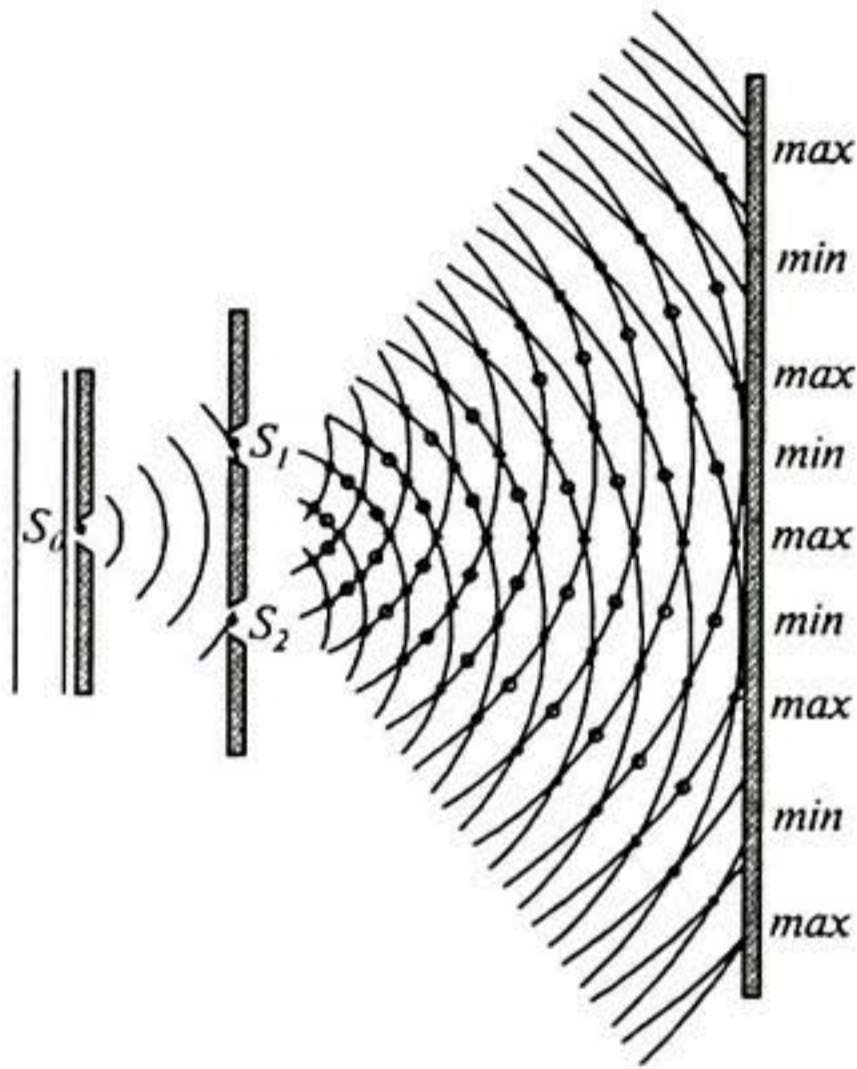


Рис. 27.8. Дослід Юнга

ходять до певної точки на екрані неоднакові шляхи, різниця між якими дорівнює:

$$\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta, \quad (27.7)$$

де  $d$  — відстань між щілинами,  $\theta$  — кут, під яким спостерігається інтерференція в точці  $P$ .

Умовою спостереження підсилення світла за інтерференції (максимуму інтерференції) є співвідношення:

$$\delta = d \sin \theta = m \lambda, \quad (m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots) \quad (27.8)$$

де  $m$  — число (порядок інтерференційної смуги).

Умовою спостереження послаблення світла завдяки інтерференції (мінімуму інтерференції) є співвідношення:

$$\delta = d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda. \quad (m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots) \quad (27.9)$$

**Принцип Гюйгенса.** Кожний елемент поверхні, якого досягла в даний момент хвиля, є центром елементарних хвиль, огинаюча яких буде хвильовою поверхнею в наступний момент часу (рис. 27.9).

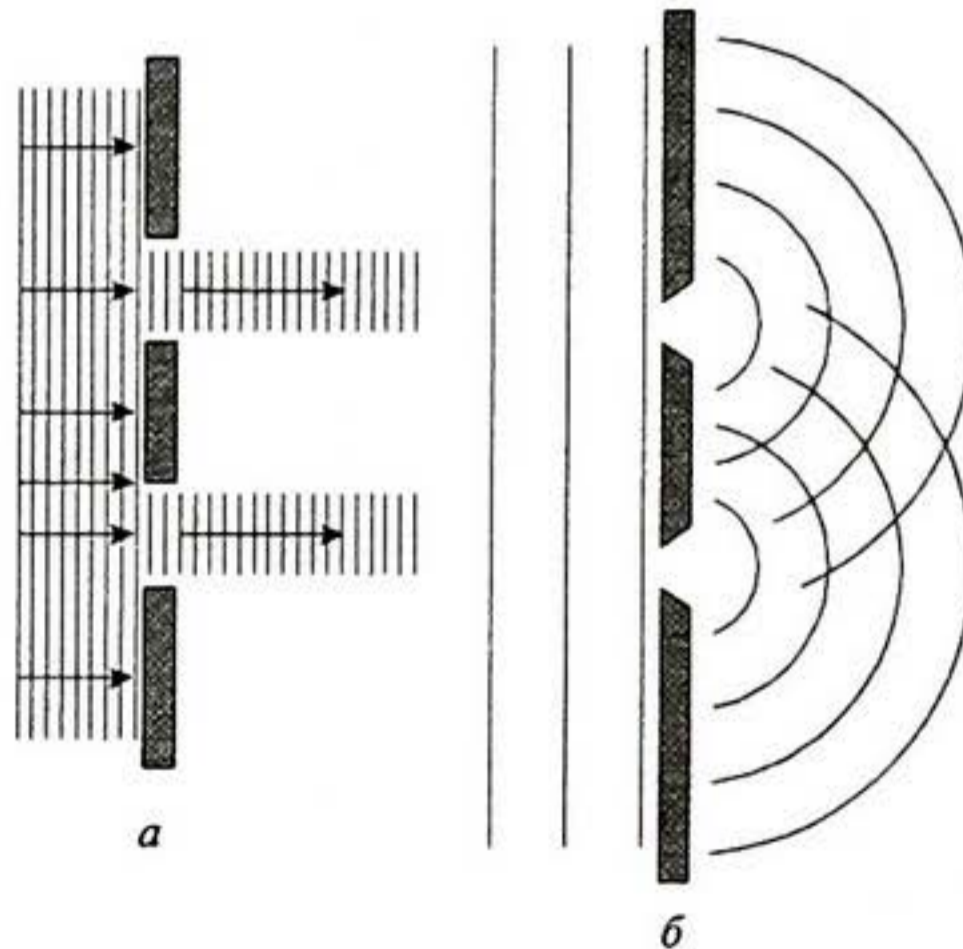


Рис. 27.9. Принцип Гюйгенса (пояснення в тексті)

### 27.3.3. Методи спостереження інтерференції світла

В основі всіх методів спостереження інтерференції світла лежать заходи, що дають змогу розділити первинний світловий промінь на два вторинних з подальшим їх накладанням. Оскільки обидва вторинних промені походять від первинного, вони є когерентними і інтерферують при накладанні.

**Дзеркала Френеля.** Світло від точкового джерела  $S$  падає на систему двох дзеркал, кут між площинами яких малий (рис. 27.10). Після відбивання від дзеркал світло поширюється у вигляді двох променів, які можна вважати вихідними із двох уявних джерел  $S_1$  і  $S_2$ , які є зображеннями джерела  $S$  в дзеркалах. Ці промені когерентні; при накладанні вони дають на екрані інтерференційну картину.

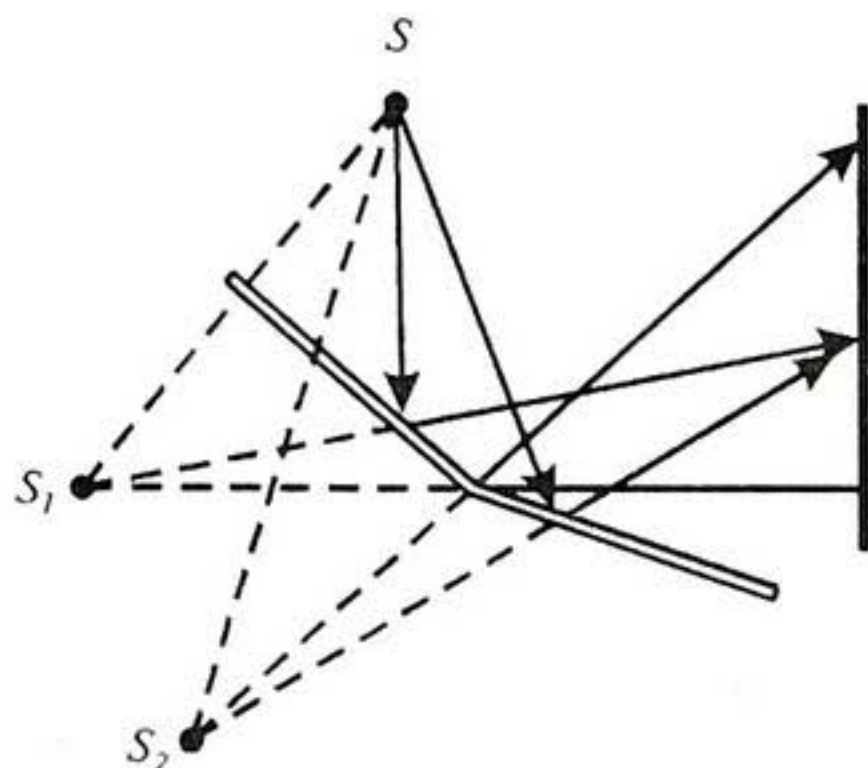


Рис. 27.10. Дзеркала Френеля

**Біпризма Френеля.** Після заломлення світлового променя від джерела  $S$  в біпризмі (системі двох однакових призм, складених основами і виготовленими як одне ціле) утворюються світлові промені, які начебто виходять з уявних джерел  $S_1$  і  $S_2$ ; ці промені є когерентними і інтерферують при накладанні (рис. 27.11).

**Інтерференція світла в тонких плівках.** Нехай на плоскопаралельну плівку товщиною  $d$  і з показником заломлення  $n$  падає під кутом  $i$  плоска монохроматична хвиля (рис. 27.12). Під час взаємодії світлового променя з плівкою відбувається відбивання світла від верхньої поверхні плівки (промінь 1), заломлення (промінь 2)

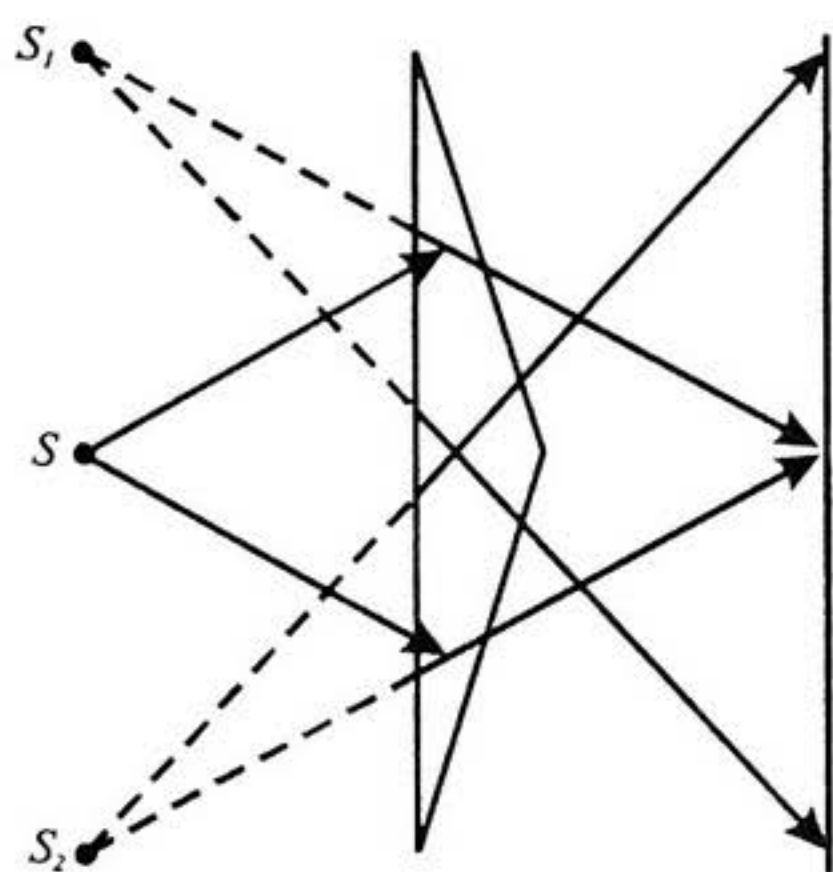


Рис. 27.11. Біпризма Френеля

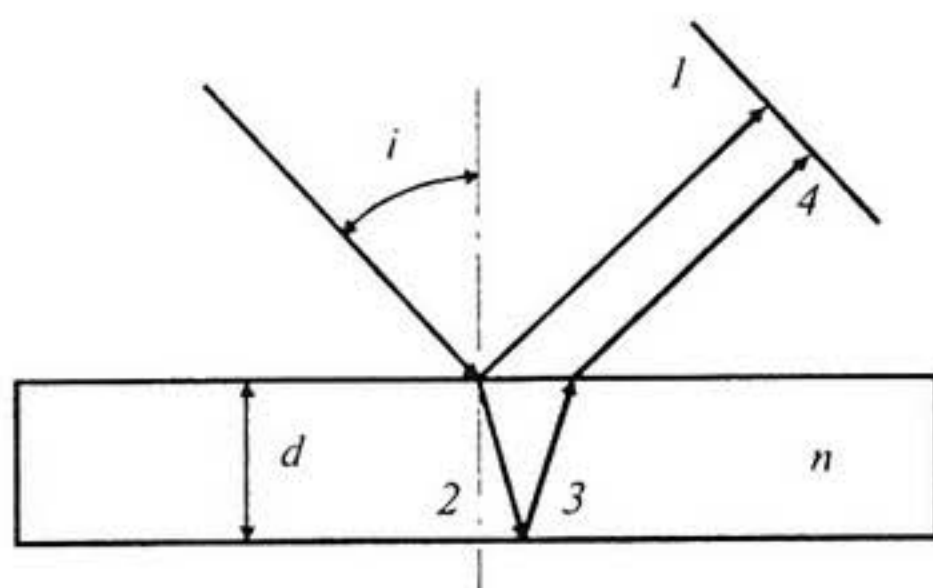
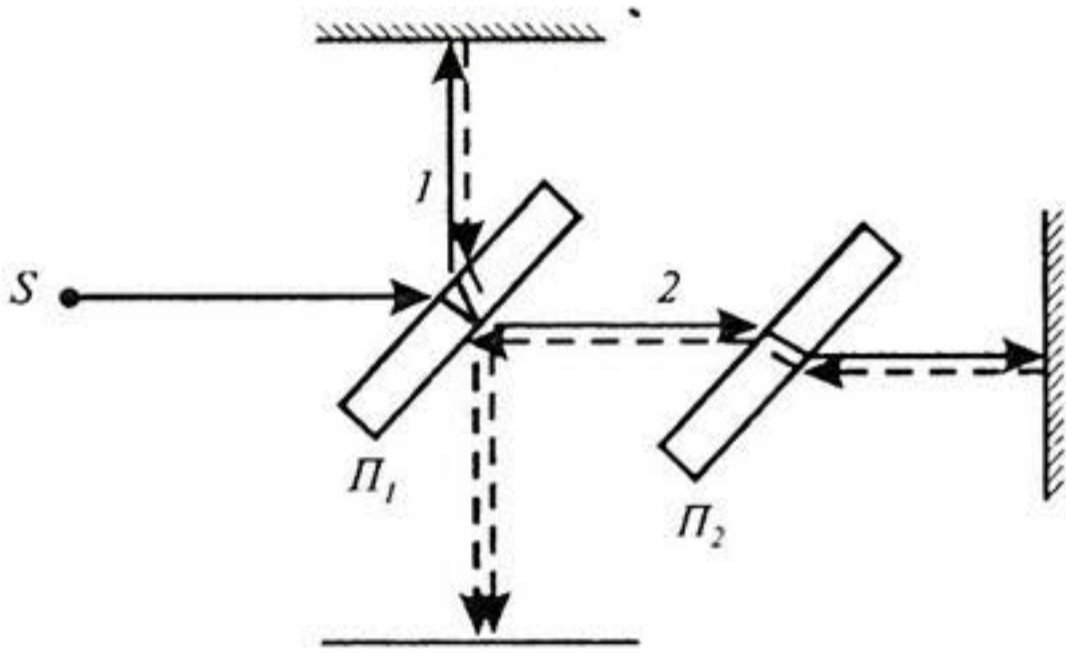


Рис. 27.12. Інтерференція світла в тонких плівках



та відбивання від нижньої поверхні плівки (промінь 3) з подальшим заломленням (промінь 4). Промені 1 і 4 є когерентними і інтерферують при накладанні.

**Інтерферометр Майкельсона.** Цей прилад призначений для точного (порядку  $10^{-7}$  м) вимірювання довжин тіл. Монохроматичне світло від джерела  $S$  падає під кутом  $45^\circ$  на напівпрозору плоскопаралельну пластину  $\Pi_1$ , яка ділить світловий промінь на два. Один з них проходить через пластину, інший — відбивається. Після відби-



вання обох променів від дзеркал вони повертаються і взаємодіють між собою як когерентні (рис. 27.13). Оскільки промінь 1 проходить через пластинку двічі, для компенсації різниці ходу на шляху другого променя 2 розташовують пластину  $\Pi_2$  (яка виконує функції компенсатора).

Рис. 27.13. Інтерферометр Майкельсона

### 27.3.4. Дифракція світла

**Дифракція світла** — явище огинання променями світла контура непрозорих тіл і проникнення світла в область геометричної тіні.

Дифракція відбувається, коли світло проходить через маленькі отвори, навколо невеличких перешкод або біля різких меж (рис. 27.14). Перша кількісна теорія дифракції світла була розвине-на Френелем, який пояснив її як результат інтерференції вторинних хвиль (так званий *принцип Гюйгенса-Френеля*). Розрізняють *дифракцію Фраунгофера* в паралельних променях світла (рис. 27.15,а) та *дифракцію Френеля* в непаралельних променях (рис. 27.15,б). Обид-

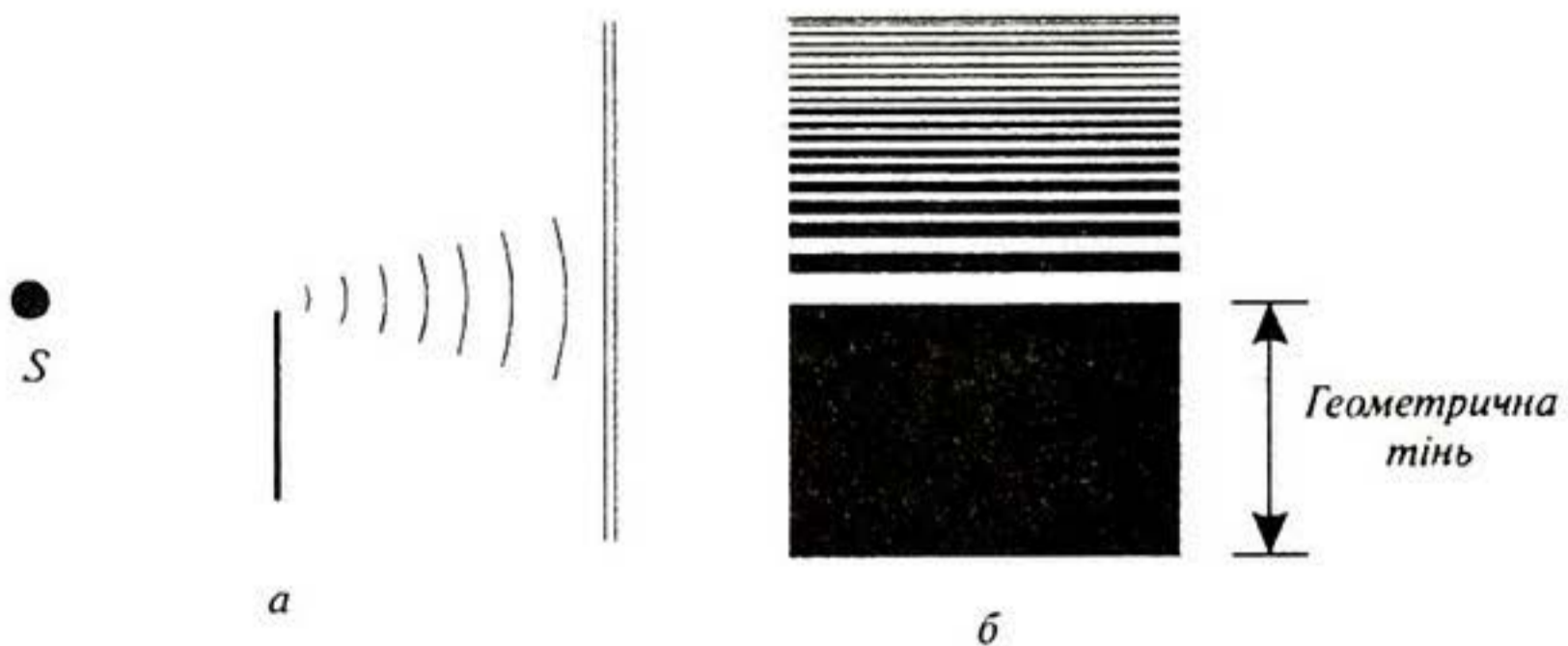


Рис. 27.14. Дифракція світла : а — проходження світла біля різких меж, що супроводжується дифракцією; б — дифракційна картина

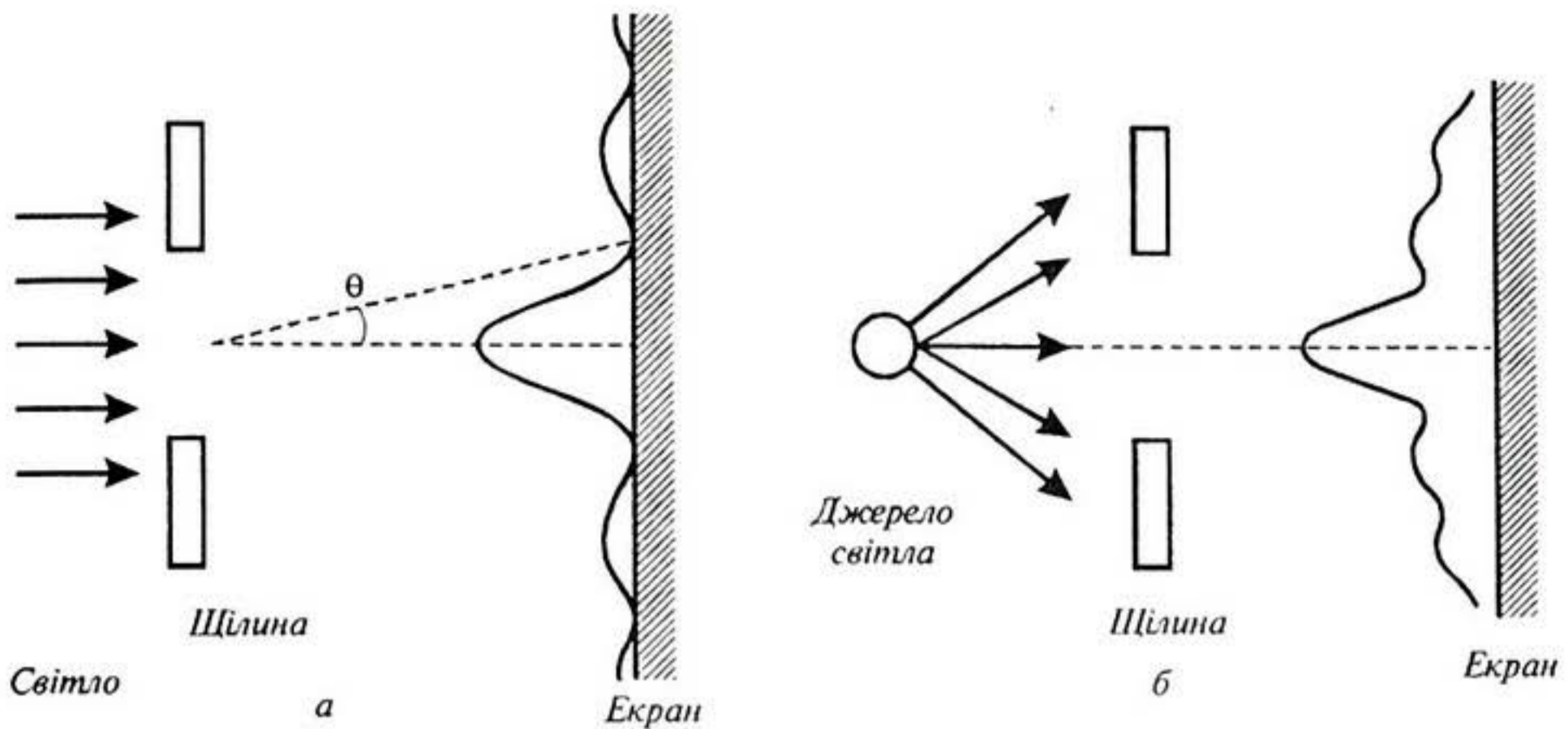


Рис. 27.15. а) Дифракція Фраунгофера паралельного пучка світла на щілині; б) дифракція Френеля світлового пучка, що розходить, на щілині (б)

ва типи дифракції різняться характером дифракційної картини, розподілом світла, пов'язаним з чергуванням світлових і темних областей на екрані.

Розглянемо паралельний промінь, що падає нормально на щілину шириною  $b$ . Відповідно до принципу Гюйгенса, кожна точка щілини є вторинним джерелом хвиль, які коливаються в одній фазі. Розглянемо хвилі 1 і 2 (рис. 27.16). Якщо вони перебувають у в протифазі, то компенсують одна одну і на екрані спостерігається мінімум дифракції. Такі міркування можна застосувати до хвиль 1' і 2' та до всіх пар хвиль, фази яких протилежні. Умова дифракційного мінімуму матиме вигляд:

$$b \sin \theta = m \lambda; m = \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots, \quad (27.10)$$

де  $\theta$  — кут спостереження дифракційного мінімуму  $m$ -го порядку.

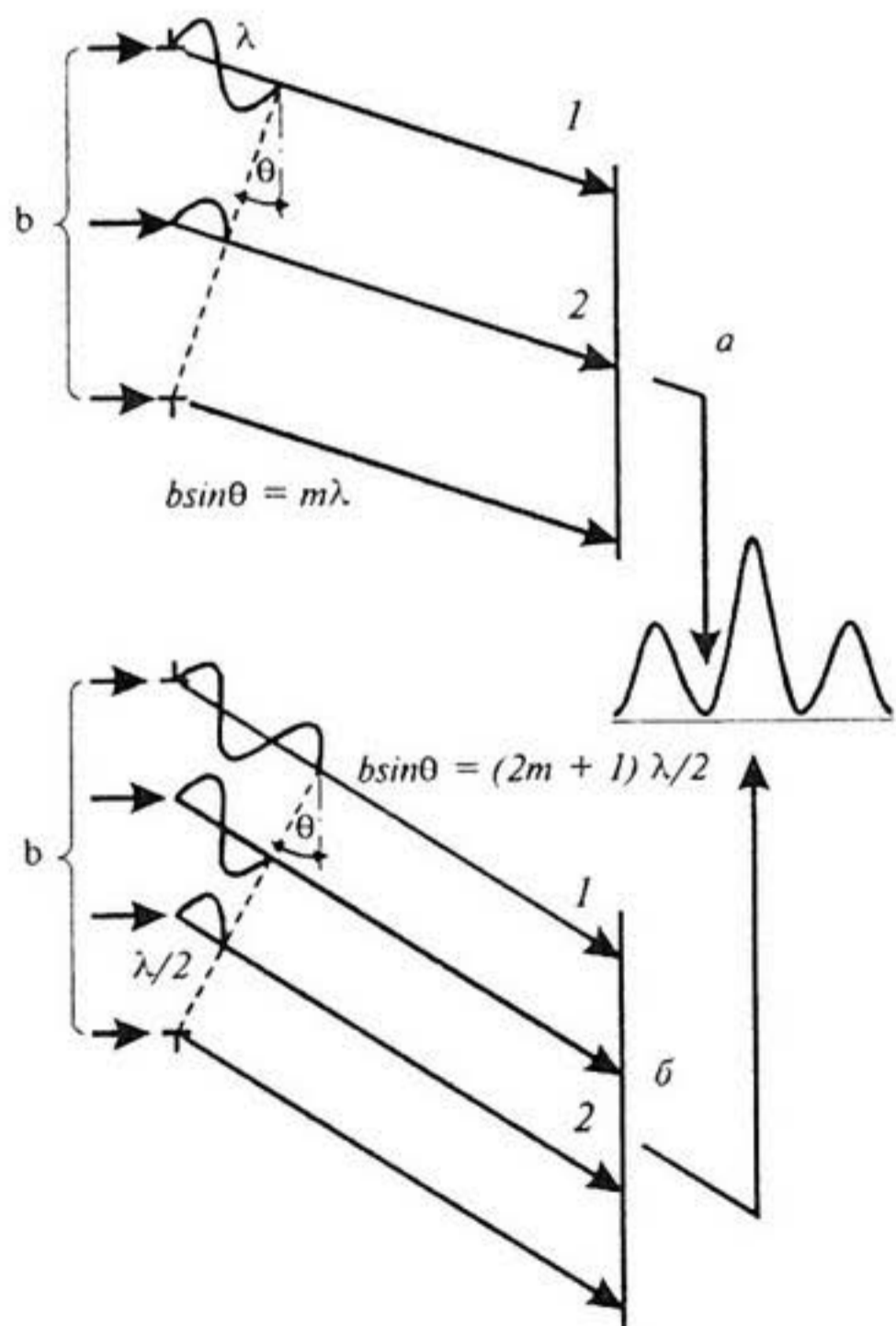


Рис. 27.16. Механізми дифракції: умови дифракційних мінімумів (а) та максимумів (б)

Якщо хвилі 1 і 2 коливаються в фазі, на екрані спостерігається дифракційний максимум, умовою якого є:

$$b \sin \theta = (2m + 1) \lambda / 2; m = \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots \quad (27.11)$$

Вимірювання відстані між дифракційними мінімумами або максимумами дає можливість оцінити розміри тіл, на яких дифрагує світло.

### 27.3.5. Дифракційна решітка

Дифракційна решітка — це оптичний прилад, що являє собою періодичну структуру з великою кількістю регулярно розміщених елементів, на яких відбувається дифракція світла. Такими елементами можуть бути штрихи, нанесені механічним, фотографічним або голографічним методом на пласку або ввігнуту пластину. Кількість штрихів на міліметр коливається від 300 до 2800 для видимої та ультрафіолетової областей спектра.

Найпростіша дифракційна решітка являє собою систему з  $N$  однакових за шириною і паралельних одна одній щілин, що лежать в

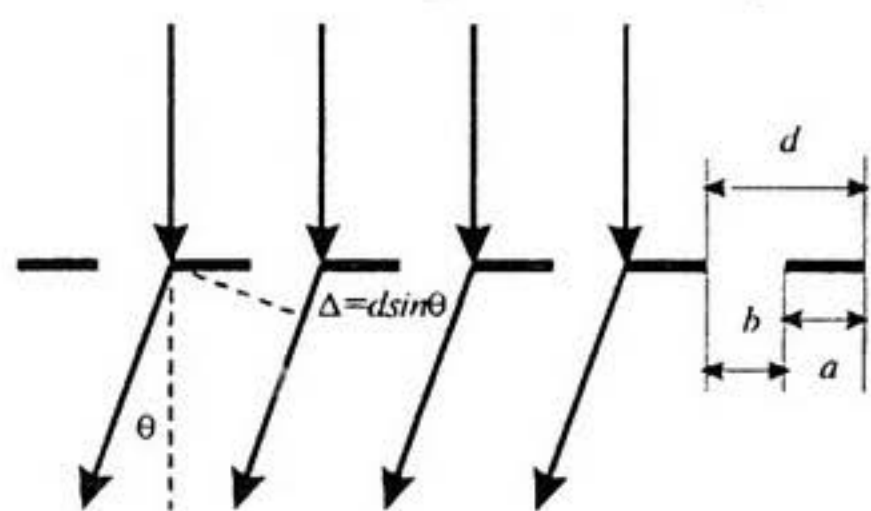


Рис. 27.17. Дифракційна решітка

одній площині і розділені непрозорими проміжками, однаковими за розмірами (рис. 27.17). Якщо ширина щілини  $b$ , а розмір проміжку  $a$ , то величина  $d = a + b$  називається *періодом* дифракційної решітки. Період  $d$  пов'язаний з кількістю  $N$  штрихів співвідношенням:

$$d = 1/N. \quad (27.12)$$

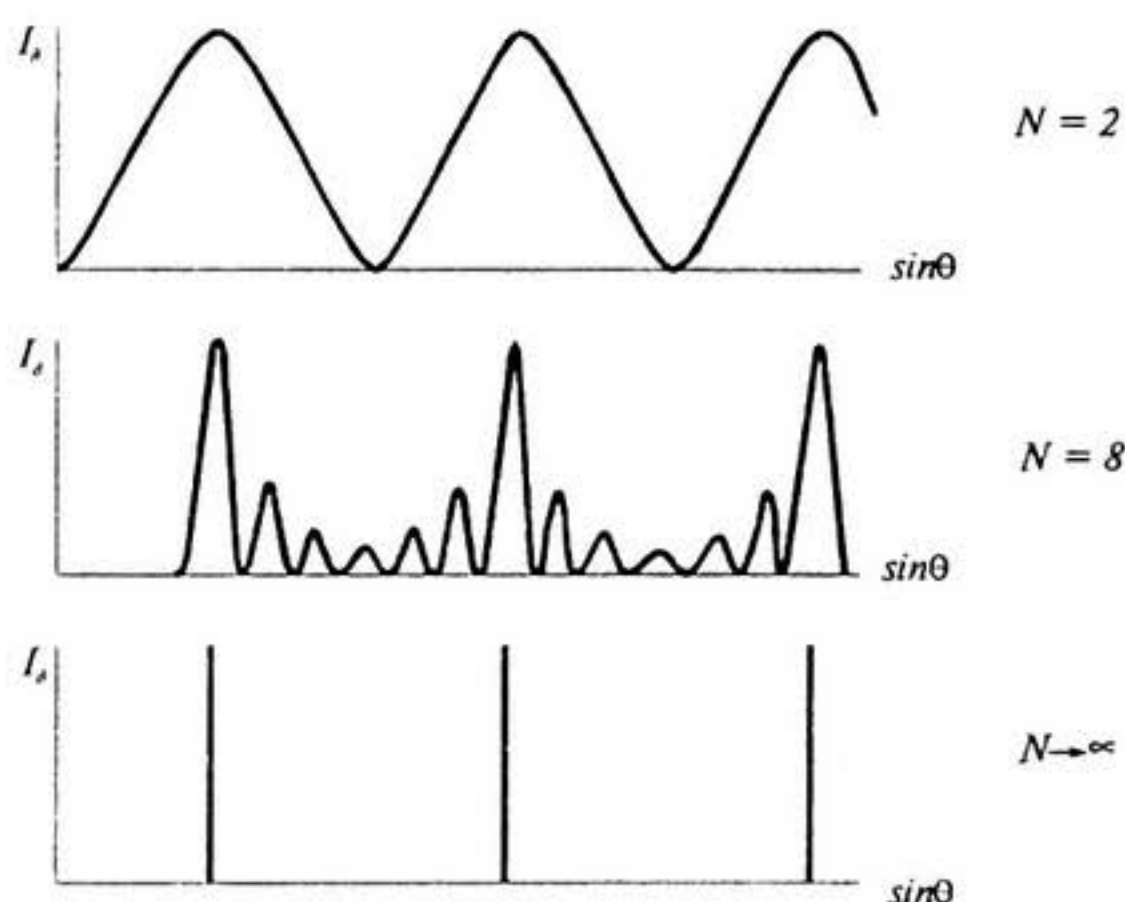


Рис. 27.18. Залежність характеру дифракційної картини від кількості штрихів  $N$

Якщо світло падає нормально на поверхню дифракційної решітки, то положення дифракційних максимумів на екрані можна знайти за допомогою рівняння дифракційної решітки:

$$d \sin \theta = m \lambda, \quad (27.13)$$

де  $\theta$  — кут спостереження дифракційного максимуму  $m$ -го порядку.

Якщо світло падає під кутом  $\theta_i$  до площини дифракційної решітки, рівняння має вигляд:

$$d(\sin \theta + \sin \theta_i) = m \lambda. \quad (27.14)$$

Характер дифракційної картини, отриманої за допомогою дифракційної решітки, наведено на рис. 27.18.

### 27.3.6. Дисперсія світла

*Дисперсія світла* — це залежність показника заломлення  $n$  речовини від частоти  $\nu$  (довжини хвилі  $\lambda$ ) світла. На рис. 27.19 наведено, як змінюється показник заломлення різних оптичних матеріалів зі зміною довжини хвилі. Якщо показник заломлення зменшується зі збільшенням довжини хвилі, такий характер залежності  $n(\lambda)$  називається *нормальною дисперсією*; в протилежному випадку дисперсія називається *аномальною*.

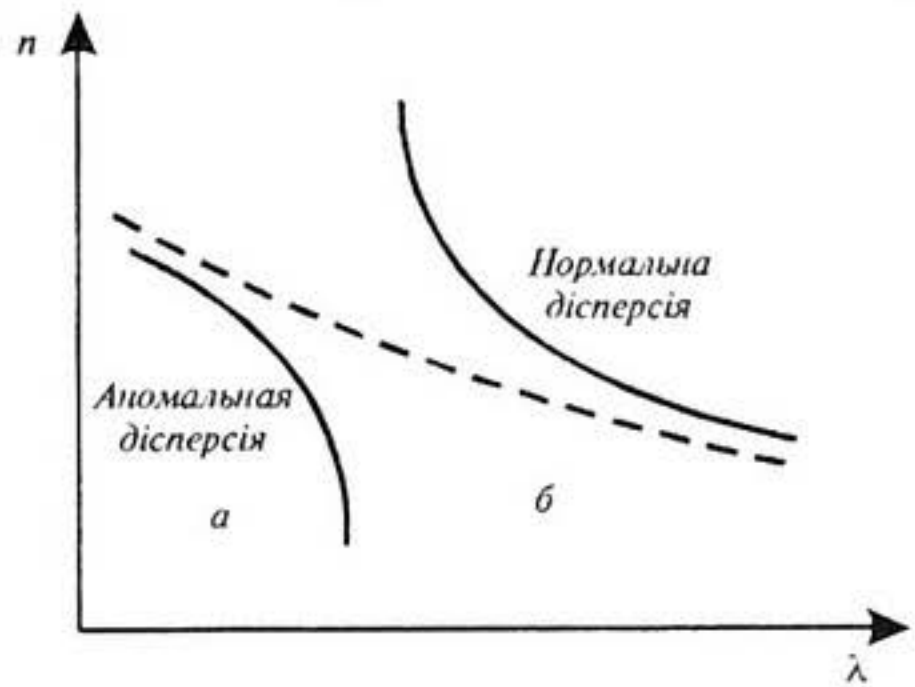


Рис. 27.19. Залежність показника заломлення від довжини світлової хвилі: а — аномальна дисперсія; б — нормальна дисперсія

Якщо пропустити біле світло крізь скляну призму, то в результаті дисперсії відбувається розкладання світла в спектр (який називається *дисперсійним*), причому

фіолетовий промінь заломлюється сильніше, ніж червоний (рис. 27.20). Величина, що показує, як швидко змінюється показник заломлення з довжиною хвилі, називається *дисперсією речовини*:

$$D = dn/d\lambda. \quad (27.15)$$

На використанні явища нормальної дисперсії ґрунтується дія призматичних спектральних приладів.

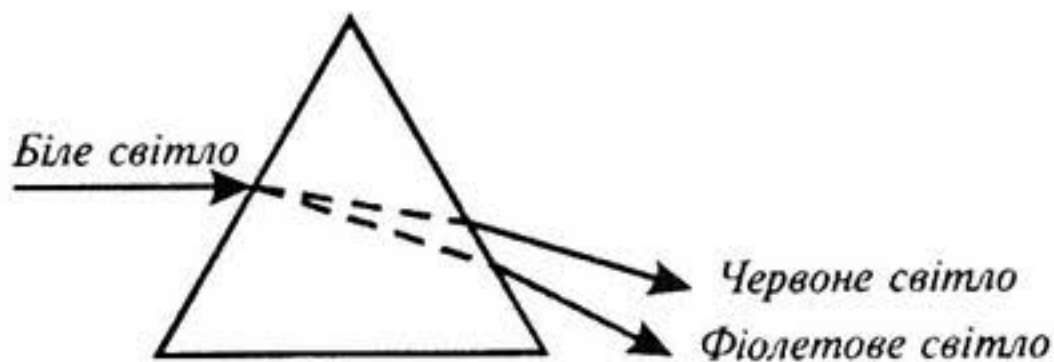


Рис. 27.20. Розкладання світла в спектр за проходження крізь призму

### 27.3.7. Поляризація світла

Поляризація світла — явище впорядкування напрямку коливання вектора  $\vec{E}$  напруженості електричного поля світлової хвилі. Таким чином, поляризація світла описує поперечну анізотропію світлових хвиль, тобто неоднаковість різних напрямків у площині, перпендикулярній світловому променю.

Для опису стану поляризації світла (що являє собою електромагнітну хвилю) достатньо аналізувати поведінку одного з векторів  $\vec{E}$  і  $\vec{H}$  — звичайно вибирають вектор  $\vec{E}$ .

Будь-яке джерело світла складається з великої кількості елементарних випромінювачів (атомів, молекул); площини коливань вектора  $\vec{E}$  в цілому характеризуються хаотичним розподілом. Світло, що випромінюється таким джерелом, називається *неполяризованим* (рис. 27.21,а).

Якщо вектор  $\vec{E}$  коливається в одній площині, світло називається *лінійно поляризованим* (рис. 27.21,б).

Якщо вектор  $\vec{E}$  коливається в одній площині, але ця площина обертається так, що кінець вектора  $\vec{E}$  описує коло, таке світло називається *циркулярно поляризованим* (рис. 27.21,в).

Проміжний випадок (між лінійною та циркулярною поляризацією), коли кінець вектора  $\vec{E}$  описує еліпс, відповідає *еліптично поляризованому* світлу (рис. 27.21,г).

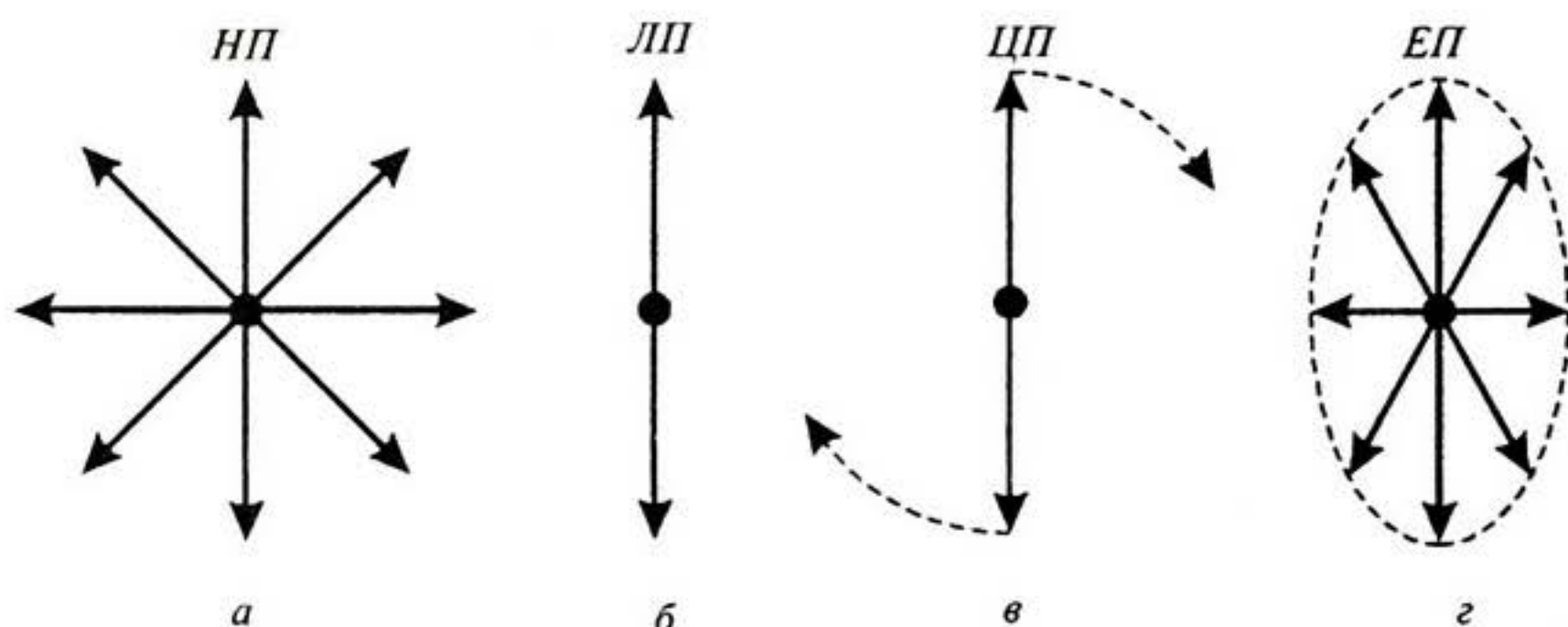


Рис. 27.21. Поляризація світла: а — неполяризоване світло (НП); б — лінійно поляризоване світло (ЛП); в — циркулярно поляризоване світло (ЦП); г — еліптично поляризоване світло (ЕП)

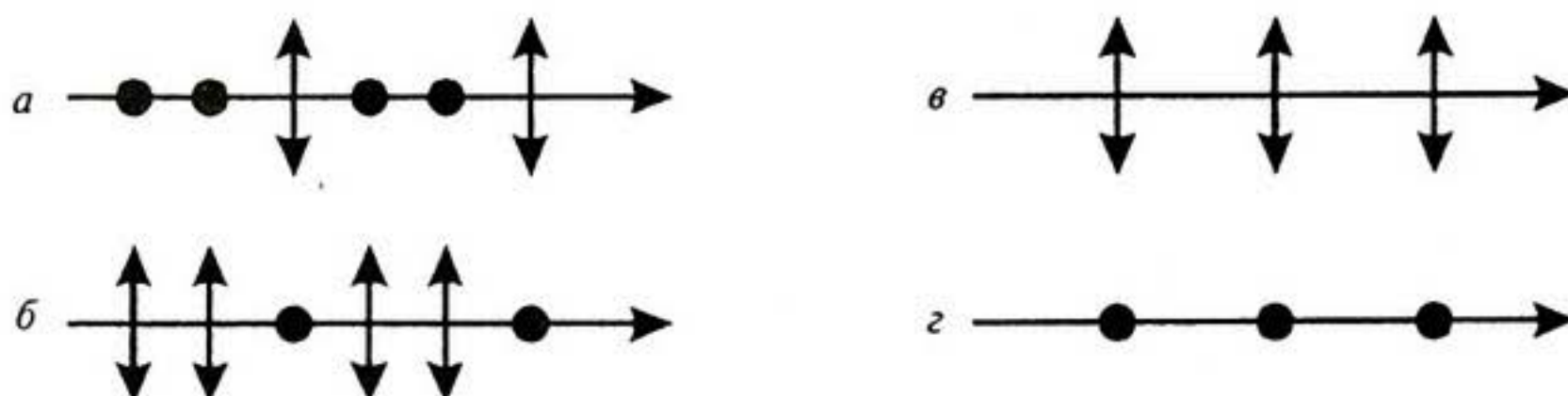


Рис. 27.22. Схематичне зображення типів поляризації: а, б — частково поляризоване світло; в і г — лінійно поляризоване світло (ЛП)

Умовно неполяризоване світло зображується як сукупність векторів  $\vec{E}$ , що коливаються в площі аркуша та перпендикулярно їй (рис. 27.22,а,б), а поляризоване світло — як сукупність векторів  $\vec{E}$ , що коливаються або в площі аркуша, або перпендикулярно їй (рис. 27.22,в,г).

### 27.3.8. Методи отримання поляризованого світла

1. *Поляризація світла при відбиванні від межі поділу двох середовищ.* Якщо поляризоване світло падає на межу поділу двох середовищ під кутом Брюстера (що визначається із співвідношення  $\text{tg } i_{\text{Бр}} = n_{21}$ , де  $n_{21}$  — показник заломлення другого середовища відносно першого), то відбитий промінь буде повністю поляризованим, а заломлений — частково поляризованим (рис. 27.23). Характерно, що в цій ситуації відбитий та заломлений промені взаємно перпендикулярні.

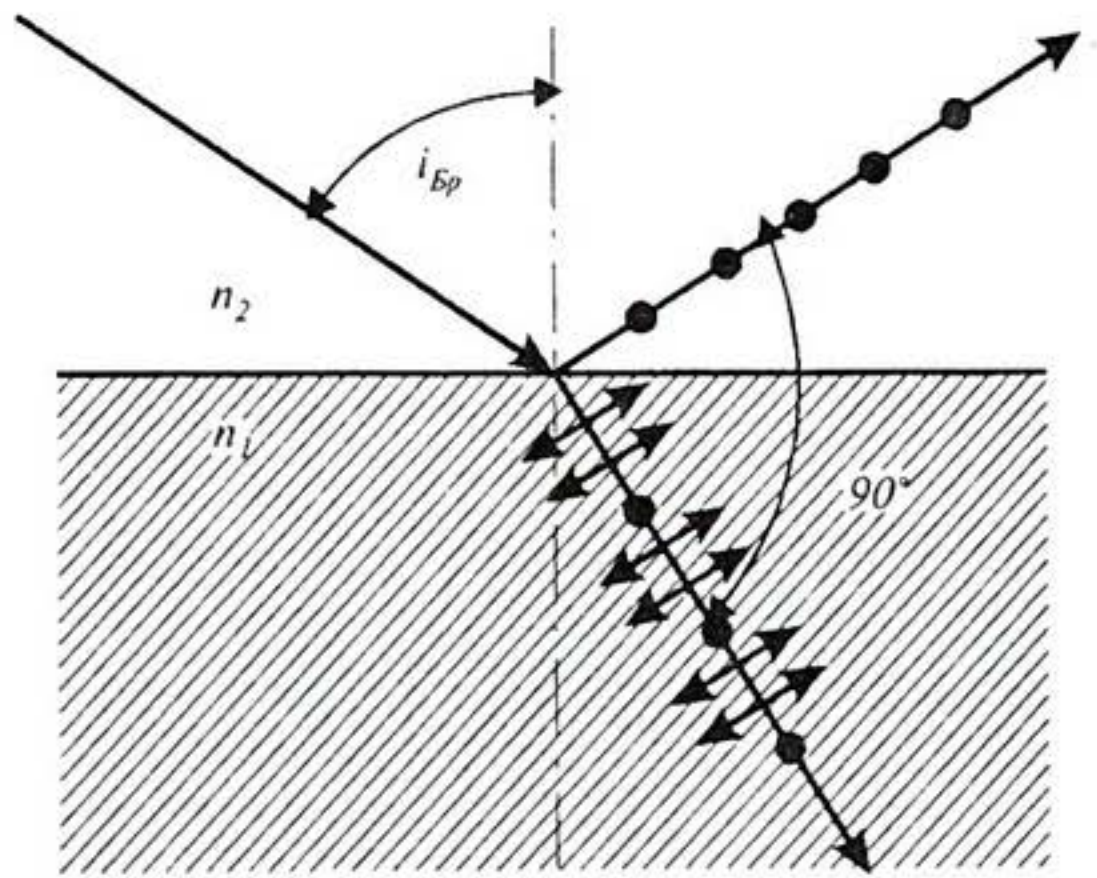


Рис. 27.23. Поляризація світла при відбиванні від межі поділу двох середовищ

2. *Анізотропія поглинання (оптичний дихроїзм).* Деякі кристали (турмалін, герпатит) характеризуються анізотропією поглинання — рівень поглинання залежить від орієнтації вектора  $\vec{E}$  світлової хвилі. Це явище називається оптичним дихроїзмом. Неполяризоване світло при проходженні крізь дихроїчний кристал позбавляється однієї компоненти і виходить з кристалу лінійно поляризованим (рис. 27.24).

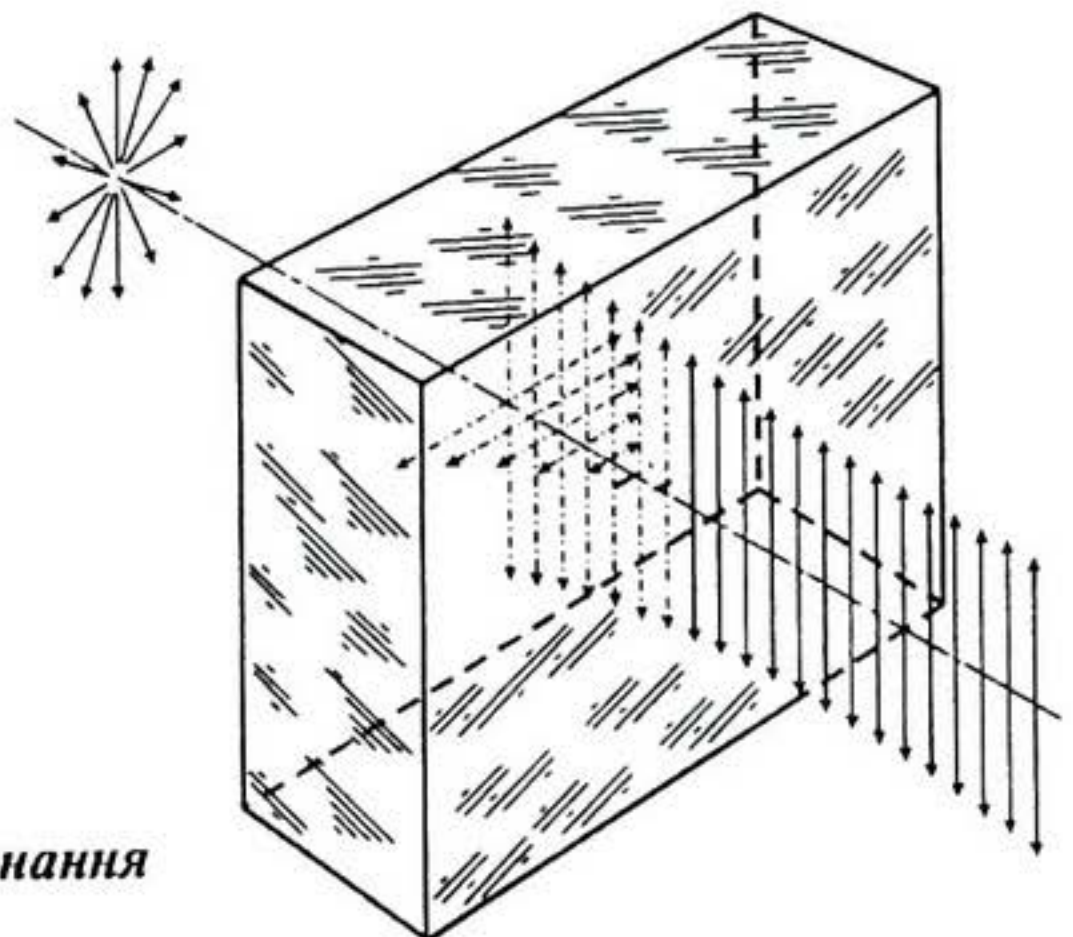


Рис. 27.24. Анізотропія поглинання (оптичний дихроїзм)

3. *Анізотропія заломлення (подвійне променезаломлення).* Якщо світло поширюється крізь скло, швидкість його залишається однакою для всіх напрямків. В той же час певні кристали (кальцит, кварц) характеризуються анізотропією заломлення — світлові промені, вектор  $E$  яких коливається в різних площинах, заломлюються під різними кутами. Навіть якщо неполяризоване світло падає на такий кристал нормально, світловий промінь ділиться на два — один з них продовжує траєкторію падаючого променя (*звичайний промінь*), а інший відхиляється (*незвичайний промінь*). Обидва ці промені поляризовані в різних площинах.

Якщо побудувати з такого кристалу (наприклад, з ісландського шпату — різновиду кальциту) систему із двох призм, розділених прошарком з канадського бальзаму (така система називається *призмою Ніколя*), то неполяризоване світло розділяється на звичайний ( $n_o = 1,658$ ) і незвичайний ( $n_e = 1,486$ ) промені (рис. 27.25). Неважко зрозуміти, що оскільки показник канадського бальзаму становить  $n = 1,55$ , звичайний промінь зазнає повного внутрішнього відбиття ( $n_o \gg n$ ). Таким чином, обидва промені, що характеризуються різною поляризацією, просторово відокремлюються. Явища роздвоювання світлового променя за анізотропії заломлення називається *подвійним променезаломленням*.

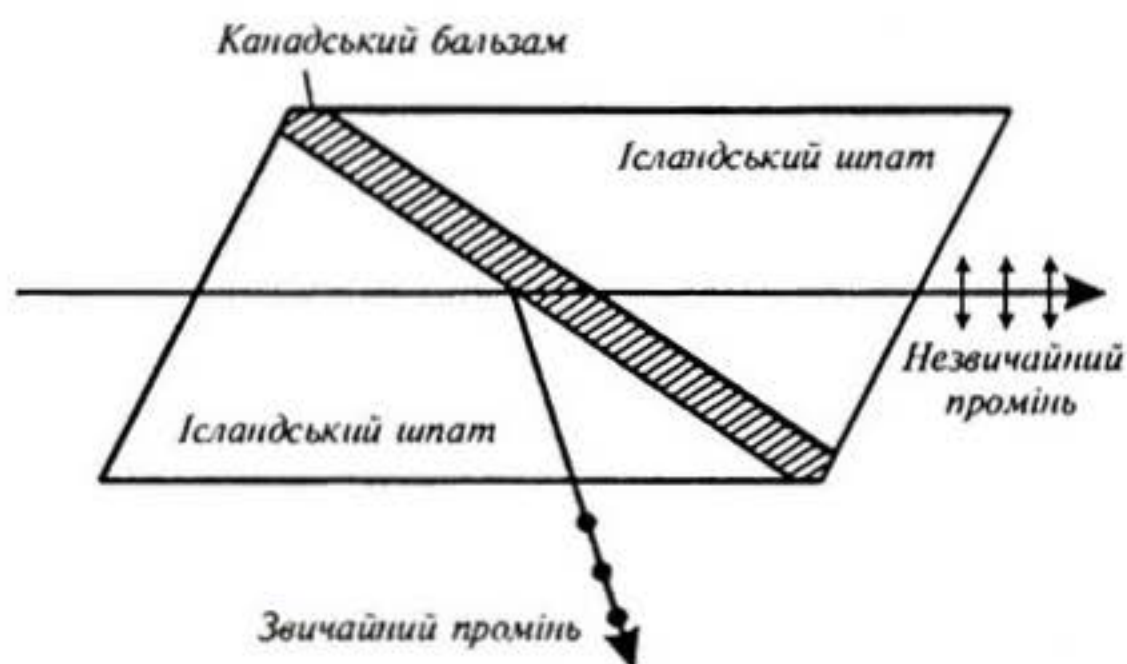


Рис. 27.25. Анізотропія заломлення (подвійне променезаломлювання)

4. *Поляризація світла за рахунок розсіювання.* Розсіювання світла пов'язане зі зміною будь-якої характеристики потоку оптичного випромінювання. Такими характеристиками можуть бути просторовий розподіл інтенсивності, частотний спектр, поляризація світла. У випадку розсіювання природного світла на малих частинках (розміри яких значно менші за довжину світлової хвилі) залежність інтенсивності  $I_\theta$  розсіяного світла від кута розсіювання  $\theta$  має вигляд:

$$I_\theta = I_{\frac{\pi}{2}} (1 + \cos^2 \theta), \quad (27.16)$$

де  $I_{\frac{\pi}{2}}$  — інтенсивність світла, що спостерігається під кутом  $\theta = \pi/2$ .

Якщо молекули речовини, яка розсіює, електрично ізотропні (неполярні молекули), то світло, що розсіюється під кутом  $\theta = \pi/2$ , буде повністю поляризоване.

Сонячне випромінювання розсіюється на молекулах повітря завдяки флуктуацій густини молекул середовища (зокрема,  $O_2$  та  $N_2$ ). Коли розміри молекул  $d$  значно менші за довжину світлової хвилі  $\lambda$ , відносна інтенсивність розсіяного світла характеризується співвідношенням, що отримало назву *закона Релея*:

$$I \sim I/\lambda^4. \quad (27.17)$$

Оскільки розміри молекул кисню та азоту становлять близько 0,2 нм, то очевидно, що короткохвильове сонячне випромінювання, що розсіюється на молекулах атмосферного повітря, матиме більшу інтенсивність. Саме цим пояснюється блакитний колір неба.

### 27.3.9. Оптична активність речовини

*Оптична активність* — це здатність речовини викликати повертання площини поляризації оптичного вимірювання, що проходить через речовину. Оптично активними є деякі кристали (кварц) та розчини деяких речовин (цукру, скипидару, білків, нуклеїнових кислот). Для оптично активних розчинів кут повертання  $\varphi$  площини поляризації залежить від концентрації  $C$  розчину та товщини  $l$  шару речовини, через який проходить світло:

$$\varphi = \alpha C l, \quad (27.18)$$

де  $\alpha$  — питома оптична активність, що вимірюється в *град · м<sup>3</sup>/кг · м*. Питома оптична активність залежить від природи речовини, температури і довжини світлової хвилі  $\lambda$ . Залежність  $\alpha$  від  $\lambda$  називається *спектром дисперсії оптичного обертання*.

Залежно від знака  $\alpha$  розрізняють *правоповоротні* ( $\alpha > 0$ ) та *лівоповоротні* ( $\alpha < 0$ ) оптично активні речовини. Право- і лівоповоротні оптично активні речовини неоднаково поглинають оптичне випромінювання; внаслідок цього лінійно поляризоване світло перетворюється після проходження розчину в еліптично поляризоване. Це явище називається *круговим дихроїзмом*.

Явище оптичної активності лежить в основі роботи приладу для точного вимірювання концентрацій розчинів — *поляриметра*. Він складається з джерела світла  $S$ , фільтра  $\Phi$ , поляризатора, що складається з двох поляризаційних призм —  $P_1$  і  $P_2$ , кювети  $K$  з розчином, аналізатора  $A$  та системи  $CP$  реєстрації кута повертання (рис. 27.26,а). Конструкція приладу передбачає поділ світлового потоку на дві частини — одна проходить через поляризаційну призму  $P_1$ , а інша — через обидві призми  $P_1$  і  $P_2$ . Призма  $P_2$  викликає додаткове повертання площини поляризації світла. Аналізатор  $A$



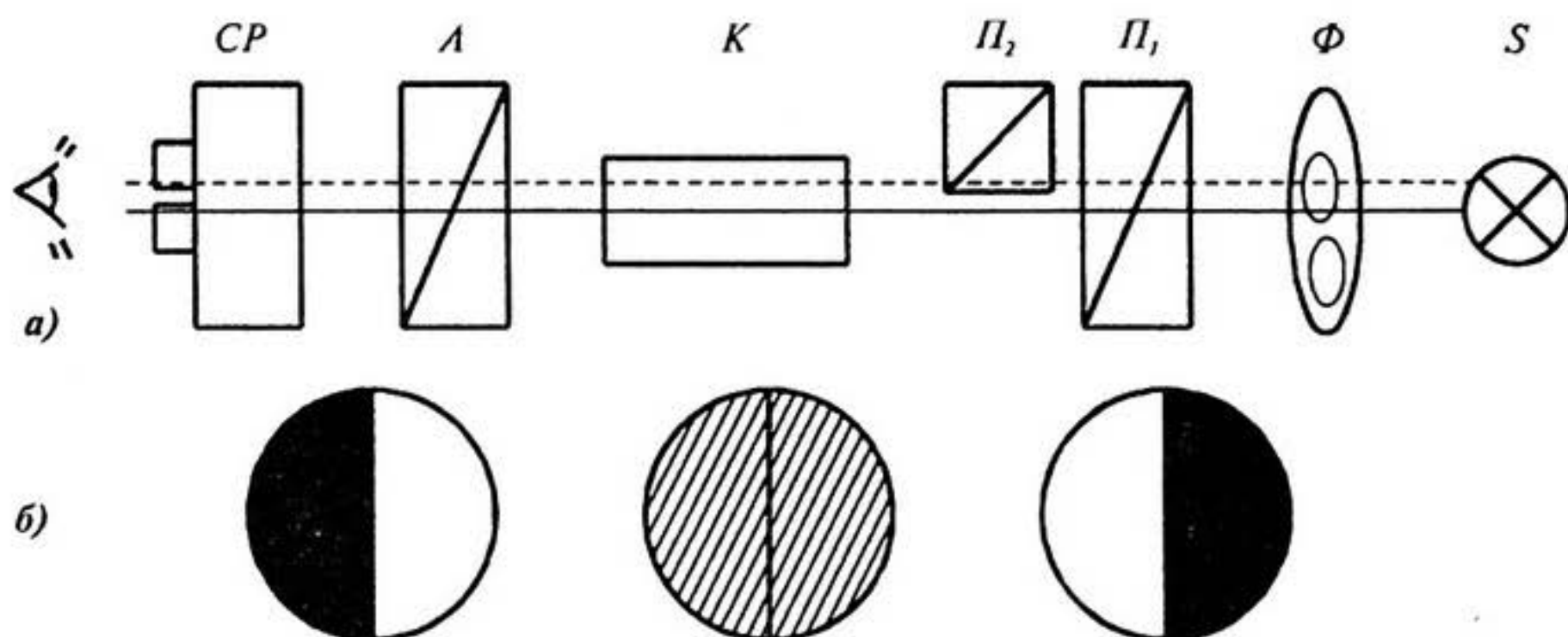


Рис. 27.26. а) будова поляриметра (пояснення в тексті); б) різні рівні освітленості двох половин зору поляриметра

може бути налаштований на повне затемнення або першої, або другої половини світлового потоку. В цьому разі в окулярі системи реєстрації можна побачити дві половини поля зору з різним рівнем освітленості (рис. 27.6, б). Якщо аналізатор знаходиться у проміжному положенні і пропускає коливання, перпендикулярні бісектрисі кута, зумовленого додатковим повертанням площини поляризації призмою  $\Pi_2$ , то обидві половини поля зору набувають однакової освітленості. Внаслідок розміщення кювети  $K$  з розчином, концентрацію якого визначають, умова однакової освітленості порушується; для її встановлення необхідно повернути аналізатор  $A$  на кут  $\varphi$ .

Процедура вимірювань передбачає визначення кута  $\varphi_0$  повертання площини поляризації світла розчином з відомою концентрацією  $C$ , потім — кута  $\varphi_x$  повертання площини поляризації світла розчином з невідомою концентрацією  $C_x$ , звідки невідому концентрацію визначають за виразом:

$$C_x = C \frac{\varphi_x}{\varphi_0}. \quad (27.19)$$

## 27.4. КВАНТОВА ОПТИКА

### 27.4.1. Квантова природа світла

Квантова оптика розглядає оптичні явища, в яких вивчається квантова природа світла. Згідно з гіпотезою М. Планка, випромінювання та поглинання світла відбувається не безперервно, а дискретно, тобто певними порціями — *квантами*, енергія яких визначається за виразом:

$$E = h\nu, \quad (27.20)$$

де  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — стала Планка,  $\nu$  — частота випромінювання.

У 1905 р. А. Ейнштейн розробив квантову теорію фотоефекту, що використовувала поняття про потік світлових квантів — *фотонів*. У цій теорії зберігаються особливості як хвильових так і корпускулярних поглядів на природу світла.

### 27.4.2. Фотоелектричний ефект

Явище виривання електронів з речовини під впливом світла називається *фотоелектричним ефектом*.

Схему експериментального приладу, за допомогою якого спостерігають фотоелектричний ефект (фотоефект), наведено на рис. 27.27. Скляний або кварцовий балон містить два металевих електроди, один з яких (катод) з'єднаний з негативним полюсом джерела струму, а інший (анод) — з позитивним. Коли балон знаходиться у темряві, струм в ланцюзі, який фіксується амперметром, дорівнює нулю. При освітленні балона в ланцюзі виникає електричний струм (*фотострум*) завдяки електронам, що вириваються з катода і прямують до анода.

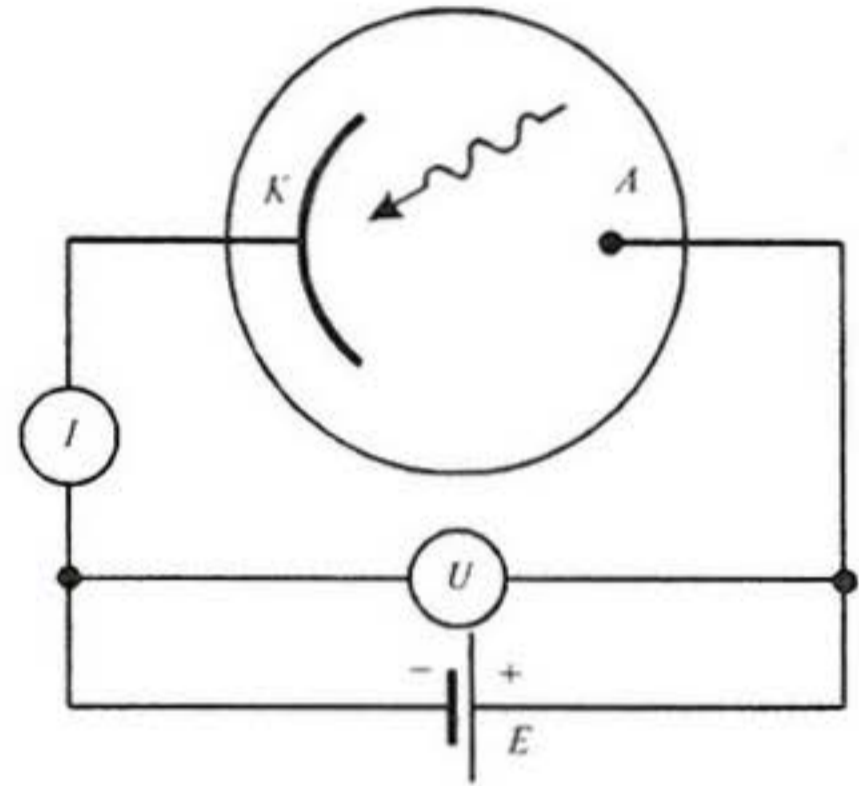


Рис. 27.27. Схема експериментального приладу, за допомогою якого спостерігають фотоефект: А — анод; К — катод

Закон збереження енергії для процесу взаємодії фотона з електроном під час фотоефекту (рис. 27.28) описується *рівнянням Ейнштейна*:

$$h\nu = A + \frac{mV^2}{2}, \quad (27.21)$$

де  $A$  — робота виходу електрона з речовини,  $\frac{mV^2}{2}$  — кінетична енергія електрона. Робота виходу  $A$  залежить від речовини та стану її поверхні.

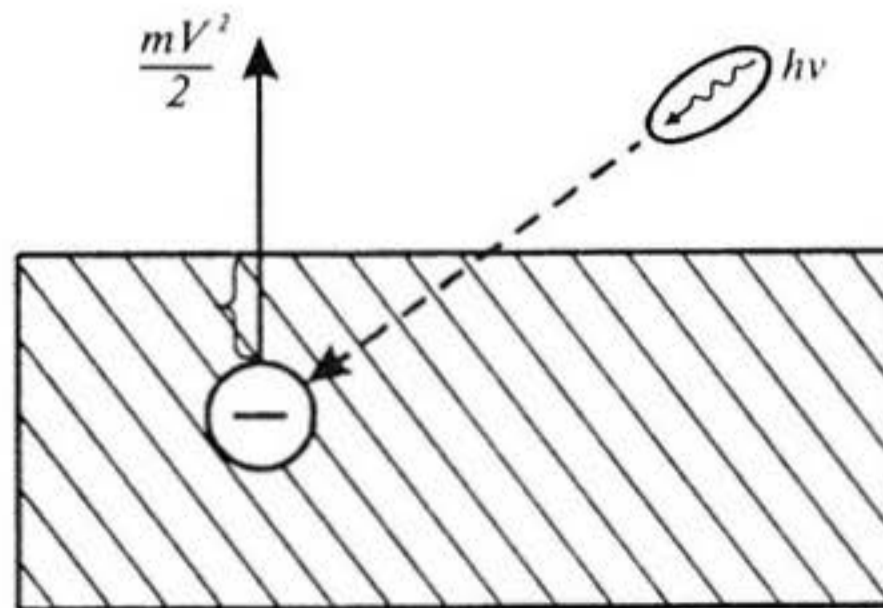


Рис. 27.28. Взаємодія фотона з електроном під час фотоефекту

Мінімальна енергія фотона, достатня для отримання фотоефекту, дорівнює:

$$h\nu_{min} = A. \quad (27.21)$$

З урахуванням того, що  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  (де  $c$  — швидкість світла,  $\lambda$  — довжина світлової хвилі), останнє рівняння можна переписати так:

$$h \frac{c}{\lambda_{max}} = A. \quad (27.22)$$

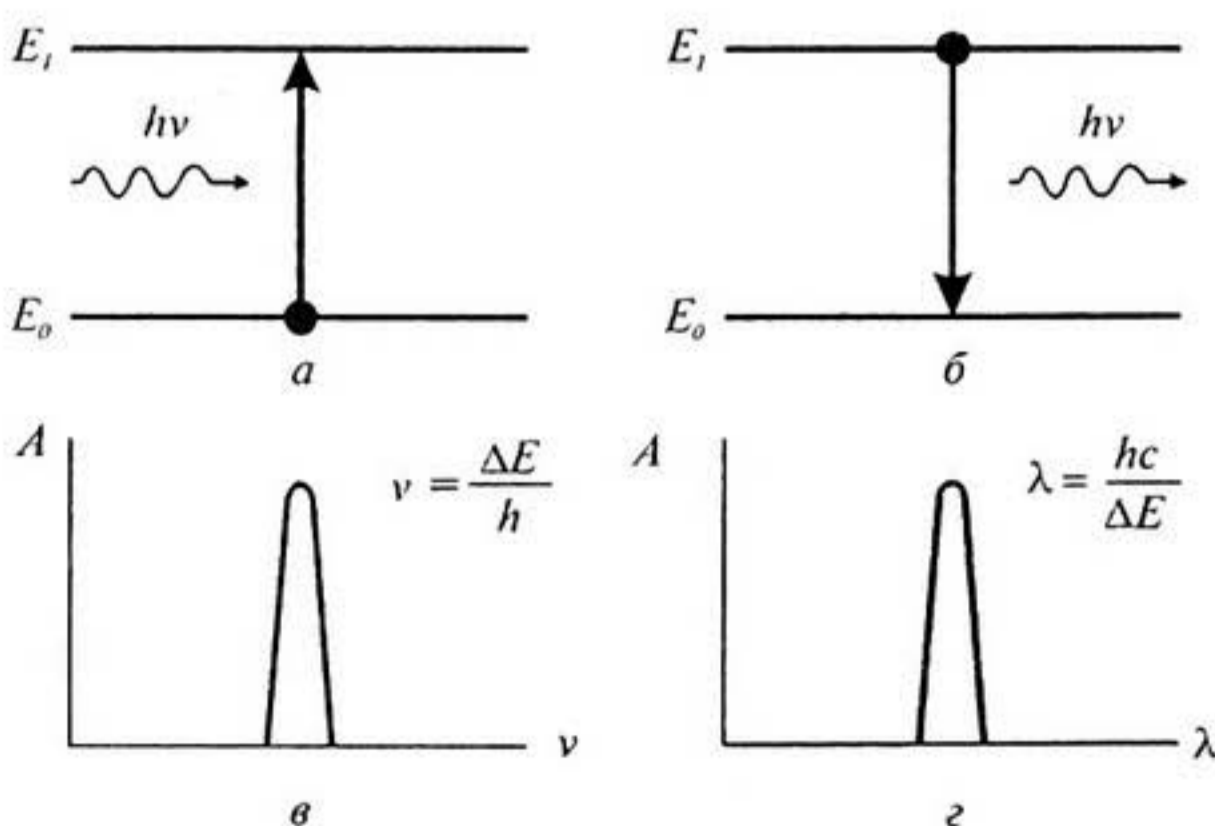
Оскільки у видимому діапазоні максимальній довжині хвилі відповідає червоний колір, довжина хвилі  $\lambda_{max}$ , що входить у рівняння (27.22), називається *червоною межею фотоефекту*.

### 27.4.3. Лазер та його характеристики

*Принцип дії лазера.* Пристрій, що генерує когерентні електромагнітні хвилі за стимульованого випромінювання світла активним середовищем, що міститься в оптичному резонаторі, називається *лазером*. Принцип дії лазера пояснюється англійською фразою «*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*»; *LASER* таким чином, є аббревіатурою словосполучення англійською мовою, що означає «*посилення світла через стимульоване випромінювання*».

*Стимульоване випромінювання.* Згідно з постулатами Н.Бора (1913 р.) існують стаціонарні стани атома, що відповідають дискретному ряду дозволених значень  $E_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) його енергій. Зміна цієї енергії пов'язана з квантовим (стрибкоподібним) переходом з одного стаціонарного стану в інший; умова частот електромагнітного випромінювання під час квантового переходу атома зі стану з енергією  $E_i$  в стан з енергією  $E_j$  має вигляд:

$$E_i - E_j = h\nu. \quad (27.23)$$



*Рис. 27.29. Енергетичні рівні атома: а — поглинання кванта світла; б — випромінювання кванта світла; в — спектральна лінія поглинання (або випромінювання) в масштабі частоти; г — те саме в масштабі довжин хвиль*

Розглянемо дворівневу енергетичну структуру атома (рис. 27.29). Рівень  $E_0$  — називається *основним*, тоді як рівень  $E_1$  — *збудженим*. Якщо на атом падає фотон, енергія якого визначається рівнянням (27.32), відбувається перехід атома з основного рівня на збуджений. Такий процес називається *поглинанням* фотона атомом (рис. 27.29,а). Атом, що перебуває в збудженому стані, може повернутися на основний рівень; цей перехід супроводжується *випромінюванням* фотона атомом (рис. 27.29,б).

Атоми перебувають у збудженому стані близько  $10^{-8}$  с, після чого залишають рівень  $E_1$ . Система збуджених атомів також буде переходити на основний рівень з випромінюванням фотонів; але процес цей хаотичний і всі фотони, що випромінюються, відрізняються своїми напрямками і фазами (рис. 27.30). Таке випромінювання неупорядкованих (некогерентних) фотонів називається *спонтанним*.

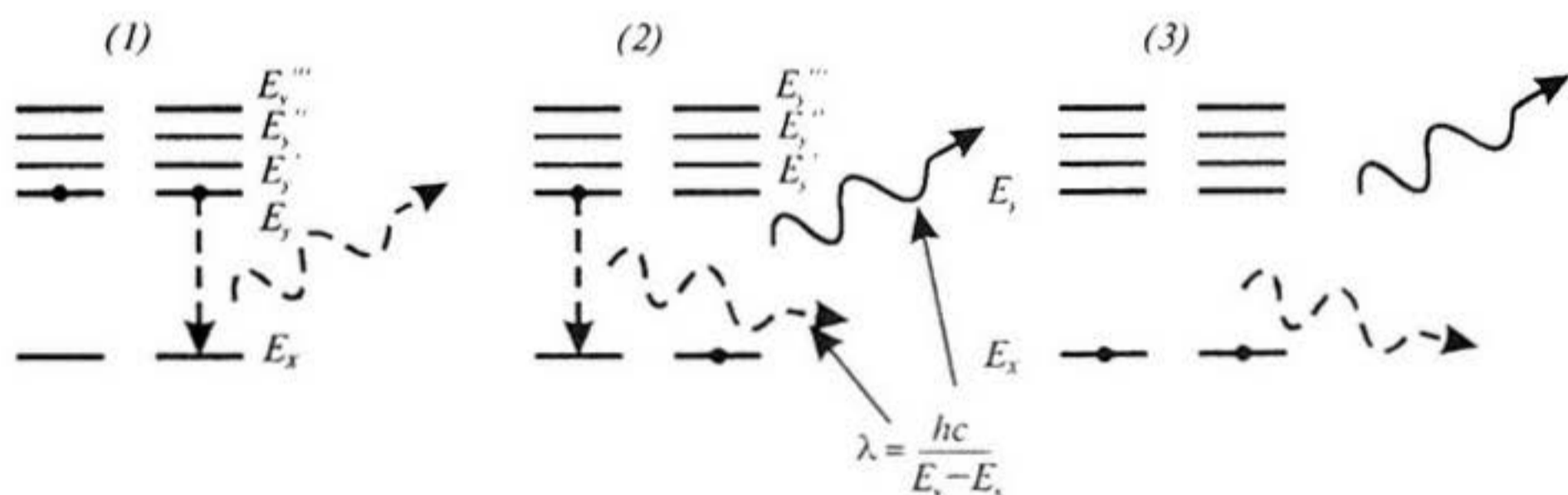


Рис. 27.30. Спонтанне випромінювання: фотони характеризуються різними напрямками поширення та фазами

Якщо атом перебуває у збудженому стані  $E_1$  і на нього діє зовнішній фотон з енергією  $h\nu = E_1 - E_0$ , то фотон стимулюватиме перехід атома з рівня  $E_1$  на рівень  $E_0$  з випромінюванням нового фотона з такою ж енергією  $h\nu$ . Причому, напрямки поширення і фази обох фотонів однакові, тобто вони є когерентними (рис. 27.31). Таке випромінювання називається *стимульованим*. Результатом стимульованого випромінювання є збільшення кількості фотонів, тобто посилення світла.

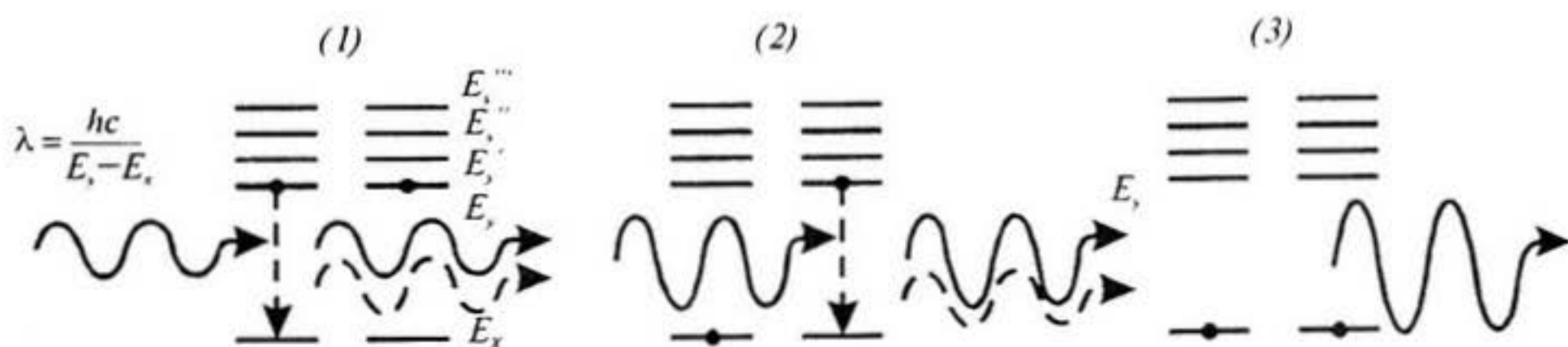


Рис. 27.31. Стимульоване випромінювання: фотони характеризуються однаковими напрямками поширення та фазами

**Будова лазера.** Лазер складається з трьох основних компонентів — активного середовища, джерела накачування та оптичного резонатора (рис. 27.32). *Активним середовищем* можуть бути кристалічні або склоподібні матеріали, рідинні середовища, гази чи суміші газів, напівпровідники. *Джерелом оптичного накачування* можуть бути потоки сфокусованого світла, електричні розряди, пучки електронів тощо. *Оптичний резонатор* — це пристрій, в якому можуть збуджуватися стоячі або біжучі електромагнітні хвилі оптичного діапазону. Складається оптичний резонатор, як правило, з двох дзеркал.

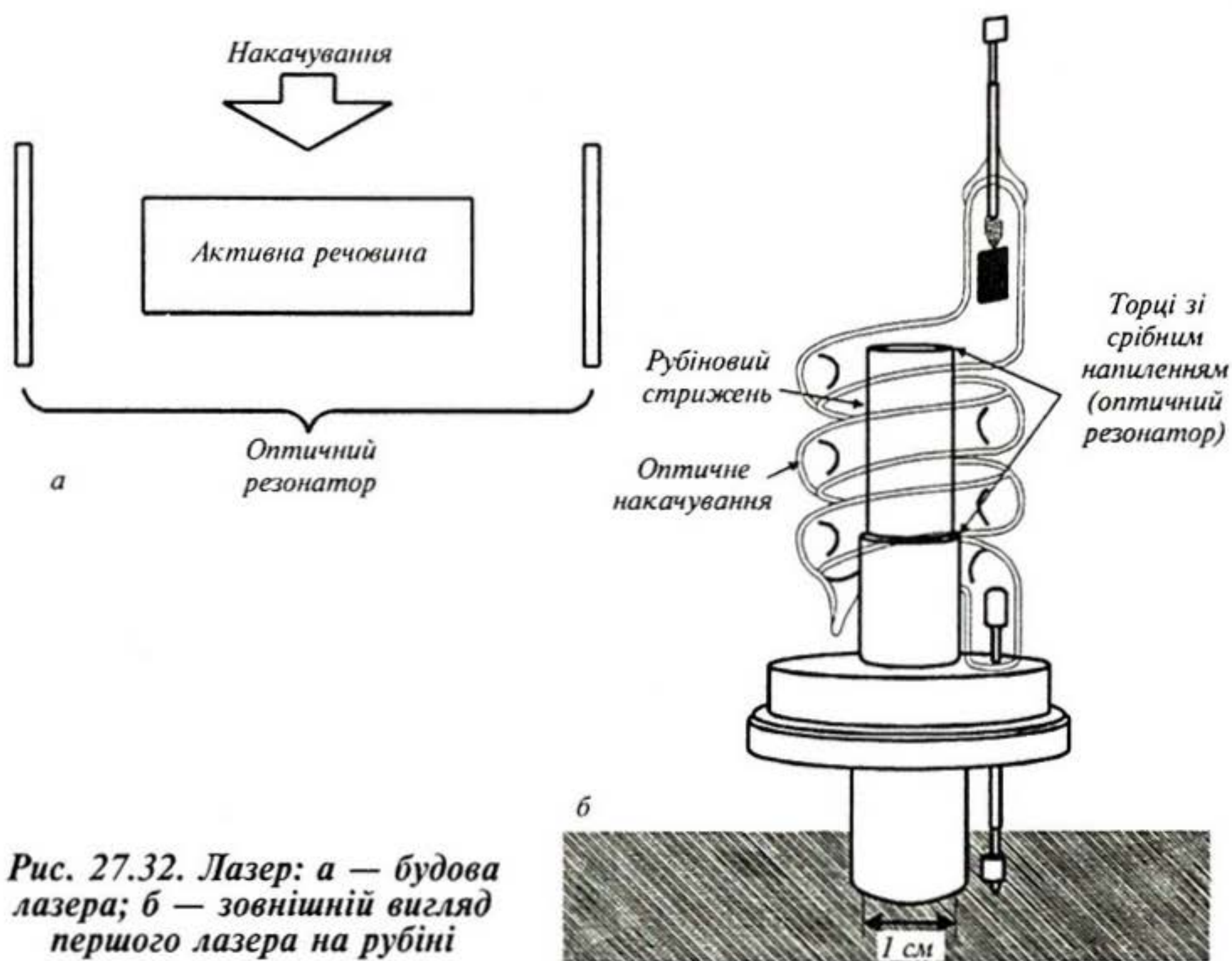


Рис. 27.32. Лазер: а — будова лазера; б — зовнішній вигляд першого лазера на рубіні

**Інверсія населеності.** Для того, щоб випромінювання мало перевагу над поглинанням, слід забезпечити так звану *інверсію населеності* — збільшення кількості збуджених атомів порівняно з тими, що перебувають в основному стані. Для реалізації інверсії населеності здійснюють *оптичне накачування*. Якщо звичайно кількість атомів в основному стані перевищує кількість збуджених (рис. 27.33,а), то під впливом накачування ситуація змінюється (рис. 27.33,б).

**Формування лазерного променя.** Після того, як у результаті накачування в активному середовищі реалізується інверсія населеності, збуджені атоми переходять в основний стан, що супроводжується випромінюванням фотонів. Фотони, що поширюються паралельно

повздовжній осі оптичного резонатора, зазнають багаторазового відбивання від дзеркал; при проходженні через активне середовище вони стають джерелом стимульованого випромінювання. Фотони, що поширюються під кутом до осі оптичного резонатора, залишають його. Багаторазові акти стимульованого випромінювання сприяють генерації оптичного випромінювання. Довжина хвилі лазерного випромінювання визначається структурою енергетичних рівнів активного середовища лазера та наявністю серед них довгоіснуючих рівнів.

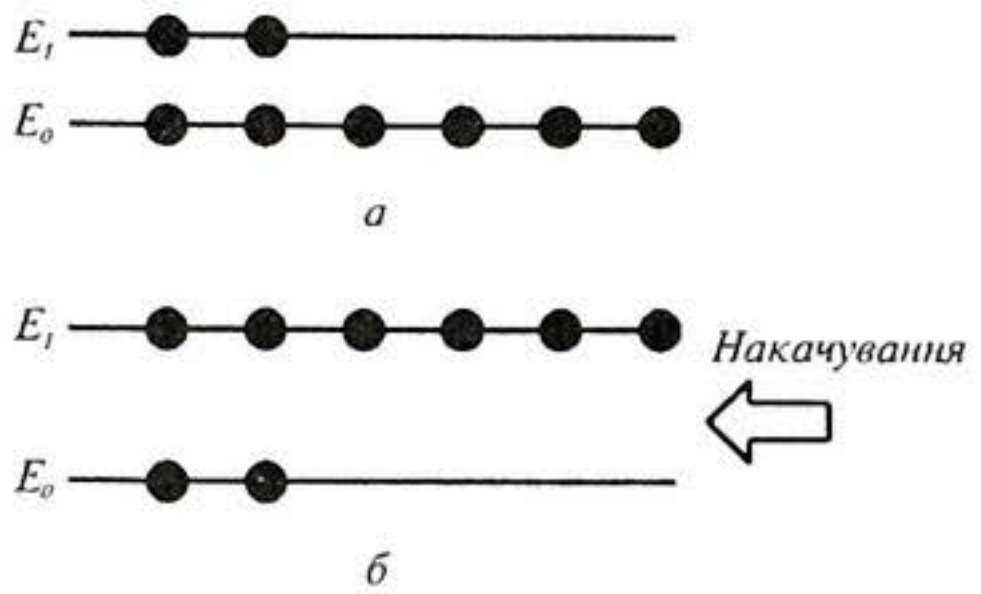


Рис. 27.33. Інверсія населеності: а — населеність рівнів у звичайному стані; б — нерівноважний стан речовини під впливом накачування

Розглянемо поведінку трьох фотонів, що утворилися за спонтанних процесів (рис. 27.34). Фотон 1 залишає оптичний резонатор; фотон 2 відбивається від дзеркала  $D_2$  і теж зникає. Фотон 3, який поширюється паралельно повздовжній осі лазера, відбивається від дзеркала  $D_2$ , рухається у протилежному напрямку і взаємодіє з частинкою А, що перебуває у збудженому стані під впливом накачування. Ця частинка бере участь у стимульованому випромінюванні. Таким чином, результатом взаємодії фотона 3 з частинкою А буде поява двох когерентних фотонів 4 і 5, які після відбивання від дзеркала  $D_1$  взаємодіють зі збудженими частинками В і С, в результаті чого далі поширюється чотири когерентних фотони: 6, 7, 8 і 9.

Отже, в решті решт, після багаторазових взаємодій фотонів, що рухаються вздовж активної речовини, зі збудженими за накачуванням частинками виникає потік когерентних фотонів, які проникають через частково прозоре дзеркало  $D_2$  і формують лазерний промінь.

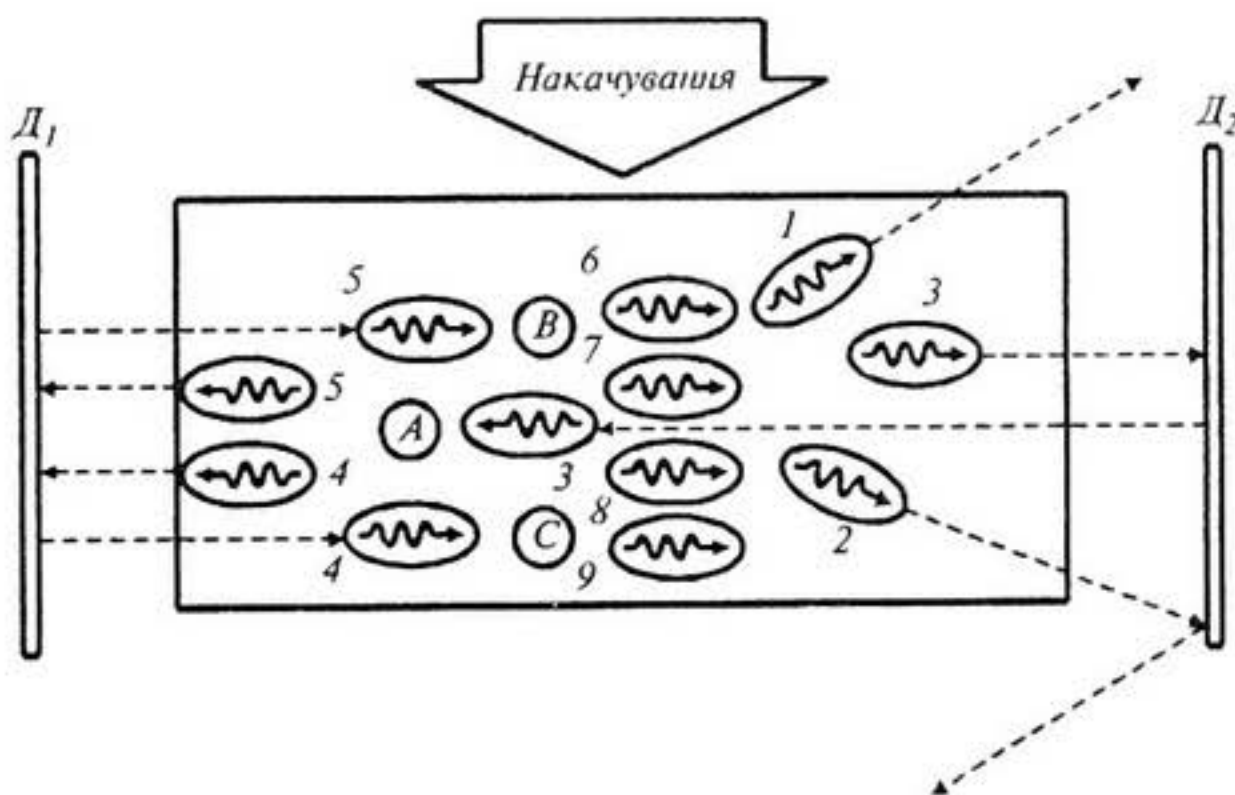


Рис. 27.34. Процеси, що відбуваються в активному середовищі лазера під впливом накачування (пояснення в тексті)

Таким чином, для реалізації дії лазера слід виконати такі умови: 1. забезпечити інверсію населеності; 2. збуджений стан системи має бути *метастабільним*, час життя якого значно більший порівняно зі звичайними короткочасними збудженими станами; саме через це стимульоване випромінювання переважає спонтанне випромінювання; 3. фотони, що випромінюються, повинні бути обмеженими достатньо довгою системою двох дзеркал (оптичним резонатором) для реалізації процесу стимулювання цими фотонами інших збуджених атомів.

Лазерному випромінюванню властиві такі характеристики:

*Інтенсивність випромінювання* — повний потік енергії випромінювання, що проходить за одиницю часу через одиничну площу у напрямку нормалі до неї і розрахований на одиницю тілесного кута. Висока інтенсивність лазерного випромінювання пов'язана зі здатністю лазера концентрувати світлову енергію у просторі. Так, інтервал інтенсивності сучасних потужних лазерів становить  $10^6 \div 10^{10}$  Вт · см<sup>-2</sup>.

*Монохроматичність* — здатність лазера випромінювати на одній певній і чітко постійній частоті. Ширина лазерної лінії може становити  $0,1 \div 1$  нм; отже монохроматичність становитиме  $\Delta\nu/\nu = 10^{-12} \div 10^{-13}$ .

*Когерентність* — узгоджений перебіг у часі та просторі кількох коливальних або хвильових процесів, що проявляється при їх накладанні. З когерентністю пов'язана висока спрямованість лазерного випромінювання. Ця властивість лазерного випромінювання пояснюється тим, що у формуванні променя беруть участь лише ті фотони, які рухаються вздовж осі лазера. Спрямованість лазерного випромінювання характеризується поширенням його у межах тілесного кута — кута розбіжності. Розбіжність  $\theta$  лазерного променя визначається за формулою:

$$\theta = 1,22 \lambda/D, \quad (27.24)$$

де  $\lambda$  — довжина світлової хвилі,  $D$  — діаметр променя (для газових лазерів  $\theta \approx 10'$ ; для твердотілих  $\theta \approx 10' \div 40'$ ; для напівпровідникових  $\theta \approx 30^\circ$ ).

*Імпульсний режим роботи.* Лазери останніх поколінь здатні генерувати ультракороткі імпульси, тривалість яких досягає сотень фемтосекунд (1 фемтосекунда дорівнює  $10^{-15}$  с). За допомогою таких приладів можна досліджувати короткотривалі процеси.

*Плавне перестроювання частоти.* Деякі типи лазерів мають можливість плавно перестроювати частоту у широкому спектральному діапазоні. Серед лазерів, частота яких плавно перестроюється, слід виділити лазери із перевертанням спіну, параметричний генератор світла, хвильоводний лазер високого тиску, лазери на барвниках, напівпровідникові лазери, ексимерні лазери. Розробка лазерів з частотою, що перестроюється, та розширення діапазону частот, який перекривається лазерами, є одним з найважливіших завдань сучасної спектроскопії.

## 27.4.4. Фокусування лазерного випромінювання

Процедура фокусування лазерного випромінювання застосовується під час мікрооперацій на клітинному рівні. Якщо пропустити лазерний промінь крізь лінзу діаметром  $D$  і з фокусною відстанню  $f$ , то діаметр сфокусованого променя буде дорівнювати  $2\omega_0$ . Співвідношення між діаметром  $2\omega$  не сфокусованого та діаметром  $2\omega_0$  сфокусованого лазерних промінів мають вигляд:

$$2\omega = D = (2/\pi)(\lambda f/\omega_0). \quad (27.25)$$

Звідси

$$\omega_0 = \lambda f / (\pi\omega) = (2/\pi)(\lambda f/D). \quad (27.26)$$

З теорії дифракції відомо, що інтенсивність у центрі фокальної плями дорівнює:

$$I_0 = P \left( \frac{\pi D^2}{4\lambda^2 f^2} \right) \sim \left( \frac{D}{\lambda f} \right)^2 P, \quad (27.27)$$

де  $P$  — потужність лазерного випромінювання.

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Визначити граничний кут для променя, що проходить межу «вода-повітря», якщо показник заломлення дорівнює 1,33.

### Розв'язок

Використовуючи рівняння (27.6), знаходимо граничний кут:

$$\sin i_{cp} = \frac{1}{n} = 1/1,33 = 0,752.$$

Звідси  $i_{cp} = 48,8^\circ$ .

Поле зору риби залежить від граничного кута. Наприклад, під кутом  $40^\circ$  вона бачить повітря над водою, тоді як під кутом  $60^\circ$  вона здатна спостерігати дно водойми.

### Приклад

Визначити мінімальну товщину мильної плівки ( $n = 1,33$ ), яка підсилює світло завдяки інтерференції, якщо довжина світлової хвилі 600 нм.

### Розв'язок

Мінімальна товщина плівки, при якій забезпечується підсилення світла, визначається з рівняння:

$$2d = (m+1/2)\lambda_n, \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad \text{де } \lambda_n = \lambda/n.$$

Звідси

$$2dn = (m+1/2)\lambda.$$

Мінімальна товщина плівки відповідає  $m=0$ , звідки:

$$d = \lambda/4n = 600/(4 \cdot 1,33) = 113 \text{ нм.}$$



### Контрольне завдання № 27.1

Випромінювання гелій-неонового лазера з довжиною хвилі 632,8 нм падає нормально на поверхню дифракційної решітки, кількість штрихів на поверхні якої становить  $6000 \cdot \text{см}^{-1}$ . Знайти кут, під яким спостерігається дифракційний максимум першого порядку.

*Відповідь:* 22,31°.

### Контрольне завдання № 27.2

Кут падіння світлового променя на поверхню постійно змінюється. Відбитий промінь стане повністю поляризованим, якщо кут падіння дорівнює 48°. Визначити показник заломлення речовини, від поверхні якої відбивається промінь.

*Відповідь:* 1,11.

### Приклад

Визначити концентрацію цукру в сечі людини, хворої на діабет, якщо в трубці поляриметра довжиною 20 см кут обертання площини поляризації становить 40°. Питома оптична активність цукру дорівнює  $66,5 \text{ град} \cdot \text{см}^3 / (\text{г} \cdot \text{дм})$ .

### Розв'язок

Визначаємо концентрацію цукру з рівняння (27.18):

$$C = \frac{\varphi}{\alpha l}$$

Підставляємо числові значення:

$$C = \frac{40 \text{ град}}{66,5 \text{ град} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{дм}^{-1} \cdot 2,0 \text{ дм}} = 0,3 \text{ г} \cdot \text{см}^3$$

### Приклад

Натрієва поверхня опромінюється світлом, довжина якого становить 300 нм. Визначити кінетичну енергію електрона, що виривається з поверхні за фотоефекту, якщо робота виходу дорівнює 2,46 еВ.

### Розв'язок

Енергія електрона визначається за допомогою рівняння (27.21):

$$\begin{aligned} E &= \frac{mV^2}{2} = h\nu - A = h \frac{c}{\lambda} - A = \\ &= (6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с})(3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}) / (300 \cdot 10^{-9} \text{ м}) - 2,46 \text{ еВ} = \\ &= 6,63 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} / (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/еВ}) - 2,46 \text{ еВ} = 4,14 \text{ еВ} - 2,46 \text{ еВ} = 1,68 \text{ еВ}. \end{aligned}$$

### Контрольне завдання № 27.3

Користуючись умовою попередньої задачі, визначити червону межу фотоефекту.

*Відповідь:* 505 нм.

### Приклад

Оцінити інтенсивність випромінювання гелій-неонового лазера ( $\lambda = 632,8$  нм;  $P = 1$  мВт), що утворюється на сітківці (фокусна відстань  $f = 22,4$  мм) під час фокусування цього випромінювання кристаликом ока. Порівняти отриману інтенсивність з інтенсивністю сонячного випромінювання, що дорівнює  $7 \cdot 10^3$  Вт  $\cdot$  м<sup>-2</sup>.

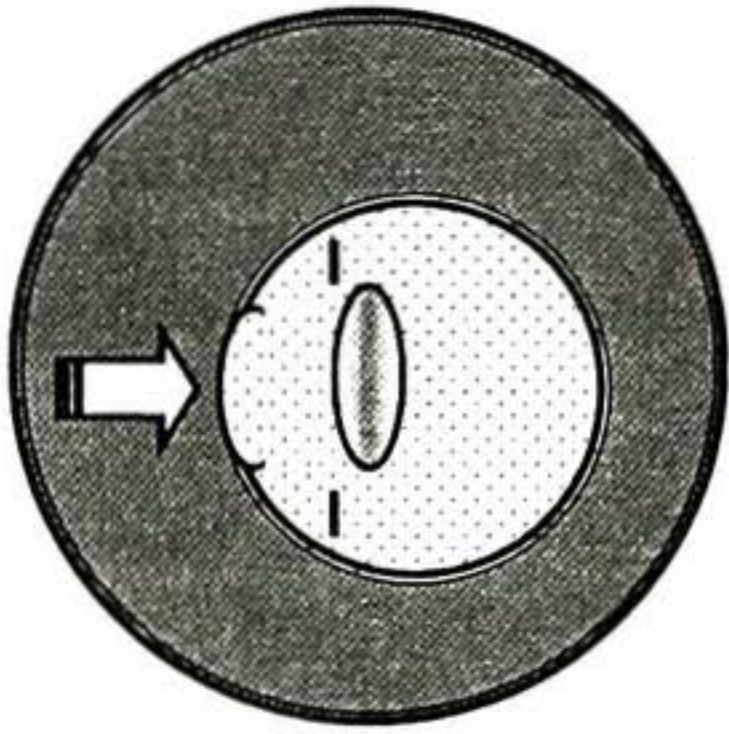
### Розв'язок

Якщо допустити для ока типові значення  $D = 1$  мм,  $f = 1,5$  см, то на основі виразу (27.27) можна отримати:

$$I = \left( \frac{10^{-3} \text{ м}}{632,8 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} \right)^2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} = 10^7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Сформулювати закони геометричної оптики.
2. Що називають абсолютним показником заломлення? відносним показником заломлення?
3. Пояснити, що таке повне внутрішнє відбиття?
3. В чому полягає принцип дії світловода? фіброскопа?
4. Що таке інтерференція світла?
5. Сформулювати необхідну умову інтерференції світла.
6. Охарактеризувати методи спостереження інтерференції світла.
7. Написати умови спостереження дифракційних мінімумів та максимумів.
8. Що таке дифракція світла?
9. Яке призначення дифракційної решітки?
10. Написати рівняння дифракційної решітки для випадку: коли світло падає нормально на поверхню решітки; коли світло падає під кутом  $\theta_i$  до площини решітки.
11. Дати визначення поляризації світла та назвати основні типи поляризації світла.
12. Охарактеризувати методи отримання поляризації світла.
13. Що називають оптичною активністю речовини?
14. Пояснити принцип дії поляриметра.
15. Що таке фотоелектричний ефект? Написати закон збереження енергії під час фотоэффекту (рівняння Ейнштейна).
16. Що називають спонтанним та стимульованим випромінюванням?
17. Що таке інверсія населеності?
18. Які умови необхідні для реалізації дії лазера?
19. Назвати основні характеристики лазерного випромінювання.
20. Чому навіть відбите лазерне випромінювання небезпечне для ока людини?
21. Які параметри лазерного випромінювання зумовлюють його застосування в ветеринарній медицині та зооінженерії?



## 28. ФОТОБІОЛОГІЯ ТА ФІЗІОЛОГІЧНА ОПТИКА

*Фотобіологія* вивчає вплив оптичного випромінювання на живі організми, а *фізіологічна оптика* — процеси сприймання світла зоровим аналізатором, його будову та механізми зору.

### 28.1. ВПЛИВ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ТВАРИН

Світло є одним з найважливіших зовнішніх факторів, що впливають на сільськогосподарську тварину. Вплив світла пов'язаний з такими основними його параметрами як *інтенсивність світла (освітленість)*, *спектральний склад* та *тривалість освітлення (фотоперіод)*. Деякі птахи і комахи здатні реагувати на *поляризацію* оптичного випромінювання.

Сприятливі з точки зору інтенсивності світла умови в тваринницьких приміщеннях впливають на обмін речовин у тварин та окислювально-відновні процеси у тканинах, функції ендокринної системи, резистентність, відтворну здатність і продуктивність тварин. В той же час забезпечення високого рівня освітленості приміщень потребує енергетичних затрат. Пошуки виходу з цієї суперечності приводять до розробки оптимальних норм освітленості тваринницьких приміщень, які знаходяться в межах близько 50÷100 лк.

Спектральний склад світла також впливає на тварину; залежно від довжини хвилі оптичного випромінювання можна досягти підвищення продуктивності та прискорення відтворних функцій тварин, збільшення вмісту гемоглобіну у крові. Помічено вплив спектрального складу світла на розвиток ембріонів, поведінку птиці, збільшення маси, кількості запліднених яєць, підвищення несучості.

Тривалість освітлення враховується у птахівництві. Вибір певних режимів фотоперіоду дає можливість скоротити період линян-

ня курей, підвищити несучість, активізувати рухову активність та інтенсивність поїдання корму курчатами.

Ультрафіолетове опромінювання тварин сприяє одержанню здорового потомства, запобігає захворюванню молодняку на рахіт, підвищує приріст живої маси, прискорює інтенсивність обмінних процесів, підвищує плодючість, зумовлює інтенсивний розвиток шкіри ягнят. Використання ультрафіолетового випромінювання у птахівництві зумовлює кращий розвиток ембріонів, поліпшення процесу виводу курчат, підвищення обміну речовин, компенсування дефіциту вітаміну *D* в раціоні птиці та запобігання захворюванням. Все це підвищує несучість птиці і збільшує прирости живої маси.

## 28.2. ФОТОРЕЦЕПЦІЯ У ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ

Основне призначення фоторецепторної системи живих організмів — забезпечення інформацією про стан навколишнього середовища, зокрема, інтенсивності світлового стимулу, просторових і часових характеристик, за допомогою яких організм здатний орієнтуватися відносно одного з найважливіших зовнішніх факторів — світла. Просторові та часові зміни інтенсивності та напрямку світлового потоку можуть викликати відповідні зміни рухової та поведінкової активності цих організмів.

### 28.2.1. Фоторецепція у комах

Реакція на світло у комах здійснюється за допомогою двох складних очей і трьох простих (рис. 28.1). *Просте око* являє собою лінзоподібний горбик на хітиновому покриві голови, до внутрішнього боку якого підходять нервові клітини. Складається просте око з прозорої лінзи, шару зорових клітин (близько 800) і зорового нерва (рис. 28.2). На сітківці простого ока не формується зорове зображення; в той же час прості очі в змозі сприймати такі параметри оптичного випромінювання як інтенсивність, період і спектральний склад. Вважається, що прості очі здатні реагувати на сутінки або світанок, забезпечуючи орієнтацію комахи в умовах зниженої освітленості.

*Складні очі* мають фасеткову структуру, що формує мозаїчну картину. Складається складне око з набору *оматидіїв*, кількість

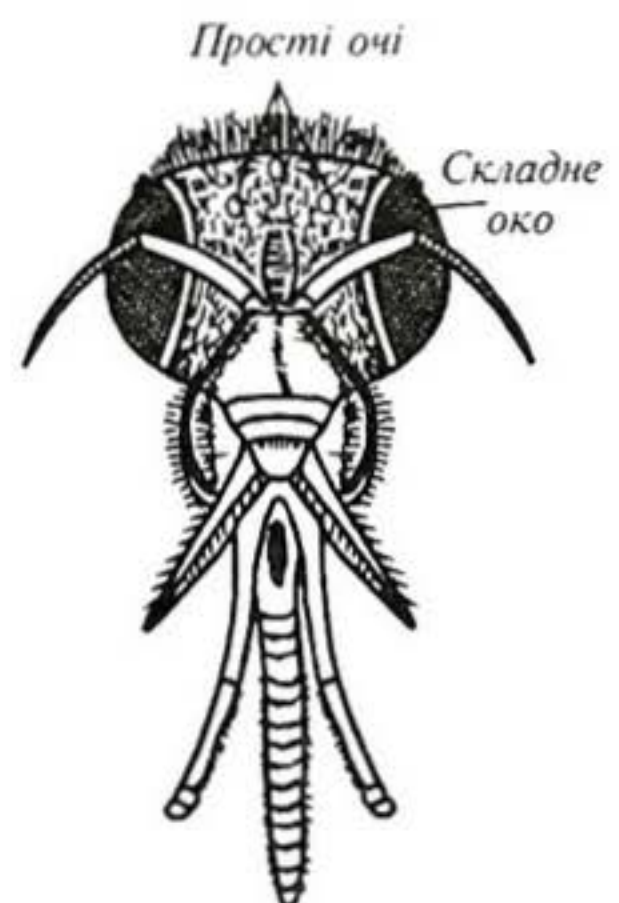


Рис. 28.1. Зоровий аналізатор комахи (бджоли)

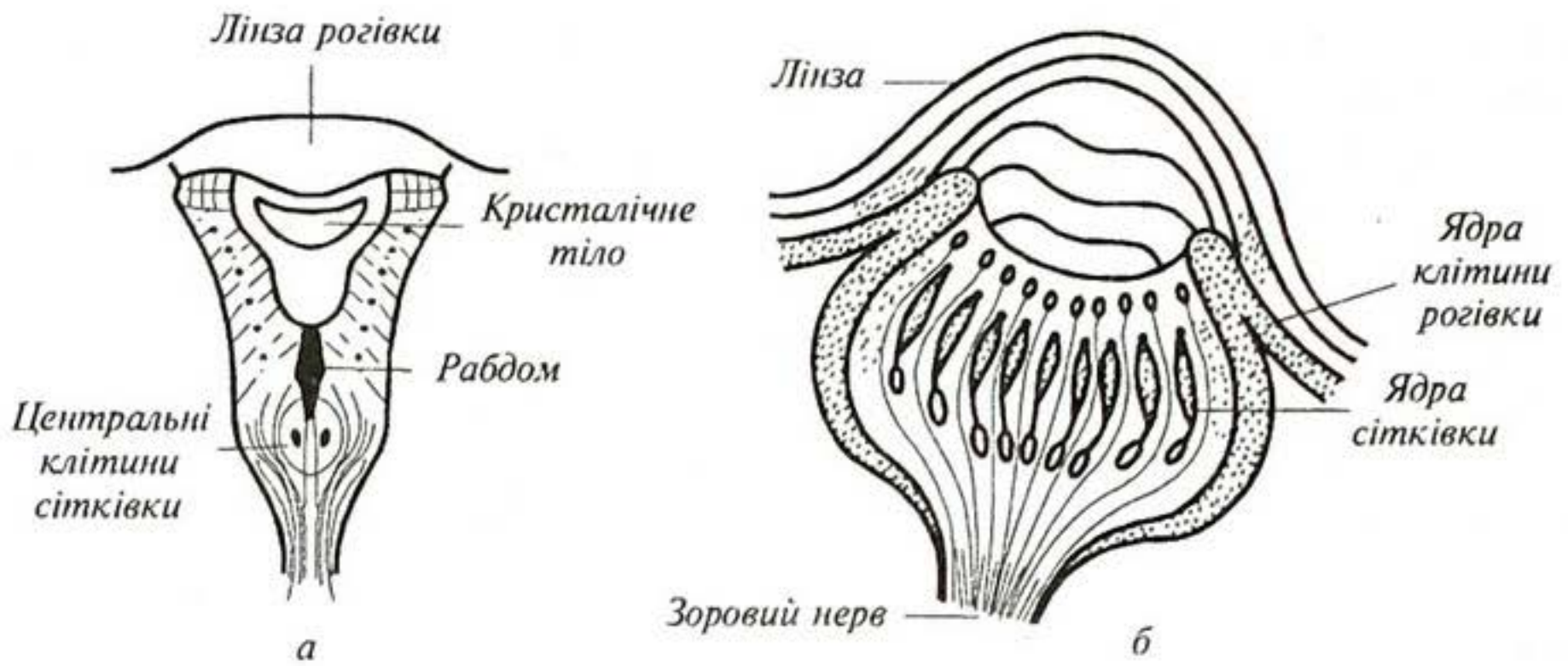


Рис. 28.2. Просте око комах: а — латеральне; б — дорсальне

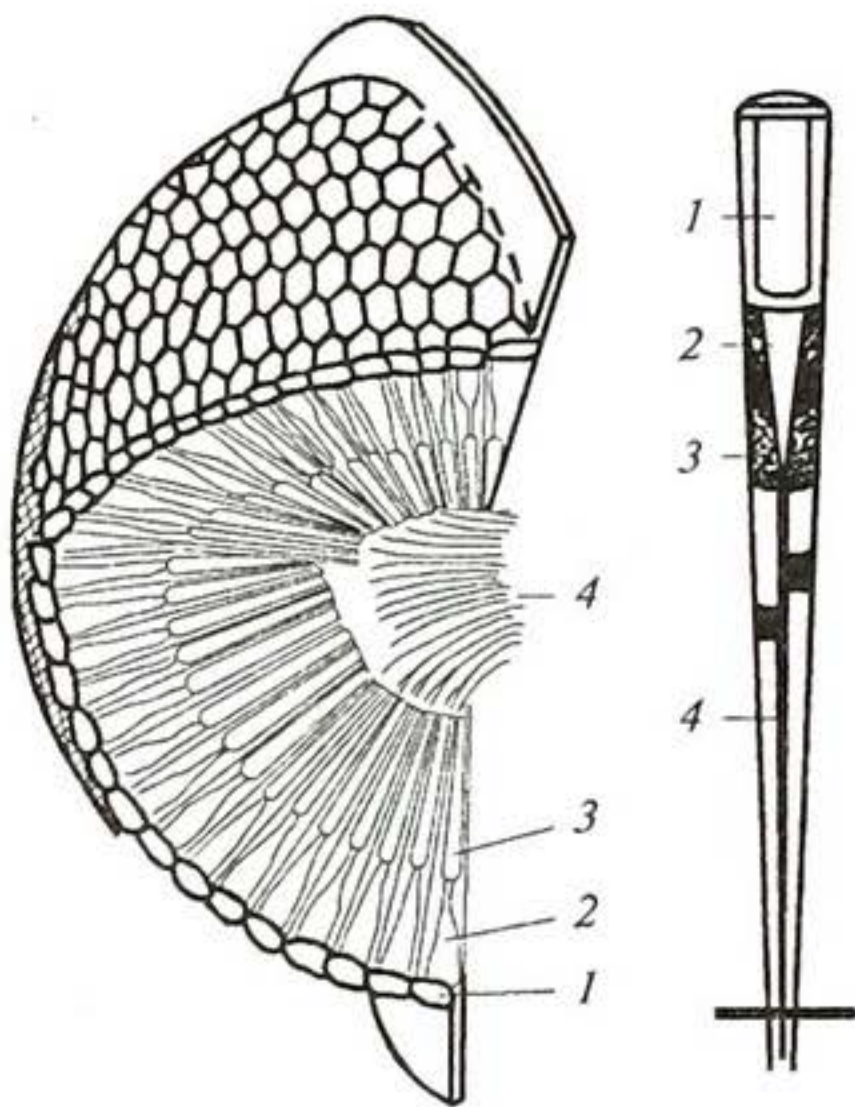


Рис. 28.3. Складне око бджоли: а — фасеткова структура складного ока: 1 — роگیвка; 2 — кристалевий конус; 3 — палички сітківки; 4 — зоровий нерв; б — схема омаїдія: 1 — кристалева лінза; 2 — кристалевий конус; 3 — пігментна клітина; 4 — ретинальна клітина

яких становить 25000 у жуків, 8000÷10000 у бджіл, 4000 у мух, 100÷1000 у мурашок. Основними елементами омаїдія є кристалева лінза (роگیвка), кристалевий конус, пігментні клітини, фоторецептор, рабдом (ретинальна клітина). Зовнішній вигляд складного ока наведено на рис. 28.3,а, а омаїдія — на рис. 28.3,б. У бджоли, наприклад, до внутрішнього кінця кристалевого конуса приєднано вісім радіально розміщених зорових клітин, завдяки яким комаха здатна сприймати поляризацію відбитого сонячного випромінювання і здійснювати орієнтацію у просторі.

Щодо здатності комах сприймати колір, то слід зазначити, що взагалі стимулюючою дією характеризуються довжини хвиль в діапазоні 250÷700 нм. Вважається, що метелики, мухи і деякі жуки реагують на синій колір; бджоли — на червоний, жовтий, зелений і синьо-зелений. Крім того, комахам властива чутливість до ультрафіолетового випромінювання. Але можливим поясненням відвідування комахами кольорових квітів є їх здатність розрізняти інтенсивність випромінювання, відбитого від різних частин квітки.

### 28.2.2. Зоровий аналізатор риби

Структуру ока риби наведено на рис. 28.4. Для захисту рогівки від великих тисків і піску око обладнане *оболонкою* — твердим прозорим утворенням. Коефіцієнти заломлення оболонки, рогівки і води приблизно однакові. Фокусування ока на об'єкт здійснюється за допомогою *втягуючого м'яза*, що пересуває кришталік вздовж оптичної осі рогівки. Форма ока залежить від способу життя риби — мешканці глибин мають рурчасту форму, причому сітківка розмі-

щена так, щоб забезпечити фокусування на об'єкти на різних відстанях. Форма ока інших типів риби нагадує правильний трикутник; така форма забезпечує різні фокусні відстані для об'єктів, розташованих нагорі або безпосередньо перед рибою. У акули, наприклад, очі взагалі позбавлені оболонки. Крім того, фокусування ока на об'єкт здійснюється за допомогою м'яза, який наближує кришталік до рогівки (на відміну від інших риби).

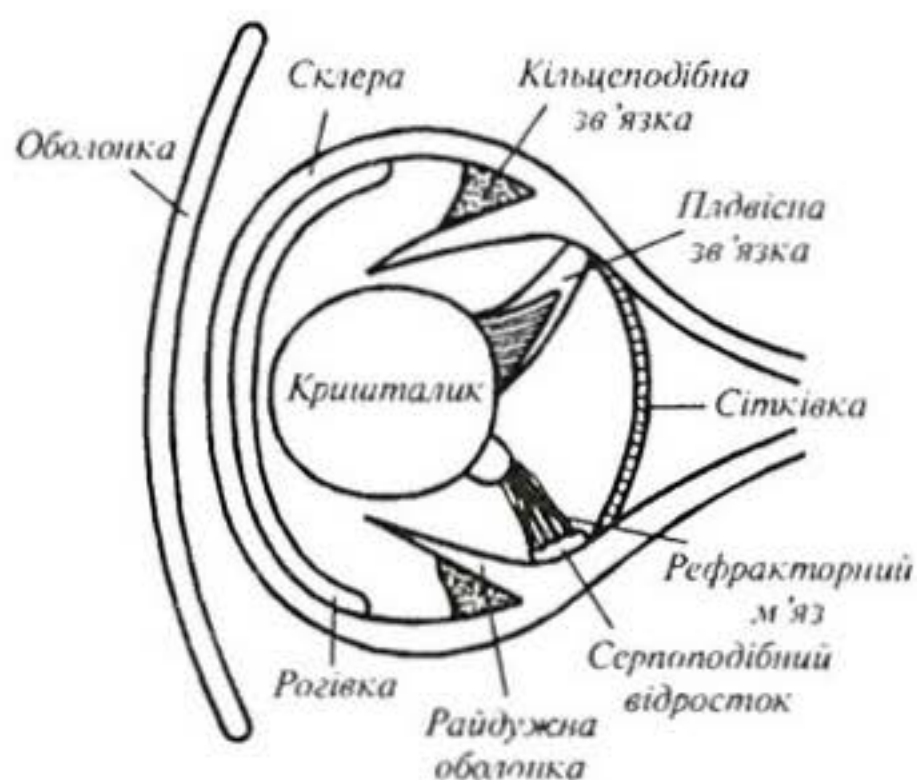


Рис. 28.4. Зоровий аналізатор риби

### 28.2.3. Зоровий аналізатор птавиці

Зоровий аналізатор птахів призначений не тільки для створення зорових зображень; функції його полягають також в формуванні кольорових образів, що важливо з точки зору розпізнавання статевих партнерів, суперників та ворогів. Більшість птахів проводить весь свій час в пошуках корму, але спосіб життя у птахів різний. Вони можуть вести денний або нічний спосіб життя; деякі з них літають високо над поверхнею землі. Все це накладає відбиток на будову і функції зорового аналізатора, що сформувався протягом еволюції. Можна розрізнити чотири основних типи будови ока у птахів.

*Рурчастий (циліндричний)* тип ока характеризується грушеподібною формою, значною сітківкою і істотно меншою напівсферичною рогівкою, що виступає вперед (рис. 28.5,а). Чотири п'ятих ока сховано в черепній скрині птаха. Є чітко виражена *склеротична кісточка*. Такий тип ока зустрічається у сов.

*Плаский* тип ока властивий курям (рис. 28.5,б). Він характеризується сплющеною овальною формою.

*Кулеподібний* тип ока характерний для птахів-хижаків. Око цього типу має кулеподібну форму з опуклою рогівкою (рис. 28.5,в). Діа-

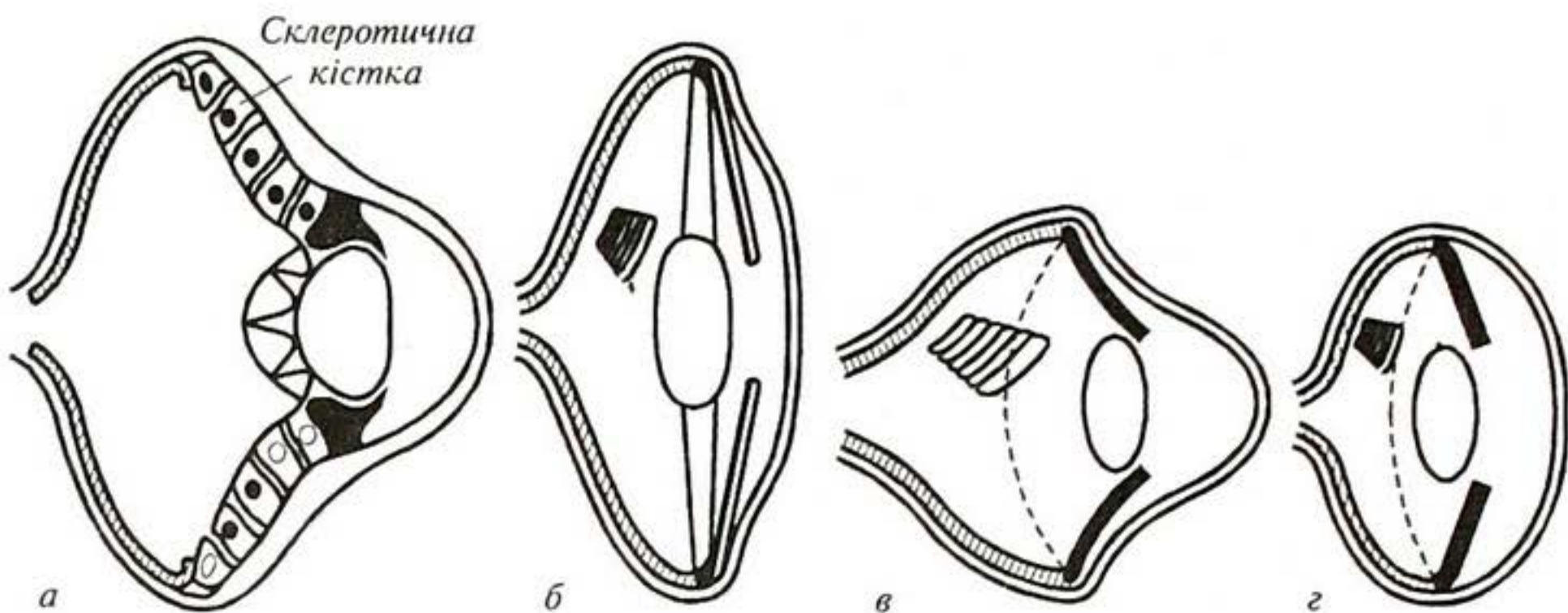


Рис. 28.5. Основні типи будови ока у птахів (пояснення в тексті)

метр ока у хижаків менший, ніж у звичайних птахів. Такий тип ока забезпечує гостре фокусування на великих відстанях.

*Пласко-сферичний* тип ока у співочих птахів. Характерними рисами такого ока є ледве приплюснута, але сферична форма рогівки (рис. 28.5,г).

Таким чином, птахи відрізняються не лише за формою ока, але й його внутрішньою структурою. Очні яблука більшості птахів обладнані двома специфічними пристроями для підвищення гостроти зору — центральною ямкою і гребінцем.

*Центральна ямка* являє собою надчутливу область, насичену колбочками, розташована на сітківці. Зазвичай центральна ямка має форму вузької смужки. Це особливо доцільно для птахів, які полюють за комахами — видовжена форма цього органа дає можливість контролювати комах без додаткових поворотів голови. Око хижака обладнане двома центральними ямками, кожна з яких настроєна на різні об'єкти. Те ж саме можна сказати щодо швидких мисливців за комахами — ластівок і стрижив. Голуби, наприклад, взагалі позбавлені центральної ямки.

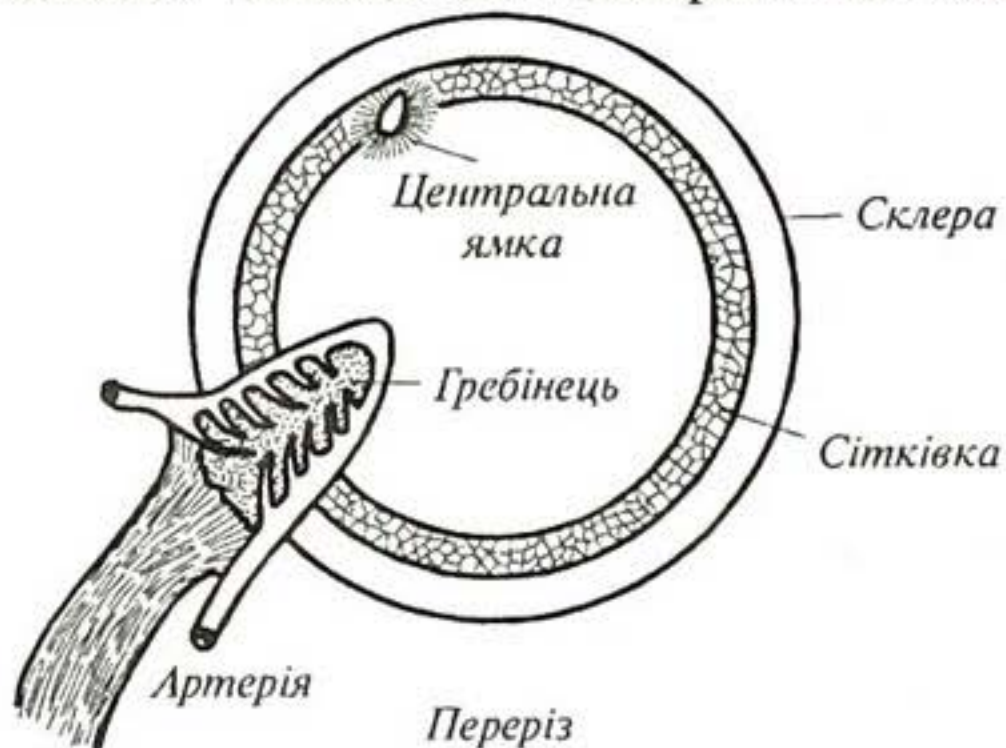


Рис. 28.6. Гребінець ока птаха в перерізі

*Гребінець* являє собою складчасте пігментоване утворення, насичене кровоносними судинами і з'єднане з оптичним нервом (рис. 28.6). Кількість складок в гребінці залежить від способу життя — у свійської птиці вона становить: 15 у курки, 13 — у качки і гуски. Птахи, що літають на великих висотах, мають іншу кількість складок: 24 у галки, 23-26 у ворони. Існують гіпо-

тези, відповідно до яких гребінець: 1) виконує функції стабілізатора тиску всередині ока, зміни якого супроводжують швидкий рух птахів; 2) є сенсорним органом, здатним відчувати зміни тиску при акомодатції та забезпечувати гостроту зору віддалених об'єктів; 3) послаблює дію сфокусованого кришталіком сонячного випромінювання, що пошкоджує сітківку; 4) бере участь у навігаційних здатностях птахів орієнтуватися відносно Сонця; 5) відчуває вплив зовнішнього магнітного поля і сонячного випромінювання через участь кровоносної системи гребінця як сукупності струмопровідних витків, розміщених у двох взаємно перпендикулярних площинах, і використовує фотомагнітний ефект для орієнтації у просторі.

#### 28.2.4. Зоровий аналізатор ссавців

Сенсорна інформація щодо навколишнього середовища сприймається людиною або твариною у вигляді змін таких параметрів як інтенсивність світла, довжина світлової хвилі, форма, розміри і положення об'єкта. Основний елемент *зорового аналізатора* (сенсорної системи, що перетворює оптичні стимули в послідовність нервових імпульсів) є *око*; його призначення — фокусування зображення на сітківку, регуляція кількості світла, яке бере участь у формуванні зображення, перетворення зображення фоторецепторною системою ока і передача інформації в мозок.

Будову ока ссавців в горизонтальній площині наведено на рис. 28.7. Зовнішній захисний шар, що оточує очне яблуко, називається *склерою*. На передній частині ока склера переходить в прозору шарувату структуру, що називається *рогівкою*. Задніх дві треті-

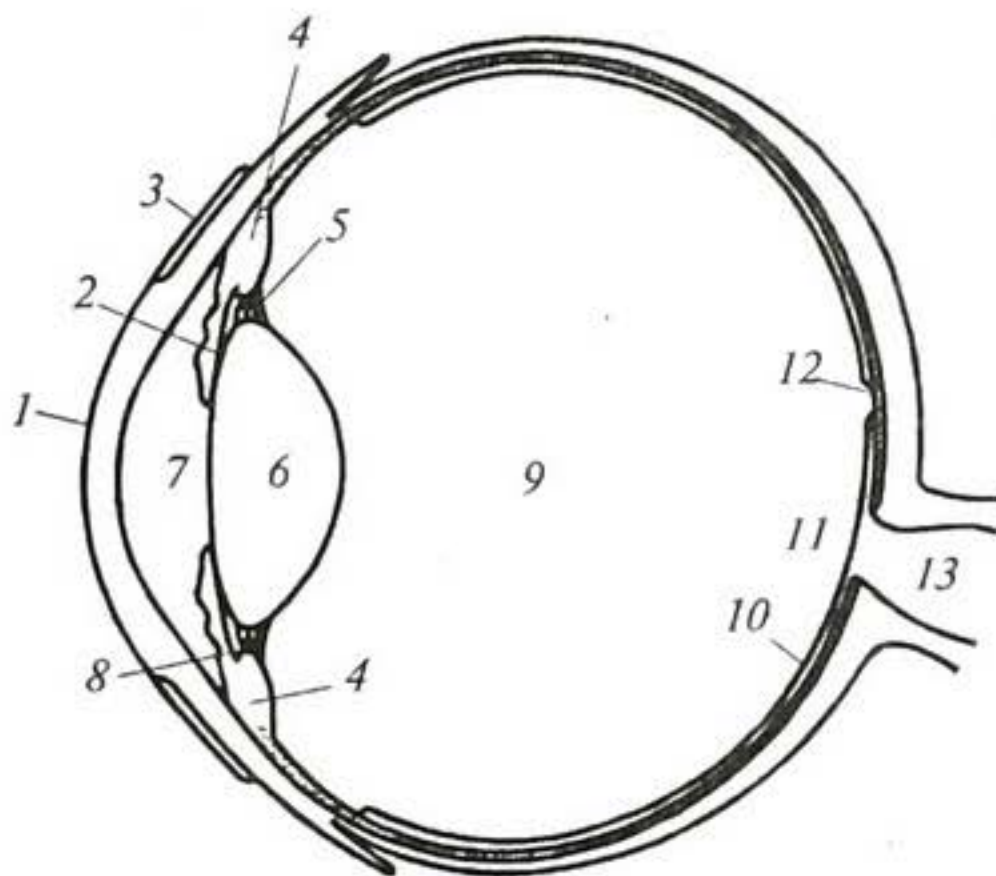


Рис. 28.7. Будова ока ссавців: 1 — рогівка; 2 — райдужна оболонка; 3 — кон'юнктива; 4 — війчастий м'яз; 5 — зв'язки; 6 — кришталік; 7 — передня камера; 8 — зв'язки; 9 — склисте тіло; 10 — сітківка; 11 — оптичний диск; 12 — центральна ямка; 13 — зоровий нерв



ни ока вкриває пігментований шар — *судинна оболонка*. Саме в цій оболонці знаходиться *сітківка*, яка містить фоторецептори. Світло потрапляє в око крізь рогівку в *передню камеру*; так само, як і *задня камера*, вона заповнена прозорою рідиною — *водянистою вологою*. Між передньою і задньою камерами розміщена *райдужна оболонка*, що виконує функції діафрагми. Завдяки скороченню або розслабленню м'язів змінюється величина діаметра *зіниці* — отвору, через який світло проходить в задню частину ока. За райдужною оболонкою міститься *кришталік*, радіус кривизни якого може бути змінений за допомогою *війчастого тіла*. Простір між кришталіком та сітківкою заповнений *склоподібним тілом* — желатиноподібною рідиною. На сітківці, якої в решті-решт досягає світло, є *оптичний диск*, до якого сходяться нервові волокна. Там же розташована *центральна ямка*, яка є місцем найкращого зору. Розміри ока у ссавців варіюють в широких межах (табл. 28.1).

28.1. Розміри ока у ссавців

Тварина	Поздовжній розмір (мм)	Вертикальний розмір (мм)	Поперечний розмір (мм)
Кінь	44	50	54
Корова	37	42	43
Свиня	22	24	25
Вівця	31	33	34

Не завжди зміна розмірів ока супроводжується адекватною зміною структурних елементів — товщина сітківки змінюється не так істотно, як розміри інших елементів.

Цікаво розглянути властивості зорового аналізатора деяких живих істот, які в процесі еволюції набули специфічних рис. До таких істот можна сміливо віднести коня. Очне яблуко коня асиметричне (рис. 28.8); рогівка розташована поблизу верхньої ділянки ока; сітківка посунута відносно оптичної осі ока. Війчасті м'язи відіграють незначну роль в зміні радіуса кривизни кришталіка. Здатність

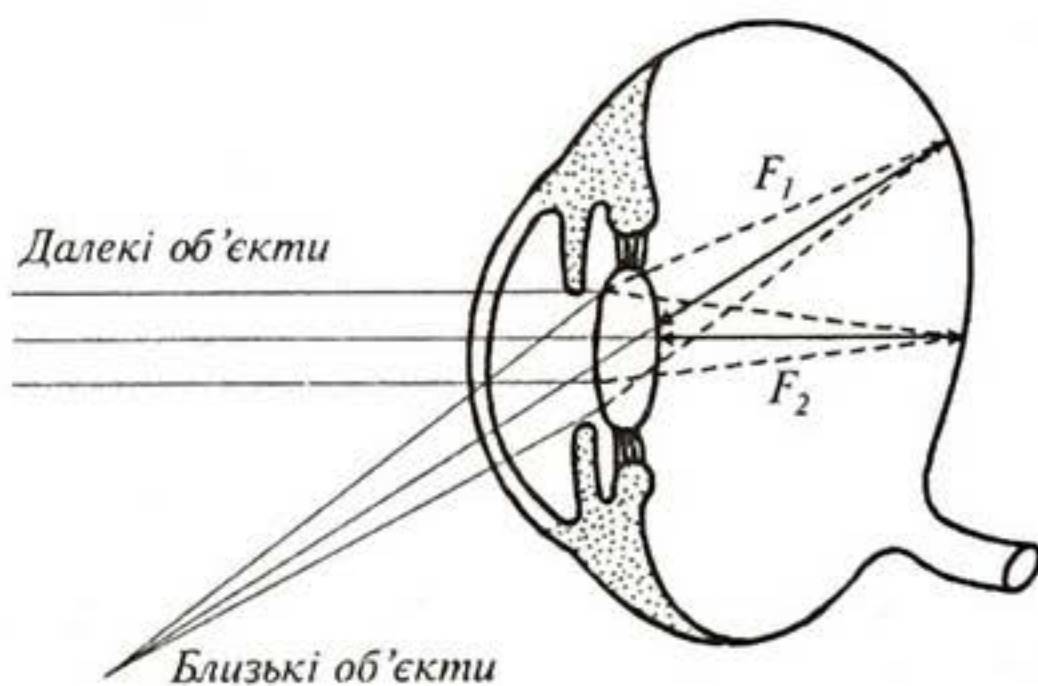


Рис. 28.8. Асиметрична форма очного яблука коня

коня фокусувати зоровий аналізатор на об'єкти, розташовані на різних відстанях, досягається простим нахилом голови. З кожною зміною положення голови коня змінюється фокусна відстань — від 40 до 45 мм. Ще однією особливістю зорового аналізатора коня є форма зіниці — у молодих коней вона кругла, після 5-6 років форма зіниці наближається до еліпсоїдальної.

### 28.2.5. Механізми зору тварин

Світловий потік, що потрапляє в око, зазнає заломлення на роговій оболонці ( $n = 1,376$ ;  $r = 7,8$  мм). Після цього має місце заломлення під час переходу з рогової оболонки в передню камеру ( $n = 1,336$ ). Подальше заломлення відбувається в кришталіку, показник заломлення якого поступово зростає від 1,386 до 1,406 в напрямку його ядра. За кришталіком прямує внутрішня камера ока ( $n = 1,336$ ). Таким чином, структура ока включає чотири сферичних межі розподілу середовищ з різними показниками заломлення (рис. 28.9). Розрахунки свідчать про те, що оптична сила ока становить: 58,64 дптр для людини; 61,3 дптр для вівці; 47,7 дптр для корови; 78,2 дптр для коня.

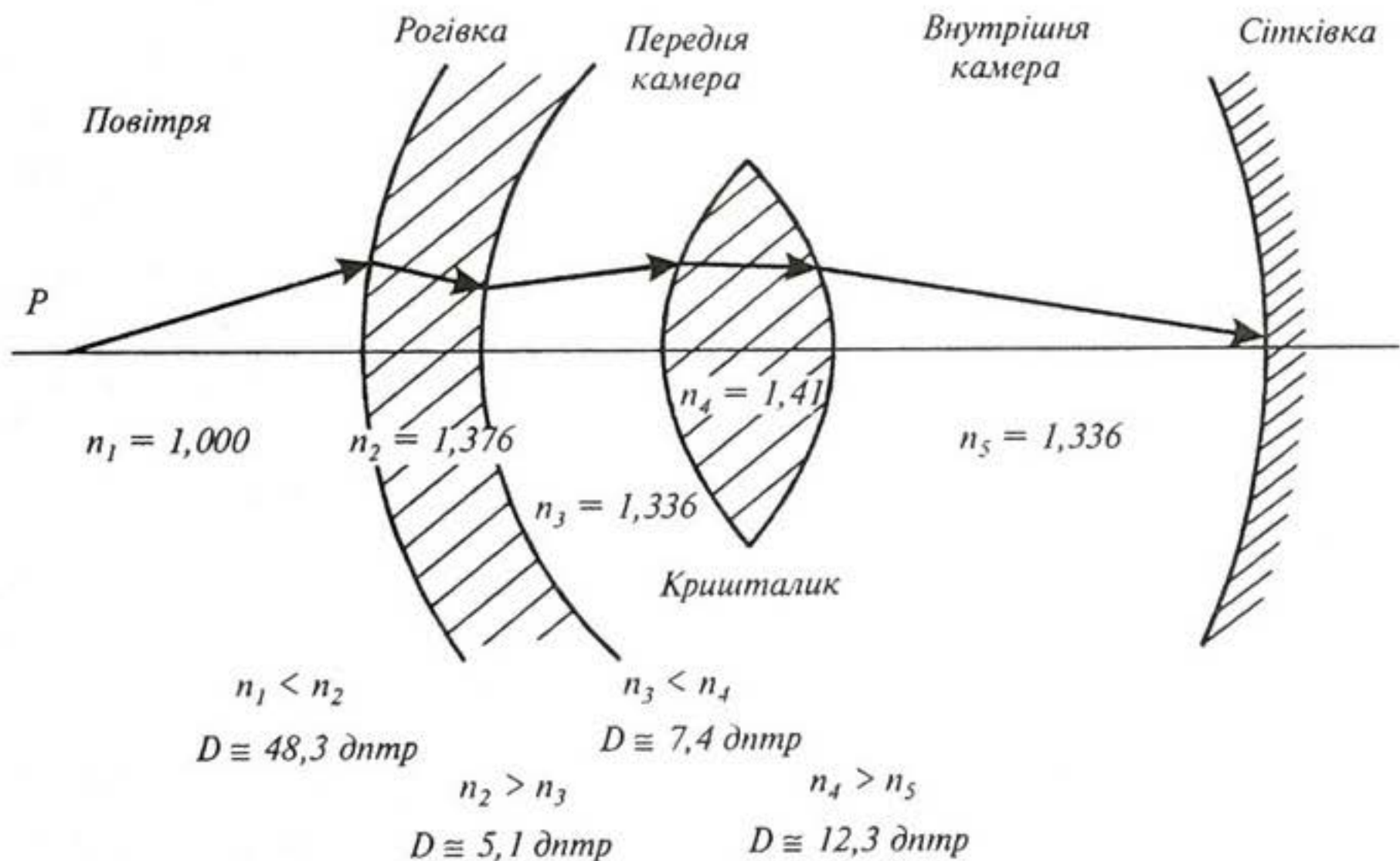


Рис. 28.9. Заломлююча здатність ока

Сітківка ссавців складається з п'яти типів клітин — фоторецепторних, біполярних, горизонтальних, амакринових і гангліозних (рис. 28.10). Фоторецепторні клітини (палички і колбочки) перебувають у контакті з біполярними клітинами, що здійснюють зв'язок з гангліозними клітинами. Останні передають потенціал дії мозку.

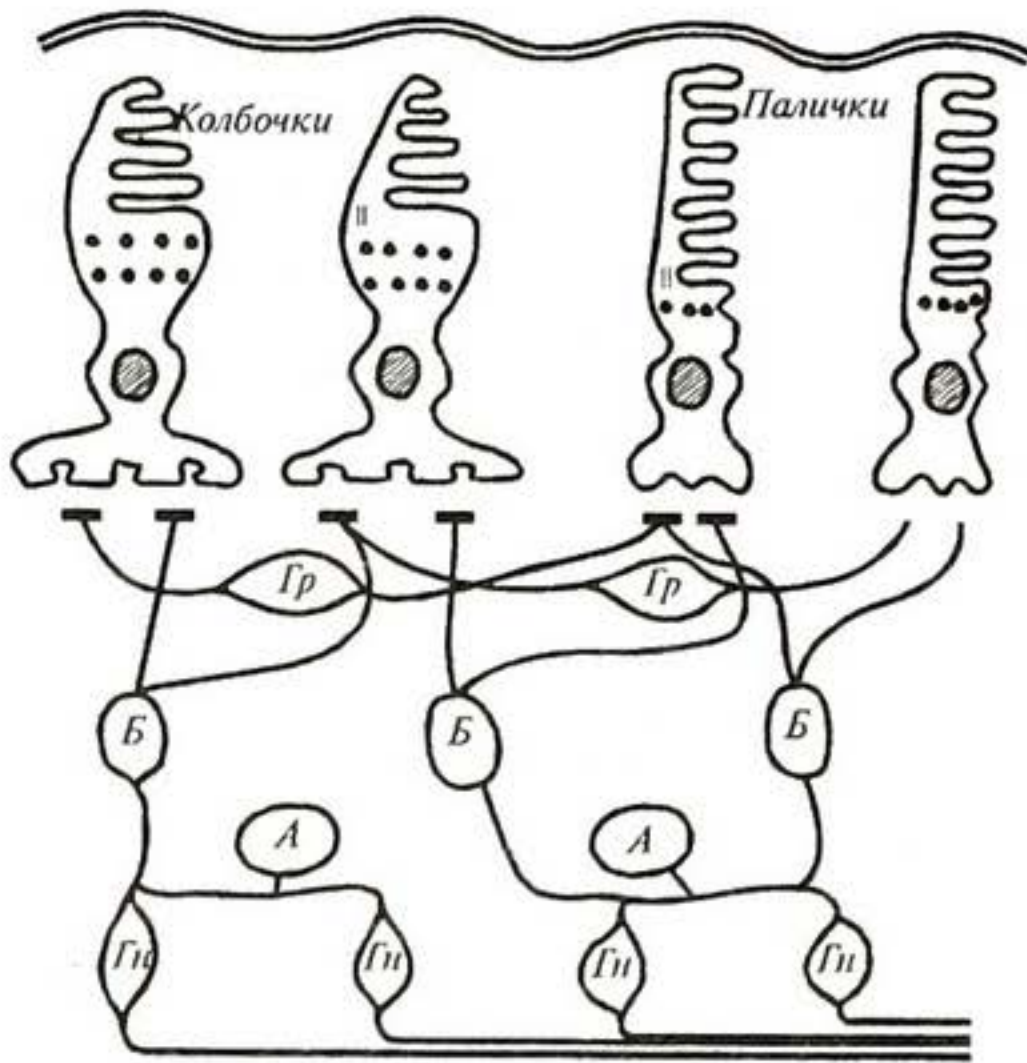


Рис. 28.10. Основні типи клітин сітківки: А — амакринові; Б — біполярні; Гр. — горизонтальні; Гн — гангліозні

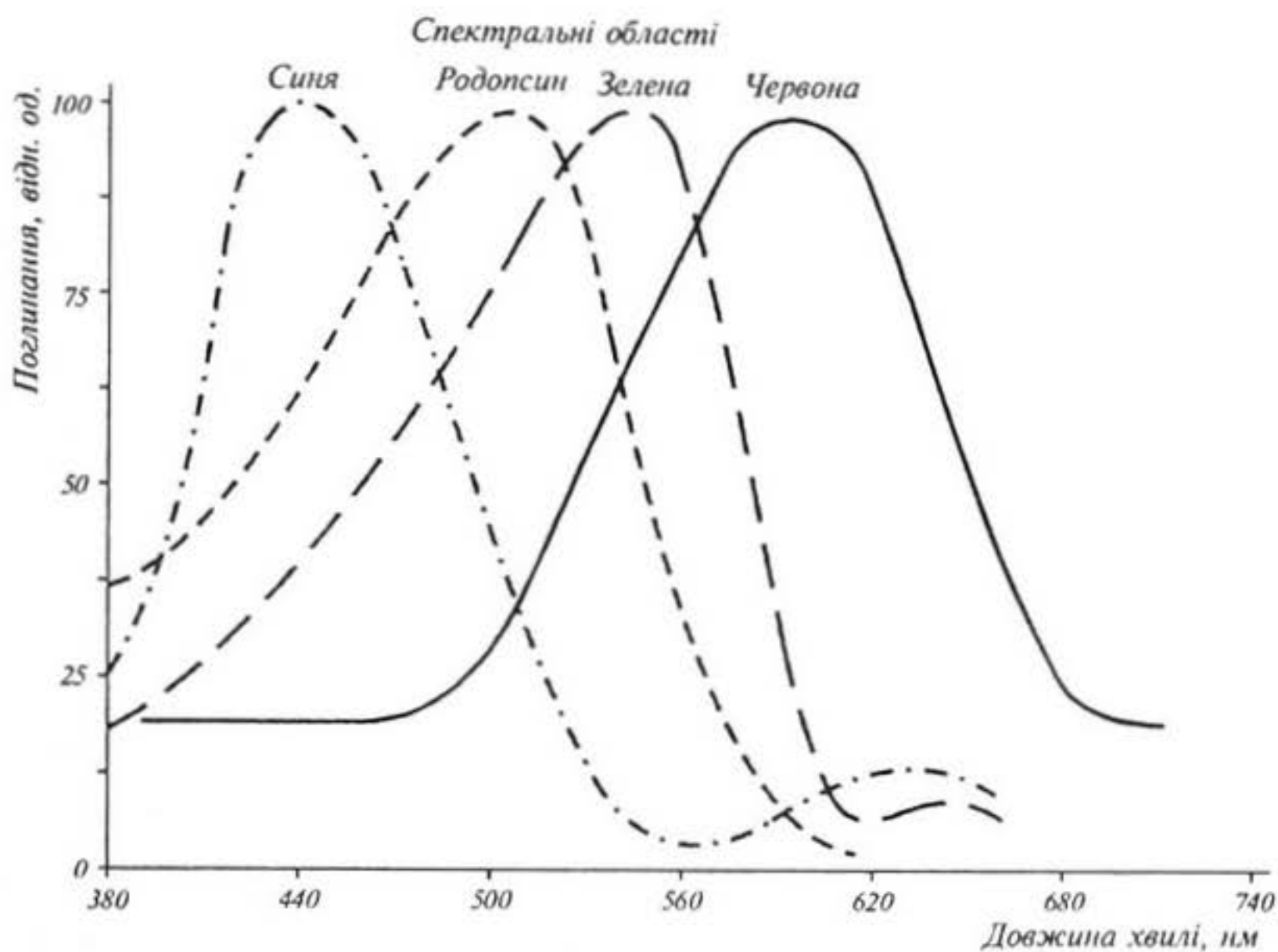
Горизонтальні клітини з'єднують по горизонталі фоторецепторні і гангліозні клітини; амакринові з'єднують по горизонталі біполярні і гангліозні клітини.

Фоторецепторні клітини містять зорові пігменти — *родопсин* в паличках і *йодопсин* в колбочках. Родопсин являє собою складний білок, що складається з білка *опсину* та хромофорної групи — *ретиналю*. Йодопсин також містить ретиналь, але відрізняється від родопсину білковою частиною. Під дією світла молекула ретиналю збуджується, зазнаючи при цьому фотоізомеризації. Потім відбувається серія конформаційних перебудов молекули білка опсину, пов'язаних із переміщенням по ній заряду, що утворює *ранній рецепторний потенціал*, а через 1 мс — *пізній рецепторний потенціал*. Під впливом світла відбувається зміна провідності іонних каналів, що приводить до гіперполяризації клітинної мембрани. Очевидно, аналогічні процеси відбуваються й в колбочках: поглинання кванта світла молекулою йодопсину викликає її збудження та появу раннього рецепторного потенціалу. Таким чином, процеси зору являють собою складний ланцюг ініціації світлом фотохімічних реакцій в зорових пігментах, ізомеризації молекул фотопігментів, зміни проникності мембрани фоторецептора, утворення електричного потенціалу в фоторецепторній мембрані і передачі електричного імпульсу від зорового нерва мозку.

### 28.2.6. Кольоровий зір тварин

У кольоровому сприйнятті зображень особливу роль відіграють колбочки. Наявність трьох типів колбочок визначає три основних області поглинання світла: С (синьої), З (зеленої) і Ч (червоної). Спектральні криві колбочок наведено на рис. 28.11. У людей порушення сприйняття кольору (*дальтонізм*) пов'язане саме з недостатньою активністю будь-яких груп колбочок. Чутливість до кольору тварин зумовлена способом життя.

Слід зазначити, що проблема вивчення кольорового зору сільськогосподарських тварин ще далека від повного розуміння.



**Рис. 28.11.** Спектри дії родопсину та пігментів колбочок

Відомо, що велика рогата худоба здатна реагувати на кольори в довго- та середньохвильовій області спектра (550÷700 нм), але короткі хвилі (синю область) вона сприймає з труднощами.

Вівця і кінь здатні відрізнити темно-зелений корм від світло-зеленого, але не зрозуміло, що тут впливає — яскравість чи кольорові відтінки корму.

У птахів здатність реагувати на колір пов'язана з необхідністю розпізнавати друзів або ворогів; кольорове забарвлення птахів є важливою статевою ознакою. Такі свійські птахи як кури не реагують на синій колір.

Кольорове відчуття риб теж залежить від способу життя — їх здатність сприймати ті чи інші довжини світлових хвиль залежить від глибини мешкання — збільшення глибини викликає спектральний зсув в короткохвильову область. Глибоководні риби не здатні відрізнити кольори. В освітлених сонцем водоймах глибина 4,5 м є, мабуть, межею кольорового сприйняття риб. Хоча літературні дані з цієї теми повні суперечностей, можна стверджувати щодо повної відсутності кольорового зору у хрящових, акул, скатів.

Щодо комах, таких як комари, деякі види мух, міль, то їх чутливість займає область 400÷600 нм з максимумом при 500 нм; в той же час є винятки — максимум спектральної чутливості аскалафід знаходиться при 350 нм. Спектральна чутливість зору бджіл характеризується зсувом в ультрафіолетову частину спектра. Максимум спектральної чутливості безхребетних займає область 450÷500 нм і ніколи не перевищує 560 нм.

### 28.2.7. Области зору у тварин

У більшості сільськогосподарських тварин очі розміщені зобабіч голови. Через це область монокулярного зору (простору, який тварина бачить кожним оком) перевищує область, яку бачить тварина, якщо очі її спрямовані уперед. Але область бінокулярного зору (тобто, простору, який тварина бачить при фіксованому положенні обох очей) у сільськогосподарських тварин вужча (рис. 28.12). Так, розбіжність зорових осей у котів і собак не перевищує  $20 \div 50^\circ$ , тоді як у сільськогосподарських тварин цей кут достатньо великий (табл.28.2).

#### 28.2. Поле зору у сільськогосподарських тварин, в градусах

Тварина	Розходження зорових осей	Загальна область зору	Поле бінокулярного зору
Кінь	до 130	330+350	30+70
Велика рогата худоба	90+115	330+360	25+50
Вівця	90+100	330+360	25+50
Коза	100+120	320+340	20+60
Свиня	70	300	30+50
Кріль	150+170	360 або менше	10+35

Тварини одного виду, але різних порід, можуть характеризуватися різним розміщенням очей. Так, наприклад, скакові коні мають очі, спрямовані більш фронтально порівняно з очима коней — ваговиків, яким притаманна більш широка лобова частина голови. «Мертва зона» попереду голови коня завдає чимало прикрощів наїзнику. В цілому області зору коня залежать від положення його голови. Кінь, який пасеться, має хороший бінокулярний зір у передньому напрямку, хороший монокулярний зір у нижньому і задньому напрямках, «мертвий» простір у верхньому напрямку. Кінь, який

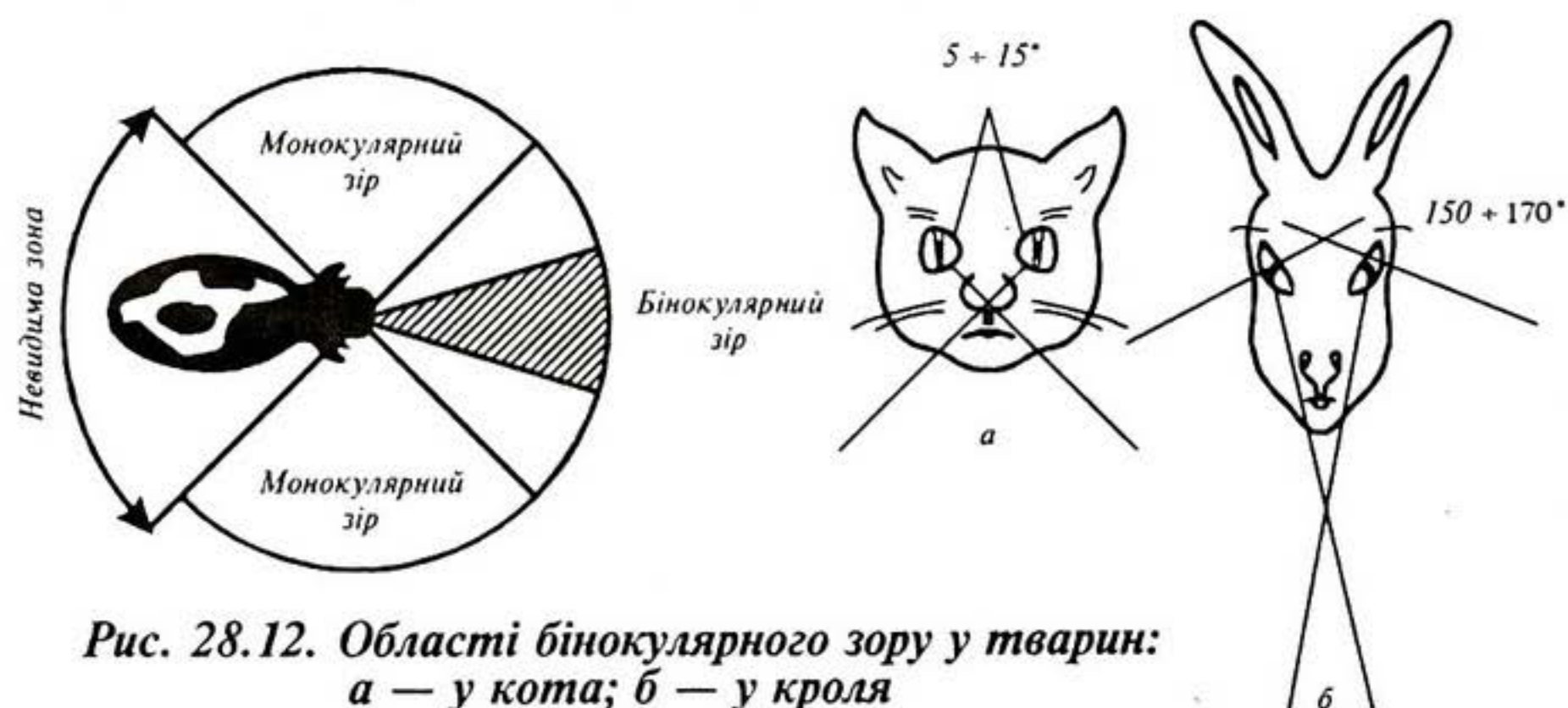


Рис. 28.12. Области бінокулярного зору у тварин: а — у кота; б — у кроля

стоїть з піднятою головою, характеризується хорошим бінокулярним і монокулярним зором в прямому напрямку, слабким монокулярним зором у задньому напрямку і нічого не бачить унизу.

Області зору птахів визначаються їх способом життя. Ряд птахів відзначається вузькою, уперед спрямованою діаграмою бінокулярного зору (сови, голуби, соколи). Птахи з очами, розташованими по обидва боки голови мають виключно монокулярний зір (кури, папути, баклани).

Риба, що пливе у водоймі, бачить навколишні об'єкти у своєрідному полі зору, характер якого визначається законами відбивання і заломлення світла на межі «повітря-вода» (рис. 28.13).

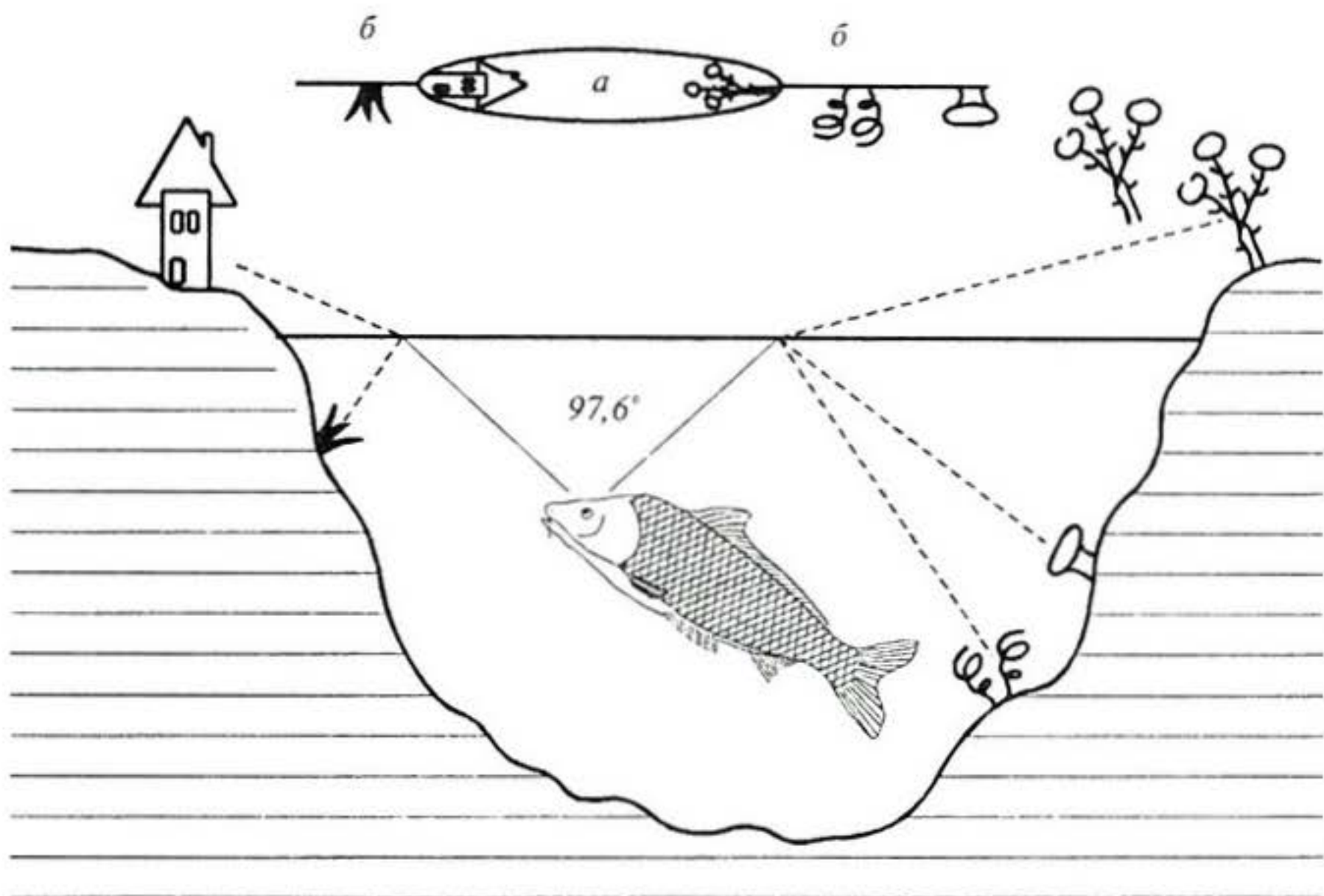


Рис. 28.13. Поле зору риб: *a* — поле прямого зору; *б* — поле відбитого зору

### 28.2.8. Характеристики зору тварин

Важливим параметром, що характеризує розмір зображення на сітківці, є *кут зору*, який утворюється двома променями, що йдуть від крайніх точок предмета (рис. 28.14). Кут зору  $\beta$  пов'язаний із відстанями  $l$  та  $L$  від вузлової точки  $N$  до сітківки і об'єкта відповідно, з розмірами  $b$  зображення та  $B$  об'єкта:

$$\beta = \frac{b}{l} = \frac{B}{L}. \quad (28.1)$$

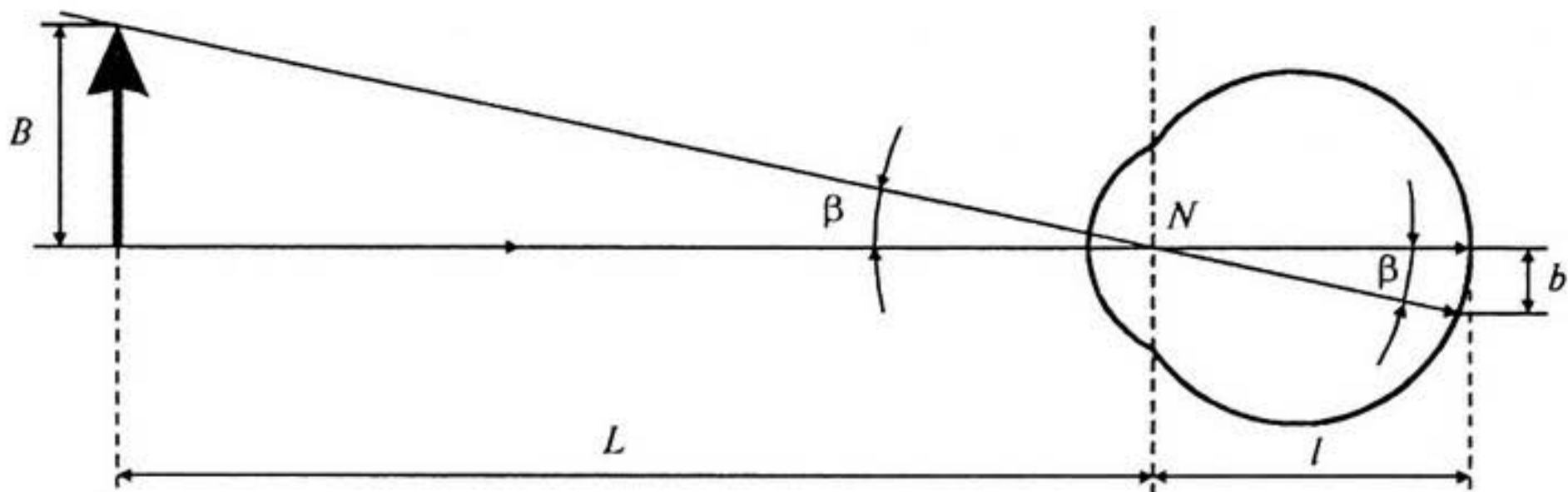


Рис. 28.14. Зв'язок між розміром  $B$  предмета, відстанню  $L$  його від ока і кутом зору  $\beta$ :  $l$  — відстань між вузловою точкою  $N$  і сітківкою;  $b$  — розмір зображення

Звідси отримуємо вираз, за яким можна визначити розмір зображення на сітківці:

$$b = l \frac{B}{L}. \quad (28.2)$$

Роздільна здатність ока визначається як *найменший кут зору*, при якому око в змозі розрізнити дві точки об'єкта. Цей кут дорівнює близько  $1'$ , що відповідає відстані між точками, рівній  $70 \text{ мкм}$ , якщо вони знаходяться на відстані  $L = 0,25 \text{ м}$ . Розмір зображення  $b$  в цьому випадку дорівнює  $5 \text{ мкм}$ .

У медицині роздільну здатність ока оцінюють *гостротою зору*. За норму гостроти зору приймається одиниця. У цьому випадку найменший кут зору дорівнює  $1'$ . Якщо пацієнт демонструє найменший кут зору  $4'$ , то гострота зору дорівнює  $1/4 = 0,25$ .

Роздільну здатність ока можна оцінити на основі *критерію Релея*: якщо на зіницю потрапляє світло від двох точкових джерел, то дифракційні максимуми можуть перекриватись або не перекриватись. Граничній ситуації відповідає збігання центрального максимуму дифракційної картини, отриманої від першого джерела, з першим мінімумом дифракційної картини, отриманої від другого джерела (рис. 28.15).

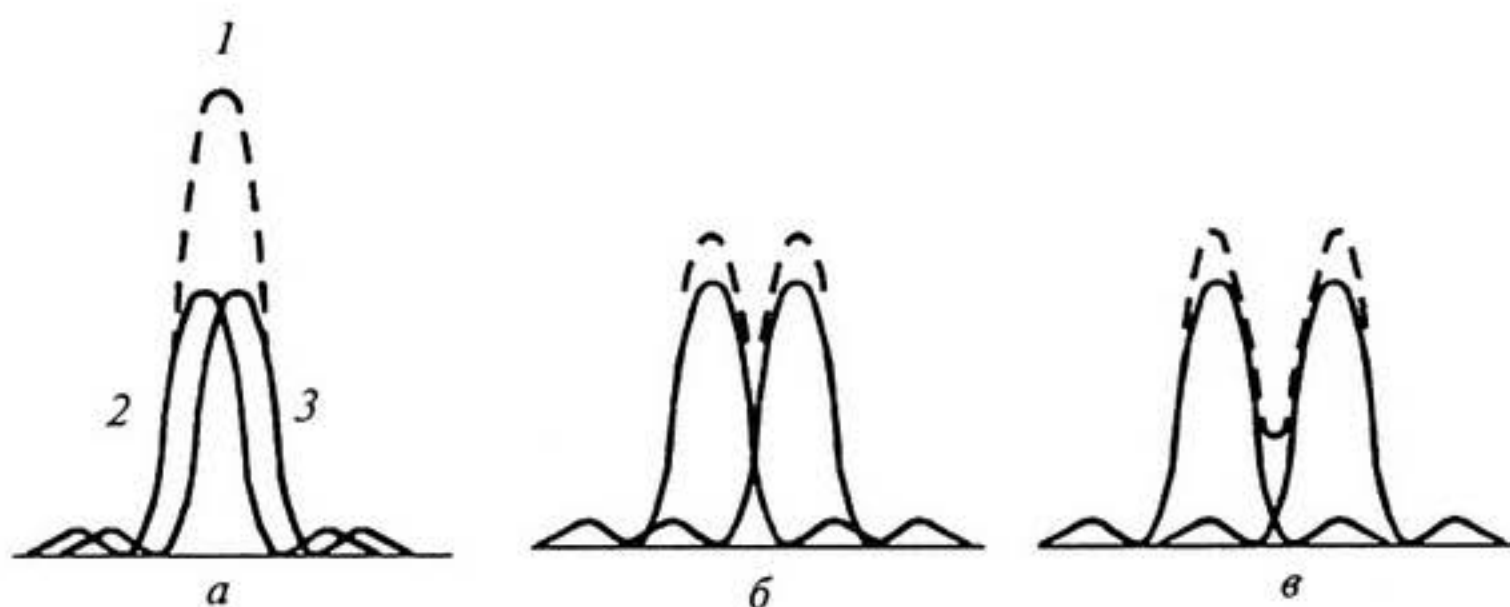


Рис. 28.15. Результуюча інтенсивність світла (1) від двох точкових джерел (2 і 3), випромінювання яких проходить через кругову апертуру: а — розділення відсутнє; б — часткове розділення; в — повне розділення

Зіниця являє собою коловий отвір, при проходженні якого світло зазнає дифракції. Дифракційна картина — це концентричні світлові і темнові кільця, так звані *диски Ейрі* (рис. 28.16). Кут  $\alpha$ , під яким видно перший темновий диск, зв'язаний з діаметром  $d$  зіниці і довжиною хвилі  $\lambda$  світла співвідношенням:

$$\alpha = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}. \quad (28.3)$$

Спроможність ока чітко бачити віддалені на різні відстані об'єкти називаються *акомодацією*. Цей параметр вимірюють оптичною силою  $D_a$  тієї тонкої скляної лінзи, яка при розміщенні перед пристосованим на дальню точку оком настроїла б око на ближню точку:

$$D_a = \frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_b}, \quad (28.4)$$

де  $t_d$  і  $t_b$  — відстані до дальньої та ближньої точок відповідно. «Дальня точка» відповідає максимальному віддаленню об'єкта, при якому ще можливе фокусування зображення на сітківці. Найбільш близьке розміщення об'єкта, при якому можливе різке його зображення на сітківці, відповідає «ближній точці». Величини  $1/t_d$  і  $1/t_b$  вимірюються в  $\text{м}^{-1}$ , тобто в *діоптріях*. Звичайно в геометричній оптиці на рисунках прийнято напрямком поширення світла зліва направо. Відрізки  $t_d$  і  $t_b$  вважаються додатними, якщо їх напрямком збігається з напрямком поширення світла, і навпаки.

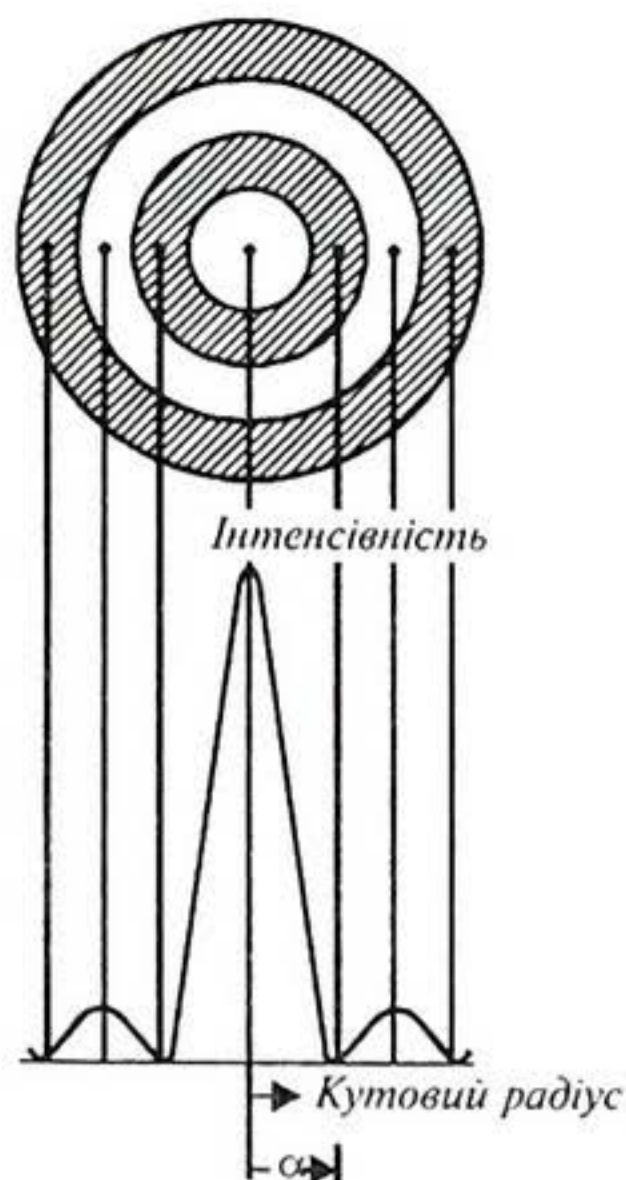


Рис. 28.16. Структура дисків Ейрі і залежність інтенсивності світла від кутового радіусу  $r$

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Оцінити найменший кут зору і розмір зображення на сітківці, якщо діаметр зіниці 2 мм, а довжина хвилі падаючого світла 500 мкм.

### Розв'язок

Підставляючи в вираз (28.3) числові значення, отримаємо:

$$\alpha = 1,22 \cdot \frac{500 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-3}} = 3,05 \cdot 10^{-4} \text{ радіан.}$$

Оскільки  $1^\circ = 60' = 0,01745$  радіана (див. додаток), можна визначити найменший кут зору  $\alpha$  в мінутах:

$$\alpha = \frac{3,05 \cdot 10^{-4} \cdot 60}{0,01745} = 1,05'.$$



З урахуванням того, що відстань  $l$  між вузловою точкою  $N$  і сітківкою дорівнює 17 мм (див. рис. 28.14), можна визначити розмір зображення  $b$ :

$$b = l \cdot \alpha = 17 \text{ мм} \cdot 3,05 \cdot 10^{-4} \text{ рад} = 0,0052 \text{ мм}.$$

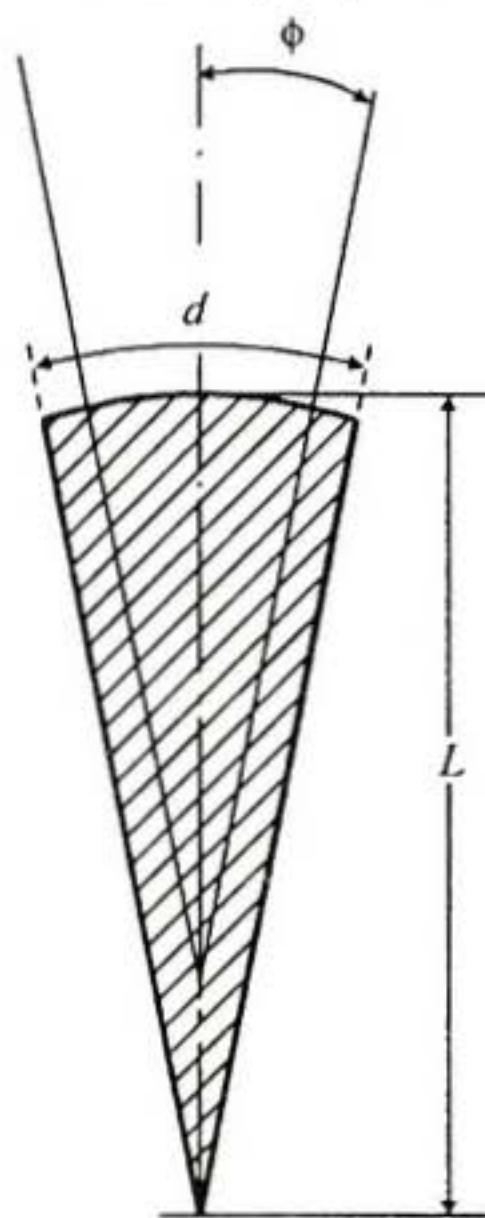
### Контрольне завдання № 28.1

Визначити найменший кут зору і розмір зображення на сітківці, якщо діаметр зіниці 6 мм, а довжина хвилі падаючого світла 440 нм.

Відповідь: 0,308'; 0,00152 мм.

### Приклад

Оматидій у змозі сприйняти світло, що потрапляє в межі кута  $\phi$  (рис. 28.17). Для отримання максимальної роздільної здатності зорового аналізатора необхідно зменшувати кут  $\phi$  шляхом або зменшення довжини оматидія  $L$ ,



або зменшення його ширини  $d$  (в природі перевага віддається останньому). Але при цьому може мати місце дифракція світла на вихідній зіниці оматидія.

Визначити, на який кут  $\theta$  дифрагуватиме світло, потрапляючи на оматидій, якщо він шириною  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  см, а довжина хвилі світла  $\lambda = 500$  нм.

### Розв'язок

Дифракція світла на отворі діаметром  $d$  описується рівнянням:

$$d \cdot \sin\theta = \lambda;$$

звідки

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{d}.$$

Підставляємо числові значення:

$$\sin\theta = \frac{500 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 2,5 \cdot 10^{-2}.$$

Звідси

$$\theta = 1,43^\circ.$$

### Контрольне завдання № 28.2

Визначити кут дифракції за умовою попередньої задачі, якщо довжина хвилі падаючого світла дорівнює: а) 400 нм; в) 700 нм.

Відповідь:  $\theta_1 = 1,146^\circ$ ;  $\theta_2 = 2^\circ$ .

### Приклад

Оцінити акомодацию ока, якщо дальня точка знаходиться в нескінченності, а ближня — на відстані 10 см.

### Розв'язок

Використовуємо рівняння (28.4):

$$D_a = \frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_b} = \frac{1}{-\infty} - \frac{1}{-0,1} = 10 \text{ діоптрій.}$$

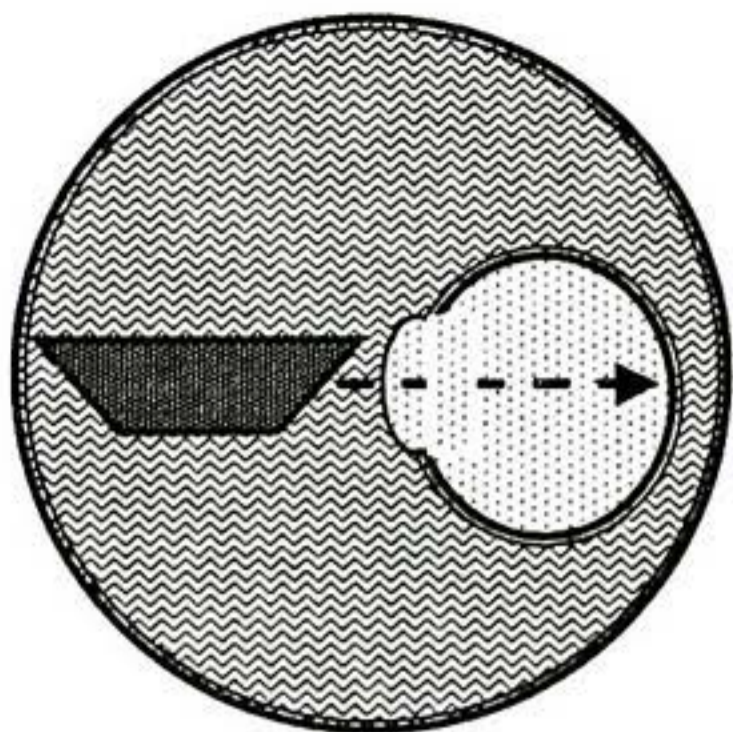
### Контрольне завдання № 28.3

Чому дорівнює акомодация ока, якщо  $t_d = -\infty$  і  $t_b = -0,4$  м?

Відповідь:  $D_a = 2,5$  діоптрій.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які характеристики оптичного випромінювання впливають на тварину?
2. Охарактеризувати особливості зорового аналізатора у комах.
3. Зобразити і назвати основні елементи зорового аналізатора тварин.
4. Дати характеристику відмінних особливостей зорового аналізатора риб.
5. Які функції гребінця в зоровому аналізаторі птахів?
6. Дати характеристику відмінних особливостей зорового аналізатора коня.
7. Назвати основні фоторецепторні клітини та зорові пігменти.
8. Пояснити особливості кольорового зору у тварин.
9. Що таке область зору у тварини?
10. Що називається найменшим кутом зору?
11. Сформулювати критерій Релея.
12. Пояснити, що таке акомодация ока.



## 29. ПРИКЛАДНА ОПТИКА

### 29.1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОРОВОГО АНАЛІЗАТОРА

#### 29.1.1. Принципи електроретинографії

Опромінювання світлом зорового аналізатора приводить до послідовних перетворень родопсину — від 11-цис ретиналю до транс-модифікацій (рис. 29.1). Цей фотохімічний процес супроводжується відповідними змінами електричного потенціалу, що вимірюється на сітківці. Дослідження функціонального стану сітківки ока шляхом реєстрації біологічних потенціалів, що виникають у ній при світловому подразненні, називається *електроретинографією*. Реєстрацію біопотенціалів здійснюють за допомогою спеціально

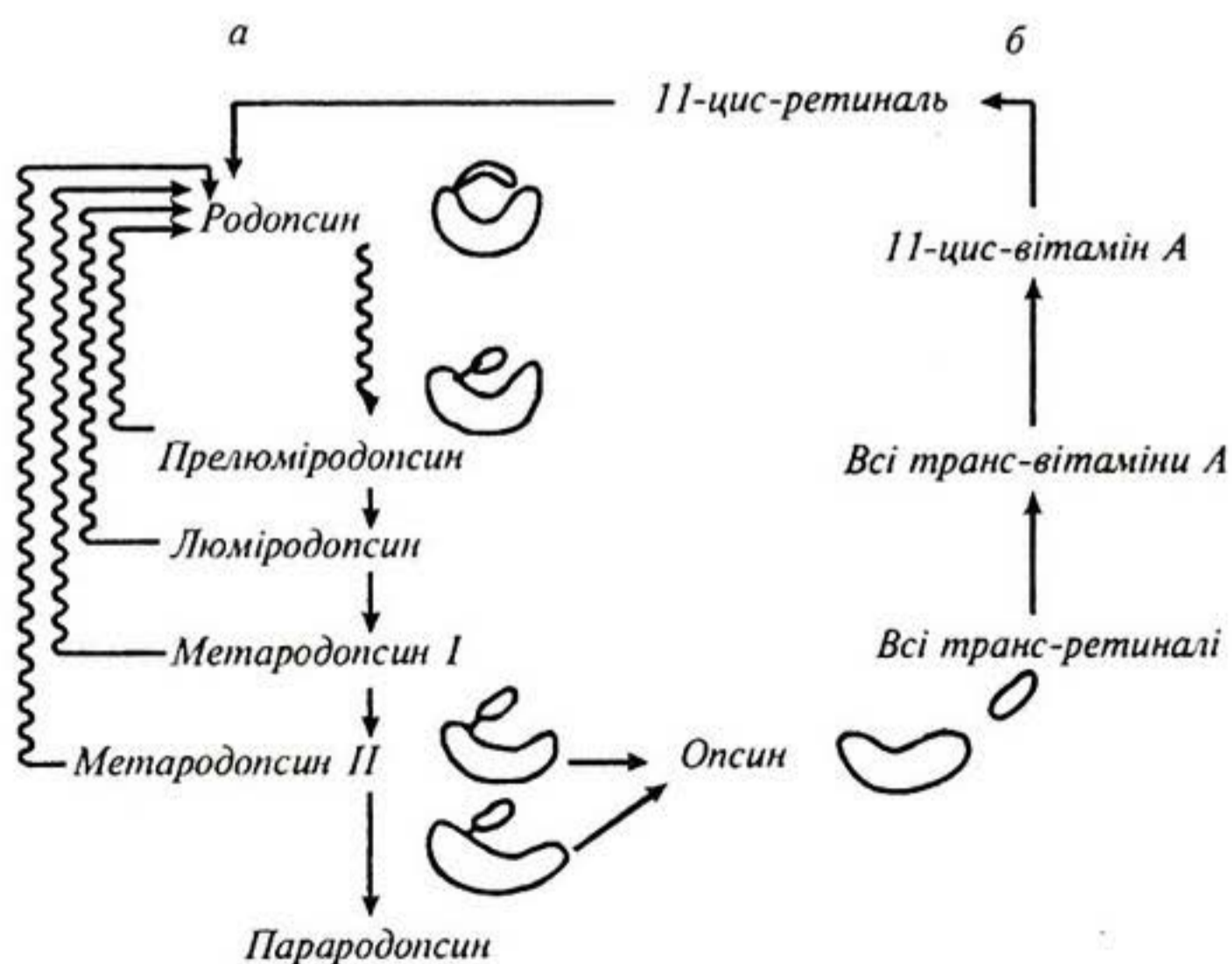


Рис. 29.1. Послідовність фотохімічних перетворень родопсину під впливом світла у ряд проміжних модифікацій (а) та відновлення родопсину (б)

сконструйованої контактної лінзи, зв'язаного з хлоридсрібним провідником. Цей електрод сферичної форми, заповнений сольовим розчином, розміщують на роговій оболонці ока, а інший, опорний електрод — на лобі, скроні чи мочці вуха. Типова *електроретинограма (ЕРГ)*, яку наведено на рис. 29.2, має характерні максимуми  $R$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $d$ , за появу яких відповідають певні шари сітківки. Ранній сигнал утворюється завдяки первинним змінам молекул зорових пігментів фоторецепторних клітин під впливом світла. Цей сигнал складається з позитивного  $R_1$  та негативного  $R_2$  відхилень, які разом називають *раннім рецепторним потенціалом (РРП)*. Далі, через близько 20 мс, виникає *пізній рецепторний потенціал (ПРП)*. Цей потенціал складається з негативної  $a$ -хвилі, у формуванні якої беруть участь палички і колбочки. Використовуючи світлові стимули різної довжини хвилі, можна відрізнити потенціали палочок та колбочок: так, під дією слабкого синього світлового імпульсу на адаптоване у темряві око виникає ЕРГ паличок, тоді як яскравий червоний імпульс індукує появу ЕРГ колбочок. Другий максимум ЕРГ — позитивна  $b$ -хвиля. Ця хвиля зв'язана з реакцією біполярних клітин сітківки. Крім того, появу  $b$ -хвилі можна пояснити присутністю у внутрішніх шарах сітківки так званих клітин Мюлера, трансмембранний потенціал яких залежить від змін внутрішньоклітинного калію при

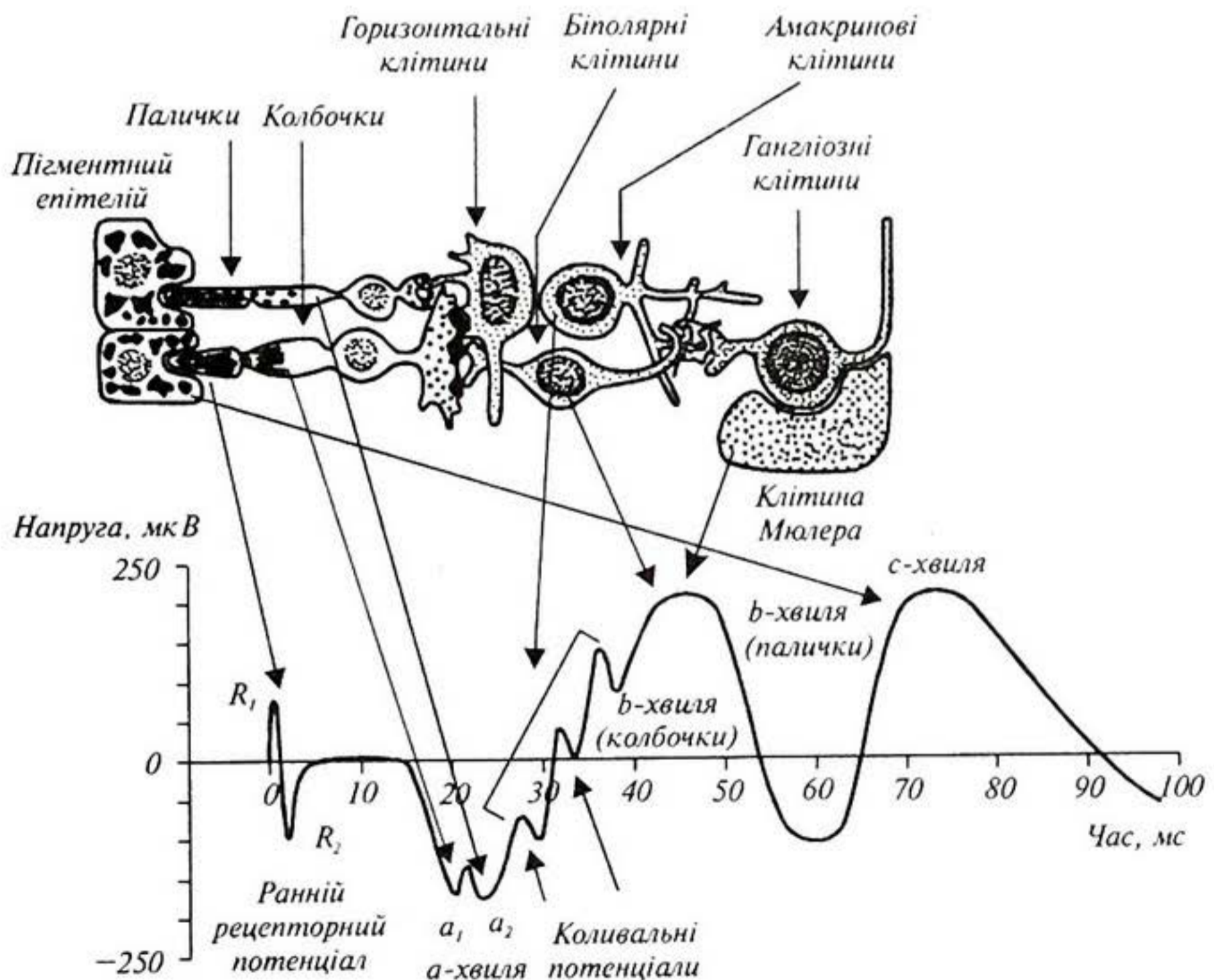


Рис. 29.2. Клітини сітківки та їх реакція на світловий імпульс

стимулюванні фоторецептора. Потенціал дії гангліозних клітин також залежить від потоку калію. Всі ці події викликають появу *b*-хвилі. Далі йде позитивна повільна *c*-хвиля, що виникає завдяки пігментному епітелію як наслідок взаємодії з паличками. Крім того, електроретинограма містить *коливальні потенціали*, які виникають на тлі *b*-хвилі. Хоча вони виникають у внутрішніх шарах сітківки і потребують яскравого світлового стимулу, значення цих хвиль поки що невідомо. Таким чином, поява всіх цих максимумів спричинюється змінами проникності мембран рецепторних, біполярних і гангліозних клітин.

### 29.1.2. Внутрішньоочний тиск

Водяниста волога, що заповнює передню та задню камери ока, утворюється за в'їчастого процесу. Вважається, що вона формується шляхом активного транспорту хлориду натрію і, можливо, іонів гідрокарбонату у задню камеру. Регулюється цей процес осмотичним тиском. Водяниста волога перетікає крізь зіницю з задньої камери у передню і поглинається між рогівкою і райдужною оболонкою. Процес поглинання регулюється градієнтом тиску. При порушенні поглинання водянистої вологи венозною системою внутрішньоочний тиск збільшується, оскільки процес утворення вологи триває. Така патологія отримала назву *глаукоми*. Наслідком цього захворювання є підвищення тиску в кровоносній системі і сліпота.

Розглянемо процес вимірювання внутрішньоочного тиску. Нормальним вважається тиск близько 15 мм. рт. ст. з відхиленнями  $\pm 3$  мм рт. ст. На рис. 29.3 наведено розподіл тисків, які вимірювалися у двох груп пацієнтів — нормальних і тих, хто страждає на глаукому. На внутрішньоочний тиск впливає ряд факторів, а саме: тиск крові, ліки, положення пацієнта, миготіння тощо. Проблема полягає в неінвазійному (неруйнівному) вимірюванні внутрішньоочного тиску. Око являє собою заповнену рідиною сферу; вимірювання тиску можна здійснювати шляхом оцінки деформації сфери при

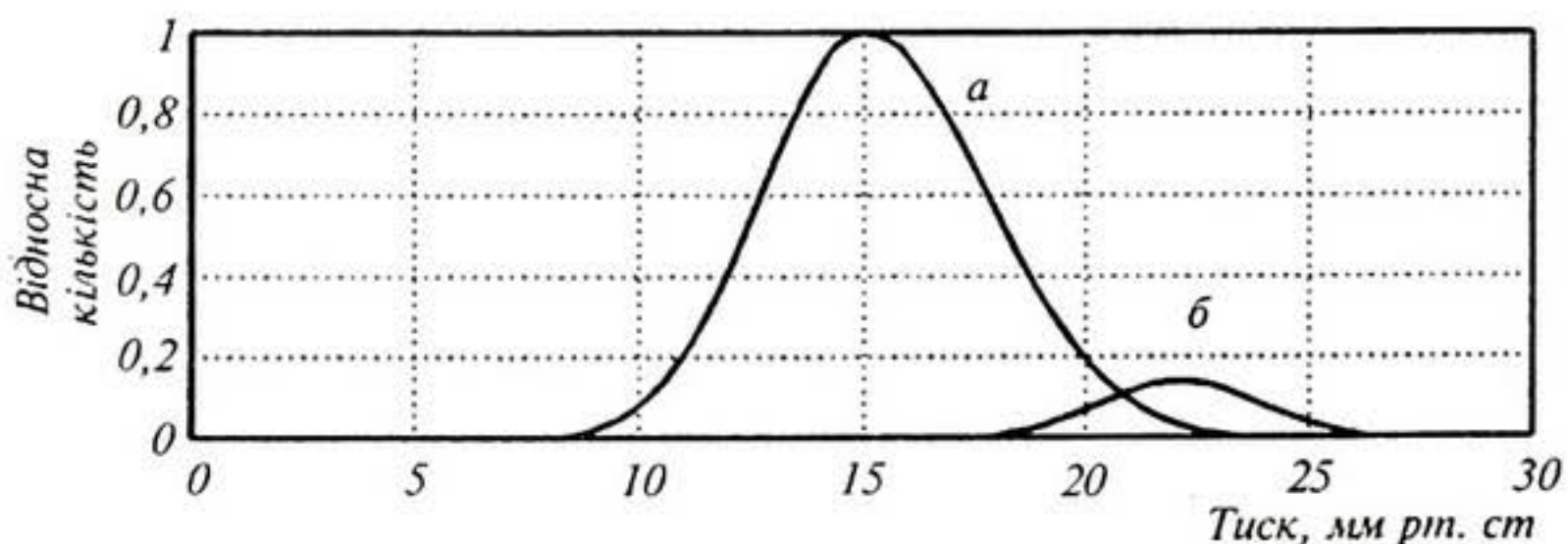


Рис. 29.3. Розподіл внутрішнього тиску серед здорових пацієнтів (а) та уражених глаукомою (б)

накладанні зовнішньої сили. Принцип дії *тонометра* (приладу для вимірювання тиску) пояснюється на рис. 29.4. Поверхневий натяг  $\alpha$  пов'язаний з різницею тисків  $\Delta p$  на сферичній поверхні формулою Лапласа:

$$\Delta p = 2 \frac{\alpha}{R}, \quad (29.1)$$

де  $R$  — радіус кривизни (в даному випадку — очного яблука).

Якщо стінку сфери сплющити (тобто  $R \rightarrow \infty$ ), то  $\Delta p$  прямуватиме до нуля. В той же час слід пам'ятати, що тиск залежить від зовнішньої сили:

$$p = \frac{F}{S}. \quad (29.2)$$

Таким чином, вимірювання розмірів сплющеної під впливом зовнішньої сили частини рогової оболонки ока дає можливість оцінити внутрішньоочний тиск. Вимірювання здійснюється оптичним методом після використання флуоресцентного препарату (флуоресцеїну натрію) і візуалізації сплющеної зони. Зовнішню силу можна реалізувати завдяки потоку повітря, який діє на око і деформує рогову оболонку. Вимірювання швидкості руху та об'єму повітря, а також результуючої деформації рогової оболонки дає можливість оцінити внутрішньоочний тиск.

### 29.1.3. Тестування світловим імпульсом

За потрапляння світла в зіницю остання звужується. Така реакція отримала назву *первинного зіничного рефлексу*. Світловий імпульс стимулює утворення потенціалів дії гангліозними клітинами і їх передачу вздовж зорового нерва. Первинний зіничний рефлекс свідчить про цілісність сітківки, нормальне функціонування зорового нерва та інервацію зіниці. Якщо спрямувати світловий імпульс тільки в одне око, звуження зіниці буде спостерігатися й в неосвітленому оці. Така реакція, що називається *опосередкованим зіничним світловим рефлексом*, дає уявлення щодо цілісності розміщеного на протилежному боці рухового краніального (черепного) нерва ока.

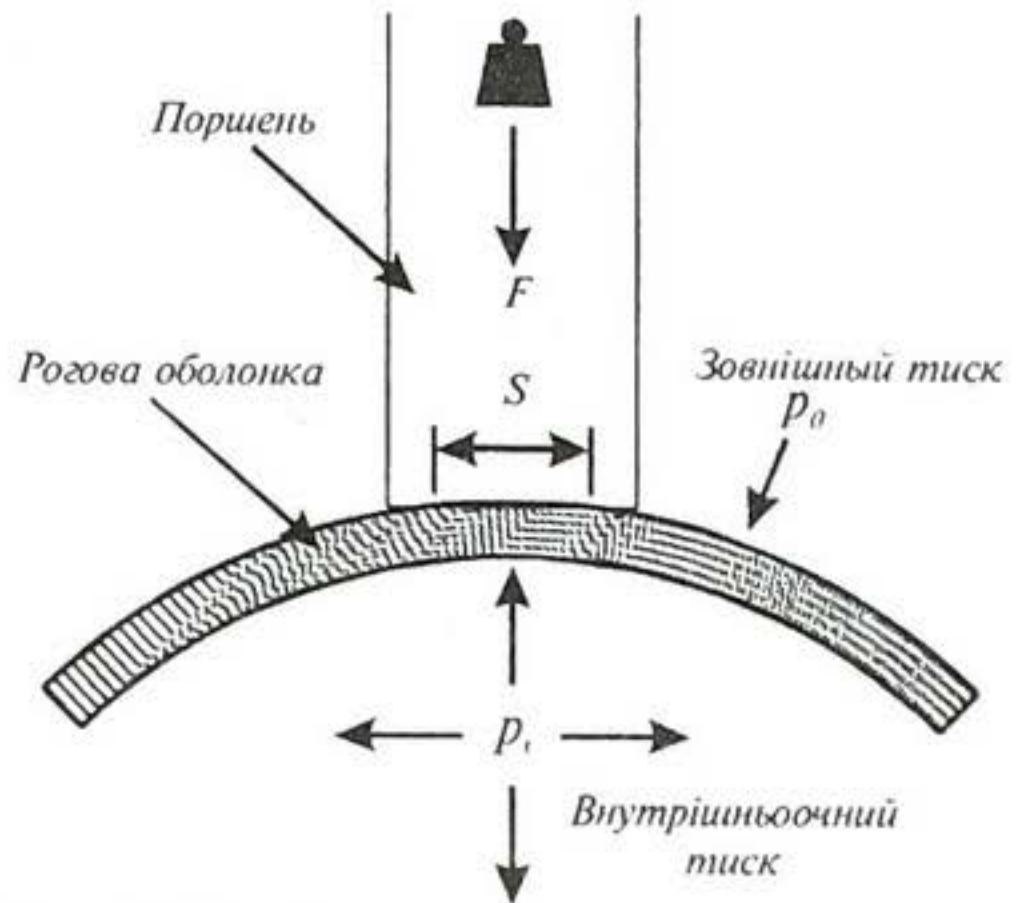


Рис. 29.4. Принцип роботи тонометра

### 29.1.4. Дефекти зору

*Міопія (короткозорість).* Нормальне око забезпечує фокусування паралельного пучка світла строго на сітківці. Якщо ж точка фокусу знаходиться перед сітківкою, такий дефект називають *міопією (короткозорістю)*. В цьому випадку пацієнт бачить чітко лише близько розташовані об'єкти. Найвіддаленіша точка, яка створює різке зображення на сітківці, називається *дальною точкою ока*. Позбутись міопії можна за допомогою окулярів, оснащених розсіювальними лінзами (рис. 29.5). Фокусна відстань лінз  $F$  підбирається за допомогою співвідношення:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (29.3)$$

де  $d$  — відстань до об'єкта,  $f$  — відстань до дальньої точки (рис. 29.5).

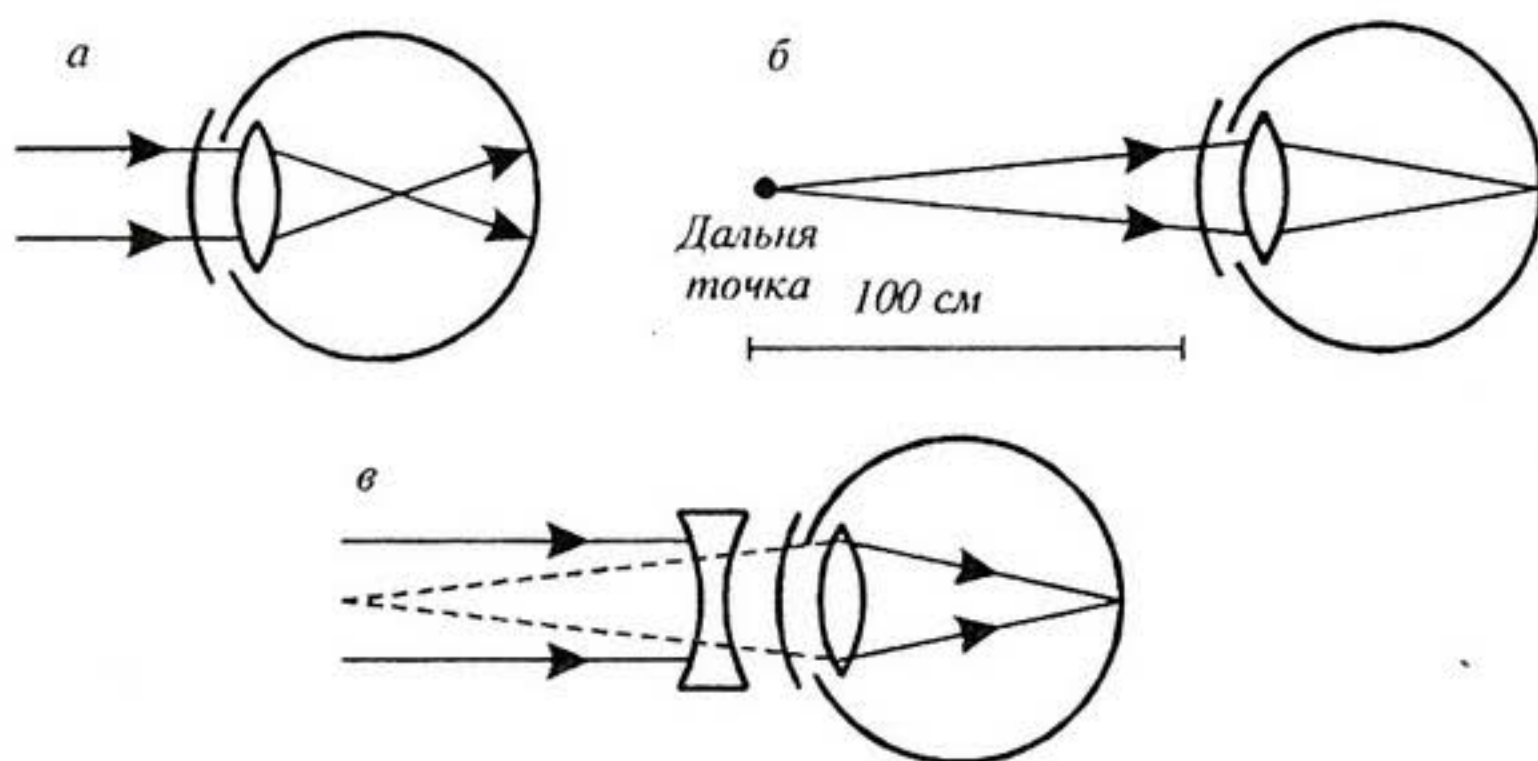


Рис. 29.5. Принцип уникнення міопії за допомогою розсіювальної лінзи

Звичайно в геометричній оптиці на рисунках прийнято напрямок поширення зліва направо. Відрізки  $d$  і  $f$  вважаються додатними, якщо їх напрямок збігається з напрямком поширення світла, і навпаки.

*Гіперметропія (далекозорість).* В цьому випадку паралельний пучок світла фокусується за сітківкою. Дефекту позбуваються за допомогою збираючих лінз (рис. 29.6). Найближча точка, яка ще створює різке зображення на сітківці, називається *ближньою точкою ока*. Якщо відстань до ближньої точки  $f'$ , об'єкт знаходиться на віддалі  $d$  від ока, то фокусну відстань  $F$  збиральної лінзи підбирають із співвідношення:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f'}. \quad (29.4)$$

*Презбіопія (стареча далекозорість).* Зі старінням організму м'язи повік слабнуть, що призводить до труднощів при фокусуванні кришталіка на об'єкт. Компенсувати цей дефект можна за допомогою

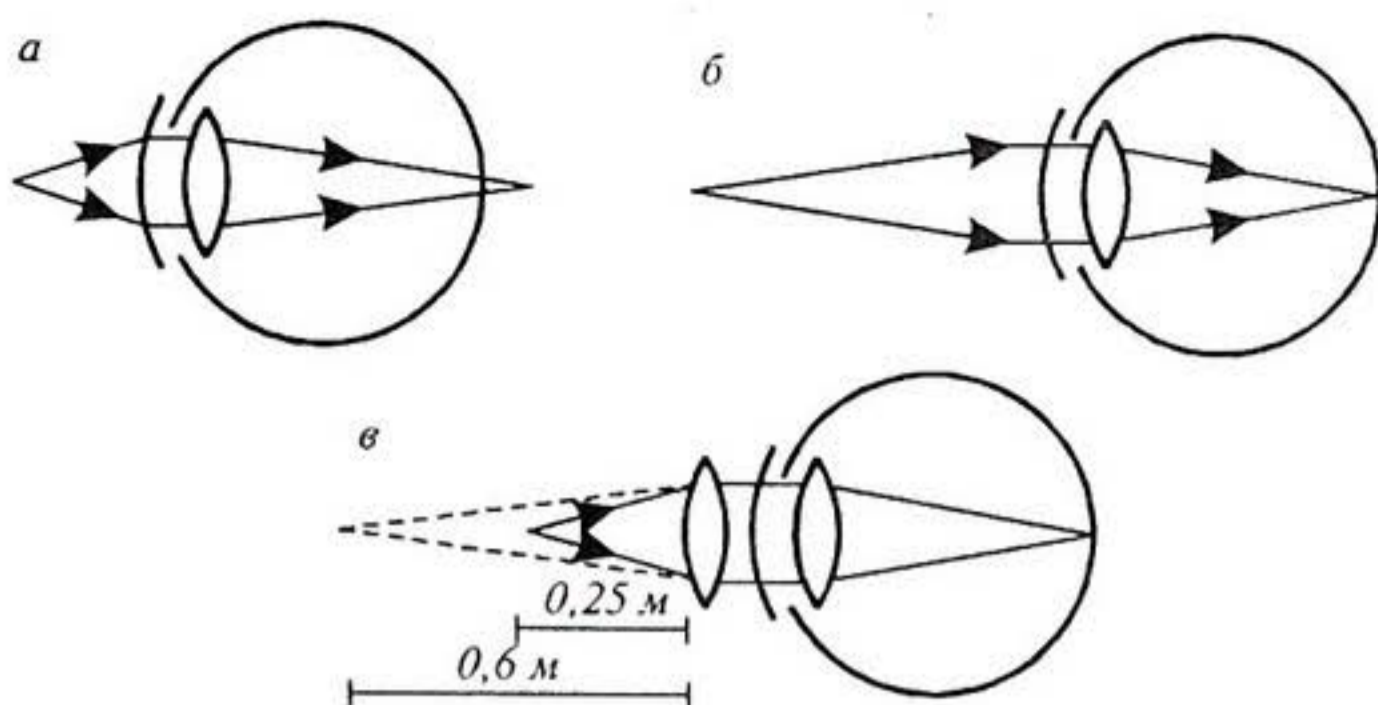


Рис. 29.6. Принцип уникнення гіперметропії за допомогою збиральної лінзи

збиральних лінз. За наявності короткозорості рекомендуються біфокальні окуляри: верхня половина лінз компенсує міопію, а нижня — презбіопію.

**Астигматизм.** Цей дефект зору зумовлює відсутність симетрії сітківки. Перевірити наявність астигматизму можна за допомогою рис. 29.7: пацієнт в цьому випадку бачить одні лінії чіткіше, ніж інші. Виправити дефект можна за допомогою циліндричних лінз.

**Хроматична аберація.** Всі оптичні лінзи заломлюють більш інтенсивно світло з меншою довжиною хвилі (рис. 29.8). В результаті зображення на сітківці білої плями в дійсності не біле, а затуманене з кольоровим ореолом. Хроматична аберація зростає в короткохвиловому діапазоні.

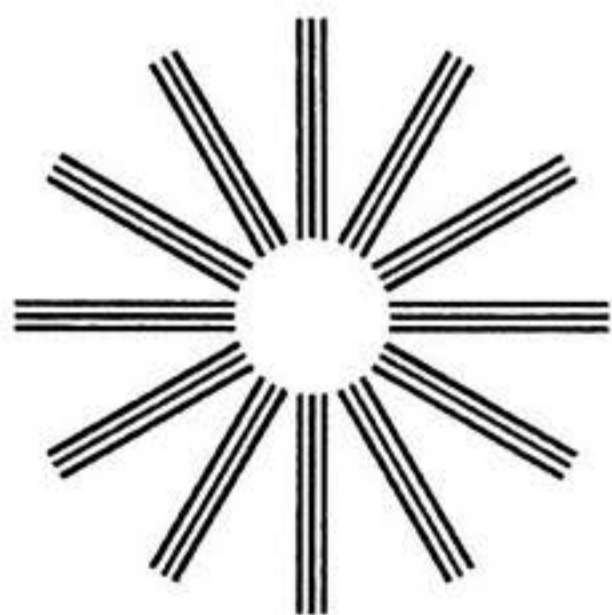


Рис. 29.7. Картина для перевірки наявності астигматизму

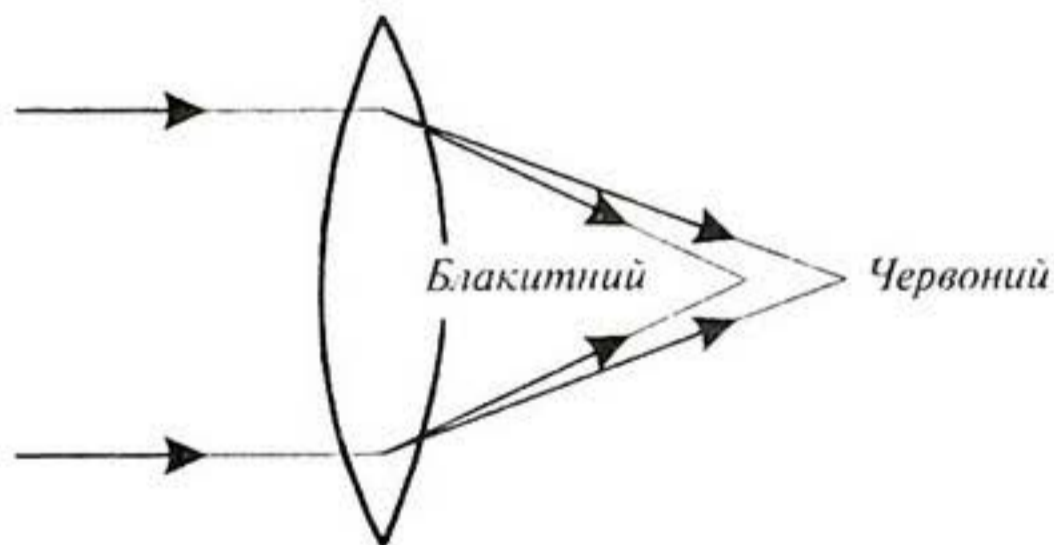


Рис. 29.8. Хроматична аберація оптичної лінзи



## 29.2. ЛАЗЕРНА ФОТОМЕДИЦИНА

### 29.2.1. Застосування лазерів у медицині

Звичайне оптичне випромінювання (Сонця або лампи) складається з багатьох світлових хвиль, що поширюються у різних напрямках без будь-яких фазових співвідношень між окремими хвилями. Лазерне випромінювання характеризується такими властивостями як висока інтенсивність, монохроматичність і когерентність (див. розділ 27.4.3), які зумовлюють високу просторову спрямованість лазерного випромінювання. Саме через це лазерний промінь має значно більшу густину фотонів, ніж монохроматичний та сколімований промінь звичайної лампи. Характеристики лазерів, що застосовуються в медичній та ветеринарній практиці, наведено в табл. 29.1 і 29.2.

#### 29.1. Лазери безперервної дії

Тип лазера	Довжина хвилі	Активне середовище	Потужність
He:Cd	325,0 нм; 442,0 нм	Газовий	50 ÷ 150 мВт
Ar	488,0 нм; 514,5 нм	Газовий	20 Вт
Kr	413,1 нм; 530,9 нм; 647,1 нм	Газовий	5 Вт
Лазери на барвниках	400 ÷ 1000 нм	Рідкі барвники	2 Вт
He:Ne	632,8 нм	Газовий	50 мВт
GaAlAs	750 ÷ 900 нм	Напівпровідниковий	100 мВт
Nd:YAG	1,06 мкм	Твердотільний	600 Вт
HF	2,6 ÷ 3,0 мкм	Хімічний	150 Вт
CO <sub>2</sub>	10,6 мкм	Газовий	100 Вт

Залежно від характеристик кожний лазер знаходить застосування в тій чи іншій галузі медицині. Так, Nd:YAG-лазер відзначається глибоким проникненням випромінювання в тканину і застосовується для нагрівання, коагуляції тканини, руйнівної дії на злоякісні пухлини. Аргоновий лазер знайшов застосування в офтальмології, оскільки довжина хвилі його випромінювання знаходиться в синьо-зеленій області спектра, добре пропускається і фокусується оком і використовується для дії на сітківку. Довжина хвилі випромінювання напівпровідникового AlGaAs лазера знаходиться в області «терапевтичного вікна» і саме через це цей лазер використовують для неінвазивного моніторингу глюкози в крові у хворих на діабет. Висока

## 29.2. Імпульсні лазери

Тип лазера	Довжина хвилі	Активне середовище	Тривалість імпульсу	Максимальна енергія (Дж/імпульс)	Частота висилання (Гц)	Середня потужність (Вт)
Ексімерні лазери	193 нм	ArF	5÷25 нс	0,5	1000	50
	249 нм	KrF	2÷50 нс	1	500	100
	308 нм	XeCl	1÷300 нс	1,5	500	150
	351 нм	XeF	1÷30 нс	0,5	500	30
Лазери на барвниках	400÷1000 нм	Рідкі барвники	3÷50 нс	0,1	100	10
Лазери на металевій парі	628÷1550 нм 510,6 нм; 578,2 нм	Пара Au Пара Cu	15 нс	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>4</sup> 5÷10 кГц	1 Десятки Вт
AlGaAs	750	Напівпровідник	0,2÷2 мкс	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>4</sup>	0,1
Nd:YAG	1,06 мкм	Твердотілий	10 нс	1	20	20
Er:YAG	2,94 мкм	Твердотілий	200 мкс	2	20	30
Ho:YAG	2,1 мкм	Твердотілий	200 мкс	Кількасот мДж/імпульс	Де кілька імпульсів за секунду	
HF	2,6÷3 мкм	Хімічний	50÷200 нс	1	20	3
CO <sub>2</sub>	10,6 мкм	Газовий	10 мкс÷10 мс	5	1000	100
Александрит Cr:BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	720÷800нм	Твердотілий	200÷1000 нс	Десятки мДж/імпульс	Де кілька імпульсів за секунду	
Ti:сапфір Ti:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	670÷1100нм	Твердотілий	Де кілька мкс	Кількасот мДж/імпульс	Де кілька імпульсів за секунду	
Лазер на вільних електронах	2,8÷4,0 мкм	Електронний промінь в магнітному полі	2 пс	12÷20 мДж/імпульс	10÷30 Гц	

потужність та здатність генерувати інфрачервоне випромінювання зумовило широке застосування  $\text{CO}_2$ -лазера в хірургії. Лазери на барвниках та вільних електронах здатні плавно перестроювати частоту генерації в широких межах, що істотно з точки зору спектроскопічних досліджень. Ультрафіолетове випромінювання ексимерних лазерів здатне руйнувати молекулярні зв'язки і саме завдяки цьому знайшло застосування в офтальмологічних операціях.

### 29.2.2. Взаємодія лазерного випромінювання з тканиною

Взаємодія лазерного випромінювання з біологічною тканиною характеризується такими оптичними процесами як відбивання (від поверхні шкіри), поглинання (молекулами таких речовин як вода, гемоглобін, білірубін та меланін) та розсіювання (внутрішніми структурними елементами шкіри). Тканина на 70% складається з води, що поглинає оптичне випромінювання в ультрафіолетовій ( $< 300$  нм) та інфрачервоній ( $> 2$  мкм) областях

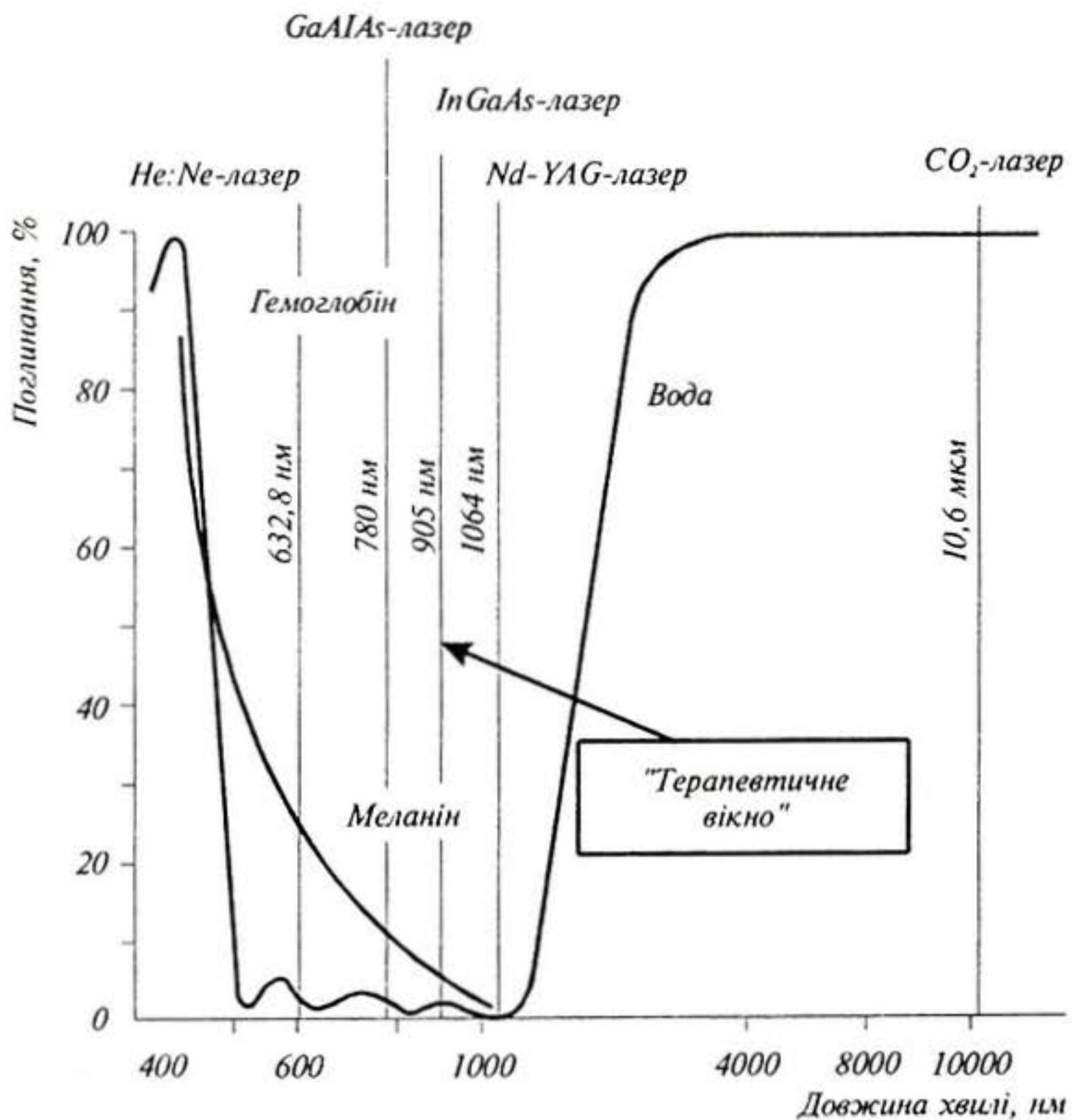


Рис. 29.9. «Терапевтичне вікно» — область мінімального поглинання, що утворюється спектрами поглинання меланіну, гемоглобіну і води

спектра. Кров поглинає в видимій області спектра. В області 600÷1300 нм утворюється так зване «терапевтичне вікно», де поглинання оптичного випромінювання тканиною мінімальне (рис. 29.9). Глибина проникнення лазерного випромінювання у тканину залежить від довжини світлової хвилі (рис. 29.10). За поглинання енергії лазерного випромінювання тканиною температура останньої зростає. Якщо підвищення температури перевищує 40° С, відбувається теплове руйнування клітин; при температурі 100° С вода в тканині починає випаровуватися. Тривале опромінювання викликає випаровування інших компонентів тканини. Такий тип взаємодії називається *фототепловим*. Якщо в тканину ввести зовнішні речовини, здатні поглинати оптичне випромінювання (так звані *фотосенсибілізатори*), то в тканині відбуваються хімічні процеси. Такий тип взаємодії називається *фотохімічним*. На характер взаємодії лазерного випромінювання з біологічною тканиною впливають такі параметри як потужність випромінювання, довжина світлової хвилі, тривалість опромінювання. Якщо на тканину подіяти ультракороткими (< 1 мкс) лазерними імпульсами високої потужності, в тканині утворюється плазма та ударні хвилі в прозорих компонентах (таких як вода) та фотоакустичні ефекти в непрозорих компонентах. Такий тип взаємодії називається *фотомеханічним*.

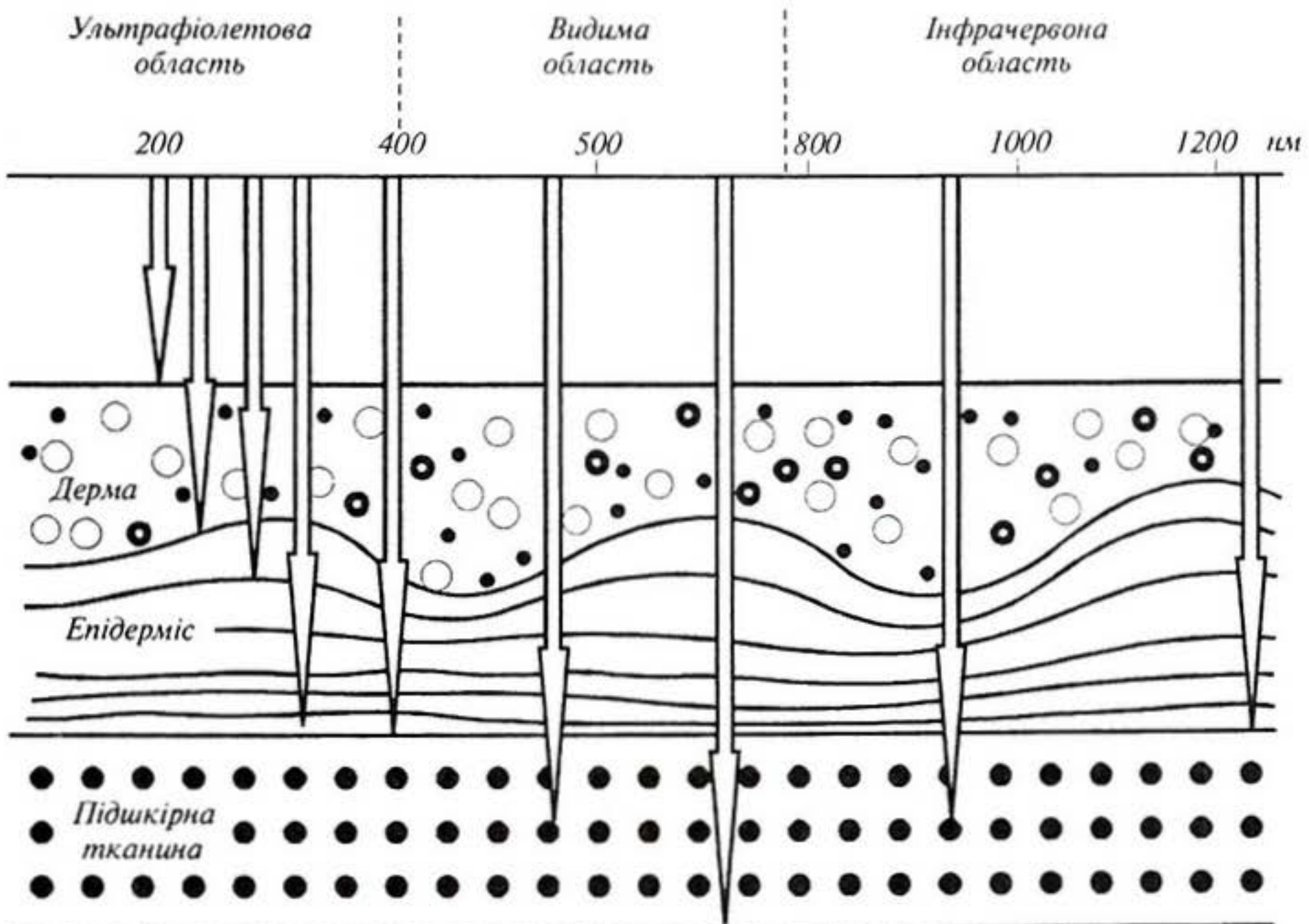


Рис. 29.10. Залежність глибини проникання лазерного випромінювання в біологічну тканину від довжини світлової хвилі

### 29.2.3. Лазерна діагностика

*Флуоресцентна спектроскопія* базується на опромінюванні речовини, що досліджують, збудженні молекули цієї речовини та пере-випромінюванні світла у вигляді флуоресценції — оптичного випромінювання з більшою довжиною хвилі. Аналіз характеру спектрів флуоресценції та часової поведінки випромінювання флуоресценції надає корисну інформацію щодо стану біомедичних об'єктів. Прикладами застосування флуоресцентних методів у медицині є діагностика злоякісних пухлин на ранніх стадіях, виявлення кров'яних бляшок, визначення концентрації глюкози в крові у хворих на діабет.

*Оптико-акустична спектроскопія* біомедичних об'єктів базується на опромінюванні об'єкта амплітудно-модульованим світлом, внаслідок чого відбуваються періодичні зміни тиску навколишнього повітря. Ці зміни тиску як акустичні сигнали реєструються чутливим мікрофоном. Перевагою методу є можливість аналізувати непрозорі та дисперсні середовища.

*Комбінаційна спектроскопія* біомедичних об'єктів передбачає непружне розсіювання світла, за якого відбувається зміна напрямку і частоти випромінювання. Комбінаційне розсіювання дає інформацію щодо структури і конформаційних змін біомолекул, зв'язків цих молекул з оточуючим середовищем, кінетики різноманітних процесів. У ветеринарній практиці метод лазерної комбінаційної спектроскопії застосовується в офтальмології для ранньої діагностики катаракти кролів, аналізу *in vivo* процесу розвитку захворювання та вивчення впливу різних медпрепаратів. Техніка комбінаційної спектроскопії може бути застосована для визначення атеросклеротичних бляшок.

*Лазерна спектроскопія квазіпружного розсіювання* базується на реєстрації часових змін (динаміки) амплітуди і фази (частоти) розсіяного випромінювання. Цей метод дає можливість оцінювати динамічні характеристики біологічних мікрооб'єктів, а саме: коефіцієнти дифузії, швидкості руху, параметри внутрішньоклітинної рухомості. В біологічних дослідженнях спектроскопія квазіпружного дослідження використовується для електрофоретичного світлорозсіювання, вимірювань швидкісних характеристик потоків крові (лазерної доплерівської анемометрії) навіть в судинах сітківки, для вимірювання рухливості сперміїв самців з метою оцінки їх якості.

*Лазерна інтерферометрія* дає можливість спрямовувати в око два лазерних когерентних пучки так, щоб вони перекривалися на сітківці, внаслідок чого на ній утворюється інтерференційна картина у вигляді світлових смуг. Аналіз цієї картини дає змогу визначити ретинальну гостроту зору навіть при наявності катаракти, вимірювати товщину рогової оболонки під час операції кератомії.

*Оптична когерентна томографія* базується на побудові зображень поперечних перерізів внутрішньоочних структур. Метод характеризується високою роздільною здатністю і неруйнівною дією.

*Голографічні методи* діагностики широко застосовуються в офтальмології для отримання тривимірних зображень ока в цілому і окремих його частин, а також для дослідження внутрішніх структур ока з високим ступенем розділення. Високі можливості голографічних методів підтверджені також в ортопедії, радіології, урології.

*Лазерний мікроаналіз* відбувається під час взаємодії потужного лазерного випромінювання з біомедичними об'єктами, що супроводжується випаровуванням малих кількостей матеріалу, які аналізуються спектроскопічно. Метод перспективний для кількісного визначення хімічних елементів, металів, токсикантів і забруднювачів, для порівняльного дослідження нормальних і ракових клітин, для вивчення процесів дифузії арматурних металів в кістках.

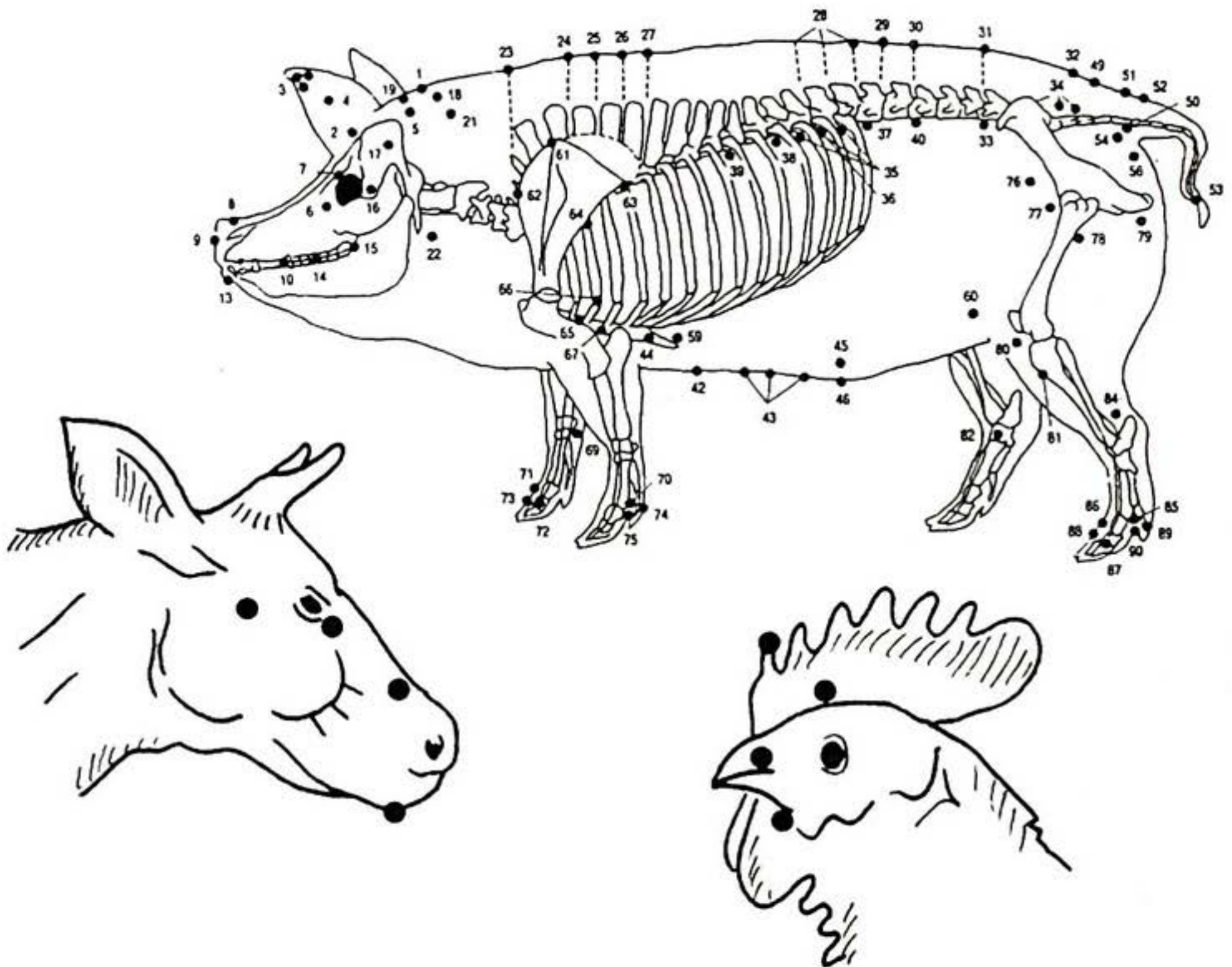
#### 29.2.4. Лазерна терапія

*Лазерна фототерапія.* Для лікування патологічних станів і стимуляції життєвих процесів в медицині і ветеринарній практиці застосовуються низькоенергетичні (гелій-неонові) лазери, що випромінюють монохроматичне когерентне поляризоване світло з довжиною хвилі 632,8 нм при інтенсивності від 2 до 25 мВт · см<sup>-2</sup>. Вважається доведеним, що червоне лазерне світло невеликої потужності діє на організм в цілому та окремі органи і системи стимулююче, оскільки їх частоти дуже близькі до частот тих життєвих процесів, які перебігають у тканинах організму, особливо у нервовій системі: під дією лазерного світла посилюється енергетичний потенціал, метаболізм в тканинах, змінюється тонус судин, оптимізується клітинний поділ і диференціювання клітин, активізуються захисні механізми, регенеративно-відновлювальні процеси, ферментативні та імунологічні системи, різко підвищується резистентність організму захворюванням.

Автори цих досліджень часто посилаються на особливу роль когерентності лазерного випромінювання, хоча цей аргумент не є переконливим, оскільки швидкість збудження молекул низькоінтенсивним світлом на кілька порядків (у 10<sup>10</sup>-10<sup>14</sup> разів) менша за швидкість втрати когерентності збудження молекулами у конденсованій фазі за нормальної температури. Можливості застосування низькоенергетичного лазерного випромінювання у ветеринарній практиці треба обов'язково розглядати з точки зору когерентної взаємодії лазерного випромінювання з біологічним об'єктом; така когерентна взаємодія відбувається тільки при високих (близько 2 · 10<sup>11</sup> Вт · см<sup>-2</sup>) інтенсивностях лазерного випромінювання.

*Лазерна фотохемотерапія.* В основі цієї медичної технології лежить взаємодія лазерного випромінювання з хімічними сполуками — *фотосенсибілізаторами*, які селективно поглинаються злоякісними пухлинами. За цієї взаємодії пухлина здатна флуоресцювати (що використовується для діагностики пухлин на ранніх стадіях) або руйнуватися (в чому полягає суть лазерної фотохемотерапії). За 48÷72 години в організм вводять шляхом ін'єкції фотосенсибілізатор (наприклад, гематопорфіринові похідні), що вибірково концентрується в злоякісній пухлині. Далі через світловід освітлюють пухлину; активований лазерним випромінюванням сенсибілізатор флуоресцює. Випромінювання флуоресценції надходить крізь інший світловід на оптичну систему, що складається з лінз, фільтра та інтенсифікатора зображення, яке аналізується або візуально, або за допомогою фотоприймача і системи реєстрації.

*Лазерна акупунктура* пов'язана зі здатністю лазерного випромінювання проникати крізь тканину, що використовується для індикації біологічно активних точок на поверхні тіла тварини (рис. 29.11). Перевагою лазерної акупунктури є неруйнівність, асептичність, безболісність, швидкодія.



*Рис. 29.11. Типові картини застосування акупунктури тварин*

### 29.2.5. Лазерна хірургія

Лазерна хірургія базується на поглинанні лазерного випромінювання тканиною, її нагріванні та руйнуванні за фотохімічних, теплових або гідродинамічних процесів. Залежно від інтенсивності лазерного випромінювання та тривалості опромінювання можна досягнути різноманітних ефектів — денатурації або інактивації білків та ферментів через конвекцію теплоти і теплопровідність тканини, гіпертермії, коагуляції, зварювання, вилучання або руйнування тканин. В ветеринарній хірургії використовують  $\text{CO}_2$ -лазери, Nd-YAG-лазери, рубінові і аргонові лазери. Схему можливого лазерного скальпеля наведено на рис. 29.12. Такі лазерні інструменти використовують під час лазерної кератотомії — хірургічних надрізів та розтинів рогової оболонки, лікування глаукоми — захворювання очей, пов'язаного з підвищенням внутрішньоочного тиску, та катаракти — помутніння кришталика. Перевагою лазерної хірургії є зменшення тривалості операції, стерильність лазерного променя, менша кількість некротичних перетворень тканин і гематом. Яскравим прикладом можливих застосувань лазера у зооінженерній практиці є кастрація самців сільськогосподарських тварин та ампутація крил у домашньої птиці з метою підвищення продуктивності та несучості.

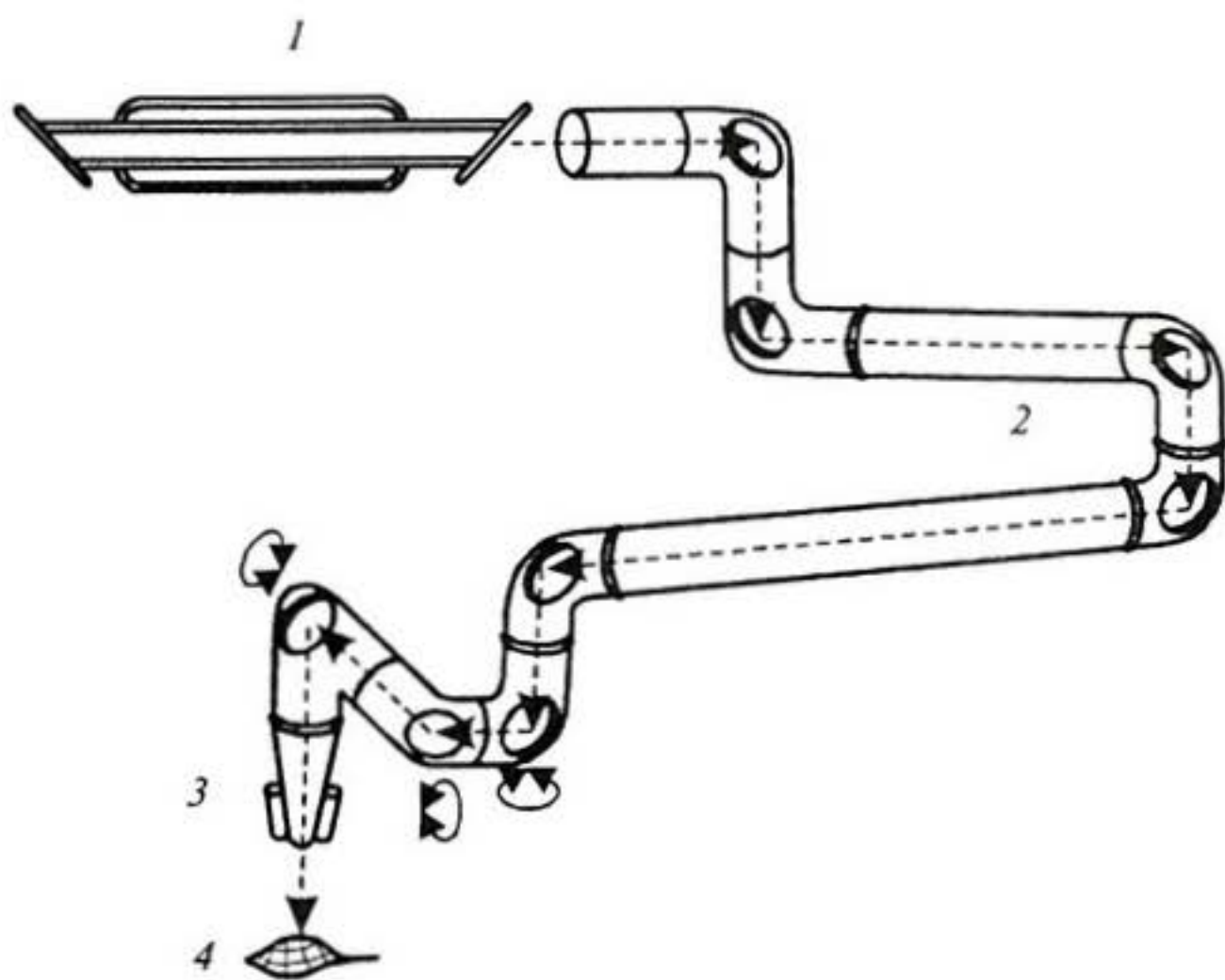


Рис. 29.12. Хірургічна система на основі  $\text{CO}_2$ -лазера: 1 — лазер; 2 — маніпулятор променя; 3 — система освітлення; 4 — об'єкт



## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Які окуляри слід виписати пацієнту, що страждає на короткозорість, якщо відстань до дальньої точки становить 1 м, а об'єкт нескінченно віддалений від ока?

### Розв'язок

Використовуємо рівняння (29.3):

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{-1\text{ м}} - \frac{1}{-\infty}.$$

Звідси  $D = 1/F = -1\text{ м}^{-1}$ . Отже, пацієнту потрібні окуляри з оптичною силою в одну діоптрію.

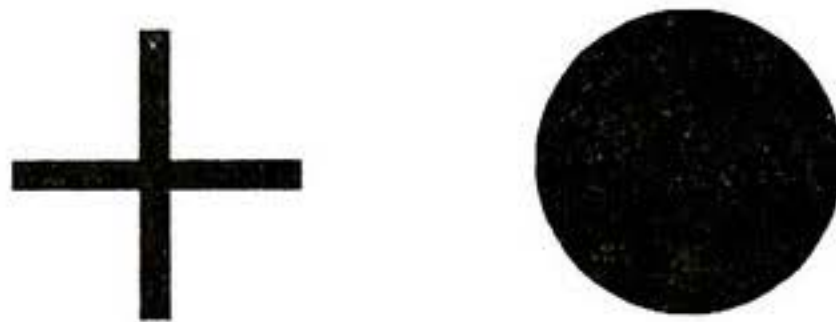
### Контрольне завдання № 29.1

Які окуляри слід виписати пацієнту, що страждає на далекозорість, якщо відстань до ближньої точки становить 0,6 м, а об'єкт віддалений від ока на відстань 0,25 м?

*Відповідь:*  $1/F = 2,33\text{ м}^{-1}$ .

### Контрольне завдання № 29.2

Для дослідження сліпої плями сітківки використати рис. 29.13, що містить хрестик і коло. Заплющити ліве око, а праве сфокусувати на коло. Поступово наближати рисунок до очей. На відстані 15-17 см від очей хрестик зникне з поля зору. Повторити експеримент при заплющеному правому оці, спостерігаючи за колом. Пояснити це явище.

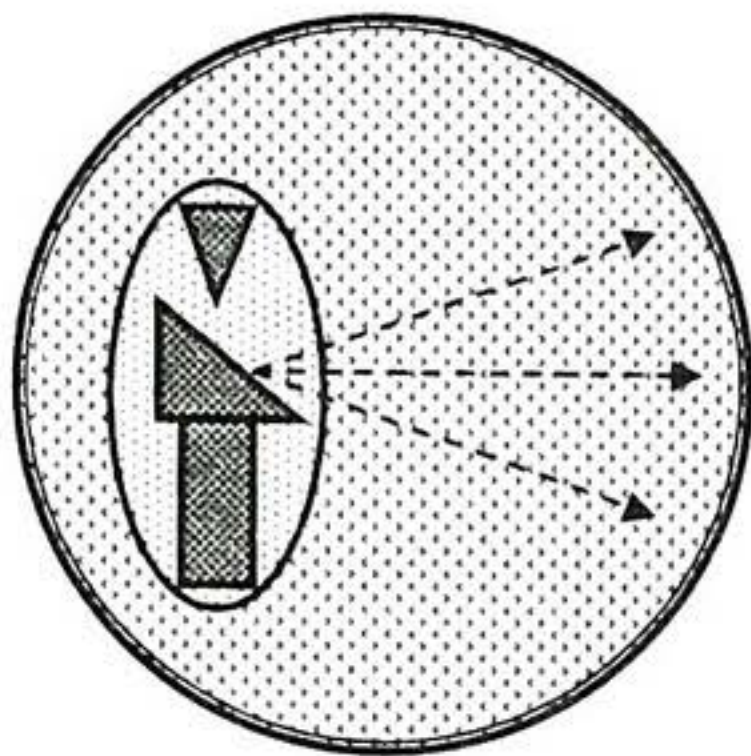


*Рис. 29.13. Дослідження світлової плями ока*

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Пояснити принципи електроретинографії.
2. Як оцінюють внутрішньоочний тиск?
3. В чому полягає тестування зорового аналізатора світловим імпульсом?
4. Назвати та пояснити основні дефекти зору.
5. Навести і охарактеризувати основні методи лазерної фотомедицини.

## 30. ЯДЕРНА ФІЗИКА



*Ядерна фізика* — розділ фізики, що вивчає структуру і властивості атомних ядер та їх перетворення — процеси радіоактивного розпаду і ядерні реакції.

### 30.1. КЛАСИФІКАЦІЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

*Іонізуючі випромінювання* — це потоки частинок або електромагнітних квантів, взаємодія яких з середовищем зумовлює іонізацію — утворення іонів та вільних електронів з електрично нейтральних атомів і молекул.

Іонізуюче випромінювання має достатньо енергії для віддалення електронів з орбіт, внаслідок чого атом набуває заряду і стає іонізованим. До іонізуючого випромінювання можна віднести:  *$\alpha$ -частинки* — ядра гелію  ${}^4\text{He}$ , що містять 2 протони і 2 нейтрони;  *$\beta$ -частинки* — електрони і позитрони, що висилаються атомними ядрами під час бета-розпаду; *рентгенівське випромінювання* — електромагнітне випромінювання, що займає спектральну область між  $\gamma$ - та ультрафіолетовим випромінюванням в межах довжин хвиль  $10^{-5} \div 10^2$  нм;  *$\gamma$ -випромінювання* — короткохвильове електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі меншою, ніж  $2 \cdot 10^{-10}$  м; *космічні промені* — потік елементарних частинок високої енергії, переважно протонів, що приходять на Землю ізотропно з усіх напрямків космічного простору, а також вторинне випромінювання, що утворюється внаслідок взаємодії протонів з атомними ядрами повітря.

Значення енергії іонізуючих випромінювань наведено в табл. 30.1.

### 30.1. Енергія іонізуючих випромінювань

Тип випромінювання	Частота, Гц	Енергія, кДж·мо ль <sup>-1</sup>
Частинки		
$\alpha$ -частинки		$4,1 \cdot 10^8$
$\beta$ -частинки		$1,5 \cdot 10^7$
Електромагнітне випромінювання		
рентгенівське випромінювання	$3 \cdot 10^{15}$	$1,2 \cdot 10^5$
$\gamma$ -випромінювання	$3 \cdot 10^{20}$	$1,2 \cdot 10^8$
космічні промені	$6 \cdot 10^{21}$	$2,4 \cdot 10^9$

## 30.2. РАДІОАКТИВНІСТЬ

### 30.2.1. Радіоактивний розпад

В 1896 г. французький фізик А. Беккерель відкрив явище *радіоактивності* — здатності деяких атомних ядер спонтанно перетворюватися в інші ядра з випромінюванням частинок. До радіоактивних перетворень належить  $\alpha$ -розпад (розпад атомних ядер, що супроводжується висиланням  $\alpha$ -частинок), всі види  $\beta$ -розпаду (перетворень нейтрона в протон і протона в нейтрон усередині атомного ядра) і *спонтанний поділ ядер* (поділ важких ядер). Радіоактивний розпад часто супроводжується  $\gamma$ -випромінюванням. Відрізняють природну та штучну радіоактивність, між якими нема принципової різниці. Природна радіоактивність з'являється внаслідок бомбардування молекул газу в верхніх шарах атмосфери іонізуючим космічним випромінюванням Сонця та за рахунок присутніх в земній корі радіоактивних елементів (уран, актиній, торій, нептуній). Радіоактивні матеріали, що мають небажаний характер і розподіляються на площах, обладнанні та персоналі, називають *радіоактивним забрудненням*.

Основними джерелами іонізуючих випромінювань і радіоактивного забруднення біосфери є природна радіоактивність, розробка, добування і збагачення копалин, використання радіоактивної сировини в реакторах, переробка ядерного палива в установках, випробування і експлуатація ядерної зброї, захоронення відробленого палива і радіоактивних відходів, тероризм.

### 30.2.2. Закон радіоактивного розпаду

Спонтанний розпад атомних ядер підпорядковується закону радіоактивного розпаду: для великої кількості ядер число актів розпа-

ду за одиницю часу (швидкість розпаду) пропорційне вихідній кількості ядер  $N_0$ :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (30.1)$$

Це рівняння являє собою диференціальну форму закону радіоактивного розпаду; інтегральна форма цього закону має вигляд:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (30.2)$$

де  $N_0$  — кількість радіоактивних ядер в момент часу  $t = 0$ ;  $N$  — кількість ядер в момент часу  $t$ ;  $\lambda$  — стала розпаду ( $\text{с}^{-1}$ ).

Швидкість радіоактивного розпаду називають *абсолютною активністю*  $a$ :

$$a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (30.3)$$

Одиницею радіоактивності є *беккерель* (Бк), що відповідає одному розпаду за секунду ( $1 \text{ Бк} = \text{с}^{-1}$ ); на практиці використовують *кюрі* (Ки) — абсолютна активність такого препарату, в якому відбувається  $3,7 \cdot 10^{10}$  розпадів за секунду ( $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ ).

Проміжок часу, за який відбувається розпад половини радіоактивних ядер елемента, називається *періодом піврозпаду*  $T_{1/2}$ :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad (30.4)$$

звідки

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (30.5)$$

Наприклад, період піврозпаду  $T_{1/2}$  становить для: радіоактивного ізотопу вуглецю  $^{14}_6\text{C}$  — 5730 років; радю  $^{226}_{88}\text{Ra}$  —  $1,6 \cdot 10^3$  років; йоду  $^{131}_{53}\text{I}$  — 8,04 днів.

## 30.3. ДОЗИМЕТРІЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

### 30.3.1. Дози іонізуючих випромінювань

Вимірювання характеристик іонізуючих випромінювань під час їх взаємодії з середовищем, від яких залежать радіаційні ефекти в об'єктах живої та неживої природи, що опромінюються, становить суть *дозиметрії*.

*Доза* — це енергія іонізуючого випромінювання, яка поглинається речовиною, що опромінюється. Доза залежить від типу випромінювання, його інтенсивності, тривалості опромінювання та складу речовини, що опромінюється. Розрізняють такі дози:

*Поглинута доза* — це розрахована на одиницю маси речовини, що опромінюється, поглинута енергія випромінювання:

$$D_n = \frac{dE}{dm}, \quad (30.6)$$

де  $dE$  — середня поглинута енергія,  $dm$  — маса речовини.

Одиниці поглинutoї дози:  $1\text{Гр} = 1\text{Дж}/1\text{кг}$ ;  $1\text{рад} = 10^{-2}\text{Гр}$ .

(Термін «рад» походить від англійської фрази «*Radiation Absorbed Dose*»).

Приріст поглинutoї дози за одиницю часу називається *потужністю поглинutoї дози*:

$$P_n = \frac{dD_n}{dt}. \quad (30.7)$$

Одиниця випромінювання поглинutoї дози —  $\text{Гр} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$ .

*Експозиційна доза* визначається як відношення сумарного заряду всіх іонів одного знаку, створених у повітрі вторинними частинками (електронами і позитронами, що утворюються в елементарному об'ємі під час їх повного гальмування) до маси повітря в цьому об'ємі:

$$D_e = \frac{dQ}{dm}, \quad (30.8)$$

де  $dQ$  — сумарний заряд всіх іонів одного знаку,  $dm$  — маса повітря.

Одиниці експозиційної дози:  $1\text{Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$ ; позасистемна одиниця — *рентген*:  $1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4}\text{Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$  або  $1\text{Кл} \cdot \text{кг}^{-1} = 3,88 \cdot 10^{-3}\text{Р}$ . Доза в  $1\text{Р}$  відповідає утворенню  $2,08 \cdot 10^{-4}$  пар іонів в  $1\text{см}^3$  повітря при  $0^\circ\text{C}$  та  $760\text{мм рт. ст.}$

Приріст експозиційної дози за одиницю часу називається *потужністю експозиційної дози*:

$$P_e = \frac{dD_e}{dt}. \quad (30.9)$$

Одиниця випромінювання потужності експозиційної дози —  $\text{Кл} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .

*Еквівалентна доза* — це поглинута енергія випромінювання, біологічно еквівалентна одному рентгену. Під час опромінювання живих організмів, зокрема людини, можуть виникати несприятливі наслідки, що визначають рівень радіаційної безпеки. Справа в тому, що біологічні ефекти залежать не тільки від дози, але й від типу іонізуючого випромінювання. Наприклад, при однаковій дозі  $\alpha$ -частинки призводять до біологічних руйнувань в десятки разів менших, ніж при дії рентгенівського випромінювання. Таким чином, знання поглинutoї дози недостатнє для оцінки радіаційно-індукованого ефекту. Біологічні ефекти, які викликаються будь-яким іонізаційним випромінюванням, прийнято порівнювати з біологічними ефектами, що виникають під впливом рентгенівського випромінювання з граничною енергією  $250$

кеВ. Це порівняння здійснюється за допомогою коефіцієнта якості випромінювання  $k$ , що визначається як кількість рад рентгенівського або  $\gamma$ -випромінювання і викликає такі самі біологічні пошкодження, як і 1 рад даного іонізуючого випромінювання. Для рентгенівського і  $\gamma$ -випромінювання  $k = 1,0$ ,  $\alpha$ -частинок — 20,  $\beta$ -частинок і електронів — 1,0, нейтронів — 10, важких іонів — 20.

Одиниці еквівалентної дози — зіверт:  $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}$ .

Добуток поглинутої дози в радах на величину  $k$ , а саме  $D(\text{рем}) = D(\text{рад}) \cdot k$  отримав назву рем (від англійської фрази «Radiation Equivalent in Man»).

### 30.3.2. Поглинання іонізуючого випромінювання

Поглинання іонізуючого випромінювання зразком товщиною  $x$  визначається за виразом:

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \quad (30.10)$$

де  $I$  — інтенсивність випромінювання, що пройшло зразок,  $I_0$  — інтенсивність випромінювання, що падає на зразок,  $\mu$  — коефіцієнт поглинання.

Слід зазначити, що коефіцієнт поглинання  $\mu = 1/\delta$ , де  $\delta$  — глибина проникання, тобто така товщина, яка зменшує інтенсивність випромінювання в  $e$  разів (37 %).

Зменшення інтенсивності часто характеризується шаром половинного вбирання  $D$ , що зменшує інтенсивність випромінювання удвічі:

$$D = \ln 2 / \mu. \quad (30.11)$$

Тоді закон поглинання іонізуючого випромінювання запишеться так:

$$I = I_0 \exp[-(\ln 2 / \mu)x] \quad (30.12)$$

або

$$I = I_0 2^{-x/D}. \quad (30.13)$$

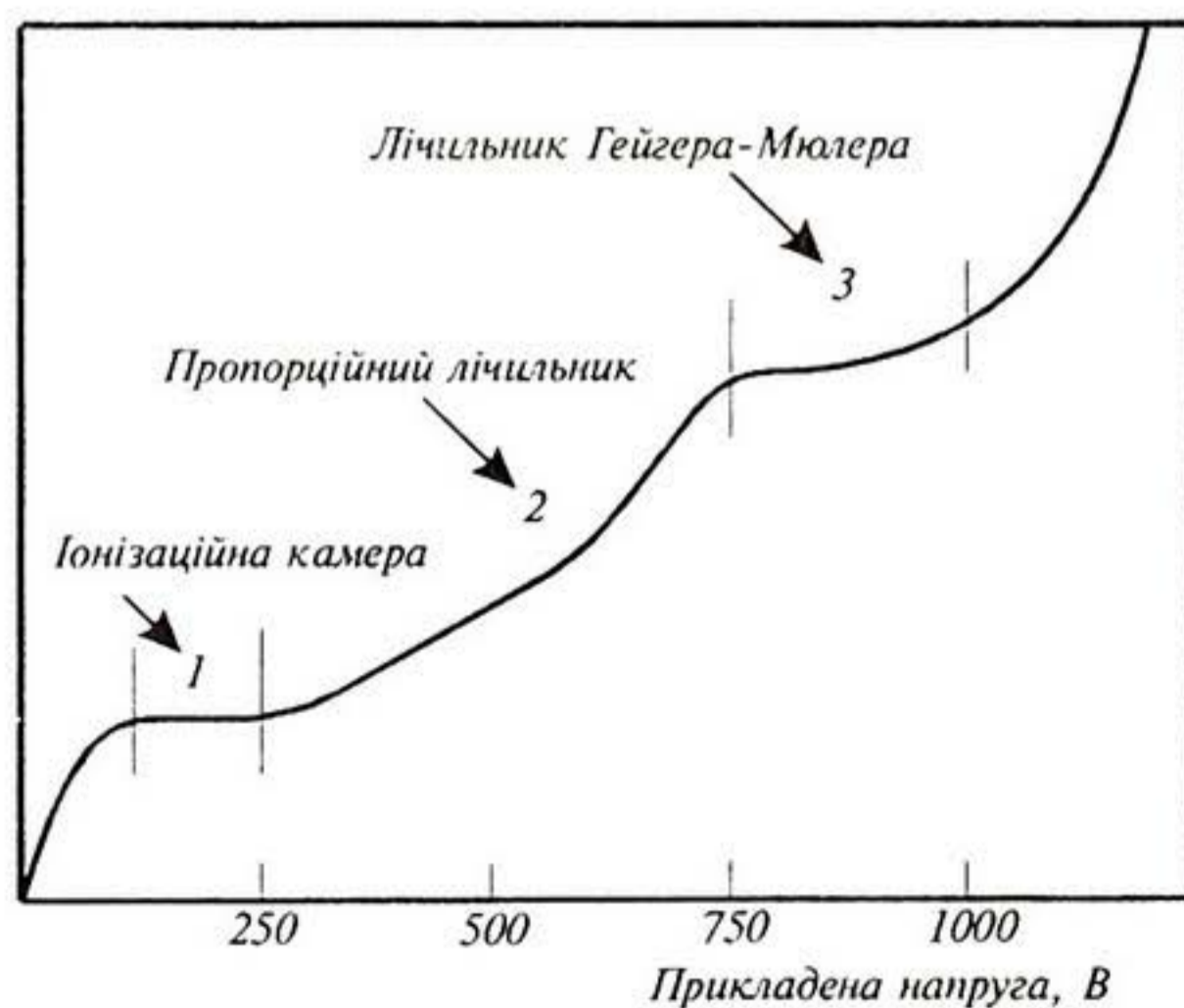
## 30.4. ВИМІРЮВАННЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

### 30.4.1. Основні методи вимірювання іонізуючих випромінювань

Основні методи вимірювання іонізуючих випромінювань базуються на: збиранні і реєстрації електронів та іонів, що вивільнюються в процесі іонізації; спостереженні флуоресценції речовини, що поглинає іонізуюче випромінювання; використанні та аналізі хімічних реакцій,

що викликаються іонізуючим випромінюванням; вимірюванні тепла, яке утворюється за поглинання іонізуючого випромінювання. Серед параметрів іонізуючого випромінювання, що реєструються, слід виділити тип випромінювання, енергію квантів або частинок, величину потоку чи швидкості зміни потоку квантів або частинок, часовий або просторовий розподіл іонізуючого випромінювання. Розглянемо основні методи вимірювання іонізуючих випромінювань.

*Заповнені газом детектори.* В основі роботи детекторів цього типу лежить прикладання напруги до просторово розділених електродів, розміщених в камері, заповненій злегка іонізованим газом. Позитивні іони та електрони, що утворюються в камері, збираються на електродах і спричиняють появу електричного струму або імпульсів. Кількість пар «іон-електрон» прямо пропорційна енергії випромінювання. Серед основних типів заповнених газом детекторів можна виділити іонізаційну камеру, пропорційні лічильники та лічильник Гейгера-Мюллера. Різниця між цими детекторами пояснюється на рис. 30.1, на якому наведено залежність іонів, що збираються на електродах, від прикладеної напруги. Ця напруга викликає конкуренцією між втраченою іонних пар за рекомбінації та їх збирання на електродах. Підвищення напруги (область 1) приводить до збільшення швидкості руху іонів, зменшення часу, потрібного на рекомбінацію, через що заряд на електродах є пропорційним кількості іонних пар, що утворюються в міжелектродному просторі. На цьому принципі працює іонізаційна камера. За подальшого підвищення напруги електрони, що утворюються за первинних іонізаційних процесів, беруть участь в додатковій іонізації. Заряд на електродах в даній ситуації прямо пропорційний прикладеній напрузі (область 2). Використання цієї залежності — в



**Рис. 30.1.** Области дії заповнених газом детекторів: 1 — іонізаційна камера; 2 — пропорційний лічильник; 3 — лічильник Гейгера-Мюллера

основі пропорційного лічильника. Продовження збільшення напруги дає можливість отримати ситуацію, коли заряд на електродах не залежить від прикладеної до них напруги (область 3). Ця ситуація реалізується в лічильниках Гейгера-Мюллера.

*Іонізаційна камера* — детектор, дія якого базується на здатності заряджених частинок викликати іонізацію газу. Принциповою перевагою детектора цього типу є можливість отримання безпосередньої інформації щодо експозиційної або поглинутої дози. Справді, оскільки рентген є одиницею експозиційної дози і відповідає кількості зарядів, що утворюється іонізуючим випромінюванням в  $1 \text{ см}^3$  повітря при нормальних умовах, саме іонізаційна камера дає можливість оцінювати іонізуюче випромінювання в цих одиницях. Зовнішній вигляд камери наведено на рис. 30.2. Утворення кожної іонної пари супроводжується втратою енергії близько  $34 \text{ eV}$  ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ). Якщо припустити, що іонізуючі частинки проходять через камеру зі швидкістю  $N(\text{с}^{-1})$  і кожна з них втрачає енергію  $E(\text{MeV})$ , то величину заряду, що збирається на електродах за одиницю часу, можна визначити за виразом:

$$Q(\text{Кл} \cdot \text{с}^{-1}) = NEe \cdot 10^6/34. \quad (30.14)$$

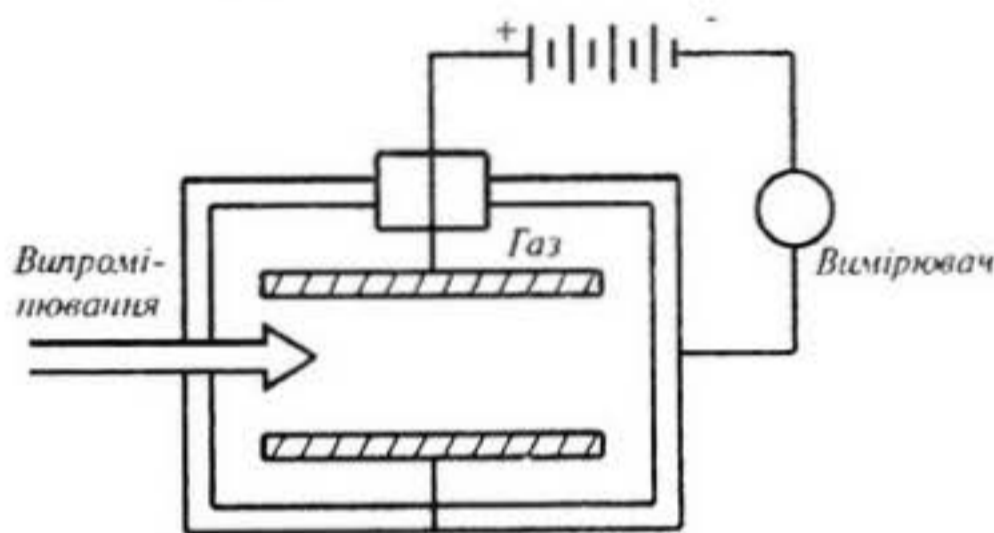


Рис. 30.2. Іонізаційна камера

Прикладання напруги величиною кілька сот вольт дає можливість збирати на електродах всі електрони і позитивні іони.

*Пропорційний лічильник* утворює сигнал, амплітуда якого пропорційна енергії, яка виділяється в його об'ємі частинкою, що реєструється. Конструкція детектора (рис. 30.3) передбачає наявність центрального електрода, до якого прямують електрони, що вивільнюються завдяки іонізації.

Напруженість поля  $E$ , що утворюється на відстані  $r$  від електрода, дорівнює:

$$E = U/[r \ln(d_1/d_2)], \quad (30.15)$$

де  $U$  — прикладена напруга (В),  $d_1$  — діаметр лічильника,  $d_2$  — діаметр центрального електрода.

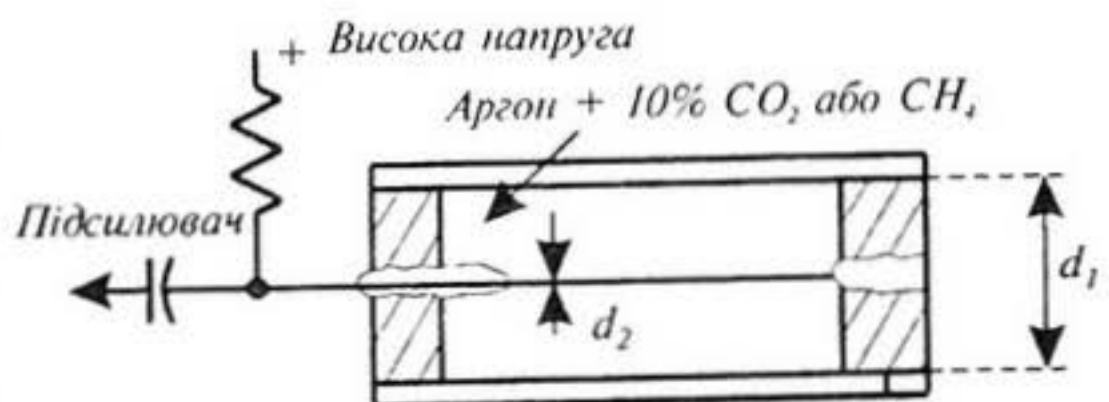


Рис. 30.3. Пропорційний лічильник



Видно, що поблизу електрода напруженість електричного поля настільки велика, що первинні електрони набувають енергію, достатньої для вторинної іонізації. При цьому на центральний електрод приходить лавина електронів. Відношення повної кількості зібраних на електроді електронів до їх первинної кількості називається *коефіцієнтом газового підсилення*; величина його може досягати  $10^2 \div 10^4$ .

*Лічильник Гейгера-Мюллера* являє собою газорозрядний детектор, який працює при проходженні через його об'єм заряджених частинок. Робочий об'єм лічильника наведено на рис. 30.4. До електродів прикладають напругу величиною кількесот вольт. За проходження іонізуючої частинки в газі утворюються вільні електрони, що рухаються до центрального електрода. Поблизу електрода напруженість електричного поля збільшується, електрони прискорюються настільки, що починають в свою чергу іонізувати газ. Виникає коронний розряд, що поширюється вздовж електрода. В зовнішньому ланцюзі утворюються електричні імпульси, які відповідають спалахам розряду. Кількість цих імпульсів за одиницю часу дорівнює кількості іонізуючих частинок.

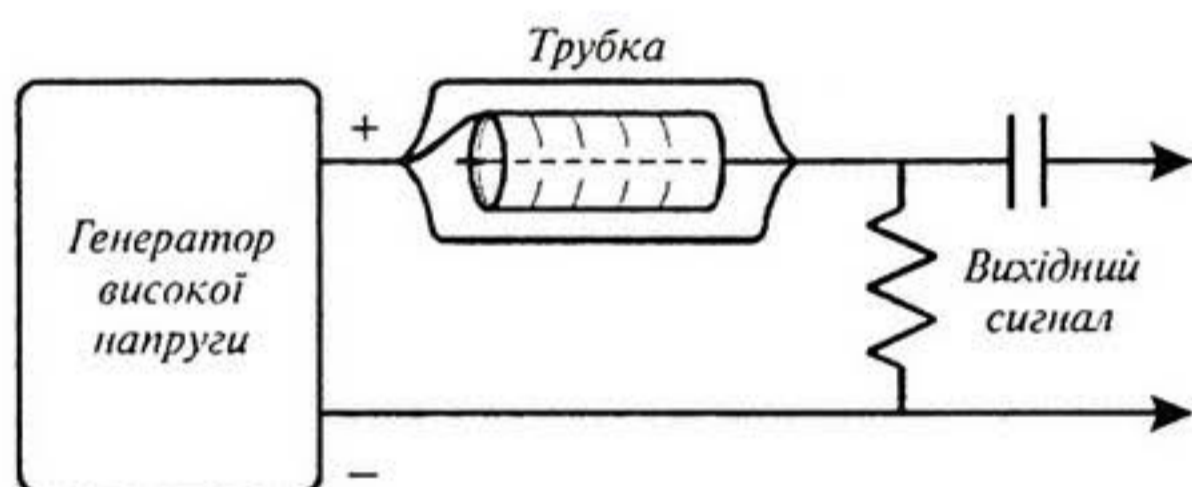


Рис. 30.4. Лічильник Гейгера-Мюллера

*Сцинтиляційний лічильник* — детектор, основними елементами якого є речовина, що люмінесціює під впливом заряджених частинок, та фотоелектронний помножувач. Заряджена частинка проходить через речовину, викликаючи не лише іонізацію атомів і молекул, а й їх збудження. Перехід атомів і молекул зі збудженого стану в основний супроводжується випромінюванням кванта видимого або ультрафіолетового діапазону. Кожний такий світловий спалах, що називається *сцинтиляцією*, реєструється фотоелектронним помножувачем, електричні імпульси з виходу якого подаються на систему реєстрації. Типовими матеріалами для сцинтиляційних лічильників є кристали  $ZnS(Ag)$ ,  $NaI(Tl)$ ,  $CsI(Tl)$  (в дужках вказано активатора, що викликає сцинтиляції в кристалі), кадмієві та кальцієві солі вольфрамової кислоти, галіди літію, а також органічні сцинтилятори — антрацен  $C_{14}H_{10}$ , стильбен  $C_{14}H_{12}$ , розчини толуену, ксілену, фенілциклогексану. Зовнішній вигляд сцинтиляційного лічильника наведено на рис. 30.5. Перевагою такого лічильника є висока чутливість

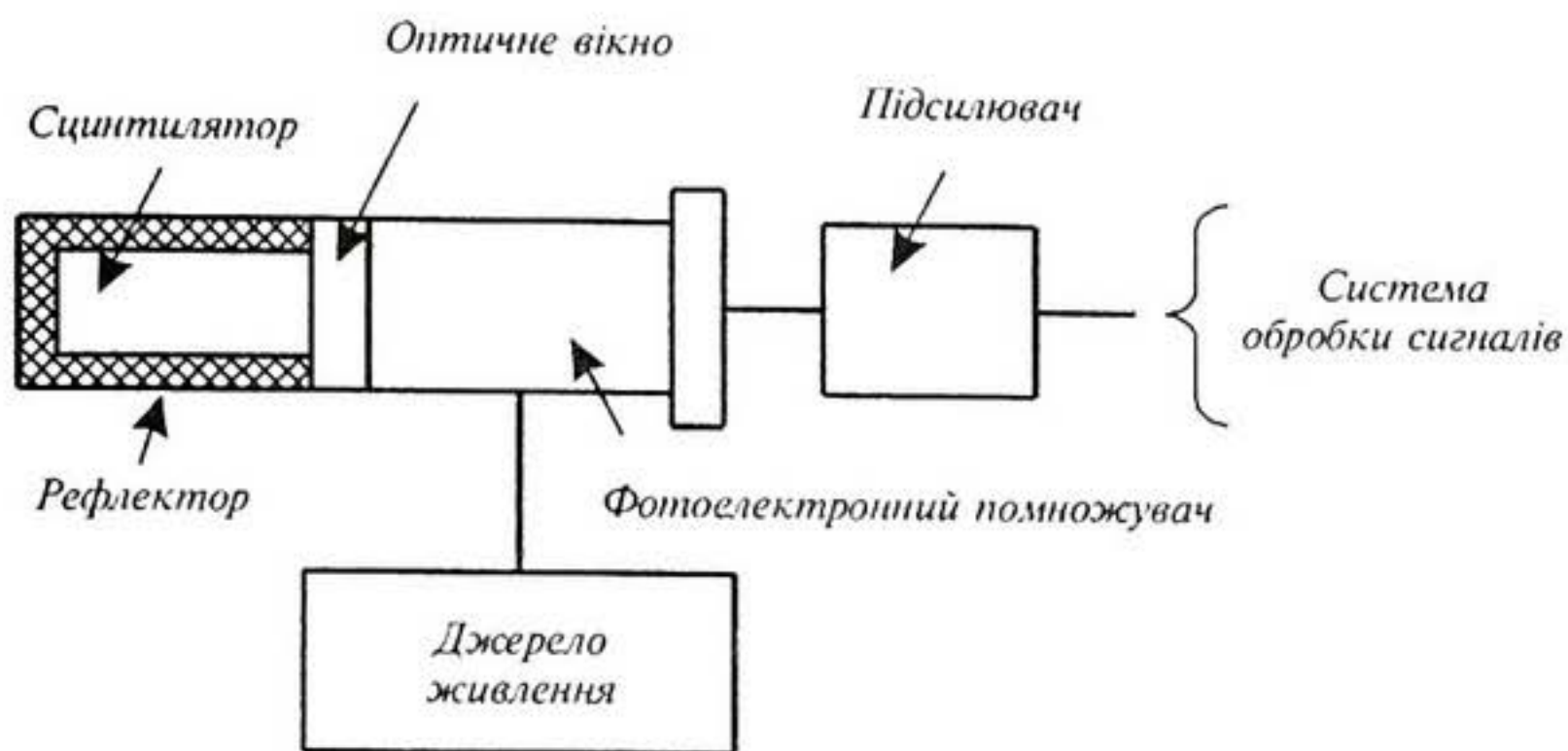


Рис. 30.5. Сцинтиляційний лічильник

(завдяки високій густині робочої речовини), особливо до  $\gamma$ -випромінювання, швидкодія та здатність визначати енергію частинки або кванта випромінювання.

**Напівпровідниковий лічильник.** В основі його лежить іонізація атомів твердого тіла, за якої утворюються вільні електрони в зоні провідності, і дірок у валентній зоні. Частинка, що проникає в кристал, генерує в ньому додаткові електронно-діркові пари. Носії заряду (електрони і дірки) під впливом прикладеного електричного поля переміщуються до електродів, завдяки чому в електричному ланцюзі утворюється електричний імпульс, що підсилюється і реєструється. Ширина забороненої зони становить  $2\div 3$  еВ; отже і енергія, необхідна для утворення пари електрон-дірка, є величиною такого ж порядку (нагадаємо, що в газових іонізаційних камерах для утворення пари іонів потрібна енергія 34 еВ (для повітря)). Таким чином, напівпровідникові лічильники мають на порядок більшу чутливість, ніж газові. Типовими матеріалами напівпровідникових лічильників є германій, кремній,  $CdTe$ ,  $HgI$ .

**Термолюмінесцентні детектори** використовують процес люмінесценції при нагріванні речовини, яка попередньо збуджується випромінюванням. Під час нагрівання речовини електрони, що захоплюються уловлювачами, вивільнюються і переходять на рівні з меншою енергією, висилаючи квант світла. Складаються термолюмінесцентні детектори з камери, зв'язаної з системою нагрівання, фотоелектронним помножувачем, підсилювачем та термопарою для вимірювання температури.

**Трекові детектори** — в основі їх роботи лежить іонізація атомів або молекул речовини; іони, що утворюються, реєструють завдяки конденсації перенасиченої пари (*камера Вільсона*), пароутворенню перегрітої рідини (*бульбашкова камера*), утворенню розрядів у газах (*іскрова камера*).

Фотографічне детектування базується на використанні плівок, в яких шар емульсії (бромисте срібло на желатиновій основі) має в десятки разів більшу товщину, ніж у звичайних фотоплівках, що підвищує ефективність взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною. Механізм цієї взаємодії полягає в поглинанні іонізуючого випромінювання речовиною за фотоелектричного процесу, завдяки якому енергія випромінювання передається електрону. Цей електрон за іонізації утворює інші вільні електрони, що взаємодіють з позитивними іонами срібла і змінюють їх розподіл по плівці. Рівень почорніння плівки оцінюється за допомогою денситометра (рис. 30.6) за виразом:

$$D = \lg (I_0 / I), \quad (30.16)$$

де  $D$  — густина срібла на плівці,  $I_0$  — інтенсивність випромінювання, що падає на плівку,  $I$  — інтенсивність випромінювання, що пройшло крізь плівку. Величина  $D = 2$  відповідає зачорненій плівці, через плівку з  $D = 1$  можна читати текст.

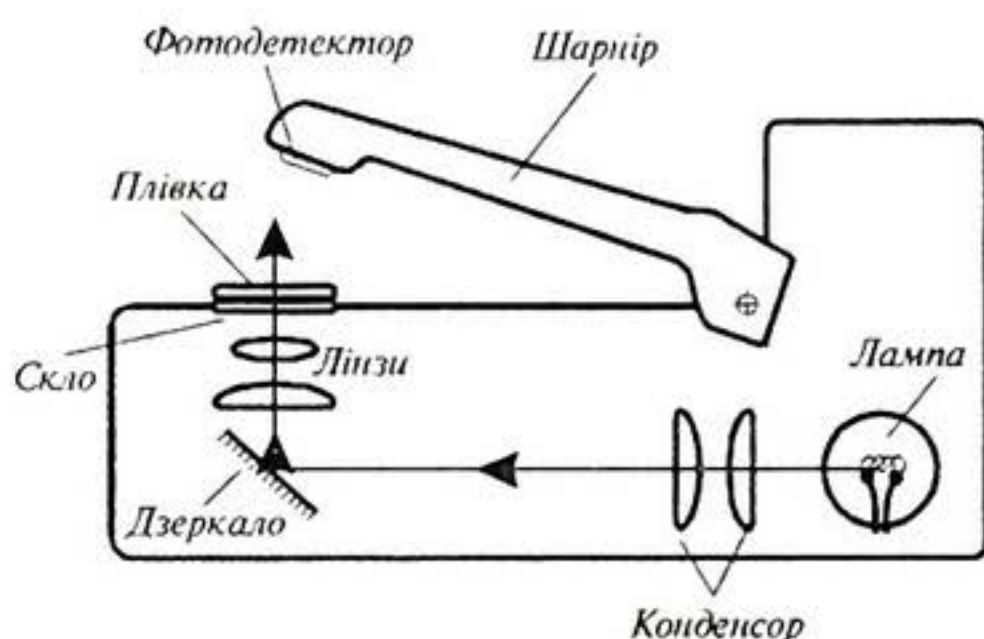


Рис. 30.6. Оцінка почорніння плівки за допомогою денситометра

### 30.4.2. Принципи $\gamma$ -спектроскопії

Оскільки  $\gamma$ -випромінювання являє собою електромагнітне випромінювання з дуже короткими ( $< 2 \cdot 10^{-10}$  м) хвилями, на перший план тут виступають корпускулярні властивості. Розглянемо основні процеси, що відбуваються під час взаємодії  $\gamma$ -випромінювання з речовиною.

Фотоелектричне поглинання супроводжується перенесенням усієї енергії  $\gamma$ -випромінювання на внутрішні електронні орбіти атома, внаслідок чого електрон залишає атом, а  $\gamma$ -випромінювання зникає (рис. 30.7). Але вакантне місце на внутрішній орбіті займає електрон з зовнішньої орбіти; цьому переходу відповідає вивільнення певної енергії у вигляді кванта рентгенівського випромінювання. Цей квант називається *характеристичним*, оскільки він характеризує речовину,

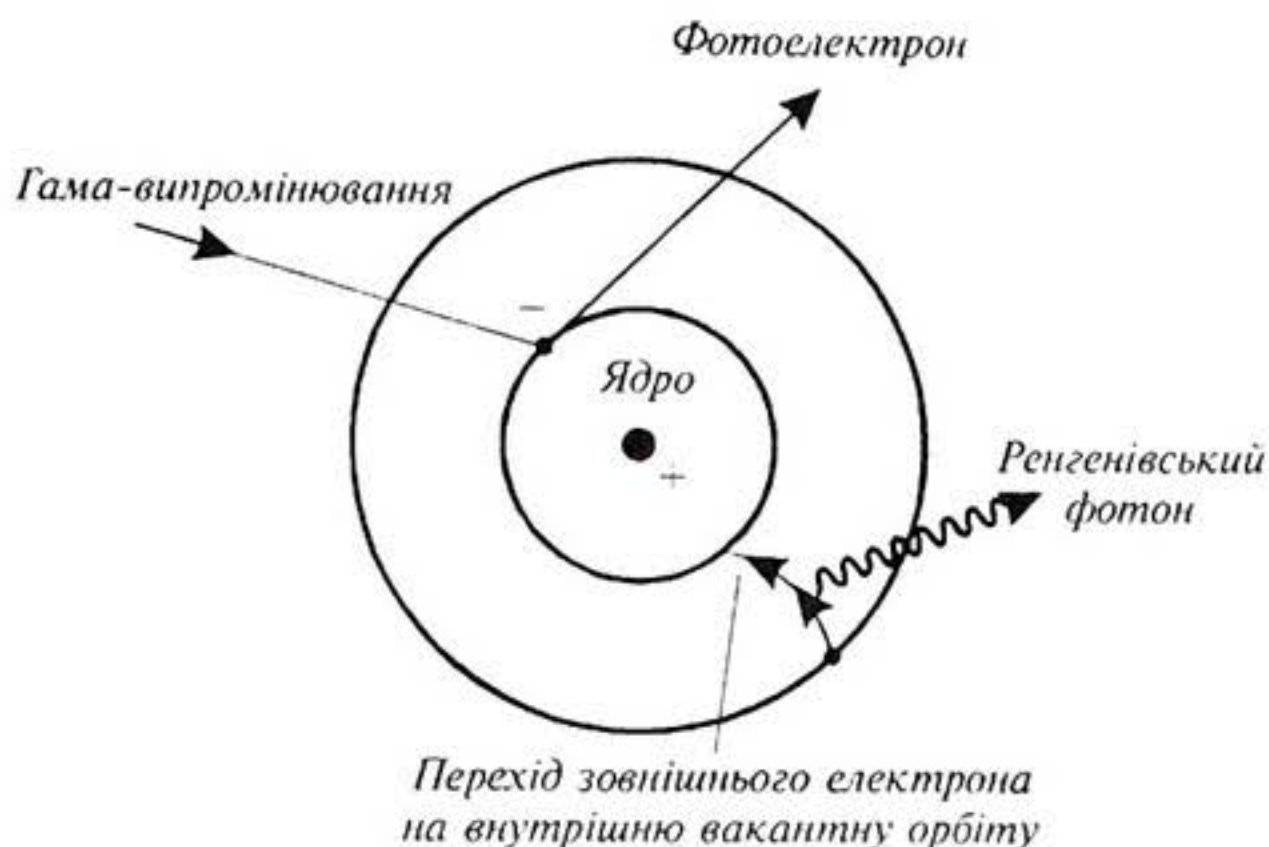


Рис. 30.7. Фотоелектричне поглинання

що поглинає  $\gamma$ -випромінювання. Фотоелектричний ефект відбувається при дії зовсім малих (десятки кеВ) енергій.

*Комптонівський ефект* полягає в пружному розсіюванні квантів рентгенівського або  $\gamma$ -випромінювання на вільних або зовнішніх, слабо пов'язаних з атомом електронах. В цьому разі квант передає частину своєї енергії електрону і змінює напрямок руху, тобто розсіюється (рис. 30.8); зменшення енергії означає збільшення довжини хвилі розсіяного випромінювання. Сумісне рішення рівнянь, що решають закони збереження енергії та імпульсу під час комптонівського ефекту дають вираз для зсуву довжини хвилі (*формулу Комптона*):

$$\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda = \lambda_0(1 - \cos\theta), \quad (30.17)$$

де  $\lambda_p$  — довжина розсіяного випромінювання,  $\lambda$  — довжина падаючого випромінювання,  $\lambda_0 = h/m_0c$  — комптонівська довжина хвилі електрона,  $m_0$  — маса спокою електрона,  $\theta$  — кут розсіювання.

*Утворення пар* — процес, що відбувається при достатньо високих рівнях енергії, при яких  $\gamma$ -квант поглинається атомним ядром речовини. За цього поглинання утворюється пара «електрон-позитрон» (рис. 30.9). Це

той самий випадок, коли енергія перетворюється в масу. Для утворення пари (згідно з співвідношенням  $E = mc^2$ ) необхідна енергія 1,022 МеВ. Позитрон живе недовго, оскільки при зустрічі з електроном він об'єднується з останнім, посилаючи два кванти з енергією 0,51 МеВ.

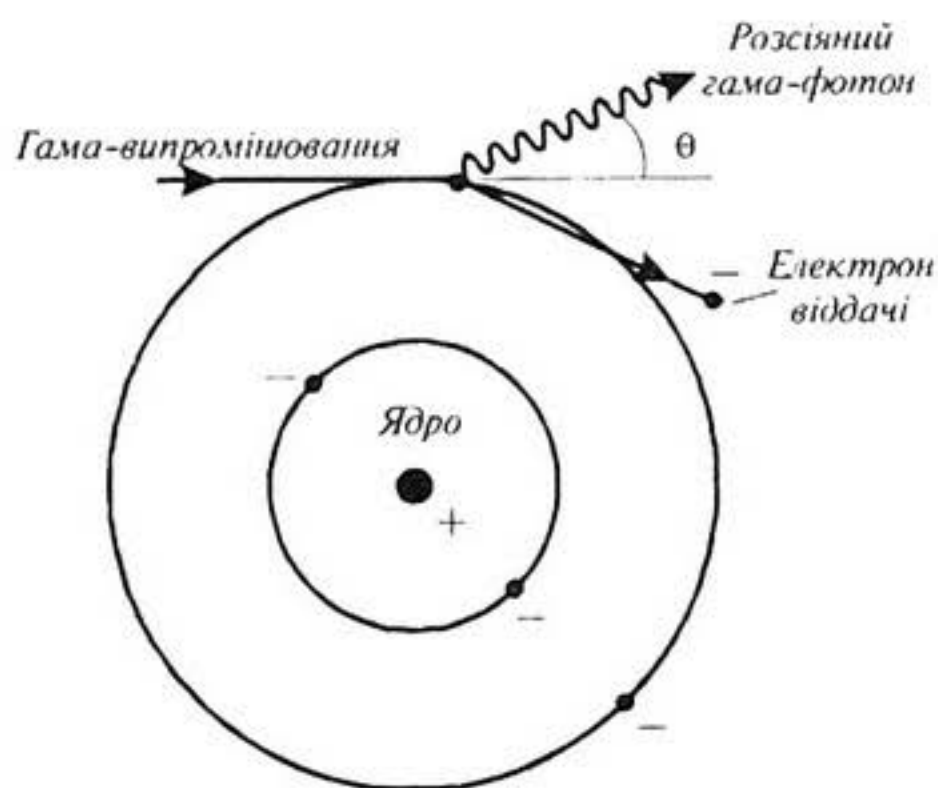


Рис. 30.8. Комптонівський ефект

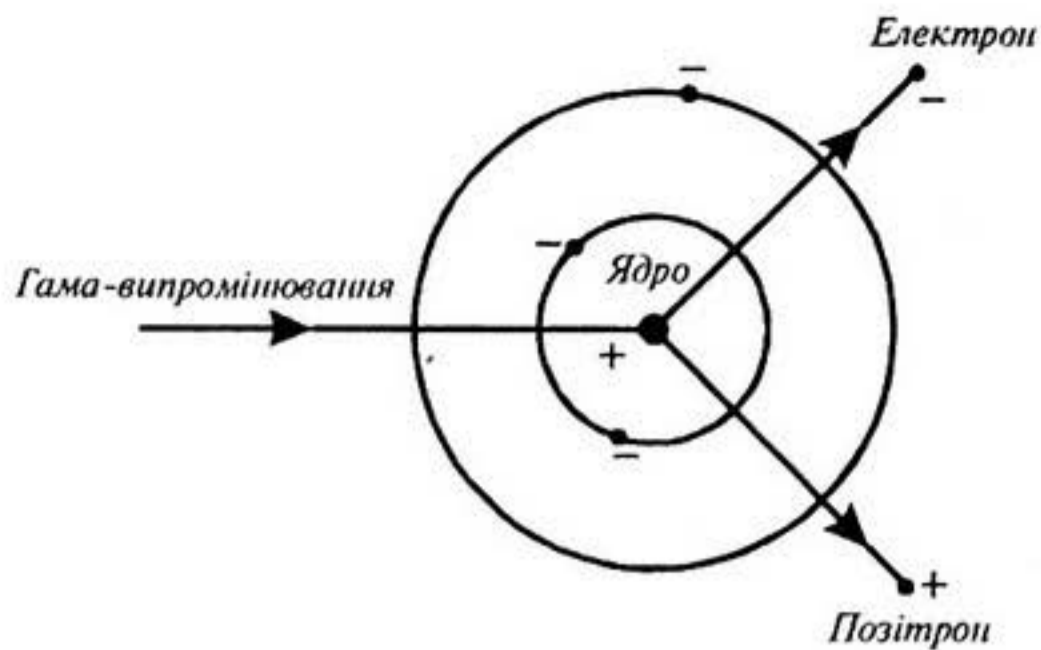


Рис. 30.9. Утворення пар

Всі розглянуті вище процеси проілюстровані на рис. 30.10а, який являє собою приклад енергетичного спектра електронів, що утворюється в кристалі  $NaI$  під впливом  $\gamma$ -випромінювання джерела  $^{60}Co$ . За присутність максимумів при 1,15 та 1,33 МеВ відповідають процеси фотоелектричного поглинання; невеликий максимум при 0,51 МеВ пов'язаний з анігіляцією випромінювання за утворення пар; нарешті, широкий максимум при 0,2 МеВ зумовлюється комптонівським розсіюванням. Дуже вузький максимум при 0,88 МеВ виникає завдяки свинцю, в якому міститься кобальт. Свинець поглинає  $\gamma$ -випромінювання і висилає кванти рентгенівського випромінювання. Ці кванти проходять через кристал  $NaI$ , де поглинаються завдяки фотоелектричним процесам. Відносну вірогідність розглянутих процесів поглинання  $\gamma$ -випромінювання залежно від енергії наведено на рис. 30.10,б.

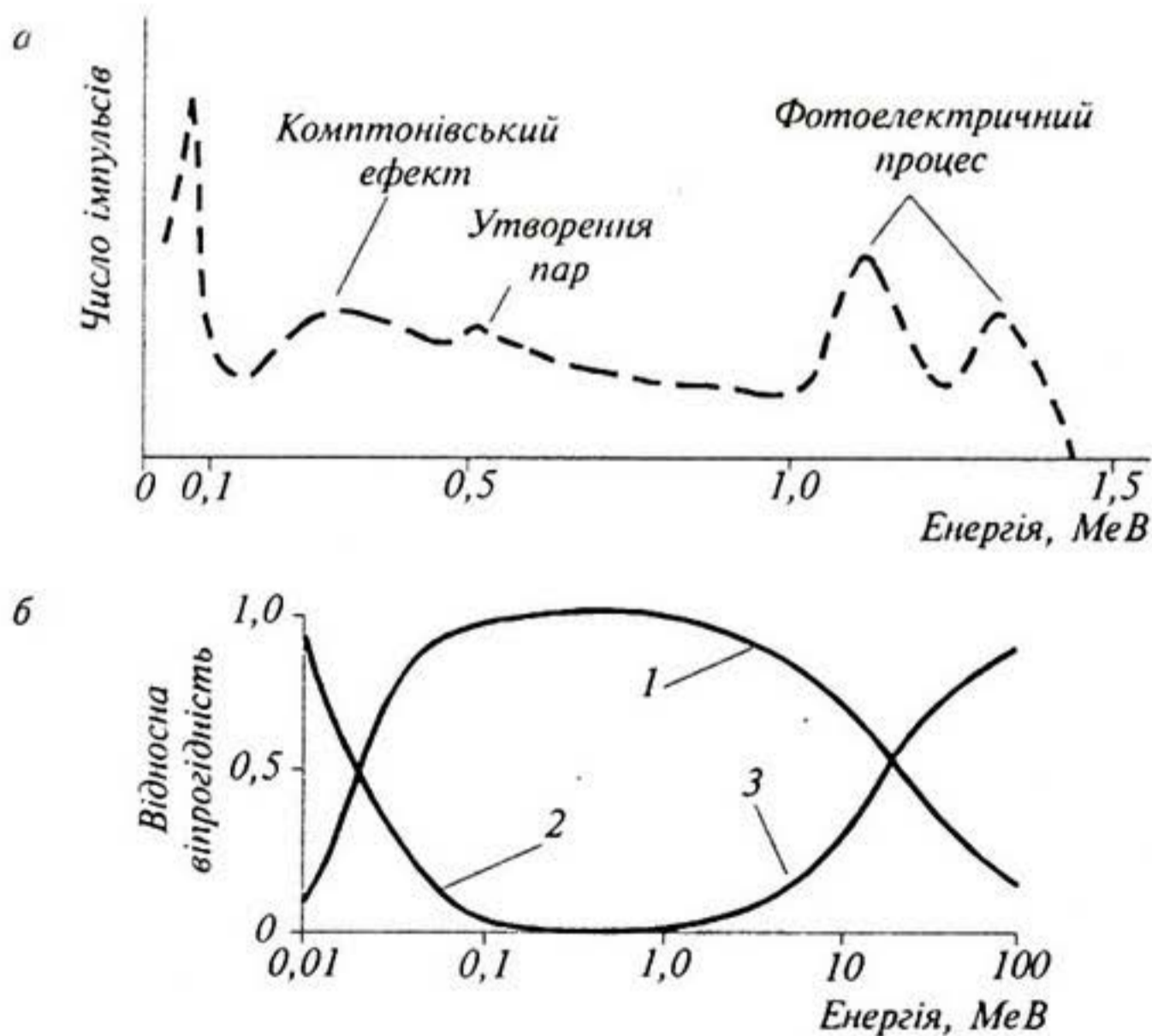


Рис. 30.10. а) Енергетичний спектр електронів, що утворюються в кристалі  $NaI$  під впливом  $\gamma$ -випромінювання; б) відносна вірогідність процесів поглинання  $\gamma$ -випромінювання: 1 — Комptonівський ефект; 2 — фотоелектричний процес; 3 — утворення пар

Таким чином, вимірювання залежності інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання від довжини хвилі або енергії квантів становить суть рентгенівської та  $\gamma$ -спектрометрії. Основною метою спектрометрії іонізуючого випромінювання є ідентифікація радіонуклідів. Як приклад можна навести спектр радіонуклідів у м'язовій тканині тунця (рис. 30.11).

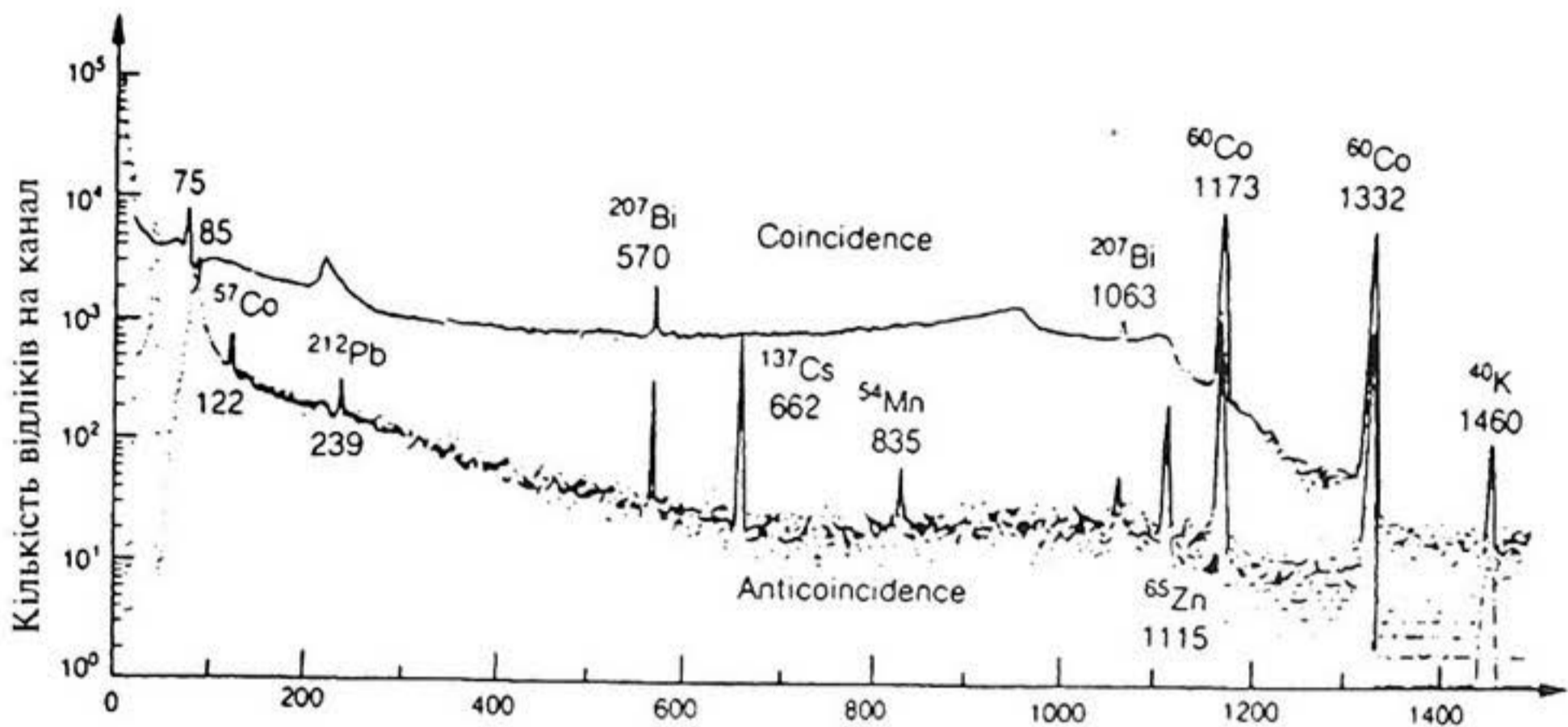


Рис. 30.11. Гама-спектр радіонуклідів у м'язовій тканині тунця, якого вловили в районі атола Бікіні, де проводили випробування ядерної зброї

## ПРИКЛАДИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### Приклад

Період піврозпаду ізоотопу  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  становить  $1,6 \cdot 10^3$  років. Визначити активність зразку, що містить  $3 \cdot 10^{16}$  ядер радю в даний момент часу.

### Розв'язок

$$T_{1/2} = 1,6 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{16} \text{ с} = 5,0 \cdot 10^{10} \text{ с.}$$

Звідси

$$\lambda = 0,693/T_{1/2} = 0,693/5,0 \cdot 10^{10} \text{ с} = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ с.}$$

Активність зразку в даний момент часу ( $\lambda = 0$ ) обчислимо за виразом:

$$\begin{aligned} a &= \lambda N_0 = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ с} \cdot 3 \cdot 10^{16} = 4,1 \cdot 10^5 \text{ Бк} = \\ &= 4,1 \cdot 10^5 / 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Ки} = 11,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ки} = 11,1 \text{ мКи}. \end{aligned}$$

### Контрольне завдання №30.1

Чому дорівнює активність 1 кг ізоотопу  ${}^{226}\text{Ra}$ , якщо період піврозпаду дорівнює 1600 років?

Відповідь:  $3,62 \cdot 10^{13}$  Бк.

### Приклад

Свинцева пластина товщиною 0,9 см зменшує інтенсивність  $\gamma$ -випромінювання ізотопу  $^{137}\text{Cs}$  на 65 %. Густина свинцю дорівнює  $11,3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ . Визначити шар половинного вбирання, коефіцієнт поглинання та глибину проникання випромінювання.

### Розв'язок

Використовуємо рівняння (30.10) з врахуванням умови завдання:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) = 0,35.$$

Звідси

$$\ln 0,35 = -\mu x = -\mu \cdot 0,9 \text{ см.}$$

Обчислюємо коефіцієнт поглинання:

$$m = -\ln 0,35 / 0,9 \text{ см} = 1,0498 / 0,9 = 1,166 \text{ см}^{-1}.$$

Шар половинного вбирання знайдемо за допомогою виразу (30.11):

$$D = \ln 2 / \mu = 0,693 / 1,166 \text{ см}^{-1} = 0,594 \text{ см.}$$

Знаходимо глибину проникання:

$$d = 1 / \mu = 1 / 1,166 \text{ см}^{-1} = 0,858 \text{ см.}$$

### Контрольне завдання №30.2

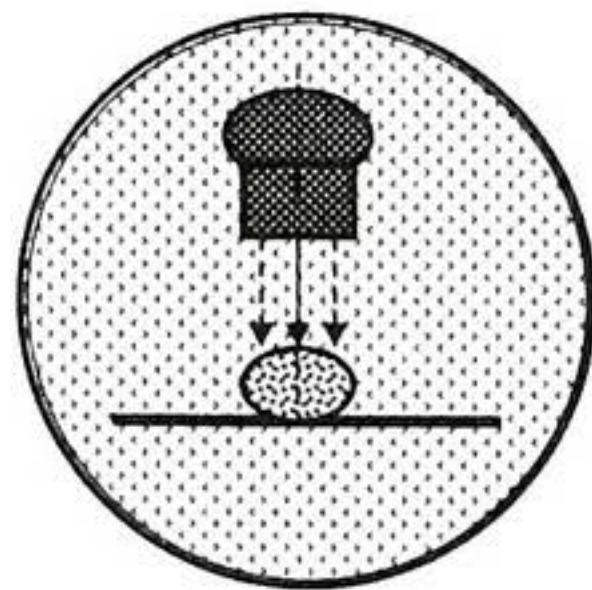
Шар половинного вбирання свинцевого поглинача дорівнює 6 мм. Яку товщину слід надати поглиначу, щоб зменшити інтенсивність  $\gamma$ -випромінювання ізотопу  $^{137}\text{Cs}$  у десять разів?

*Відповідь:* 20 мм.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яке випромінювання називають іонізуючим?
2. Назвати основні типи іонізуючих випромінювань.
3. В чому полягає явище радіоактивного розпаду?
4. Сформулювати закон радіоактивного розпаду.
5. Що таке абсолютна активність?
6. Назвати основні дози та одиниці доз.
7. За яким законом відбувається поглинання іонізуючого випромінювання речовиною?
8. Назвати та пояснити основні методи вимірювань іонізуючих випромінювань.
9. В чому полягають принципи  $\gamma$ -спектроскопії?
10. Які процеси лежать в основі взаємодії  $\gamma$ -випромінювання з речовиною?

# 31. РАДІОІЗОТОПИ І ЯДЕРНА МЕДИЦИНА



## 31.1. АТОМНЕ ЯДРО ТА ІЗОТОПИ

Ядерна медицина охоплює комплекс діагностичних та терапевтичних процедур, що передбачають застосування радіоізоотопів. Нагадаємо, що кожне атомне ядро характеризується зарядом  $Ze$ , де  $Z$  — зарядове число (число протонів у ядрі),  $e$  — заряд одного протона, масою  $M$  і масовим числом  $A$  (числом нуклонів у ядрі), що дорівнює числу нуклонів у ядрі; число нейтронів дорівнює  $N = A - Z$ . Атомні ядра позначаються символом  ${}^A_ZX$ , де  $X$  — символ хімічного елемента. *Ізотопи* — це різновиди даного хімічного елемента, що мають однаковий електричний заряд ядер, але відрізняються числом нейтронів. Наприклад, йод  ${}^{127}I$  має масове число  $A=127$ , число протонів  $Z = 53$  і число нейтронів  $N=74$ ; в той же час в природі існують ізотопи йоду  ${}^{123}I$ ,  ${}^{125}I$  та  ${}^{131}I$ , в яких число нейтронів  $N$  становить 70, 72 та 78 відповідно. Ізотопи, що належать радіоактивним елементам, називають *радіоізотопами*. Для потреб діагностики доцільно використовувати радіоізоотопи, здатні утворювати  $\gamma$ -випромінювання, спроможне проникати крізь біологічну тканину і бути зареєстрованим зовні тіла пацієнта з подальшим визначенням розподілу цього випромінювання всередині тіла. Для терапії слід застосовувати ізотопи, що висилають  $\beta$ -частинки, невелика проникність яких у тканину зумовлює забезпечення високих доз випромінювання в області локалізації ізотопа.

## 31.2. РАДІОІЗОТОПИ ЯК ІНДИКАТОРИ

Застосування радіоізоотопів дає можливість вивчати фізіологічні процеси, що відбувається в живому організмі, особливо за заміни тих елементів, з яких складається організм і які беруть участь в обміні



речовин. Радіоізотопи утворюють сполуки з іншими атомами, що приводить до формування так званих «мічених» молекул, що поведуть себе так само, як і звичайні молекули, але які легко можна відрізнити. В цілому радіоізотопи дають змогу отримати відомості щодо динаміки процесів в організмі; методи застосування радіоізотопів характеризуються високою чутливістю — для кількісного вимірювання достатньо  $10^5$ — $10^6$  атомів (тоді як для традиційних аналітичних методів необхідно  $10^{12}$ — $10^{14}$  атомів); невеликі кількості радіоізотопів не впливають на стан і процеси життєдіяльності організму.

В медицині радіоізотопи знайшли застосування для діагностики щитовидної залози ( $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ), серцево-судинної системи ( $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{99m}\text{Tc}$ ), центральної нервової системи ( $^{99m}\text{Tc}$ ), шлунково-кишкового тракту ( $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{113m}\text{In}$ ), показників крові ( $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ), запальовальних та інфекційних процесів ( $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ , цитрат  $^{67}\text{Ga}$ ), легень ( $^{99m}\text{Tc}$ ), дихальної системи ( $^{81m}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{127}\text{Xe}$ ), кісток ( $^{99m}\text{Tc}$ ), злоякісних пухлин ( $^{123}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{99m}\text{Tc}$ ).

### 31.3. УТВОРЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Основна ідея утворення зображень за допомогою радіонуклідів полягає в реєстрації просторового розподілу радіоізотопів в людському організмі шляхом переміщення або сканування детектора іонізуючого випромінювання; інколи детектор нерухомий, але застосовують кристал детектора великого розміру. Така система (гама-камера або сцинтиограф) здатна реєструвати активність, що накопичується окремими частинами тіла. Будову гама-камери наведено на рис. 31.1. Основними елементами приладу є коліматор, що складається з 50-міліметрового шару свинцю, в якому є отвори, та системи локалізації фотонів. Гама-випромінювання з тіла пацієнта проходить крізь отвір коліматора тільки при умові, якщо воно поширюється паралельно осі отвору. На виході кожного отвору знаходиться сцинтиляційний детектор, який реєструє активність певної ділянки тіла пацієнта. Вся система детекторів дає можливість утворити повну карту людського тіла.

Систему для утворення тривимірних зображень пацієнта (рис. 31.2) передбачає переміщення гама-камери навколо пацієнта. В кожному положенні гама-камери фіксується певний зріз тіла; за допомогою комп'ютерної системи можна побудувати об'ємне зображення.

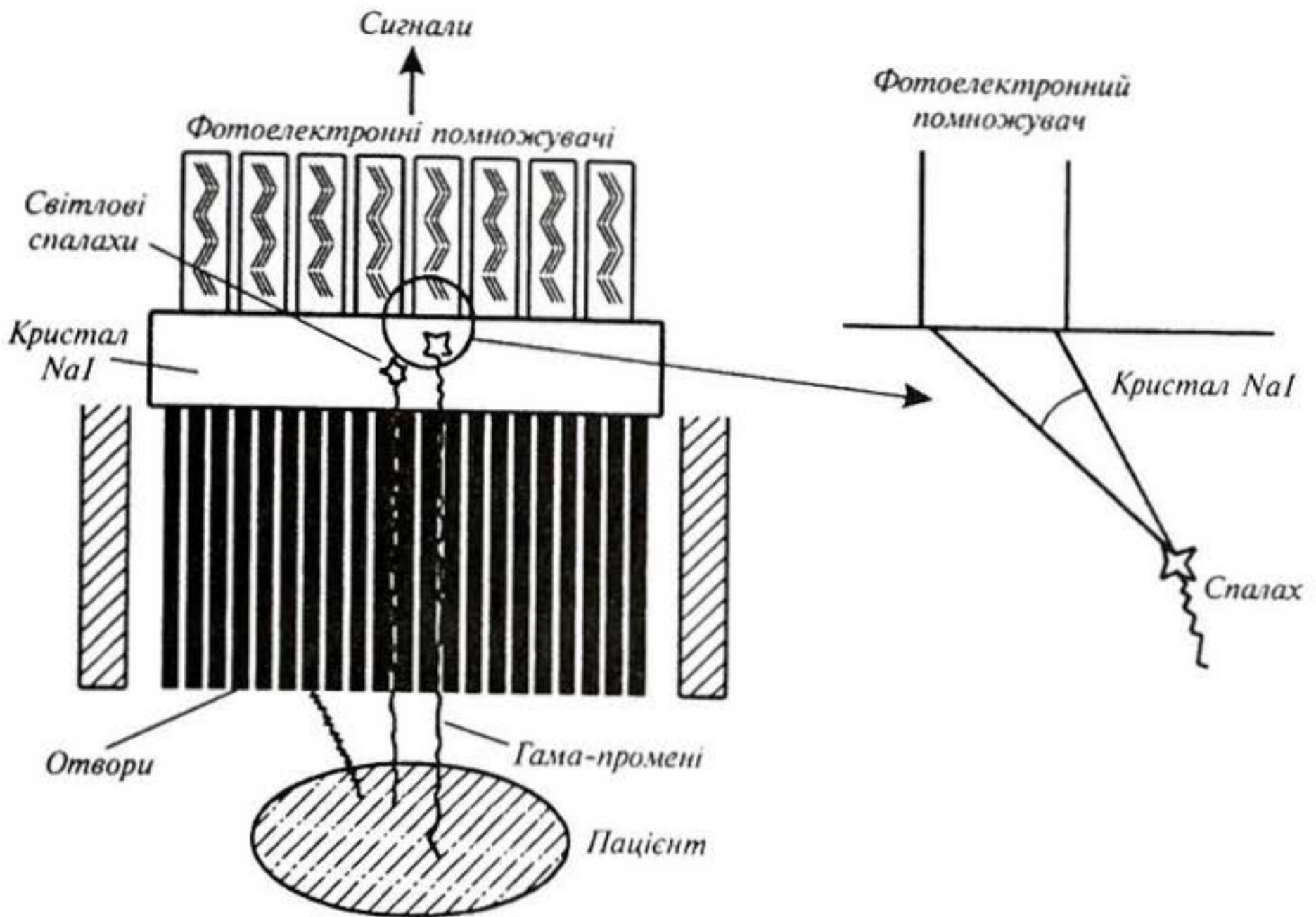


Рис. 31.1. Будова гама-камери

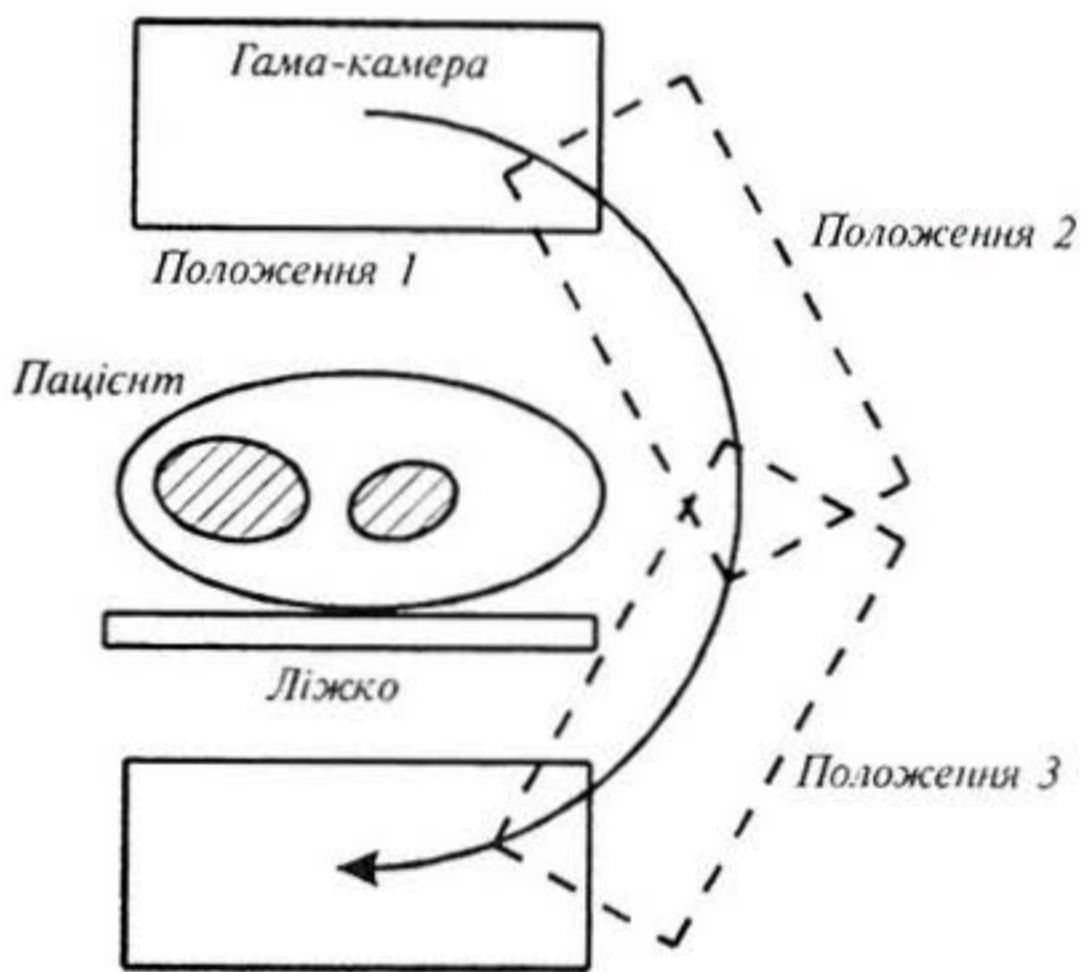


Рис. 31.2. Система для утворення тривимірних зображень пацієнта

## 31.4. ВПЛИВ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

### 31.4.1. Механізми впливу іонізуючих випромінювань

Внаслідок того, що енергія квантів іонізуючих випромінювань значно перевищує енергію будь-яких хімічних зв'язків, відбувається руйнування молекул живої тканини, що призводить до загибелі клітин і порушення систем життєдіяльності організму. Процес іонізації атомів і молекул пов'язаний з їх збудженням, через що вони набувають підвищеної реакційної здатності за появи неспарених електронів. Все це може сприяти утворенню нових хімічних сполук або зміні окремих ділянок молекул.

Вплив іонізуючого випромінювання на воду, що міститься в біологічних клітинах, пов'язаний з утворенням вільних радикалів, здатних завдати серйозної шкоди біологічно важливим молекулам. Крім того, іонізуюче випромінювання діє на молекули ДНК (руйнування нуклеотидів, розриви полінуклеотидних ланцюгів), білків (зміни амінокислотних залишків, порушення системи водневих зв'язків, втрата конформаційних станів), ліпідів (процеси радіолізу). Всі ці руйнування біологічно важливих молекул і клітинних структур призводять до розвитку *променевого ураження* — патологічних змін в організмі, органах і тканинах. Крім різноманітних безпосередніх порушень процесів життєдіяльності, можливі віддалені ефекти опромінення, що проявляються в формі виникнення злоякісних пухлин, скорочення тривалості життя, послаблення імунітету, мутагенних наслідків.

### 31.4.2. Радіоактивні забруднення

З точки зору здоров'я людини найбільш небезпечними є радіоактивні елементи з періодом піврозпаду від декількох тижнів до кількох років. Наприклад, стронцій  $^{90}\text{Sr}$ , що накопичується в кісткових тканинах (28 років), і цезій  $^{137}\text{Cs}$  (32 роки). Крім того, небезпечними є ізотопи простих елементів, що входять до складу живої речовини —  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{35}\text{S}$ . Небезпечними є радіоактивні опади, що виникають внаслідок випробування ядерної зброї. Радіоактивні домішки розсіюються в атмосфері, а потім через ґрунт і воду потрапляють у біомасу. Джерелом радіоактивного забруднення може бути атомна промисловість. Забруднення може відбуватися під час видобування і збагачення копалин, використання сировини в реакторах, обробки ядерного палива в установках. Вкрай гострою для навколишнього середовища є проблема утилізації радіоактивних відходів. Процеси

обробки та експлуатації ядерного палива можна поділити з точки зору можливих впливів на здоров'я людини на дві категорії. До першої слід віднести технологічні операції, що супроводжуються утворенням невисокого рівня відходів — це добування уранових копалин та їх очищення. Ці операції можуть завдати шкоди людському організму лише протягом тривалого часу. Відходи високого рівня мають місце під час роботи з урановими стрижнями, коли за короткий час можна отримати високі рівні радіоактивності.

Води океану можуть бути сильно радіоактивними внаслідок випробувань ядерної зброї. Активно піддаються радіоактивному забрудненню планктон й водорості, з яких починаються харчові ланцюги, що призводить до потрапляння радіоактивних речовин у водні організми. Такі швидкі риби як меч-риба і тунець можуть випереджати на декілька місяців швидкість північної екваторіальної течії, що несе радіоактивно заражені внаслідок ядерних вибухів води, і можуть в цілком чистих водах ставати джерелом радіоактивності для своїх ворогів, а, надходячи на ринок, і для людини. Є відомості про те, що окрилені комахи, личинки яких жили і харчувались в радіоактивно заражених середовищах, мають в своєму тілі велику кількість радіоактивних ізотопів і здатні перенести їх в польоті на великі відстані від місця випуску в природу. Перелітні птахи спроможні також переносити радіоактивні частки водосховища, що забруднювалося, в інші країни, на інші материки, особливо ж — водоплавні, що мають в своєму живленні безпосередній контакт з мулом і донними організмами.

Заражені ділянки ґрунту поступово будуть звільнятися від забруднення завдяки участі бактерій і рослин, які концентрують ізотопи і передають їх іншим тваринам, а також за міграції та переміщення радіоактивно заражених організмів, насіння та частинок ґрунту у просторі. Суто ерозійні процеси також зроблять свою справу. Крім того, діяльність рухомих ґрунтових тварин — червів, личинок комах, кротів, ховрахів, мишоподібних гризунів, що так чи інакше сприймають радіоактивні забруднення, неминуче надаватимуть прискорення процесу розсіювання забруднень.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. Що називають ізотопом? радіоізотопом?
2. В чому полягає суть використання радіоізотопів як індикаторів?
3. Пояснити принцип утворення зображень на основі використання  $\gamma$ -випромінювання.
4. Назвати механізми впливу іонізуючих випромінювань на живі організми.
5. Які забруднення називаються радіоактивними?

# ДОДАТОК

## Фізичні сталі

Символ	Назва	Величина і одиниці
$c$	Швидкість світла у вакуумі	$2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
$N_A$	Число Авогадро	$6,0221367(36) \cdot 10^{23} \text{ (г} \cdot \text{моль)}^{-1}$
$R=N_A \cdot k$	Універсальна газова стала	$8,3145510(70) \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
$k = R/N_A$	Стала Больцмана	$1,380658(12) \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
$kT$	Стала Больцмана · температура	0,0235 еВ при 0°C 0,0253 еВ при 20°C
$RT$	Універсальна газова стала · температура	$2,271 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$ при 0 °C $2,437 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$ при 20 °C
$e$	Елементарний заряд	$1,60217733(49) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
$\epsilon_0$	Електрична стала	$8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$
$\mu_0$	Магнітна стала	$12,56637614 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}$
$F = N_A \cdot e$	Число Фарадея	$9,64846 \cdot 10^4 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
$RT/F$		25,3 мВ при 20°C
$2,303RT/F$		58,2 мВ при 20°C
$h$	Стала Планка	$6,626075(40) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
$\hbar = h/2\pi$	Стала Планка	$1,05457266(63) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
$s$	Стала Стефана - Больцмана	$5,67051(19) \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$
$B$	Стала в законі зміщення Віна	0,002897756 м · К

## Множники і префікси для творення кратних і часткових величин

Множник	Префікс	Позначення	Множник	Префікс	Позначення
$10^{18}$	екса	Е	$10^{-1}$	деци	д
$10^{15}$	пета	П	$10^{-2}$	санти	с
$10^{12}$	тера	Т	$10^{-3}$	мілі	м
$10^9$	гіга	Г	$10^{-6}$	мікро	мк
$10^6$	мега	М	$10^{-9}$	нано	н
$10^3$	кіло	к	$10^{-12}$	піко	п
$10^2$	гекто	г	$10^{-15}$	фемто	ф
$10^1$	дека	д	$10^{-18}$	атто	а

## Грецький алфавіт

А $\alpha$ альфа	І $\iota$ йота	Р $\rho$ ро
В $\beta$ бета	К $\kappa$ капа	$\Sigma$ $\sigma$ сигма
Г $\gamma$ гама	Л $\lambda$ ламбда	Т $\tau$ тау
$\Delta$ $\delta$ дельта	М $\mu$ мю	Ф $\phi$ фі
Е $\epsilon$ епсилон	Ν $\nu$ ню	Х $\chi$ хі
Ζ $\zeta$ дзета	Ξ $\xi$ ксі	Υ $\upsilon$ юпсилон, іпсилон
Η $\eta$ ета	Ο $\omicron$ омікрон	Ψ $\psi$ пси
Θ $\theta, \vartheta$ тета	Π $\pi$ пі	Ω $\omega$ омега

## ПСИХРОМЕТРИЧНІ ТАБЛИЦІ

*Пружність водяної пари в мм рт.ст. при різних температурах*

Температура повітря, С°	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	4,58	4,61	4,65	4,68	4,71	4,75	4,79	4,82	4,85	4,89
1	4,92	4,96	5,00	5,03	5,07	5,10	5,15	5,18	5,21	5,25
2	5,29	5,33	5,37	5,41	5,45	5,48	5,52	5,57	5,60	5,64
3	5,69	5,72	5,76	5,84	5,89	5,93	5,93	5,97	6,02	6,05
4	6,10	6,14	6,18	6,23	6,27	6,32	6,36	6,41	6,45	6,50
5	6,54	6,59	6,63	6,68	6,73	6,77	6,82	6,87	6,92	6,96
6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7,41	7,46
7	7,52	7,54	7,61	7,67	7,72	7,77	7,83	7,88	7,94	7,99
8	8,04	8,10	8,15	8,21	8,27	8,33	8,38	8,44	8,49	8,55
9	8,61	8,67	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08	9,15
10	9,21	9,27	9,33	9,40	9,46	9,53	9,59	9,65	9,71	9,78
11	9,85	9,91	9,98	10,04	10,11	10,18	10,25	10,32	10,38	10,45
12	10,52	10,59	10,66	10,74	10,80	10,88	10,95	11,02	11,09	11,16
13	11,24	11,31	11,39	11,46	11,54	11,61	11,69	11,76	11,84	11,91
14	11,99	12,07	12,15	12,23	12,31	12,39	12,47	12,55	12,63	12,72
15	12,78	12,87	12,95	13,03	13,12	13,20	13,29	13,38	13,46	13,55
16	13,64	13,72	13,80	13,89	13,98	14,07	14,16	14,25	14,34	14,43
17	14,53	14,62	14,71	14,81	14,90	15,00	15,09	15,18	15,27	15,38
18	15,48	15,57	15,67	15,77	15,87	15,97	16,07	16,17	16,27	16,38
19	16,47	16,58	16,68	16,79	16,89	17,00	17,10	17,21	17,31	17,43
20	17,53	17,64	17,75	17,86	17,97	18,08	18,19	18,30	18,42	18,54
21	18,65	18,76	18,88	18,99	19,11	19,23	19,35	19,47	19,59	19,71
22	19,83	19,95	20,07	20,20	20,32	20,44	20,56	20,69	20,82	20,94
23	21,07	21,19	21,33	21,46	21,58	21,71	21,83	21,98	22,11	22,24
24	22,38	22,51	22,65	22,78	22,92	23,06	23,20	23,33	23,47	23,62
25	23,76	23,90	24,04	24,19	24,33	24,47	24,62	24,76	24,91	25,06
26	25,21	25,36	25,51	25,66	25,81	25,96	26,12	26,27	26,43	26,59
27	26,74	26,90	27,06	27,21	27,37	27,54	27,70	27,86	28,18	28,18
28	28,34	28,51	28,69	28,85	29,02	29,19	29,36	29,53	29,70	29,87
29	30,04	30,22	30,40	30,57	30,75	30,92	31,10	31,28	31,46	31,64
30	31,83	32,01	32,20	32,38	32,57	32,75	32,94	33,13	33,32	33,51
31	33,70	33,89	34,09	34,28	34,49	34,67	34,87	35,07	35,27	35,47
32	35,67	35,87	36,07	36,28	36,48	36,69	36,89	37,10	37,31	37,52
33	37,73	37,95	38,16	38,38	38,59	38,81	39,02	39,24	39,47	39,68
34	39,91	40,13	40,35	40,58	40,80	41,03	41,26	41,49	41,72	41,95
35	42,18	42,42	42,66	42,89	43,13	43,37	43,61	43,85	44,09	44,33
36	44,58	44,82	45,06	45,31	45,57	45,81	46,06	46,32	46,57	46,83
37	47,08	47,34	47,60	47,85	48,12	48,38	48,64	48,90	49,17	49,44
38	49,71	49,98	50,25	50,52	50,80	51,07	51,34	51,62	51,09	52,18
39	52,46	52,61	53,02	53,31	53,60	53,89	54,17	54,46	54,76	55,05

*Пружність водяної пари в паскалях при різних температурах*

Темпе- ратура повітря, °С	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	611	615	620	624	629	633	638	642	647	652
1	656	661	666	671	676	680	686	690	695	700
2	705	710	716	721	726	731	736	742	747	752
3	758	763	768	779	785	790	790	796	802	807
4	813	819	824	830	836	842	848	854	860	866
5	872	878	884	891	897	903	909	916	922	928
6	935	941	948	954	961	968	974	981	988	995
7	1002	1008	1015	1022	1029	1036	1044	1051	1058	1065
8	1072	1080	1087	1095	1102	1110	1117	1125	1132	1140
9	1148	1156	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1220
10	1228	1236	1244	1253	1261	1270	1278	1287	1295	1304
11	1313	1321	1330	1339	1348	1357	1366	1375	1384	1393
12	1403	1412	1421	1431	1440	1450	1459	1469	1478	1488
13	1498	1508	1518	1528	1538	1548	1558	1568	1578	1588
14	1599	1609	1620	1630	1641	1651	1662	1673	1684	1695
15	1704	1715	1726	1737	1749	1760	1771	1783	1794	1806
16	1817	1829	1840	1852	1864	1876	1888	1900	1912	1924
17	1937	1949	1961	1974	1986	2000	2011	2024	2036	2050
18	2063	2076	2089	2102	2115	2129	2142	2155	2169	2183
19	2196	2210	2224	2238	2252	2266	2280	2294	2308	2323
20	2337	2352	2366	2381	2396	2410	2425	2440	2455	2471
21	2486	2501	2517	2532	2548	2563	2579	2595	2611	2627
22	2643	2659	2675	2692	2708	2724	2741	2758	2775	2791
23	2808	2825	2843	2860	2877	2894	2912	2930	2947	2965
24	2983	3001	3019	3037	3055	3074	3092	3110	3129	3148
25	3167	3186	3205	3224	3243	3262	3282	3301	3321	3341
26	336161	3381	3401	3421	3441	3461	3482	3502	3523	3544
27	3565	3586	3607	3628	3649	3671	3692	3714	3735	3757
28	3779	3801	3824	3846	3868	3891	3913	3936	3959	3982
29	4005	4028	4052	4075	4099	4122	4146	4170	4194	4218
30	4243	4267	4292	4316	4341	4366	4391	4416	4441	4467
31	4492	4518	4544	4570	4596	4622	4648	4675	4701	4728
32	4755	4782	4809	4836	4863	4891	4918	4946	4974	5002
33	5030	5059	5087	5116	5144	5173	5202	5231	5261	5290
34	5320	5349	5379	5409	5439	5470	5500	5531	5561	5592
35	5623	5654	5686	5717	5749	5781	5813	5845	5877	5909
36	5942	5975	6007	6040	6074	6107	6140	6174	6208	6242
37	6276	6310	6345	6379	6414	6449	6484	6519	6555	6590
38	6626	6662	6698	6734	6771	6807	6844	6881	6918	6955
39	6993	7031	7068	7106	7145	7183	7221	7260	7299	7338

# ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗМІРНОСТІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

## Механіка

Величина	Одиниця вимірювання	Розмірність	Зв'язок між одиницями в різних системах
Робота $A$ , енергія $E$	Джоуль (Дж)	$\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}$	1 Дж = $10^7$ ерг
Потужність, $N$	Ват (Вт)	$\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-3}$	1 Вт = 1 Дж·с <sup>-1</sup> ; 1 к.с. = 735,5 Вт
Сила, $F$	Ньютон (Н)	$\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$	1 Н = 1 Дж·м <sup>-1</sup> ; 1 Н = $10^5$ дін
Тиск, $p$	Паскаль (Па)	$\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-2}$	1 Па = 1 Н·м <sup>-2</sup> ; 1 Па = $9,87\cdot 10^{-6}$ атм; 1 Па = $7,5\cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.; 1 атм = $1,013\cdot 10^5$ Па; 1 мм рт. ст. = 133 Па; 1 Па = $10^{-5}$ бар; 1 бар = $10^5$ Па; 1 мбар = 100 Па; 1 тор = 133 Па; 1 гПа = 100 Па
Густина, $\rho$	$\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	$\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	1 $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ = $10^{-3}$ г·см <sup>-3</sup> 1 г·см <sup>-3</sup> = $10^3$ $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$

## Молекулярна фізика і термодинаміка

Величина	Одиниця вимірювання	Розмірність	Зв'язок між одиницями в різних системах
Температура, $t^\circ$	Кількість градусів Цельсія ( $^\circ\text{C}$ )		$^\circ\text{C} = \text{K} - 273,15$
			$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,15$
			$^\circ\text{C} = (^\circ\text{F} - 32)5/9$
			$^\circ\text{F} = 9/5^\circ\text{C} + 32$
			$\text{K} = (^\circ\text{F} - 32)5/9 + 273,15$
			$^\circ\text{F} = (\text{K} - 273,15)9/5 + 32$
Теплота, $Q$	Джоуль (Дж)	$\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}$	1 Дж = 0,2389 кал;
			1 кал = 4,186 Дж;
			1 Дж = $10^7$ ерг;
			1 ерг = $10^{-7}$ Дж
Ентропія, $S$	Дж·К <sup>-1</sup>	$\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$	
Теплоємність, $C$	Дж·К <sup>-1</sup>	$\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$	
Питома теплоємність, $c$	Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	$\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$	
Молярна питома теплоємність, $C/n$	Дж·моль <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>		
Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda$	Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	$\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$	
Коефіцієнт температуропровідності, $\chi$	$\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$		



## Електрика і магнетизм

Величина	Одиниця вимірювання	Розмірність	Зв'язок між одиницями в різних системах
Електричний заряд, $q$	Кулон (Кл)	$\text{кг}^{1/2} \cdot \text{м}^{3/2} \cdot \text{с}^{-1}$	$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$
Електрична індукція, $D$	Кл·м	$\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$	
Потенціал $\varphi$ , напруга $U$ , ЕРС $\mathcal{E}$	Вольт (В)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{с}^{-3}$	$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} \cdot \text{Кл}^{-1}$
Струм, $I$	Ампер (А)	А	$1 \text{ А} = 1 \text{ Кл} \cdot \text{с}^{-1}$
Густина струму, $j$	$\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$	$\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$	
Електроємність, $C$	Фарада (Ф)	$\text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{А}^2 \cdot \text{с}^4$	$1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл} \cdot \text{В}^{-1}$
Електричний дипольний момент, $p$	Кл·м	$\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}$	
Напруженість електричного поля, $E$	$\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$	$\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{с}^{-3}$	$1 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} = 1 \text{ Н} \cdot \text{Кл}^{-1}$
Опір, $R$	Ом (Ом)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}^{-2} \cdot \text{с}^{-3}$	
Питомий електричний опір, $\rho$	Ом·м	$\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{А}^{-2} \cdot \text{с}^{-3}$	
Магнітний потік, $\Phi$	Вебер (Вб)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	
Магнітна індукція, $B$	Тесла (Тл)	$\text{кг} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб} \cdot \text{м}^{-2}$ $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$ $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$
Напруженість магнітного поля, $H$	$\text{А} \cdot \text{м}^{-1}$	$\text{А} \cdot \text{м}^{-1}$	
Індуктивність, $L$	Генрі (Гн)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}^{-2} \cdot \text{с}^{-2}$	

## Оптика

Величина	Одиниця вимірювання	Розмірність	Зв'язок між одиницями в різних системах
Довжина світлової хвилі, $\lambda$	м	м	$1 \text{ м} = 10^6 \text{ мкм}$ ; $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ ; $1 \text{ м} = 10^9 \text{ нм}$ ; $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ; $1 \text{ м} = 10^{10} \text{ \AA}$ ; $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$
Хвильове число, $\sigma$	$\text{м}^{-1}$	$\text{м}^{-1}$	$1 \text{ м}^{-1} = 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ ; $1 \text{ см}^{-1} = 10^2 \text{ м}^{-1}$
Енергія одного кванта, $E$	$(1,240/\lambda) \text{ еВ}$		$1 \text{ еВ} = 1,60210 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Енергія моля квантів, $E$	ейнштейн	ейнштейн	$1 \text{ ейнштейн} = 12 \cdot 10^7 \text{ Дж}$

### Енергетичні та світлові величини

Енергетична величина	Одиниця вимірювання	Світлова величина	Одиниця вимірювання
Потік випромінювання, $\Phi_e$	Ват (Вт)	Світловий потік, $\Phi_c$	Люмен (лм)
Сила випромінювання, $I_e$	Ват на стерadian (Вт·ср <sup>-1</sup> )	Сила світла, $I_c$	Кандела (кд) = (лм·ср <sup>-1</sup> )
Енергетична яскравість, $L_e$	Ват на стерadian — квадратний метр (Вт·ср <sup>-1</sup> ·м <sup>-2</sup> )	Яскравість, $L_c$	Кандела на квадратний метр (кд·м <sup>-2</sup> )
Енергетична освітленість, $E_e$	Ват на квадратний метр (Вт·м <sup>-2</sup> )	Освітленість, $E_c$	Люкс (лк) = (лм·м <sup>-2</sup> )
Енергетична світність, $M_e$	Ват на квадратний метр (Вт·м <sup>-2</sup> )	Світність, $M_c$	Люмен на квадратний метр (лм·м <sup>-2</sup> )

### Зв'язок між одиницями енергетичних та світлових величин

<p style="text-align: center;"><i>Потік випромінювання</i></p> <p>1 Вт = 0,27 лм (<math>\lambda = 400</math> нм)                      = 25,9 лм (<math>\lambda = 450</math> нм)                      = 220,0 лм (<math>\lambda = 500</math> нм)                      = 679,0 лм (<math>\lambda = 550</math> нм)                      = 683,0 лм (<math>\lambda = 555</math> нм)                      = 430,0 лм (<math>\lambda = 600</math> нм)                      = 73,0 лм (<math>\lambda = 650</math> нм)                      = 2,78 лм (<math>\lambda = 700</math> нм)</p>	<p style="text-align: center;"><i>Світловий потік</i></p> <p>1 лм = <math>1,464 \cdot 10^{-3}</math> Вт (<math>\lambda = 555</math> нм)                      1 лм·с = <math>1,464 \cdot 10^{-3}</math> Дж (<math>\lambda = 555</math> нм)</p>
<p style="text-align: center;"><i>Енергетична освітленість</i></p> <p>1 Вт·см<sup>-2</sup> = <math>1 \cdot 10^4</math> Вт·м<sup>-2</sup> =  <math>6,83 \cdot 10^6</math> лк (<math>\lambda = 555</math> нм)</p>	<p style="text-align: center;"><i>Яскравість</i></p> <p>1 лм·ср<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup> = <math>1 \cdot 10^{-4}</math> лм·ср<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup></p>
<p style="text-align: center;"><i>Сила випромінювання</i></p> <p>1 Вт·ср<sup>-1</sup> = 683 кд (<math>\lambda = 555</math> нм)</p>	<p style="text-align: center;"><i>Сила світла</i></p> <p>1 лм·ср<sup>-1</sup> = <math>1,464 \cdot 10^{-3}</math> Вт·ср<sup>-1</sup>                      (<math>\lambda = 555</math> нм)</p>

### Зв'язок між градусами, мінутами, секундами і радіанами

$$1^\circ = 0,01745 \text{ радіана} = 1,745 \cdot 10^{-2} \text{ радіана}$$

$$1' = 0,00029 \text{ радіана} = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ радіана}$$

$$1'' = 0,0000048 = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ радіана}$$

### Деякі числа, що часто зустрічаються

$$\pi = 3,141593 \quad e = 2,718282$$

# СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

## ОСНОВНА НАВЧАЛЬНА ЛІТЕРАТУРА

*Посудін Ю.І.* Біофізика (підручник) Київ: Урожай, 1995. — 222 с.

*Посудін Ю.І.* Фізика і біофізика навколишнього середовища (підручник) Київ: Світ, 2000. — 303 с.

*Федишин Я.І.* Фізика з основами біофізики. Львів: Світ, 2000. — 458 с.

*Посудін Ю.І.* Основи фізики і біофізики (Частина I). Навчальний посібник. Київ, НАУ, 2000. — 158 с.

*Посудін Ю.І.* Основи фізики і біофі-

зики (Частина II). Навчальний посібник. Київ, НАУ, 2001. — 250 с.

*Посудін Ю.І., Семенова Н.П., Кожем'яко Я.В.* Прикладна фізика і біофізика/ Під заг. редакцією проф.

Ю.І.Посудіна. Збірник задач (друге видання). Київ, НАУ, 2001. — 115 с.

*Посудін Ю.І.* Лабораторний практикум з дисципліни «Фізика з основами біофізики». Навч.посіб. — К.: НАУ, 2002. — 93 с.

## ДОДАТКОВА НАВЧАЛЬНА ЛІТЕРАТУРА

*Чолпан П. П.* Основи фізики, Київ, Вища школа, 1995, 488 с.

*Грабовский Р.И.* Курс фізики, М.: Высш. шк., 1980, 607 с.

*Детлаф А. А., Яворский Б. М.* Курс фізики. — М.: Высш. шк. — 1989. — 607 с.

*Трофимова Т. И.* Курс фізики, М.: Высш. шк., 1990, 478 с.

*Владимиров Ю.А., Рощупкин Д.И., Потапенко А.Я., Деев А.И.* Биофізика: Учебник. — М.: Медицина, 1983. — 272 с.

*Костюк П.Г., Гродзинский Д.М., Зима В.Л., Магура И.С., Сидорик Е.П., Шуба М.Ф.* Биофізика. Под общ. ред. П.Г.Костюка. — Киев, Высш. шк. Главное изд-во. 1988. — 504 с.

*Лекции по биофізике.* Под ред. П.О.Макарова. — Л-д: Изд-во ЛГУ, 1968. — 272 с.

*Медична і біологічна фізика, т.1/За ред. О.В. Чалого.* — К.: ВІПОЛ, 1999. — 425 с.

*Медична і біологічна фізика, т.2/За ред. О.В. Чалого.* — К.: ВІПОЛ, 2000. — 372 с.

*Мерион Д.Б.* Общая фізика с биологическими примерами. М.: Высш. шк., 1986. — 623с.

*Посудін Ю.І.* Біофізика риб. — К.: НАУ, 1996. — 32 с.

*Посудін Ю.І.* Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища. Київ: Світ, 2003. — 286 с.

*Ремизов А.Н.* Медицинская и биологическая фізика. — М.: Высшая школа, 1987. — 638 с.

*Рубин А.Б.* Биофізика, В 2-х кн.: Учеб. для биол. спец. вузов. Кн.1. Теоретическая биофізика. — М.: Высш. шк., 1987. — 319 с.

*Тарьян И.* Фізика для врачей и биологов. Будапешт, Akademiai Kiado, 1969. — 600 с.

*Sybesma C.* Biophysics. An Introduction. - Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers. — 1989. — 320 p.

*Jobling M.* Environmental biology of fishes. London, New York: Chapman & Hall, 1995. — 455 p.

## ДОДАТКОВА НАУКОВА ЛІТЕРАТУРА

*Посудін Ю.І.* Спектроскопічний моніторинг агросфери. — К: Урожай, 1998. — 127 с.

*Сравнительная физиология животных.* — М.: Мир, 1977. — Т.1. — 606 с; 1977. — Т.2. — 571 с; 1978. — Т.3. — 653 с.

*Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д.* Теплообмен излучением: Пер. с англ. — Энергия, Ленинград, 1971. — 294 с.

*Хазе Р.* Термодинамика необратимых процессов: Пер. с нем. — М: Мир, 1967. — 544 с.

Чалый А.В. Неравновесные процессы в физике и биологии. К: Наукова думка, 1997. — 183 с.

Чалый А.В. Синергетичні принципи освіти та науки. К: АПН, НМУ, 2000. — 253 с.

Шмидт-Ниельсон К. Размеры животных: почему они так важны? М.: Мир. — 1987. — 259 с.

Эдсолл Дж., Гатфренд Х. Биотермодинамика: Пер. с англ. — М: Мир, 1986. — 296 с.

Эккерт Р., Рэнделл Д., Огастин Дж. Физиология животных. — М.: Мир, 1991. — Т.1. — 424 с.; Т.2. — 343 с.

Aidley D.I. Animal Migration. Cambridge University Press, Cambridge, 1981. — 264 p.

Akoev G.N., Alekseev N.P., Krylov B.V. Mechanoreceptors. Their Functional Organization. Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg/ New York/ London / Paris / Tokyo, 1988. — 197 p.

Alexander R.M. Animal Mechanics. University of Washington Press, Seattle, 1968. — 346 p.

Brown B.H., Smallwood R.H., Barber D.C., Lawford P.V., Hose D.R. Medical Physics and Biomedical Engineering. Bristol-Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1999. — 736 p.

Bullock T.H., Heiligenberg W.F. Electroreception. Melbourne: Krieger Publishing Company, 1986. — 722 p.

Crane E. Bees and beekeeping. Science, practice and world resources. Comstock Publishing Associates, Cornell University Press, Ithaca, N.Y., 1990. — 614 p.

Cunningham J.G. Textbook of Veterinary Physiology. W.B. Saunders Company, Philadelphia / London / Toronto / Montreal / Sydney / Tokyo, 1992. — 656 p.

Curtis S.E. Environmental management in animal agriculture. Iowa, The Iowa State University Press, 1983. — 409 p.

Duncan G. Physics for Biologists. Blackwell Scientific Publications, Oxford, London, Edinburgh, Melbourne, 1975. — 200 p.

Environmental aspects of housing for animal production. Clark J.A., ed. Butterworths, London, 1981.

Farm Animals and the Environment / Phillips C. and Piggins D., eds. CAB International, 1992. — 430 p.

Frandsen R. D., Spurgeon T. L. Anatomy and Physiology of Farm Animals. Lea and Febiger, Philadelphia, 1992. — 572 p.

Gates D. M. Biophysical Ecology. New York-Heidelberg-Berlin: Springer-Verlag, 1980. — 611 p.

Goodman L.J., Fisher R.C. The Behaviour and Physiology of Bee. G.A.B. International, 1991. — 362 p.

Gray J. Animal Locomotion. W.W. Norton and Company Inc. N.Y., 1968. — 479p.

Hallet R.F., Stinson R.H., Speight P.A. Physics for the Biological Sciences.

Malmivuo J., Plonsey R. Bioelectromagnetism. Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields.- Oxford University Press: New York, Oxford, 1995. — 482 p.

Posudin Yu.I. Lasers in Agriculture. Science Publishers, Inc., Enfield, New Hampshire, 1998. — 188 p.

Rose A.H. Thermobiology. Academic Press, London, N.Y., 1967. — 653 p.

Schmidt-Nielsen K. Animal Physiology. Adaptation and Environment. Cambridge University Press, 1975. — 699 p.

Smythe P.H. Animal Vision. What Animals See. Charles C. Thomas Publisher, Springfield, Illinois, USA.

Smythe R.H. Vision in the Animal World. New York: Saint Martin's Press, LLC., 1975. — 175 p.

Thermobiology. Rose A.H., ed. Academic Press, London, New York. 1967. — 653 p.

A Topical Approach to Biophysical Concepts. New York: John Willey & Sons, Inc., 1982. — 320p.

Willmer P., Stone G., Jonston I. Environmental Physiology of Animals.- Blackwell Science, 2000. — 644 p.

Wiltschko R., Wiltschko W. Magnetic Orientation in Animals. New York: Springer-Verlag, Inc., 1995. — 336 p.

Woodward F.I., Sheehy J.E. Principles and measurements in environmental biology. London: Butterworths, 1983. — 263 p.

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

Абдуктин .....	18	Бруньки смакові .....	173
Аберація хроматична .....	351	Будова лазера .....	324
Агранулоцити .....	63	Бурі магнітні .....	299
Аероіонізація .....	285	Вага .....	15
Акомодація .....	343	Важіль .....	23
Аксон .....	258	Веберов апарат .....	133
Аксонема .....	38	Вектор .....	6
Активність		Вектор хвильовий .....	98
-абсолютна .....	363	Веретено м'язове .....	48
-електрична мозку .....	268	Вестибулорецепція .....	45,47
-електрична організму .....	259	Вестибулярний апарат .....	47
-електрична серцевої клітини .....	260	Взаємодія лазерного	
-електрична серця .....	261	випромінювання з тканиною .....	354
-магнітна організму .....	297	Взаємодія міжклітинна .....	258
-оптична речовини .....	319	Вигини хвильові .....	37
Актин .....	31	Видовження відносно тіла .....	17
Акупунктура лазерна .....	358	Види транспорту .....	254
Акустика .....	105	-активний .....	254
Акустика прикладна .....	143	-пасивний .....	254
Акустобіологія .....	127	Визначення гематокриту .....	89
Акусторцепція .....		Використання ультразвуку	
-у риб .....	132	-у ветеринарній медицині .....	147
- у бджіл .....	134	-у зооінженерії .....	149
Алометрія .....	29	Вимірювання	
Амплітуда коливань .....	95	-вологості .....	155
Ампули Лоренціні .....	282	-діаметру еритроцитів .....	87
Аналіз запахів .....	171	-іонізуючих випромінювань .....	365
Аналізатор .....	45	-мембранних струмів .....	259
-зоровий .....	333	-слухового сприймання .....	143
-нюховий .....	170	-температури .....	229
-слуховий .....	127	Вимірювання тиску крові .....	90
-смаковий .....	173	-прямий метод .....	91
Аневризма .....	76	-метод неінвазивний .....	90
Анемія .....	74	Вимірювання ШОЕ .....	87
Анемія серповідно-клітинна .....	74	Випаровування .....	152
Анізотропія		Випливання .....	85
-поглинання .....	317	Випромінювання	
-заломлення .....	318	-іонізуюче .....	361
Антифризи .....	223	-оптичне .....	304
Апарат вестибулярний .....	128	-спонтанне .....	323
Апарат опорно-руховий .....	30	-стимульоване .....	323
Апертура мікроскопа .....	307	-теплове .....	184
Аритмія .....	274	Висота звуку .....	109
Астигматизм .....	351	Відбивання	
АТФаза .....	254	-звуку .....	121
Аудіограма .....	144	-повне внутрішнє .....	306
Аудіометрія .....	144	-світла від межі поділу .....	317
Ацетилхолін .....	259	Віднімання векторів .....	6
Баланс тепловий тварини .....	207	Війки .....	37,129
Биття коливань .....	99	«Вікно терапевтичне» .....	354
Беккерель .....	363	Віконце	
Бекеші Г. ....	131	-кругле .....	127
Бер .....		-овальне .....	127
365		Властивості пружні біологічних матеріалів ..	18
Білки .....	162,164	Волога водяниста .....	336
-інтегральні .....	246	Вологість .....	153
-периферійні .....	246	-абсолютна .....	154
Біоакустика .....	119	-відносна .....	154
Біоелектрика .....	245	Волокна	
Біомагнетизм .....	297	-м'язові .....	31
Біомеханіка .....	29	-нервові .....	129
Біофізика молекулярна .....	162	Використання низьких температур .....	233
Біпризма Френеля .....	311	Випливання .....	85
Бомбікол .....	168	Випромінювання	
Брадикардія .....	267	-оптичне .....	304

-іонізуюче .....	361	-речовини .....	12
-рентгенівське .....	361	-струму зміщення .....	279
-спонтанне .....	323	-струму провідності .....	279
-стимульоване .....	322,323	-струму .....	240
Вплив		Гучність звуку .....	109
-високих температур		Далекозорість .....	350
на ендотермних тварин .....	219	-стареча .....	350
-низьких температур		Дальтонізм .....	338
на ендотермних тварин .....	220	Дарсонвалізація .....	286
-електричних полів на живі організми ..	278	Двигун тепловий .....	185
-інфразвуку на біооб'єкти .....	138	Дегустатори запахів .....	171
-іонізуючих випромінювань		Декремент логарифмічний затухання ...	112
на живі організми .....	378	Дендрити .....	168,258
-магнітних полів на живі організми ..	299	Денситометр .....	370
-теплових факторів на тварину .....	218	Деполяризація .....	257
-теплових факторів на риб .....	224	Детектор	
-теплових факторів		-котушковий .....	301
на ектотермних тварин .....	223	-на основі ефекта Холла .....	302
-ультразвуку на біооб'єкти .....	136	Детектори	
Вплив шуму на організм .....	134	-заповнені газом .....	366
Втрати діелектричні .....	240	-термолюмінесцентні .....	369
Вузли		-трекові .....	369
-Ранвье .....	258	Детектування фотографічне .....	370
-розгалуження .....	241	Дефекти зору .....	350
Вузол .....	98	Дефіцит вологості .....	154
Вухо		Деформації .....	16
-внутрішнє		-вигину .....	16
-зовнішнє .....	127	-зсуву .....	16,19
-середнє .....	127	-кручення .....	16
Газ ідеальний .....	150	-пластичні .....	16
Газ реальний .....	152	-прогину .....	16
Гальванізація .....	286	-пружні .....	16
Гальванотаксис .....	281	-розтягу .....	16
Гама-камера .....	376	-стиску .....	16
Ганглії .....	258	Деформація механічна .....	16
Гематокрит .....	64	Джгутики .....	37
Гемодинаміка .....	63	Джерела магнітного поля .....	297
Гемоліз .....	75	Джерело струму .....	241
Гігрометр		Дзеркала Френеля .....	311
-волосяний .....	155	Динаміка .....	11
-ємнісний .....	156	Диполь електричний .....	238
-конденсаційний .....	156	Диск оптичний .....	336
-сорбційний .....	157	Диски Ейрі .....	343
Гідродинаміка .....	53	Диски Меркеля .....	46
Гідроліз АТФ .....	34	Дисперсія оптичного обертання .....	319
Гіпаталамус .....	213	Дисперсія речовини .....	315
Гіперметропія .....	350	-аномальна .....	315
Гіпертермія .....	220	-нормальна .....	315
Гіпертрофія правого шлуночка .....	265	Дисперсія світла .....	315
Гіпотеза Ейнтховена .....	264	Дифракція	
Гіпоталамус .....	213	-звуку .....	121
Гіпотермія .....	220,233	-світла .....	312
Гістерезис .....	18	-Фраунгофера .....	312
Глаукома .....	348	-Френеля .....	312
Глибина проникнення ультразвуку ....	113	Дифузія .....	247
Головка полярна гідрофільна .....	246	Дихроїзм	
Гострота зору .....	342	-оптичний .....	317
Гравірецептори .....	51	-круговий .....	319
Гradient		Діагностика лазерна .....	356
-електричний .....	252	Діагностика ультразвукова .....	147
-хімічний .....	252	Діаграма розтягу .....	17
Градiометр .....	301	Діамагнетик .....	291
Гранулоцити .....	63	Діапауза .....	223
Гребінець .....	334	Діатермія .....	287
Грей .....	364	Діатермія хірургічна .....	287
Густина		Ділення векторів .....	7
-об'ємна енергії .....	107	Діоптрія .....	343

Добуток		Еритроцити	63,272
-векторний	7	Ефект	
-скалярний	7	-бінауральний	129
Довжина шляху	10	-Допплера	110
Додавання векторів	6	-Зеебека	229
Доза	363	-Комптонівський	371
-еквівалентна	364	-п'єзоелектричний	147
-експозиційна	364	-фотоелектричний	321
-поглинута	364	-Холла	302
Дозиметрія	363	Ефекти впливу ультразвуку	136
Домени	293,300	-механічні	136
Дослід Юнга	309	-теплові	137
Дослідження крові	87	-фізико-хімічні	138
Дослідження		Ехокардіографія	148
-зорового аналізатора	346	Забарвлення тварин	224
-смакового аналізатора	174	Забруднення радіоактивні	378
Дуалізм корпускулярно-хвильовий	305	Завитка	131
Екворин	34	Закінчення вільні нервові	46
Екзоцитоз	255	Закінчення нервові	46,258
Екологічна модель Вольтерра	101	Заклики птахів	122
Ектотерми	213	Закон	
Еластин	18	-Ампера	291
Електрика	234	-Біо-Савара-Лагласа	294
-прикладна	285	-випромінювання Планка	184
Електробіологія	276	-всесвітнього тяжіння	14
Електрогастрографія	270	-Гагена-Пуазейля	56
Електродермометрія	287	-Гесса	182
Електродинаміка	234	-Гука	16,17
Електроенцефалограма	268	-Джоуля-Ленца	242
Електроенцефалографія	268	-другий термодинаміки	188,191
Електроінтестинографія	270	-збереження моменту імпульсу	23
Електроністагмографія	139	-збереження енергії	21
Електрокардіограма	262	-збереження заряду	235
Електрокардіографія	262	-збереження імпульсу	13
Електрокортикографія	269	-зміщення Віна	185
Електролікування	286	-Кулона	235
Електроміографія	270	-лінійний	204
Електроміомастикаціографія	270	-Ньютона другий	13
Електроплетизмографія	288	-незалежного поширення променів ...	306
Електропунктура	288	-Ньютона перший	11
Електроретинограма	347	-Ньютона третій	13
Електроретинографія	346	-Ома	241
Електрорецепція	281	-перший термодинаміки	181
Електростатика	234	-радіоактивного розпаду	362
Електростимуляція	285	-Стефана-Больцмана	185
Електрофорез лікарський	286	-Стокса	55,277
Електрофорез	276	-Фарадея	293
Еритроцити	272	-Фур'є	183
Електрочутливість	286	Закони	
Емболія газова	58,78	-відбивання світла	306
Ендотерми	213	-геометричної оптики	305
Ендоплазма	36	-заломлення світла	306
Ендоцитоз	255	-постійного струму	241
Енергія	21,179	Заломлення звуку	121
-вільна Гельмгольца	192	Запахи у тваринництві	172
-вільна Гіббса	192	Заряд	
-внутрішня	178	-пробний	235
-гармонічних коливань	96	-електричний	235
-звукових коливань	107	-точковий	235
-кінетична обертання	22	Застосування лазерів у медицині	352
-кінетична	21	Заціпеніння	223
-повна	107	Зв'язок зворотний	214
-потенціальна	21	Здатність випромінювальна	208
-потенціальна пружно-деформованого тіла	18	Здатність поглинальна	208
Ентальпія	182	Зіверт	365
Ентропія	189	Зіниця	336
Еритропоез	74	Зір кольоровий	338

Зміна ентропії .....	202	-об'ємного розширення .....	177
Зміна стандартної вільної енергії .....	195	-поверхневого натягу .....	58
Значення числове .....	5	-психрометричний .....	155
Зона		-седиментації .....	87
-«мертва» .....	340	-теплоізоляції .....	212
-термонеутральна .....	218	-теплопровідності .....	211
Зсув .....	19	-термічний корисної дії .....	188
Зсув пороговий індукований шумом ...	134	-якості випромінювання .....	365
Ізометрія .....	29	Колаген .....	18
Ізопроекти .....	151	Колби Краузе .....	47
-ізобарний .....	151	Колбочки .....	337
-ізотермічний .....	151	Коливальні процеси в біології .....	101
-ізохорний .....	151	Коливання .....	94
Ізотопи .....	375	- вільні .....	94
Імпульс нервовий .....	257	-вимушені .....	96
Інверсія населеності .....	324	-гармонічні .....	95
Індуктометрия .....	303	-загасаючі .....	96
Індукція		-звукові .....	105
-електромагнітна .....	293	-незагасаючі .....	96
-магнітна .....	289	-періодичні .....	94
Інтенсивність		Коло електричне .....	241
-звукової хвилі .....	108	Комунікація акустична тварин .....	122
-лазерного променя .....	326	Конвекція .....	184
-світла .....	330	-вимушена .....	210
Інтерорецепція .....	45,48	-вільна .....	210
Інтерференція		Конденсація .....	152
-світла .....	309	Константа рівноваги .....	195
-в тонких плівках .....	311	Конттури замкнуті .....	241
Інтерферометр Майкельсона .....	312	Короткозорість .....	350
Інтерферометрія лазерна .....	356	Корпускала тактильна .....	46
Ішемічна хвороба серця .....	266	Критерій Релея .....	342
Йодопсин .....	338	Кришталік .....	336
Кавітація .....	136	Кріоконсервація .....	233
Камера задня .....	336	Кров .....	63
Камера іонізаційна .....	367	Кровообіг тварин .....	65
Камера передня .....	336	Кут гранічний .....	306
Канал		Кут зору .....	341
-барабанний .....	128	Кюрі .....	363
-вестибулярний .....	128	Лазер .....	322
-напівкруглий .....	47	Легені .....	78
-середній .....	128	Лейкоцити .....	63
Кардіостимуляція .....	287	Ліганди .....	255
Картина дифракційна .....	313	Лінії	
Катетер .....	91	-силові .....	236
Квант .....	320	-течії .....	53
Кипіння .....	152	Ліпіди .....	162,167
Кислоти нуклеїнові .....	162,165	Лічильник	
Кінематика .....	9	-Гейгера-Мюлера .....	368
Кістки .....	20	-напівпровідниковий .....	369
Кісточки слухові .....	127	-пропорційний .....	367
Клітина Мюлера .....	347	-сцинтиляційний .....	368
Клітини волоскові .....	129	Магнетик .....	291
Клітини сітківки .....	338	Магнетит .....	300
-амакринові .....	338	Макромолекули біологічні .....	162
-біполярні .....	338	Маркер .....	39
-гангліозні .....	338	М'язи	
-горизонтальні .....	338	-гладенькі .....	31
-фоторецепторні .....	338	-поперечно-посмутовані .....	31
Коваделко .....	127	-серцеві .....	31
Ковзання мікротрубочок .....	37	Магнетизм .....	289
Когерентність .....	309,326	Магнетизм прикладний .....	301
Коефіцієнт		Магнетит .....	300
-загасання .....	96,113	Магнітобіологія .....	299
-температуропровідності .....	184	Магнітоенцефалографія .....	298
-корисної дії .....	186	Магнітокардіографія .....	297
-лінійного розширення .....	177	Магнітокардіограма .....	298
-лінійний взаємозв'язку .....	204	Магнітоміографія .....	298



Магнітоокулографія .....	298	-Юнга .....	17
Магніторетинографія .....	298	Молоточок .....	127
Магніторецепція .....	300	Момент	
Магнітотерапія низькочастотна .....	302	-дипольний .....	238
Магнітотерапія .....	302	-інерції .....	22
Макромолекули .....	162	-обертальний .....	239
Маса .....	11	-сили .....	22,23
Мас-спектрометрія .....	172	-стержня .....	22
Матеріали пружні .....	18	-сфери .....	22
Медицина ядерна .....	375	-циліндра .....	22
Межа .....		Монохроматичність .....	326
-міцності .....	17	М'язи .....	31
-пружності .....	17	-гладенькі .....	31
-пластичності .....	17	-поперечно-посмуговані .....	31
-розділення .....	307	-серцеві .....	31
-червона фотоефекту .....	322	-скелетні .....	31
Мембрана		Накачування оптичне .....	324
-базилярна .....	128	Напруження нормальне механічне .....	17
-внутрішньоклітинна .....	245	Напруженість електричного поля .....	235
-поверхнева .....	245	Напруженість магнітного поля .....	289
-покровна .....	129	Насос .....	254
-Рейснера .....	128	Натяг поверхневий .....	57
Мембрани біологічні .....	245	Невромасти .....	50
Метод		Негентропія .....	202
-мас-спектрометричний .....	172	Нейромедіатор .....	258
-фотометричний .....	42	Нейрони .....	49,258
-хроматографії .....	172	-альфа-рухливі .....	49
Методи		-гама-рухливі .....	49
-аналізу запахів .....	171	Нерви .....	258
-вимірювання тиску крові .....	90,92	«Ніс електронний» .....	172
-вимірювання іонізуючих		Ністагм .....	138
випромінювань .....	365	Номограма для вимірювання вологості ...	156
-вимірювання швидкості кровотоку ..	295	Нюх тварин .....	167,168
-голографічні .....	357	-у комах .....	168
-дослідження крові .....	87	- у птахів .....	169
-дослідження смакового аналізатора .	174	-у риб .....	169
-дифракційні .....	87	Обертон .....	110
-магнітотерапії .....	302	Області зору у тварин .....	340
-отримання поляризованого світла ...	317	Обмін речовин .....	207
-реєстрації біомагнітних полів .....	301	Обмін тепловий .....	183
-спостереження інтерференції світла	311	Обмін через випромінювання .....	208
Механізми		Області зору у тварин .....	340
-впливу іонізуючих випромінювань ..	378	Оболонка	
-впливу ультразвуку .....	136	-мієлінова .....	258
-зору .....	тварин	-райдужна .....	336
337		-судинна .....	336
-нюху .....	171	Одиниця вимірювання .....	5
Механіка .....	9	Одоранти .....	167
Механобіологія .....	45	Озонування .....	285
Механорецепція .....	45	Око	
- у бджіл .....	50	-просте .....	331
- у риб .....	50	-складне .....	331
Механорецептори шкіри .....	45	Ольфактометрія .....	171
Міграція тварин .....	224	Оматидій .....	331
Мікроаналіз лазерний .....	357	Опір електричний .....	241
Міозин .....	31	Опсин .....	338
Міопія .....	350	Оптика .....	304
Міофібрили .....	31	-геометрична .....	305
Містки поперечні .....	31	-квантова .....	320
Множення векторів .....	7	-прикладна .....	346
Модель екологічна Вольтерра .....	101	-хвильова .....	308
Модель рідинно-мозаїчна .....	246	Орган .....	
Модуляція		-ампулярний .....	282
-амплітудна .....	124	-бульбовий .....	282
-частотна .....	124	-Гольджі .....	48
Модуль		-Джакобсона .....	171
-зсуву .....	19	-Джонстонів .....	52

-електричний риб .....	272	Посудина Дьюара .....	231
-кортієв .....	129	Потенціал	
-чуттів .....	45	-дії .....	257
Ослаблення ультразвуку .....	112	-електричного поля .....	236
Освітленість .....	330	-електрохімічний .....	194,251
Осцилотаксис .....	281	-мембранний .....	256
Отоліти .....	48	-пізній рецепторний .....	338,347
Оцінка кількості еритроцитів .....	87	-ранній рецепторний .....	338,347
Оцінка рухливості джгутикових .....	42	-спокою .....	256
Падіння звукової хвилі на межу поділу	111	-хімічний .....	193
Палички .....	337	Потенціали	
Пара насичена .....	154	-коливальні .....	348
Парамагнетик .....	291	-термодинамічні .....	191
Параметри		Потік .....	53
-екстенсивні .....	193	-магнітний .....	293
-змінні .....	101	Потужність	
-інтенсивні .....	193	-звукової хвилі .....	108
-термодинамічні .....	178	-процесу .....	203
Пароутворення .....	209	-сили .....	20
Переддвер'я .....	47	Поширення звуку у водному середовищі ...	122
Переміщення .....	10	Положення лінійної нерівноважної термо-	
Перестроювання частоти плавне .....	326	динаміки .....	204
Перетинка барабанна .....	127	Правила Кірхгофа .....	242
Період		Правило	
-дифракційної решітки .....	314	-друге Кірхгофа .....	242
-коливаль .....	95	-Ленца .....	294
-піврозпаду .....	363	-лівої руки .....	290,291
Петч-клемп-метод .....	259	-перше Кірхгофа .....	242
Піноцитоз .....	255	-паралелограма .....	6
Пірометрія оптична .....	230	-трикутника .....	6
Плазма крові .....	63	Презбіопія .....	350
Плече		Прикладна електрика .....	285
-диполя .....	238	Принцип Гюйгенса .....	310
-сили .....	23	Принцип	
Плівки тонкі .....	311	-Гюйгенса-Френеля .....	312
Площина фазова .....	102	-локальної рівноваги .....	203
Поверхня еквіпотенціальна .....	238	-симетрії кінетичних коефіцієнтів .....	204
Поглинання		-скраплення газів .....	153
-звуку .....	121	Принципи g-спектроскопії .....	370
-ультразвуку .....	112	Природа світла .....	304
-іонізуючого випромінювання .....	365	Прискорення .....	10
-ультразвуку .....	112	Прискорення кутове .....	22
-фотоелектричне .....	370	Прискорення нормальне .....	10
Показник заломлення .....	306	Прискорення повне .....	11
-абсолютний .....	306	Прискорення тангенціальне .....	10
-відносний .....	306	Проеціювання векторів .....	7
Поле		Променезаломлення подвійне .....	318
-електричне .....	234	Промені космічні .....	361
-електромагнітне .....	234	Пропріорецепція .....	48
-електростатичне неоднорідне .....	236	Проникність діелектрична .....	239
-електростатичне однорідне .....	236	Проникність магнітна середовища .....	289
-магнітне .....	234,289	Проникність мембрани .....	248
-магнітне Землі .....	299	Пропріорецептори .....	51
Поліпное .....	219	Протофібрили .....	31
Полісахариди .....	162,166	Прохід слуховий .....	127
Поліцитемія .....	74	Процес	
Поля електричні риб .....	271	-необоротний .....	186
Поляризація за рахунок		-оборотний .....	186
розсіювання світла .....	318	-термодинамічний .....	178
Поляризація клітини .....	256	-хвильовий .....	105
Поляризація світла .....	316	Процеси	
-при відбиванні від межі поділу .....	317	-коливальні .....	101
-за рахунок розсіювання .....	318	-тепловіддачі .....	207
Поляриметр .....	319	Пружність водяної пари .....	154
Пора смакова .....	173	Пружність насиченої пари .....	154
Порожнина барабанна .....	127	Псевдоподії .....	36
Послаблення звуку .....	121	Психрометр аспіраційний .....	155

Пупки сейсмоденситивні .....	50
Рад .....	364
Радіоактивність .....	362
Радіоізотопи .....	375
Радіотермометри .....	231
Раковина вушна .....	127
Реакція поведінкова .....	227
Регуляція термостатична .....	213
Режим імпульсний роботи лазера .....	326
Резилін .....	18
Резонанс .....	97,127
Резонатор оптичний .....	324
Рем .....	365
Рентген .....	364
Рентгенівське випромінювання .....	361
Реполаризація .....	257
Ретиналь .....	338
Рефлекс опосередкований зіничний .....	349
Рефлекс первинний зіничний .....	349
Рецептор .....	45
Рецептори	
-вісцеральні .....	48
-тиску .....	52
Речовини поверхнево-активні .....	58
Решітка дифракційна .....	314
Рівень інтенсивності звуку .....	108
Рівновага динамічна .....	152
Рівновага	
-Гіббса-Доннана .....	253
-електрохімічна .....	252
-іонна .....	252
-осмотична .....	249
Рівняння	
-Бернуллі .....	53
-Ван-дер-Ваальса .....	152
-Вант-Гоффа .....	250
-Гіббса .....	193
-дифракційної решітки .....	315
-дифузії Фіка .....	248
-Ейнштейна .....	321
-Моенса-Кортвега .....	57
-Нернста .....	253
-нерозривності потоку .....	53
-Ньютона .....	53
-основне молекулярно-кінетичної теорії газу .....	150
-основне обертального руху .....	23
-стану ідеального газу .....	150
-стану реального газу .....	152
Рідина	
-в'язка .....	54
-ідеальна .....	53
-імерсійна .....	308
-нестислива .....	53
-ньютонівська .....	55
Різниця потенціалів .....	237
Робота .....	20,179
-серця .....	71
-сили .....	20
Рогівка .....	335
Родопсин .....	338
Розбіжність ультразвукової хвилі .....	113
Розпад радіоактивний .....	362
Розсіювання звуку .....	121
Розсіювання ультразвуку .....	112
Розширення теплове .....	176
Рух амебоїдний .....	36
Рух	
-амебоїдний .....	36
-еритроцитів в потоці .....	68
-механічний .....	9
-обертальний .....	21
-поступальний .....	11
Рухи тварини .....	30
Рухливість	
-джгутикових .....	42
-електрофоретична .....	277
-нем'язова .....	36
Ряд Фур'є .....	100
Сарколема .....	31
Саркомер .....	31
Сведберг .....	87
Світло	
-неполяризоване .....	316
-еліптично поляризоване .....	316
-лінійно поляризоване .....	316
-циркулярно поляризоване .....	316
Світловід .....	307
Седиментація .....	85
Сенсили .....	50
Середовище активне .....	324
Серце .....	71
Сила .....	11
-архімедова .....	56
-відцентрова інерції .....	15
-гравітаційна .....	15
-електрорушійна .....	241
-Лоренца .....	289
-поверхневого натягу .....	58
-притягання .....	15
-пружна .....	16
-струму .....	240
-тертя .....	56
-тяжіння .....	15
Синапс .....	258
Система	
-білатеральна .....	48
-відкрита .....	178
-відліку .....	9
-замкнута .....	178
-ізолювана .....	178
-термодинамічна .....	178
Системи	
-дисперсні .....	276
-сенсорні .....	45
Сітківка .....	336
Скаляр .....	5
Склад	
-крові .....	63
-спектральний .....	330
Склера .....	335
Скорочення м'язове .....	31
Скраплення газів .....	153
Слухові кісточки .....	127
-коваделко .....	127
-молоточок .....	127
-стремінець .....	127
Смак .....	173
Сонограми .....	122
Сосочки смакові .....	173
Спектр	
-гармонічний .....	100
-дисперсії оптичного обертання .....	319
Спектрометрія Доплерівська .....	43

Спектроскопія		
-Допплерівська ультразвукова	148	
-комбінаційна	356	
-лазерна квазіпружного розсіювання	356	
-оптико-акустична	356	
-флуоресцентна	356	
Співи птахів	122	
Сплячка		
-літня	220	
-зимова	223	
Спорідненість хімічна	203	
Сприйнятливість		
-діелектрична	239	
-магнітна	292	
Спученість	98	
Стан		
-метастабільний	326	
-рівноважний	178	
-стаціонарний	103,201	
-термодинамічний	178	
Статика	23	
Стимул	45	
Стремінець	127	
Стридуляція	120	
Струм		
-електричний	240	
-зміщення	279	
-постійний	240	
-провідності	279	
Суперпарамагнетизм	300	
Сурфакант	79	
Сфігмоманометр	90	
Сцинтиограф	376	
Таблиці віртуальні психрометричні	157	
Тахікардія	267	
Тахікардія вентрикулярна	267	
Тембр звуку	109	
Температура	176	
-кипіння	152	
-критична	152	
Температуропровідність	184	
Теорема		
-Онзагера	205	
-Пригожина	205	
-Штейнера	22	
Теорія біжучої хвилі	131	
Теплоємність	178	
Теплоємність питома	179	
Теплообмін	207	
Теплопровідність	183	
Теплота	179,211	
-пароутворення	209	
Терапія		
-електромагнітна	287	
-лазерна	357	
-ультразвукова	149	
Термістори	229	
Термобіологія	218	
Термогенез	222	
Термографія	232	
Термодинаміка	176	
-лінійна нерівноважна	204	
-необоротних процесів	201	
-прикладна	229	
-рівноважних станів	178	
Термодіагностика	231	
Термолікування тварин	231	
Термометр		
-кварцовий п'єзоелектричний	231	
-опору	229	
-рідинний	229	
-термоелектричний	229	
Терморегуляція у тварин	207	
Терморезистори	229	
Терморецептори у тварин	226	
Терморецепція	226	
Термотаксис	227	
Термотерапія	232	
Термохірургія	232	
Тестування світловим імпульсом	349	
Течія	53	
-ламінарна	57	
-турбулентна	57	
Типи деформацій	16	
Типи поляризації світла	316	
Типи смаку	173	
Тиск	54	
-акустичний	108	
-артеріальний	72	
-внутрішній	58	
-внутрішньоочний	348	
-гідродинамічний	54	
-гідростатичний	54	
-діастолічний	72	
-крові	72	
-молекулярний	58	
-осмотичний	248	
-парціальний водяної пари	154	
-пульсовий	72	
-сistolічний	72	
-статичний	54	
Тіло		
-абсолютно тверде	9	
-абсолютно чорне	208	
-війчасте	336	
-сіре	208	
-склоподібне	336	
Тільця		
-Мейснера	46	
-Пачіні	46	
-Руфіні	46	
Тканина бура жирова	222	
Томографія		
-електроімпедансна	288	
-оптична когерентна	357	
-ультразвукова	149	
Тонometr	349	
Тони Короткова	90	
Точка		
-ближня	343,350	
-дальня	343,350	
-матеріальна	9	
-роси	154	
Точки особливі	103	
Траєкторія	9	
Траєкторія фазова	102	
Транспорт		
-активний	254	
-мембранний	251	
-пасивний	254	
Тремтіння	222	
Тривалість освітлення	330	
Тромбоз	75	
Тромбоцити	64	

Тропоміозин .....	31	Хвиля біжуча .....	129
Тропонин .....	31	Хвилі	
Труба слухова .....	127	-звукові .....	105
Трубка течії .....	53	-інфразвукові .....	105
Трубки з еластичними стінками .....	57	-когерентні .....	309
Удар тепловий .....	220	-монохроматичні .....	309
Ультразвук .....	111	-поздовжні .....	105
Ультрацентрифугування .....	85	-поперечні .....	105
Умова рівноваги важеля .....	24	-ультразвукові .....	105
Утворення		Хвиля .....	105
-звуків тваринами .....	119	-біжуча .....	97
-зображень .....	376	-механічна .....	105
-пар .....	371	-пружна .....	105
Фагоцити .....	63	-пульсова .....	57
Фагоцитоз .....	255	-стояча .....	98
Фаза коливань .....	95	Хвіст неполярний гідрофобний .....	246
Фаза початкова .....	95	Хвороба гіаліново-мембранна .....	58,79
Фактор антиателектатичний .....	79	Хірургія лазерна .....	359
Феромагнетик .....	292	Хірургія ультразвукова .....	149
Феромони .....	167	Хроматографія .....	172
Фібриляція		Центр	
-вентрикулярна .....	267	-мас .....	14
-шлуночкова .....	274	-терморегуляторний .....	214
Фібрин .....	64	Цикл Карно .....	186
Фіброскоп .....	307	Частка масова вологи .....	154
Фізика ядерна .....	361	Частота .....	95
Фізична величина .....	5	-колова .....	95
Фокусування лазерного променя .....	327	-основна .....	110
Формування лазерного променя .....	324	Число Рейнольдса .....	57
Формула		Чутливість	
-Комптона .....	371	-слухова .....	134
-Лапласа .....	59	-тактильна .....	45
Формула психрометрична .....	155	Швидкість	
Фосфатидилхолін .....	79	-кутова .....	22
Фотобіологія .....	330	-лінійна кровотечії .....	66
Фотомедицина лазерна .....	352	-локальна продукції ентропії .....	203
Фоторецепція у живих організмів .....	331	-миттєва .....	10
-комахи .....	331	-об'ємна кровотечії .....	65
-птахів .....	333	-осідання еритроцитів .....	70
-риб .....	333	-продукції ентропії .....	202
-ссавців .....	335	-рівномірного падіння .....	56
Фотосенсибілізатори .....	355,358	-седиментації .....	85
Фотострум .....	321	-середня .....	10
Фототерапія лазерна .....	357	Широта географічна знаходження тіла .	15
Фотохемотерапія лазерна .....	358	Шкала температурна	
Франклінізація .....	286	-Кельвіна .....	176
Функція		-Цельсія .....	176
-дисипативна .....	203	Шум .....	134
-стану системи .....	178	-білий .....	134
Функції біологічних мембран .....	245	Явища	
Характеристики		-капілярні .....	59
-динамічні тварин .....	41	-поверхневі в легенях .....	78
-звукових хвиль .....	106	-резонансні .....	109
-зору .....	341	Ядро атомне .....	375
-кінематичні тварин .....	37	Ямка центральна .....	334
-механічні кісток .....	20	g-випромінювання .....	361
-рухові тварин .....	37	a-частинки .....	361
-ультразвуку .....	111	b-частинки .....	361
Характеристики суб'єктивні		a-хвиля .....	347
звукових коливань .....	109	b-хвиля .....	347
-висота звуку .....	109	c-хвиля .....	348
-гучність звуку .....	109	Z-диски .....	31
-тембр звуку .....	109		

# ЗМІСТ

<b>1. Вступ</b> .....	<b>4</b>	6.7. Тиск крові .....	72
1.1. Предмет фізики і біофізики. Основні завдання курсу .....	4	6.8. Фізичні явища і процеси, що лежать в основі захворювань крові та кровоносних судин .....	74
1.2. Фізичні величини .....	5	6.9. Поверхневі явища в легенях .....	78
1.3. Скаляри і вектори .....	5	<b>7. Прикладна гідродинаміка та гемодинаміка</b> .	<b>85</b>
<b>2. Механіка</b> .....	<b>9</b>	7.1. Ультрацентрифугування .....	85
2.1. Основні визначення .....	9	7.2. Фізичні методи дослідження крові ...	87
2.2. Кінематика матеріальної точки і поступального руху твердого тіла .....	9	7.3. Вимірювання тиску крові .....	90
2.3. Динаміка матеріальної точки і поступального руху твердого тіла .....	11	7.4. Автоматизовані системи вимірювання тиску крові .....	92
2.4. Типи сил .....	14	<b>8. Коливання і хвилі</b> .....	<b>94</b>
2.4.1. Сили тяжіння .....	14	8.1. Механічні коливання .....	94
2.4.2. Пружні сили .....	16	8.2. Основні характеристики гармонічного коливання .....	95
2.4.3. Пружні властивості біологічних матеріалів .....	18	8.3. Енергія механічних гармонічних коливань .....	96
2.5. Робота, потужність і енергія .....	20	8.4. Згасаючі коливання .....	96
2.6. Кінематика і динаміка обертального руху твердого тіла .....	21	8.5. Вимушені коливання .....	96
2.7. Статика твердого тіла .....	23	8.6. Біжуча хвиля .....	97
<b>3. Біомеханіка</b> .....	<b>29</b>	8.7. Стояча хвиля .....	98
3.1. Механічні властивості тварин. Принцип алометрії .....	29	8.8. Биття коливань .....	99
3.2. Опорно-руховий апарат тварин .....	30	8.9. Розкладання складних коливань у ряд Фур'є .....	100
3.3. Основи фізики м'язового скорочення .....	31	8.10. Коливальні процеси в біології .....	101
3.4. Нем'язові форми рухливості .....	36	8.10.1. Кінетика біологічних процесів 101	
3.4.1. Амебоїдний рух .....	36	8.10.2. Екологічна модель вольтера .	101
3.4.2. Війки та джгутики .....	37	<b>9. Акустика</b> .....	<b>105</b>
3.5. Методи вимірювання рухових характеристик тварин .....	37	9.1. Хвилі в пружному середовищі .....	105
3.5.1. Кінематичні характеристики тварин .....	37	9.2. Характеристики звукових коливань	106
3.5.2. Динамічні характеристики тварин .....	41	9.3. Суб'єктивні характеристики звукових хвиль .....	109
3.5.3. Оцінка рухливості джгутикових	42	9.4. Резонансні явища .....	109
<b>4. Механобіологія</b> .....	<b>45</b>	9.5. Ефект Доплера .....	110
4.1. Механорецепція у тварин .....	45	9.6. Падіння звукової хвилі на межу поділу двох середовищ .....	111
4.1.1. Механорецептори шкіри .....	45	9.7. Ультразвук та його характеристики .	111
4.1.2. Вестибулорецепція .....	47	9.8. Ослаблення, поглинання і розсіювання ультразвуку .....	112
4.1.3. Інтерорецепція .....	48	9.9. Глибина проникнення ультразвукової хвилі в речовину .....	113
4.2. Механорецепція у риб .....	50	9.10. Розбіжність ультразвукової хвилі в середовищі .....	113
4.3. Механорецепція у бджіл .....	50	<b>10. Біоакустика</b> .....	<b>119</b>
<b>5. Основи гідродинаміки</b> .....	<b>53</b>	10.1. Утворення звуків тваринами .....	119
5.1. Рух ідеальної рідини .....	53	10.2. Фізичні процеси, що супроводжують поширення звуку у навколишньому середовищі .....	120
5.2. Рух в'язкої рідини .....	54	10.3. Поширення звуків у водному середовищі .....	122
5.3. Ламінарна і турбулентна течії .....	57	10.4. Акустична комунікація тварин .....	122
5.4. Течія рідини в трубках з еластичними стінками .....	57	<b>11. Акустобіологія</b> .....	<b>127</b>
5.5. Поверхневий натяг .....	57	11.1. Фізичні процеси, що відбуваються в слуховому аналізаторі ссавців .....	127
5.6. Капілярні явища .....	59	11.2. Акусторецепція у птиці .....	131
<b>6. Основи гемодинаміки</b> .....	<b>63</b>	11.3. Акусторецепція у риб .....	132
6.1. Склад крові .....	63	11.4. Акусторецепція у бджіл .....	134
6.2. Фізичні властивості та показники крові .....	64	11.5. Вплив шуму на живі організми .....	134
6.3. Система кровообігу тварин. рух крові по судинах .....	65	11.6. Механізми впливу ультразвуку на біологічні об'єкти .....	136
6.4. Рух еритроцитів у потоці .....	68	11.7. Вплив інфразвуку на живі організми	138
6.5. Фізичні принципи вимірювання швидкості осідання еритроцитів .....	70		
6.6. Серце як механічна система. Робота серця .....	71		

<b>12. Прикладна акустика</b> .....	<b>143</b>	15.3.5. Принцип симетрії кінетичних .....	204
12.1. Вимірювання слухового сприймання тваринами .....	143	15.3.6. Теорема пригожина .....	205
12.2. Використання ультразвуку у ветеринарній медицині .....	147	<b>16. Терморегуляція у тварин</b> .....	<b>207</b>
12.3. Використання ультразвуку у зооінженерії .....	149	16.1. Тепловий баланс тварини .....	207
<b>13. Молекулярна фізика</b> .....	<b>150</b>	16.2. Термостатична регуляція температури тіла .....	213
13.1. Ідеальний газ .....	150	<b>17. Термобіологія</b> .....	<b>218</b>
13.2. Ізопроцеси .....	151	17.1. Вплив теплових факторів на тварин .....	218
13.3. Випаровування та конденсація .....	152	17.1.1. Вплив високих температур на ендотермних тварин .....	219
13.4. Реальний газ .....	152	17.1.2. Вплив низьких температур на ендотермних тварин .....	220
13.5. Вологість повітря .....	153	17.1.3. Вплив теплових факторів на ектотермних тварин .....	223
13.5.1. Вплив вологості на живі організми .....	153	17.1.4. Вплив теплових факторів на риб .....	224
13.5.2. Характеристики вологості повітря .....	154	17.1.5. Забарвлення тварин .....	224
13.5.3. Методи вимірювання вологості повітря .....	155	17.1.6. Міграція тварин .....	224
<b>14. Молекулярна біофізика</b> .....	<b>162</b>	17.2. Терморцепція у тварин .....	226
14.1. Біологічні макромолекули .....	162	17.2.1. Механізми терморцепції .....	226
14.1.1. Білки .....	164	17.2.2. Терморцептори у тварин .....	226
14.1.2. Нуклеїнові кислоти .....	165	17.3. Поведінкова реакція тварин на температуру .....	227
14.1.3. Полісахариди .....	166	<b>18. Прикладна термодинаміка</b> .....	<b>229</b>
14.1.4. Ліпіди .....	167	18.1. Вимірювання температури .....	229
14.2. Нюх і смак у тварин .....	167	18.2. Посудина дьюара .....	231
14.2.1. Нюх та нюховий аналізатор тварин .....	167	18.3. Термолікування тварин .....	231
14.2.2. Методи аналізу запахів .....	171	18.3.1. Застосування високих температур .....	231
14.2.3. Запахи у тваринництві .....	172	18.3.2. Використання низьких температур .....	233
14.2.4. Смак та смаковий аналізатор тварин .....	173	<b>19. Електрика</b> .....	<b>234</b>
14.2.5. Методи дослідження смакового аналізатора .....	174	19.1. Електростатичне поле та його характеристики .....	234
<b>15. Термодинаміка</b> .....	<b>176</b>	19.1.1. Електричний заряд. властивості електричних зарядів .....	234
15.1. Температура і теплове розширення тіл ..	176	19.1.2. Закони електричного поля ...	235
15.1.1. Температура .....	176	19.1.3. Напруженість електричного поля .....	235
15.1.2. Теплове розширення тіл .....	176	19.1.4. Потенціал електричного поля ...	236
15.2. Термодинаміка рівноважних станів ..	178	19.1.5. Електричний диполь .....	238
15.2.1. Параметри термодинамічної системи .....	178	19.1.6. Діелектричні властивості речовини .....	239
15.2.2. Внутрішня енергія системи ..	178	19.1.7. Електричний струм .....	240
15.2.3. Теплоємність та питома теплоємність .....	178	19.1.8. Електричне коло .....	241
15.2.4. Робота і енергія .....	179	19.1.9. Закони постійного струму ....	241
15.2.5. Перший закон термодинаміки ..	181	<b>20. Біоелектрика</b> .....	<b>245</b>
15.2.6. Застосування першого закону термодинаміки до певних термодинамічних процесів ..	182	20.1. Структура і властивості біологічних мембран .....	245
15.2.7. Ентальпія. Закон гесса .....	182	20.1.1. Функції біологічних мембран ..	245
15.2.8. Тепловий обмін .....	183	20.1.2. Будова і склад біологічних мембран .....	246
15.2.9. Тепловий двигун .....	185	20.1.3. Фізичні властивості мембран ....	247
15.2.10. Цикл карно .....	186	20.2. Фізичні основи проникності мембран ..	247
15.2.11. Другий закон термодинаміки ...	188	20.2.1. Дифузія .....	247
15.2.12. Ентропія та її властивості ...	189	20.2.2. Проникність мембрани .....	248
15.2.13. Термодинамічні потенціали ...	191	20.2.3. Осмотичний тиск .....	248
15.2.14. Хімічний і електрохімічний потенціали .....	193	20.2.4. Осмотична рівновага .....	249
15.2.15. Зміна стандартної вільної енергії і константа рівноваги ..	195	20.3. Мембранний транспорт .....	251
15.3. Термодинаміка необоротних процесів ...	201	20.3.1. Електрохімічний потенціал ..	251
15.3.1. Стационарний стан .....	201	20.3.2. іонна рівновага .....	252
15.3.2. Зміна ентропії у відкритих системах .....	202	20.3.3. Рівновага гіббса-доннана .....	253
15.3.3. Дисипативна функція .....	203	20.3.4. Види транспорту .....	254
15.3.4. Основні положення лінійної нерівноважної термодинаміки .....	204		

20.3.5. Ендо- та екзоцитоз .....	255	27.3.8. Методи отримання поляризованого світла .....	317
20.3.6. Мембранний потенціал .....	256	27.3.9. Оптична активність речовини ..	319
20.4. Процеси міжклітинної взаємодії .....	258	27.4. Квантова оптика .....	320
20.5. Електрична активність організму ....	259	27.4.1. Квантова природа світла .....	320
20.5.1. Техніка вимірювання .....		27.4.2. Фотоелектричний ефект .....	321
мембранних струмів .....	259	27.4.3. Лазер та його характеристики ...	322
20.5.2. Електрична активність серцевої клітини .....	260	27.4.4. Фокусування лазерного випромінювання .....	327
20.5.3. Електрична активність серця ...	261	<b>28. Фотобіологія та фізіологічна оптика .....</b>	<b>330</b>
20.5.4. Принципи електрокардіографії ..	262	28.1. Плив оптичного випромінювання на тварин .....	330
20.5.5. Електрична активність мозку. Принципи електроенцефалографії ..	268	28.2. Фоторецепція у живих організмів ...	331
20.5.6. Принципи електроміографії ..	270	28.2.1. Фоторецепція у комах .....	331
20.5.7. Утворення електричних полів рибами .....	271	28.2.2. Зоровий аналізатор риб .....	333
<b>21. Електробіологія .....</b>	<b>276</b>	28.2.3. Зоровий аналізатор птиці .....	333
21.1. Вплив електричних полів на макромолекули .....	276	28.2.4. Зоровий аналізатор ссавців ..	335
21.2. Вплив електричних полів на живі організми .....	278	28.2.5. Механізми зору тварин .....	337
21.3. Електрорецепція .....	281	28.2.6. Кольоровий зір тварин .....	338
<b>22. Прикладна електрика .....</b>	<b>285</b>	28.2.7. Області зору у тварин .....	340
22.1. Застосування електрофізичних методів у тваринництві .....	285	28.2.8. Характеристики зору тварин	341
22.2. Електролікування тварин .....	286	<b>29. Прикладна оптика .....</b>	<b>346</b>
<b>23. Магнетизм .....</b>	<b>289</b>	29.1. Дослідження зорового аналізатора ..	346
23.1. Магнітне поле. Магнітна індукція ..	289	29.1.1. Принципи електроретинографії ..	346
23.2. Сила лоренца .....	289	29.1.2. Внутрішньоочний тиск .....	348
23.3. Закон ампера .....	291	29.1.3. Тестування світловим імпульсом ..	349
23.4. Магнітні властивості речовини .....	291	29.1.4. Дефекти зору .....	350
23.5. Електромагнітна індукція .....	293	29.2. Лазерна фотомедицина .....	352
23.6. Закон біо-савара-лапласа .....	294	29.2.1. Застосування лазерів у медицині	352
<b>24. Біомагнетизм .....</b>	<b>297</b>	29.2.2. Взаємодія лазерного випромінювання з тканиною	354
24.1. Джерела магнітного поля в живому організмі .....	297	29.2.3. Лазерна діагностика .....	356
24.2. Магнітна активність організму .....	297	29.2.4. Лазерна терапія .....	357
<b>25. Магнітобіологія .....</b>	<b>299</b>	29.2.5. Лазерна хірургія .....	359
25.1. Вплив магнітних полів на живі організми .....	299	<b>30. Ядерна фізика .....</b>	<b>361</b>
25.2. Магніторецепція .....	300	30.1. Класифікація іонізуючих випромінювань .....	361
<b>26. Прикладний магнетизм .....</b>	<b>301</b>	30.2. Радіоактивність .....	362
26.1. Методи реєстрації біомагнітних полів ..	301	30.2.1. Радіоактивний розпад .....	362
26.2. Методи магнітотерапії .....	302	30.2.2. Закон радіоактивного розпаду ...	362
<b>27. Оптика .....</b>	<b>304</b>	30.3. Дозиметрія іонізуючих випромінювань .....	363
27.1. Природа світла .....	304	30.3.1. Дози іонізуючих випромінювань ..	363
27.2. Геометрична оптика .....	305	30.3.2. Поглинання іонізуючого випромінювання .....	365
27.2.1. Основні закони геометричної оптики .....	305	30.4. Вимірювання іонізуючих випромінювань .....	365
27.2.2. Повне внутрішнє відбивання ....	306	30.4.1. Основні методи вимірювання іонізуючих випромінювань ..	365
27.3. Хвильова оптика .....	308	30.4.2. Принципи $\gamma$ -спектроскопії ...	370
27.3.1. Світло як електромагнітна хвиля .....	308	<b>31. Радіоізотопи і ядерна медицина .....</b>	<b>375</b>
27.3.2. інтерференція світла .....	309	31.1. Атомне ядро та ізотопи .....	375
27.3.3. Методи спостереження інтерференції світла .....	311	31.2. Радіоізотопи як індикатори .....	375
27.3.4. Дифракція світла .....	312	31.3. Утворення зображень .....	376
27.3.5. Дифракційна решітка .....	314	31.4. Вплив іонізуючих випромінювань на живі організми .....	378
27.3.6. Дисперсія світла .....	315	31.4.1. Механізми впливу іонізуючих випромінювань ..	378
27.3.7. Поляризація світла .....	316	31.4.2. Радіоактивні забруднення .....	378
		<b>Додаток .....</b>	<b>380</b>
		<b>Список літератури .....</b>	<b>386</b>
		<b>Предметний покажчик .....</b>	<b>388</b>

051295





*Навчальне видання*

**Посудін Юрій Іванович**

**ФІЗИКА З ОСНОВАМИ БІОФІЗИКИ**

Підписано до друку 25.07.2003. Формат 60x90/16.  
Папір офсетний. Гарнітура Таймс.  
Обл.-вид. арк. 25. Тираж 1000 прим.  
Зам. 3-2424

Видавництво «Світ».  
Державний реєстраційний № 5313 від 25.11.98 р.

ЗАТ «ВІПОЛ», ДК № 15  
03151, м. Київ, вул. Волинська, 60

65-00  
A8.

92878

UKMA Library \* Book



0415187



**Професор Посудін Юрій Іванович – завідувач кафедри біофізики Національного аграрного університету.**

**Закінчив 1969 року радіофізичний факультет Державного університету ім. Шевченка. Захистив дисертації: у 1977 р. – на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук (Інститут радіотехніки і електроніки АН СРСР, Москва), у 1992 р. – на здобуття вченого ступеня доктора біологічних наук (Агрофізичний інститут, Санкт-Петербург).**

**Основні наукові інтереси пов'язані з застосуванням методів оптичної і лазерної спектроскопії у сільському господарстві та для контролю навколишнього середовища. Брав участь у науковій роботі в університетах Італії, Німеччини, Іспанії, США, Японії. У 1969 р. як стипендіат програми ім. Фулбрайта читав лекції в Університеті штату Джорджія, США.**

**Автор підручників та монографій: “Біофізика” (1995 р.), “Спектроскопічний моніторинг агросфери” (1998 р.), “Lasers in Agriculture” (1998 р.), “Фізика і біофізика навколишнього середовища” (2000 р.), “Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища” (2002 р.).**