

**В.В. БОЙКО, І.А. ЗАЛОЇЛО, О.О. ГОДЛЕВСЬКА**

# **ПРАКТИКУМ з БІОФІЗИКИ**

## **Ч.1. БІОМЕХАНІКА**

**Навчальний посібник  
для вищих навчальних закладів**

**КИЇВ  
2021**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**В.В. БОЙКО, І.А. ЗАЛОЇЛО, О.О. ГОДЛЕВСЬКА**

# **ПРАКТИКУМ з БІОФІЗИКИ**

**Ч.1. БІОМЕХАНІКА**

**Навчальний посібник  
для вищих навчальних закладів**

**КИЇВ  
2021**

**УДК 577.35**  
**ББК**

*Рекомендовано до друку Вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол №2 від 27 вересня 2017 року), як навчальний посібник для студентів агробіологічних, ветеринарних спеціальностей вищих навчальних закладів III – IV рівнів акредитації*

Розглянуто теоретичні відомості з розділу біофізики – біомеханіки, дано опис робіт лабораторного практикуму, представлено задачі для контрольних робіт та самостійної роботи студентів денної та заочної форми навчання. Наведено довідковий матеріал.

Для студентів агробіологічних, ветеринарних спеціальностей вищих навчальних закладів.

#### **Р е ц е н з е н т и:**

*С.Г. Неділько, завідувач науково – дослідної лабораторії «Фізика конденсованого стану речовини» фізичного факультету Київського Національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук, професор;*

*Л.П. Буцацький, провідний науковий співробітник лабораторії біотехнологій інституту рибного господарства НААН України, доктор біологічних наук, професор;*

*А.П. Відьмаченко, професор кафедри фізики Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор фізико-математичних наук, професор.*

**Практикум з біофізики.ч.1.:** Навчальний посібник / В.В. Бойко, І.А.Залоїло, О.О.Годлевська.- К.: \_\_\_\_\_, 2021. – \_\_\_\_\_ с.

**ISBN**

© В.В. Бойко, І.А.Залоїло, О.О.Годлевська. 2021  
© \_\_\_\_\_, 2021

## ЗМІСТ

<b>1. ВСТУП</b> .....	
1.1. Предмет біофізики.....	
1.2. Основні завдання курсу.....	
1.3. Призначення посібника.....	
<b>2. МЕХАНІКА</b> .....	
2.1. Основні визначення.....	
2.2. Кінематика .....	
2.2.1. Кінематика матеріальної точки і поступального руху твердого тіла .....	
2.2.2. Швидкість руху живих організмів.....	
2.3. Динаміка .....	
2.3.1. Динаміка матеріальної точки і поступального руху твердого тіла .....	
2.3.3. Закони Ньютона.....	
2.3.4. Закон збереження імпульсу замкнутої системи.....	
2.3.5. Реактивний рух у природі .....	
2.4. Статика.....	
2.4.1. Умови статичної рівноваги	
2.4.2. Важіль. Умови рівноваги важеля	
2.5. Сили тяжіння .....	
2.5.1. Закон всесвітнього тяжіння.....	
2.5.2. Гравітаційне поле .....	
2.5.3. Гравітація та живі організми.....	
2.5.4. Вага тіла .....	

- 2.6. Пружні сили.....
  - 2.6.1. Деформації твердого тіла .....
  - 2.6.2. Закон Гука .....
  - 2.6.3. Вимірювання модуля Юнга .....
  - 2.6.4. Пружні властивості біологічних матеріалів
  - 2.6.5. Пружні властивості рослинної клітини.....
  - 2.6.6. Пружні властивості рослинного стебла
  - 2.6.7. Потенціальна енергія пружно-деформованого тіла
- 2.7. Робота, потужність та енергія.....
  - 2.7.1. Робота постійної сили .....
  - 2.7.2. Робота змінної сили.....
  - 2.7.3. Потужність.....
  - 2.7.4. Енергія.....
  - 2.7.5. Енергія та обмін речовин .....
- 2.8. Обертальний рух
  - 2.8.1. Кінематика руху матеріальної точки по колу
  - 2.8.2. Сили, що виникають під час криволінійного руху
  - 2.8.3. Кінематичні характеристики обертального руху
  - 2.8.4. Динамічні характеристики обертального руху

### **3. БІОМЕХАНІКА**

- 3.1. Механічні властивості біологічних об'єктів
- 3.2. Опорно-руховий апарат тварин
- 3.3. М'язи хребетних тварин
- 3.4. Основи фізики м'язового скорочення
- 3.5. М'язи птахів

- 3.6. М'язи риб
- 3.7. Експериментальні дослідження м'язового скорочення
- 3.8. Гіпокінезія та гіподинамія
- 3.9. Нем'язові форми рухливості
  - 3.9.1. Амебоїдний рух
  - 3.9.2. Війки та джгутики
  - 3.9.3. Робота джгутикового апарату
  - 3.9.4. Особливості биття джгутиків
  - 3.9.5. Реєстрація биття джгутиків
  - 3.9.6. Лазерна доплерівська спектроскопія
  - 3.9.7. Метод світлорозсіювання
  - 3.9.8. Метод фотометрії
  - 3.9.9. Метод відеомікрографії
  - 3.9.10. Оцінка рухливості сперміїв
- 3.10. Методи вимірювання рухових характеристик живих організмів
  - 3.10.1. Кінематичні характеристики тварин
  - 3.10.2. Динамічні характеристики тварин

#### **4. МЕХАНОБІОЛОГІЯ.....**

- 4.1. Механорецепція у тварин.....
  - 4.1.1. Механорецептори шкіри.....
  - 4.1.2. Вестибулорецепція.....
  - 4.1.3. Інтерорецепція
  - 4.1.4. Механорецепція у риб
  - 4.1.5. Механорецепція у бджіл
  - 4.1.6. Тигмонастичні рухи рослин

#### **5. ГІДРОДИНАМІКА.....**

5.1. Тиск.....	.....
5.2. Тиск води .....	.....
5.3. Закон Архімеда.....	.....
5.4. Рух ідеальної рідини.....	.....
5.5. Рух в'язкої рідини.....	.....
5.5.1. Рух тварин у водному середовищі	
5.5.2. Ламінарна і турбулентна течії.....	.....
5.5.3. Закон Гагена-Пуазейля .....	.....
5.5.4. Седиментація .....	.....
5.5.5. Ультрацентрифугування .....	.....
5.6. Поверхневий натяг	
5.6.1. Поверхневі явища в легенях	
5.6.2. Капілярні явища	
5.7. Гідродинаміка рослин	
5.7.1. Ксилема	
5.7.2. Механізми ксилемного транспорту	
5.7.3. Флоема	
5.7.4. Механізми транслокації по флоемі	
5.7.5. Вимірювання потоків соку	
<b>6. ГЕМОДИНАМІКА .....</b>	<b>.....</b>
6.1. Склад крові .....	.....
6.2. Система кровообігу. Рух крові по судинах	
6.3. Фізичні принципи вимірювання швидкості осідання еритроцитів	
6.4. Фізичні методи дослідження крові	
6.5. Фізичні принципи захворювань кровоносних судин	
6.6. Робота серця .....	.....
6.7.Тиск крові .....	.....

- 6.7.1. Артеріальний тиск .....
- 6.7.2. Вимірювання тиску крові .....
- 6.7.3. Сучасні прилади для вимірювання тиску

## **7. АЕРОДИНАМІКА**

- 7.1. Фізика частинок
- 7.2. Аерозолі та біоаерозолі
- 7.3. Рух атмосферних частинок
- 7.4. Аеродинаміка пташиного польоту

## **8. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ.....**

- 8.1. Механічні коливання.....
- 8.2. Згасаючі коливання .....
- 8.3. Біжуча хвиля .....
- 8.4. Стояча хвиля.....
- 8.5. Биття коливань .....
- 8.6. Розкладання складних коливань у ряд Фур'є ..
- 8.7. Коливальні процеси у природі.....
  - 8.7.1. Екологічна модель Вольтерра–Лотка ..
  - 8.7.2. Утворення колоній колективними амебами
  - 8.7.3. Природні коливання та рослини

## **9. АКУСТИКА.....**

- 9.1. Звук та його характеристики .....
- 9.2. Рівень інтенсивності звукових коливань .....
- 9.3. Суб'єктивні характеристики звукових хвиль ..
- 9.4. Ефект Доплера.....



- 9.5. Ультразвук та його характеристики .....
- 9.6. Інфразвук .....
- 9.7. Шум.....
- 9.8. Розподіл шуму за інтенсивністю .....

## **10. БІОЛОГІЧНА АКУСТИКА**

- 10.1. Утворення звуків тваринами.....
- 10.2. Акустична комунікація тварин .....
- 10.3. Акустична комунікація риб.....
- 10.4. Акустична комунікація комах.....
- 10.5. Ехолокація тварин
- 10.6. Ультразвук та рослини
- 10.7. Вплив шуму на живі організми.....

## **11. АКУСТОБІОЛОГІЯ**

- 11.1. Акусторецепція у ссавців.....
- 11.2. Акусторецепція у птиці.....
- 11.3. Акусторецепція у риб.....
- 11.4. Акусторецепція у бджіл.....

## **12. НЮХ І СМАК**

- 12.1. Нюх.....
- 12.2. Нюховий аналізатор .....
- 12.3. Механізми нюху .....
- 12.4. Методи аналізу запахів .....
- 12.5. Смак.....
- 12.6. Смаковий аналізатор .....
- 12.7. Леткі органічні сполуки у повітрі приміщень
  - 12.7.1. Повітря приміщень

12.7.2. Леткі органічні сполуки

12.8. Вимірювання якості повітря приміщень

12.8.1. Газова хроматографія (ГХ)

12.8.2. Мас-спектрометрія (МС)

12.8.3. Комбінація методів хроматографії та мас-спектрометрії  
(ГХ/МС)

12.8.4. Техніка мас-спектрометрії на основі реакцій переносу  
протона (РПП/МС)

12.9. Фітореємедіація

12.9.1. Основні процеси фітореємедіації

12.9.2. Фітореємедіація у космосі

12.9.3. Фітореємедіація радіонуклідів

12.9.4. Леткі сполуки зелених листків

### **13. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ З «БІОМЕХАНІКИ»**

13.1. Вступ.

13.2. Вимірювання. Теорія похибок.

13.3. Опис робіт

### **14. ДОДАТОК**

**15. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....**

**16. ПОКАЖЧИК.....**

# 1. ВСТУП

## 1.1. Предмет біофізики

*Біофізика* – це наука, яка вивчає фізичні явища і процеси в біологічних системах та досліджує фундаментальні процеси, що складають основу живої природи.

У біофізиці використовують фізичні принципи, методи та інструменти для вивчення живих систем на різних рівнях їх організації – від атомів та молекул до клітин, організмів та екосистем; фізика таким чином є основою біофізики.

*Фізика* – це наука, яка 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.

## 1.2. Основні завдання курсу

*Основною метою* дисципліни „Біофізика” є:

- ознайомлення студентів з принципами та законами фізики, які дають можливість зрозуміти загальні закономірності явищ природи;
- висвітлення основних фізичних характеристик та особливостей живих організмів;
- опис фізичних процесів, які становлять основу життєдіяльності людини, тварин, рослин та мікроорганізмів;
- вивчення механізмів і наслідків впливу різноманітних зовнішніх фізичних факторів (механічних, акустичних, теплових, електричних,

магнітних та оптичних) на організм і його здатності здійснювати механо-, акусто-, термо-, електро-, магніто- та фоторецепцію, що дає можливість організму взаємодіяти з навколишнім середовищем;

- розгляд фізичних методів та принципів дії приладів, що можуть зустрітися у практичній діяльності майбутнього спеціаліста.

Особлива увага звертається на сучасні досягнення фізичної науки і технології та їх практичне використання для дослідження живих організмів та систем.

### **1.3. Призначення посібника**

Посібник призначений для студентів ветеринарних, екологічних, сільськогосподарських, лісогосподарських та інших спеціальностей, для яких фізика не є домінуючою дисципліною, але які мають справу з вивченням живих організмів та оточуючого їх середовища. Підручник може бути також використаний студентами біологічних, медичних та педагогічних спеціальностей.

Структура підручника передбачає первинне знайомство студента з основами фізики та подальше вивчення практичних біофізичних проблем.

Підручник призначений для студентів-першокурсників, які ще не чітко уявляють необхідність вивчення фізики і можливі застосування фізичних принципів і законів до живих організмів. Але ознайомившись з основними розділами підручника, студент зможе підвищити рівень своєї поінформованості щодо можливих застосувань принципів і методів фізики до вивчення живих організмів та систем.

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 представлений и додатку.

Передбачається, що питання біологічної реакції живих організмів на іонізуюче випромінювання та дозиметрії студенти вивчатимуть в окремих курсах радіобіології та радіоекології.

Дане видання передбачає можливість роботи з матеріалом для студентів-іноземців та студентів, які навчаються у англomовних групах. Після фундаментальних тематичних блоків курсу автори надають цю ж інформацію англійською. Додатки англійською викладені конспективно, однак у достатній мірі для успішного засвоєння основної термінології й визначень, а також – для паралельного опрацювання матеріалу двома мовами.

#### 1.4. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ

Характеристики процесів або властивостей тіл і полів, які 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* (*м/с, кг · м/с<sup>2</sup>, кг · м<sup>2</sup> та інші*).

#### 1.5. СТАНДАРТИ ДОВЖИНИ, МАСИ ТА ЧАСУ

Будь-які фізичні величини можуть бути представлені за допомогою фундаментальних величин, які, в свою чергу, визначаються як результати вимірювань або порівняння з установленими стандартами. У 1960 році було прийнято *Міжнародну систему одиниць* (СІ), яка містить сім основних одиниць: метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, кандела, моль. У механіці такими фундаментальними величинами є довжина ( $L$ ), час ( $T$ ) та маса ( $M$ ). У системі СІ одиниці цих величин визначаються так:

1 метр дорівнює довжині шляху, який проходить у вакуумі світло за  $1/299\,792\,458$  частину секунди.

### 1.1. Приблизні значення довжини деяких об'єктів

Довжина об'єкта	Числове значення, м
Радіус видимого Всесвіту	$1 \cdot 10^{26}$
Радіус сонячної системи	$1 \cdot 10^{13}$
Відстань між Землею та Сонцем	$1 \cdot 10^{11}$
Середній радіус орбіти Землі	$1,5 \cdot 10^{11}$
Середній радіус земної кулі	$6,4 \cdot 10^6$
Висота секвої <i>Sequoiadendron giganteum</i>	76–84 (рекордна висота – 95 м)
Частинки ґрунту: - глина - мул - дрібний пісок - пісок - гравій	до $2 \cdot 10^{-6}$ $2 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5}$ $2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$ $2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$ більше за $2 \cdot 10^{-3}$
Частинка пилу	$1 \cdot 10^{-4}$
Біологічна клітина	$1 \cdot 10^{-5}$
Радіус вірусу грипу	$1 \cdot 10^{-7}$
Діаметр атома водню	$1 \cdot 10^{-10}$
Діаметр атомного ядра	$1 \cdot 10^{-14}$

Одиниця довжини *метр* – довжина, що дорівнює 1650763,73 довжини хвилі випромінювання у вакуумі, що відповідає переходу між рівнями  $2p_{10}$  та  $5d_5$  атома криптона-86.

Числові значення довжини деяких об'єктів наведено в таблиці 1.1.

Одиниця часу *секунда* – час, який дорівнює 9 192 631 770 періодам випромінювання, що відповідає енергетичному переходу між двома рівнями надтонкої структури основного стану атома цезію  $^{133}_{55}\text{Cs}$ .

Числові значення деяких часових інтервалів наведено в таблиці 1.2.

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

Одиниця маси *кілограм* – дорівнює масі платиново-іридієвого сплаву у вигляді циліндра діаметром та висотою 3,9 см, який зберігається у Севрі (Франція).

Типові значення маси різних об'єктів наведено в таблиці 1.1.

## 1.2 Приблизні значення часових інтервалів

Часовий інтервал	Значення, с
Вік Всесвіту	$5 \cdot 10^{17}$
Вік Землі	$1,3 \cdot 10^{17}$
Тривалість людського життя	$6,3 \cdot 10^8$
Один рік	$3,2 \cdot 10^7$
Один день	$8,6 \cdot 10^4$
Період світлової хвилі	$2 \cdot 10^{-15}$



### 1.3. Типові значення маси різних об'єктів

Об'єкт	Маса, кг	Об'єкт	Маса, кг
Галактика “Чумацький шлях”	$7 \cdot 10^{41}$	Індичка	4,5–7,5
		Гуска	4,5–5,0
Сонце	$2 \cdot 10^{30}$	Качка	2,7–2,9
Земна куля	$6 \cdot 10^{24}$	Курка	1,4–2,2
Місяць	$7 \cdot 10^{22}$	Людина	70
Блакитний кит	$10^5$ – $2 \cdot 10^5$	Колібрі	$2 \cdot 10^{-3}$
Слон	5000–7000	Краплина дощу	$10^{-4}$
Гіпопотам	3000	Комар	$10^{-5}$
Бізон	1500	Бактерія	$10^{-15}$
Морж	900	Вірус грипу	$10^{-18}$
Кінь	400–700	Молекула гемоглобіну	$10^{-22}$
Свиня	200–350	Атом водню	$1,67 \cdot 10^{-27}$
Баран	100–130	Електрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$

## 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 даної 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

#### 2.2.1. Кінематика матеріальної точки і поступального руху твердого тіла

*Кінематика* вивчає рух тіл без врахування причин, що зумовлюють цей рух.

*Траєкторія  $s(t)$*  – це лінія, яку описує під час руху матеріальна

точка. Залежно від форми траєкторії розрізняють *прямолінійний* і *криволінійний* рух точки.

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

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

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_t - \vec{r}_0, \quad (2.1)$$

де  $\vec{r}_0$  – радіус-вектор точки, що рухається, у початковий момент часу, а  $\vec{r}_t$  – радіус-вектор точки у даний момент часу.

Траєкторію, довжину шляху і переміщення показано на рисунку 2.1.

*Середня швидкість точки*  $\langle \vec{v} \rangle$  – це відношення переміщення  $\Delta \vec{r}$  до проміжку часу  $\Delta t$ , за який воно відбулося (рис.2.2):

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

Одиниця вимірювання швидкості –  $m/s$ .

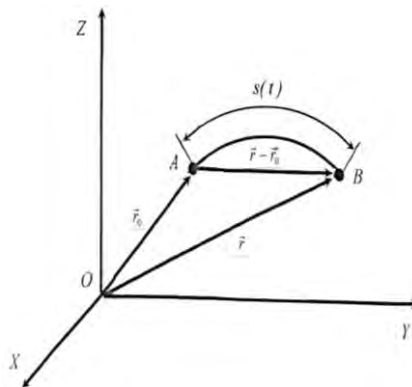


Рис. 2.1. Траєкторія, довжина

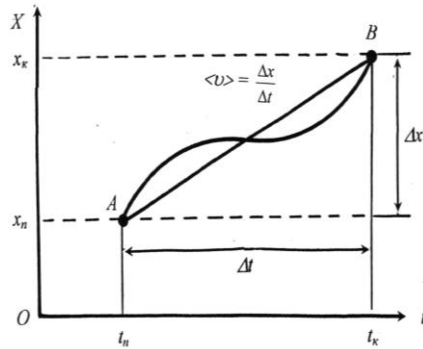


Рис. 2.2. Середня швидкість руху шляху і переміщення точки

### Приклад

Бджола летить уздовж 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 – у точці  $X_2 = 4$  м. Знайти модулі векторів переміщення та середньої швидкості польоту бджоли за даний проміжок часу.

### Розв'язання

Модуль вектора переміщення бджоли знаходимо за виразом:

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

Модуль середньої швидкості визначаємо за формулою:

$$|\langle v \rangle| = \left| \frac{\Delta X}{\Delta t} \right| = \left| \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1} \right| = |(4 \text{ м} - 12 \text{ м}) / (3 \text{ с} - 1 \text{ с})| = 8 \text{ м} / 2 \text{ с} = 4 \text{ м/с}.$$

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

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (2.3)$$

На рис.2.1 видно, що зі зменшенням  $\Delta t$  довжина шляху  $\Delta s$  наближається до  $|\Delta \vec{r}|$ , отже модуль миттєвої швидкості дорівнюватиме:

$$v = |\vec{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}. \quad (2.4)$$

*Прискорення* – це векторна величина, що характеризує зміну швидкості точки за числовим значенням та напрямком. Під час прямолінійного руху точки вздовж осі  $x$ , коли її швидкість зростає або спадає рівномірно, *середнє прискорення* визначається за виразом:

$$\bar{a} = \frac{\Delta \bar{v}}{\Delta t}, \quad (2.5)$$

де  $\Delta v$  – зміна швидкості за проміжок часу  $\Delta t$ .

*Миттєве прискорення*  $\bar{a}$  дорівнює першій похідній від швидкості  $\bar{v}$  руху точки за часом  $t$ , або другій похідній від радіус-вектора за часом (рис.2.3):

$$\bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{v}}{\Delta t} = \frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}. \quad (2.6)$$

Одиниця вимірювання прискорення –  $m/c^2$ .

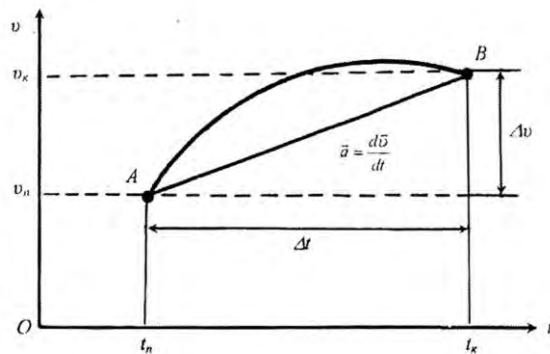


Рис. 2.3. Середнє прискорення руху точки

*Поступальним* називається такий рух твердого тіла, за якого пряма, що з'єднує будь-які дві точки цього тіла, залишається під час руху паралельною сама собі; під час поступального руху всі точки тіла

рухаються однаково і тіло можна замінити матеріальною точкою незалежно від його розмірів.

### Приклад

Частинка рухається вздовж осі  $X$  згідно з рівнянням  $X = At^2$ , де  $A = 3 \text{ м/с}^2$ ,  $X$  вимірюється в м, а  $t$  – в с. Знайти миттєву швидкість руху частинки.

### Розв'язання

У початковий момент часу  $t$  координата частинки  $X_n = 3t^2$ . 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 (за умови, що  $\Delta t \rightarrow 0$ ):

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X}{\Delta t} = 6t \text{ м/с}.$$

### Контрольне завдання

Швидкість руху частинки вздовж осі  $X$  описується рівнянням  $v = (A - Bt^2) \text{ м/с}$ , де  $A = 40 \text{ м/с}$ ,  $B = 5 \text{ м/с}^3$ ,  $t$  вимірюється в секундах. Знайти проєкції на вісь  $X$  модулів середнього прискорення, з яким рухається частинка за проміжок часу від  $t = 0$  до  $t = 2 \text{ с}$ , та миттєвого прискорення в момент часу  $t = 2 \text{ с}$ .

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

### 2.2.2. Швидкість руху живих організмів

Рух є однією з ознак живого організму. Живі організми використовують різноманітні способи переміщення по земній поверхні, в водному та повітряному середовищі за допомогою м'язової активності, спеціальних пристосувань (джгутиків, війок, плавників, крил тощо). Типові значення швидкості руху представників живого світу представлені нижче.

Таблиця 2.1. Швидкість поступального руху деяких тварин

Таксон	Швидкість руху, км/год
Гепард ( <i>Acinonux jubatus</i> )	110
Сокіл ( <i>Falco peregrinus</i> ) під час горизонтального польоту	150
Сокіл ( <i>Falco peregrinus</i> ) під час пікірування	320
Голкохвостий стриж ( <i>Chaeturinae</i> )	160
Страус ( <i>Struthio camelus</i> )	60
Риба парусник ( <i>Istiophorus platypterus</i> )	110

Таблиця 2.2. Швидкість поступального руху клітин деяких мікроорганізмів [Posudin et al., 2010]

Таксон	Швидкість руху, мкм/с
<i>Porphyridium cruentum</i>	0,05
<i>Anabaena variabilis</i>	0,5
<i>Dictyostelium discoideum</i>	0,1
<i>Micrasterias denticulata</i>	1,0
<i>Pinnularia nobilis</i>	2,8
<i>Nitzschia palea</i>	6,0
<i>Navicula peregrina</i>	18,0
<i>Dunaliella salina</i>	48±2
<i>Dunaliella viridis</i>	36±2
<i>Chlamydomonas</i> sp.	200,0
<i>Euglena gracilis</i>	160
<i>Euglena gracilis</i>	84
<i>Euglena rubra</i>	20
<i>Thiospirillum jenense</i>	87
<i>Chromatium okenii</i>	46
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	56
<i>Escherichia coli</i>	16
<i>Bacillus licheniformis</i>	21
<i>Sporosarcina urea</i>	28

Швидкість руху риб залежить від способу їх життя. Для коралових риб важливою є здатність маневрувати, тоді як великим



швидкість руху необов'язкова. Такі риби мають достатньо гнучкий, здатний до регулювання хвіст. Навпаки, пелагічні риби, які рухаються з великою швидкістю, характеризуються великим різноманіттям форм та функцій хвостів. Вони можуть бути симетричними (гомоцеркальними) або асиметричними (гетероцеркальними). Серед останніх розрізняють гіпоцеркальні (якщо нижня частина хвоста більша за розмірами, ніж верхня) або епіцеркальні (у протилежній ситуації). Акули та осетри мають епіцеркальні хвости. Риби, що рухаються з великою швидкістю, характеризуються великими значеннями відношення квадрату висоти хвоста  $H^2$  до його площі  $S$ , тобто  $H^2/S$ .

Швидкість руху водних тварин залежить від розмірів тіла (табл. 2.3).

### 2.3. Максимальна швидкість руху риб по відношенню до довжини тіла [Videler, 1993]

Вид риби	Довжина, м	Максимальна швидкість, м/с
Синій кит	30	10
Тунець	3	10
Макрель	0,3	3,3
Оселедець		
Дорослий	0,2	1
Мальок	0,1	0,5
Веслоногі ракоподібні	0.001	0.002
Сперматозоїд морського їжака	0.00015	0.0002

#### ▼ Для допитливих

Полярна крачка (*Sterna paradisea*) мігрує на відстань до 3200–4000 км.

Розміри водних тварин коливаються у широких межах - від 24-27 м (максимальна довжина 33 м) у синього кига *Valuenopteru musculus* до 6,2 мм у риби *Photocorynus spiniceps*.

Рекорд розмірів серед дерев належить секвої (*Sequoiadendron giganteum*) – середня висота становить 76–84 м, діаметр – 5–7 м; максимальна висота – 95 м та діаметр – 11 м.

## 2.3. ДИНАМІКА

### 2.3.1. Динаміка матеріальної точки і поступального руху твердого тіла

*Динаміка* – розділ механіки, який вивчає рух тіл у зв'язку з тими причинами, які спричинюють або змінюють цей рух. Класична механіка ґрунтується на поняттях маси і сили, а також на законах, які пов'язують ці поняття з кінематичними величинами – зміщенням, швидкістю та прискоренням руху.

*Сила* – фізична величина, яка характеризує дію одного тіла на інше; наслідком прикладення до тіла сили є набування прискорення або деформації тіла.

Одиниця вимірювання сили – *ньютон (Н)*:  $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$ .

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

Одиниця вимірювання маси – *кілограм (кг)*.

Типові значення маси різних об'єктів наведено в таблиці 2.4.

## 2.4. Типові значення маси різних об'єктів

Об'єкт	Маса, кг	Об'єкт	Маса, кг
Галактика “Чумацький шлях”	$7 \cdot 10^{41}$	Індичка	4,5–7,5
		Гуска	4,5–5,0
Сонце	$2 \cdot 10^{30}$	Качка	2,7–2,9
Земна куля	$6 \cdot 10^{24}$	Курка	1,4–2,2
Місяць	$7 \cdot 10^{22}$	Людина	70
Синій кит	$10^5$ – $3 \cdot 10^5$	Колібрі	$2 \cdot 10^{-3}$
Слон	5000–7000	Краплина дощу	$10^{-4}$
Гіпопотам	3000	Комар	$10^{-5}$
Бізон	1500	Бактерія	$10^{-15}$
Морж	900	Вірус грипу	$10^{-18}$
Кінь	400–700	Молекула гемоглобіну	$10^{-22}$
Свиня	200–350	Атом водню	$1,67 \cdot 10^{-27}$
Баран	100–130	Електрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$

### 2.3.2. ГУСТИНА

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

$$\rho = m/V, \quad (2.10)$$

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

Одиниця вимірювання густини –  $кг/м^3$ . Значення густини деяких речовин наведено в таблиці 2.5.

Густина сферичної частинки радіусом  $R$  дорівнює:

$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3} = \frac{m}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3}, \quad (2.11)$$

де  $D$  – діаметр частинки.

## 2.5. 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
Вода морська	1025	0
Пара водяна	0,6	100
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
Деревина рослин:		
- балса <i>Ochromona lagopus</i>	110–140	
- кедр <i>Cedrela mexicana</i>	293	
- клен <i>Flindersia brayleyana</i>	436	
- дуб <i>Castanopsis</i>	569	
<i>accuminatissima</i>	1490	
- олива <i>Olea sapensis</i>	2600–2700	
Ґрунти		
Компоненти ґрунтів:	2660	
- кварц	2650	
- глинисті мінерали	2900	
- оксиди заліза	1300	
- органічна речовина		

### Приклад

Визначити середню густину земної кулі, маса якої становить  $M = 6 \cdot 10^{24}$  кг, а радіус  $R = 6,4 \cdot 10^6$  м. Припустити, що земна куля має сферичну форму.

### Розв'язання

Густина сферичного тіла радіусом  $R$  дорівнює:

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3} = (6 \cdot 10^{24} \text{ кг}) / (4/3)(3,14)(6,4 \cdot 10^6 \text{ м})^3 =$$

$$5467 \text{ кг/м}^3.$$

Густина прісної води становить  $1000 \text{ кг/м}^3$ , тоді як густина морської води завдяки високій концентрації розчинених солей досягає  $1026 \text{ кг/м}^3$ . В цілому, густина води залежить від температури (Табл. 2.6). Густина водяної пари становить  $0,6 \text{ кг/м}^3$  ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Вода є єдиною сполукою, яка під час охолодження розширюється; отже густина льоду менша, ніж густина води. Через це лід знаходиться на поверхні водойм, що дає можливість зберегти життєдіяльність водних організмів в умовах охолодження.

### 2.6. Густина води

Густина, $\text{кг/м}^3$	Температура, $^\circ\text{C}$
999,8	0
1000,0	4
999,7	10
998,2	20
995,6	30
992,2	40
983,2	60
971,8	80

Тканини морських тварин (м'язи та кістки) містять білки та неорганічні речовини, через що їх густина варіює в межах  $1060\text{-}2000 \text{ кг/м}^3$ . Густина тіла тварин, що плавають, але не мають спеціальних пристосувань для підтримання плавучості, перевищує густину води.

Риба мешкає у прісній воді, густина якої становить  $1000 \text{ кг/м}^3$ , або у морській воді, густина якої дорівнює  $1026 \text{ кг/м}^3$ . Втім, м'язова тканина риби характеризується більшими значеннями густини (Табл. 2.7). Для забезпечення плавучості тварини необхідно підігнати її

густину до значень густини морської води. Саме з цією метою організм тварини містить речовини з невисокими значеннями густини: жир ( $930 \text{ кг/м}^3$ ), сквален та воскові ефіри ( $860 \text{ кг/м}^3$ ), гази ( $\approx 0 \text{ кг/м}^3$ ).

## 2.7. Густина окремих тканин тіла риби [Alexander, 1968]

Густина. $\text{кг/м}^3$			
Тканин	Хрящові	Морські кісткові	Прісноводні кісткові
М'яз	1038-1081	1055	1046-1063
Хрящ	1061-1183		
Кістки	-	1300-1500	1570-2040
Шкіра	1079-1188	1054-1066	-
Кишки	-	1038	-
Легені	893-1069	986-1050	-

Розглянемо тварину об'ємом  $V$  з густиною тіла  $\rho$ , яка мешкає у воді з меншою густиною  $\rho_v$ . Нехай тварина використовує деяку субстанцію для забезпечення плавучості з густиною  $\rho_c$  та об'ємом  $V_c$ .

Первинна маса тварини дорівнює  $m = \rho V$ , а маса субстанції  $m_c = \rho_c V_c$ ; загальна маса тварини з субстанцією становить  $m_s = \rho V + \rho_c V_c$ , а загальний об'єм дорівнює  $V_s = V + V_c$ .

Якщо тварина завдяки застосуванню субстанції має однакову з водою густину, то можна записати:

$$\rho V + \rho_c V_c = \rho_e (V + V_c) \quad (2.12)$$

звідки можна одержати вираз:

$$V_c/V = (\rho - \rho_e) / (\rho_e - \rho_c). \quad (2.13)$$

Для тварини з типовою густиною тіла  $\rho = 1075 \text{ кг/м}^3$  величини  $V_c/V$  наведено у табл. 2.8.

Отже, очевидно, що для забезпечення плавучості у морській воді тварині потрібно заповнити 51% об'єму тіла жиром; у прісній воді об'єм жиру навіть перевищує об'єм тіла тварини.

Тому водні тварини, такі як акули *Centroscymnus* та *Cetorhinus*, використовують вуглеводень сквален, який займає лише 30% об'єму тіла тварини.

Деякі тварини застосовують рідини з невеликими значеннями густини. Відомо, що сольові розчини мають різну густину: хлориду натрію  $1018 \text{ кг/м}^3$ ; сульфату натрію –  $1040 \text{ кг/м}^3$ ; хлориду амонію –  $1007 \text{ кг/м}^3$ . Тварини (такі як медуза *Scyphozoa* або *Ctenophora*) здатні регулювати густину рідини завдяки важким іонам сульфатів або легким іонам амонію.

## 2.8. Об'єми субстанцій, необхідних для забезпечення плавучості водних тварин у прісній та морській воді [Alexander, 1968]

Субстанція	Прісна вода.	Морська вода.
	$\rho_e = 1000$ кг/м <sup>3</sup>	$\rho_e = 1026 \text{ кг/м}^3$



Жир, $\rho_c=930$ кг/м <sup>3</sup>	1,07	0,51
Сквален та воскові ефіри, $\rho_c =$ 860 кг/м <sup>3</sup>	0,54	0,30
Гази, $\rho_c \approx$ 0 кг/м <sup>3</sup>	0,08	0,05

Ще один засіб, який використовують водні організми для забезпечення плавучості, це заповнення внутрішніх органів газами (азотом, киснем або двоокисом вуглецю), які мають невелику густину. До таких органів можна віднести плавальний міхур, який здатний розширюватися і скорочуватися, надаючи можливість рибі чи молюску регулювати густину тіла. Наприклад, якщо риба плаває на глибині, її міхур стискається завдяки збільшенню тиску, отже загальна густина тіла збільшується. Якщо риба плаває близько біля поверхні, густина її тіла зменшується.

#### ▼ Для допитливих

Серед водних організмів найбільшу масу має синій кит *Balaenoptera musculus* – близько 100 тон (максимальна маса, яку було визначено, становила 190 тон); найменшу масу має представник вудильщиків риб *Photocorynus spiniceps*, який не перевищує 1 мг.

Значення густини біологічних рідин інколи можуть використовуватися як діагностичні критерії стану організму (табл. 2.9).

## 2.9. 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

Густину використовують як параметр оцінки деревної рослинності та показник росту дерев. На густину впливають кліматичні умови: у тропічних районах густина рослин більша, ніж у північних.

Густина є одним із важливих критеріїв оцінювання якості сільськогосподарських та харчових продуктів [Посудін, 2005]. Наприклад, яйце складається з чотирьох основних компонентів, що характеризуються власною густиною: шкаралупи (2230–2316 кг/м<sup>3</sup>); жовтка (1028–1035 кг/м<sup>3</sup>); білка (1039–1042 кг/м<sup>3</sup>) та підшкаралупової оболонки (близько 1075 кг/м<sup>3</sup>). У цілому густина яйця (курячого) становить 1075–1095 кг/м<sup>3</sup>. Оскільки густина шкаралупи майже вдвічі перевищує густину інших компонентів, зрозуміло, що вимірювання густини яйця дає можливість оцінити саме якість шкаралупи, тому що її густина залежить від наявності тріщин та інших механічних пошкоджень.

Вимірювання густини лежить в основі *флотаційного методу* контролю якості продуктів: застосування кількох об'ємів з різними значеннями густини рідини (води, спиртових та сольових розчинів, олії) дають можливість здійснити сортування картоплі, в тому числі солодкої, гороху, бобів, винограду, вишні, чорниці. Крім того, такий метод застосовується для вилучення яблук з внутрішніми дефектами

та цитрусових з пошкодженнями від заморозків. Метод відзначається високим рівнем точності сортування; до недоліків можна віднести забруднення розчину та необхідність миття продуктів перед та після сортування. Використання сольових та спиртових розчинів підвищує собівартість процесу вимірювань та завдає певну небезпеку для довкілля.

Вимірюванням густини можна оцінити якість молочних продуктів, таких як молоко, сироватка, згущене молоко та морозиво.

### **Приклад**

Молоко являє собою суміш жирових глобул (1–10 мкм), міцел казеїну (0,1–0,2 мкм) і частинок сироваткового білка (0,01–0,02 мкм). Визначити масу жирової глобули молока діаметром 10 мкм, якщо її густина становить 1028,5 кг/м<sup>3</sup>.

### **Розв'язання**

Використовуючи формулу (1.2), 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**

Визначити масу міцели казеїну молока діаметром 0,1 мкм, якщо її густина становить 1110 кг/м<sup>3</sup>.

*Відповідь:* 5,81·10<sup>-19</sup> 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. 2.10.

## 2. 10. Значення числових коефіцієнтів $a, b, c, d$

3.

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	$3,66 \cdot 10^{-2}$	$-1,46 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$-1,6 \cdot 10^{-7}$

Знайти густину незбираного молока за температури  $20^{\circ}\text{C}$ .

### Розв'язання

Підставляємо числові значення в останнє рівняння:

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

### Контрольне завдання

Знайти густину збираного молока за температури  $20^{\circ}\text{C}$ .

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

Густину використовують як параметр оцінювання деревної рослинності та якості рослинних продуктів.

Густина сухої твердої речовини деревини становить близько  $1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . У більшості видів деревини, що використовуються людиною у господарстві, густина дорівнює  $(0,35-0,65) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Вважається, що найменшу густину має вид *Aeschynomene hispida* ( $0,044 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), а найбільшу – маслина *Olea capensis* ( $1,49 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) [Рейвн и др., 1990].

#### ✓ Для допитливих

У 1947 році Тур Хейердал і п'ять його супутників здійснили подорож на плоту «Кон-Тікі». Метою його подорожі був намір підтвердити свою гіпотезу про можливість первісного заселення Полінезії мешканцями Південної Америки.

Пліт «Кон-Тікі» складався з 9 бальсових колод довжиною від 10 до 14 м. Бальсове дерево, або Охрома пірамідальна (*Ochroma pyramidale*) – це велике, швидко зростаюче дерево, яке може рости до 30 м у висоту. Деревина дерева – дуже легкий матеріал. Його середня суха густина становить 120–160 кг/м<sup>3</sup>. Нагадаємо, що у берези суха густина становить приблизно 600 кг/м<sup>3</sup>, а у північної ялини суха густина становить 400 кг/м<sup>3</sup>.

Завдяки малому значенню щільності бальси і плавучості плоту, мандрівники пройшли близько 6 980 км за 101 день.

### 2.3.3. Закони Ньютона

В основі класичної механіки 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 її змінити цей стан.

Властивість тіл зберігати стан спокою або рівномірного прямолінійного руху називається *інерцією*. Перший закон Ньютона виконується лише в інерціальній системі відліку.

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

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (2.14)$$

Рівняння (2.14) можна записати так:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (2.15)$$

Третій закон Ньютона – будь-яка дія матеріальних точок (тіл) одна на одну носить характер взаємодії; сили, з якими діють одна на одну матеріальні точки (тіла), завжди однакові за модулями, протилежні за напрямком і діють уздовж прямої, що з'єднує ці точки (тіла):

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}, \quad (2.16)$$

де  $\vec{F}_{21}$  – сила, що діє на одне тіло з боку іншого;  $\vec{F}_{12}$  – сила, що діє на одне тіло з боку іншого.

#### **2.3.4. Закон збереження імпульсу замкнутої системи**

Імпульсом (кількістю руху)  $\vec{p}$  матеріальної точки, що рухається зі швидкістю  $\vec{v}$ , називається добуток маси цієї точки на її швидкість:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (2.17)$$

Одиниця вимірювання імпульсу –  $кг \cdot м/с$ .

Якщо матеріальна точка рухається у довільному напрямку, кількість її руху характеризується трьома компонентами:

$$p_x = m v_x; p_y = m v_y; p_z = m v_z. \quad (2.18)$$

Розглянемо систему матеріальних точок. Механічна система, на яку не діють зовнішні сили (що діють на систему з боку зовнішніх тіл), або якщо їх рівнодіюча дорівнює нулю, називається *замкнутою* (*ізолюваною*).

Для системи матеріальних точок рівняння (2.15) матиме такий вигляд:

$$\frac{d(m\bar{v})}{dt} = \vec{F}_{зовн} + \vec{F}_{дис}^{енусп}, \quad (2.19)$$

де  $\vec{F}_{зовн} = \Sigma(\vec{F}_i)_{зовн}$  – вектор зовнішніх сил, а  $\vec{F}_{дис}^{енусп}$  – вектор внутрішніх дисипативних сил.

Оскільки геометрична сума внутрішніх сил механічної системи за третім законом Ньютона дорівнює нулю, то  $\frac{d(m\bar{v})}{dt} = \vec{F}_{зовн}$ . Для замкнутої

системи матеріальних точок маємо  $\vec{F}_{зовн} = 0$ , отже  $\frac{d(m\bar{v})}{dt} = 0$ , або

$$m\bar{v} = \sum_{i=1}^n m_i \bar{v}_i = \sum_{i=1}^n \bar{p}_i = \bar{p} = \text{const}, \text{ тобто повний імпульс замкнутої системи не}$$

змінюється з часом (закон збереження імпульсу).

Для замкнутої системи рівняння (2.19) можна записати так:

$$d(m\bar{v}) = d\bar{p} = \vec{F}_{зовн} dt, \quad (2.20)$$

де величина  $\vec{F}_{зовн} dt$  називається імпульсом сили.

З рівняння (2.20) видно, що імпульс сили дорівнює зміні кількості руху.

### 2.3.5. Реактивний рух у природі

*Реактивний рух* виникає за рахунок відкидання частини маси тіла із певною швидкістю. За законом збереження імпульсу повний імпульс замкнутої системи не змінюється з часом (див. розділ 2.3.4).

Отже, при відокремленні від тіла масою  $M$  маси  $m$  із швидкістю  $v$ , тіло набуває швидкості  $V$ , яку можна обчислити за формулою

$$(M - m)V + m v = 0, \quad (2.21)$$

звідки

$$V = -\frac{mv}{M - m}. \quad (2.22)$$

Швидкість  $V$  тіла направлена протилежно напрямку руху  $v$  відкинутого тіла.

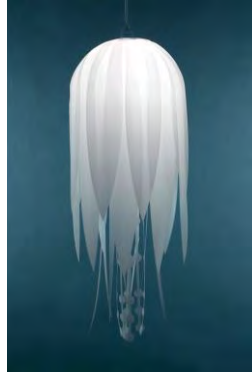
Розглянемо рух живих організмів, що супроводжується зміною їх маси.

Личинка бабки-коромисла (*Aeshna* sp.), мешканця прісноводних водойм, використовує реактивний рух у разі небезпеки. Набираючи воду в задню кишку, а потім різко викидаючи її, личинка стрибає вперед завдяки силі віддачі.

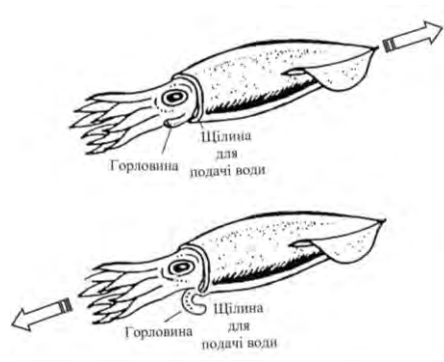
Яскравими прикладами таких організмів у морському середовищі є медузи, кальмари, восьминоги, деякі молюски тощо (рис. 2.5). Вони пересуваються завдяки своєрідному реактивному руху, який



забезпечується струменем виштовхнутої з особливих порожнин тіла води.



А



Б

**Рис. 2.5. Реактивний рух у природі:  
А–медуза; Б–кальмар (пояснення в тексті)**

Наприклад, медуза корнерот або різостома (лат. *Rhizostomae*) заповнює парасолькову частину водою, яку виштовхує, внаслідок чого рухається у протилежний бік завдяки скороченню м'язів стінки парасольки.

Складнішими системами є кальмари (лат. *Teuthida*), які мають м'язову накидку, що заповнюється водою. Внаслідок м'язового скорочення вода виштовхується через сифон, а кальмар рухається у

протилежному напрямку. Причому він здатний регулювати напрямок руху завдяки обертанню сифона. Деякі кальмари за рахунок реактивного руху досягають палуби кораблів. Часто кальмар супроводжує викид води з темною чорнильною рідиною для відлякування хижаків. Подовжене та загострене тіло кальмара визначає велику швидкість його руху як у воді (до 70 км/год), так і в повітрі (кальмари можуть вискакувати з води на висоту до 7 м).

Восьминіг (лат. *Octopus vulgaris*) може також плавати щупальцями назад, використовуючи своєрідний водометний двигун, набираючи воду в порожнину, в якій знаходяться зябра, і з силою виштовхуючи її в напрямку, протилежному руху, через лійку, що відіграє роль сопла.

Каракатиці (лат. *Sepiida*) також демонструють реактивний рух. Так, японська каракатиця (*Todarodes pacificus*) рухається під час міграції на відстань близько 2000 км зі швидкістю приблизно 2 км/год. Під час переміщення на короткі відстані вона може розвивати швидкість до 11 км/год. Відомо, що деякі різновиди каракатиць вміють розвивати швидкість понад 30 км/год.

Деякі молюски, такі як морський гребінець (лат. *Pectinidae*), стискають періодично свої стулки, завдяки чому можуть створити реактивну тягу та запобігти зустрічі з хижаками – морськими зірками. В основі раковини знайдено білок абдуктин, пружні властивості якого дають можливість молюску плавати, відкриваючи й закриваючи стулки з частотою 3 коливання в секунду.

Серед сільськогосподарських об'єктів реактивний рух демонструє огірок-пирскач пружний або “скажений” огірок (лат. *Ecballium elaterium*). Після досягання плід під великим тиском рідини, що в

ньому міститься, відокремлюється від ніжки. Насіння через утворений отвір з силою випорскується на віддаль 1-2 м від рослини.

## 2.4. СТАТИКА ТВЕРДОГО ТІЛА

### 2.4.1. Умови статичної рівноваги

*Статика* – це розділ механіки, який вивчає умови рівноваги тіл під дією сил. Термін *рівновага* означає, що тіло знаходиться у стані спокою, або його центр мас рухається з постійною швидкістю. Ми будемо розглядати у цьому розділі тіла, що знаходяться у стані спокою, тобто у стані *статичної рівноваги*.

Необхідними умовами статичної рівноваги тіла є:

1) рівність нулю геометричної суми всіх зовнішніх сил, що діють на тіло:

$$\sum_i \vec{F}_i = 0; \quad (2.23)$$

2) рівність нулю геометричної суми всіх моментів зовнішніх сил відносно даного центра:

$$\sum_i \vec{M}_i = 0. \quad (2.24)$$

### 2.4.2. Важіль. Умови рівноваги важеля

*Важіль* – найпростіший механізм, який дозволяє меншою силою зрівноважити більшу; являє собою тверде тіло, що обертається навколо нерухомої опори (рис. 2.6).

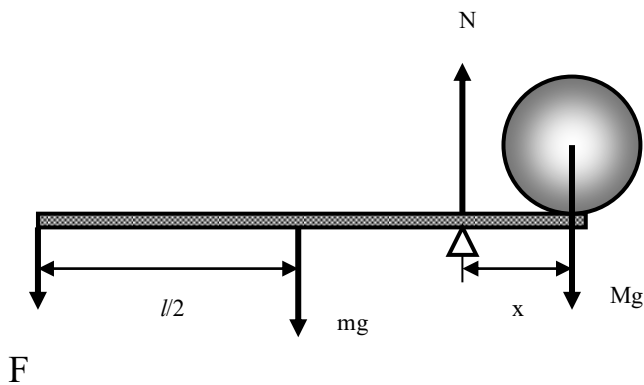


Рис. 2.6. Важіль:  $l$  – довжина планки;  $F$  – сила, що діє на важіль;  $m$  – маса планки;  $M$  – маса вантажу;  $x$  – плече важеля;  $N$  – реакція опори

Моментом  $\vec{M}$  сили  $\vec{F}$  відносно нерухомої точки  $O$  називається векторний добуток радіуса-вектора  $\vec{r}$ , проведеного із точки  $O$  в точку прикладання сили  $\vec{F}$ , на цю силу:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}. \quad (2.25)$$

Модуль моменту сили дорівнює:

$$M = Fr \sin \alpha = Fl, \quad (2.26)$$

де  $\alpha$  – кут між  $F$  і  $r$ ;  $r \sin \alpha = l$  – плече сили.

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

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

Умова рівноваги важеля: важіль знаходиться в рівновазі, якщо алгебраїчна 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).

На важіль, зображений на рис. 2.6, діють чотири сили:  $F$  – діюча сила;  $mg$  – вага планки важеля;  $Mg$  – вага вантажу;  $N$  – реакція опори. Перші три сили утворюють моменти сил, що обертають важіль відносно точки опори. Умова рівноваги важеля описується рівняннями балансу сил та моментів сил:

$$N - F - mg - Mg = 0; \quad (2.27)$$

$$- mg(l/2 - x) - F(l - x) + Mgx = 0, \quad (2.28)$$

де  $l$  – довжина планки;  $m$  – маса планки;  $M$  – маса вантажу;  $x$  – плече важеля.

Звідси:

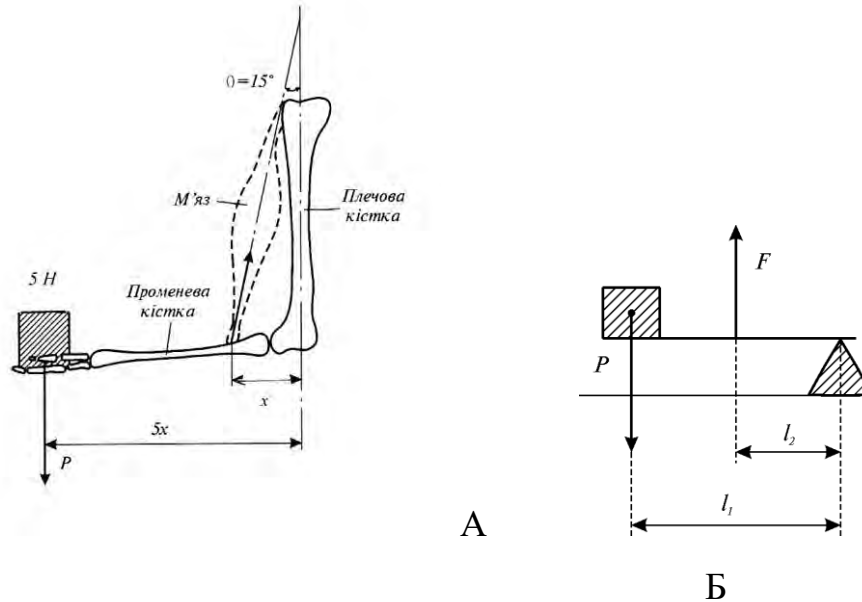
$$F = \frac{Mgx + mg(x - l/2)}{l - x}. \quad (2.29)$$

Відношення  $Mg/F$  характеризує виграш у силі, який надає важіль.

### Приклад

Розглянемо важіль, що складається із передпліччя, розміщеного горизонтально, і біцепса, який утворює кут  $15^\circ$  з плечовою кісткою

(рис. 2.7, а). Відстань  $x$  від точки опори до точки прикладання сили (еквівалентна схема важеля показана на рис. 2.7,б) становить  $1/5$  відстані від ліктя до долоні з вантажем. Визначити зусилля, яке розвиває біцепс під час утримання тіла вагою  $5\text{ Н}$ .



**Рис. 2.7. Кістка як важіль:**  
**А** – важіль, що складається із плечової, променевої кісток і м'яза;  
**Б** – еквівалентна схема важеля:  $P$  – вантаж;  $F$  – діюча сила;  $l_1$  і  $l_2$  – плечі важеля

**Розв'язання**

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:

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

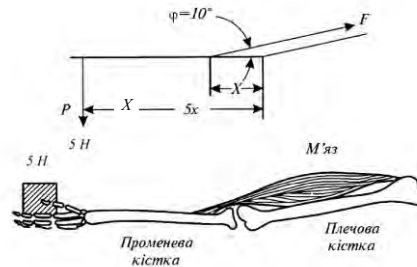
Підставляємо числові дані:

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

### Контрольне завдання

Визначити зусилля, яке розвиває біцепс для ситуації, зображеної на рис. 2.8.

Відповідь:  $F = 143,7 \text{ Н.}$



**Рис. 2.8. Важіль та його еквівалентна схема згідно з умовою попереднього завдання**

## 2.5. СИЛИ ТЯЖІННЯ

### 2.5.1. Закон всесвітнього тяжіння

Закон всесвітнього тяжіння – дві будь-які матеріальні точки 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 між ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.30)$$

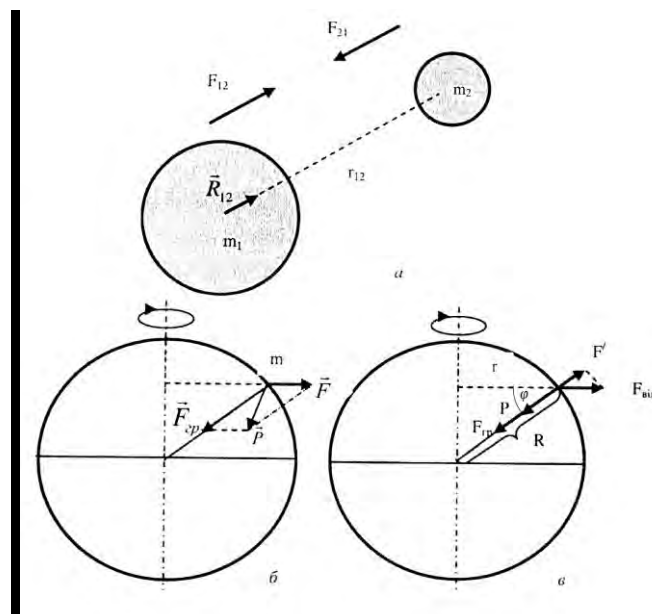
де  $F$  – сила тяжіння (гравітаційна сила, сила всесвітнього тяжіння);  $r$  – відстань між точками;  $m_1$  і  $m_2$  – їх маси;  $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$  – гравітаційна стала.

Матеріальні точки – це будь-які тіла, розміри яких значно менші ніж відстань між ними. Ньютон довів, що сила тяжіння між двома сферичними тілами кінцевих розмірів зі сферичним розподілом речовини також описується рівнянням (2.18).

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

$$F = G \frac{m M_3}{R_3^2}, \quad (2.31)$$





**Рис. 2.9. Взаємодія двох тіл: *a* – взаємодія двох тіл; *б* – дія сил на тіло, що знаходиться на земній поверхні; *в* – залежність ваги тіла від широти його місцезнаходження.**

Тут:  $\vec{F}_{cp}$  – вектор гравітаційної сили;  $\vec{F}_{v0}$  – вектор відцентрової сили;  $\vec{P}$  – вектор сили ваги;  $F_{cp}$  – гравітаційна сила;  $F_v$  – відцентрова сила;  $P$  – вага тіла;  $\varphi$  – географічна широта місцезнаходження тіла;  $r$  – радіус обертання тіла;  $R$  – радіус земної кулі.

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

У векторній формі закон всесвітнього тяжіння має вигляд:

$$\vec{F} = -G \frac{mM_3}{R_3^3} \vec{R}, \quad (2.32)$$

де  $\vec{R}$  – одиничний вектор (рис. 2.9).

### 2.5.2. Гравітація та живі організми

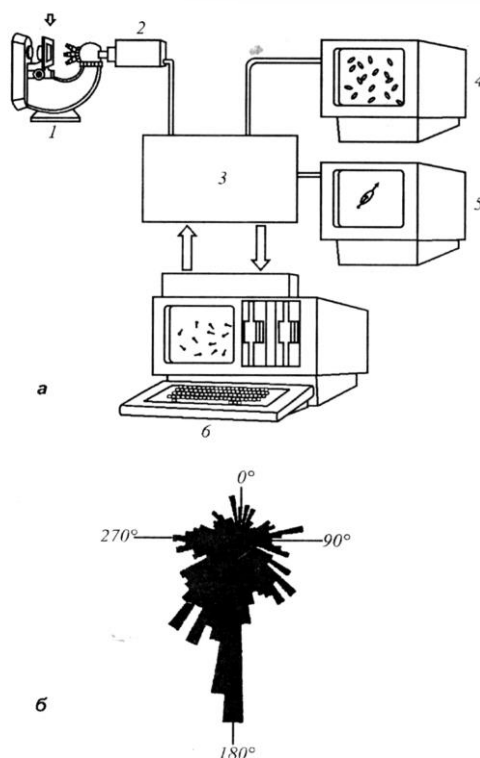
*Гравітація* або *тяжіння* – властивість тіл із масою притягуватись одне до одного. На відміну від інших зовнішніх стимулів гравітація існує завжди і не змінюється за величиною; її не можна увімкнути чи вимкнути.

*Гравітаксис водоростей.* Вертикальна міграція водоростей являє собою поведінковий механізм пошуків оптимального з точки зору їх росту та репродукції положення у водному середовищі. Фотосинтетичні та нефотосинтетичні мікроорганізми використовують світло як зовнішній стимул: при низьких рівнях освітлення вони демонструють позитивний фототаксис, прямуючи до водної поверхні з тим, щоб отримати достатнє для життєдіяльності сонячне випромінювання. Але при високій інтенсивності сонячного випромінювання вони використовують негативний фототаксис, прямуючи у глибину з тим, щоб запобігти руйнуючій дії цього випромінювання. Фотоорієнтація не має місця у темряві, але є на значних глибинах, де світла не вистачає. В цьому разі водні організми використовують гравітацію як зовнішній фактор для вертикальної орієнтації.

Гравітаційне поле Землі є важливим зовнішнім фактором для організмів, що пересуваються у водному середовищі. Таку здатність організмів орієнтувати напрямок свого руху відносно гравітаційного поля називають *гравітаксисом*. Гравітаксис спостерігається у таких водоростей як *Euglena gracilis*, *Chlamydomonas nivalis*, *Cryptomonas*, *Peridinium gatunense* та *P. faeroense*, *Amphidinium catereae*, *Prorocentrum micans*, *Dunaliella salina*. Напрямок гравітаційної орієнтації організмів залежить від виду та віку водорості. Так, *Peridinium faeroense* та молода популяція *Euglena gracilis* виявляють позитивний гравітаксис

(рух від водної поверхні), в той час як *Chlamydomonas nivalis*, *Peridinium gatunense*, *Amphidinium catereia*, *Prorocentrum micans* та старим популяціям *Euglena gracilis* притаманний негативний гравітаксис (рух до водної поверхні). Рівень гравітаційної орієнтації водоростей визначається віком культури та часом доби, наявністю важких металів у середовищі, впливом сонячного, зокрема ультрафіолетового випромінювання. Таким чином, гравітаксис є важливим екологічним фактором, який дозволяє водним організмам знаходити кращі умови існування.

Щодо механізмів гравітаксису водоростей, то тут існує дві гіпотези. Згідно з першою гіпотезою пасивної переорієнтації, гравітаксис є чисто фізичним явищем, яке пояснюється нерівномірним розподілом маси в клітині [Brinkmann, 1968]. Важка частина клітини утворює обертаючий момент, який устанавлює клітину у вертикальне положення; завдяки дії джгутикового апарата клітина прямує до водної поверхні. Але ця гіпотеза не підтверджується результатами останніх досліджень. Так, гравітаксис *Euglena gracilis* інгібується ультрафіолетовим випромінюванням, тоді як швидкість руху залишається незмінною [Häder and Liu, 1990]. Перша гіпотеза не здатна пояснити, чому молодим популяціям *Euglena gracilis* притаманний позитивний гравітаксис, тоді як старим – негативний. Не пояснюється також реверсія гравітаксиса під впливом важких металів. Експерименти, що були проведені у космосі, свідчать про те, що гравітаксис водоростей залежить від рівня гравітації, але не від магнітного чи електричного поля Землі. Отже, була запропонована друга гіпотеза [Lebert and Häder, 1996] згідно з якою гравітаксис є активний фізіологічний процес, в основі якого лежить різниця густини тіла клітини (1,05 г/мл) та середовища (1,00 г/мл), в

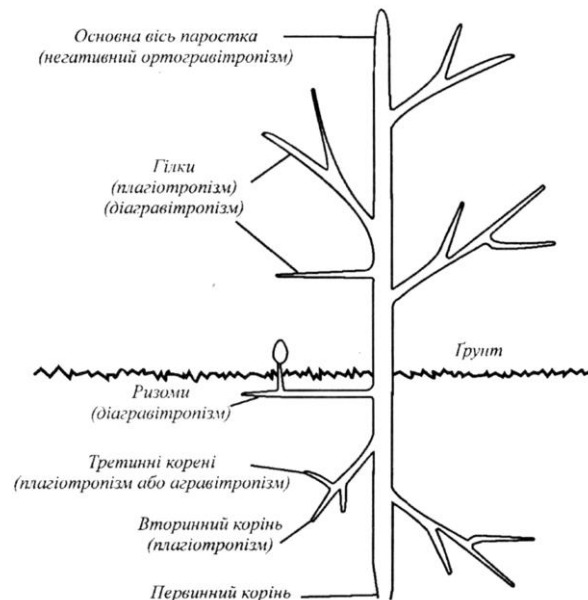


**Рис. 2.8. Гравітаксис водоростей: а – типова схема спостереження та оцінки гравітаксису водоростей (1 – мікроскоп; 2 – відеокамера; 3 – система обробки інформації; 4 – монітор спостереження за популяцією; 5 – монітор спостереження за окремою клітиною; 6 – комп'ютер); б – гістограма кутового розподілу клітин зеленої водорості *Dunaliella salina* під час гравітаксису (кількість клітин 1336; середня швидкість 25,36 мкм/с; рівень гравітаксису 0,352; напрямок гравітаксису 192,89°) [Посудін, 1998]**

якому вона знаходиться. Внаслідок седиментації тіло клітини утворює тиск на клітинну мембрану, що призводить до її зміщення на 1 нм та активізації чутливих до гравітації іонних каналів. На користь цієї гіпотези свідчать результати застосування специфічних препаратів – інгібітора механочутливих каналів гадолінію, іонофору A23187 та

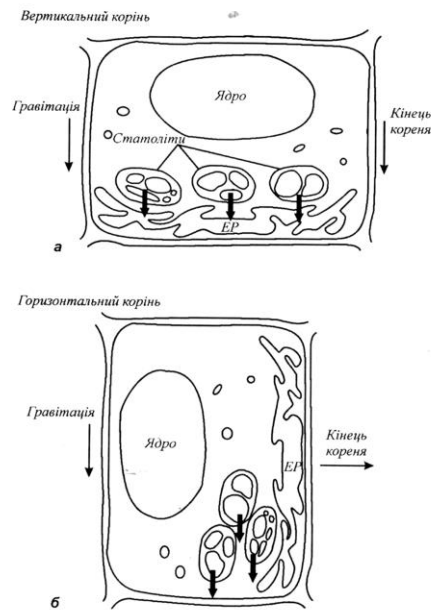
ванадату, які навіть при незначних концентраціях пригнічують гравітаксис, тоді як рухливість клітин залишається незмінною. Крім того, ці результати дають можливість допустити участь у механізмі гравіорієнтації електричних потенціалів, що виникають на цитоплазматичній мембрані. Типову схему спостереження та оцінки гравітаксиса водоростей наведено на рис. 2.8.

*Гравітропізм рослин.* Ростову реакцію рослин, яка викликає вигин або скривлення її певної частини у бік зовнішнього стимула називають *тропізмом*. Якщо рух направлений до стимулу, має місце *позитивний тропізм*; якщо в протилежний бік – *негативний тропізм*. Коли зовнішнім стимулом є гравітаційна сила, то реакція рослини на неї називається *гравітропізмом*. Рослина, покладена в горизонтальне положення (рис. 2.9), направляє паросток догори (*негативний гравітропізм*), а корінь – донизу (*позитивний гравітропізм*) [Посудін, 2004].



**Рис.2.9. Типові гравітропні відгуки стебла та коріння рослини**

*Гравірецепція.* На відміну від інших зовнішніх стимулів гравітація існує завжди і не змінюється за величиною. Крім того, гравітацію не можна увімкнути чи вимкнути; вона не характеризується наявністю градієнтів. Клітини на верхніх ділянках стебла чи кореня підлягають дії такої ж гравітаційної сили, що і на нижніх ділянках. Отже, такий зовнішній стимул як гравітацію можна реєструвати тільки завдяки руху певних рослинних чи клітинних структур – руху, внаслідок якого утворюється асиметрія в клітині, що призводить до виникнення тиску. У 1900 р. Хаберленд та Немек (цит. по [Weevers, 1949]) на основі ретельних цитологічних досліджень прийшли до висновку, що функції чутливих до гравітації органів у рослині виконують зерна крохмалю – так званих *статолитів*. Згідно з сучасними уявленнями механізм сприймання гравітаційної сили відбувається за рахунок осідання *амілопластів* - пластид, що містять зерна крохмалю (від 1 до 8) і розміщені у мембрані. Ці амілопласти, які мають певну масу і густину, рухаються по в'язкій цитоплазмі; при зміні положення рослини вони переміщуються донизу і затримуються біля клітинних стінок. Внаслідок свого накопичення вони утворюють тиск на плазматичну мембрану або ендоплазматичний ретикулум (рис. 2.10).



**Рис. 2.10. Схематичне пояснення механізму гравірецепції: а – однорідний тиск статолітів на ендоплазматичний ретикулум при вертикальній орієнтації коріння; б – перерозподіл статолітів при горизонтальній орієнтації коріння, що обумовлює неоднорідний тиск статолітів на ендоплазматичний ретикулум *ЕР*.**

Рух рецепторів гравітації сприяє активації певних ферментів, що регулюють гормонний метаболізм. Внаслідок переміщення пластид утворюється градієнт ростових речовин, які забезпечують ріст паростка або кореня.

*Вимірювання гравітропізму.* В більшості експериментів використовується гравітаційне прискорення на рівні 1 g чи менше, що досягається орієнтуванням органа (колеоптиля чи кореня) у положенні, що відрізняється від вертикального. Гравітаційна сила пропорційна синусу кута нахилу органа відносно вертикалі. Якщо потрібно звести нанівець вплив гравітаційного поля, застосовують *кліностати* – прилади, які забезпечують обертальний рух рослинного

об'єкта, або проводять *космічні дослід*и, в яких досягають стану невагомості.

#### 2.5.4. Вага тіла

Характер механічного руху залежить від системи відліку. Ті системи, по відношенню до яких виконується перший закон Ньютона (тобто такі системи, які знаходяться у стані спокою або рухаються рівномірно та прямолінійно), називаються *інерціальними системами відліку*. Системи відліку, що рухаються відносно інерціальної системи з прискоренням, називаються *неінерціальними*.

Розглянемо тіло, розміщене поблизу Землі. Крім гравітаційної сили, що визначається за законом всесвітнього тяжіння і завдяки якій тіло рухається з прискоренням вільного падіння, на нього діє за рахунок добового обертання Землі *відцентрова сила інерції*  $F_{від} = m\omega^2 r$  (де  $\omega = 7,3 \cdot 10^{-5}$  рад/с – кутова швидкість добового обертання Землі;  $r$  – радіус обертання), що направлена від осі 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 гравітаційного тяжіння.

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

$$F'_{від} = m\omega^2 r \cos \varphi, \quad (2.33)$$

де  $\varphi$  – географічна широта місцезнаходження тіла.



Вага  $P$  тіла – це сила, з якою тіло внаслідок тяжіння до Землі діє на опору (чи підвіс), що утримує тіло від вільного падіння. Вага тіла виявляється лише тоді, коли на тіло діють інші, ніж сила тяжіння, сили і тіло рухається з прискоренням, відмінним від  $g$ . Оскільки маса тіла постійна, а значення  $g$  змінюється з широтою, то відповідно змінюється вага тіла. Як видно з рисунку 2.9,в, вага тіла визначається як різниця сили тяжіння  $F$  і проекції відцентрової сили  $F'_{від}$  на напрямок дії сили тяжіння:

$$P = G \frac{mM_3}{R_3^2} - m\omega^2 r \cos \varphi. \quad (2.34)$$

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

$$P = G \frac{mM_3}{R_3^2} - m\omega^2 R \cos^2 \varphi. \quad (2.35)$$

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

## 2.6. ПРУЖНІ СИЛИ

### 2.6.1. Деформації твердого тіла

*Механічна деформація* – це зміна взаємного розташування множини частинок матеріального середовища, яка призводить до зміни форми та розмірів тіла і зумовлює виникнення сил взаємодії між частинками, тобто появу напружень.

*Пружними* називаються деформації, які виникають і зникають одночасно з навантаженням і не супроводжуються розсіюванням енергії. *Пластичними* називаються деформації, які залишаються після зняття навантаження і супроводжуються розсіюванням енергії. Якщо після зняття навантаження деформація зникає неповністю, її називають *пружно-пластичною*; якщо величина деформації явно залежить від часу, але оборотна, вона називається *в'язко-пружною*.

Існують деформації *розтягу*, *стиску*, *згину*, *кручення* та *зсуву* (рис. 2.11). Деформація викликає в тілі, що деформується, появу *сили пружності* – внутрішньої сили, що перешкоджає деформації тіла.

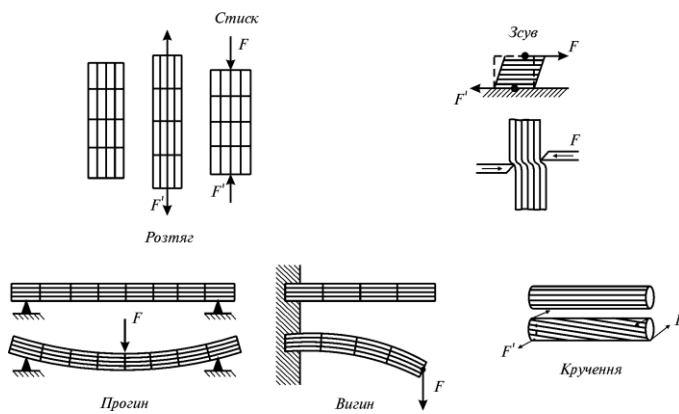


Рис. 2.11. Типи деформації

### 2.6.2. Закон Гука

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

:

$$\vec{F}_{пр} = -k\vec{x}, \quad (2.36)$$

де  $k$  – коефіцієнт пружності, що залежить від розмірів і матеріалу тіла (під час розтягу або стиску тіла вздовж осі  $OX$  закон Гука набуває вигляду  $F_{прх} = -k \cdot x$ ).

Закон Гука може бути сформульований і записаний так: *внаслідок невеликих деформацій, які є пружними, нормальне напруження пропорційне відносному видовженню:*

$$\frac{F}{S} \sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.37)$$

де  $\frac{F}{S}$  – нормальне механічне напруження, що виникає у поперечному перерізі;  $S$  – площа поперечного перерізу тіла;  $\frac{\Delta l}{l}$  – відносне видовження тіла;  $E$  – модуль Юнга (значення модуля Юнга різних пружних матеріалів наведено в табл. 2.10).

Модуль Юнга характеризує пружні властивості речовини під час невеликих деформацій; він визначається напруженням, що викликає відносне видовження тіла, яке дорівнює одиниці.

## 2.10. Модуль Юнга для різних пружних матеріалів

Матеріал	Модуль Юнга $E$ , Н/м <sup>2</sup>
Сталь	$2 \cdot 10^{11}$
Кістка	$1,5-2 \cdot 10^{10}$
Колаген	$10^7-10^8$
Сухожилля	$2 \cdot 10^7$
Хрящ реберний	$1,2 \cdot 10^7$
Гума	$2 \cdot 10^6$
Абдуктин	$1,9 \cdot 10^6$
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	$10^4$
Бамбук	$2 \cdot 10^{10}$
Деревна рослинність	$(0,35-1,93) \cdot 10^{10}$
Клітинна оболонка водорості <i>Nitella</i>	$7 \cdot 10^8$
Чиста целюлоза	$10^8$

### Приклад

Коефіцієнт жорсткості пружини показує, яку силу треба прикласти для розтягу пружини на одиницю довжини. Визначити коефіцієнт жорсткості  $k$  пружини, прикріпленої одним кінцем до

горизонтальної площини, якщо інший кінець зв'язаний з вантажем масою  $m = 400$  г. Видовження пружини становить  $x = 3$  см.

### Розв'язання

Вага тіла дорівнює пружній силі:  $mg = kx$ .

Звідси:

$$k = \frac{mg}{x} = (0,4 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2) / 3 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 1,31 \cdot 10^2 \text{ Н/м}.$$

### Приклад

Смужка тканини завдовжки 5 см із поперечним перерізом  $0,1 \text{ см}^2$  вирізана зі стінки аорти, модуль Юнга якої становить  $2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ . Яку масу варто прикріпити до вертикально підвішеної смужки, щоб викликати видовження  $0,5$  см (змінюючи поперечного перерізу знехтувати).

### Розв'язання

Сила  $F$ , прикладена до смужки, визначається як:  $F = m \cdot g$ ,

де  $m$  – маса прикріпленого вантажу;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Запишемо закон Гука у термінах нормальної механічної напруги

$\sigma = F/S$  та відносного видовження тіла  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ :

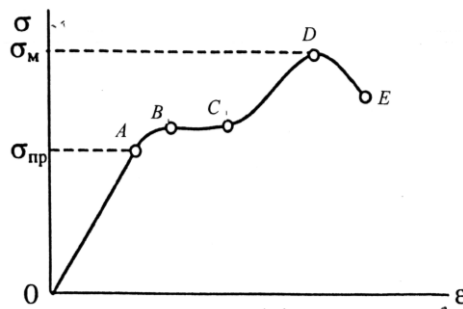
$$\frac{m \cdot g}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l},$$

звідси:

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

Залежність механічного напруження  $\sigma$  від відносного видовження  $\varepsilon$  називається *діаграмою розтягу* (рис. 2.12). Тут можна виділити такі ділянки і характерні точки: точка  $A$  називається *межею*

пропорційності; вона відповідає максимальному напруженню  $\sigma_{пр}$ , за якого ще виконується закон Гука; точка  $B$  – межа пружності – напруження, за якого деформація ще залишається пружною;  $BC$  – ділянка плинності, де деформація відбувається без збільшення напруження; точка  $C$  – межа плинності; точка  $D$ , що відповідає максимальному напруженню  $\sigma_{макс}$  тіла перед руйнуванням, називається межею міцності; точка  $E$  відповідає розриву тіла, який відбувається за меншого ніж  $\sigma_{макс}$  напруження.



**Рис. 2.12.** Діаграма розтягу – графічне зображення залежності механічного напруження  $\sigma$  від відносного видовження  $\epsilon$  (пояснення в тексті).

Типові значення модуля зсуву наведено в табл. 2.11.

### 2.11. Модуль зсуву деяких матеріалів

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

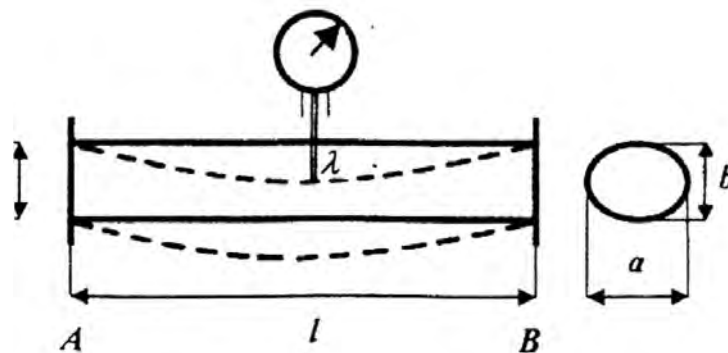
### 2.6.3. Вимірювання модуля Юнга

Розглянемо стержень, до якого прикладена зовнішня сила  $F$ . Внутрішні сили у стержня будуть чинити опір деформації стержня, в якому виникає через це механічне напруження; сам стержень набуває відносного видовження. Відношення напруження до відносного видовження характеризується модулем Юнга. Величина деформації стержня залежить від величини прикладеної сили, геометрії стержня та його пружних властивостей, тобто модуля Юнга, який можна визначити. Наведемо готові вирази для модуля Юнга.

*Модуль Юнга кісткової тканини.* Вивчення пружних властивостей тканин організму і, зокрема, кісткової тканини є доцільним з точки зору завдань, які стоять перед сучасною хірургією та ортопедією, пов'язаних з розробкою та впровадженням засобів протезування. Модуль Юнга  $E$  кісткової тканини можна визначити за прогином кістки еліптичного перерізу (рис.2.13) за виразом:

$$E = \frac{4l^3}{3\pi ab^3} \cdot \frac{F}{\lambda}, \quad (2.38)$$

де  $l$  – довжина стержня;  $a$  і  $b$  – осі еліпса;  $F = mg$  – сила, що прикладена до стержня;  $m$  – маса тягарця;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\lambda$  – величина згину стержня (“стріла згину”).



**Рис. 2.13. Визначення модуля Юнга кісткової тканини**

*Модуль Юнга рослинної тканини.* Рослинна клітина оточена еластичною оболонкою целюлозно-пектинової природи. Оболонки рослинних клітин характеризуються пружними властивостями, які зумовлюють здатність рослинних клітин розтягуватися під впливом зовнішніх навантажень. Модуль Юнга, що характеризує пружні властивості тіл, для чистої целюлози дорівнює  $10^8$  Н/м<sup>2</sup>, що становить близько 5% модуля Юнга для сталі. Клітинна оболонка містить різноманітні компоненти, крім целюлози, через що її модуль Юнга менший, ніж у чистої целюлози. Наприклад, модуль Юнга клітинної оболонки водорості *Nitella* дорівнює  $7 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>. Модуль Юнга деревної рослинності змінюється в інтервалі  $(0,35-1,93) \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>.



### Приклад

Визначити модуль Юнга деревини, з якої виготовлена балка розмірами  $a = b = 5$  см,  $l = 70$  см, якщо під впливом сили  $F = 6860$  Н величина вигину стержня  $\lambda$  дорівнює 0,7 см.

### Розв'язання

Підставляємо числові значення у рівняння (2.26):

$$E = \frac{700 \text{ кг} \cdot 0,7^3 \text{ м}^3 \cdot 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}}{4(2 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м})^4 \cdot 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 1,34 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2.$$

### 2.6.4. Пружні властивості біологічних матеріалів

Вивчення пружних властивостей біологічних матеріалів дає змогу досліджувати процеси функціонування опорно-рухового апарату живих організмів. Розглянемо основні біологічні матеріали, що відзначаються надзвичайними пружними властивостями.

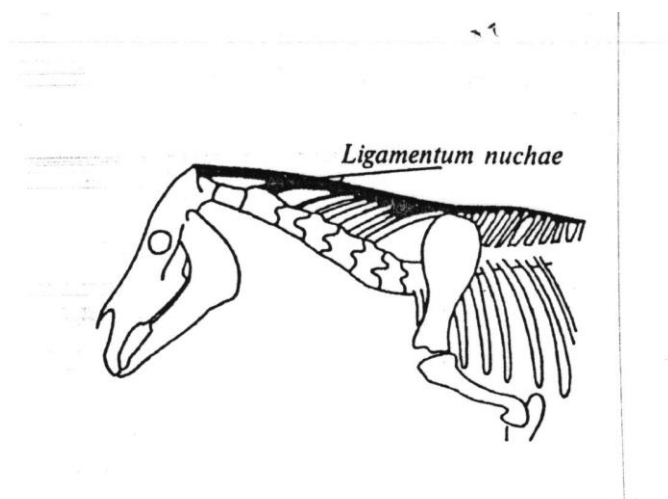
*Колаген* – білок, органічний компонент кісткової тканини, який забезпечує її пружні властивості. Крім того, колаген знаходиться в шкірі і тканинах кровоносних судин.

*Еластин* являє собою пружний білок, що зустрічається в хребетних у вигляді тонких жмутів у сполучній тканині, яка знаходиться в стінках артерій, особливо біля серця.

*Резилін* – білок, що зустрічається у комах. Пружні властивості резиліну надають їм можливість здійснювати стрибки. Наприклад, якщо б людина мала можливість стрибати як блоха (*Aphaniptera*), то вона змогла б перескочити через 100-поверховий будинок. Саме завдяки резиліну бджола здатна здійснювати близько 500 мільйонів змахів крилами протягом життєвого циклу. Штучний резилін широко використовується у медицині як заміник пружних серцевих клапанів, стінок кровоносних судин та міжхребцевих дисків.

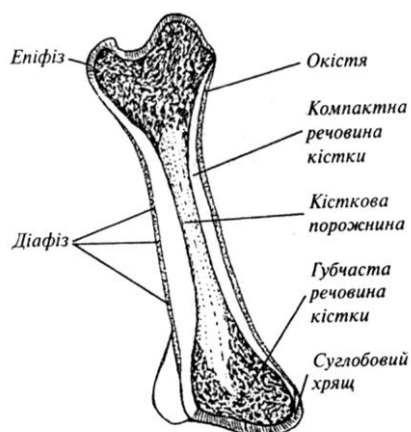
*Абдуктин* – білок, знайдений у молюска – морського гребінця (*Pecten*) в основі черепашки; гребінець здатний пливти, відкриваючи і закриваючи стулки з частотою 3 коливання за секунду. Крім того, абдуктин знаходиться в передніх крилах цикади (*Homoptera, Cicadidae*).

Багато біологічних матеріалів містять кілька пружних компонентів, що спричинює специфічний характер діаграми розтягу. Так, потилична зв'язка *Ligamentum nuchae* копитних тварин (рис. 2.14) містить такі пружні субстанції як еластин та колаген, модулі Юнга яких значно відрізняються (див. табл. 2.10). Отже, еластин відповідає за початковий відгук зв'язки, тоді як колаген – за кінцевий.



**Рис.2.14. Потилична зв'язка копитних**

*Кістки* та *м'язи* є основними компонентами опорно-рухового апарату людини і тварини. Вивчення пружних властивостей кісткової тканини доцільно з точки зору завдань, які стоять перед сучасною хірургією та ортопедією, пов'язаних з розробкою та впровадженням засобів протезування.



**Рис.2.15. Типова довга кістка**

Крім забезпечення руху, кістки виконують функції підтримки та захисту м'язових тканин, являють собою місце нагромадження кальцію.

За формою кістки поділяються на *довгі, короткі, плоскі та ірегулярні*. Маса кісток становить близько 18% загальної маси тіла. Близько 60% об'єму (40% ваги) компактної кісткової тканини займає органічний матеріал колаген; решту – неорганічний матеріал гідроксилапатит  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ . Кристалики цієї речовини розташовані між волокнами колагену і міцно прикріплені до них (рис.2.15). Саме така структура кісток зумовлює їх пружні властивості.

Модуль пружності кісткової тканини займає проміжне значення між модулями пружності її компонентів і суттєво залежить від їх відсоткового вмісту. Механічні характеристики кістки наведено в табл. 2.12.

### 2.12. Механічні характеристики кістки

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

### Контрольне завдання

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

Відповідь: 12 кН.

### 2.6.5. Пружні властивості рослинної клітини

*СФЕРИЧНА КЛІТИНА.* СПРОБУЄМО ВИЗНАЧИТИ ТОВЩИНУ ОБОЛОНКИ КЛІТИНИ СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ РАДІУСОМ  $R$  (РИС. 2.16). БАЛАНС СИЛ, ЩО ДІЮТЬ НА ОБОЛОНКУ КЛІТИНИ, МАЄ ВИГЛЯД:

$$F_{\uparrow} = F_{\downarrow}, \quad (2.39)$$

де  $F_{\uparrow} = p \cdot \pi r^2$ , а  $F_{\downarrow} = \sigma \cdot 2\pi r \Delta r$ ;  $p$  – внутрішньоклітинний тиск;  $\sigma$  – напруження, що виникає в клітинній оболонці;  $\Delta r$  – товщина клітинної оболонки.

Звідси

$$p \cdot \pi r^2 = \sigma \cdot 2\pi r \Delta r. \quad (2.40)$$

Товщину клітинної оболонки можна знайти за виразом:

$$\Delta r = \frac{pr}{2\sigma}. \quad (2.41)$$

Підставимо типові значення механічних параметрів для сферичної за формою клітини:  $r = 1$  мкм;  $p = 20$  атм =  $2 \cdot 10^6$  Н·м<sup>-2</sup>;  $\sigma = 2 \cdot 10^7$  Н·м<sup>-2</sup> в останній вираз, звідки  $\Delta r = 50$  нм.

*Циліндрична клітина.* Клітини такої форми, що мають водорості *Nitella* або *Chara*, відчують механічні напруження в клітинних оболонках. Якщо радіус циліндра  $r$ , а сила, що виникає за рахунок

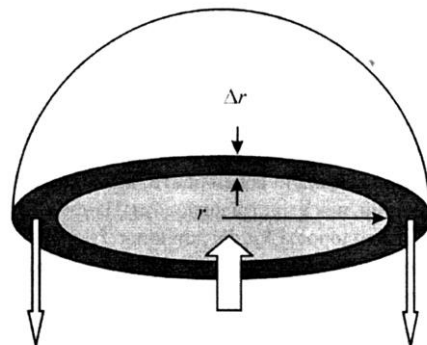
внутрішнього гідростатичного (тургорного) тиску, дорівнює  $F_p = p \cdot S = p \cdot \pi r^2$ , то цю силу буде зрівноважувати сила, яка обумовлена поздовжнім напруженням  $\sigma_L$ , що виникає в клітинній оболонці (рис. 2.16,a).

Площа, на яку діє поздовжнє напруження, дорівнює  $S_L = 2\pi r \cdot \Delta r$ , де  $\Delta r$  – товщина клітинної оболонки. Отже, сила, що виникає в клітинній оболонці, дорівнює  $F_L = \sigma_L \cdot 2\pi r \cdot \Delta r$ . З балансу сил, що діють на оболонку ( $F_p = F_L$ ), можна знайти напруження в клітинній оболонці:

$$p \cdot \pi r^2 = \sigma_L \cdot 2\pi r \cdot \Delta r, \quad (2.42)$$

звідки

$$\sigma_L = \frac{rp}{2\Delta r}. \quad (2.43)$$

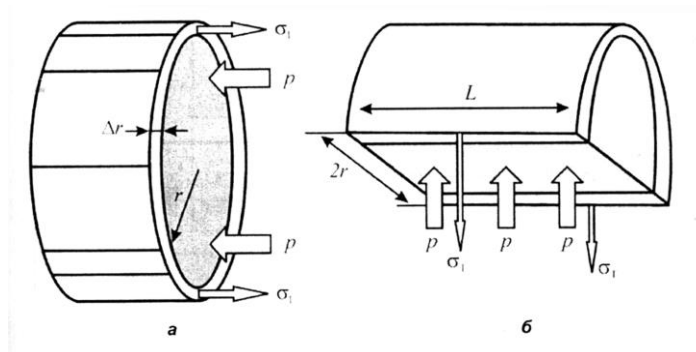


**Рис. 2.16.** Баланс сил, що діють на оболонку клітини сферичної форми радіусом  $r$  [Нобел, 1973].

Поздовжнє напруження діє паралельно осі циліндра і протидіє деформації розтягу клітини.

Крім того, в клітині виникає тангенціальне напруження  $\sigma_T$ , яке обмежує радіальне розширення клітини завдяки внутрішньому тиску. Розглянемо циліндричну клітину, що розрізана посередині (рис. 2.17).

Внутрішній тиск  $p$  діє на площу прямокутника  $2rL$ , що викликає появу сили  $F_T = p \cdot 2rL$ . Цю силу буде зрівноважувати сила, яка обумовлена тангенціальним напруженням  $\sigma_T$ , що виникає в клітинній оболонці. Площа, на яку діє тангенціальне напруження, дорівнює  $S_T = 2rL$ , де  $L$  – довжина клітинної оболонки (рис.2.17,б).



**Рис. 2.17. Механічні напруження у клітинній оболонці: а – поздовжнє напруження  $\sigma_L$ , що діє паралельно осі циліндричної клітини і протидіє деформації розтягу клітини; б – тангенціальне напруження  $\sigma_T$ , що виникає в клітинній оболонці. Тут  $p$  – тиск, що діє на клітину;  $r$  – радіус клітини;  $\Delta r$  – товщина клітинної оболонки;  $L$  – довжина клітини [Нобел, 1973].**

Отже, з балансу сил ( $F_p = F_T$ ) можна знайти тангенціальне напруження:

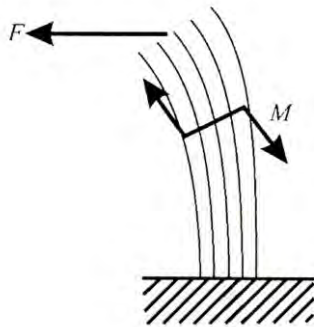
$$p \cdot 2rL = \sigma_T \cdot 2\Delta rL, \quad (2.44)$$

звідки

$$\sigma_T = \frac{rp}{\Delta r}. \quad (2.45)$$

### 2.6.6. Пружні властивості рослинного стебла

*Деформація згину.* Рослинне стебло під впливом зовнішньої сили  $F$  (наприклад, вітру) згинається. Під впливом цієї сили певні шари розтягуються, тоді як інші стискаються (рис. 2.18).



**Рис. 2.18.** Схема впливу зовнішньої сили  $F$  на деформацію стержня, внаслідок якої утворюється протидіючий момент  $M$

У стеблі виникають пружні сили, що утворюють обертальний момент, який протидіє моменту сили  $F$ . Видно, що основну участь в утворенні протидіючого моменту беруть зовнішні шари стебла, тоді як середні шари ніякої ролі не відіграють. Отже, якщо вилучити центральну частину стебла, її опір на згин не зміниться. Математичні розрахунки свідчать, що найбільший опір згину виявляють трубки, в яких відношення внутрішнього діаметра до зовнішнього становить 8:11. Саме таке співвідношення мають стебла більшості рослин. Яскравим представником рослин, які позбавлені центральної частини стебла, є бамбук. Цю рослину ефективно використовують для одержання сировини, продуктів харчування та будівельних матеріалів 2,2 млрд населення світу; деякі види бамбуку ростуть зі швидкістю близько одного метра за добу. Модуль Юнга тканини бамбуку

дорівнює  $2 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, тобто бамбук більш пружний, ніж сталевий стержень, модуль Юнга якого становить  $2,1 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>. У той же час відношення маси бамбуку до його об'єму становить 600 кг/м<sup>3</sup>, тоді як для сталі це відношення дорівнює 7800 кг/м<sup>3</sup>.

*Вимірювання пружних параметрів рослинного стебла.* Відомо, що рослини здатні адаптуватися до механічних факторів навколишнього середовища (наприклад, вітру). Багато рослин обмежують висоту та збільшують діаметр стебла у відповідь на постійно діючі механічні стимули [Nobel, 2005]. Цей процес адаптації супроводжується відповідною зміною пружних властивостей стебла. Схему приладу для дослідження залежності пружних властивостей ксилеми (провідної тканини, по якій здійснюється основне транспортування води і мінеральних речовин в рослині) від впливу механічних стимулів наведено на рис. 2.19 [Herworth, 1999].

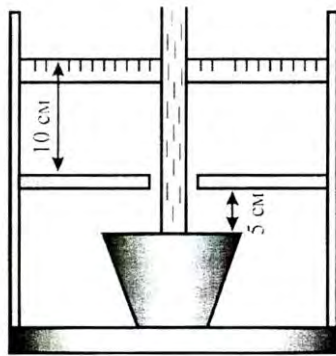


Рис. 2.19 Схема приладу для дослідження пружних властивостей ксилеми від впливу механічних стимулів [Herworth, 1999].

**Рис.2.19** Схема приладу для дослідження залежності пружних властивостей ксилеми від впливу механічних стимулів [Herworth, 1999].

Рослини були поділені на чотири групи: одна – контрольна, тоді як інші підлягали дії повітряного потоку різної інтенсивності двадцять разів на день по 2 хв протягом 8 тижнів. Повітряний потік



викликав є другій групі відхилення на 3,5 см, третій – на 10,5 см, є четвертій – на 17 см (відхилення виміряли на висоті 15 см від ґрунтової поверхні). Опір стебла згину оцінювали за допомогою індексу жорсткості на згин:

$$EI = \frac{4F(h^{2/3})^4}{\pi h \sigma}, \quad (2.46)$$

де  $F$  – діюча сила;  $h$  – висота рослини;  $\sigma$  – механічне напруження.

Результати досліджень з рослиною (*Nicotiana tabacum* “Samsun”) свідчать про те, що рослина відповідає на постійно діючі механічні стимули збільшенням товщини циліндру, що утворюється ксилемною тканиною.

### 2.6.7. Потенціальна енергія пружно-деформованого тіла

Потенціальна енергія пружно-деформованого тіла дорівнює максимальній роботі, що здійснюється силами пружності, які відновлюють первинні розмір та форму тіла. Потенціальну енергію пружно-деформованого тіла визначають так:

$$W_{np} = \frac{k \cdot x^2}{2} = \frac{E \cdot S \cdot (\Delta l)^2}{2 \cdot l} = \frac{\sigma^2 \cdot V}{2 \cdot E}, \quad (2.47)$$

де  $k$  – коефіцієнт пружності;  $x$  – видовження цього тіла;  $E$  – модуль Юнга;  $S$  – площа поперечного перерізу тіла;  $\Delta l$  – видовження;  $l$  – довжина тіла;  $\sigma$  – нормальна механічна напруга (Н/м<sup>2</sup>);  $V$  – об’єм тіла.

#### Приклад

Визначити роботу, що виконується під час стискування стегнової кістки собаки на 0,5 мм, яка має довжину 25 см і переріз 3 см<sup>2</sup>. Модуль Юнга дорівнює  $2 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>.

### Розв'язання

Робота стискання кістки витрачається на збільшення її потенціальної енергії:

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

Підставляємо числові дані:

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

### Приклад

Стрибок блохи масою  $m = 0,45 \cdot 10^{-6}$  кг характеризується вертикальною компонентою швидкості  $v = 1$  м/с, яку вона досягає через  $t = 10^{-3}$  с, та висотою стрибка  $h = 3,5 \cdot 10^{-2}$  м. Визначити такі параметри:

- а) прискорення, з яким стрибає блоха;
- б) кінетичну енергію блохи;
- в) енергію м'язів блохи, яка становить 20% маси тіла комахи, якщо питома потужність м'язів дорівнює  $P/m = 60$  Вт/кг;
- г) енергію, що накопичує блоха в двох задніх кінцівках (об'єм кожної з яких становить  $1,4 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>) під час стискання резиліну, що знаходиться в цих кінцівках;
- д) на яку відстань змогла стрибнути людина, якщо б вона мала пружні властивості блохи? Нагадуємо, що блоха стрибає на відстань, що перевищує її розміри в 200 разів.

### Розв'язання

а) прискорення, з яким стрибає блоха, визначається за виразом:

$$a = v/t = (1 \text{ м/с})/(10^{-3} \text{ с}) = 10^3 \text{ м/с}^2.$$

Отже,  $a \approx 100g$  (де  $g$  – прискорення вільного падіння);

б) кінетична енергія блохи розраховується за формулою:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot (1 \text{ м/с})^2 = 22,5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}.$$

в) енергія м'язів блохи визначається так:

$$E_m = 20\% \cdot (P/m) \cdot m \cdot t = 0,2 \cdot 60 \text{ Вт/кг} \cdot 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot 10^{-3} \text{ с} = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}.$$

Отже, енергії м'язів блохи явно недостатньо для забезпечення стрибка

( $E_m < E_k$ );

г) використовуючи формулу (2.28) та табл. 2.1, знаходимо потенціальну енергію  $1 \text{ мм}^3$  пружно-деформованого резиліну:

$$E_{np} = \frac{k \cdot x^2}{2} = \frac{E \cdot S \cdot (\Delta l)^2}{2 \cdot l} = \frac{1}{2} \cdot 1,7 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 = 0,85 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

Загальна енергія, що нагромаджується двома кінцівками, становить:

$$E_k = 2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,85 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}.$$

Цієї енергії достатньо для забезпечення стрибка ( $E_k > E_m$ );

д) людина, яка б мала пружні властивості блохи, змогла б стрибнути на довжину стадіону.

## 2.7. РОБОТА, ПОТУЖНІСТЬ ТА ЕНЕРГІЯ

*Робота сили* – це міра дії сили, яка залежить від чисельної величини і напрямку сили та від переміщення точки її прикладання.

### 2.7.1. Робота постійної сили

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

$$A = \vec{F} \cdot \vec{r}, \quad (2.48)$$

або

$$A = |\vec{F}| \cos \alpha \cdot |\vec{r}|. \quad (2.49)$$

### 2.7.2. Робота змінної сили

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

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F \cos \alpha \cdot ds, \quad (2.50)$$

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 зводиться до інтеграла:

$$A \cong \int_1^2 \vec{F} d\vec{r} = \int_{s_1}^{s_2} F \cos \alpha \cdot ds. \quad (2.51)$$

Одиниця вимірювання роботи – джоуль (Дж):  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

### 2.7.3. Потужність

Якщо зовнішня сила прикладена до об'єкта і при цьому виконується робота  $\Delta A$  за проміжок часу  $\Delta t$ , то *середня потужність* визначається як відношення роботи до проміжку часу:

$$\langle N \rangle = \frac{\Delta A}{\Delta t}. \quad (2.52)$$

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

$$N = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{dA}{dt}. \quad (2.53)$$

Використовуючи вираз (2.42), одержимо:

$$N = \frac{\vec{F} \cdot d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v}. \quad (2.54)$$

Одиниця вимірювання потужності – ват (Вт):  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$ .

Позасистемною одиницею потужності є *кінська сила (к.с.)*:  
1 к.с. = 746 Вт.

Використовуючи одиниці потужності, можна визначити таку одиницю енергії (або роботи) як *кіловат-година (кВт·г)*:  $1 \text{ кВт}\cdot\text{г} = (10^3 \text{ Вт})\cdot(3600 \text{ с}) = 3,6\cdot 10^6 \text{ Дж} = 3,6 \text{ МДж}$ .

### **Приклад**

Двигун, що використовується у підйомнику, забезпечує підймання вантажу масою 100 кг на висоту 10 м за 20 с. Визначити потужність двигуна ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ ).

### **Розв'язання**

Використовуючи рівняння (2.46), одержимо з урахуванням того, що напрямки сили та швидкості збігаються:

$$N = F \cdot v = mgv = 100 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot (10 \text{ м}/20 \text{ с}) = 500 \text{ Вт}.$$

## **2.7.4. Енергія**

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

*Кінетична енергія* механічної системи – це енергія механічного руху цієї системи. Кінетична енергія тіла  $E_k$  залежить від маси тіла  $m$  та швидкості його поступального руху  $v$ :

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2. \quad (2.55)$$

Розглянемо матеріальну точку, що рухається під впливом постійної сили у напрямку дії цієї сили. Робота сили під час переміщення

матеріальної точки дорівнює зміні кінетичної енергії цієї точки:

$$A = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2, \quad (2.56)$$

де  $v_1$  та  $v_2$  – початкова та кінцева швидкості руху матеріальної точки.

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

Робота, що виконується консервативною силою  $\vec{F}$  з переміщення частинки вздовж осі  $x$ , дорівнює:

$$A_K = \int_{x_n}^{x_k} F_x dx = -\Delta E_n = E_{n_1} - E_{n_2}, \quad (2.57)$$

де  $E_{n_1}$  та  $E_{n_2}$  – потенціальна енергія частинки у початковому та кінцевому положеннях відповідно.

Отже, робота, що здійснюється консервативними силами, дорівнює від'ємній зміні потенціальної енергії.

Енергія механічного руху та взаємодії називається *повною механічною енергією*.

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

$$E_K + E_n = \text{const}, \quad (2.58)$$

де  $E_K$ ,  $E_n$  – кінетична та потенціальна енергії системи відповідно.

Цей закон еквівалентний твердженню, що якщо кінетична енергія консервативної системи збільшується (або зменшується) на певну величину, то потенціальна енергія буде зменшуватися (або збільшуватися) на ту ж саму величину.

### Приклад

Лижник спускається з пагорба висотою 100 м. Визначити його швидкість біля підніжжя пагорба, нехтуючи силою тертя та опором повітря.

### Розв'язання

Запишемо закон збереження енергії:

$$E_{кв} + E_{пв} = E_{ко} + E_{по},$$

де  $E_{кв}$  та  $E_{пв}$  – кінетична і потенціальна енергія лижника на вершині пагорба, а  $E_{ко}$  та  $E_{по}$  – кінетична та потенціальна енергія лижника біля основи пагорба відповідно.

Останнє рівняння можна переписати так:

$$0 + mgh = \frac{1}{2} m v^2 + 0.$$

Звідси:

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 100 \text{ м}} = 44,27 \text{ м/с}.$$

### 2.7.5. Енергія та обмін речовин

*Обмін речовин (метаболізм)* – це сукупність процесів перетворення речовин і енергії в живих організмах, які становлять основу їх життєдіяльності. Обмін речовин передбачає руйнування складних органічних речовин, яке супроводжується звільненням енергії, потрібної для інших процесів, та утворенням складних субстанцій, що формують речовину для тканин та органів. Живий організм одержує енергію з продуктів харчування; ця енергія витрачається на нагрівання і здійснення роботи. Типове значення обміну речовин як швидкості перетворення хімічної енергії у теплову та механічну для людини масою 70 кг у стані спокою становить 120 Вт.



Протягом доби значення обміну речовин зростає до  $120 \text{ Вт} \cdot 24 \text{ г} \cdot 3600 \text{ с} = 10368 \text{ кДж} = 0,2389 \text{ ккал/кДж} \cdot 10368 \text{ кДж} = 2477 \text{ ккал}$ . Таким чином, людині щодобово потрібно одержувати через харчування близько 2500 ккал з тим, щоб підтримувати свою масу. Зміна маси тіла на 1 кг еквівалентна енергії близько 7700 ккал.

### **Приклад**

Альпініст масою 90 кг піднявся на вершину гори висотою 1000 м. Якщо припустити, що 20 % хімічної енергії, що одержав альпініст через харчування, витрачається на механічну енергію, визначити кількість енергії, яку він споживає.

### **Розв'язання**

Робота, яку виконує альпініст під час підймання на гору висотою  $h$ , дорівнює:

$$A = mgh = 90 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 1000 \text{ м} = 8,82 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 0,2389 \text{ ккал/кДж} \cdot 8,82 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 2,1 \cdot 10^2 \text{ ккал}.$$

Хімічна енергія, що одержав альпініст через харчування, становить  $2,1 \cdot 10^2 \text{ ккал} / 0,2 = 1050 \text{ ккал}$ . Оскільки зміна маси тіла на 1 кг еквівалентна енергії 7700 ккал, зменшення маси тіла альпініста внаслідок підймання на гору дорівнюватиме:

$$\Delta m = 1050 \text{ ккал} / 7700 \text{ ккал/кг} = 0,136 \text{ кг}.$$

### **Приклад**

Кожний день раціон корови живою масою 500 кг, необхідний для підтримання життя та одержання надою 10 кг, включає 940 г засвоєваних білків, 290 г жирів, 800 г цукру та 3700 г клітковини. Визначити роботу, що виконала корова під час випасу, та теплоту,

виділену у процесі згорання кормів за такого щоденного раціону, якщо корова піднялась на пагорб висотою  $h = 500$  м. Калоричні еквіваленти поживних речовин:

$$Q_o^\circ = 17000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; Q_{ж}^\circ = 39000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; Q_{ц}^\circ = 17000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; Q_{к}^\circ = 17000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

### Розв'язання

Робота, яку виконала корова під час випасу:

$$A = F \cdot h = mgh = 500 \cdot 10 \cdot 500 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Теплота, яка була виділена при згоранні кормів, визначається так:

$$Q = m_o \cdot Q_o^\circ + m_{ж} \cdot Q_{ж}^\circ + m_{ц} \cdot Q_{ц}^\circ + m_{к} \cdot Q_{к}^\circ.$$

Підставляємо числові дані:

$$Q = 0,94 \cdot 17000 + 0,29 \cdot 39000 + 0,8 \cdot 17000 + 3,7 \cdot 17000 = 15980 + 11310 + 13600 + 62900 = 103790 \text{ кДж} = 103,79 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

## 2.8. Обертальний рух

### 2.8.1. Кінематика руху матеріальної точки по колу

Розглянемо рух матеріальної точки, що рухається по коловій траєкторії радіусом  $r$  зі швидкістю  $\vec{v}$ . Проекції прискорення на дотичну та головну нормаль до траєкторії називають відповідно *тангенціальним*  $\vec{a}_\tau$  і *нормальним*  $\vec{a}_n$  прискореннями.

Тангенціальна складова прискорення виникає за рахунок зміни швидкості матеріальної точки за модулем; вона направлена по дотичній до траєкторії в даній точці:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}. \quad (2.59)$$

Нормальна складова прискорення характеризує зміну у часі напрямку вектора швидкості; вона направлена по радіусу кривизни  $r$  до центра кривизни (саме тому його називають *доцентровим прискоренням*), а абсолютна величина визначається за виразом:

$$a_n = \frac{v^2}{r}. \quad (2.60)$$

Модуль *повного прискорення* матеріальної точки під час криволінійного руху визначається так (рис.2.20):

$$a = |\vec{a}| = \sqrt{\left[\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{r}\right)^2\right]}. \quad (2.61)$$

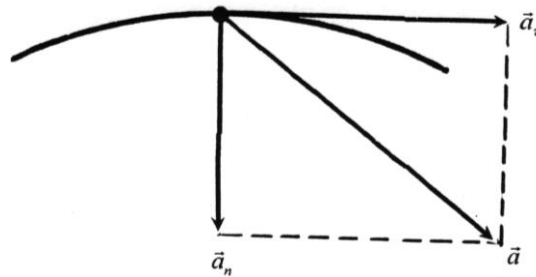


Рис. 2.20. Повне прискорення точки під час криволінійного руху

### 2.8.2. СИЛИ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС КРИВОЛІНІЙНОГО РУХУ

Згідно з рівнянням (2.48), матеріальна точка, що бере участь в обертальному русі, набуває нормального прискорення  $a_n = \frac{v^2}{r}$ . Воно спрямоване до центра кола і називається *доцентровим*. Відповідно силу, яка діє на матеріальну точку і направлена вздовж головної нормалі до її траєкторії у бік центра кола, називають *доцентровою*:

$$F_{\partial} = ma_n = m \frac{v^2}{r}. \quad (2.62)$$

Сила, з якою матеріальна точка, що рухається по криволінійній траєкторії (по колу), діє на зв'язок, який обмежує свободу руху точки і змушує її рухатися криволінійно, називається *відцентровою*. Відцентрова та доцентрова сили дорівнюють одна одній, мають протилежні напрямки, оскільки прикладені до різних тіл.

### Приклад

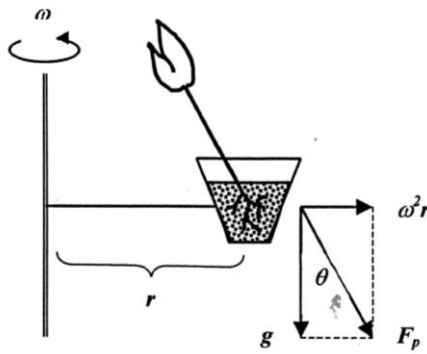
Тіло сферичної форми масою 1 кг, до якого прикріплена мотузка довжиною 1,5 м, обертається у горизонтальній площині. Визначити максимальну швидкість руху тіла, якщо сила, що діє на мотузку, дорівнює 50 Н.

### Розв'язання

Використовуючи рівняння (2.39), знайдемо швидкість руху тіла:

$$v = \sqrt{\frac{F_{\partial} r}{m}} = \sqrt{\frac{(50\text{Н})(1,5\text{м})}{1\text{кг}}} = 8,7 \text{ м/с}.$$

Розглянемо горщик з рослиною на столі, що обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ , на відстані  $r$  від осі обертання. Рослина буде рости під кутом  $\theta$  до вертикальної осі, який визначається впливом гравітаційного  $g$  та інерціального  $\omega^2 r$  прискорень (рис. 2.21).



**Рис. 2.21.** Вплив гравітаційної та відцентрової сил на рослину, яка розміщена на столі, що обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ , на відстані  $r$  від осі обертання: внаслідок дії результуючої сили  $F_p$  рослина буде рости під кутом  $\theta$  до вертикальної осі.

### 2.8.3. КІНЕМАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

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

Розглянемо обертальний рух тіла довільної форми у площині  $xy$  навколо осі, що проходить через точку  $o$  перпендикулярно до площини (рис. 2.22). Для спрощення вважатимемо вісь обертання нерухомою. Якщо частинка  $P$  тіла, що обертається по колу радіусом  $r$ , переміщується з точки 1 в точку 2, радіус-вектор зміщується на кут  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ , який являє кутове зміщення. Тоді середню кутову швидкість  $\langle\omega\rangle$  визначають так:

$$\langle\omega\rangle = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}. \quad (2.63)$$

Миттєва кутова швидкість  $\omega$  – це векторна величина, що дорівнює першій похідній кута обертання тіла за часом:

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}, \quad (2.64)$$

або

$$\omega = |\vec{\omega}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (2.65)$$

Одиниця вимірювання кутової швидкості –  $\text{рад}/\text{с}$  або  $1/\text{с}$  (оскільки радіан не має розмірності).

За аналогією введемо поняття *середнього* та *миттєвого кутового прискорення*:

$$\langle \beta \rangle = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}. \quad (2.66)$$

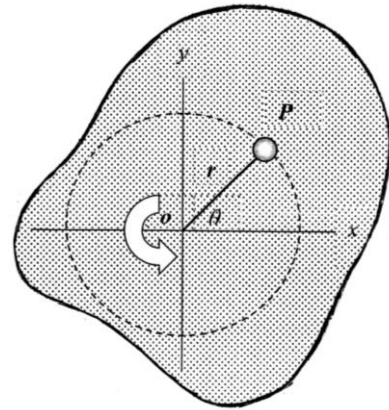
$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.67)$$

Одиниця вимірювання кутового прискорення –  $\text{рад}/\text{с}^2$  або  $1/\text{с}^2$ .

Модуль швидкості поступального руху  $v$  пов'язаний з кутовою швидкістю  $\omega$  співвідношенням:

$$v = \omega r; \quad (2.68)$$

де  $r$  – радіус обертання.



**Рис. 2.22.** Обертальний рух тіла довільної форми у площині  $xu$  навколо осі, що проходить через точку  $O$  перпендикулярно до площини:

$P$  – частинка тіла, що обертається по колу радіусом  $r$ ;  $\theta$  – кут обертання

#### 2.8.4. Динамічні характеристики обертального руху

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

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2. \quad (2.69)$$

У випадку безперервного розподілу мас ця сума зводиться до інтегралу:

$$I = \int r^2 dm. \quad (2.70)$$

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

- *суцільний циліндр або диск радіусом  $R$*

$$I = \frac{1}{2} mR^2; \quad (2.71)$$

- *тонкостінний циліндр радіусом  $R$*

$$I = mR^2; \quad (2.72)$$

- *суцільна сфера радіусом  $R$*

$$I = \frac{2}{5} mR^2; \quad (2.73)$$

- *тонкий стержень довжиною  $l$*

$$I = \frac{1}{12} ml^2; \quad (2.74)$$

- *суцільний паралелепіпед довжиною  $a$  та шириною  $b$*

$$I = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2). \quad (2.75)$$

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

Якщо необхідно визначити момент інерції тіла відносно довільної осі, використовують теорему Штейнера.

Теорема Штейнера – момент інерції тіла  $I$  відносно будь-якої осі обертання дорівнює сумі моменту його інерції  $I_c$  відносно осі, яка паралельна заданій і проходить через центр мас  $C$  тіла, та добутку маси  $m$  тіла на квадрат відстані  $d$  між осями:

$$I = I_c + md^2. \quad (2.76)$$

### Приклад

Визначити момент інерції суцільного диска масою  $m$  та радіусом  $R$ , який обертається відносно осі, що паралельна осі, яка проходить через центр мас диска та знаходиться на відстані  $R$  від цієї осі.

### Розв'язання

Використовуємо вираз (2.65):

$$I = I_c + md^2 = \frac{1}{2} mR^2 + mR^2 = \frac{3}{2} mR^2.$$

### Контрольне завдання

Визначити момент інерції суцільної сфери масою  $m$  та радіусом  $R$ , якщо вісь обертання змістили на відстань  $2R$  відносно осі, що паралельна осі, яка проходить через центр мас сфери.

*Кінетична енергія обертання* тіла, що обертається, визначається за виразом:

$$E_{об} = \frac{I\omega^2}{2}. \quad (2.77)$$



### Приклад

Двоатомна молекула кисню обертається в площині  $xy$  навколо осі  $z$ , що проходить через точку  $O$  перпендикулярно площині. Відстань між атомами дорівнює  $1,21 \cdot 10^{-10}$  м, маса атома кисню –  $2,66 \cdot 10^{-26}$  кг, кутова швидкість –  $2 \cdot 10^{12}$  1/с. Визначити момент інерції та кінетичну енергію обертання молекули кисню.

### Розв'язання

Використовуючи формулу (2.57), знаходимо момент інерції молекули кисню:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = m(d/2)^2 + m(d/2)^2 = md^2/2 = (2,66 \cdot 10^{-26} \text{ кг})(1,21 \cdot 10^{-10} \text{ м})^2 = 1,95 \cdot 10^{-46} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Кінетичну енергію обертання молекули кисню визначимо за формулою (2.65):

$$E_{об} = \frac{1}{2} (1,95 \cdot 10^{-46} \text{ кг} \cdot \text{м}^2)(2 \cdot 10^{12} \text{ 1/с})^2 = 3,9 \cdot 10^{-22} \text{ Дж}.$$

Моментом  $\vec{M}$  сили  $\vec{F}$  відносно нерухомої точки  $O$  називається векторний добуток радіуса-вектора  $\vec{r}$ , проведеного із точки  $O$  в точку прикладання сили  $\vec{F}$ , на цю силу:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}. \quad (2.78)$$

Модуль моменту сили дорівнює:

$$M = Fr \sin \alpha = Fl, \quad (2.79)$$

де  $\alpha$  – кут між  $F$  і  $r$ ;  $r \sin \alpha = l$  – плече сили.

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

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Що таке деформація?
2. Дайте визначення пружної і пластичної деформації.
3. Перелічіть відомі Вам види деформації.
4. Запишіть і сформулюйте закон Гука.
5. Розкрийте фізичний зміст модуля Юнга.
6. Що таке нормальна механічна напруга?
7. Що називають відносною деформацією?
8. Нарисуйте діаграму розтягу і вкажіть точки, що відповідають границям пружності, плинності і міцності.
9. В яких границях діаграми розтягу діє закон Гука?
10. Назвіть пружні біологічні матеріали.
11. З чого складаються кістки?

## **APPENDIX I**

### **Physical quantities**

The characteristics of processes or properties of bodies and fields that can be quantified by measurements are called physical quantities.

Each physical quantity is characterized by a numerical value and a unit of measurement. For example, the force  $F=5H$  has a numerical value (5) and a unit of measurement (H).

Units can be basic (m, s, kg, K, A) and derivatives (m/s,  $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ ,  $\cdot\text{m}^2$  and others).

### **Length, weight and time standards**

Any physical quantities can be represented by fundamental quantities, which are defined in the form of measurement results or comparisons with established standards. In 1960, the International System of Units (SI) was adopted, which contains seven basic units: meter, kilogram, second, ampere, kelvin, candela, mol. In mechanics, such fundamental quantities are length (L), time (t) and mass (M).

## **MECHANICS**

Mechanics is a branch of physics that studies the mechanical motion of material bodies and their interaction.

### **Basic definitions**

Mechanical motion - a change in the position of a body in time relative

to another body or system of bodies, which is conventionally considered immobile.

In mechanics, simplified models are used to describe real bodies, mainly a material point and an absolutely solid.

A material point is a body whose shape and dimensions can be neglected under the conditions of this problem.

An absolutely solid is a body whose deformations can be neglected under the conditions of this problem.

A frame of reference is a set of coordinate and clock systems associated with a body relative to which the motion of any material points or bodies is studied.

## **Kinematics**

### **Kinematics of a material point and translational motion of a solid**

Kinematics studies the motion of bodies without taking into account the reasons that cause this motion.

*The trajectory*  $s(t)$  is a line described by a material point during motion. Depending on the shape of the trajectory, there are rectilinear and curvilinear motion of the point.

*The path length*  $\Delta s$  is the distance traveled by a point over a period of time and measured along a trajectory.

*The displacement*  $\Delta \vec{r}$  is a vector drawn from the initial position of a moving point to its position at a given time:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_t - \vec{r}_0,$$

where  $\vec{r}_0$  is the radius vector of the moving point at the initial time, and  $\vec{r}_t$  is the radius vector of the point at this time.

The average velocity of the point  $\langle \vec{v} \rangle$  is the ratio of the movement  $\Delta \vec{r}$  to the period of time  $\Delta t$  for which it occurred:

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

The unit of measurement of speed is m/s.

The instantaneous velocity of a point is equal to the first derivative of the radius vector in time:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

As  $\Delta t$  decreases, the path length  $\Delta s$  approaches to  $|\Delta \vec{r}|$ , so the modulus of instantaneous velocity will be equal to:

$$v = |\vec{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

*Acceleration* is a vector quantity that characterizes the change in velocity of a point in numerical value and direction. During the rectilinear motion of a point along the x-axis, when its velocity increases or decreases uniformly, the average acceleration is determined by the expression:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

where  $\Delta v$  is change of speed over time  $\Delta t$ .

*Instant acceleration*  $\vec{a}$  is equal to the first derivative of the velocity  $\vec{v}$  of the point in time  $t$ , or the second derivative of the radius vector in time:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}.$$

The unit of acceleration is m/s<sup>2</sup>.

It is common to call such a collapse of solid body, for which it is straight, that there are two points of the whole body, that it's not going to be parallel to itself; before the hour of the progressive collapse, all points of the body collapse in the same way, and it is possible to replace the material point with a material point right away from each other.

### **Speed of movement of living organisms**

Movement is one of the signs of a living organism. Living organisms use a variety of ways to move on the earth's surface, in water and air through muscular activity, special devices (flagella, cilia, fins, wings, etc.). Typical values of the speed of movement of the living world are presented below.

The speed of movement of fish depends on their lifestyle. For coral fish, the ability to maneuver is important, while high speeds are not required. Such fish have a fairly flexible, adjustable tail. On the contrary, pelagic fish that move at high speed are characterized by a great variety of tail shapes and functions. They can be symmetrical (homocercal) or asymmetric (heterocercal). Among the latter, there are hypocercal (if the lower part of the tail is larger than the upper) or epicercal (in the opposite situation). Sharks and sturgeons have epicercal tails. Fish moving at high speed are characterized by large values of the ratio of the square of the height of the tail  $H^2$  to its area  $S$ , i.e.  $H^2/S$ .

The speed of movement of aquatic animals depends on the size of the body.

## DYNAMICS

### DYNAMICS OF MATERIAL POINT AND PROGRESSIVE MOVEMENT OF A SOLID

*Dynamics* is a branch of mechanics that studies the motion of bodies in relation to the causes that cause or alter that motion. Classical mechanics is based on the concepts of mass and force, as well as on the laws that relate these concepts to the kinematic quantities - displacement, velocity and acceleration.

*Force* is a physical quantity that characterizes the action of one body on another; the consequence of applying force to the body is the acquisition of acceleration or deformation of the body.

Unit of measurement of force - Newton (N):  $1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ .

*Body mass* is a physical quantity that is one of the main characteristics of matter that determines its inertial and gravitational properties.

The unit of mass is the kilogram (kg).

## DENSITY

*The density* of a substance  $\rho$  is the mass per unit volume:

$$\rho = m/V,$$

where  $m$  is body weight;  $V$  is body volume.

The unit of density is  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

The density of a spherical particle with radius  $R$  is equal to:

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

where  $D$  is particle diameter.

The density of fresh water is  $1000 \text{ kg/m}^3$ , while the density of sea water due to the high concentration of dissolved salts reaches  $1026 \text{ kg/m}^3$ . In general, the density of water depends on temperature. The density of water vapor is  $0.6 \text{ kg/m}^3$  ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Water is the only compound that expands during cooling; hence the density of ice is less than the density of water. Because of this, ice is on the surface of water bodies, which makes it possible to preserve the vital functions of aquatic organisms under cooling conditions.

Marine tissues (muscles and bones) contain proteins and inorganic substances, so their density varies between  $1060\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ . The body density of floating animals, but do not have special devices to maintain buoyancy, exceeds the density of water.

Fish live in fresh water, the density of which is  $1000 \text{ kg/m}^3$ , or in sea water, the density of which is  $1026 \text{ kg/m}^3$ . However, the muscle tissue of fish is characterized by higher values of density. To ensure the buoyancy of the animal, it is necessary to adjust its density to the values of the density of sea water. For this purpose, the animal's body contains substances with low density values: fat ( $930 \text{ kg/m}^3$ ), squalene and wax esters ( $860 \text{ kg/m}^3$ ), gases ( $\approx 0 \text{ kg/m}^3$ ).

To ensure buoyancy in sea water, the animal needs to fill 51% of body volume with fat; in fresh water, the amount of fat even exceeds the volume of the animal's body.

Therefore, aquatic animals such as *Centroscymnus* and *Cetorhinus* sharks use the hydrocarbon squalene, which occupies only 30% of the animal's body volume.

Some animals use liquids with low density values. It is known that saline solutions have different densities: sodium chloride  $1018 \text{ kg/m}^3$ ; sodium sulfate -  $1040 \text{ kg/m}^3$ ; ammonium chloride -  $1007 \text{ kg/m}^3$ . Animals (such as



the jellyfish Scyphozoa or Ctenophora) are able to regulate the density of the liquid due to heavy sulfate ions or light ammonium ions.

Another tool used by aquatic organisms to ensure buoyancy is to fill the internal organs with gases (nitrogen, oxygen or carbon dioxide), which have a low density. Such organs include the swimming bladder, which is able to expand and contract, allowing fish or mollusks to regulate body density. For example, if a fish swims at depth, its bladder contracts due to increased pressure, so the overall density of the body increases. If a fish swims close to the surface, its body density decreases. Density is used as a parameter for assessing tree vegetation and an indicator of tree growth. Density is affected by climatic conditions: in tropical areas, plant density is higher than in the north.

Density is one of the important criteria for assessing the quality of agricultural and food products: eggs, milk, ice cream, etc. Density measurement is the basis of the flotation method of product quality control: the use of several volumes with different values of liquid density (water, alcohol and salt solutions, oil) make it possible to sort potatoes, including sweet, peas, beans, grapes, cherries, blueberries. In addition, this method is used to remove apples with internal defects and citrus with frost damage. The method is characterized by a high level of sorting accuracy; Disadvantages include contamination of the solution and the need to wash products before and after sorting. The use of saline and alcohol solutions increases the cost of the measurement process and poses a certain danger to the environment.

### **Newton's laws**

Classical mechanics is based on Newton's three laws.

*Newton's first law:* any material point (body) maintains a state of rest

or uniform rectilinear motion until the action of other bodies does not force it to change this state.

The property of bodies to maintain a state of rest or uniform rectilinear motion is called inertia. Newton's first law holds only in an inertial frame of reference.

*Newton's second law:* the acceleration acquired by a material point (body), proportional to the force that causes this acceleration, coincides with it in direction, and inversely proportional to the mass of the material point (body):

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

This equation can be written as follows:

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

*Newton's third law:* any action of material points (bodies) on each other has the character of interaction; the forces with which material points (bodies) act on each other are always the same in modules, opposite in direction and act along the line connecting these points (bodies):

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12},$$

where  $\vec{F}_{21}$  is force acting on one body from another;  $\vec{F}_{12}$  is force acting on one body from another.

### **The law of conservation of momentum of a closed system**

The momentum (amount of motion)  $\vec{p}$  of a material point moving with velocity  $\vec{v}$  is the product of the mass of this point and its velocity:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Одиниця вимірювання імпульсу – кг·м/с.

Якщо матеріальна точка рухається у довільному напрямку, кількість її руху характеризується трьома компонентами:

Unit of measurement of pulse is kg·m/s.

If a material point moves in any direction, the amount of its movement is characterized by three components:

$$p_x = m v_x; p_y = m v_y; p_z = m v_z.$$

The total momentum of a closed system does not change over time (*law of conservation of momentum*).

For a closed system, this equation can be written as follows:

$$d(m\vec{v}) = d\vec{p} = \vec{F}_{\text{зовн}} dt,$$

where the value of  $\vec{F}_{\text{зовн}} dt$  is called the momentum.

From this equation it is seen that the momentum of the force is equal to the change in the amount of motion.

### **Jet motion in nature**

Reactive motion occurs due to the rejection of part of the body mass at a certain speed. According to the law of conservation of momentum, the total momentum of a closed system does not change over time.

Therefore, when separated from the body by mass  $M$  of mass  $m$  with velocity  $v$ , the body acquires velocity  $V$ , which can be calculated by the formula

$$V = -\frac{mv}{M - m}.$$

The velocity  $V$  of the body is directed opposite to the direction of motion  $v$  of the rejected body.

Consider the movement of living organisms, accompanied by a change in their mass.

The larva of the dragonfly (*Aeshna sp.*), A resident of freshwater, uses jet propulsion in case of danger. Gathering water in the hindgut, and then abruptly throwing it, the larva jumps forward due to the force of recoil.

Prominent examples of such organisms in the marine environment are jellyfish, squid, octopuses, some mollusks and more. They move due to a kind of jet propulsion, which is provided by a jet of water pushed out of special cavities of the body.

More complex systems are squid (*Latin Teuthida*), which have a muscular cape that fills with water. As a result of muscle contraction, water is pushed out through the siphon and the squid moves in the opposite direction. Moreover, it is able to regulate the direction of movement due to the rotation of the siphon. Some squid reach the deck of ships due to jet propulsion. Often squid is accompanied by the release of water with a dark ink liquid to scare away predators. The elongated and pointed body of the squid determines the high speed of its movement both in water (up to 70 km / h) and in the air (squid can jump out of the water to a height of 7 m).

Octopus vulgaris can also swim back with its tentacles, using a kind of water jet engine, collecting water into the cavity where the gills are, and

forcibly pushing it in the opposite direction, through a funnel that acts as a nozzle.

Cuttlefish (*Latin Sepiida*) also show jet propulsion. Thus, the Japanese cuttlefish (*Todarodes pacificus*) moves during migration for a distance of about 2000 km at a speed of about 2 km/h. When traveling short distances, it can reach speeds of up to 11 km / h. It is known that some species of cuttlefish can develop a speed of more than 30 km/h.

Some mollusks, such as the scallop (*Latin Pectinidae*), periodically compress their wings, so they can create jet thrust and prevent encounters with predators - starfish. At the base of the shell was found protein abductin, the elastic properties of which allow the mollusk to swim, opening and closing the sash with a frequency of 3 oscillations per second.

Among agricultural objects, jet propulsion is demonstrated by the elastic cucumber or "mad" cucumber (*Latin Ecballium elaterium*). After reaching the fruit under high pressure, the liquid contained in it is separated from the leg. The seeds are forcibly sprayed at a distance of 1-2 m from the plant through the formed hole.

## **Solid state statistics**

### **Conditions of static equilibrium**

Statics is a branch of mechanics that studies the conditions of equilibrium of bodies under the action of forces. The term equilibrium means that the body is at rest, or its center of mass is moving at a constant speed. We will consider in this section bodies that are at rest, ie in a state of static equilibrium.

Necessary conditions for static balance of the body are:

- 1) zero equality of the geometric sum of all external forces acting on the body:

$$\sum_i \vec{F}_i = 0;$$

- 2) zero equality of the geometric sum of all moments of external forces relative to this center:

$$\sum_i \vec{M}_i = 0.$$

### **Lever. Leverage equilibrium conditions**

The lever is the simplest mechanism that allows less force to balance more; is a solid body that rotates around a fixed support.

The moment of force relative to a fixed point O is the product of the radius-vector drawn from point O to the point of application of force to this force:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}.$$

The modulus of the moment of force is equal to:

$$M = Fr \sin \alpha = Fl,$$

where  $\alpha$  is the angle between F and r;  $r \sin \alpha = l$  is shoulder force.

The unit of force moment is N · m.

If the support is located between the points of application of forces, it is a lever of the first kind; if both forces are applied on one side of the support, it is a lever of the second kind.

Leverage equilibrium condition: a lever is in equilibrium if the algebraic sum of the moments of the acting forces is zero, ie the sum of the moments of the forces rotating the lever clockwise (positive) is equal to the

sum of the moments of the forces rotating the lever counterclockwise (negative).

There are four forces acting on the lever:  $F$  - the acting force;  $mg$  is the weight of the lever bar;  $Mg$  is cargo weight;  $N$  is the reaction of the support. The first three forces form the moments of forces rotating the lever relative to the fulcrum. The equilibrium condition of the lever is described by the equations of balance of forces and moments of forces:

$$N - F - mg - Mg = 0;$$

$$- mg(l/2 - x) - F(l - x) + Mgx = 0,$$

where  $l$  is the length of the bar;  $m$  - mass of the bar;  $M$  - weight of cargo;  $x$  - lever arm.

From here:

$$F = \frac{Mgx + mg(x - l/2)}{l - x}.$$

The  $Mg/F$  ratio characterizes the gain in force provided by the lever.

## GRAVITY

### The law of universal gravitation

*The law of universal gravitation* - any two material points with masses  $m_1$  and  $m_2$  are attracted in the direction of each other with a force that is directly proportional to the product of the masses and inversely proportional to the square of the distance between them:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

where  $F$  is gravity (gravitational force, gravity);  $r$  is distance between points;  $m_1$  and  $m_2$  are their masses;  $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ H}\cdot\text{M}^2/\text{K}\Gamma^2$  – gravitational constant.

Consider the forces acting on a stationary body located on the earth's surface. From the Earth there is a force of gravity  $F$ , which is determined by the law of universal gravitation:

$$F = G \frac{mM_3}{R_3^2},$$

where  $m$  is body weight;  $M_3$  is mass of the Earth;  $R_3$  is radius of the globe.

### **Gravity and living organisms**

*Gravity* is the property of bodies with mass to be attracted to each other. Unlike other external stimuli, gravity always exists and does not change in magnitude; it cannot be turned on or off.

*The Earth's gravitational field* is an important external factor for organisms that move in the aquatic environment. This ability of organisms to orient the direction of their motion relative to the gravitational field is called gravitaxis. Gravitaxis is observed in such algae as *Euglena gracilis*, *Chlamydomonas nivalis*, *Cryptomonas*, *Peridinium gatunense* and *P.faeroense*, *Amphidinium catereae*, *Prorocentrum micans*, *Dunaliella salina*. The direction of gravitational orientation of organisms depends on the species and age of the alga. Thus, *Peridinium faeroense* and the young population of *Euglena gracilis* show positive gravitaxis (movement from the water surface), while *Chlamydomonas nivalis*, *Peridinium gatunense*, *Amphidinium catereae*, *Prorocentrum micans* and older populations of



*Euglena gracilis* have negative gravitaxis (surface movement). The level of gravitational orientation of algae is determined by the age of the crop and the time of day, the presence of heavy metals in the environment, the influence of solar, in particular ultraviolet radiation. Thus, gravitaxis is an important environmental factor that allows aquatic organisms to find better living conditions.

*Gravitaxis of algae.* Vertical migration of algae is a behavioral mechanism for finding the optimal position in terms of their growth and reproduction in the aquatic environment. Photosynthetic and non-photosynthetic microorganisms use light as an external stimulus: at low light levels, they show a positive phototaxis, heading to the water surface in order to obtain sufficient solar radiation for life. But at high intensities of solar radiation, they use negative phototaxis, going into the depths in order to prevent the destructive effects of this radiation. Photo orientation has no place in the dark, but is at great depths where there is not enough light. In this case, aquatic organisms use gravity as an external factor for vertical orientation.

*Gravitropism of plants.* The growth reaction of plants, which causes the bending or curvature of a certain part of it towards an external stimulus is called tropism. If the movement is directed to the stimulus, there is a positive tropism; if in the opposite direction - negative tropism. When the external stimulus is gravitational force, the plant's reaction to it is called gravitropism. The plant, placed in a horizontal position, directs the sprout up (negative gravitropism), and the root - down (positive gravitropism).

*Engraving reception.* Unlike other external stimuli, gravity always exists and does not change in magnitude. In addition, gravity cannot be turned on or off; it is not characterized by the presence of gradients. Cells in the

upper parts of the stem or root are subject to the same gravitational force as in the lower parts. Thus, such an external stimulus as gravity can be registered only due to the movement of certain plant or cellular structures - the movement that results in the formation of asymmetry in the cell, which leads to pressure. According to modern ideas, the mechanism of perception of gravitational force is due to the deposition of amyloplasts - plastids containing starch grains (from 1 to 8) and placed in the membrane. These amyloplasts, which have a certain mass and density, move along the viscous cytoplasm; when the position of the plant changes, they move down and linger near the cell walls. Due to their accumulation, they form pressure on the plasma membrane or endoplasmic reticulum.

The movement of gravity receptors promotes the activation of certain enzymes that regulate hormone metabolism. Due to the movement of the plastids, a gradient of growth substances is formed, which ensure the growth of the sprout or root.

*Measurement of gravitropism.* Most experiments use a gravitational acceleration of 1 g or less, which is achieved by orienting the organ (coleoptile or root) in a position other than vertical. The gravitational force is proportional to the sine of the angle of inclination of the body relative to the vertical. If it is necessary to nullify the influence of the gravitational field, clinostats are used - devices that provide the rotational motion of a plant object, or conduct space experiments in which they reach a state of weightlessness.

### **Body weight**

The nature of mechanical motion depends on the frame of reference. Those systems in relation to which Newton's first law holds (ie, such

systems that are at rest or move uniformly and rectilinearly) are called inertial reference frames. Reference systems moving relative to an inertial system with acceleration are called non-inertial.

Consider a body located near the Earth. In addition to the gravitational force determined by the law of gravity and due to which the body moves with the acceleration of free fall, it is acted upon by the centrifugal force of inertia due to the diurnal rotation of the Earth  $F_{eid} = m\omega^2 r$  ( $\omega = 7,3 \cdot 10^{-5}$  rad/s is angular velocity of the Earth's diurnal rotation;  $r$  is the radius of rotation), which is directed from the axis of rotation.

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 гравітаційного тяжіння.

Проекція відцентрової сили інерції  $F_{eid}$  на напрямок дії сили тяжіння Землі дорівнює:

The geometric sum of the Earth's gravitational force and the centrifugal force of inertia is called the force of gravity. The force of attraction significantly exceeds the centrifugal force of inertia, because the value of  $\omega^2$  is very small; therefore, the force of gravity is almost indistinguishable from the force of gravitational gravity.

The projection of the centrifugal force of inertia  $F_{eid}$  from the direction of action of the Earth's gravitational force is equal to:

$$F'_{eid} = m\omega^2 r \cos \varphi,$$

where  $\varphi$  is latitude of the body.

The weight  $P$  of the body  $\square$  is the force with which the body due to gravity to the Earth acts on the support (or suspension) that keeps the body from falling freely. Body weight is detected only when the body is affected by forces other than gravity and the body moves with an acceleration other than  $g$ . Since body weight is constant and the value of  $g$  changes with latitude, body weight changes accordingly. Thus, body weight depends on latitude of body location.

## **Elastic forces**

### **Deformation of a rigid body**

*Mechanical deformation* is a change in the relative position of a set of particles of the material medium, which leads to a change in the shape and size of the body and causes the forces of interaction between the particles, ie the appearance of stresses.

Elastic are deformations that occur and disappear simultaneously with the load and are not accompanied by energy dissipation. Plastic are deformations that remain after the removal of the load and are accompanied by energy dissipation. If after removal of loading the deformation disappears incompletely, it is called elastic-plastic; if the amount of deformation clearly depends on time, but reversible, it is called viscoelastic.

Deformation causes in the deforming body the appearance of the force of elasticity is internal force, which prevents the deformation of the body.

## Hooke's law

*Hooke's law for one-sided tension (compression):* the force of elasticity  $F_{np}$  arising from the deformation of a body is proportional to the elongation of this body  $x$ :

$$\vec{F}_{np} = -k \vec{x},$$

where  $k$  is the coefficient of elasticity, which depends on the size and material of the body (during stretching or compression of the body along the axis OX Hooke's law takes the form  $F_{npX} = -k \cdot x$ ).

Hooke's law can be formulated and written as follows: *due to small deformations that are elastic, the normal stress is proportional to the relative elongation:*

$$\frac{F}{S} \sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l},$$

where  $\frac{F}{S}$  is normal mechanical stress occurring in the cross section;  $S$  is cross-sectional area of the body;  $\frac{\Delta l}{l}$  is relative elongation of the body;  $E$  is Young's modulus.

Young's modulus characterizes the elastic properties of matter during small deformations; it is determined by the stress that causes the relative elongation of the body, which is equal to one. The dependence of the mechanical stress on the relative elongation is called *the tensile diagram*. Here we can distinguish the following areas and characteristic points: point A is called the limit of proportionality; it corresponds to the maximum stress, at which Hooke's law is still fulfilled; point B is the limit of elasticity stress at which the deformation still remains elastic;  $\sigma_{un}$  - the

area of fluidity, where deformation occurs without increasing stress; point C is the yield strength; point D, which corresponds to the maximum stress max of the body before failure, is called the tensile strength; point E corresponds to the rupture of the body, which occurs at less than max stress.

### **Elastic properties of biological materials**

The study of the elastic properties of biological materials makes it possible to study the processes of functioning of the musculoskeletal system of living organisms. Consider the main biological materials, which are characterized by extraordinary elastic properties.

*Collagen* is a protein, an organic component of bone tissue that provides its elastic properties. In addition, collagen is found in the skin and tissues of blood vessels.

*Elastin* is an elastic protein found in vertebrates in the form of thin tufts in the connective tissue that is located in the walls of the arteries, especially near the heart.

*Resilin* is a protein found in insects. The elastic properties of resilin give them the opportunity to jump. For example, if a person had the opportunity to jump like a flea (Aphaniptera), he would be able to jump over a 100-story house. Thanks to resilin, the bee is able to make about 500 million wingspan during its life cycle. Artificial resilin is widely used in medicine as a substitute for elastic heart valves, blood vessel walls and intervertebral discs.

*Abductin* is a protein found in the mollusk scallop (Pecten) at the base of the shell; the comb is able to float, opening and closing the sash

with a frequency of 3 oscillations per second. In addition, abductin is found in the forewings of cicadas (*Homoptera, Cicadidae*).

Bones and muscles are the main components of the musculoskeletal system of humans and animals. The study of the elastic properties of bone tissue is expedient in terms of the tasks facing modern surgery and orthopedics related to the development and implementation of prosthetics.

In addition to providing movement, bones perform the functions of support and protection of muscle tissue, are a place of accumulation of calcium.

The shape of the bones are divided into long, short, flat and irregular. Bone mass is about 18% of total body weight. About 60% of the volume (40% by weight) of compact bone tissue is organic collagen; the rest □ inorganic material hydroxylapatite  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ . The crystals of this substance are located between the collagen fibers and are firmly attached to them. This structure of bones determines their elastic properties.

The modulus of elasticity of bone tissue occupies an intermediate value between the modulus of elasticity of its components and significantly depends on their percentage.

### **Elastic properties of plant stem**

*Bending deformation.* The plant stem is bent under the influence of external forces  $F$  (eg wind). Under the influence of this force, certain layers are stretched, while others are compressed.

In the stem there are elastic forces that form a torque that counteracts the moment of force  $F$ . It is seen that the main part in the formation of the counteracting moment are the outer layers of the stem, while the middle layers play no role. Therefore, if you remove the central part of the stem, its resistance to bending will not change. Mathematical calculations show that

the greatest bending resistance is found in tubes in which the ratio of the inner diameter to the outer is 8:11. This is the ratio of the stems of most plants. Bamboo is a bright representative of plants that are deprived of the central part of the stem. This plant is effectively used to produce raw materials, food and building materials 2.2 billion people worldwide; some species of bamboo grow at a rate of about one meter per day. The Young's modulus of bamboo fabric is  $2 \cdot 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>, ie bamboo is more elastic than a steel rod with a Young's modulus of  $2.1 \cdot 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>. At the same time, the ratio of bamboo mass to its volume is 600 kg/m<sup>3</sup>, while for steel this ratio is 7800 kg/m<sup>3</sup>.

### **Potential energy of an elastically deformed body**

The potential energy of an elastic-deformed body is equal to the maximum work performed by elastic forces that restore the original size and shape of the body. The potential energy of an elastically deformed body is determined as follows:

$$W_{np} = \frac{k \cdot x^2}{2} = \frac{E \cdot S \cdot (\Delta l)^2}{2 \cdot l} = \frac{\sigma^2 \cdot V}{2 \cdot E},$$

where  $k$  is coefficient of elasticity;  $x$  is the elongation of this body;  $E$  is Young's modulus;  $S$  is cross-sectional area of the body;  $\Delta l$  is elongation;  $l$  - body length;  $\sigma$  is normal mechanical stress (N/m<sup>2</sup>);  $V$  is body volume.

### **Work, power and energy**

The work of force is a measure of the action of force, which depends on the numerical magnitude and direction of the force and on the displacement of the point of its application.



### Work of constant force

If a body moves in a straight line and a constant force acts on it, which forms an angle with the direction of movement, then the work of this force is defined as the scalar product of the force vector on the displacement vector:

$$A = \vec{F} \cdot \vec{r},$$

or

$$A = |\vec{F}| \cos \alpha \cdot |\vec{r}|.$$

### Work of variable force

In the general case, when the force can vary both modulo and direction, it is advisable to introduce the concept of elementary work  $dA$ :

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F \cos \alpha \cdot ds,$$

where  $ds = |d\vec{r}|$  is elementary way.

Work  $A$ , which is performed by force on the section of the trajectory from point 1 to point 2, is equal to the sum of elementary works of force on all infinitesimal sections of the trajectory; this sum is reduced to the integral:

$$A \cong \int_1^2 \vec{F} d\vec{r} = \int_{s_1}^{s_2} F \cos \alpha \cdot ds.$$

Unit of work is joule (J):  $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

## Power

If an external force is applied to the object and the work  $\Delta A$  is performed for the time period  $\Delta t$ , then the average power is defined as the ratio of the work to the time period:

$$\langle N \rangle = \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

Instantaneous power is the ratio of the elementary work  $dA$ , carried out by this force  $\vec{F}$  for a short period of time, to its duration  $dt$ :

$$N = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{dA}{dt}.$$

Using this expression, we obtain:

$$N = \frac{\vec{F} \cdot d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

Unit of measurement of power - watts (W):  $1 \text{ W} = 1 \text{ J} / \text{s} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$ .

Out-of-system unit of power is horsepower (hp):  $1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$ .

## Energy

Energy is a physical quantity that is a general measure of the motion and interaction of all kinds of matter.

The *kinetic energy* of a mechanical system is the energy of the mechanical motion of this system. The kinetic energy of the body  $E_k$  depends on the mass of the body  $m$  and the speed of its translational motion  $v$ :

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2.$$

Consider a material point that moves under the influence of a constant force in the direction of this force. The work of force during the movement of a material point is equal to the change in the kinetic energy of this point:

$$A = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2,$$

where  $v_1$  and  $v_2$  is initial and final velocities of a material point.

*Potential energy* is the mechanical energy of a system of bodies, which is determined by their mutual location and the nature of the forces of interaction between them.

The work performed by conservative force  $\vec{F}$  to move the particle along the x-axis is equal to:

$$A_k = \int_{x_n}^{x_k} F_x dx = -\Delta E_n = E_{n_1} - E_{n_2},$$

where  $E_{n_1}$  and  $E_{n_2}$  the potential energy of the particle in the initial and final positions, respectively.

Thus, the work done by conservative forces is equal to the negative change in potential energy.

The energy of mechanical motion and interaction is called total mechanical energy.

*The law of conservation of energy in mechanics* - the total mechanical energy of a closed system of bodies, between which only conservative forces act, remains constant:

$$E_k + E_n = \text{const},$$

where  $E_k$ ,  $E_n$  is kinetic and potential energy of the system, respectively.

This law is equivalent to the statement that if the kinetic energy of a conservative system increases (or decreases) by a certain amount, the potential energy will decrease (or increase) by the same amount.

### **Energy and metabolism**

Metabolism (metabolism) is a set of processes of transformation of substances and energy in living organisms, which form the basis of their life. Metabolism involves the destruction of complex organic substances, which is accompanied by the release of energy needed for other processes, and the formation of complex substances that form the substance for tissues and organs. A living organism receives energy from food; this energy is spent on heating and work. The typical value of metabolism as the rate of conversion of chemical energy into thermal and mechanical for a person weighing 70 kg at rest is 120 watts. A person needs to receive daily through nutrition about 2500 kcal in order to maintain their weight. A change in body weight per 1 kg is equivalent to an energy of about 7700 kcal.

### **Rotational motion**

#### **Kinematics of the motion of a material point in a circle**

Consider the motion of a material point moving along a circular trajectory of radius  $r$  with velocity  $\vec{v}$ . The acceleration projections on the tangent and principal normal to the trajectory are called tangential  $\vec{a}_\tau$  and normal  $\vec{a}_n$  accelerations, respectively.

The tangential component of acceleration arises due to the change in the velocity of the material point modulo; it is directed tangent to the trajectory at this point:

$$a_{\tau} = \frac{dv}{dt}.$$

The normal component of acceleration characterizes the change in time of the direction of the velocity vector; it is directed along the radius of curvature  $r$  to the center of curvature (which is why it is called centripetal acceleration), and the absolute value is determined by the expression:

$$a_n = \frac{v^2}{r}.$$

The modulus of total acceleration of a material point during curvilinear motion is defined as follows:

$$a = |\vec{a}| = \sqrt{\left[\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{r}\right)^2\right]}$$

### **Forces arising during curvilinear motion**

The material point involved in rotational motion acquires normal acceleration  $a_n = \frac{v^2}{r}$ . It is directed to the center of the circle and is called centripetal. Accordingly, the force acting on a material point and directed along the main norm to its trajectory toward the center of the circle is called centripetal:

$$F_{\partial} = ma_n = m \frac{v^2}{r}.$$

The force with which a material point moving along a curvilinear trajectory (in a circle) acts on a connection that restricts the freedom of motion of a point and forces it to move curvilinearly is called centrifugal. Centrifugal and centripetal forces are equal to each other, have opposite directions, because they are applied to different bodies.

## Kinematic characteristics of rotational motion

The rotational motion of a rigid body is called its motion, in which all the points that make up the body describe circles, the centers of which lie on a line called the axis of rotation.

Consider the rotational motion of a body of arbitrary shape in the x-plane around the axis passing through the point o perpendicular to the plane. For simplicity, consider the axis of rotation fixed. If the particle P of a body rotating in a circle of radius r moves from point 1 to point 2, the radius vector is shifted by an angle  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ , which represents the angular displacement. Then the *average angular velocity*  $\langle\omega\rangle$  is determined as follows:

$$\langle\omega\rangle = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}.$$

The instantaneous angular velocity  $\omega$  is a vector quantity equal to the first derivative of the angle of rotation of the body in time:

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt},$$

or

$$\omega = |\vec{\omega}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Unit of angular velocity is rad/s or 1/s (because radians have no dimension).

By analogy, we introduce the concept of *average and instantaneous angular acceleration*:

$$\langle\beta\rangle = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}.$$

$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}.$$

Unit of angular acceleration is  $\text{rad/s}^2$  or  $1/\text{s}^2$ .

The modulus of the speed of translational motion  $v$  is related to the angular velocity  $\omega$  the ratio:

$$v = \omega r,$$

where  $r$  is the radius of rotation.

### Dynamic characteristics of rotational motion

The dynamic characteristic of a rotating solid is the moment of inertia is the sum of the products of the masses  $m_i$  of the material points that make up the body, squared by their distance from the axis of rotation:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$$

In the case of continuous mass distribution, this sum is reduced to the integral:

$$I = \int r^2 dm.$$

Here are the formulas for the moments of inertia of some homogeneous bodies of mass  $m$  with respect to the axes of symmetry passing through the center of mass:

- *a solid cylinder or disk with radius  $R$*

$$I = \frac{1}{2} mR^2;$$

- *thin-walled cylinder with radius  $R$*

$$I = mR^2;$$

- *a solid sphere of radius  $R$*

$$I = \frac{2}{5} mR^2;$$

- *a thin rod of length  $l$*

$$I = \frac{1}{12} ml^2;$$

- • a continuous parallelepiped of length  $a$  and width  $b$

$$I = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2).$$

Unit of moment of inertia is  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

If it is necessary to determine the moment of inertia of a body about an arbitrary axis, use Steiner's theorem.

*Steiner's theorem* - the moment of inertia of a body  $I$  with respect to any axis of rotation is equal to the sum of the moment of its inertia  $I_s$  with respect to the axis parallel to the given one and passing through the center of mass  $C$  of the body:

$$I = I_c + md^2.$$

*The kinetic energy of rotation* of a rotating body is determined by the expression:

$$E_{o\delta} = \frac{I\omega^2}{2}.$$



### 3. БІОМЕХАНІКА

*Біомеханіка* – розділ біофізики, який 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 біологічних об'єктів

Всі біологічні об'єкти характеризуються геометричними розмірами  $L$ , площею поверхні  $S$  та об'ємом  $V$ . Якщо перехід невеликих живих організмів до великих супроводжується пропорційною зміною параметрів  $L$ ,  $S$  та  $V$ , то можна стверджувати про *ізометрію* цих організмів [Шмидт-Ниельсен, 1987]. У цьому разі відбувається лінійна залежність фізіологічних параметрів  $y$  від механічних  $x$ , а саме  $y = kx$  (де  $k$  – константа). У реальній ситуації організми не ізометричні, а алометричні (від грецьк. *alloios* – різний). Кореляція різних фізіологічних параметрів організму із степеневою функцією його механічних характеристик одержала назву *алометрії*.

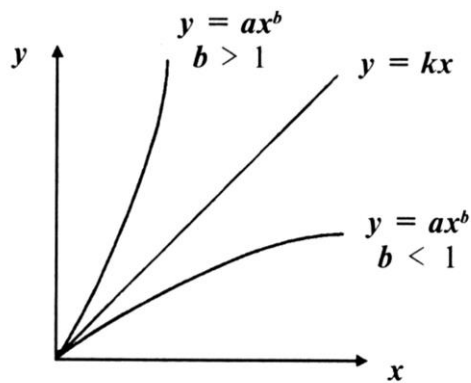


Рис. 3.1. Алометричні співвідношення між фізіологічними  $y$  і механічними  $x$  параметрами для двох значень коефіцієнта  $b$  ( $b > 1$  і  $b < 1$ )

Цю кореляційну залежність можна описати алометричним рівнянням типу  $y = ax^b$ , де  $y$  – фізіологічний параметр;  $x$  – механічна характеристика;  $a$  та  $b$  – константи. Приклади алометричних співвідношень наведено на рис. 3.1

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

Розглянемо приклади використання алометричних рівнянь з точки зору аналізу взаємозв'язку різних механічних характеристик біологічних об'єктів.

Одним із таких об'єктів є яйце птиці. Механічні властивості яйця визначаються потребою в забезпеченні достатньої міцності шкаралупи (для забезпечення захисту та безпеки ембріона) і в той же час крихкості (щоб пташеня могло вийти із шкаралупи). Крім того, шкаралупа яйця повинна забезпечувати необхідний газовий обмін (пропускати кисень всередину, а двоокис вуглецю – назовні) і запобігати висиханню вмісту.

Маса яєць різної птиці варіює у широких межах – від 0,3 г у колібрі до 100 г у страуса. Типові показники маси курячого яйця становлять близько 60 г у момент знесення та близько 50 г при вилуплюванні курчати. За даними Шмідт-Ніельсона (1987), за цей період яйце поглинає 6 л кисню, виділяє 4,5 л двоокису вуглецю, втрачає близько 9 г води. Такий газовий режим забезпечують 10 тис. пор у шкаралупі, діаметр кожної з яких становить близько 17 мкм.

Загальна площа пор у шкаралупі яйця становить 2,3 мм<sup>2</sup> при загальній площі поверхні курячого яйця 70 см<sup>2</sup>.

Алометричні співвідношення дають можливість встановити зв'язок між масою яйця  $M_{я}$  і масою тіла птиці  $M_T$  [Rahn et al., 1975]:

$$M_{я} = 0,277M_T^{0,770}. \quad (3.1)$$

Довжина  $L_n$  та площа  $S_n$  пор пов'язані з масою яйця  $M_{я}$  співвідношеннями (Ar et al., 1979):

$$L_n = 5,126 \cdot 10^{-2} M_{я}^{0,456}; \quad (3.2)$$

$$S_n = 9,2 \cdot 10^{-3} M_{я}^{0,236}. \quad (3.3)$$

Зміст зазначених співвідношень визначається практичними потребами: незважаючи на 30-тисячну різницю у розмірах яєць, довжина та площа пор так відносяться одна до одної, що забезпечують нормальне функціонування яйця. Із збільшенням його розмірів прискорюється проходження газів. За даними К. Шмідт-Ніельсона (1987), збільшення маси яйця у 10 разів зумовлює відповідне збільшення довжини пор (згідно з рівнянням 2) у  $10^{0,456} = 2,86$  раза та площі пор (відповідно до рівняння 3) у  $10^{1,236} = 17,2$  рази. Згідно з цим обмін газів у яйці більшого розміру збільшується пропорційно потребам зародка, який розвивається.

Можна навести також алометричні співвідношення, що зв'язують масу шкаралупи  $M_{ш}$  із масою яйця  $M_{я}$  (Paganelli et al., 1974):

$$M_{ш} = 0,0482M_{я}^{1,132}. \quad (3.4)$$

За аналізом цього виразу, у найменшого яйця (колібрі) шкаралупа повинна становити близько 4 % маси яйця, а у найбільшого (страуса) – 12 % від маси яйця. Таке трикратне збільшення маси шкаралупи пов'язане з її потовщенням.

Сила  $F$ , що руйнує яйце, пов'язана з масою яйця  $M_y$  виразом [Ar et al., 1979]:

$$F = 50,86M_y^{0,916}. \quad (3.5)$$

Отже, міцність яйця підвищується із збільшенням його розмірів. Дійсно, площа поперечного перерізу шкаралупи  $S_{in}$  пропорціональна квадратові товщини шкаралупи.

Аналогічні відношення спостерігаються між енергетичним обміном і зменшенням розмірів тіла тварин, висотою, діаметром і фітомасою у рослин тощо.

### **Приклад**

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

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

Визначити масу мозку тварини з масою тіла 2 кг.

### **Розв'язання**

Підставляємо числові дані у останнє рівняння:

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

Логарифмуємо останній вираз:

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

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

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

### **Контрольне завдання**

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 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'язання**

Прологарифмуємо алометричні рівняння :

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

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

Підставляємо числові значення для курячого яйця:

$$\begin{aligned} \lg L_{nop} &= \lg(5,126 \cdot 10^{-2}) + 0,456 \cdot \lg 60 = \lg 5,126 - 2 \cdot \lg 10 + 0,456 \cdot \lg 60 = L_{nop} = 0,3316 \text{ мм.} \\ &= 0,7098 - 2 + 0,456 \cdot 1,7781 = 0,7098 - 2 + 0,8108 = -0,4794; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lg S_{nop} &= \lg(9,2 \cdot 10^{-3}) + 1,236 \cdot \lg 60 = \lg 9,2 - 3 \cdot \lg 10 + 1,236 \cdot \lg 60 = S_{nop} = 1,4504 \text{ мм}^2. \\ &= 0,9638 - 3 + 1,236 \cdot 1,7781 = 0,9638 - 3 + 2,1977 = 0,1615; \end{aligned}$$

Для яйця нанду:

$$\begin{aligned} \lg L_{nop} &= \lg(5,126 \cdot 10^{-2}) + 0,456 \cdot \lg 600 = \lg 5,126 - 2 \cdot \lg 10 + 0,456 \cdot \lg 600 = L_{nop} = 0,9475 \text{ мм}; \\ &= 0,7098 - 2 + 0,456 \cdot 2,7781 = 0,7098 - 2 + 1,2668 = -0,0234; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{nop} &= \lg(9,2 \cdot 10^{-3}) + 1,236 \cdot \lg 600 = \lg 9,2 - 3 \cdot \lg 10 + 1,236 \cdot \lg 600 = S_{nop} = 24,9557 \text{ мм}^2. \\ &= 0,9638 - 3 + 1,236 \cdot 2,7781 = 0,9638 - 3 + 3,4337 = 1,3972; \end{aligned}$$

Визначаємо відношення  $(L_{nop})_{н}/(L_{nop})_{к}$  і  $(S_{nop})_{н}/(S_{nop})_{к}$ :

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

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

### Контрольне завдання

Рівняння проникненості для водяної пари крізь шкаралупу має такий вигляд:

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

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

*Відповідь:*  $\sim 6$ .

Аллометричні співвідношення справедливі також і для рослинних організмів. Фізіологічними параметрами можуть бути

обрані фітомаса стовбура дерева, фітомаса кори, фітомаса коренів; механічними - середня висота дерева, середній діаметр дерева, середнє значення деревостану.

На основі нормативно-довідкових даних було вивчено аллометричні співвідношення між фітомасою хвої  $M_{xв}$  і діаметрами дерев  $D$  в соснових деревостанах різної повноти [Вайс, 2015а,б]:

$$M_{xв} = aD^b; \quad (3.6)$$

$$M_{xв} = 0,041D^{1,738}. \quad (3.7)$$

### 3.2. Опорно-руховий апарат тварин

Основне призначення опорно-рухового апарата сільськогосподарських тварин – забезпечення динамічних переміщень тіла або окремих його частин у просторі та зберігання під час спокійного стояння статичної рівноваги. Основними елементами опорно-рухового апарата 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, які утворюють важіль, забезпечується м'язами. Скорочуючись, вони змінюють положення кісток, до яких вони прикріплені. Основою опорно-рухового апарату тварин та його несучою конструкцією є скелет. Таким чином, опорно-руховий апарат тварин складається з кісток – міцних матеріалів, виконуючих пасивні функції у процесі руху тіла, та м'язів, які є активним елементом опорно-рухового апарату.

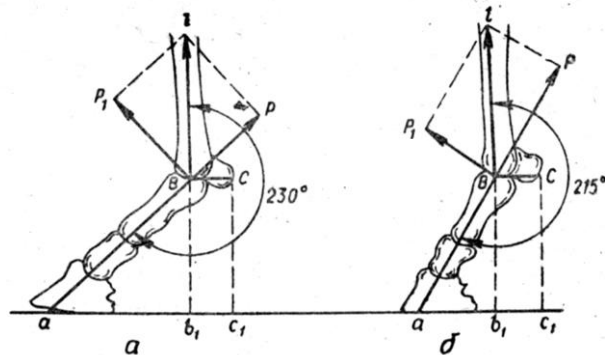
Тварина бере участь у різноманітних типах рухів – поступальному (рух тіла в цілому), обертальному ( рух зчленувань), коливальному (рух окремих частин тіла і внутрішніх органів), хвилеподібному (рух хребта).

Основними елементами рухового апарата 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, які утворюють важіль, забезпечується м'язами. Скорочуючись, м'язи змінюють положення кісток, до яких вони прикріплені.

У процесі руху тварини виникає необхідність пом'якшувати поштовхи; роль амортизатора при цьому відіграє сухожильно-м'язовий апарат. Розглянемо як приклад амортизуючі властивості путового суглоба коня [Гиммельрейх, 1979]. Силу навантаження на кінцівку, що йде вздовж п'ясної кістки у путовому суглобі, можна розкласти на силу  $P$ , яка сприймається кістками пальця, та силу  $P_1$ , що перерозгинає путовий суглоб та поглинається розтягненням сухожильно-м'язового апарата (рис.3.2). Збільшення довжини пальця підсилює навантаження на сухожильно-м'язовий апарат.





**Рис.3.2.. Розподіл сили поштовху в путовому суглобі при наступанні кінцівки на ґрунт: а – при куті  $230^{\circ}$ ; в – при куті  $215^{\circ}$  [Гиммельрейх, 1979].**

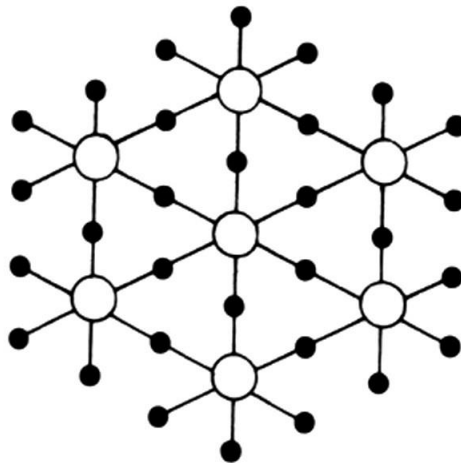
У коней з довгим пальцем хода м'якша, поштовхи відчуються вершником менше, проте кінь швидше стомлюється; у коня з коротким пальцем поштовхи відчуються сильніше, але такий кінь витриваліший.

### 3.3. М'язи хребетних тварин

М'язи, маса яких становить від 40 до 50% загальної маси тіла тварини, являють собою тканини, які 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 пов'язані з роботою серця; гладенькі м'язи утворюють стінки внутрішніх органів (кишок, кровоносних судин, стравоходу). Скелетний м'яз складається з центральної тканини, яка спроможна скорочуватися, та двох сухожиль. Одне з них прикріплено до кістки, яка рухається, а друге –

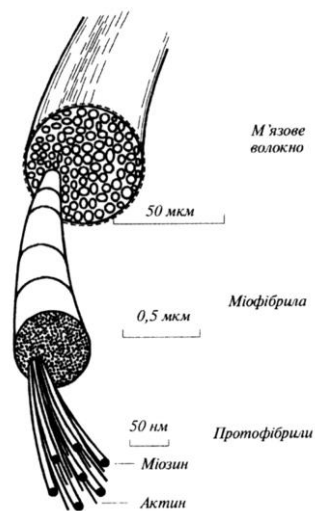
до опорної кістки. Тканина скелетного м'яза утворюється з *м'язових волокон* – багатоядерних клітин циліндричної форми діаметром 20-80 мкм і завдовжки від декількох міліметрів до десятків сантиметрів, оточених оболонкою – *сарколемою*. Кожне м'язове волокно містить від кількох сот до кількох тисяч *міофібрил* діаметром 1–2 мкм, які складаються з *протофібрил* – товстих (білок *міозин*) і тонких (білок *актин*) ниток які утворюють гекагональну структуру в перерізі (рис.3.3).



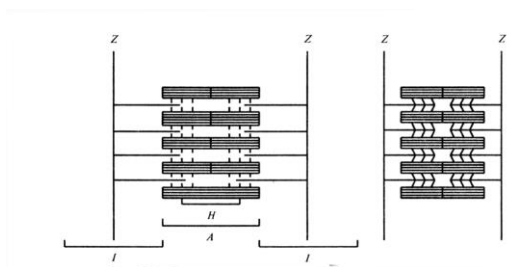
**Рис. 3.3. Впорядкована структура товстих (світлі кола) і тонких (зачернені кола) ниток в поперечному перерізі саркомера**

Довжина міозинових ниток – 1,6 мкм, актинових – 1 мкм; діаметр міозинових ниток – 16 нм, актинових – 8 нм. Товсті міозинові нитки обладнані *поперечними містками*. Будова скелетного м'яза наведена на рис.3.4.

Результати електронної мікроскопії свідчать про те, що міофібрили складаються з основних одиниць, які повторюються, – *саркомерів*. Довжина саркомера – 2-3 мкм; всі саркомери розділені *Z-дисками* (рис.3.5).



**Рис. 3.4. Будова скелетного м'яза**



**Рис.3.5. Структура саркомера. Ділянки, що займають: *H* – товсті нитки; *I* – тонкі нитки; *A* – товсті та тонкі нитки разом**

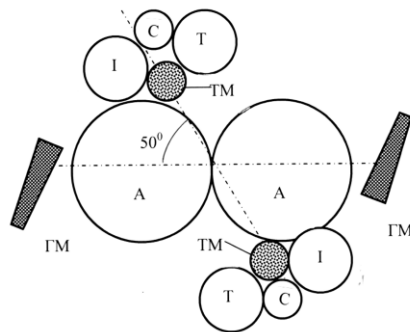
### 3.4. Основи фізики м'язового скорочення

У процесі м'язового скорочення великі клітини сірої речовини спинного мозку (або відповідного стовбура головного мозку) посилають нервові імпульси (потенціали дії). Ці клітини називаються *мотонейронами*. Вони складаються з тіла клітки (*соми*) і спеціальних відростків (*аксона і дендритів*). Ділянка контактування аксона з м'язовим волокном називається *синапсом*. Крім передачі збудження у вигляді нервового імпульсу через синапс від аксона мотонейрона м'язовому волокну має місце додаткове збудження хімічної природи у формі ацетилхоліну (ACh), що виділяється закінченням аксона. Імпульс досягає закінчення рухового нерва, дозволяючи іонам  $\text{Ca}^{2+}$  проникнути в синапс і виділити ацетилхолін, який дифундує через синаптичну щілину, викликаючи зміну проникності мембрани м'язового волокна. Ацетилхолін підсилює невеликий імпульс у закінченні рухового нерва до рівня, необхідного для включенні імпульсу в м'язовому волокні. Коли імпульс досягає закінчення аксона, відбувається деполяризація мембрани, що супроводжується відмиканням каналів  $\text{Na}^+$  і активацією каналів  $\text{Ca}^{2+}$ . Швидке збільшення концентрації іонів  $\text{Ca}^{2+}$  поблизу філаментів актину і міозину є сигналом для початку м'язового скорочення. Іони  $\text{Ca}^{2+}$  виділяються з саркоплазматичного ретикулума, який являє собою єдину тривимірну мембранну структуру, що оточує кожний саркомер від одного Z-диска до другого.

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

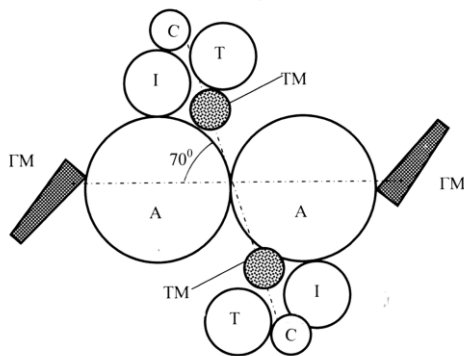
Відносна кількість міозину становить 50–55%, а актину – 20–25% від загальної кількості білків. Крім того, у процесі скорочення беруть участь такі білки як *тропоміозин* (7%) і *тропонин* (2%). Тропонин містить три субодиниці: найбільшу субодиницю *TnT*, яка зв'язана з молекулою тропоміозина; середню субодиницю *TnI*, яка зв'язується з молекулою актина і може інгібувати актин-міозинову взаємодію; найменшу субодиницю *TnC*, яка зв'язується з кальцієм. Зв'язувальні властивості субодиниць тропонина залежать від концентрації іонів кальцію в оточуючому просторі.

В стані розслаблення м'яза (при концентрації іонів кальцію  $< 10^{-8}$  М) тропоміозин орієнтується під кутом  $50^{\circ}$  відносно центру актинової нитки, внаслідок чого *TnI* сильно зв'язується з актином, що призводить до такої орієнтації тропоміозина, яка припиняє взаємодію поперечних містків з актиновою ниткою, оскільки містки розімкнуті (Рис. 3.6).



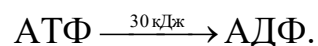
**Рис. 3.6.** Схема взаємодії міозинових містків, актину, тропонину та тропоміозину у відсутності іонів кальцію. Тут: ГМ – головки міозину; А – актин; ТМ – тропоміозин; Т – субодиниця *TnT*; І – субодиниця *TnI*; С – субодиниця *TnC*.

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 тропоміозина під кутом  $70^\circ$  і укладанням його в борозну актинової спіралі, що ініціює взаємодію поперечних містків з актиною (Рис.3.7).



**Рис. 3.7. Схема взаємодії міозинових містків, актину, тропонину та тропоміозину в присутності іонів кальцію. Тут: ГМ – головки міозину; А – актин; ТМ – тропоміозин; Т – субодиниця  $TnT$ ; І – субодиниця  $TnI$ ; С – субодиниця  $TnC$ .**

Джерелом енергії для скорочення м'язових волокон служить АТФ, який розташований на головках міозину. Звільнення енергії відбувається при ферментативному гідролізі молекули АТФ:



### 3.5. М'язи птахів

У мускулатурі птахів можна виділити два типи м'язових волокон. Червоний колір “повільних” волокон обумовлений наявністю в них великої кількості міоглобіну. Ці м'язові волокна обплетені густою мережею капілярів і містять велику кількість мітохондрій. Такі волокна скорочуються відносно повільно і добре переносять тривалі навантаження; їх метаболізм заснований на окисненні вуглеводів і жирів до води і двоокису вуглецю. Птахи з червоною літальною мускулатурою, навпаки, здатні переносити досить тривалі навантаження далекого польоту. Наприклад, качки під час міграцій можуть летіти весь день зі швидкістю 80 км/год.

Білі – “швидкі” волокна більші за розміром, містять менше міоглобіну і мітохондрій; число капілярів в білих м'язах теж нижче. Енергетика білих м'язів заснована на окисненні вуглеводів, а не жирів. Такі волокна пристосовані до швидких скорочень протягом короткого часу. Птахи, в літальній мускулатурі яких переважають білі волокна (як, наприклад, у фазанів), злітають, будучи сполохані, але скоро втомлюються і не можуть літати на великі відстані.

### 3.6. М'язи риб

Оскільки риба мешкає у воді і м'язам не потрібно підтримувати вагу тіла риби, м'язи риби мають свої особливості. М'язові волокна у риби згруповані у блоки – так звані *міотомми*, які відмежовуються один від одного шарами колагену, що називаються *міосептами*. Вцілому, здатність риби плавати забезпечується латеральною (розташованою вбік від серединної площини) мускулатурою, яка становить 40% від загальної ваги у карася *Carassius auratus*, близько 60% у лососевих та 70% у скумбрієвих.

Склад м'язів риби визначається її способом життя, а саме участю у процесі повільного плавання та несподіваних ривках. Кожний міотом складається з відносно невеликої кількості волокон, що формують так звані *червоні м'язи*, які призначені для повільного плавання, та значно більшої (близько 90%) кількості волокон, що утворюють *білі м'язи*, які забезпечують швидкий рух або ривки риби.

Червоні м'язи характеризуються високими значеннями вмісту міоглобіну, розгалуженою системою капілярів, великою кількістю мітохондрій (органодів клітин, що забезпечують вироблення, нагромадження і розподіл енергії в клітинах) та окислювальних ферментів. Вони демонструють аеробне функціонування, повільно втомлюються та мають невелику внутрішню швидкість скорочення. Діаметр волокон червоних м'язів становить 100-200 мкм. Всі ці властивості надають можливість рибі реалізувати повільні періодичні рухи.

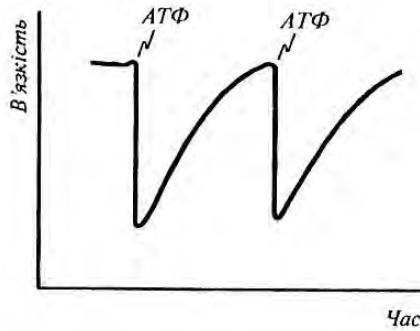
Білі м'язи спроможні забезпечити максимальну потужність рибі. Вони характеризуються високою густиною міофібрил, невеликою кількістю мітохондрій та обмеженим кровопостачанням. Білі м'язи функціонують анаеробно; вони швидко втомлюються та мають високу внутрішню швидкість скорочення. Діаметр волокон білих м'язів знаходиться в межах 300-400 мкм.

У більшості риб червоні м'язи розташовані у вигляді вузької смужки вздовж бокової поверхні. Наприклад, щука *Esox lucius* –хижак, що чекає свою жертву у засідці, майже позбавлена червоних м'язів, хоча у деяких видів риб(наприклад, таких хижаків-бурлак як скумбрії *Scomber* або тунця *Katsuwonus pelamis*) червоний м'яз простягається аж до хребетного стовпа.



### 3.7. Експериментальні дослідження м'язового скорочення

Розглянемо експериментальну техніку дослідження м'язового скорочення [Sybesma, 1989; Mc-Comas A.J. 1996; *Біофізика*, 2001; Посудін, 2003].



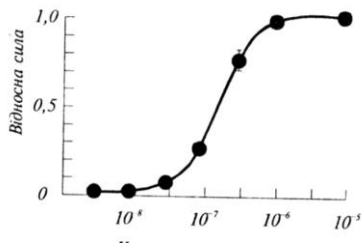
**Рис.3.8. Залежність в'язкості суспензії актоміозину від ступеня його зв'язування з АТФ**

На користь теорії сковзання протофібрил свідчать результати дослідження залежності в'язкості суспензії актоміозина (суміш білків актина і міозина) від ступеня його зв'язування з АТФ. Додавання АТФ до суспензії призводить до різкого зменшення в'язкості (рис.3.8), що можна пояснити дисоціацією актоміозина на актин і міозин-АТФ комплекс.

Під час гідролізу АТФ (у присутності іонів  $Mg^{2+}$ ) відбувається відновлення первинної величини в'язкості суспензії.

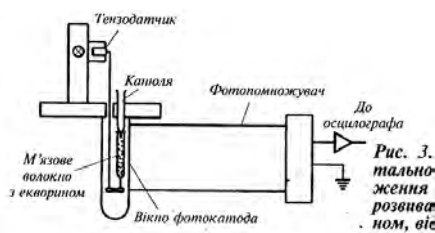
Встановлено залежність відновлення первинної величини в'язкості суспензії від концентрації вільного  $Ca^{2+}$ .

Експериментально встановлена залежність між концентрацією вільного  $Ca^{2+}$  в саркоплазмі і силою м'язового скорочення (рис.3.9): сила зростає від 0 ( $C=10^{-8}M$ ) до максимуму ( $C=5 \cdot 10^{-6}M$ ).



**Рис.3.9. Залежність сили м'язового скорочення від концентрації вільного кальцію в саркоплазмі**

Ще один експеримент передбачає використання чутливого до  $Ca^{2+}$  білка екворина (рис.3.10). Коли молекула цього білка приєднує три іони кальцію, вона випромінює квант світла.



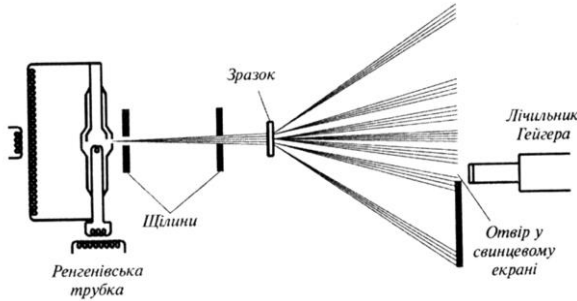
**Рис. 3. тально жєння розвива ном, віє**

**Рис.3.10. Схема експериментального приладу для дослідження сили, що розвивається м'язовим волокном, від концентрації вільного кальцію (пояснення в тексті)**

Екворин вводили в незбуджений м'яз і за допомогою фотоелектронного помножувача спостерігали залежність випромінювання світла від концентрації кальцію в процесі його звільнення з саркоплазматичного ретикулула. Сила, що розвивається м'язовим волокном, залежить лінійно від концентрації вільного  $Ca^{2+}$ .

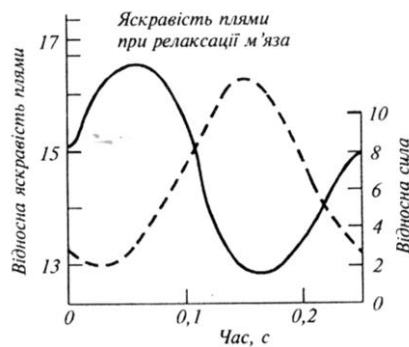
Залежність сили скорочення від положення поперечних містків у живому м'язі досліджували за допомогою рентгеноструктурного

аналізу (рис.3.11), в основі якого лежить дифракція рентгенівського випромінювання на квазікристалевій структурі м'язових ниток.



**Рис. 3.11. Рентгеноструктурний аналіз залежності сили скорочення від положення містків у живому м'язі (пояснення в тексті)**

Коли поперечні містки виступають із міозинової нитки і приєднуються до актинової нитки, інтенсивність рентгенівського випромінювання зменшується за рахунок його дифракції на періодичній структурі, яка утворюється поперечними містками. Коливання інтенсивності випромінювання корелюють з коливаннями напруги м'яза (рис.3.12).



**Рис. 3.12. Кореляція коливань інтенсивності рентгенівського випромінювання зі зміною напруження м'яза**

### 3.8. Гіпокінезія та гіподинамія

*Гіпокінезія* (від грец. ὑπό – знизу, під; κίνησις – рух) – стан недостатньої рухової активності організму з обмеженням темпу і обсягу рухів.

Сучасна людина приречена до гіпокінезії внаслідок таких причин як обмеження обсягу рухів, малорухливий спосіб життя, нехтування фізичною культурою, неправильна організація навчального процесу та перевантаження навчальними заняттями, поширення громадського та особистого транспорту, зменшення робіт, що вимагають фізичних зусиль і м'язових напруг

У сільському господарстві умови стійлового утримання тварин у промислових комплексах спричинюють порушення обміну речовин, дегенеративних змін у кістковій тканині, погіршення відтворної функції та скорочення періоду господарської діяльності. У корів, яких утримують у закритих приміщеннях, зменшується кількість телят, що народжуються живими, порівняно з тими, які знаходяться на вільному випасанні. Гіпокінезія викликає мінеральну недостатність, що призводить до зниження міцності кісток, нерівномірності та диспропорції збільшення маси та розвитку кісток [Костюк В.В., 1982].

Слід відмітити, що як захід профілактики по подоланню гіпокінезії пропонується активний моціон та введення у раціони тварин та птиці підвищеної кількості легкозасвоюваних вуглеводів і жирів. Гіпокінезія як особливий стан організму, обумовлений недостатністю рухової активності, призводить в ряді випадків до гіподинамії.

*Гіподинамія* (від грец. ὑπό – під та δύναμις – сила) – порушення функцій організму (опорно-рухового апарату, кровообігу, дихання, травлення), яке сталося через обмеження рухової активності,

зниження сили скорочення м'язів. Гіподинамія є наслідком звільнення людини від фізичної праці.

### 3.9. Нем'язові форми рухливості

#### 3.9.1. Амебоїдний рух

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



**Рис.3.13.**  
Зображення амеби  
*Chaos carolinensis*

Амебоїдний рух супроводжується зміною форми клітини за рахунок спрямовування уперед вакуолізованої серцевини цитоплазми ( *ендоплазми* ) в одну або декілько *псевдоподій* - паростків, які витягуються, утягуються та змінюють форму (рис.3.13). Внаслідок перетікання в псевдоподії ендоплазми відбувається їх випинання. Течія ендоплазми обмежена границями периферійної оболонки.

Пересування (*локомоція*) амебоподібних організмів можливе при наявності контакту з будь-яким субстратом.

Вільно повзаючі амеби рухаються зі швидкістю 0,5–4,5 мкм/с.

### 3.9.2. Війки та джгутики

Органели з характерною внутрішньою структурою, які розташовані на поверхні клітини, забезпечують переміщення рідини вздовж поверхні за рахунок коливальних рухів; короткі органели називають *війками*, а відносно довгі – *джгутиками*. Війками, наприклад, обладнані 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 10–20 мкм, а діаметр – 0,20–0,25 мкм. Частота биття війок знаходиться в межах 10–40 ударів за секунду. Типовим для війок є рух у вигляді *хвильових вигинів* (рис.3.14), які складаються з прямого гребного удару та зворотного відновного руху.

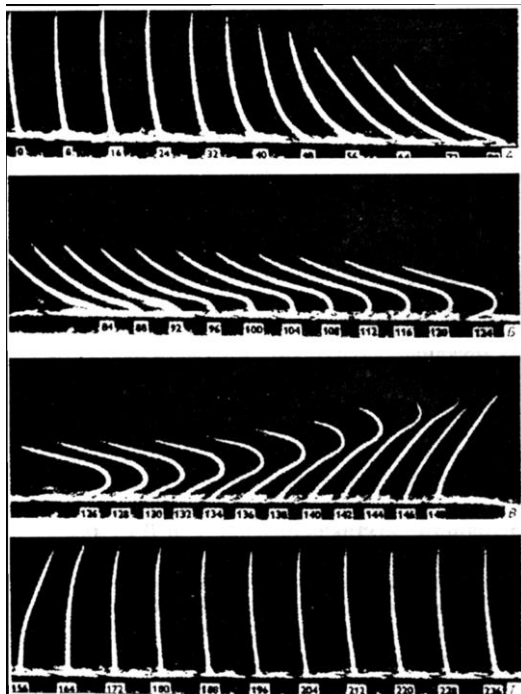


Рис. 3.14. Рух війок у вигляді хвильових вигинів

Джгутики мають більші, ніж війки, розміри і досягають довжини від 20 мкм до декількох міліметрів; діаметр джгутика дорівнює 0,20–0,25 мкм.

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

Робота, яка 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  $(1-4) \cdot 10^{-14}$  Вт.

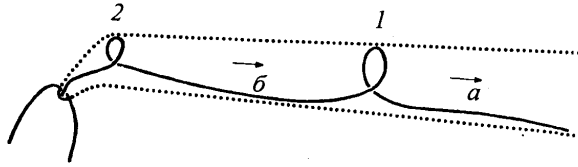
### **3.9.3. Робота джгутикового апарату**

Джгутики є органелами, які в більшості випадків розташовані на апікальному (передньому по ходу руху) кінці клітини; звичайно довжина джгутиків може дорівнювати довжині клітини, бути меншою або перевищувати її [Масюк, 1973]. Кожен джгутик являє собою бічеподібне утворення діаметром близько 0,2 мкм. Завдяки активним вигинам джгутики зазвичай виробляють тягнучий або штовхаючий вплив на клітину, забезпечуючи її поступальний рух з одночасним її обертанням навколо власної поздовжньої осі.

### **3.9.4. Особливості биття джгутиків**

Вигини джгутика *Euglena gracilis* в процесі биття характеризуються спіралеподібною формою, хоча, строго кажучи, структура биття більше відповідає серії вигинів, кожен з яких

представляє собою частину спіралі. Ці ділянки розділені прямолінійними відрізками джгутика (рис. 3.15).



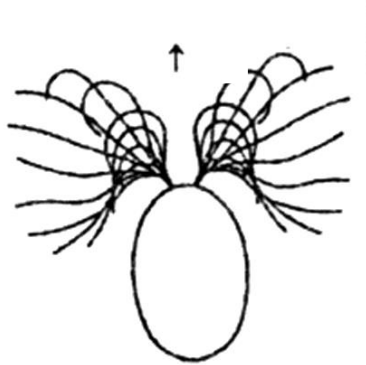
**Рис. 3.15. Схематичне зображення структури биття джгутика *Euglena gracilis*, що представляє собою серію вигинів ("перервану спіраль"), кожен з яких (1, 2) являє собою частину спіралі; розділені ці спіралеподібні ділянки прямолінійними відрізками джгутика (*a*, *b*) [Jahn, Vovee, 1968]. Тут стрілки вказують напрям поширення вигинів; пунктирні лінії відповідають кордонам вигинів.**

Це дало підставу назвати таку форму джгутика в процесі биття «перерваною спіраллю» ("interrupted helix") [Jahn, Vovee, 1968].

Биття джгутика *E. gracilis* забезпечують рух клітини по спіралеподібній траєкторії. Клітина здійснює при цьому обороти навколо своєї поздовжньої осі з частотою 2 Гц (близько 0,32 об/с = 19 об/хв).

Джгутики *Chlamydomonas reinhardtii* демонструють синхронні биття симетричної форми відносно поздовжньої осі тіла в одній площині (Рис. 3.16). Такий характер руху клітини Д.Л. Рінго назвав "плаванням стилем брас", а рух джгутиків відніс до циліарному типом (таке веслообразно биття характерно для війок інфузорій) [Ringo, 1967; Квитко и др., 1978].





**Рис. 3.16. Веслоподібний рух джгутиків *Chlamydomonas reinhardtii* при плаванні стилем "брас"[Colombetti, Marangoni, 1991]. Стрілка вказує напрямок руху клітини.**

Відмінністю у роботі жгутикового апарату *Dunaliella* в порівнянні з *Chlamydomonas* є те, що при зміні напрямку руху клітини один з джгутиків короткочасно стає нерухомим, тоді як інший забезпечує поворот клітини, після чого клітина рухається в новому напрямку з двома працюючими джгутиками [Dunaliella, 1992]. Крім того, частота биття двох джгутиків *Dunaliella bioculata* неоднакова (50 і 60 Гц), що призводить до появи деякого кута між площинами биття джгутиків. Це викликає обертання клітини і її рух по синусоїдальній траєкторії [Shoevaert et al., 1988].

### **3.9.5. Реєстрація биття джгутиків**

*Високошвидкісна мікрокінематографія*, Ця техніка дозволяє проаналізувати кадр за кадром (100-500 кадрів за секунду) рух клітин водоростей. Для *Chlamydomonas reinhardtii* параметри руху клітин становили: поступальна швидкість при кімнатній температурі 100-200 мкм/с (максимальне значення 240 мкм/с); швидкість обертального

руху 1,4-2 Гц (0,22-0,32 об/с) при максимальному значенні 2,5 Гц (0,4 об/с); частота биття джгутиків, які забезпечують спиралеподібний рух клітини, від 45 до 62-70 Гц у джгутика, що знаходиться на зовнішній стороні спіралі, та 45 Гц у джгутика, що знаходиться на внутрішній стороні спіралі [Rüffer, Nultsch, 1985]. Завдяки використанню методу високошвидкісної кінозйомки були визначені швидкість поступального руху *Dunaliella bioculata*, яка склала  $105 \pm 10$  мкм/с [Dunaliella ..., 1992], та частоту биття джгутиків (50 і 60 Гц) цього виду [Shoevaert et al., 1988].

### 3.9.6. Лазерна доплерівська спектроскопія

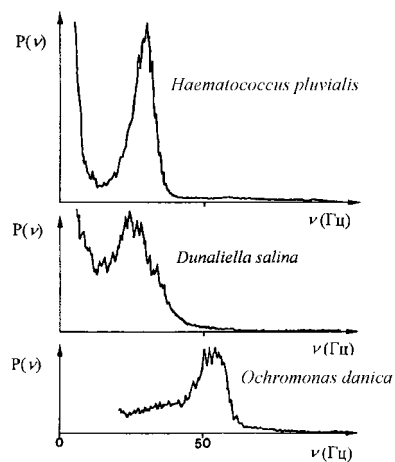
Суть ефекту Доплера полягає в тому, що при опроміненні об'єкта, який рухається зі швидкістю  $v$ , світлом певної частоти  $\lambda$  має місце розсіювання світла, причому частота (довжина хвилі) розсіяного світла залежить від швидкості руху об'єкта. Доплерівське зміщення  $\Delta f$  частоти світла залежить від кута розсіяння  $\theta$  світла об'єктом, швидкості руху  $v$  об'єкта і від кута  $\varphi$  між напрямком руху об'єкту і напрямком поширення світла [Ascoli et al., 1980]:

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi. \quad (10.1)$$

Впливаючи на клітини джгутикових водоростей лазерним випромінюванням і реєструючи доплерівські зсуви, Ц. Асколі зі співробітниками вдалося оцінити швидкості поступального і обертального рухів (для *E. gracilis* швидкість поступального руху склала 100 мкм/с, а частота обертання клітини близько 2 Гц), а також частоту биття джгутиків [Ascoli et al., 1978, 1980]. Використання

техніки доплерівської спектроскопії дало можливість оцінити швидкість поступального руху *Dunaliella bioculata*, яка склала  $109 \pm 5$  мкм/с [Dunaliella, 1992].

Типові доплерівські спектри, що дозволяють оцінити частоту биття джгутиків для різних водоростей, представлені на рис. 3.17.

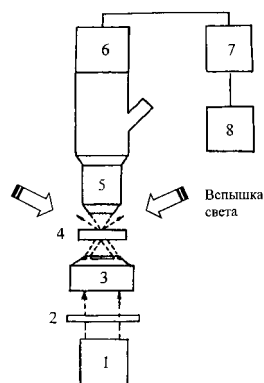


**Рис. 3.17.** Типові доплерівські спектри, що дозволяють оцінити частоту биття джгутиків для різних водоростей [Ascoli et al., 1980]. Тут:  $P(\nu)$  – інтенсивність розсіяного на рухомому об'єкті сигналу, зареєстрованого на частоті  $\nu$ .

Як видно, частота биття джгутиків *D. salina* знаходиться на рівні близько 25 Гц.

### 3.9.7. Метод світлорозсіювання

Суть методу світлорозсіювання пояснюється рис. 3.18.



**Рис.3.18. Схема експериментальної установки, призначеної для реєстрації світлорозсіювання (пояснення в тексті) [Angellini et al., 1986]**

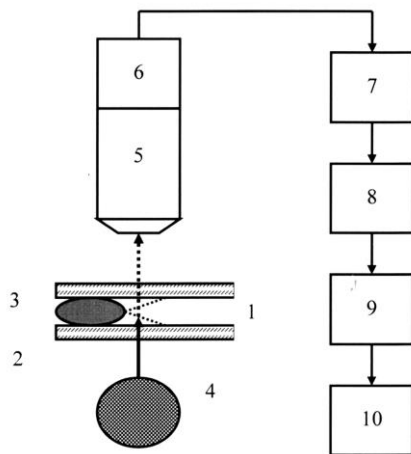
Інфрачервоний компонент випромінювання джерела 1 проходить через інфрачервоний фільтр 2 і темнопольний конденсор 3, після чого потрапляє на суспензію 4 водоростей, що досліджується. Спалах світла, який подається на суспензію, не потрапляє в об'єктив за рахунок темнопольного конденсора. Однак, модульований за рахунок биття джгутиків сигнал збирається об'єктивом 5 і реєструється фотоприймачем 6, вихідний сигнал якого подається на спектроаналізатор 7, пов'язаний з комп'ютером 8 [Ascoli, Petracchi, 1991]. Експериментальна система дає можливість проводити вимірювання, накопичуючи за допомогою комп'ютера дані через кожні 300 мс в шестиразовій повторності. Використовуючи техніку швидкого Фур'є-перетворення, можна порівняти початковий спектр інтенсивності для сукупності досліджуваних клітин з тими, які

отримані при різних відносно спалаху світла часових затримках, і одержати уявлення про еволюції частоти биття джгутиків водорості.

### **3.9.8. Метод фотометрії**

В основі фотометричних методів лежить реєстрація абсолютних або відносних значень потоків випромінювання, що пройшли через основи рухливих джгутиків: переміщення у просторі джгутиків викликають модуляцію світлового потоку, що дає можливість отримати інформацію про частоту биття джгутиків.

У процесі фотометрії клітина досліджуваної водорості закріплюється між предметним і покривним стеклами, після чого до основи джгутиків підводять зонд мікроскопа (Рис. 3.19). Процедура вимірювань зводилася до реєстрації модульованого світлового потоку фотоелектронним помножувачем мікроскопа, підсилення та аналізу одержаного сигналу. Система реєстрації дає можливість перетворити частоту биття джгутиків в аналогову форму і реєструвати її на самописці.



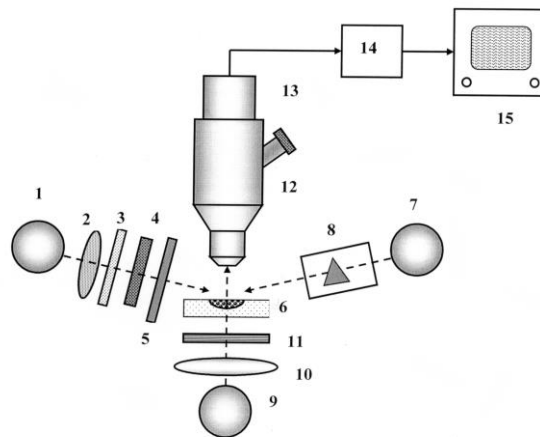
**Рис.3.19.** Принцип мікрофотометрії джгутиків мікроорганізмів. Тут: 1 – клітина мікроорганізму, що досліджується; 2 – предметне скло мікроскопа; 3 – покривне скло мікроскопа; 4 – джерело світла; 5 – мікроскоп; 6 – фотопомножувач; 7 – підсилювач-перетворювач; 8 – тригер Шмідта 8, який виробляє стандартний імпульс певної тривалості, якщо сигнал перевищує заданий рівень; 9 – синхронізуючий тригер, який запускає лічильник імпульсів; 10 – аналогово-цифровий перетворювач, який визначає частоту биття джгутиків.

### 3.9.9. Метод відеомікрографії

Система відеомікрографії складається з мікроскопа, який з'єднаний з відеокамерою і монітором (Рис.3.20). Така система дає можливість вимірювати поступальну та обертальну швидкість клітин, фоторух та кількість клітин водоростей.

Випромінювання джерела 1 білого світла (лампа розжарювання потужністю 300 Вт) формували в паралельний пучок світла за допомогою коліматора 2. Потім пучок світла пропускали через скляний 3 і рідинний 4 інфрачервоні фільтри, а при необхідності

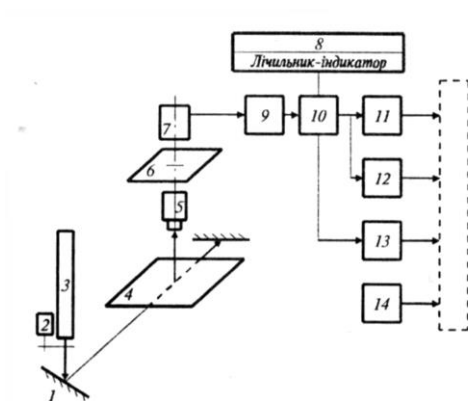
реєстрації світлових кривих - також через інтерференційний фільтр 5. Після цього світло під кутом  $30^\circ$  направляли на площину предметного скла з нанесеною на нього суспензією водоростей, яке знаходилося на предметному столику 6 мікроскопа 12. При дослідженні спектральних залежностей фототопотаксису використовували галогенну лампу 7, випромінювання якої пропускали через монохроматор 8. Дію поляризованого світла вивчали, використовуючи джерело світла 9, конденсор 10, поляризатор 11. Параметри фоторуху оцінювали за допомогою системи реєстрації, що складається з відеокамери 13, блоку сполучення 14 і монітора 15.



**Рис. 3.20. Схема системи відеомікрографії для дослідження фоторуху водоростей: 1 – джерело білого світла; 2– коліматор; 3 – скляний інфрачервоний фільтр; 4 – рідинний інфрачервоний фільтр; 5 – інтерференційний фільтр; 6 – зразок на предметному столику мікроскопа; 7 – галогенна лампа; 8 – монохроматор; 9 – джерело світла; 10 – конденсор; 11 – поляризатор; 12 – мікроскоп; 13 – відеокамера; 14 – блок сполучення; 15 – монітор [Posudin et al., 1992].**

### 3.9.10. Оцінка рухливості спермій

В основі фотометричного методу, що призначений для контролю якості сперми, лежить властивість спермій повертатися у процесі поступального руху. Освітлюючи рухомі спермії боковим світлом, можна реєструвати відблиски, які пов'язані з обертальною (а, отже, з поступальною) швидкістю. Фіксування кількості спермій, що проходять через певний перетин, дає можливість визначити їх концентрацію. Схему фотометричного аналізатора наведено на рис.3.21.



**Рис. 3.21. 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**



### 3.10. Методи вимірювання рухових характеристик живих організмів

#### 3.10.1. Кінематичні характеристики тварин

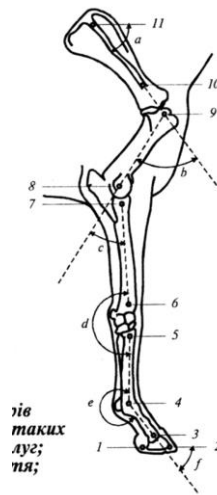
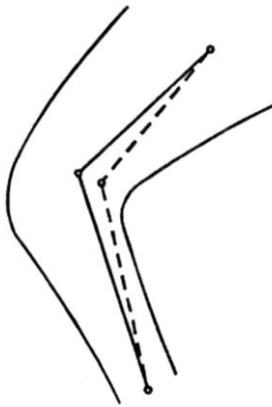
До основних кінематичних характеристик тварини належать довжина кроку, частота кроків, тривалість контакту кожної кінцівки з ґрунтом. Всі ці параметри вимірюються за допомогою високошвидкісної кінематографії або акселерометрії. Прикладом результатів вимірювань кінематичних характеристик є швидкість руху і довжина кроку коня (табл.3.1).

Таблиця 3.1. Кінематичні характеристики коня

Тип руху	Швидкість руху, км/год	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

У ветеринарній медицині все частіше використовують такий параметр, як кут між окремими сегментами зчленування. Вимірювання кінематичних характеристик проводять у дво- або тривимірному просторі за допомогою камер, які розташовані збоку, позаду або спереду тварини. Методика вимірювань передбачає

використання маркерів, які закріплюються в центрі обертання суглоба і на окремих сегментах (рис.3.22). Розмір кожного маркера становить 2,5 см. Розвитком цієї техніки можна вважати застосування фотодіодів як маркерів, на які діють три світлових променя, що скануються в тривимірному просторі.



**Рис. 3.22. Закріплення маркера в центрі обертання суглоба**

**Рис. 3.23. Схематичне зображення маркерів (номери 1-11) та кутів між сегментами таких суглобів передньої кінцівки коня: *a* – вертлуг; *b* – плече; *c* – лікоть; *d* – кістка зап'ястя; *e* – щітка; *l* – суглоб копита**

Розташування 11 фотодіодів на передній кінцівці коня (рис.3.23) дало можливість визначити залежність кута між сегментами від часу для таких суглобів як вертлуг, плече, лікоть, кістка зап'ястя, щітка, суглоб копита.

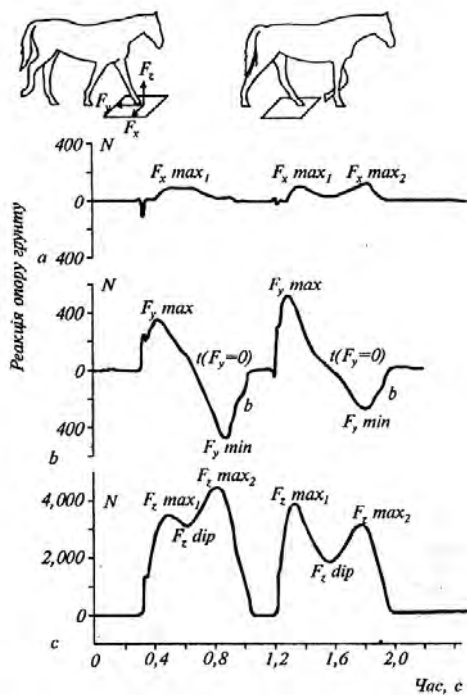
### 3.10.2. Динамічні характеристики тварин

Під час руху тварини виникають внутрішні сили, які 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, які являють собою плоскі пластини розміром 60×90 см, з'єднані з 3-4 п'єзоелектричними перетворювачами або датчиками напруги. Ці пластини розташовують на шляху руху тварини, яка досліджується.

Ще один метод вимірювання базується на використанні силових черевиків, які обладнані датчиками. Як приклад, можна навести результати залежності реакції опору ґрунту під час ходи коня (рис.3.24).

Важливою динамічною характеристикою тварини є розтяг, який відбувається на поверхні кісток тварини під час їх згину або кручення. Оцінку цього параметру проводять за допомогою датчиків, що дозволяють вимірювати силу або напругу, які викликають розтяг. Неоднорідність і нелінійність пружних властивостей кістки вимагають попереднього калібрування датчиків.

Розтяг сухожилів, який відбувається при навантаженні, можна вимірювати, наприклад, за допомогою датчиків, що працюють на основі ефекта Холла.



**Рис. 3.24. Результати вимірювання реакції опору ґрунту під час ходи коня за допомогою силових черевиків: *a,b* – горизонтальні сили; *c* – вертикальні сили**

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

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 використовуються для вимірювання кінематичних та динамічних характеристик тварин?

10. Пояснити принципи контролю якості сперми.

## APPENDIX II

### BIOMECHANICS

*Biomechanics* is a branch of biophysics that studies the mechanical properties of tissues, organs and the body as a whole, as well as phenomena related to the movement of animals, the work of individual organs and systems.

#### **Mechanical properties of biological objects**

All biological objects are characterized by geometric dimensions  $L$ , surface area  $S$  and volume  $V$ . If the transition of small living organisms to large ones is accompanied by a proportional change in the parameters  $L$ ,  $S$  and  $V$ , then we can say about the isometry of these organisms. In this case, there is a linear dependence of physiological parameters  $y$  on mechanical  $x$ , namely  $y=kx$  (where  $k$  is a constant). In the real situation, organisms are not isometric, but allometric (from the Greek *alloios* - different). The correlation of different physiological parameters of an organism with the power function of its mechanical characteristics is called allometry.

This correlation dependence can be described by an allometric type equation  $y=ax^b$ , where  $y$  – physiological parameter;  $x$  - mechanical characteristics;  $a$  and  $b$  are constants.

For example, the body weight of the smallest bird (hummingbird) is  $M_{bh}=2$  g, and the largest (ostrich rhinoceros) -  $M_{bo}=100$  kg. The mass of a hummingbird's egg is  $m_{eg}=0.3$  g. If you use an isometric ratio to determine

the weight of an ostrich egg, this weight will be 15 kg, which is unrealistic. The real relationship between egg weight and bird body weight is described by the allometric equation  $M_e = 0.277 \cdot M_b^{0.770}$ .

Consider examples of the use of allometric equations in terms of analyzing the relationship of different mechanical characteristics of biological objects.

One such object is a bird's egg. The mechanical properties of the egg are determined by the need to ensure sufficient strength of the shell (to ensure the protection and safety of the embryo) and at the same time fragility (so that the chick can come out of the shell). In addition, the eggshell should provide the necessary gas exchange (let oxygen in and carbon dioxide out) and prevent the contents from drying out.

The weight of eggs of different birds varies widely - from 0.3 g in hummingbirds to 100 g in ostriches. Typical weights of a chicken egg are about 60 g at the time of demolition and about 50 g at the time of hatching. During this period, the egg absorbs 6 liters of oxygen, emits 4.5 liters of carbon dioxide, loses about 9 g of water. This gas regime is provided by 10 thousand nop in the shell, the diameter of each of which is about 17 microns. The total area of the nop in the egg shell is 2.3 mm<sup>2</sup> with a total surface area of the chicken egg of 70 cm<sup>2</sup>.

Allometric ratios make it possible to establish a relationship between the weight of the egg  $M_e$  and the body weight of the bird  $M_b$ :

$$M_e = 0,277M_b^{0,770}.$$

The length  $L_n$  and the area  $S_n$  pop are related to the mass of the egg by the relations:

$$L_n = 5,126 \cdot 10^{-2} M_e^{0,456} ;$$

$$S_n = 9,2 \cdot 10^{-3} M_e^{0,236}.$$

The content of these ratios is determined by practical needs: despite the 30,000 difference in the size of the eggs, the length and area of the pores are so related to each other that ensure the normal functioning of the egg. As its size increases, the passage of gases accelerates. An increase in the mass of the egg by 10 times causes a corresponding increase in the length of the pore by  $10^{0,456}=2.86$  times and the area of the pore (according to equation 3) by  $10^{1,236}=17.2$  times. Accordingly, the exchange of gases in a larger egg increases in proportion to the needs of the developing embryo.

You can also give allometric ratios that link the mass of the shell  $M_{sh}$  with the mass of the egg  $M_e$ :

$$M_{sh} = 0,0482 M_e^{1,132}.$$

According to the analysis of this expression, the shell of the smallest egg (hummingbird) should be about 4% of the egg weight, and the largest (ostrich) - 12% of the egg weight. This threefold increase in the mass of the shell is associated with its thickening.

The force  $F$  that destroys the egg is related to the mass of the egg by the expression:

$$F = 50,86 M_e^{0,916}.$$



Thus, the strength of the egg increases with increasing size. Indeed, the cross-sectional area of the shell  $S_{in}$  is proportional to the square thickness of the shell.

Similar relationships are observed between energy metabolism and reduction of animal body size, height, diameter and phytomass in plants and the like.

Allometric ratios are also valid for plant organisms. Physiological parameters can be selected phytomass of tree trunk, phytomass of bark, phytomass of roots; mechanical - the average height of the tree, the average diameter of the tree, the average value of the stand.

### **Musculoskeletal system of animals**

The main purpose of the musculoskeletal system of farm animals - to ensure the dynamic movement of the body or its individual parts in space and storage during a quiet state of static balance. The basic elements of the musculoskeletal system of animals are bones, muscles, joints, tendons and ligaments. The bones, connected to each other in moving parts, form kinematic chains. Individual links in such a chain can be considered as the simplest mechanism - the lever. The fulcrum around which the lever rotates is the joint. The movement of the bones that form the lever is provided by the muscles. As they contract, they change the position of the bones to which they are attached. The basis of the musculoskeletal system of animals and its supporting structure is the skeleton. Thus, the musculoskeletal system of animals consists of bones - strong materials that perform passive functions in the process of body movement, and muscles, which are an active element of the musculoskeletal system.

The animal participates in various types of movements - translational (movement of the body as a whole), rotational (movement of joints),

oscillating (movement of individual parts of the body and internal organs), wavy (movement of the spine).

The main elements of the musculoskeletal system of animals are bones, muscles, joints, tendons and ligaments.

The bones, connected to each other in moving parts, form kinematic chains. Individual links in such a chain can be considered as the simplest mechanism - the lever. The fulcrum around which the lever rotates is the joint. The movement of the bones that form the lever is provided by the muscles. As the muscles contract, they change the position of the bones to which they are attached.

As the animal moves, there is a need to soften the shocks; the role of the shock absorber is played by the tendon-muscle apparatus. Consider as an example the cushioning properties of a horse's ankle joint. The force of the load on the limb along the metacarpal bone in the ankle joint can be decomposed into the force  $P$ , which is perceived by the bones of the finger, and the force  $P_1$ , which flexes the ankle joint and is absorbed by stretching the tendon-muscle apparatus. Increasing the length of the finger increases the load on the tendon-muscle apparatus.

In horses with a long toe, the gait is softer, the shocks are less felt by the rider, but the horse gets tired faster; a horse with a short finger feels stronger shocks, but such a horse is more enduring.

### **Vertebrate muscles**

Muscles, which account for 40 to 50% of the total body weight of an animal, are tissues that are characterized by the ability to contract, ie to change their length and cause corresponding changes in the spatial position of the whole body and its parts.

Vertebrates have three types of muscle tissue - skeletal (or cross-striated), cardiac and smooth. Skeletal muscles are involved in the musculoskeletal system; heart muscle is related to the work of the heart; smooth muscles form the walls of internal organs (intestines, blood vessels, esophagus). Skeletal muscle consists of central tissue that can contract and two tendons. One of them is attached to the moving bone, and the other to the supporting bone. Skeletal muscle tissue is formed from muscle fibers - multinucleated cells of cylindrical shape with a diameter of 20-80 microns and a length of several millimeters to tens of centimeters, surrounded by a shell - sarcolemma. Each muscle fiber contains from several hundred to several thousand myofibrils with a diameter of 1-2  $\mu\text{m}$ , which consist of protofibrils - thick (myosin protein) and thin (actin protein) filaments that form a hexagonal structure in cross section.

The length of myosin filaments is 1.6  $\mu\text{m}$ , actin filaments are 1  $\mu\text{m}$ ; diameter of myosin filaments - 16 nm, actin - 8 nm. Thick myosin filaments are equipped with transverse bridges.

The results of electron microscopy indicate that myofibrils consist of basic units that are repeated - sarcomeres. Length of the sarcomere - 2-3 microns; all sarcomeres are separated by Z-disks.

### **Fundamentals of physics of muscle contraction**

In the process of muscle contraction, large cells of the gray matter of the spinal cord (or the corresponding brain stem) send nerve impulses (action potentials). These cells are called motoneurons. They consist of a cell body (soma) and special processes (axons and dendrites). The area where an axon comes into contact with a muscle fiber is called a synapse. In addition to the transmission of excitation in the form of a nerve impulse through the synapse of the motoneuron axon to the muscle fiber, there is an

additional excitation of a chemical nature in the form of acetylcholine (ACh), released by the axon end. The impulse reaches the end of the motor nerve, allowing  $\text{Ca}^{2+}$  ions to enter the synapse and release acetylcholine, which diffuses through the synaptic cleft, causing a change in the permeability of the muscle fiber membrane. Acetylcholine amplifies a small impulse at the end of the motor nerve to the level required to activate the impulse in the muscle fiber. When the pulse reaches the end of the axon, the membrane depolarizes, which is accompanied by the unlocking of  $\text{Na}^+$  channels and activation of  $\text{Ca}^{2+}$  channels. A rapid increase in the concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  ions near the filaments of actin and myosin is a signal to begin muscle contraction.  $\text{Ca}^{2+}$  ions are released from the sarcoplasmic reticulum, which is a single three-dimensional membrane structure that surrounds each sarcomere from one Z-disk to another.

Muscles, which account for 40 to 50% of the total body weight of an animal, are tissues that are characterized by the ability to contract, ie to change their length and cause corresponding changes in the spatial position of the whole body and its parts.

The relative amount of myosin is 50-55%, and actin - 20-25% of the total protein. In addition, proteins such as tropomyosin (7%) and troponin (2%) are involved in the reduction process. Troponin contains three subunits: the largest subunit of TnT, which is associated with the tropomyosin molecule; the middle TnI subunit, which binds to the actin molecule and can inhibit the actin-myosin interaction; the smallest subunit of TnC that binds to calcium. The binding properties of troponin subunits depend on the concentration of calcium ions in the surrounding space.

In the state of muscle relaxation (at a concentration of calcium ions  $< 10^{-8}$  M) tropomyosin is oriented at an angle of  $50^\circ$  relative to the center of the actin filament, resulting in TnI strongly binds to actin, which leads to

the orientation of tropomyosin, which stops the interaction of transverse bridges with actin filament because the bridges are open.

When the muscle is excited and the calcium concentration increases, TnC binds to TnT and TnI; at the same time the interaction of TnI with actin decreases. This process is accompanied by the orientation of tropomyosin at an angle of 70° and its laying in the furrow of the actin helix, which initiates the interaction of transverse bridges with the actin filament

The source of energy for the contraction of muscle fibers is ATP, which is located on the heads of myosin. Energy release occurs during enzymatic hydrolysis of the ATP molecule.

### **Bird muscles**

There are two types of muscle fibers in the muscles of birds. The red color of "slow" fibers is due to the presence of a large amount of myoglobin in them. These muscle fibers are entwined with a dense network of capillaries and contain a large number of mitochondria. Such fibers shrink relatively slowly and tolerate long loads well; their metabolism is based on the oxidation of carbohydrates and fats to water and carbon dioxide. Birds with red flight muscles, on the contrary, are able to withstand fairly long loads of long flight. For example, ducks during migration can fly all day at a speed of 80 km/h.

White - "fast" fibers are larger in size, contain less myoglobin and mitochondria; the number of capillaries in the white muscles is also lower. White muscle energy is based on the oxidation of carbohydrates, not fats. Such fibers are adapted to rapid contractions in a short time. Birds, whose flight muscles are dominated by white fibers (such as pheasants), take off, being frightened, but soon get tired and can not fly long distances.

## **Fish muscles**

Because fish live in water and muscles do not need to maintain the weight of the fish, the muscles of the fish have their own characteristics. Muscle fibers in fish are grouped into blocks - so-called myotomes, which are separated by layers of collagen, called myosepts. In general, the ability of fish to swim is provided by the lateral (located away from the middle plane) muscles, which is 40% of the total weight in the crucian *Carassius auratus*, about 60% in salmon and 70% in mackerel.

The composition of the muscles of the fish is determined by its lifestyle, namely participation in the process of slow swimming and unexpected jerks. Each myotome consists of a relatively small number of fibers that form the so-called red muscles, which are designed for slow swimming, and a much larger (about 90%) number of fibers that form white muscles, which provide rapid movement or jerks of fish.

Red muscles are characterized by high levels of myoglobin, a branched system of capillaries, a large number of mitochondria (organelles of cells that provide the production, accumulation and distribution of energy in cells) and oxidative enzymes. They demonstrate aerobic functioning, get tired slowly and have a low internal rate of contraction. The diameter of the red muscle fibers is 100-200  $\mu\text{m}$ . All these properties allow the fish to realize slow periodic movements.

White muscles are able to provide maximum power to the fish. They are characterized by a high density of myofibrils, a small number of mitochondria and limited blood supply. White muscles function anaerobically; they get tired quickly and have a high internal rate of contraction. The diameter of the white muscle fibers is in the range of 300-400  $\mu\text{m}$ .

In most fish, the red muscles are arranged in a narrow strip along the lateral surface. For example, the pike (*Esox lucius*) – a predator waiting for its prey in an ambush, is almost devoid of red muscle, although in some species of fish (such as predators such as mackerel or tuna) red muscle extends to the vertebrate pillar.

### **Experimental studies of muscle contraction**

Consider an experimental technique for studying muscle contraction. The sliding theory of protofibrils is supported by a study of the dependence of the viscosity of an actomyosin suspension (a mixture of actin and myosin proteins) on the degree of its binding to ATP. The addition of ATP to the suspension leads to a sharp decrease in viscosity, which can be explained by the dissociation of actomyosin into actin and myosin-ATP complex.

During the hydrolysis of ATP (in the presence of  $Mg^{2+}$  ions), the initial viscosity of the suspension is restored.

The dependence of the recovery of the initial value of the viscosity of the suspension on the concentration of free  $Ca^{2+}$ .

The relationship between the concentration of free  $Ca^{2+}$  in the sarcoplasm and the force of muscle contraction has been experimentally established: the force increases from 0 ( $C=10^{-8}M$ ) to a maximum ( $C=5 \cdot 10^{-6}M$ ).

Another experiment involves the use of sensitive to  $Ca^{2+}$  protein evorin. When a molecule of this protein attaches three calcium ions, it emits a quantum of light.

Ekvorin was injected into an unexcited muscle and the dependence of light radiation on the concentration of calcium during its release from the sarcoplasmic reticulum was observed using a photoelectron multiplier. The

strength developed by a muscle fiber depends linearly on the concentration of free  $\text{Ca}^{2+}$ .

The dependence of the contraction force on the position of the transverse bridges in living muscle was investigated by X-ray diffraction analysis, which is based on the diffraction of X-rays on the quasi-crystal structure of muscle fibers.

When the transverse bridges protrude from the myosin filament and join the actin filament, the intensity of X-rays decreases due to its diffraction on the periodic structure formed by the transverse bridges. Fluctuations in radiation intensity correlate with fluctuations in muscle tension.

### **Hypokinesia and hypodynamia**

*Hypokinesia* - a state of insufficient motor activity of the body with limited pace and range of motion.

Modern man is doomed to hypokinesia due to such reasons as limited range of motion, sedentary lifestyle, neglect of physical culture, improper organization of the educational process and overload of classes, the spread of public and private transport, reducing work that requires physical effort and muscle tension

In agriculture, the conditions of stall keeping of animals in industrial complexes cause metabolic disorders, degenerative changes in bone tissue, deterioration of reproductive function and shortening the period of economic activity. In cows kept indoors, the number of calves born alive decreases compared to those in free grazing.

Hypokinesia causes mineral deficiency, which leads to decreased bone strength, unevenness and disproportion of bone mass and bone development. It should be noted that as a preventive measure to overcome



hypokinesia, active exercise and introduction of increased amounts of easily digestible carbohydrates and fats into the diets of animals and poultry are proposed. Hypokinesia as a special condition of the body due to lack of motor activity, in some cases leads to hypodynamics.

*Hypodynamia* - a violation of the body's functions (musculoskeletal system, blood circulation, respiration, digestion), which occurred due to limited motor activity, decreased muscle contraction. Hypodynamia is a consequence of the liberation of man from physical labor.

### **Non-muscular forms of mobility**

#### **Amoeboid movement**

In addition to muscle contraction, living organisms have other basic mechanisms for generating movement, such as amoeboid movement and the beating of cilia and flagella.

Amoeboid movement is accompanied by a change in the shape of the cell due to the forward direction of the vacuolated nucleus of the cytoplasm (endoplasm) in one or more pseudopodia - sprouts that are pulled out, retracted and change shape. Due to the overflow in the pseudopodia of the endoplasm is their protrusion. The flow of the endoplasm is limited by the boundaries of the peripheral membrane.

Movement (locomotion) of amoeba-like organisms is possible in the presence of contact with any substrate.

Free-creeping amoebae move at a speed of 0.5–4.5  $\mu\text{m/s}$ .

#### **Війки та джгутики**

Органели з характерною внутрішньою структурою, які розташовані на поверхні клітини, забезпечують переміщення рідини

вздовж поверхні за рахунок коливальних рухів; короткі органели називають *війками*, а відносно довгі – *джгутиками*. Війками, наприклад, обладнані 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 10–20 мкм, а діаметр – 0,20–0,25 мкм. Частота биття війок знаходиться в межах 10–40 ударів за секунду. Типовим для війок є рух у вигляді *хвильових вигинів*, які складаються з прямого гребного удару та зворотного відновного руху.

Джгутики мають більші, ніж війки, розміри і досягають довжини від 20 мкм до декількох міліметрів; діаметр джгутика дорівнює 0,20–0,25 мкм.

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

Робота, яка 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  $(1-4) \cdot 10^{-14}$  Вт.

### **Eyelashes and flagella**

Organelles with a characteristic internal structure, which are located on the surface of the cell, ensure the movement of fluid along the surface due to oscillating movements; short organelles are called cilia, and

relatively long - flagella. Ciliates, for example, are equipped with cilia; flagella - algae, some of the simplest, sperm.

Eyelashes show activity only in the aquatic environment; they allow the body to change the direction and speed of movement under the influence of an external stimulus. The length of the lashes is 10–20 $\mu\text{m}$ , and the diameter is 0.20–0.25 $\mu\text{m}$ . The frequency of lashes is in the range of 10–40 beats per second. Typical for lashes is the movement in the form of wave bends, which consist of a direct rowing impact and reverse recovery movement.

The flagella are larger than the eyelashes, the size and reach a length of 20 microns to several millimeters; the diameter of the flagellum is equal to 0.20–0.25 $\mu\text{m}$ .

According to modern notions, the mechanism of ciliary and flagellar movement is associated with the sliding of the peripheral pairs of microtubules relative to each other, relative to the central pair, resulting in the bending of the cilia or flagella.

The work performed during the movement of the cilia or flagellum is aimed mainly at overcoming the forces of internal friction of the medium and the elastic resistance of the organelles of the bend. The work of direct impact of the organelle is  $4 \cdot 10^{-16}$  J, and the reverse -  $10^{-16}$  J; the power of one blow is equal to  $(1-4) \cdot 10^{-14}$  W.

### **The work of the flagellar apparatus**

Flagella are organelles, which in most cases are located at the apical (anterior in the course of movement) end of the cell; usually the length of the flagella can be equal to the length of the cell, be less than or greater than it. Each flagella is a whip-like formation with a diameter of about 0.2 $\mu\text{m}$ . Due to the active bends, the flagella usually produce a pulling or

pushing effect on the cell, ensuring its translational motion with its simultaneous rotation around its own longitudinal axis.

### **Features of beating flagella**

The bends of the flagellum *Euglena gracilis* in the process of beating are characterized by a spiral shape, although, strictly speaking, the structure of the beating is more in line with a series of bends, each of which is part of a spiral. These areas are separated by rectilinear segments of the flagellum. This gave reason to call this form of flagella in the process of beating "broken spiral".

The beating of the *E. gracilis* flagella ensures the movement of the cell along a spiral trajectory. The cell rotates around its longitudinal axis with a frequency of 2 Hz (about 0.32 rpm/s = 19 rpm/min).

The flagella of *Chlamydomonas reinhardtii* show synchronous beats of symmetrical shape relative to the longitudinal axis of the body in one plane. This nature of the cell movement D. Ringo called "breaststroke swimming", and the movement of flagella attributed to the ciliary type (such a paddle-like beat is characteristic of cilia).

The difference in the work of the flagellar apparatus *Dunaliella* in comparison with *Chlamydomonas* is that when changing the direction of movement of the cell, one of the flagella briefly becomes immobile, while the other rotates the cell, after which the cell moves in a new direction with two working flagella. In addition, the beating frequency of the two flagella *Dunaliella bioculata* is different (50 and 60 Hz), which leads to the appearance of some angle between the beating planes of the flagella. This causes the cell to rotate and move along a sinusoidal trajectory.

### **Registration of flagella beating**

High-speed microcinematography, This technique allows you to analyze frame by frame (100-500 frames per second) the movement of algae cells. For *Chlamydomonas reinhardtii*, the parameters of cell movement were: translational velocity at room temperature 100-200  $\mu\text{m/s}$  (maximum value is 240  $\mu\text{m/s}$ ); rotational speed 1.4-2 Hz (0.22-0.32 rpm) with a maximum value of 2.5 Hz (0.4 rpm); the frequency of beating of the flagella, which provide a spiral movement of the cell, from 45 to 62-70 Hz in the flagellum, located on the outer side of the spiral, and 45 Hz in the flagella, located on the inner side of the spiral. Due to the use of high-speed filming, the translational velocity of *Dunaliella bioculata*, which was 105–10  $\mu\text{m/s}$ , and the beating frequency of flagella (50 and 60 Hz) of this species were determined.

### **Photometry method**

The basis of photometric methods is the registration of absolute or relative values of radiation fluxes that have passed through the bases of moving flagella: movements in the space of flagella cause modulation of light flux, which allows to obtain information about the frequency of flagella.

In the process of photometry, the cell of the studied alga is fixed between the slide and the cover glass, after which the probe of the microscope is brought to the base of the flagella. The measurement procedure was reduced to the registration of the modulated light flux by a photoelectron multiplier of the microscope, amplification and analysis of the obtained signal. The registration system makes it possible to convert the beating frequency of the flagella into an analog form and register it on a recorder.

### **Video micrography method**

The video micrography system consists of a microscope that is connected to a video camera and a monitor. This system makes it possible to measure the translational and rotational speed of cells, photomotor and the number of algae cells.

The radiation of the white light source 1 (a 300 W incandescent lamp) was formed into a parallel beam of light using a collimator. Then the light beam was passed through glass and liquid infrared filters, and if necessary to register the light curves - also through the interference filter. After that, the light at an angle of  $30^\circ$  was directed to the plane of the slide with a suspension of algae applied to it, which was on the slide of the microscope. In the study of the spectral dependences of phototaxis used a halogen lamp, the radiation of which was passed through a monochromator. The effect of polarized light was studied using a light source, condenser, polarizer. The parameters of the photomotor were evaluated using a registration system consisting of a video camera, a communication unit and a monitor.

### **Assessment of sperm motility**

The basis of the photometric method, which is designed to control the quality of sperm, is the property of sperm to return in the process of translational movement. By illuminating the moving sperm with a side light, it is possible to register reflections which are connected with rotational (and, consequently, with translational) speed. Fixing the number of sperm passing through a certain section makes it possible to determine their concentration.

## **Methods of measuring the motor characteristics of living organisms**

### **Kinematic characteristics of animals**

The main kinematic characteristics of the animal include stride length, stride frequency, duration of contact of each limb with the ground. All these parameters are measured using high-speed cinematography or accelerometry.

In veterinary medicine, such a parameter as the angle between the individual segments of the joint is increasingly used. Measurements of kinematic characteristics are performed in two- or three-dimensional space using cameras located on the side, behind or in front of the animal. The measurement technique involves the use of markers that are fixed in the center of rotation of the joint and on individual segments. The size of each marker is 2.5 cm. The development of this technique can be considered the use of photodiodes as markers that are affected by three light rays that are scanned in three-dimensional space.

The location of 11 photodiodes on the front end of the horse made it possible to determine the dependence of the angle between the segments on time for such joints as the swivel, shoulder, elbow, wrist bone, brush, hoof joint.

### **Dynamic characteristics of animals**

During the movement of the animal, internal forces develop, which are developed by the muscles in the body of the animal and are converted into the rotation of the segments of the joints and the translational movement of the animal as a whole, as well as external forces such as soil resistance. One method of estimating external forces involves the use of power plates, which are flat plates measuring 60 × 90 cm, connected to 3-4

piezoelectric transducers or voltage sensors. These plates are located in the path of movement of the animal under study. Another method of measurement is based on the use of power boots, which are equipped with sensors.

An important dynamic characteristic of an animal is the stretching that occurs on the surface of the animal's bones during their bending or torsion. This parameter is evaluated using sensors that measure the force or stress that causes tension. The heterogeneity and nonlinearity of the elastic properties of the bone require pre-calibration of the sensors.

Tendon stretching that occurs under load can be measured, for example, using sensors based on the Hall effect.



## 4. МЕХАНОБІОЛОГІЯ

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

### 4.1. Механорецепція у тварин

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

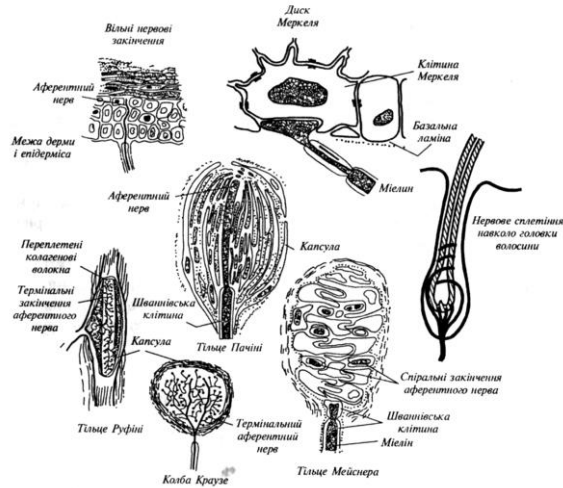
*Механорецептори* – це спеціалізовані чутливі утворення, що призначені для трансформації механічного стимулу в активність нервової клітини, яка призводить до поширення нервового імпульсу.

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 покрита 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.



**Рис.4.1. Типи механорецепторів**

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

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

*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 біля 300 волосяних фолікулів на площі 1 см<sup>2</sup>. У тварин у волосяному покриві зустрічаються чутливі волоски – *вібриси*, які локалізуються навкруг ротового отвору. Кожна вібриса може бути оточена більш ніж 100 волокнами, що забезпечує її високу чутливість.

*Тільця Мейснера* виявляються в шкірі, що позбавлена волосяного покриву. Вони знаходяться в сосочковому шарі дерми і мають конусоподібну або еліпсоподібну форму. Довжина тілець Мейснера становить 90–120 мкм. Зовні кожне тільце покрито тонкою капсулою (оболонкою), яка тісно зв'язана з оточуючими тканинами.

*Тільця Пачіні* являють собою інкапсуловані закінчення в шкірі розмірами 4–5 мм завдовжки і 1–2 мм завширшки (інкапсуляція – процес утворення оболонки). Розташовані в нижніх шарах дерми і в підшкірній жировій клітковині. Складаються з зовнішньої капсули, внутрішньої колби і немієлінізованого нервового закінчення, яке зв'язане 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, покриті капсулою. Внутрішнє середовище пронизане розгалуженою мережею закінчень аферентного нерва.

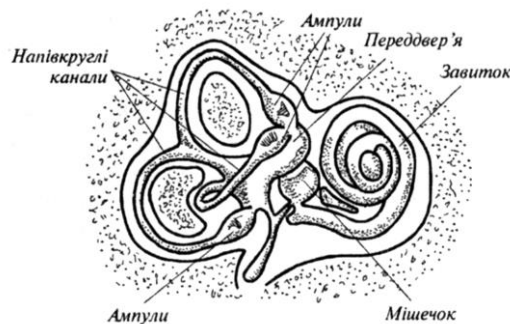
Тільця Руфіні мають веретеноподібну форму і оточені капсулою. Діаметр рецептора досягає 150 мкм. Основа кожного тільця Руфіні – складно переплетені колагенові волокна, які зв’язані з численними розгалуженнями аферентного нервового волокна.

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

#### 4.1.2. Вестибулорецепція

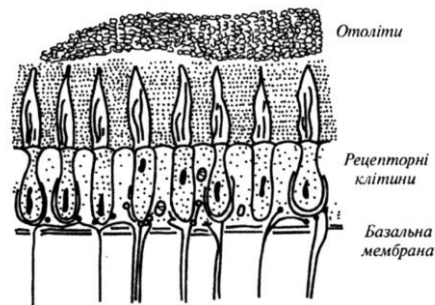
*Вестибулорецепція* – це сприймання зміни швидкості та напряму переміщення тіла у просторі за допомогою *вестибулорецепторів* – волоскових клітин перетинчастого лабіринту внутрішнього вуха. Цей тип рецепції реалізується за допомогою *вестибулярного апарату*, який складається з *переддвер’я* і трьох *напівкруглих каналів*, розташованих у взаємоперпендикулярних площинах (рис.4.2).

У порожнині переддвер’я знаходяться рецепторні клітини з волосками, що занурені в желеподібну масу, яка містить кристали карбонату кальцію – так звані *отоліти*. Якщо



**Рис.4.2. Вестибулярний апарат**

голова тварини нахиляється, напівкруглі канали набувають прискорення, тоді як ендолімфа прямує залишитися на місці через силу інерції.



**Рис. 4.3. Вміст порожнини переддвер'я**

Внаслідок цього отоліти зміщуються і згинають волоски, що призводить до збудження нервових клітин, які пов'язані з рецепторними клітинами, і передачі інформації до мозку про положення голови або тіла у просторі (рис.4.3).

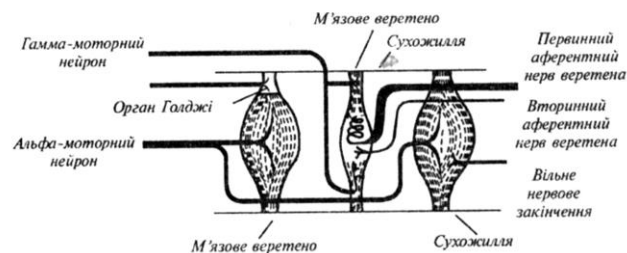
Обидва внутрішніх вуха являють собою *білатеральну* (двобічну) рецепторну систему: якщо під час обертання голови ліві напівкруглі канали набувають прискорення, то праві канали набувають сповільнення. У мозку тварини відбувається порівняння і аналіз частоти посилення біопотенціалів, які поступають з обох систем.

#### **4.1.3. Інтерорецепція**

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

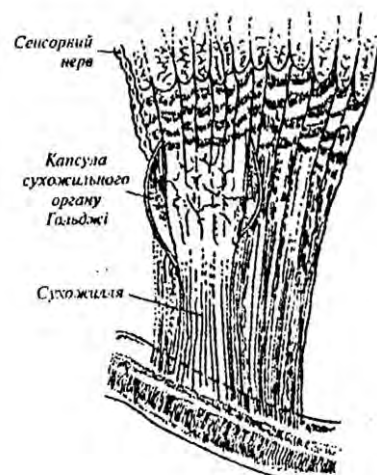
*Пропріорецептори* сигналізують про відносне положення різних частин тіла. Представлені ці типи механорецепторів *м'язовими веретенами* і *сухожильними органами Гольджі*.

М'язові веретена орієнтовані паралельно скелетним м'язам і пов'язані з сухожиллями (рис.4.4); вони надають інформацію про довжину м'яза.



**Рис.4.4. М'язове веретено**

М'язове веретено являє собою інкапсульовану групу тонких і спеціалізованих м'язових ниток. Оскільки капсула, де знаходяться ці нитки, має веретеноподібну форму, ці нитки називають *внутрішньоверетенними*. Вони пов'язані з сухожиллями; причому, кінці цих ниток містять скоротливі білки, тоді як середня частина позбавлена їх. Аферентний нерв м'язового веретена знаходиться саме в середній частині веретена. Полярні кінці цього веретена мають власні рухливі нерви, які називаються *гама-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 призводить до виникнення біопотенціалів, частота яких залежить від рівня зміни довжини середньої частини.



**Рис.4.5. Сухожильний орган Гольджі**

Сухожильний орган Гольджі являє собою тонку капсулу усередині сухожилля, яке 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 *механічну напругу*, що виникає в сухожиллі. Частота посилення потенціалів пропорційна напрузі, що виникає в сухожиллі.

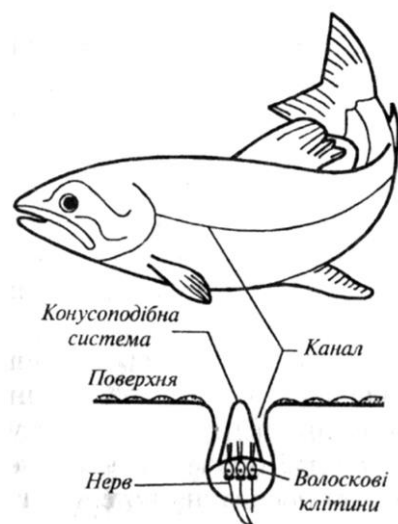
*Вісцеральні рецептори* постачають інформацію про рух або стан внутрішніх органів (шлунка, кишечника, січового міхура), а також сигналізують про стан внутрішнього середовища, з яким пов'язані відчуття голоду (рівень цукру в крові) або спраги (підвищення осмотичного тиску в плазмі крові).

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 механічної напруги, що виникають в м'язах.

#### 4.1.4. 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 сейсмодатчиків органів (каналів, борозенок), які містять рецепторні елементи - *невромасти* або *сейсмодатчикні пупки*. До застарілих належать терміни “бокова лінія”, “органи бокової лінії”.

Вздовж тіла більшої кількості риб, а також в області голови, розташована сейсмодатчикова система, яка являє собою послідовність каналів, відкритих через певний проміжок для води. Складаються ці канали з в'язких, желатинових конусоподібних структур (*cupulae*), які містять волоски, пов'язані з чутливими клітинами (*neuromasts*). До кожної такої клітини підходить нервове закінчення (рис.4.6).



**Рис.4.6. Будова каналу сейсмодатчикової системи риб**

Потік води, що рухається, викликає деформацію волосків, що сприяє утворенню електричних потенціалів та їх передачі у нервову



систему. Такі сейсмоденситивні системи, які спроможні реагувати на мінімальні зміщення води, забезпечують інформацією щодо напрямку руху водних потоків та наявності турбулентних течій, викликаних присутніми у водному середовищі членів зграї або ворогів.

#### 4.1.5. 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 напруги м'язів та зовнішнього скелета.

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

Трихоїдні сенсиль (*s.trichodea*), які виконують функції рецепторів дотику, складаються з двох частин – спеціалізованого утворення (волоска) і нервового закінчення, яке знаходиться в контакті з цим утворенням (рис.4.7).

Подразнення волоска передається розташованій біля його основи нервовій клітині і через її відростки попадає у центральну нервову систему. Розміщені трихоїдні сенсиль по всьому тілу бджоли. За допомогою тих сенсил, що розташовані на антенах, бджола має можливість виявляти і аналізувати мікрорельєфи на поверхні квітів. Розміри сенсиль (близько 10 мкм) сумірні з розмірами цих мікрорельєфів, які можуть трошки змінюватися від края квітки до центру; аналіз цих змін надає інформацію відносно розташування нектару.



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

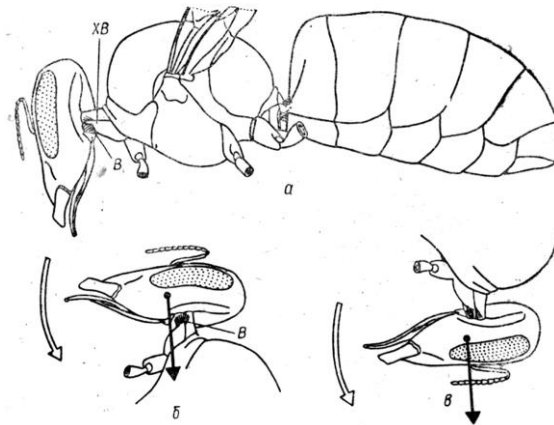
Трихоїдні сенсили, розміщені у місці зчленування голови та грудей, виконують також функції *гравірецепторів*.

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. При побудові шестикутних чарунок (саме шестикутники мають найменший периметр і при тій самій місткості порівняно з чарунками іншої форми зумовлюють найменшу кількість будівельного матеріалу) бджоли вимірюють кути за допомогою особливих органів чуттів, розміщених у місці зчленування голови та грудей (рис.4.8). У звичайному стані голова опирається на два хітинових виступи грудей вище центра маси (рис.4.8,*а*). При вертикальному розміщенні бджоли головою догори нижня її частина тисне на груди (рис.4.8,*б*), причому чутливі волоски *В*

сприймають цей тиск; при розміщенні головою донизу ситуація змінюється (рис.4.8,в).

Таким чином, реєструючи рівень тиску голови на груди за допомогою волосків, бджола здатна контролювати положення у просторі свого тіла та стільників.

Реакція бджоли на механічні напруги та деформації відбувається завдяки сенсилам, що розташовані на голові та кінцівках (*s.scolopophora*), а також на гострому кінці жала (*s.campaniformia*). На відміну від трихоїдних ці сенсиль спеціалізуються як *пропріорецептори пружних деформацій* кутикули.



**Рис. 4.8. Орган рівноваги бджоли в місці з'єднання голови та груді. Голова спирається на хітинові виступи передгруддя (ХВ на рис.4.8, а). Щоб їх було краще видно, голова відтягнута дещо вперед. Оскільки її центр тяжіння (верхній кінець стрілки на рис.4.8,б та в) лежить глибше, при положенні тіла головою вверх голова під дією сили тяжіння відхиляється вперед (б), а при положенні головою вниз – назад (в). У результаті цього чутливі волоски В, які стикаються з головою, збуджуються. Такий самий орган чуття розміщений між грудьми і черевцем [Lindauer and Nedel, 1959]**

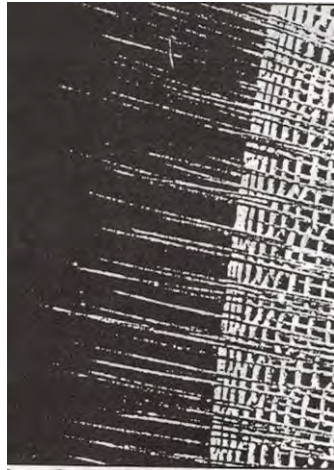
Розміщені по лініях деформацій, вони передають сигнали щодо інтенсивності та напрямку вигинів кутикули. Морфологічно вони відрізняються від трихоїдних сенсил, бо позбавлені волоска, який перетворений у невеликий овальний ковпачок, до якого підходить колоколоподібний кінцевий відросток чутливої клітини. Колоколоподібні сенсили у робочої бджоли знаходяться на крилах (кількість їх становить 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 сенсили викликає або зменшення, або збільшення кривизни кутикулярного купола.

Медоносна бджола спроможна оцінювати швидкість потоків повітря та їх напрямок під час польоту завдяки чутливим волоскам, які діють як *аеродинамічні датчики*. Розташовані ці волоски на складних очах бджоли (рис.4.9), на деяких ділянках голови та крилах.

Оцінка швидкості руху відносно земної поверхні відбувається візуально, за рахунок фоторецепторів. Затрати енергії під час польоту дозволяють бджолі мати уявлення про відстань польоту. Крім того, бджола отримує інформацію через *рецептори тиску*, які знаходяться на стінках медового мішка: тиск зменшується, якщо мішок спорожнюється.

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

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



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

#### **4.1.6. Тигмонастичні рухи рослин**

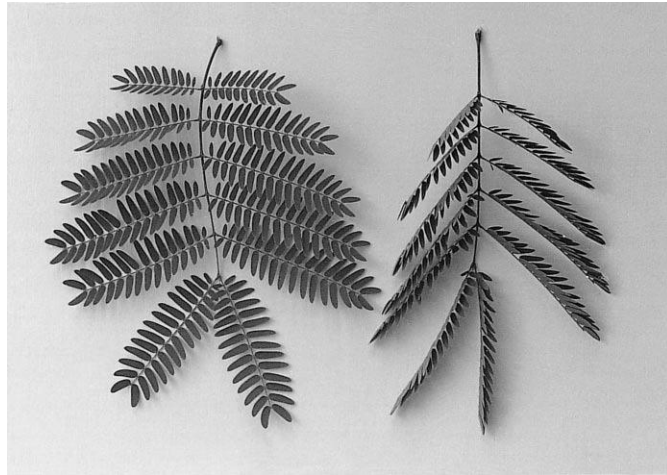
*Настичні рухи* виникають у відповідь на будь-які зовнішні фактори – дотик, пошкодження, механічну вібрацію, світло, хімічні речовини, на які рослина реагує швидкими рухами. Напрямок настичних рухів не залежить від напрямку стимулу.

*Тигмонастичними* називаються рухи, що викликаються дотиком. Особливу категорію складають швидкі настичні рухи – *сейсмонастії*, що виникають від легкого удару або струсу. Їх механізм пов'язаний з миттєвим викликаним потенціалом дії, збільшенням проникності мембран і втратою здатності клітин листових зчленувань утримувати

осмотично активні речовини і воду, в результаті чого різко падає тургор. Такі рухи характерні, наприклад, для добре відомої рослини мімоза сором'язлива (*Mimosa pudica*), яка згортає листки у відповідь на дотик (Рис.4.10).

через всього 0,1 с. При цьому роздратування поширюється зі швидкістю 40-50 см/с.

Такі швидкі рухи у мімози можуть бути використані для захисту проти комах та інших тварин, протидії суховіям з метою збереження води у посушливих районах, де вона мешкає.



**Рис. 4.10.Тигмонастичні рухи *Leucaena* (рід квіткових рослин, підродина мімозових, сім'я бобових)**

Реакція відбувається надзвичайно швидко, Зовнішній механічний стимул, що сприймається сенсорними клітинами черешка, перетворюється в електричний сигнал, який швидко поширюється по тканині, доки не досягне локомоторних клітин листової подушечки поблизу основи листка, які негайно змінюють свій об'єм. Мабуть, рух органів у мімози визначається

зміною тургорного тиску в цих клітинах. Зміна об'єму клітин призводить до виділення з них іонів калію та таніноподібних речовин з клітини.

До рослин, що рухають листками у відповідь на дотик, можна віднести також *Mimosa nuttallii*, *Codariocalyx motorius*, *Chamaecrista fasciculata*, *Chamaecrista nictitans*, *Schrankia roemeriana*, *Neptunia lutea*.

Тигмонастичними можна вважати й рухи, які демонструють у відповідь на дотик комахоїдні рослини – наприклад, венерина мухоловка *Dionaea muscipula*. Вона отримує свою здобич, головним чином комах та павукоподібних, за рахунок захоплення жертви структурою, що утворюється кінцевою частиною кожного з листків рослини та ініціюється крихтними волосками на їх внутрішніх поверхнях. Коли комаха або павук повзе вздовж листка, відбувається контакт з волосками, через що пастка закривається. Вважається, що швидке закривання листків рослини пов'язане з незворотним розтягуванням клітин та зміною підкислення клітинних стінок [Рейвн и др., 1990].

Рослина-телеграф або, інакше, танцююча рослина *Codariocalyx motorius* (або *Desmodium gyrans*) належить до сімейства бобових. Це одна з кількох існуючих в природі рослин, здатних здійснювати швидкі рухи. Причому ці рухи – листові, і можуть бути викликані найрізноманітнішими факторами, в тому числі дотиком.

Росичка круглолиста (*Drosera rotundifolia*) оснащена листками, які зверху усаджені клейкими яскраво-червоними залозистими волосками з головчастими потовщеннями на вершечку, що виділяють прозорі й блискучі, як роса, крапельки клейкого слизу (тому рослина й називається росичкою). Клейка рідина служить для захоплення й перетравлювання комах

Пухирчатка звичайна (*Utricularia vulgaris*) – водна рослина, листя якої розсічені на вузькі частки, де розташовані маленькі овальні ловчі бульбашки з повітрям. Ловить дрібних комах, ракоподібних, водорості.

Альдрованда пухирчаста (*Aldrovanda vesiculosa*) теж відноситься до комахоїдних рослин. При подразненні ніжних волосків, що знаходяться на поверхні листка, останній складається вздовж, при цьому краї знаходяться один над іншим. Дрібні водяні личинки і ракоподібні, які трапляються в цю пастку, перетравлюються рослиною.

До тигмонастичних рухів слід віднести й *закручування вусиків*, за допомогою яких деякі рослини (*Passiflora coerulea*, *Pisum sativum*) здатні підтримувати себе у просторі. Вусики під час свого росту виконують кругові рухи з тим, щоб збільшити ймовірність контакту з потенційною опорою, внаслідок чого вони змінюють швидкість та напрямок росту так, щоб зачепитися за опору та підтягнути рослину. Якщо погладити нижню сторону вусика гороху *Pisum sativum* скляною паличкою, клітини нижньої сторони починають стискуватися, а клітини верхньої – розтягуватися, після чого всі клітини розтягуються, але клітини верхньої сторони розтягуються швидше. Очевидно, в регуляції зміни розмірів клітин беруть участь такі гормони, як ауксин, що стимулює ріст, та етилен, який збільшує проникність мембрани; збільшення етилену в клітинах нижньої сторони супроводжується втратою розчинених речовин з вакуолі, що викликає стискування клітин.



## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

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. Як реагує бджола на механічні стимули?
9. Чим відрізняються настичні, тигмонастичні та сейсмонастичні рухи рослин?

## 5. ГІДРОДИНАМІКА

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

### 5.1. Тиск

*Тиск*  $p$  – це фізична величина, що характеризує інтенсивність нормальних (перпендикулярних до поверхні) сил, з якими одне тіло діє на поверхню іншого. Середня величина тиску на будь-яку площину дорівнює відношенню середнього значення сили, що діє перпендикулярно цій площині, до її площі:

$$p = \sum_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS}. \quad (5.1)$$

Якщо сили розподілені вздовж поверхні рівномірно, то тиск  $p$  на будь-яку частину поверхні дорівнює:

$$p = \frac{F}{S}, \quad (5.2)$$

де  $F$  – сума прикладених перпендикулярно до поверхні сил;  $S$  – площа цієї частини поверхні.

Одиниця вимірювання тиску в системі СІ – *паскаль* ( $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ ).

Позасистемні одиниці та їх зв'язок із паскалем:

$1 \text{ атм} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1013,25 \text{ мбар} = 760 \text{ мм.рт. ст.};$

$1 \text{ мбар} = 100 \text{ Па} = 1 \text{ гПа} = 0,75006 \text{ мм рт. ст.};$

1 мм рт. ст. = 1 Тор = 1,3332 мбар = 133,32 Па;

1Па =  $9,87 \cdot 10^{-6}$  атм =  $7,5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.

## 5.2. Тиск води

Абсолютний тиск  $p$  на глибині  $d$  від поверхні рідини перевищує тиск  $p_A$  на величину  $\rho gh$ , яка відповідає тиску, що утворює вага стовпчика рідини  $d$  і площею  $S$ :

$$p = p_A + \rho g d, \quad (5.3)$$

де  $p_A$  – атмосферний тиск;  $\rho$  – густина рідини;  $d$  – глибина.

Цей вираз можна переписати так:

$$p = p_A + \frac{\rho g d S}{S} = p_A + \frac{m g}{S} = p_A + \frac{P}{S}, \quad (5.4)$$

де  $P$  – вага стовпа рідини;  $m$  – маса рідини;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Оскільки тиск рідини залежить лише від глибини, будь-яке збільшення тиску на поверхні передається кожній точці рідини. Цей факт було сформульовано у 1663 р. як закон Паскаля: *тиск на поверхні рідини, який утворюється зовнішніми силами, передається рідиною однаково по всіх напрямках*. Цей закон знайшов своє застосування у гідравлічному пресі.

## 5.3. Закон Архімеда

Сила тиску на нижні шари рідини завжди перевищує силу, що діє

на верхні шари. Отже, на тіло, занурене в рідину, діє виштовхуюча сила. Закон статички рідин та газів, або закон Архімеда, стверджує: *на будь-яке тіло, занурене в рідину (або газ), діє з боку цієї рідини (або газу) виштовхуюча сила, яка дорівнює вазі рідини (газу) в об'ємі зануреної частини тіла, направлена по вертикалі догори та прикладена до центра тяжіння виштовхнутого об'єму.*

Виштовхуючу силу називають *архімедовою*, або *гідростатичною підйомною силою*.

#### **5.4. Рух ідеальної рідини**

*Ідеальною* вважається рідина, окремі елементи якої рухаються без тертя та яка є нестисливою.

*Нестисливою* називають рідину, густина якої стала.

*Течією* називають рух рідини, а *поток*ом – саму рідину, що рухається. Якщо швидкість руху рідини в кожній точці об'єму не змінюється з часом, такий рух рідини називається *стаціонарним*. Графічно рух рідини зображується за допомогою *ліній течії* – таких ліній, дотичні до яких збігаються за напрямком вектора швидкості в даній точці потоку. Частина рідини, обмежена лініями течії, називається *трубкою течії*.

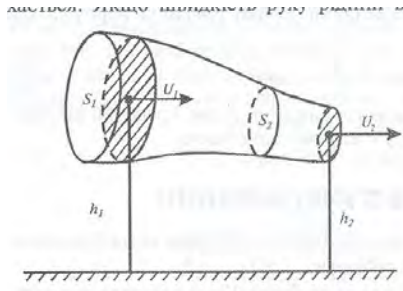
Розглянемо трубку течії змінного перерізу (рис. 5.1). Для ідеальної рідини, що рухається у цій трубці, справедливі такі закономірності.

Рівняння нерозривності потоку – за *стаціонарної течії рідини* *добуток швидкості течії рідини на поперечний переріз трубки течії є величиною сталою*:

$$S \cdot v = \text{const.} \quad (5.5)$$

З цього рівняння можна одержати вираз:

$$v = \frac{\text{const}}{S}. \quad (5.6)$$



**Рис. 5.1.** Трубка змінного перерізу

### Приклад

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

### Розв'язання

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

$$Q_a = S_a \cdot V_a,$$

де  $S_a$  – переріз артерії;  $V_a$  – швидкість руху крові по артерії.

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

$$Q_a = n \cdot Q_k,$$

де  $n$  – кількість капілярів.

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

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

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:

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

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

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

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

Для горизонтально розміщеної трубки рівняння Бернуллі має вигляд:

$$p + \frac{\rho \cdot V^2}{2} = \text{const.} \quad (5.8)$$

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

### Приклад

Визначити надлишковий тиск, що виникає в аорті діаметром 10 мм у процесі її розширення до 15 мм, якщо швидкість руху крові складає  $40 \cdot 10^{-2}$  м/с.

### Розв'язання

Запишемо рівняння нерозривності потоку в 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, одержимо:

$$p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2},$$

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 одержати:

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^4 \right]$$

Підставляємо числові значення:

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

### Контрольне завдання

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

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

### 5.5. Рух в'язкої рідини

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

Рівняння Ньютона – тангенціальна сила  $F$ , що зумовлює зсув шарів рідини один відносно одного, пропорційна площі  $S$  шару, по якому відбувається зсув, та градієнту  $\Delta v / \Delta x$  швидкості течії:

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x}, \quad (5.9)$$

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

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



1 Па·с = 1 Н·с·м<sup>-2</sup> = 10 П (пуаз);

1 П = 100 сП (сантипуаз) = 0,1 кг·м<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup> = 0,1 Па·с;

1 сП = 1 мПа·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	$(4-5) \cdot 10^{-3}$	20
Плазма крові	$1,7 \cdot 10^{-3}$	20
Суцільне молоко	1,45	27
Збиране молоко	1,42	25
Молочна сироватка	1,16	24
Рицинова олія	0,9	20
Гліцерин	1,5	20

Рідину, яка в процесі течії підпорядковується рівнянню Ньютона, називають *ньютонівською*. Наприклад, вода – ньютонівська рідина, а ряд суспензій та розчинів, зокрема кров – це *неньютонівські* рідини.

## Контрольне завдання

Знайти на сайті

[http://www.gordonengland.co.uk/conversion/dynamic\\_viscosity.htm](http://www.gordonengland.co.uk/conversion/dynamic_viscosity.htm) таблицю перетворювань одиниць в'язкості; виразити в'язкість рідини 1,71 сП у Па·с та пуазах.

### 5.5.1. Рух тварин у водному середовищі

Вода має густину, що у 800 разів перевищує густину повітря. Але через те, що вода є нестисливим середовищем, водні тварини легко відштовхуються від неї. Крім того, густина води та густина тіла водних тварин приблизно однакові, що дає можливість майже не витрачати енергію на протидію гравітації. Отже, вода є середовищем, в якому дуже легко пересуватися, а плавання є найефективнішим засобом пересування у воді.

На тіло, що рухається у водному середовищі, діють два типи сил: інерціальна сила  $F_{in} = \rho_e v^2 L^2$  та сила в'язкості  $F_\eta = \eta v L$ , де  $\rho_e$  – густина води;  $v$  – швидкість руху об'єкта;  $L$  – розмір об'єкта;  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості. Співвідношення між цими силами залежать від розмірів об'єкта та його швидкості. Так, для риби розміром 30 см, що рухається зі швидкістю близько 1 м/с, інерціальна сила дорівнює 36 Н, тоді як сила в'язкості –  $3 \cdot 10^{-4}$  Н, тобто різниця становить  $10^5$ . Ця різниця зменшується в 10 разів у випадку руху личинки розміром 3 мм, що рухається з такою ж швидкістю.

Під час руху зі швидкістю  $U$  риба масою  $m$  відштовхує воду масою  $M$ , яка рухається у протилежному напрямку зі швидкістю  $V$ . Імпульси риби  $mU$  та води  $MV$  мають однакову величину, але протилежні напрямки:

$$mU = -MV, \quad (5.10)$$

звідки швидкість руху води визначиться так:

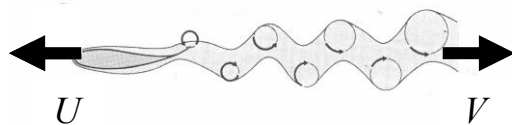
$$V = \frac{mU}{M}. \quad (5.11)$$

Робота, яка виконується під час руху риби у воді, дорівнює:

$$A = \frac{mU^2}{2} + \frac{MV^2}{2} = \frac{mU^2}{2} \left(1 + \frac{m}{M}\right). \quad (5.12)$$

Таким чином, чим більша маса виштовхнутої води  $M$ , тим менша сума  $\left(1 + \frac{m}{M}\right)$ , і, отже риба рухається з більшою швидкістю  $U$ . Велика маса виштовхнутої води забезпечується великим за площею хвостом.

Поступальний рух риби у воді супроводжується виникненням вихорів, які послідовно збільшуються за розмірами (рис. 5.2).



**Рис.5.2. Утворення вихрів у кільватері риби під час поступального руху [Videler, 1993]**

Відстань між центрами вихрів не змінюється, а швидкість циркуляції зменшується. Ці вихрі утворюють сумарний імпульс, протилежний імпульсу риби.

### 5.5.2. Ламінарна і турбулентна течії

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

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

$$Re = \frac{\nu \rho D}{\eta}, \quad (5.13)$$

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.

Наприклад, для течії в'язкої нестисливої рідини в циліндричній трубці  $Re_{кр} = 2300$ . Ламінарний процес перенесення води у ґрунті характеризується значеннями  $Re < 1$ .

#### **Приклад**

Потік води рухається через ґрунтову пору діаметром  $D = 6 \cdot 10^{-5}$  м зі швидкістю  $1,2 \cdot 10^{-4}$  м/с. Визначити число Рейнольдса, якщо температура ґрунту становить  $20$  °С.

#### **Розв'язання**

Використовуючи дані таблиць 1.4 та 4.2, підставляємо числові дані у рівняння

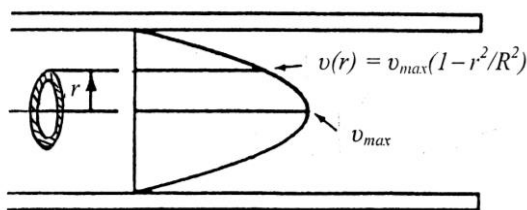
$$(4.13): Re = (1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с})(998,2 \text{ кг/м}^3)(6 \cdot 10^{-5} \text{ м}) / (1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}) = 7,17 \cdot 10^{-3}.$$

### 5.5.3. Закон Гагена-Пуазейля

Розглянемо течію рідини вздовж тонкої довгої трубки. Згідно з рівнянням Бернуллі, в стаціонарному потоці повний тиск ідеальної рідини вздовж довгої трубки є величина стала. Але на практиці спостерігається зменшення тиску завдяки в'язкості рідини. Ньютонівська рідина рухається вздовж трубки як серія концентричних кільцеподібних шарів, швидкості руху яких змінюються за параболічним законом (рис. 5.3): рідина рухається скоріше вздовж осі і повільніше – у разі наближення до стінок трубки. Швидкість руху кожного шару радіусом  $r$  описується рівнянням:

$$v(r) = v_{max}(1 - r^2/R^2), \quad (5.14)$$

де  $v_{max}$  – швидкість руху рідини вздовж осі трубки;  $R$  – радіус трубки. Через зміну швидкості руху рідини виникає різниця тисків уздовж довжини трубки  $\Delta v = p_1 - p_2$ . Визначимо, за яким законом описується течія рідини вздовж тонкої циліндричної трубки.



**Рис. 5.3.** Рух ньютонівської рідини як серії концентричних шарів радіуса

$r$ , швидкості  $v$  руху яких у трубці радіуса  $R$  змінюються за параболічним законом

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

$$Q = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\pi \cdot R^4}{8 \cdot l} \cdot (p_1 - p_2), \quad (5.15)$$

де  $Q = V/t$  – об'ємна швидкість течії рідини;  $V$  – об'єм рідини.

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.

$$F = 6\pi\eta Rv. \quad (5.16)$$

#### 5.5.4. Седиментація

Застосування закону Гагена-Пуазейля до аналізу потоків води у ґрунті через пори свідчить про те, що пропускання води пропорційне  $R^4$ , тоді як площа поперечного перерізу пори пропорційна  $R^2$ . Таким чином, одна велика пора пропускає істотно більше води, ніж декілька дрібних пор з однаковою сумарною площею перерізів, за рахунок менших значень сил опору, які утворюються стінками пор.

Розглянемо частинку масою  $m$ , об'ємом  $V$  і густиною  $\rho$ , занурену у рідке середовище з густиною  $\rho_0$ . На цю частинку діє гравітаційна сила:

$$F_{zp} = mg = V\rho g, \quad (5.17)$$

яка спрямована донизу, і архімедова сила:

$$F_0 = m_0g = V\rho_0g, \quad (5.18)$$

спрямована догори і яка чисельно дорівнює вазі  $m_0g$  рідини, виштовхнутої частинкою. Результируюча сила дорівнює:

$$F_s = F_{zp} - F_0 = V\rho g - V\rho_0g = Vg(\rho - \rho_0). \quad (5.19)$$

Якщо  $\rho < \rho_0$ , результируюча сила спрямована догори (процес *випливання*); якщо  $\rho > \rho_0$ , результируюча 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:

$$F_\eta = 6\pi\eta r v \quad (5.20)$$

і швидкість седиментації визначиться так:

$$v_{сед} = Vg(\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \frac{2}{9} g(\rho - \rho_0) r^2 / \eta. \quad (5.21)$$

Процес седиментації використовують для очищення води від піску, глини, органічної речовини, вірусів, бактерій та водоростей.

### Приклад

Визначити швидкість седиментації частинки мулу густиною 2650 кг/м<sup>3</sup> та діаметром 0,03 мм, яка осідає у воді при 20 °С. Використати дані таблиць 1.4 та 4.2.

### Розв'язання

Підставляємо числові дані у рівняння (4.20):

$$\begin{aligned} v_{\text{сед}} &= \frac{2}{9} g(\rho - \rho_0) r^2 / \eta = \frac{2}{9} (9,8 \text{ м/с}^2)(2650 - 998,2)(15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2) / (1,002 \cdot 10^{-3} \\ &\text{Па}\cdot\text{с}) = \\ &= 8,1 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.} \end{aligned}$$

### Контрольне завдання

Визначити швидкість падіння дощових краплин діаметром 7 мм, якщо температура повітря становить 20 °С.

*Відповідь:* 7,95 м/с.

### 5.5.5. Ультрацентрифугування

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

Техніка розділення компонентів складних речовин і одержання однорідних фракцій називається *ультрацентрифугуванням*.

Розглянемо пробірку з розчином частинок, яка обертається навколо вертикальної осі з кутовою швидкістю  $\omega$  (рис. 5.4). На частинку діє доцентрова (виштовхуюча) сила  $F_d$ , спрямована до осі обертання:



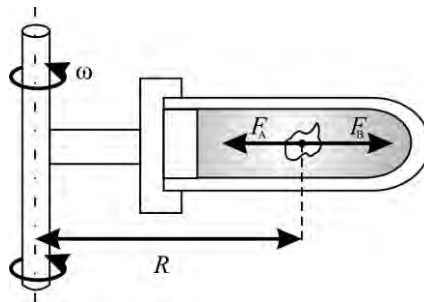
$$F_{\partial} = \frac{m_0 v^2}{r} = m_0 \omega^2 r = \rho_0 V \omega^2 r, \quad (5.22)$$

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  $F_e$ , яка прикладена до зв’язку (нитки чи дроту) і спрямована від осі обертання:

$$F_e = \frac{m v^2}{r} = m \omega^2 r = \rho V \omega^2 r, \quad (5.23)$$

де  $m$  – маса частинки;  $V$  – об’єм частинки.



**Рис. 5.4. Пробірка з розчином частинок, що обертаються навколо вертикальної осі з кутовою швидкістю  $\omega$  (пояснення в тексті)**

Рідке середовище характеризується в’язкістю, внаслідок чого виникає сила опору  $F_{\eta}$ , пропорційна швидкості руху частинки:

$$F_{\eta} = \mu \omega = 6\pi\eta r v, \quad (5.24)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $\eta$  – в’язкість.

Через деякий час сили, що діють на частинки, зрівноважуються:

$$F_g = F_\partial + F_\eta, \quad (5.25)$$

звідки:

$$6\pi\eta r v = \omega^2 r V(\rho - \rho_0), \quad (5.26)$$

або:

$$v_{\text{цф}} = \frac{2}{9} \omega^2 r(\rho - \rho_0)r^2/\eta. \quad (5.27)$$

Порівнюючи вирази (5.26) і (5.27), можна впевнитися в тому, що швидкість руху частинки у полі доцентрової сили ( $v_{\text{цф}}$ ) у багато разів більша, ніж у гравітаційному полі Землі ( $v_{\text{сг}}$ ):

$$\frac{v_{\text{цф}}}{v_{\text{сг}}} = \frac{\omega^2 r}{g}. \quad (5.28)$$

Наприклад, якщо пробірка в центрифугі радіусом 10 см обертається зі швидкістю 60000 обертів за хвилину, відношення  $\frac{v_{\text{цф}}}{v_{\text{сг}}}$  становить близько 400000.

Техніка ультрацентрифугування дає можливість розділити кров на три фракції: на дні кювети розміщуються еритроцити; далі розташований шар лейкоцитів і тромбоцитів; у верхній частині кювети міститься плазма крові. Таким чином, можна визначити відносну кількість складових частин крові і показник гематокриту відносного співвідношення формених елементів крові і плазми.

### Приклад

Центрифуга забезпечує 60000 об/хв. Визначити, у скільки разів швидкість седиментації частинок під час ультрацентрифугування перевищує швидкість седиментації частинок у гравітаційному полі Землі. Радіус обертання – 10 см.

### Розв'язання

Кутова швидкість  $\omega$  пов'язана із числом обертів  $\nu$  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 під час ультрацентрифугування 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:

$$\frac{V_e}{V_{\text{гп}}} = 402841.$$

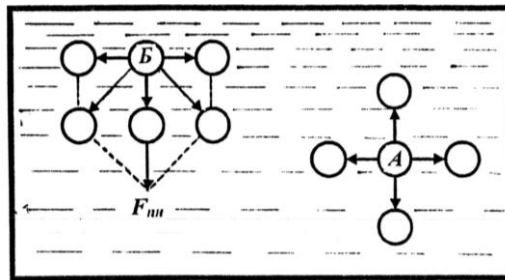
### Контрольне завдання

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

Відповідь: 322273.

### 5.6. ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ

Розглянемо молекулу *A*, розташовану всередині рідини (рис. 5.5). З різних боків її оточує однакова кількість сусідніх молекул, через що результуюча сил, що діють на молекулу, дорівнює нулю. Щодо молекули *B*, яка знаходиться в поверхневому шарі рідини, то результуюча сил, які діють на таку молекулу, не дорівнює нулю, оскільки концентрація молекул у повітрі над рідиною значно менша концентрації молекул у рідині.



**Рис. 5.5. Взаємодія молекул поверхневого (А) та глибинного (Б) шарів рідини з оточуючими молекулами**

Причому результуюча сила направлена до середини рідини перпендикулярно її поверхні, через що поверхневий шар рідини 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, яка здійснюється за рахунок кінетичної енергії молекул і витрачається 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, які зумовлюють скорочення поверхневої плівки рідини, називають *силами поверхневого натягу*.

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

$$F = \sigma \cdot l, \quad (5.29)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу;  $l$  – довжина межі рідини.

Коефіцієнт поверхневого натягу чисельно дорівнює силі поверхневого натягу, розрахованій на одиницю довжини контуру, що обмежує поверхню рідини; 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. 5.1, а залежність коефіцієнта поверхневого натягу води від температури – у табл. 5.2.

### 5.1. Коефіцієнти поверхневого натягу рідин. Залежність коефіцієнта поверхневого натягу води від температури

Рідина	Коефіцієнт поверхневого натягу $\sigma$ , Н/м	Температура, °С	Коефіцієнт поверхневого натягу $\sigma$ , Н/м
Вода	$72,8 \cdot 10^{-3}$	0	$75,6 \cdot 10^{-3}$
	$36,4 \cdot 10^{-3}$	20	$72,8 \cdot 10^{-3}$
	$26,0 \cdot 10^{-3}$	60	$66,2 \cdot 10^{-3}$
		100	$58,9 \cdot 10^{-3}$
Рицинова олія	$22,8 \cdot 10^{-3}$		
Нафта			
Спирт етиловий	$22,6 \cdot 10^{-3}$		
Спирт метиловий			
Мильний розчин	$25,0 \cdot 10^{-3}$		

#### Контрольне завдання

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.

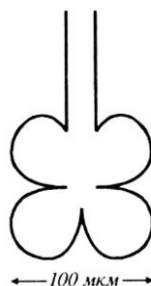
*Відповідь:*  $2 \cdot 10^3$  Н/м<sup>2</sup>.

Речовини, які зменшують поверхневий натяг рідини, називають *поверхнево-активними*. Вивчення поверхневого натягу допоможе зрозуміти принципи боротьби з личинками малярійних комарів у водоймах на основі застосування поверхнево активних речовин.

#### 5.6.1. Поверхневі явища в легенях

Поверхня легень має специфічну рельєфну форму і велику площу для забезпечення кращого газообміну.

Зображення елементарної структури легень (*альвеоли*) наведено на рис. 5.6.



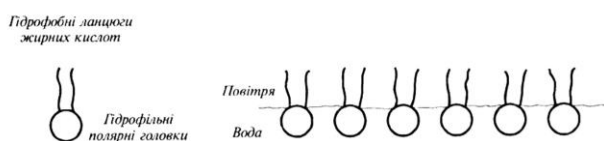
**Рис. 5.6. Елементарна структура легень альвеола**

Під час нормального функціонування легень цей значний тиск компенсується поверхневим натягом, що виникає на поверхні легень.

Підвищення поверхневого натягу може привести до небезпечного респіраторного захворювання – *гіаліново-мембранної хвороби новонароджених*.

Запобігти цьому захворюванню можна за рахунок внесення поверхнево-активних речовин, які зменшують поверхневий натяг.

Однією з таких речовин є *фосфатидилхолін*, молекули якого складаються із гідрофільних полярних головок і гідрофобних ланцюгів жирних кислот. Полярні головки знаходяться у контакті з водою, тоді як жирні кислоти залишаються у повітрі (рис.5.7).



**Рис.5.7. Розташування гідрофільних полярних головок і гідрофобних ланцюгів жирних кислот на межі поділу «повітря-рідина»**

Результатом дії такого граничного молекулярного шару є зменшення коефіцієнта поверхневого натягу від  $70 \cdot 10^{-3}$  Н/м до  $30 \cdot 10^{-3}$  Н/м.

**Приклад**

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

**Розв'язання**

Сила поверхневого натягу рідини визначається для шести кінцівок водомірки як:

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

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

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

Відповідь:  $27,5 \cdot 10^{-5}$  Н.

### 5.6.2. КАПЛЯРНІ ЯВИЩА

Трубки з дуже вузьким внутрішнім каналом називаються *капілярами*. Рідина в капілярі піднімається або опускається на таку висоту  $h$ , при якій тиск стовпа рідини (гідростатичний тиск)  $\rho gh$  врівноважується надлишковим тиском  $\Delta p$ .

Формула Лапласа – додатковий тиск, зумовлений кривизною поверхні рідини, визначається так:

$$\Delta p = \pm \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (5.30)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу;  $R_1$  і  $R_2$  – радіуси кривизни двох взаємно перпендикулярних перерізів поверхні рідини (рис. 5.8).

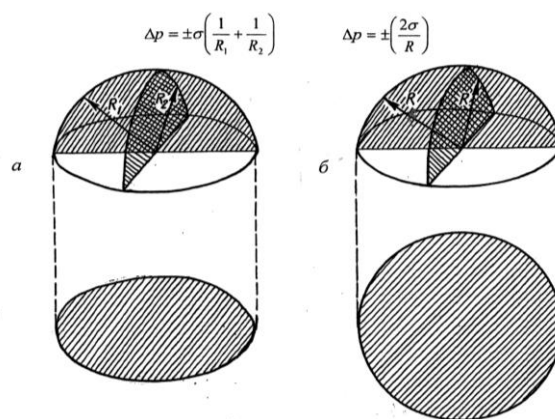


Рис. 5.8. Форма меніска в капілярі: *а* – еліптична ( $R_1 \neq R_2$ ); *б* – сферична поверхні ( $R_1 = R_2 = R$ )

Додатковий тиск береться зі знаком “+”, якщо поверхня опукла, зі знаком “-” – якщо поверхня ввігнута. У випадку сферичної поверхні ( $R_1 = R_2 = R$ ) формула Лапласа має вигляд:

$$\Delta p = \pm \frac{2 \cdot \sigma}{R}. \quad (5.31)$$

## 5.7. Гідродинаміка рослин

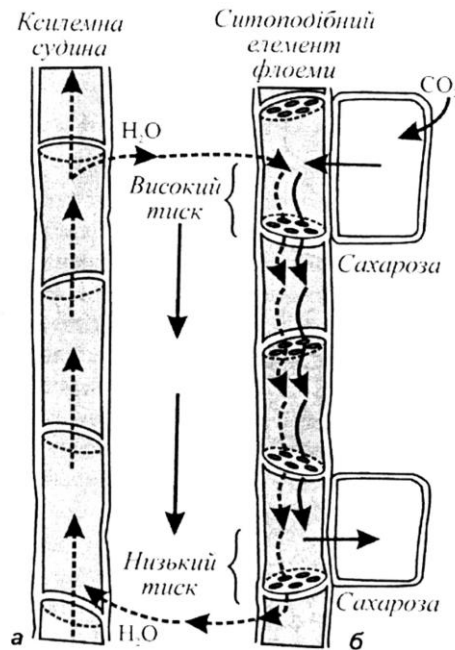
### 5.7.1. Ксилема

Систему, що забезпечує постачання води та мінеральних речовин з ґрунту у верхні частини рослини, називають *ксилемою*. Ця тканина складається з провідних елементів – трахеїд, волокон та елементів судин, що утворюють довгі ряди вздовж розташованих клітин. Діаметри провідних елементів ксилеми варіюють у діапазоні 10-500 мкм для різних видів рослин, а довжина може становити від декількох сот мікрометрів до двох і більше метрів. Через те, що ці провідні елементи позбавлені протопластів і клітинних оболонок, опір проходженню через них води та розчинів дуже малий. Спрощений вигляд провідного елемента ксилеми наведено на рис. 5.9,а.

### 5.7.2. Механізми ксилемного транспорту

Якщо помістити вузьку трубку (*капіляр*) одним кінцем у рідину, то внаслідок змочування або незмочування рідиною стінок капіляра кривизна поверхні рідини (меніска) стає суттєвою, через що над поверхнею утворюється значний додатковий тиск. Притягання між молекулами рідини називають *когезією*, тоді як притягання між рідиною і твердим тілом (стінками капіляра) – *адгезією*. Коли взаємодія рідини зі стінкою виявляється значною, відбувається

змочування стінки рідиною; коли ж міжмолекулярні когезійні сили в рідині значно перевищують адгезію між рідиною та стінкою, має місце *незмочування* стінки рідиною. Розглянемо капіляр, занурений у змочуючу рідину.



**Рис.5.9. Спрощений вигляд провідних елементів рослини: а – ксилеми; б – флоєми**

Сили притягання, які виникають між молекулами рідини і капіляра, примушують рідину підійматися по стінці капіляра, що призводить до викривлення поверхні рідини і утворенню негативного тиску. Внаслідок цього рідина підіймається по капіляру, доки гідростатичний тиск не зрівноважить додатковий тиск. Умову рівноваги можна описати за виразом:

$$\frac{2\sigma}{R} = \rho gh, \quad (5.32)$$

де  $\rho$  – густина рідини;  $R$  – радіус кривизни меніска;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $h$  – висота, на яку підіймається рідина.

Звідси можна визначити висоту піднімання рідини:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}, \quad (5.33)$$

де  $r = R \cos \theta$  – радіус капіляра,  $\theta$  – крайовий кут (рис. 5.10).

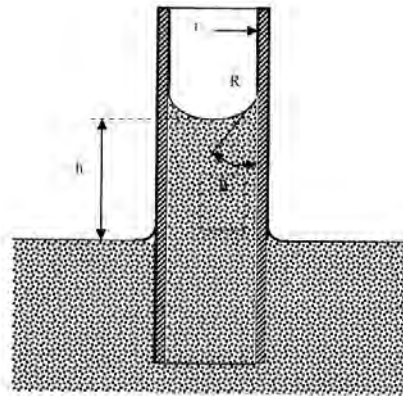


Рис. 5.10. Величини, необхідні для розгляду капілярного піднімання води

Розглянемо на конкретному прикладі судину ксилеми радіусом 20 мкм: згідно з формулою (5.33) вода в судині підійметься на висоту:

$$h = \frac{2 \cdot 72,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1} \cos 90^\circ}{998,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = \frac{1,49 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2}{20 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}} = 0,745 \text{ м.}$$

Отже, додатковий тиск у судинах ксилеми не здатний забезпечити піднімання рідини в рослинах висотою більше одного

метра. На великих відстанях переносом води керує об'ємний потік, який забезпечується градієнтом тиску.

Кількісно цей об'ємний потік води  $J_v$  для циліндричних трубок, таких як клітини ксилеми радіусом  $r$ , описується рівнянням Пуазейля в диференціальній формі:

$$J_v = \left( \frac{\pi r^4}{8\eta} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad (5.34)$$

де  $\eta$  – в'язкість рідини;  $\frac{\partial p}{\partial x}$  – градієнт тиску.

З рівняння видно, що об'ємний потік суттєво залежить від радіуса трубки: якщо збільшити радіус удвічі, швидкість об'ємного потоку води збільшиться у  $2^4 = 16$  разів. Таким чином, керований градієнтом тиску об'ємний потік води є домінуючим механізмом руху води на великі відстані.

Застосуємо рівняння Пуазейля для оцінки об'ємної швидкості протікання води через одиницю площі ( $S = \pi r^2$ ) судини ксилеми, який у цьому разі визначається за виразом:

$$J_v/S = \left( \frac{r^2}{8\eta} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right). \quad (5.35)$$

Якщо середній потік води в ксилемі становить  $10^{-3}$  м/с, коефіцієнт в'язкості води  $\eta = 10^{-3}$  Па·с, а радіус ксилеми  $r = 20$  мкм =  $2 \cdot 10^{-5}$  м, то градієнт тиску, що задовольняє рівнянню (5.35), становитиме  $\frac{\partial p}{\partial x} = -2 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup> =  $-2 \cdot 10^4$  Па/м.

Зміна гравітаційного потенціалу на кожний метр висоти становить (як було встановлено в попередніх розділах)  $\rho gh/h = 10^4$  Па =  $10^{-2}$  МПа. Тобто, градієнт тиску здатний перевищити силу тяжіння і підтримати рух води в ксилемі.

### 5.7.3. Флоема

Під час фотосинтезу відбувається перетворення світлової енергії на хімічну, яке супроводжується утворенням вуглеводів з вуглекислого газу. Хоча невелика кількість сполук вуглецю або *фотоасимілятів* іде на забезпечення процесів росту та метаболізму листя, основна кількість передається нефотосинтетичним органам та тканинам. Процес транспортування фотоасимілятів на довгі відстані називається *транслокацією*. Розподіл більшості органічних речовин (у першу чергу – фотоасимілятів) по рослині здійснюється завдяки *флоемі* – другій провідній системи рослини. Флоема являє собою тканину, що складається з кількох типів клітин. Але на відміну від ксилеми провідні елементи флоєми містять протоплазму (рис. 5.9,б). Ці провідні елементи називають *ситоподібними клітинами* або *ситоподібними трубками*. Вони з'єднані в єдиний ланцюг, який утворює транспортування органічних речовин. Розчинені речовини переміщуються по флоемі – продукти фотосинтезу рухаються від листя до кореневої системи, тоді як цукри у протилежному напрямку, від кореневої системи до верхівки рослини.

### 5.7.4. Механізми транслокації по флоемі

Будь-яка теорія, яка б могла пояснити механізми транслокації фотоасимілятів та органічних речовин по флоемі, повинна враховувати та пояснювати структуру ситоподібних елементів

флоеми, високу (50-250 см/г) швидкість транслокації на великі відстані, одночасне транспортування речовин у протилежних напрямках, початковий процес перенесення асимілятів з мезофільних клітин листка до ситоподібних елементів флоеми (*завантаження флоеми*), транспортування асимілятів по ситоподібних елементах та остаточне перенесення асимілятів із ситоподібних елементів до клітин запасуючих органів (*розвантаження флоеми*).

Найбільш вірогідною вважається *гіпотеза потоку під тиском* [Münch, 1930], яка базується на переносі маси розчиненої речовини від джерела до запасуючих органів за рахунок градієнта гідростатичного (тургорного) тиску в ситоподібних елементах (див. рис. 5.9). Завантаження флоеми відбувається завдяки транспортуванню цукрів від мезофілу через тонкі пучки, серединну жилку та листовий черешок до ситоподібних елементів флоеми. Збільшення концентрації розчинених речовин у цих елементах призводить до зменшенню водного потенціалу та відповідного осмотичного поглинання води з сусідньої ксилеми. Гідростатичний (тургорний) тиск на цьому кінці флоеми збільшується. В той же час, на протилежному кінці флоеми цукри покидають флоему, а вода повертається в ксилему. Тиск зменшується, а в цілому вздовж флоеми утворюється градієнт тиску, який обумовлює потік рідини від листя до коріння. Цей градієнт описується законом Пуазейля. На користь цієї гіпотези свідчать результати експериментального вимірювання гідростатичного тиску в ситоподібних елементах, який становить  $2 \cdot 10^6$  Па [Нобел, 1973].

Ще одна гіпотеза [Fensom, 1975; Spanner, 1975] передбачає участь електроосмосу у транспортуванні речовин по флоемі. Вважається, що рушійною силою переміщення цукрів з однієї

ситоподібної трубки в іншу через пори є транспорт іонів  $K^+$ , який супроводжується виникненням електричних полів на кожній ситоподібній пластинці. Існують ще гіпотези, що пояснюють механізми транспортування асимілятів по ситоподібних елементах – рух протоплазми, перистальтика (скорочення) клітинних стінок, мікроелектрокінез, поверхнево-активний рух та інші, але вони не достатньо переконливі [Люттге, Хигинботам, 1984].

### **Приклад**

Визначити висоту піднімання води у капілярі ґрунту діаметром 10 мкм, якщо крайовий кут дорівнює нулю, а температура ґрунту становить 20 °С.

### **Розв'язання**

Підставляємо числові дані у рівняння (4.38):

$$h = 2(72,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2)(\cos 0) / (998,2 \text{ кг/м}^3)(9,8 \text{ м/с}^2)(5 \cdot 10^{-6} \text{ м}) = 2,98 \text{ м.}$$

### **Контрольне завдання**

Чи здатний додатковий тиск у ксилемі дерева *Sequoia* забезпечити піднімання рідини на висоту 100 м, якщо густина рідини становить  $10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а коефіцієнт поверхневого натягу  $70 \cdot 10^{-3}$  Н/м?

## **5.7.5. Вимірювання потоків соку**

*Сік* – це рідина, що транспортується в ксилемі через трахеїди та судини або у флоемі через ситоподібні трубки. Ксилемний сік містить воду та мінеральні солі, а флоемний – воду та цукри.

*Потік соку* вимірюється у літрах, що проходять протягом дня. Процес вимірювання потоку соку важливий з точки зору оцінювання водного балансу рослини та визначення загальної швидкості використання води рослиною (зазвичай деревом).

Всі основні методи вимірювання потоків соку базуються на

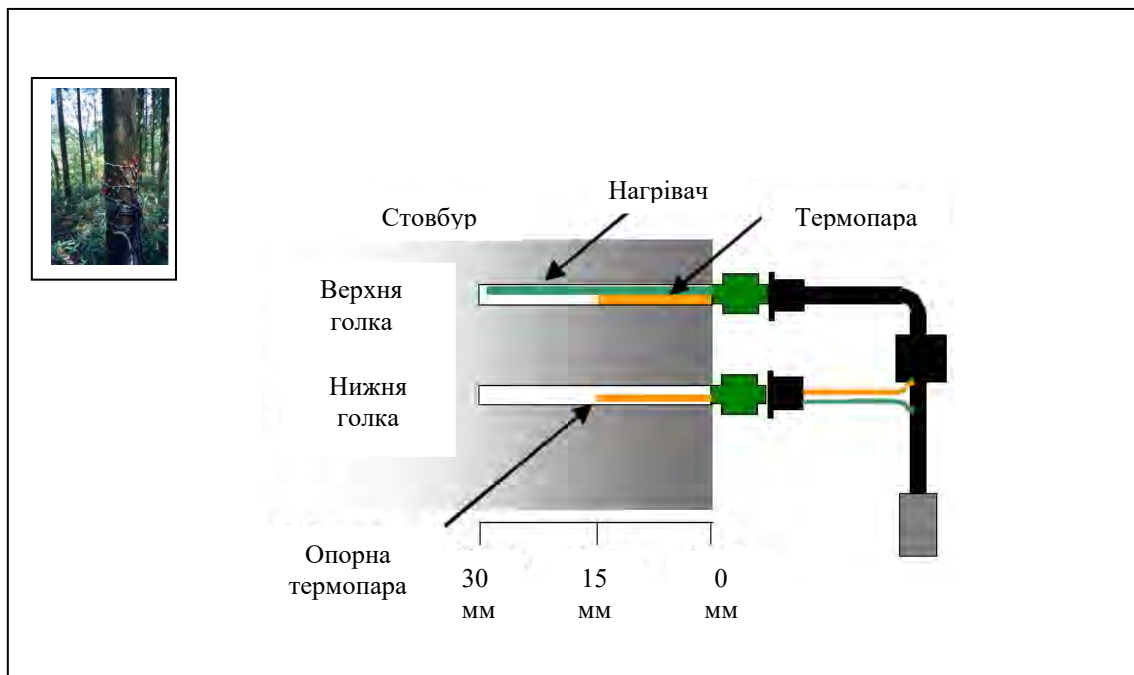


нагріванні транспіраційного потоку з подальшим визначенням швидкості поширення теплоти вздовж стовбура.

Одним з поширених є *метод теплової дисипації*, який був запропонований А. Граньє у 1985 році [Granier,1985]. Суть методу полягає у зануренні у стовбур дерева двох пустотілих голок, які містять термопари – робочу та опорну (рис. 5.11). Одна голка (з робочою термопарою) має нагрівник, завдяки якому утворюється потік теплоти. Швидкість потоку соку  $F$  визначається за виразом:

$$F = 0.428S_a[(T_m - T_d)/T_d]^{1,231}, \quad (5.36)$$

де  $S_a$  – площа потоку на висоті вимірювання;  $T_m$  – максимальна різниця температур, отримана вночі, коли потік соку відсутній;  $T_d$  – дійсна різниця температур вдень.



**Рис. 5.11. Сенсор Граньє [Granier,1985].**

Сенсори Граньє характеризуються невисокою вартістю, механічною міцністю та надійністю.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

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

## APPENDIX III

### MECHANOBIOLOGY

*Mechanobiology* is a branch of biophysics that studies the mechanisms of influence of external mechanical factors on living organisms and the reaction of organisms to these factors (mechanoreception).

#### **Mechanoreception in animals**

A complex system that converts the energy of external stimuli into a sequence of nerve impulses, forms a sensory system or analyzer (an obsolete term - the sense organ). The sensory system consists of the receptor, the centripetal pathway and the brain. Factors that excite sensory impressions of a certain quality are called stimuli. Cells in the sensory system that are able to respond to stimuli are called receptors.

*Mechanoreceptors* are specialized sensitive formations designed to transform a mechanical stimulus into nerve cell activity that causes a nerve impulse to propagate.

Mechanoreceptors are able to respond to various mechanical stimuli and perform: 1) tactile sensitivity (perception of pressure, changes in pressure, touch, vibration); 2) vestibuloreception (balance); 3) interreception (coordination of movements of individual parts of the body).

#### **Mechanoreceptors of the skin**

There are a large number of mechanoreceptors in the skin. If the skin is covered with hair, it is characterized by free nerve endings, Merkel's discs, nerve endings around the hair follicles. In skin devoid of hair,

mechanoreceptors are free nerve endings, Merkel's discs, Meissner's body and Pacini's. Krause flasks can be found in the subpapillary layer of the dermis; in the depths of the dermis there are Rufini's bodies.

Free nerve endings are the most common skin receptors; they are part of a system of developed networks of nerve fibers located in the surface structures of the dermis. Free nerve endings often branch and can occupy a large area.

Merkel's discs are located in the lower part of the epidermis. Fibers extending from several Merkel disks can combine into a single fiber to form a single tactile corpuscle (a tactile one that is tactile) with a diameter of 100–500  $\mu\text{m}$  that rises above the surface of the skin. Each Merkel cell connects to the terminal (terminal) disk of the afferent (sensitive) nerve fiber, which conducts impulses from the periphery to the central nervous system. The number of Merkel disks in one corpuscle can reach 30-50. This type of mechanoreceptors can be found, for example, on the lips of animals.

*Nerve endings around the hair* are non-myelinated (ie without myelin sheaths consisting of a mixture of lipid and protein substances) nerve fibers that densely intertwine the structures of the hair follicle. Each hair is surrounded by several fibers; at the same time, the same fiber can entangle a large amount of hair. For example, in a rabbit's ear, one fiber covers about 300 hair follicles in an area of 1  $\text{cm}^2$ . In animals, there are sensitive hairs in the hair - vibrissae, which are localized around the mouth. Each vibrissae can be surrounded by more than 100 fibers, which ensures its high sensitivity.

*Meissner's bodies* are found in the skin, which is devoid of hair. They are located in the papillary layer of the dermis and have a conical or elliptical shape. The length of Meissner's bodies is 90-120  $\mu\text{m}$ . Externally, each body

is covered with a thin capsule (shell), which is closely connected with the surrounding tissues.

*Pacini bodies* are encapsulated endings in the skin measuring 4–5 mm long and 1–2 mm wide (encapsulation is the process of shell formation). Located in the lower layers of the dermis and in the subcutaneous fat. They consist of an outer capsule, an inner bulb, and an unmyelinated nerve ending that is connected to a soft nerve fiber. Each of Pacini's bodies is entwined with thick, soft fibers.

*Krause flasks* are located in the subpapillary layer of the dermis and are spherical formations covered with a capsule. The internal environment is permeated by an extensive network of afferent nerve endings.

*Rufini's bodies* are spindle-shaped and surrounded by a capsule. The diameter of the receptor reaches 150  $\mu\text{m}$ . The basis of each Rufini body is intricately intertwined collagen fibers, which are associated with numerous branches of the afferent nerve fiber.

According to the simplest hypothesis of mechanoreceptor transformation, the stimulus that directly affects the mechanoreceptor is the stretching or deformation of the surface cell membrane, which leads to changes in the permeability of ion-selective channels.

### **Vestibuloreception**

*Vestibuloreception* is the perception of changes in the speed and direction of movement of the body in space with the help of vestibuloreceptors - hair cells of the membranous labyrinth of the inner ear. This type of reception is realized by means of the vestibular device consisting of a vestibule and three semicircular channels located in mutually perpendicular planes.

In the vestibule cavity, there are receptor cells with hairs immersed in a jelly-like mass containing calcium carbonate crystals or otoliths. If the

animal's head is tilted, the semicircular canals gain acceleration, while the endolymph tends to remain in place due to the force of inertia.

As a result, the otoliths displace and bend the hairs, which excites the nerve cells that are connected to the receptor cells and transmits information to the brain about the position of the head or body in space.

Both inner ears are a bilateral (bilateral) receptor system: if during the rotation of the head the left semicircular canals become accelerated, the right canals become decelerated. In the animal's brain there is a comparison and analysis of the frequency of reference of biopotentials coming from both systems.

### **Interreception**

Receptors localized in the cardiovascular system and internal organs, which are able to perceive stimuli of various natures, are called *interreceptors*. Interreceptors are divided into proprioceptors and visceral receptors.

*Proprioceptors* signal the relative position of different parts of the body. These types of mechanoreceptors are represented by muscle spindles and Golgi tendon organs.

Muscle spindles are oriented parallel to the skeletal muscles and are connected to the tendons; they provide information about muscle length.

The muscle spindle is an encapsulated group of thin and specialized muscle threads. Because the capsule where these threads are located has a spindle-shaped shape, these threads are called intra-spindle. They are connected to tendons; moreover, the ends of these threads contain contractile proteins, while the middle part is devoid of them. The afferent nerve of the muscular spindle is located in the middle part of the spindle. The polar ends of this spindle have their own motor nerves, called gamma-motor neurons (as opposed to alpha-motor neurons, which are connected to

muscle fibers. During contraction or elongation of skeletal muscle, the length of the middle part of the spindle changes. leads to the emergence of biopotentials, the frequency of which depends on the level of change in the length of the middle part.

*The Golgi tendon* is a thin capsule inside the tendon that connects 15-20 muscle fibers.

Each organ has an afferent nerve that sends potentials to the central nervous system during muscle contraction. The Golgi organ responds to mechanical stress that occurs in the tendon. The frequency of reference potentials is proportional to the voltage that occurs in the tendon.

*Visceral receptors* provide information about the movement or condition of internal organs (stomach, intestines, bladder), as well as signal the state of the internal environment, which is associated with feelings of hunger (blood sugar) or thirst (increased osmotic pressure in blood plasma). Thus, all mechanoreceptors differ not only in structure, but also in the ability to respond to various mechanical stimuli - touch, pressure, pressure change, compression, bending, tension, linear or rotational acceleration, change in muscle length or mechanical stress occurring in muscles.

### **Mechanoreception of fish**

Fish perceive external mechanical factors and react to them with the help of special structures, namely: Lorentzini ampoules, Savi vesicles and actually seismic organs (channels, grooves), which contain receptor elements - neuromasts or seismic sensory buds. The terms "lateral line" and "lateral line organs" are obsolete.

Along the body of more fish, as well as in the head, is a seismic sensor system, which is a sequence of channels opened at a certain interval for water. These canals consist of viscous, gelatinous cone-shaped structures

(cupulae) that contain hairs associated with sensitive cells (neuromasts). A nerve ending is suitable for each such cell.

The flow of moving water causes deformation of the hairs, which contributes to the formation of electrical potentials and their transmission to the nervous system. Such seismic sensing systems, which are able to respond to minimal water displacements, provide information on the direction of water flow and the presence of turbulent currents caused by the presence in the aquatic environment of members of the pack or enemies.

### **Mechanoreception of bees**

Bee mechanoreceptors respond to mechanical deformations of a part of them during contact or contact with a solid substrate, exposure to air flow, or act as a proprioceptor that responds to deformations or stresses in muscles and the external skeleton.

Bee mechanoreceptors are located on the antennae, mouth appendages, limbs, abdomen surface. Sensitive elements of mechanoreceptors are senses, namely: sensilla trichodea, s.scolopophora, s.campaniformia, s.schaetica.

Trichoid senses (s.trichodea), which perform the functions of touch receptors, consist of two parts - a specialized formation (hair) and a nerve ending that is in contact with this formation.

Irritation of the hair is transmitted to the nerve cell located at its base and through its processes enters the central nervous system. Trichoid senses are placed all over the bee's body. With the help of the senses located on the antennas, the bee has the opportunity to detect and analyze microreliefs on the surface of flowers. The dimensions of the senses (about 10  $\mu\text{m}$ ) are commensurate with the dimensions of these microreliefs, which may vary



slightly from the edge of the flower to the center; analysis of these changes provides information about the location of nectar.

Trichoid senses, located at the junction of the head and chest, also perform the functions of gravireceptors.

The pressure of the head on the chest depends on the position of the bee's head relative to the body; By recording the level of pressure with the help of hairs, the bee is able to control the position in the space of its body, as well as to measure the angles of hexagonal cells during their construction. When constructing hexagonal cells (hexagons have the smallest perimeter and at the same capacity compared to cells of other shapes determine the smallest amount of building material) bees measure angles using special sense organs located at the joint of the head and chest. In the normal state, the head rests on two chitinous protrusions of the chest above the center of mass. When the bee is placed vertically upside down, its lower part presses on the chest, and sensitive hairs perceive this pressure; when placed upside down, the situation changes.

Thus, by recording the level of pressure of the head on the chest with the help of hairs, the bee is able to control the position in the space of its body and honeycombs.

The bee's response to mechanical stresses and strains is due to the senses located on the head and limbs (s.scolopophora), as well as on the sharp end of the sting (s.campaniformia). Unlike trichoids, these senses specialize as proprioceptors of elastic cuticle deformities.

Located along the lines of deformation, they transmit signals about the intensity and direction of curvature of the cuticle. Morphologically, they differ from the trichoid senses because they lack a hair, which is transformed into a small oval cap, to which the bell-shaped end process of a sensitive cell fits. Bell-shaped senses in the worker bee are on the wings

(their number is 1510), limbs (450), stings (100); in queens - on the wings (1310) and limbs (450); in drones - on the wings (1998) and limbs (606). Changing the tension of the cuticle near the senseilla causes either a decrease or increase in the curvature of the cuticular dome.

The honey bee is able to estimate the speed of air flows and their direction during flight thanks to sensitive hairs that act as aerodynamic sensors. These hairs are located on the complex eyes of the bee, on some parts of the head and wings.

Estimation of speed of movement concerning a terrestrial surface occurs visually, at the expense of photoreceptors. Energy expenditure during flight allows the bee to have an idea of the distance of flight. In addition, the bee receives information through pressure receptors located on the walls of the honeycomb: the pressure decreases if the sac is emptied.

The reaction of the bee to the vibration of the substrate on the surface of which it is located, occurs due to specialized organs (scolopophora), located in the upper parts of the legs of the forelimbs. Sensitive elements of these organs (scolopidia) are able to register oscillations of the substrate. These receptors are used during the communication of bees in a closed space of the hive.

Another specialized form of mechanoreceptors is the Johnston organ (s.schaetica), which is located on the second joint of the antenna. Stimulation of this organ occurs when the antennae feel various objects and the movement of the bee in the air.

### **Tigmonastic movements of plants**

Nastic movements occur in response to any external factors - touch, damage, mechanical vibration, light, chemicals, to which the plant responds with rapid movements. The direction of nastic

movements does not depend on the direction of the stimulus. Tigmonastic are movements caused by touch. A special category consists of rapid nastic movements - seismonasties, arising from a light blow or shock. Their mechanism is associated with the instantaneous evoked potential of action, increased permeability of membranes and loss of ability of cells of leaf joints to hold osmotically active substances and water, as a result of which turgor sharply falls. Such movements are characteristic, for example, of the well-known plant *Mimosa pudica*, which folds the leaves in response to touch after only 0.1 s. The irritation spreads at a speed of 40-50 cm / s.

Such rapid movements in mimosas can be used to protect against insects and other animals, to counteract dry winds in order to preserve water in arid areas where it lives.

The reaction is extremely fast, the external mechanical stimulus perceived by the sensory cells of the petiole is converted into an electrical signal that propagates rapidly through the tissue until it reaches the locomotor cells of the leaf cushion near the base of the leaf, which immediately change their volume. Apparently, the movement of organs in mimosa is determined by changes in turgor pressure in these cells. Changing the volume of cells leads to the release of potassium ions and tannin-like substances from the cell.

*Mimosa nuttallii*, *Codariocalyx motorius*, *Chamaecrista fasciculata*, *Chamaecrista nictitans*, *Schrankia roemeriana*, *Neptunia lutea* can also be considered plants that move leaves in response to touch.

Tigmonastic can also be considered movements that show insectivorous plants in response to touch - for example, the Venus

flytrap *Dionaea muscipula*. It gets its prey, mainly insects and arachnids, by capturing the victim with a structure formed by the end of each of the plant's leaves and initiated by tiny hairs on their inner surfaces. When an insect or spider crawls along the leaf, it comes into contact with the hairs, causing the trap to close. It is believed that the rapid closure of the leaves of the plant is associated with irreversible stretching of cells and changes in the acidification of cell walls.

The telegraph plant or, alternatively, the dancing plant *Codariocalyx motorius* (or *Desmodium gyrans*) belongs to the legume family. This is one of the few plants in nature that can make rapid movements. Moreover, these movements are leaf, and can be caused by a variety of factors, including touch.

Round-leaved sundew (*Drosera rotundifolia*) is equipped with leaves, which are sewn on top with sticky bright red glandular hairs with head thickenings on the top, which emit transparent and shiny, like dew, drops of sticky mucus (that's why the plant is called sundew). The sticky liquid is used to capture and digest insects *Utricularia vulgaris* is an aquatic plant whose leaves are dissected into narrow lobes, where small oval hunting bubbles with air are located. Catches small insects, crustaceans, algae.

*Aldrovanda vesiculosa* also belongs to insectivorous plants. At irritation of the gentle hairs which are on a leaf surface, the last develops along, thus edges are one above another. Small aquatic larvae and crustaceans that fall into this trap are digested by the plant.

Tigmonastic movements include the twisting of tendrils, with which some plants (*Passiflora coerulea*, *Pisum sativum*) are able to support

themselves in space. The tendrils perform circular motions during their growth in order to increase the probability of contact with the potential support, as a result of which they change the speed and direction of growth so as to catch the support and pull the plant. If you stroke the underside of the pea tendril *Pisum sativum* with a glass rod, the cells of the underside begin to shrink and the cells of the upper side stretch, after which all the cells stretch, but the cells of the upper side stretch faster. Apparently, hormones such as auxin, which stimulates growth, and ethylene, which increases membrane permeability, are involved in the regulation of cell size changes; the increase in ethylene in the cells of the lower side is accompanied by the loss of solutes from the vacuole, which causes compression of the cells.

## **HYDRODYNAMICS**

Hydrodynamics is a branch of physics that studies the motion of liquids, their interaction with each other and the solids that flow around them.

### **Pressure**

Pressure  $p$  is a physical quantity that characterizes the intensity of normal (perpendicular to the surface) forces with which one body acts on the surface of another. The average value of pressure on any plane is equal to the ratio of the average value of the force acting perpendicular to this plane, to its area:

$$p = \sum_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS}.$$

If the forces are distributed along the surface evenly, then the pressure  $p$  on any part of the surface is equal to:

$$p = \frac{F}{S},$$

where  $F$  is the sum of forces applied perpendicular to the surface;  $S$  is the area of this part of the surface.

The unit of pressure in the SI system is Pascal ( $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ ).

### **Water pressure**

Absolute pressure  $p$  at a depth  $d$  from the surface of the liquid exceeds the pressure  $p_A$  by the value of  $\rho gh$ , which corresponds to the pressure forming the weight of the column of liquid  $d$  and the area  $S$ :

$$p = p_A + \rho gd,$$

where  $p_A$  is the atmospheric pressure;  $\rho$  is the density of the liquid;  $d$  - depth.

Since the fluid pressure depends only on the depth, any increase in surface pressure is transmitted to each point of the fluid. This fact was formulated in 1663 as Pascal's law: *the pressure on the surface of a liquid, which is formed by external forces, is transmitted by the liquid equally in all directions. This law has found its application in the hydraulic press.*

### **Archimedes' law**

The force of pressure on the lower layers of the liquid always exceeds the force acting on the upper layers. Thus, a repulsive force acts on a body immersed in a liquid. The law of statics of liquids and gases, or Archimedes' law, *states that any body immersed in a liquid (or gas) is subjected to an ejection force from that liquid (or gas) equal to the weight of the liquid (gas) in the volume immersed. part of the body directed vertically upwards and applied to the center of gravity of the ejected volume.* The repulsive force is called the Archimedean, or hydrostatic lifting force.

### **The movement of an ideal fluid**

An ideal is a fluid whose individual elements move without friction and which is incompressible.

Incompressible is a liquid whose density has become.

A flow is called the motion of a liquid, and a flow is called the moving fluid itself. If the velocity of the fluid at each point in the volume does not change over time, such fluid flow is called stationary. Graphically, the motion of a liquid is represented by flow lines - such lines, the tangents of which coincide in the direction of the velocity vector at a given point of flow. The part of the fluid bounded by the flow lines is called the flow tube.

Consider a flow tube of variable cross section. For an ideal fluid moving in this tube, the following laws are valid.

The equation of continuity of the flow - for a stationary flow of liquid, the product of the velocity of the flow of liquid on the cross section of the flow tube is a constant value:

$$S \cdot v = \text{const.}$$

From this equation we can obtain the expression:

$$v = \frac{\text{const}}{S}.$$

*Bernoulli's equation: in a stationary flow, the total pressure, consisting of static, hydrostatic and dynamic pressures, is the value of the constant for any cross-section of the flow.*

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

where  $p$  is the static pressure, ie the pressure that the liquid forms on the surface of the body, which it flows around;  $\rho \cdot g \cdot h$  - hydrostatic pressure caused by the weight of the liquid;  $\frac{\rho \cdot V^2}{2}$  - dynamic pressure due to the movement of fluid.

For a horizontally placed tube, the Bernoulli equation has the form:

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

Thus, the total energy per unit volume of an ideal fluid in any flow section is a constant value.

### **The movement of a viscous fluid**

If during the movement of a liquid there are forces of internal friction (viscosity forces), then such a liquid is called real.

Newton's equation is the tangential force  $F$ , which causes the displacement of the fluid layers relative to each other, proportional to the



area  $S$  of the layer on which the displacement occurs, and the gradient  $\Delta v/\Delta x$  of the flow velocity:

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x},$$

where  $\eta$  is dynamic viscosity coefficient. It characterizes the resistance of a fluid to the displacement of its layers.

A fluid that obeys Newton's equation in the flow process is called a *Newtonian fluid*. For example, water is a Newtonian fluid, and a number of suspensions and solutions, including blood, are non-Newtonian fluids.

### **Movement of animals in the aquatic environment**

Water has a density that is 800 times the density of air. But due to the fact that water is an incompressible environment, aquatic animals are easily repelled by it. In addition, the density of water and the density of the body of aquatic animals are approximately the same, which makes it possible to spend almost no energy on the fight against gravity. Thus, water is an environment in which it is very easy to move, and swimming is the most effective means of transportation in the water. Two types of forces act on a body moving in the aquatic environment: inertial force  $F_{in} = \rho_e v^2 L^2$  and viscosity  $F_\eta = \eta v L$ , where  $\rho_e$  – density of water;  $v$  – the speed of the object;  $L$  is the size of the object;  $\eta$  – viscosity coefficient. The relationship between these forces depends on the size of the object and its speed. For example, for a 30 cm fish moving at a speed of about 1 m / s, the inertial force is 36 N, while the viscosity force –  $3 \cdot 10^{-4}$  N, that is, the difference is  $10^5$ . This difference is reduced 10 times in the case of a 3 mm larva moving at the same speed.

When moving at speed  $U$ , a fish of mass  $m$  repels water of mass  $M$ , which moves in the opposite direction at speed  $V$ . The impulses of fish  $mU$  and water  $Mv$  have the same magnitude, but opposite directions:

$$mU = -Mv,$$

where the speed of water will be determined as follows:

$$v = \frac{mU}{M}.$$

The work performed during the movement of fish in the water is equal to:

$$A = \frac{mU^2}{2} + \frac{MV^2}{2} = \frac{mU^2}{2} \left( 1 + \frac{m}{M} \right).$$

Thus, the greater the mass of ejected water  $M$ , the smaller the amount  $\left( 1 + \frac{m}{M} \right)$ , and, therefore, the fish moves at a higher speed  $v$ . A large mass of ejected water is provided by a large area of the tail.

The translational movement of fish in the water is accompanied by the appearance of vortices, which consistently increase in size.

The distance between the centers of the vortices does not change, and the circulation speed decreases. These vortices form a total momentum opposite to the momentum of the fish.

### **Laminar and turbulent currents**

The flow of a viscous fluid can be laminar (if the layers of moving fluid are not mixed), or turbulent (if the layers are mixed).

The fluid flow regime is characterized by the Reynolds number,

determined by the formula:

$$Re = \frac{v\rho D}{\eta},$$

where  $\eta$  – fluid viscosity;  $\rho$  – fluid density;  $D$  – tube diameter.

The transition from laminar to turbulent flow is determined by *the critical Reynolds numeric*  $Re_{кр}$ : if  $Re < Re_{кр}$ , flow is laminar; at  $Re > Re_{кр}$  the flow is turbulent.

### **Gauguin-Poiseuille law**

Consider the flow of fluid along a thin long tube. According to Bernoulli's equation, in a steady stream the total pressure of an ideal fluid along a long tube is a constant value. But in practice, there is a decrease in pressure due to the viscosity of the liquid. Newtonian fluid moves along the tube as a series of concentric annular layers, the velocities of which vary according to the parabolic law: the fluid moves faster along the axis and slower  $\square$  in the case of approaching the walls of the tube. The speed of each layer of radius  $r$  is described by the equation:

$$v(r) = v_{max}(1 - r^2/R^2),$$

where  $v_{max}$  is the speed of the fluid along the axis of the tube;  $R$  is the radius of the tube. Due to the change in the velocity of the fluid, there is a pressure difference along the length of the tube  $\Delta v = p_1 - p_2$ . Визначимо, за яким законом описується течія рідини вздовж тонкої циліндричної трубки.

Hagen-Poiseuille law: *the volume of fluid flowing per unit time through the cross section of the tube is directly proportional to the pressure difference*

$p_1 - p_2$  at the ends of the tube, the fourth degree of the radius  $R$  of the tube and inversely proportional to the tube length  $l$  and fluid viscosity  $\eta$ :

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

where  $Q = V/t$  is volumetric fluid flow rate;  $V$  □ volume of liquid.

Stokes' law: the force acting on a spherical solid of radius  $R$  that moves slowly in a viscous liquid is proportional to the viscosity coefficient □ of the liquid, the radius  $R$ , and the velocity  $v$  of the body.

$$F = 6\pi\eta Rv.$$

### Sedimentation

The application of Hagen-Poiseuille's law to the analysis of water flows in the soil through the pores indicates that the water transmission is proportional to  $R^4$ , while the cross-sectional area of the pores is proportional to  $R^2$ . Thus, one large pore allows significantly more water than several small pores with the same total cross-sectional area, due to the smaller values of the resistance forces formed by the pore walls.

Consider a particle of mass  $m$ , volume  $V$  and density  $\rho$ , immersed in a liquid medium with density  $\rho_0$ . Gravitational force acts on this particle:

$$F_{gp} = mg = V\rho g,$$

which is directed downwards, and the Archimedean force:

$$F_0 = m_0g = V\rho_0g,$$

directed upwards and which is numerically equal to the weight  $m_0g$  of the liquid expelled by the particle. The resulting force is equal to:

$$F_s = F_{zp} - F_0 = V\rho g - V\rho_0g = Vg(\rho - \rho_0).$$

If  $\rho < \rho_0$ , the resulting force is directed upwards (flow process); if  $\rho > \rho_0$ , the resulting force is directed downward (sedimentation process).

At the same time, the liquid medium is characterized by viscosity (internal friction). If a spherical particle of radius  $r$  moves, the force of resistance due to viscosity is determined by Stokes' law:

$$F_\eta = 6\pi\eta r v$$

and the sedimentation rate will be determined as follows:

$$v_{sed} = Vg(\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \frac{2}{9} g(\rho - \rho_0) r^2 / \eta.$$

The sedimentation process is used to purify water from sand, clay, organic matter, viruses, bacteria and algae.

### **Ultracentrifugation**

It should be emphasized that subcellular structures are characterized by such a low sedimentation rate in the Earth's gravitational field that sedimentation of these structures should be expected within months or years. Ultracentrifugation is used to accelerate the sedimentation process.

The technique of separating the components of complex substances and obtaining homogeneous fractions is called ultracentrifugation.

Consider a test tube with a solution of particles that rotates around a vertical axis with an angular velocity  $\omega$ . The particle is acted by centripetal (pushing) force  $F_d$ , directed to the axis of rotation:

$$F_d = \frac{m_0 v^2}{r} = m_0 \omega^2 r = \rho_0 V \omega^2 r,$$

where  $m_0$  is the mass of the ejected liquid;  $v$  is the linear velocity of the particle;  $\omega$  - circular velocity of the particle;  $V$  - volume of liquid;  $r$  is the radius of the particle.

In addition, there is a centrifugal force  $F_b$ , which is applied to the connection (thread or wire) and directed from the axis of rotation:

$$F_b = \frac{m v^2}{r} = m \omega^2 r = \rho V \omega^2 r,$$

where  $m$  is the mass of the particle;  $V$  is the volume of the particle.

The liquid medium is characterized by viscosity, resulting in a resistance force  $F_\eta$ , proportional to the velocity of the particle:

$$F_\eta = \mu v = 6\pi\eta r v,$$

where  $\mu$  – coefficient of friction;  $\eta$  – viscosity.

After some time, the forces acting on the particles are balanced:

$$F_g = F_d + F_\eta,$$

from here:

$$6\pi\eta r v = \omega^2 r V(\rho - \rho_0),$$

or:

$$v_{cf} = \frac{2}{9} \omega^2 r(\rho - \rho_0)r^2/\eta.$$

The technique of ultracentrifugation makes it possible to divide the blood into three fractions: at the bottom of the cuvette are placed erythrocytes; next is a layer of leukocytes and platelets; at the top of the cuvette contains blood plasma. Thus, it is possible to determine the relative number of blood components and the hematocrit index of the relative ratio of formed elements of blood and plasma.

### **Surface tension**

Consider molecule A, located inside the liquid. On different sides it is surrounded by the same number of neighboring molecules, so the resulting force acting on the molecule is zero. With respect to molecule B, which is in the surface layer of a liquid, the resultant forces acting on such a molecule are not zero, because the concentration of molecules in the air above the liquid is much lower than the concentration of molecules in the liquid.

Moreover, the resultant force is directed to the middle of the liquid perpendicular to its surface, so that the surface layer of the liquid forms a pressure on the entire liquid, which is the sum of all the resulting forces acting on a unit surface area of the liquid. This pressure is called molecular or internal. To move a molecule from the depth of the liquid to the surface layer requires work that is carried out due to the kinetic energy of the molecules and is spent on increasing the potential energy of these molecules. Because of this, the molecules of the surface layer of the liquid

have a higher potential energy than the molecules inside the liquid. Since the equilibrium state is characterized by a minimum of potential energy, the liquid tends to reduce the surface area. The surface layer of the liquid in this case is similar to an elastic stretched film. The stress state of the surface layer of a liquid is called the surface tension, and the forces that cause the contraction of the surface film of the liquid are called the surface tension forces.

The force of surface tension at any boundary of the liquid surface is proportional to the length of the boundary:

$$F = \sigma \cdot l,$$

where  $\sigma$  is surface tension coefficient;  $l$  is the length of the fluid boundary. The coefficient of surface tension is numerically equal to the force of surface tension, calculated per unit length of the circuit that limits the surface of the liquid; it depends on the type of liquid, impurities and temperature. As the temperature increases, the surface tension coefficient decreases as the average distance between the liquid molecules increases. Substances that reduce the surface tension of a liquid are called surfactants. The study of surface tension will help to understand the principles of control of malaria mosquito larvae in water bodies based on the use of surfactants.



## SUPERFICIAL PHENOMENA IN THE LUNGS

The surface of the lungs has a specific relief shape and a large area to ensure better gas exchange. During normal lung function, this significant pressure is compensated by the surface tension that occurs on the surface of the lungs.

Increased surface tension can lead to a dangerous respiratory disease - hyaline-membrane disease of newborns. This disease can be prevented by applying surfactants that reduce surface tension. One such substance is phosphatidylcholine, the molecules of which consist of hydrophilic polar heads and hydrophobic fatty acid chains. The polar heads are in contact with water, while the fatty acids remain in the air.

The result of the action of such a limiting molecular layer is a decrease in the coefficient of surface tension from  $70 \times 10^{-3}$  N/m to  $30 \times 10^{-3}$  N/m.

### Capillary phenomena

Tubes with a very narrow inner channel are called capillaries. The liquid in the capillary rises or falls to a height  $h$  at which the pressure of the liquid column (hydrostatic pressure)  $\rho gh$  is balanced by the excess pressure  $\Delta p$ .

Laplace formula - the additional pressure due to the curvature of the fluid surface is determined as follows:

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

where  $\sigma$  is surface tension coefficient;  $R_1$  and  $R_2$  are the radii of curvature of two mutually perpendicular sections of the fluid surface.

Additional pressure is taken with the sign "+" if the surface is convex, with the sign "-" if the surface is concave. In the case of a spherical surface ( $R_1 = R_2 = R$ ), the Laplace formula has the form:

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

## **Hydrodynamics of plants**

### **Xylem**

The system that supplies water and minerals from the soil to the upper parts of the plant is called xylem. This tissue consists of conductive elements - tracheids, fibers and vascular elements that form long rows along the cells. The diameters of the conductive elements of the xylem vary in the range of 10-500  $\mu\text{m}$  for different species of plants, and the length can range from several hundred micrometers to two or more meters. Due to the fact that these conductive elements are devoid of protoplasts and cell membranes, the resistance to the passage of water and solutions through them is very small.

### **Mechanisms of xylem transport**

If you place a narrow tube (capillary) with one end in the liquid, then due to wetting or non-wetting of the capillary walls with liquid, the curvature of the liquid surface (meniscus) becomes significant, due to which a significant additional pressure is formed above the surface. The attraction between liquid molecules is called cohesion, while the attraction between a liquid and a solid (capillary walls) is called adhesion. When the interaction of the liquid with the wall is significant, the wall is wetted with

liquid; when the intermolecular cohesive forces in the liquid significantly exceed the adhesion between the liquid and the wall, there is a non-wetting of the wall with the liquid. Consider a capillary immersed in a wetting fluid.

The forces of attraction that occur between the molecules of the liquid and the capillary, cause the liquid to rise along the wall of the capillary, which leads to curvature of the liquid surface and the formation of negative pressure. As a result, the liquid rises in the capillary until the hydrostatic pressure balances the additional pressure. The equilibrium condition can be described by the expression:

$$\frac{2\sigma}{R} = \rho gh,$$

where  $\rho$  is fluid density;  $R$  – radius of curvature of the meniscus;  $g$  - acceleration of free fall;  $h$  is the height to which the liquid rises.

From here you can determine the height of the liquid:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho gr},$$

where  $r = R\cos\theta$  is capillary radius,  $\theta$ – edge angle.

Additional pressure in the vessels of the xylem is not able to provide fluid uplift in plants more than one meter high. Over long distances, the transfer of water is controlled by a volumetric flow, which is provided by a pressure gradient.

Quantitatively, this volumetric flow of water  $J_b$  for cylindrical tubes, such as xylem cells of radius  $r$ , is described by the Poiseuille equation in differential form:

$$J_b = \left( \frac{\pi r^4}{8\eta} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right),$$

where  $\eta$  is fluid viscosity;  $\frac{\partial p}{\partial x}$  - pressure gradient.

It can be seen from the equation that the volume flow significantly depends on the radius of the tube: if you increase the radius twice, the speed of the volume flow of water will increase  $2^4 = 16$  times. Thus, the pressure gradient controlled by the volume flow of water is the dominant mechanism of water movement over long distances.

### **Phloem**

During photosynthesis, light energy is converted into chemical energy, which is accompanied by the formation of carbohydrates from carbon dioxide. Although a small amount of carbon compounds or photoassimilates goes to support the processes of growth and metabolism of leaves, the main amount is transferred to non-photosynthetic organs and tissues. The process of transporting photoassimilates over long distances is called translocation. The distribution of most organic matter (primarily photoassimilates) in the plant is due to the phloem - the second leading system of the plant. Phloem is a tissue consisting of several types of cells. But unlike the xylem, the leading elements of the phloem contain protoplasm. These conductive elements are called sieve cells or sieve tubes. They are connected in a single chain, which forms the transport of organic matter. Solutes move along the phloem - the products of photosynthesis move from the leaves to the root system, while the sugars in the opposite direction, from the root system to the top of the plant.

## **Mechanisms of phloem translocation**

Any theory that could explain the mechanisms of translocation of photoassimilates and organic matter along the phloem should take into account and explain the structure of sieve-like elements of the phloem, high (50-250 cm/h) translocation rate over long distances, simultaneous transport of substances in opposite directions, initial the process of transfer of assimilates from mesophylic cells of the leaf to sieve-like elements of the phloem (loading of the phloem), transportation of assimilates through sieve-like elements and final transfer of assimilates from sieve-like elements to cells of storage organs (unloading of the phloem).

The most probable hypothesis is the flow under pressure, which is based on the transfer of the mass of solute from the source to the storage organs due to the gradient of hydrostatic (turgor) pressure in the sieve-like elements. Phloem is loaded by transporting sugars from the mesophyle through thin bundles, the middle vein and the petiole to the sieve-like elements of the phloem. Increasing the concentration of solutes in these elements leads to a decrease in water potential and the corresponding osmotic absorption of water from the adjacent xylem. Hydrostatic (turgor) pressure at this end of the phloem increases. At the same time, at the opposite end of the phloem, the sugars leave the phloem and the water returns to the xylem. The pressure decreases, and in general a pressure gradient is formed along the phloem, which determines the flow of fluid from the leaves to the roots. This gradient is described by Poiseuille's law. This hypothesis is supported by the results of experimental measurement of hydrostatic pressure in sieve-like elements, which is  $2 \times 10^6 P_A$ .

Another hypothesis involves the participation of electroosmosis in the transport of substances through the phloem. It is believed that the driving force of sugar movement from one sieve tube to another through

the pores is the transport of  $K^+$  ions, which is accompanied by the appearance of electric fields on each sieve plate. There are also hypotheses that explain the mechanisms of transportation of assimilates through sieve-like elements - protoplasm movement, peristalsis (reduction) of cell walls, microelectrokinesis, surface-active movement and others, but they are not convincing enough.

### **Measurement of juice flows**

Juice is a fluid that is transported in the xylem through the tracheids and vessels or in the phloem through sieve tubes. Xylem juice contains water and mineral salts, and phloem juice contains water and sugars.

Juice flow is measured in liters per day. The process of measuring sap flow is important in terms of assessing the water balance of the plant and determining the overall rate of water use by the plant (usually a tree).

All basic methods of measuring juice flows are based on heating the transpiration flow, followed by determining the rate of heat propagation along the trunk.

One of the most common is the method of thermal dissipation, which was proposed by A. Granier in 1985. The essence of the method is to immerse in the tree trunk two hollow needles, which contain thermocouples - working and support. One needle (with a working thermocouple) has a heater, which generates a stream of heat. The flow rate of juice  $F$  is determined by the expression:

$$F = 0.428S_a[(T_m - T_d)/T_d]^{1,231},$$

where  $S_a$  is flow area at the measurement height;  $T_m$  - the maximum temperature difference obtained at night, when the flow of juice is absent;  $T_d$  is the actual temperature difference during the day.

Granier sensors are characterized by low cost, mechanical strength and reliability.

## 6. ГЕМОДИНАМІКА

Розділ біофізики, який 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 постачає кожній клітині воду, кисень, поживні речовини, гормони, а також одержує залишки продуктів метаболізму та передає їх органам виділення. Крім того, кров бере участь у регуляції температури організму – вона переносить тепло, що утворюється внаслідок життєдіяльності організму, від внутрішніх структур до поверхні тіла.

Кров – це непрозора в'язка суспензія, що складається із 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, яка складається з розчинених у воді солей, вуглеводів, білків і біологічно активних сполук.

Густина цільної крові коливається в межах  $(1,035-1,055) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; густина плазми становить  $(1,025-1,034) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; еритроцитів  $(1,08-1,09) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. В'язкість крові дорівнює  $(4-5) \cdot 10^{-3}$  Па·с, а плазми –  $1,7 \cdot 10^{-3}$  Па·с за температури 20 °С; в'язкість крові та плазми залежить від *показника гематокриту* (об'ємного співвідношення формених елементів крові і плазми) та температури.

### 6.2. Система кровообігу. Рух крові по судинах



Кровоносна система тварин складається із сукупності судин різного діаметра, які утворюють замкнене коло. Типові параметри кровоносних судин наведено у табл.6.1.

### 6.1. Основні параметри кровоносних судин

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

Згідно з законом Гагена-Пуазейля (формула (5.19)), об'єм кровотечії визначають за різницею тисків на початку і наприкінці системи судин і гідродинамічним опором  $R$ , який виникає внаслідок тертя крові о стінки судин:

$$R = (p_1 - p_2)/Q = 8l\eta / \pi R^4. \quad (6.1)$$

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/с*.

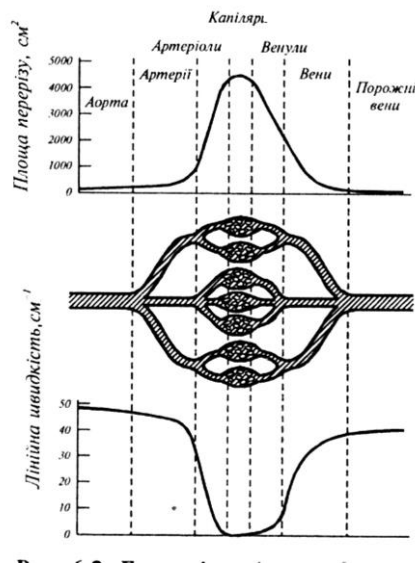
Лінійною швидкістю кровотечії  $v$  називається відношення об'ємної швидкості кровотечії  $Q$  до площі  $S$  поперечного перетину судини:

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

Одиниця вимірювання лінійної швидкості кровотечії – *см/с*.

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.

Швидкість руху потоків крові через судини змінюється від максимального значення ( $40 \cdot 10^{-2}$  м/с) в аорті до мінімального (близько  $10^{-3}$  м/с) в капілярах; швидкість потоку крові у венах, перед тим, як досягнути серця, знову збільшується ( $20 \cdot 10^{-2}$  м/с). Еволюцію швидкості руху крові у кровоносній системі наведено на рис.6.1.



**Рис. 6.1. Еволюція зміни швидкості крові у кровоносній системі**

Коли велика судина розгалужується на декілька дрібних судин, закон Пуазейля вимагає, щоб 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:

$$S_1 v_1 = nS_2 v_2. \quad (6.5)$$

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; кров 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, яка притаманна малим значенням  $\alpha$  (рис.6.3). Типові динамічні характеристики кровоносних судин наведено у табл.6.3.

### 6.2. Типові динамічні характеристики кровоносних судин

Судина	Діаметр, мм	Об'ємна швидкість кровотоку, м л/с	Лінійна швидкість, с м/с	Число Рейнольд-са	Ста ла $\alpha$
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
Велико гомількова задня артерія	3,8	0,17	3,5	35	2,7

Аналіз цих характеристик свідчить про те, що із 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.

Кров є неньютонівська рідина і з цим пов'язані певні відміни 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 примушує еритроцити концентруватися вздовж осі потоку. За рахунок цього біля стінок судини утворюються шари крові з меншою в'язкістю, причому розміри цих шарів стають значними відносно загального перетину трубки із зменшенням радіуса судини.

### **Приклад**

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

### **Розв'язання**

Лінійну швидкість можна знайти з рівняння ( 6.3 ):

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

Підставляємо числові дані:

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

Середню кінетичну енергію можна визначити за виразом:

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

Підставляємо числові дані:

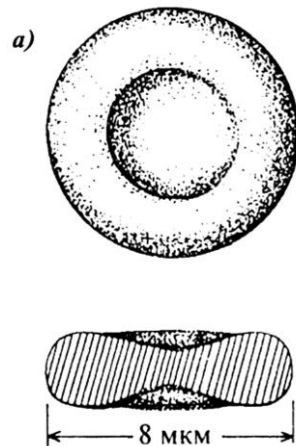
$$E_k = \frac{1}{2} \cdot 1052 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot (8,49 \cdot 10^{-1} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})^2 = 379 \text{ Дж}.$$

### **6.3. Фізичні принципи вимірювання швидкості осідання еритроцитів**

Основну масу формених елементів крові становлять *еритроцити* – червоні кров'яні тільця.

Еритроцити містять гемоглобін – складний білок, що переносить кисень від легень до тканин та вуглекислий газ від тканин до органів дихання.

Завдяки гемоглобіну колір еритроцитів червоний.

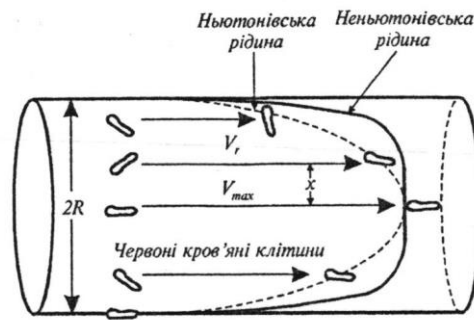


**Рис. 6.2. Форма двоввігнутого диска еритроцита**

Еритроцити ссавців мають форму двоввігнутого диска (Рис.6.2.) – така форма забезпечує максимальну площу поверхні за даного об’єму, що важливо з точки зору оптимального обміну киснем з довкіллям. Кількість еритроцитів у крові становить  $2-3 \cdot 10^{13}$  для дорослої людини та  $5-9 \cdot 10^{13}$  для свійської тварини; типовий діаметр диска еритроцита варіює в межах 6–8 мкм у людини та 4–8 мкм у тварин.

У кровоносних судинах еритроцити рухаються радіально-кільцевим способом;





**Рис. 6.3. Орієнтація еритроцитів відносно перерізу судини**

орієнтацію еритроцитів відносно перетину судини наведено на рис. 6.3. 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 зазнавати деформації, набуваючи овальної чи поздовжньої форми за рахунок зіткнень між собою та зі стінками.

*Швидкість осідання еритроцитів (ШОЕ)* у разі наближення їх до сферичної форми (табл. 6.3) визначається за формулою (5.21).

### 6.3. Результати приведення еритроцитів до сферичної форми

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

Типові значення ШОЕ становлять 15-20 мм/год для чоловіків, 20-30 мм/год для жінок та 2-13 мм/год для дітей.

Швидкість осідання еритроцитів  $v$  пов'язана із в'язкістю крові  $\eta$  залежністю:

$$v \approx \frac{1}{\eta}. \quad (6.12)$$

Коефіцієнт в'язкості рідини у свою чергу залежить від температури:

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

де  $a$  і  $b$  – константи;  $T$  – абсолютна температура.

Отже, з урахуванням формул (6.12) та (6.13) можна довести, що швидкість осідання еритроцитів у в'язкій рідині (крові) також залежить від температури:

$$v = a \cdot e^{bT}. \quad (6.14)$$

Зміна швидкості осідання частинок під час зміни температури визначається з виразу:

$$\ln v_2 - \ln v_1 = b \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right). \quad (6.15)$$

Вимірювання ШОЕ дає можливість оцінити процеси, що спричинюють підвищення температури організму. Якщо температура

тіла збільшується, в'язкість зменшується, а швидкість осідання еритроцитів збільшується. Збільшення швидкості осідання еритроцитів зумовлюється запальними процесами, гострими інфекційними хворобами, хронічними локалізованими інфекціями (абсцесами), травмами, злоякісними пухлинами, станом вагітності. Особливо процедура вимірювання ШОЕ доцільна у разі таких захворювань, як темпоральний артрит, коли значення ШОЕ досягають 100 мм/год.

### Приклад

Визначити швидкість осідання еритроцитів діаметром 5,5 мкм, якщо в'язкість плазми за температури 15°C становить 0,00228 г/см·с. Густина одиничного еритроцита  $\rho_{ep} = 1,09$  г/см<sup>3</sup>, густина плазми  $\rho_{пл} = 1,03$  г/см<sup>3</sup>.

### Розв'язання

Використовуючи дані табл. 6.3, знайдемо, що еритроциту діаметром 5,5 мкм відповідає сфера діаметром 3,6 мкм. Швидкість осідання еритроцитів під час наближення їх до сферичної форми визначається за формулою:

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

Підставляємо числові значення:

$$v_{сед} = \frac{2}{9} \frac{(1,8 \cdot 10^{-6} \text{ м})^2 \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot (1,09 - 1,03) \cdot 10^3 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}}{0,0228 \cdot 10^{-1} \frac{\text{КГ}}{\text{М} \cdot \text{С}}} = 1,895 \cdot 10^{-7} \frac{\text{ММ}}{\text{С}} = 0,6822 \frac{\text{ММ}}{\text{ГОД}}.$$

### **Контрольне завдання**

Визначити швидкість осідання еритроцитів діаметром 9,5 мкм, якщо в'язкість плазми за температури 27 °С становить 1,42 сП. Густина одиничного еритроцита  $\rho_{ep} = 1,09 \text{ г/см}^3$ , густина плазми –  $\rho_{пл} = 1,03 \text{ г/см}^3$ .

*Відповідь:* 3,34 мм/год.

### **Контрольне завдання**

Використовуючи дані, що 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>.

## **6.4. Фізичні методи дослідження крові**

*Прямі вимірювання діаметру еритроцитів.* Еритроцити на забарвленій плівці освітлюються так, що їх зображення проеціюється на екран із збільшенням у 1000 разів. Недоліком методу є довготривалість 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 еритроциту 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 варто уваги вивчення швидкості осідання еритроцитів (*ШОЕ*). Відповідно рівнянню (6.15), швидкість осідання частинок у в'язкій рідині залежить від температури. Якщо температура тіла збільшується, в'язкість зменшується, а швидкість осідання еритроцитів збільшується. Збільшення швидкості осідання еритроцитів обумовлюється запальними процесами, гострими інфекційними захворюваннями, хронічними локалізованими інфекціями (абсцесами), травмами, злоякісними пухлинами, станом вагітності.

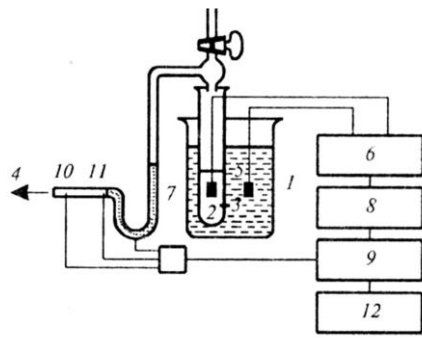
*Оцінка кількості еритроцитів в одиниці об'єму.* Чим більша кількість еритроцитів в одиниці об'єму, тим менша швидкість осідання еритроцитів. Оцінка кількості еритроцитів у крові можлива за допомогою лічильних камер або електронних приладів. Для використання лічильної камери кров розбавляють у співвідношенні 1:100 або 1:200. Зразок розбавленої крові розміщують на предметному столику мікроскопа і аналізують.

Принцип дії електронного приладу для визначення кількості кров'яних клітин заснований 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 вимагає

попереднього калібрування щодо концентрації і розмірів кров'яних клітин, а також типу тварин, кров яких досліджується.

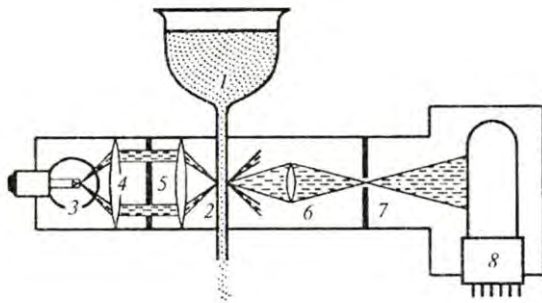
Електронний лічильник (рис.6.4.) складається з двох судин - широкої 1, яка містить кров, і вузької 2, що занурена у кров. Вузька судина має вузький отвір 3, через який проходять кров'яні клітини за рахунок деякого розрядження повітря, що створюється помпою 4. Система обладнана електродами 5, які з'єднані 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, внаслідок чого вимірювач електропровідності генерує імпульс, амплітуда якого залежить від об'єму клітини. Ці імпульси аналізуються амплітудним дискримінатором 8, який реагує лише на імпульси певної амплітуди, після чого вони проходять (або ні) через імпульсний затвор 9, який 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.



**Рис. 6.4. 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;— електроди, з'єднані з приладом для вимірювання електропровідності; 7 — ртутний манометр; — амплітудний дискримінатор;— імпульсний затвор; 10 і 11 — електроди; 12 — лічильник**

Ще один метод визначення кількості кров'яних клітин базується на мікроскопії темного поля (рис.7.4). Розбавлена кров *1* проходить через тонку трубку *2*, яка освітлюється конусоподібним променем, що утворюється лампою *3* і конденсором темного поля (лінзи *4* і діафрагма *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, за рахунок чого утворюється світлове зображення клітини на темному полі. Це світлове зображення попадає через лінзу *6* і діафрагму *7* на фотоелектронний підсилювач *8*.



**Рис. 6.5. 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 розташований шар лейкоцитів і тромбоцитів; у верхній частині кювети міститься плазма крові.

Таким чином можна визначити відносну кількість складових частин крові і гематокрит.



**Рис. 6.6.. Результати застосування техніки ультрацентрифугування крові собаки (пояснення в тексті)**



На рис.6.5 наведено результати ультрацентрифугування крові собаки: тут кювета *A* містить кров собаки, яка страждає на анемію (об'єм еритроцитів становить 29 мм) і лейкоцитозом (шар завдовжки 4 мм, колір якого змінюється від білого до сірого). Кювети *B* і *C* демонструють діапазон нормальних рівнів еритроцитів і лейкоцитів.

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

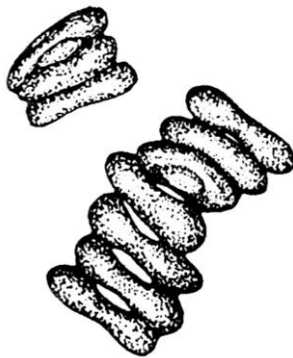
### **6.5. Фізичні принципи захворювань кровоносних судин**

Захворювання крові та ураження стінок кровоносних судин можуть бути пов'язані із 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, яке 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 5-7,5 до 20-24 млн/мм<sup>3</sup>. Зменшення кількості еритроцитів або концентрації гемоглобіну в одиниці об'єму крові призводить до такого захворювання як *анемія*, що супроводжується зменшенням кількості еритроцитів і зниженням вмісту гемоглобіну в одиниці об'єму крові. У тварин анемія викликається втратами крові через кровотечії, дії паразитів, прискорення руйнування еритроцитів або сповільнення *еритропоеза* (процесу утворення еритроцитів). У випадку *серпоподібно-клітинної анемії* спостерігають істотне підвищення в'язкості крові при великих

швидкостях зсуву. Зовнішній вигляд порушеної форми еритроцитів внаслідок серподібно-клітинної анемії наведено на рис.6.7. Викликається це захворювання наявністю в еритроцитах патологічних гемоглобінів.

Багато захворювань пов'язано з посиленням агрегації еритроцитів у вигляді так званих монетних стовпчиків або складніших конгломератів (рис.6.8).

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.



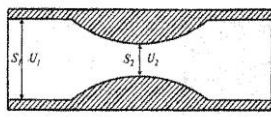
**Рис.6.7. Вигляд порушеної внаслідок серподібно-клітинної анемії форми еритроцитів**

**Рис. 6.8. Агрегація еритроцитів**

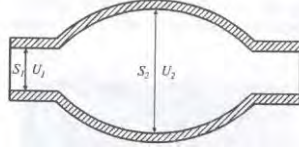
Розглянемо фізичні принципи захворювань кровоносних судин, пов'язаних з ущільненням судини за рахунок утворення на внутрішній стінці кров'яних згустків, або дифузним розширенням отвору внаслідок патологій стінок. Ці захворювання можуть бути розглянуті на основі рівнянь ідеальної рідини.

*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. 6.9, *a*) згідно з рівнянням нерозривності потоку  $S = \frac{\text{const}}{v}$ ; збільшення швидкості  $v$  течії призводить до зменшення статичного тиску  $p$  відповідно до рівняння Бернуллі  $p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \text{const}$ . Зменшення цього тиску нижче певного рівня призводить до закупорки судини. Але через це кінетична енергія крові, що рухається, збільшується, і отвір судини збільшується. Виникають коливання стінок кровоносної судини, які спричиняють болісні відчуття.

*Аневризма.* У разі розширення перерізу  $S$  судини внаслідок патоморфологічних змін у стінках (рис. 6.9, *б*) швидкість течії  $v$  зменшується (рівняння нерозривності потоку), але статичний тиск  $p$  збільшується (рівняння Бернуллі). Цей надлишковий тиск може призвести до крововиливу.



*a*



*б*

**Рис. 6.9. Фізичні принципи захворювань кровоносних судин: *a* – звуження кровоносної судини внаслідок тромбозу; *б* – розширення перерізу кровоносної судини внаслідок аневризми**

### Приклад

На скільки зменшиться тиск крові в артерії при досягненні нею місця, де артерія звужується за рахунок атеросклеротичних явищ до 1/5 площі нормального перерізу. Нормальний тиск крові в артерії 100 мм рт.ст., швидкість руху крові 0,10 м/с.

### Розв'язання

Запишемо рівняння Бернуллі для артерії перерізом  $S_1$ , яка 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 закону нерозривності потоку

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2,$$

або

$$v_2 = 5 \cdot v_1.$$

Комбінуючи останні рівняння, отримаємо:

$$\Delta p = 12 \cdot \rho \cdot v_1^2 = 12 \cdot 1000 \text{ кг/м}^3 \cdot (0,10 \text{ м/с})^2 = 120 \text{ Па}.$$

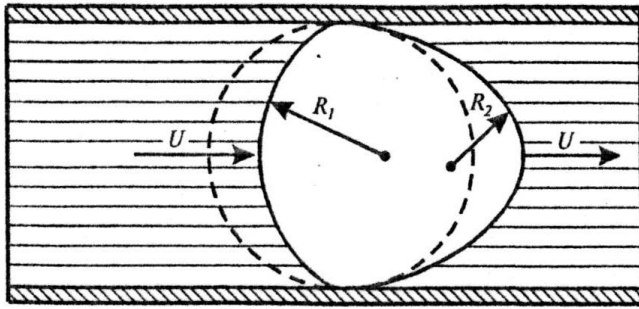
Враховуючи, що нормальний тиск крові в артерії складає  $p = 100$  мм рт.ст., визначимо тиск  $p_1$  як:

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

Відносне зменшення тиску дорівнюватиме:

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

*Газова емболія.* У кровоносній судині, в якій з певних причин (конденсація газу, поранення або травми кровоносних судин, оперативні втручання) утворилась бульбашка газу, за рахунок потоку форма бульбашки спотворюється (ліва й права півсфери мають різні за величиною радіуси кривизни) (рис. 6.10). Отже, згідно з рівнянням Лапласа (5.31), додаткові тиски, зумовлені поверхневим натягом рідини на лівій та правій межах поділу, будуть відрізнятися. Різниця тисків може призвести до порушення кровопостачання, розриву або закупорки судини. Цей патологічний процес називається *газовою емболією*.



**Рис. 6.10.** Виникнення газової емболії за руху крові в судині, що зумовила деформацію бульбашки газу ( $R_1 \neq R_2$ ), різницею тиску і розрив судини

### Приклад

Визначити, у скільки разів зміниться додатковий тиск, зумовлений поверхневим натягом крові на лівій і правій межах поділу повітряної бульбашки, яка виникає під час газової емболії, якщо лівий радіус кривизни збільшився, а правий – зменшився на 25% (рис.4.16).

### Розв'язання

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

$$\Delta p_s = \pm \frac{2 \cdot \alpha}{R + \Delta R}, \quad \Delta p_n = \pm \frac{2 \cdot \alpha}{R - \Delta R}.$$

Відношення додаткових тисків становить:

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

Підставляємо числові значення:

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

### **Контрольне завдання**

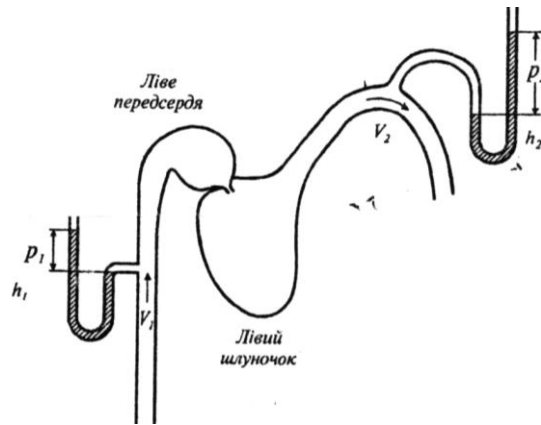
Середній радіус альвеоли в легенях становить близько  $5 \cdot 10^{-5}$  м.  
Визначити додатковий тиск, зумовлений кривизною альвеоли, якщо коефіцієнт поверхневого натягу плазми  $50 \cdot 10^{-3}$  Н/м.

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

## 6.6. РОБОТА СЕРЦЯ

Повна робота, яка виконується серцем під час перенесення  $1 \text{ см}^3$  крові, залежить від зміни (рис. 6.11): висоти  $m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$ , тисків  $(m/\rho) \cdot (p_2 - p_1)$  та швидкостей течії крові  $\frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$ , тобто:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + \frac{m}{\rho_0} \cdot (p_2 - p_1) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2). \quad (6.16)$$



**Рис. 6.11. 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**

Припустимо, що різниця висот між шлуночком і артеріальною дугою дорівнює  $0,15 \text{ м}$ , швидкість руху крові на цій ділянці становить  $0,4 \text{ м/с}$ , а густина –  $10^3 \text{ кг/м}^3$ . Початкова швидкість скорочення м'язів дорівнює нулю. Зазначимо, що артеріальний тиск у здорової людини змінюється від  $80 \text{ мм рт. ст.}$  (*діастола* – розширення порожнин серця та їх наповнення кров'ю) до  $120 \text{ мм рт. ст.}$  (*систола* – скорочення м'язів серця після розслаблення, що супроводжується нагнітанням крові в артеріальну систему). Однак мінімальний тиск, що встановлюється в артеріях, призводить до закриття аортального



клапана, коли тиск дорівнює нулю. Отже, різниця тисків становить  $\Delta p = (120 \text{ мм рт. ст.} - 0) = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ .

Повна робота, що виконується серцем під час перенесення  $1 \text{ см}^3$  крові, становить:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + \frac{m}{\rho_0} \cdot (p_2 - p_1) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) = \\ = 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot (0,15) + \frac{10^{-3}}{10^3} \cdot \left(\frac{120-80}{760} \cdot 1,013 \cdot 10^5\right) + \frac{1}{2} \cdot 10^{-3} \cdot (0,4^2 - 0) = 0,01755 \text{ Дж.}$$

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

$$A = 1,755 \cdot 10^{-2} \text{ Дж} \cdot 60 = 1,053 \text{ Дж.}$$

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

Загальна робота, яку виконує серце за одне скорочення, дорівнює:

$$A_{\text{заг}} = (1 + 1/6) \text{ Дж} = 1,23 \text{ Дж.}$$

За добу серце виконує (за пульсу  $60 \text{ хв}^{-1}$ )  $24 \cdot 3600 = 86400$  ударів; робота серця за добу становить  $A_{\text{д}} \approx 10^5 \text{ Дж}$ .

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

$$N = \frac{A_{\text{заг}}}{t} = 4,1 \text{ Вт.}$$

### Приклад

Визначити роботу серця, якщо різниця висот між шлуночком і дугою аорти становить 15 см, швидкість течії крові у цій точці дорівнює  $40 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ , густина крові –  $1 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ . Прийняти початкову швидкість перед систолою рівною нулю, артеріальний тиск протягом діастолі – 80 мм рт.ст., протягом систоли – 120 мм рт.ст.

### Розв'язання

Підставляємо числові дані у рівняння (6.17):

$$A = 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot (0,15) + \frac{10^{-3}}{10^3} \cdot \left( \frac{120-80}{760} \cdot 1,013 \cdot 10^5 \right) + \frac{1}{2} \cdot 10^{-3} \cdot (0,4^2 - 0) = 0,01755 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Якщо припустити, що середній об'єм крові, що переноситься за один удар становить  $60 \text{ см}^3$ , то робота по 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 один удар, становить:

$$A'' \cong 10^5 \text{ Дж}.$$

З урахуванням того, що тривалість систоли дорівнює близько 0,3 с, середня потужність серця за одне скорочення складає:

$$N = A'' / t = 4,1 \text{ Вт}.$$

### **Контрольне завдання**

Визначити роботу, яку виконує серце коня за добу, якщо артеріальний тиск протягом діастоли становить 70 мм рт. ст., а протягом систоли – 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. Припустити, що порожня вена та аорта знаходяться на одному рівні ( $h_1 = h_2 = 0$ ).

*Відповідь:*  $5,9 \cdot 10^5$  Дж.

## 6.7. ТИСК КРОВІ

### 6.7.1. Артеріальний тиск

Роботу серця забезпечує *артеріальний тиск*, який діє на стінки артерій і зумовлений рівнем стискування крові. Тиск, що виникає під час скорочення серця, називається *систолічним*; тиск, що виникає після розслаблення серця, називається *діастолічним*. Артеріальний тиск вимірюється у мм рт.ст. і позначається як відношення систолічного тиску до діастолічного. Залежність тиску крові від часу в процесі роботи серця зображена на рис. 6.12. Видно, що коливання тиску відбуваються від практично нульового рівня до 120 мм рт.ст. Різниця між систолічним і діастолічним тиском являє собою *пульсовий тиск*. Типові значення систолічного, діастолічного і пульсового тисків у кровоносній системі тварин наведено у табл. 6.4.

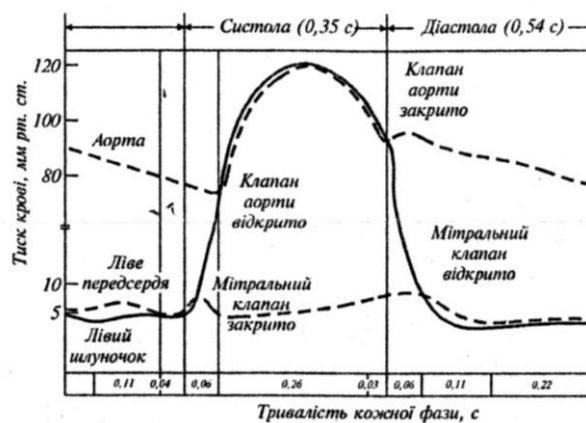


Рис. 6.12. Залежність тиску крові від часу в процесі роботи серця

### 6.7.2. Вимірювання тиску крові

Розглянемо два методи вимірювання тиску крові.

*Неінвазивний метод* полягає у 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, яка 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)*.

#### 6.4. Типові значення тисків у кровоносній системі людини

Вік	$p_{max}$ , мм рт.ст.	$p_{min}$ , мм рт.ст.	$\Delta p$ , мм рт.ст.
Новонароджений	80	46	34
10	103	70	33
20	120	80	40
40	126	84	42
60	135	89	46

Середній тиск визначають так:

$$\langle p \rangle = \frac{p_c + p_d}{2}, \quad (6.17)$$

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

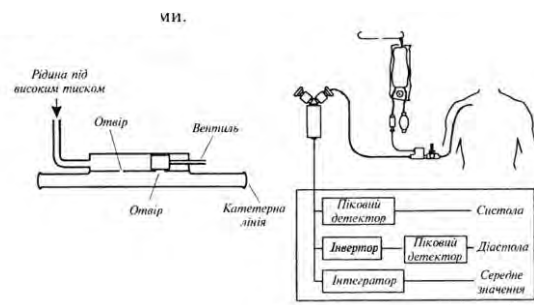
Більш точний вираз для визначення середнього тиску, що враховує тривалість пульсової хвилі, має вигляд:

$$\langle p \rangle = \frac{1}{3} (p_c + p_d) + p_d. \quad (6.18)$$

Неінвазивний метод точний, безболісний і зручний у користуванні. Але він страждає від 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, що розташована 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 помилок під час вимірювання тиску. Для запобігання зсідання крові або газової емболії катетер заповнюють сольовим розчином. Потік розчину з коагулянтном (речовиною, що спричинює укрупнення частинок) утворюється за допомогою еластичної сумки, що заповнюється повітрям. Коли катетер вводять у вену, потік крові направляється за допомогою клапана до перетворювача тиску, пов'язаного з системою реєстрації тиску (рис.6.13).

Перевагою прямого методу є можливість безперервного контролю форми пульсової хвилі і більш висока 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.6.13. Катетер та система його введення в кровоносну судину**

### 6.7.3. Сучасні прилади для вимірювання тиску

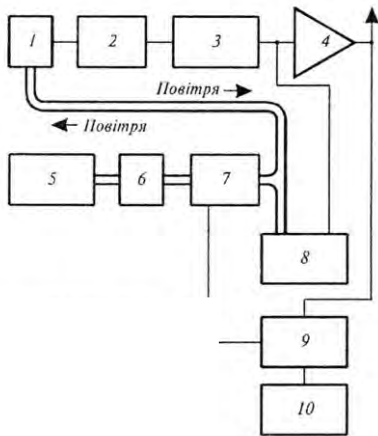
Прилад для вимірювання артеріального тиску називається *тонометром* (або *сфігмоманометром*). Тонometri діляться залежно від принципу роботи на механічні, напівавтоматичні, автоматичні.

Напівавтоматичні тонометри відрізняються від автоматичних моделей тим, що для вимірювання тиску необхідно самостійно підкачувати повітря в манжету приладу за допомогою груші (рис. 6.14,а). Повністю автоматичні електронні тонометри мають компресор, який нагнітає потрібний тиск у манжеті.

Принцип роботи приладу такий: коли тиск в манжеті перевищує тиск крові, манжета перетискує артерію, потік крові призупиняється. При зниженні тиску в манжеті артерія відкривається, струм крові по артерії поновлюється. При малому просвіті артерії завихрення крові створюють шуми Короткова. Коли артерія повністю відкрита, шуми зникають. Електронна схема реєструє коливання тиску повітря в манжеті (осциляції) і трансформує їх у цифрові значення.



а



б

**Рис.6.14.** Напівавтоматичний тонометр, в якому необхідно самостійно підкачувати повітря в манжету приладу за допомогою груші: *а* – зовнішній вигляд тонометра; *б* – 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



## **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ**

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 тромбозом.
6. Пояснити фізичні принципи захворювання аневризмою.
7. Пояснити фізичні принципи захворювання газовою емболією.
8. До чого призводить підвищення поверхневого натягу на поверхні легень?

## 7. АЕРОДИНАМІКА

*Аеродинаміка* – це розділ фізики, який вивчає закони руху повітря (або іншого газу) та сили, що виникають на поверхні тіл, відносно яких відбувається цей рух.

### 7.1. Фізика частинок

*Частинки* – це окремі порції твердої, рідкої або газоподібної речовини, розміри яких перевищують 1 нм.

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:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\eta}, \quad (7.1)$$

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. Наприклад, для течії в'язкої нестисливої рідини в циліндричній трубці  $Re_{кр} = 2300$ . Ламінарний процес перенесення води у ґрунті характеризується значеннями  $Re < 1$ .

### 7.2. Аерозолі та біоаерозолі

Особливе місце серед частинок займають *аерозолі* – дисперсні (колоїдні) системи, що складаються з частинок розмірами від  $10^{-5}$  м до

$10^{-7}$  м та газового середовища, в якому вони знаходяться у завислому стані. Основним джерелом біологічних аерозолів є рослини, які постачають в атмосферу спори і пилок. Останні поширюються завдяки повітряним потокам. До біоаерозолів належать також віруси, бактерії і частинки комах.

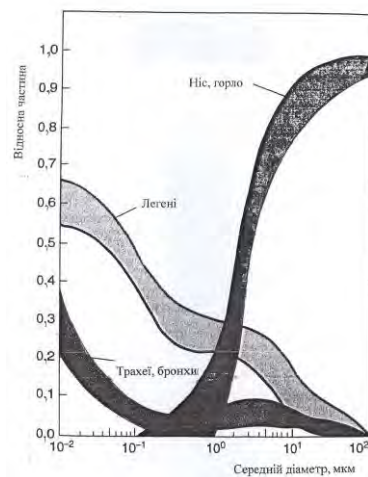
Типовими представниками біоаерозолів є бактерії *Bacillus* sp., *Legionella pneumophila*, *Microspolyspora faeni*, *Mycobacterium tuberculosis*, *Pseudomonas* spp., *Staphylococcus* spp., *Streptococcus* spp.; гриби (в першу чергу, плісень та дріжджі) *Histoplasma capsulatum*, *Alternaria* spp., *Penicillium* spp., *Aspergillus fumigatus*, *Stachybotrys atra*, *Fusarium* spp., *Cladosporium* spp.; найпростіші *Naegleria fowleri*, *Acanthamoeba* sp.; водорості *Chlorella*, *Chlorococcum*, *Schizothrix*, *Anabaena*; кліщі *Dermatophagoides farinae*, *D. Pteronyssinus*, комахи *Blatella germanica*, *Periplanetta Americana*, *Blatta orientalis*; залишки шерсті (кішки, собаки, тхори, морські свинки, хом'яки, кролі, пацюки, миши), пилок та спори рослин берези *Betula*, вільхи *Alnus*, сосни *Pinus*, полину *Artemisia*, амброзії *Ambrosia*.

Галузь біології, яка вивчає органічні частинки, що пасивно переносяться у повітрі, називається аеробіологією [Mar Trigo Perez et al., 2007]. Ця наука тісно пов'язана з палінологією, мікологією, токсикологією, кліматологією, метеорологією, інженерією та контролем біологічного забруднення навколишнього середовища. Проблемам аеробіології з кожним роком приділяється все більша увага. Ще у 1974 році у Гаазі, Нідерланди, було засновано Міжнародну асоціацію аеробіології IAA (International Association for Aerobiology). Нині ця Асоціація нараховує близько 800 членів, має свою Раду, журнали та кожні чотири роки збирає міжнародні конгреси.

Більшість розвинутих країн світу мають станції спостереження за поведінкою та тенденціями поширення небезпечних для здоров'я людини біоаерозолів. Крім того, аерозолі та біоаерозолі відіграють роль центрів конденсації і, отже, впливатимуть на процеси утворення хмар.

*Вплив біоаерозолів на живі організми.* Біоаерозолі здатні провокувати захворювання та алергічні реакції людей, впливати на тварин і рослини, викликати захворювання через повітряні потоки. Відомо, що багато біоаерозолів здатні викликати подразнення респіраторного тракту, зокрема носоглотки, трахейної системи, легенів залежно від їх типу та розмірів.

Як приклад можна навести рис. 7.1, на якому представлена залежність долі атмосферних частинок різних розмірів, що осідають у респіраторному тракті людини.



**Рис.7.1. Розподіл атмосферних частинок у респіраторному тракті людини залежно від їх розмірів**

Серед захворювань, що викликаються біоаерозолями, можна виділити *бронхіальну астму* – алергічну хворобу, яка проявляється повторними нападами експіраторної (під час видихів) ядухи внаслідок порушення бронхіальної прохідності; *алергічний риніт* – алергічну реакцію, що проявляється значним набряком слизової оболонки носа, особливо в ділянці носових раковин; *пневмонію* – групу запальних процесів у легенях з переважним ураженням їхніх респіраторних відділів.

Ось чому проблема ідентифікації та кількісного оцінювання атмосферних аерозолів та біоаерозолів є актуальною.

*Методи вимірювання параметрів аерозолів.* Зовнішній вигляд приладу для збору біоаерозолів наведено на рис.7.2.



**Рис. 7.2. Зовнішній вигляд приладу для збору біоаерозолів**

Прилад обладнаний флюгером, який дозволяє орієнтувати вхідне віконце проти напрямку вітру. Біоаерозолі надходять протягом доби на стрічку, покриту клейкою стрічкою. Ця стрічка обертається

відносно вхідного віконця за допомогою електродвигуна з тим, щоб прослідкувати за рівнем аерозолів, що надходять протягом доби. Вся система устанавлюється на високому місці (наприклад, на даху будинку). Раз за добу стрічку знімають та аналізують на предмет кількісного та якісного вмісту біоаерозолів.

### 7.3. Рух атмосферних частинок

Якщо частинка рухається в атмосфері, на неї діють гравітаційна, виштовхуюча сили та сила внутрішнього тертя з боку повітряного потоку згідно із законом Стокса. Співвідношення між цими силами залежить від фізичних параметрів частинки, атмосфери та безрозмірного числа Рейнольдса  $Re$ .

Розглянемо випадки, які залежать від співвідношення між радіусом частинки  $r$ , довжиною вільного пробігу  $\lambda$  молекул газу та числом Рейнольдса  $Re$ .

a)  $r > \lambda$ , але  $Re = 2rv/\nu < 0,1$  (тут  $\nu$  – швидкість руху частинки,  $\nu$  – кінематична в'язкість). На частинку масою  $m$  та об'ємом  $V$  і густиною  $\rho$ , занурену у газ масою  $m_0$  з густиною  $\rho_0$ , діють гравітаційна ( $F_{gp} = mg = V\rho g$ ) та архімедова ( $F_0 = m_0g = V\rho_0g$ ) сили, а також сила внутрішнього тертя (в'язкості), що визначається за законом Стокса ( $F_\eta = 6\pi\eta r v$ ), де  $\eta$  – коефіцієнт внутрішнього тертя (динамічна в'язкість).

Швидкість седиментації визначається так:

$$\begin{aligned} v_{sed} &= Vg(\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \\ &= \frac{2}{9} g(\rho - \rho_0) r^2 / \eta. \end{aligned} \quad (7.2)$$

### Приклад

Визначити швидкість седиментації частинки мулу густиною 2650 кг/м<sup>3</sup> та діаметром 0,03 мм, яка осідає у воді за 20 °С. В'язкість води за цієї температури становить 1,002·10<sup>-3</sup> Па·с.

### Розв'язання

Підставляємо числові дані у рівняння (4.38):

$$v_{sed} = \frac{2}{9} g(\rho - \rho_0) r^2 / \eta = \frac{2}{9} (9,8 \text{ м/с}^2)(2650 - 998,2)(15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2)^2 / (1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}) = 8,1 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$$

### Контрольне завдання

Визначити швидкість седиментації сферичної частинки густиною 2650 кг/м<sup>3</sup> та діаметром 0,1 мм, яка осідає у воді за 20 °С. В'язкість води за цієї температури становить 1,002·10<sup>-3</sup> Па·с. Чи встигне частинка досягнути дна резервуара за 2 години, якщо глибина танка 3,5 м?

б)  $r > \lambda$ , але  $Re = 2rv/v > 1$ . Якщо розмістити певне тіло у повітряному потоці, то перенесення імпульсу відбудеться не лише завдяки силам тертя, що направлені паралельно поверхні шарів, та градієнта швидкості, що виникає при цьому, але через те, що у напрямку повітряного потоку виникає сила, яка називається *опором форми*. Ця сила, що обумовлена різними значеннями тиску з переднього та заднього боків тіла під час обтікання його потоком, залежить від форми та орієнтації тіла. Якщо початковий імпульс тіла становить  $\rho v$ , а середня зміна швидкості –  $v/2$ , то швидкість, з якою

потік зменшує свій імпульс, буде дорівнювати  $\rho v \cdot v/2 = 0,5\rho v^2$ , а сила опору визначається як:

$$F_{on} = 0,5c_m\rho_0v^2 \cdot S, \quad (7.3)$$

де  $c_m$  – коефіцієнт опору;  $\rho_0$  – густина газу;  $v$  – швидкість руху частинки;  $S$  – площа перерізу частинки.

У цьому разі баланс сил, що діють на частинку, розраховують за формулою:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \rho_0) = 0,5 c_{on}\rho_0 v^2 \cdot \pi r^2. \quad (7.4)$$

Для біоаерозолів  $\rho > \rho_0$ , тому останнє рівняння можна переписати так:

$$v^2 = 8rg\rho/3\rho_0 c_{on}. \quad (7.5)$$

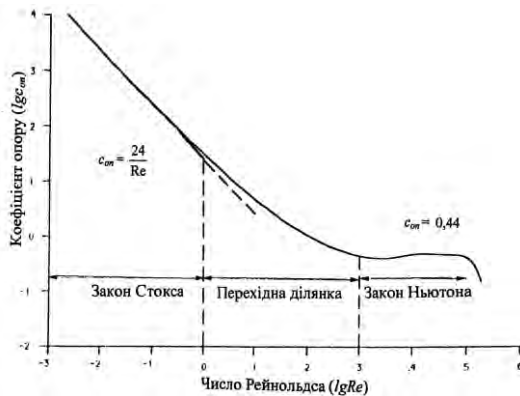
Звідки швидкість седиментації частинки становить:

$$v_{sed} = 2g\rho r^2/9\rho_0\nu, \quad (7.6)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість.

Залежність швидкості седиментації для рослинних частинок від радіуса  $r$  та числа Рейнольдса  $Re_c$  за густини частинки  $\rho \approx 10^3$  кг/м<sup>3</sup> наведено на рис. 7.3.





**Рис. 7.3. Залежність коефіцієнта загального опору  $c_{on}$  частинки від числа Рейнольдса  $Re$**

Видно, що для значень  $Re_c < 0,1$  (для типових значень  $r = 30$  мкм та  $v_{сед} = 0,1$  м/с, притаманних пилку та спорам) виконується закон Стокса.

### Приклад

Визначити силу опору для спори патогенного гриба *Helminthosporium maydis* циліндричної форми, якщо діаметр циліндра становить  $d = 20$  мкм, густина  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнт загального опору  $c_{on} = 4$ , швидкість вітру  $v = 10$  м/с.

### Розв'язання

Використовуємо рівняння (4.40):

$$F_{on} = 0,5c_{on}\rho v^2 \cdot S = 0,5 \cdot 4 \cdot 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot (10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})^2 \cdot \pi \cdot (20 \cdot 10^{-6} \text{ м})^2 / 4 = 0,75 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

Експериментально було встановлено, що коефіцієнт опору та число Рейнольдса пов'язані співвідношенням:

$$c_{on} = \frac{b}{Re^n}, \quad (7.7)$$

де  $b$  та  $n$  – константи.

Для ламінарної течії  $Re < 2$ ,  $b = 24$ ,  $n = 1$ , а  $c_{on} = \frac{24}{Re}$ ; для турбулентної течії  $Re = 500-200000$ ,  $b = 0,44$ ,  $n = 0$ , а  $c_{on} = 0,44$ .

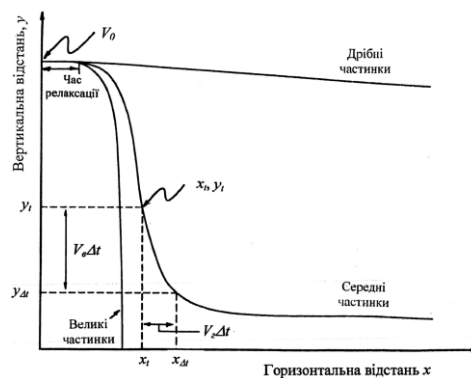
Таким чином, для малих значень числа Рейнольдса ( $Re < 1$ ) домінуючими є сили в'язкості (закон Стокса), тоді як для великих значень числа Рейнольдса ( $Re > 1000$ ) переважають сили, що описуються законом Ньютона. Причому, в першій області сила опору залежить від числа Рейнольдса, тоді як в другій області сила опору не залежить від числа Рейнольдса (рис. 4.19).

Швидкість руху частинки в будь-який момент часу визначається за виразом:

$$v_t = v_k - (v_k - v_0)e^{-t/\tau}, \quad (7.8)$$

де  $v_t$  – швидкість руху частинки у вертикальному чи горизонтальному напрямках у момент часу  $t$ ;  $v_k$  – кінцева швидкість частинки;  $v_0$  – початкова швидкість руху частинки у горизонтальному напрямку ( $v_0 = 0$  для вертикального напрямку).

Траєкторії руху частинок залежно від їх розмірів наведено на рис. 7.4.



**Рис. 7.4. Траєкторії руху частинок залежно від їх розмірів**

#### 7.4. Аеродинаміка пташиного польоту

Крило птаха має обтічну форму із закругленим переднім кінцем та вузьким заднім. Завдяки обтіканню такого увігнутого крила птаха частинки повітря, що минають верхню, більш опуклу поверхню крила, проходять за одиницю часу шлях більший, ніж частинки, що минають нижню поверхню крила і отже мають більшу швидкість руху. Несиметричне обтікання крила спричинює появу циркуляційного потоку навколо контуру крила, який на опуклій площині спрямований в бік течії повітря, що призводить до збільшення швидкості руху повітря, а на увігнутій – проти течії, що супроводжується зменшенням швидкості руху повітря. Але, згідно з рівнянням Бернуллі, там де швидкість повітряного потоку більша, тиск середовища менший, і навпаки. Завдяки різниці тисків між верхньою та нижньою площинами крила виникає так звана *піднімаюча сила*, що спрямована перпендикулярно до напрямку швидкості руху тіла.

Під час польоту виникають чотири основних сили, що діють на крило. Крім піднімаючої сили, треба згадати силу тяжіння, спрямовану вертикально вниз, силу тяги та силу лобового опору, яка діє протилежно напрямку швидкості руху тіла (рис. 7.5.).

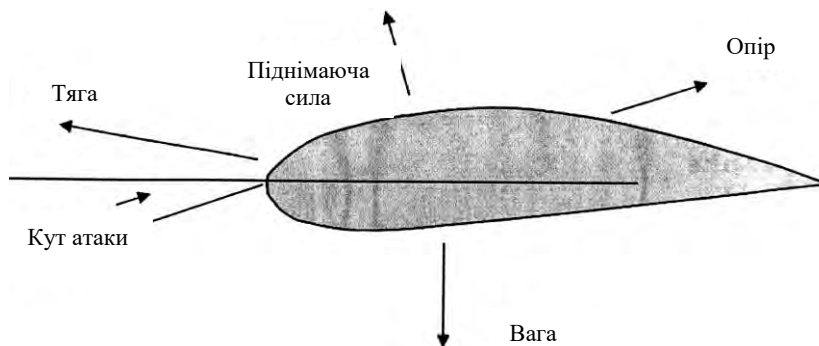


Рис. 7.5. Сили, що діють на крило птаха

У процесі польоту птах здатний змінювати кут атаки – кут між хордою крила та напрямком потоку повітря, причому змах крила вниз характеризується збільшенням кута атаки, що збільшує піднімаючу силу.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ**

1. Що характеризує число Рейнольдса?
2. Які сили діють на кульку, занурену в рідину?
3. Що таке частинка? аерозоль? біоаерозоль?
4. Які сили діють на частинку у повітряному потоці? Від чого залежить баланс цих сил?
5. Які сили діють на крило птаха?

## 8. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

### 8.1. МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ

*Коливання* – це рухи або процеси, які відзначаються певною пов-торюваністю у часі.

*Періодичними* є коливання, що повторюються через однакові проміжки часу.

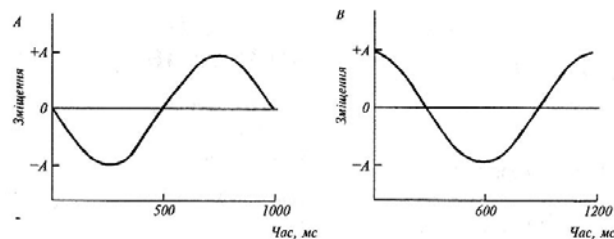
*Гармонічними* коливаннями називаються періодичні коливання фізичної величини (або будь-якої іншої) залежно від часу, які відбуваються згідно із законами синуса (Рис. 8.1):

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (8.1)$$

або косинуса

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (8.2)$$

де  $A$  – *амплітуда коливань* (максимальне зміщення точки, що коливається, від положення рівноваги);  $\omega$  – *колова частота*;  $\omega t + \varphi_0$  – *фаза коливань* у момент часу  $t$ ;  $\varphi_0$  – *початкова фаза* (фаза коливань у момент часу  $t=0$ ).



**Рис. 8.1.** Гармонічні коливання, за яких фізична величина змінюється з часом за синусоїдним (A) або косинусоїдним (B) законами

Найменший проміжок часу, через який система, що здійснює коливання, повертається до стану, в якому вона перебувала в початковий момент часу, вибраний довільно, називається *періодом коливань*  $T$ . Період  $T$  пов'язаний з коловою частотою  $\omega$  співвідношенням:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (8.3)$$

Величина, яка дорівнює кількості коливань за одиницю часу, називається *частотою*  $\nu$ . Частота  $\nu$  пов'язана з періодом  $T$  так:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (8.4)$$

Одиниця вимірювання частоти – *Гц* (Герц) – одиниця виміру в СІ частоти періодичних процесів, яка дорівнює одному коливанню за секунду:  $1 \text{ Гц} = 1/\text{с}$ .

На основі рівнянь (8.3) і (8.4) можна одержати співвідношення:

$$\omega = 2\pi\nu. \quad (8.5)$$

Енергія гармонічних коливань визначається за формулою:

$$E = \frac{mA^2\omega^2}{2}. \quad (8.6)$$

### Приклад

Визначити повну енергію коливань тіла масою 300 г, що здійснює за допомогою пружини коливання в горизонтальній площині, якщо амплітуда коливань дорівнює 4 см, а жорсткість пружини 15 Н/м.

### Розв'язання

Підставляємо числові дані у рівняння (5.13), знаходимо:

$$E = \frac{mA^2\omega^2}{2} = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2} \cdot 15 \text{ Н/м} \cdot (4 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2 = 12 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

### Контрольне завдання

Визначити максимальну швидкість руху тіла за умовою попередньої задачі.

Відповідь:  $v_{\text{макс}} = 0,28 \text{ м/с}$ .

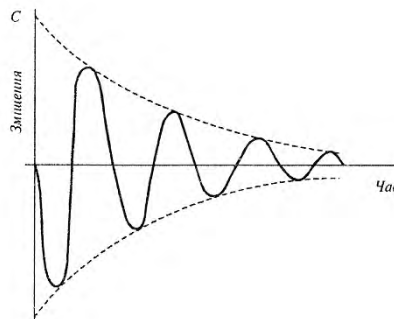
## 8.2. ЗГАСАЮЧІ КОЛИВАННЯ

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

Рівняння згасаючих коливань має вигляд:

$$x = Ae^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (8.7)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт згасання.



**Рис. 8.2. Згасаючі гармонічні коливання**

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

Для кількісної оцінки швидкості зменшення амплітуди згасаючих коливань користуються поняттям *логарифмічного декременту згасання*, який дорівнює натуральному логарифму відношення значень амплітуди згасаючих коливань у моменти часу, що розділені періодом:

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T. \quad (8.8)$$

### 8.3. БІЖУЧА ХВИЛЯ

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

$$y = y_0 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x). \quad (8.9)$$

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

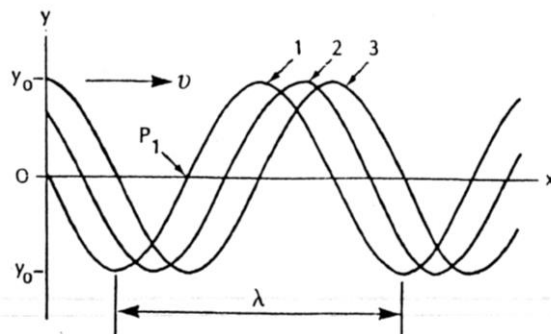
$$y = y_0 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} x). \quad (8.10)$$

Величина  $\frac{2\pi}{\lambda}$  в рівняннях (5.29) та (5.30) називається *хвильовим числом*; вона позначається символом  $k$ .



Рівняння (8.9) і (8.10) можуть приймати ще такі форми:

$$y = y_0 \sin(\omega t \pm kx), \quad (8.11)$$



**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

#### 8.4. СТОЯЧА ХВИЛЯ

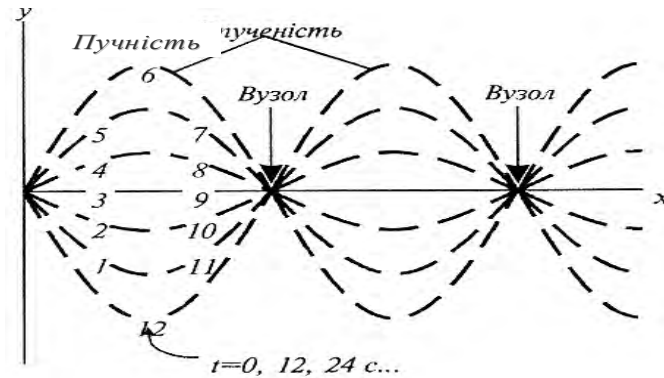
Розглянемо дві біжучі хвилі  $y_1 = y_0 \sin(\omega t + kx)$  та  $y_2 = y_0 \sin(\omega t - kx)$ , які поширюються у протилежних напрямках.

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

$$y = y_1 + y_2 = 2 y_{max} \sin \omega t \cos kx. \quad (8.12)$$

Особливістю стоячої хвилі є те, що частинки коливаються одночасно, у цьому разі утворюються області з максимальною амплітудою коливань (*пучності*) та області спокою (*вузли*). Відстань

між сусідніми вузлами (або сусідніми пучностями) дорівнює половині довжини хвилі (рис. 8.4).



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

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

### 8.5. 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:

$$y_1 = y_{max} \cos \omega_1 t, \tag{8.13}$$

$$y_2 = y_{max} \cos \omega_2 t, \tag{8.14}$$

Внаслідок накладання двох коливань результуюче коливання описується рівнянням:

$$y = y_1 + y_2 = y_{max} (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t). \quad (8.15)$$

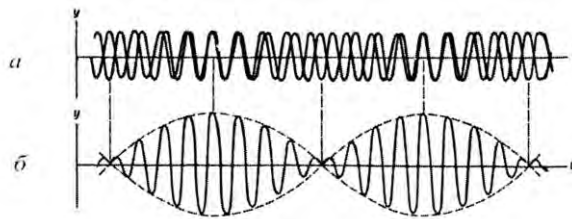
Використовуючи тригонометричне співвідношення

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right), \quad (8.16)$$

та враховуючи вираз (5.9), одержимо:

$$y = 2y_{max} \cos 2\pi \left( \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} \right) t \cos 2\pi \left( \frac{\nu_1 + \nu_2}{2} \right) t. \quad (8.17)$$

Графік результуючого коливання наведено на рис. 8.5.



**Рис. 8.5. Биття коливань**

Таким чином, ефективна частота результуючого коливання дорівнює  $\left( \frac{\nu_1 + \nu_2}{2} \right)$ ; максимальна амплітуда результуючих коливань має місце

тоді, коли  $\cos 2\pi \left( \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} \right) t = \pm 1$ , тобто амплітуда результуючих коливань

змінюється з частотою  $\left( \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} \right)$ .

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

За Фур'є, будь-яке складне коливання  $y(t)$  можна представити як комбінацію достатньо великої кількості синусоїдних та косинусоїдних хвиль, які утворюють *ряд Фур'є*:

$$y(t) = \sum_n (A_n \sin 2\pi \nu_n t + B_n \cos 2\pi \nu_n t), \quad (8.18)$$

де  $A_n$  і  $B_n$  – амплітуди гармонічних коливань;  $\nu_n$  – частота  $n$ -го коливання.

Залежність відносної інтенсивності гармонік від їх частоти називається *гармонічним спектром* складного коливання. Приклад розкладання складного коливання в ряд Фур'є наведено на рис. 8.6, а відповідний гармонічний спектр цього коливання – на рис. 8.7.

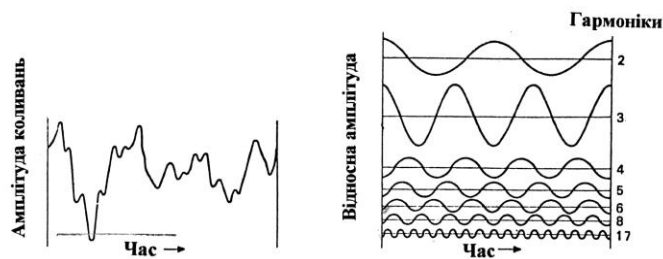


Рис. 8.6. Розкладання складного коливання в ряд Фур'є

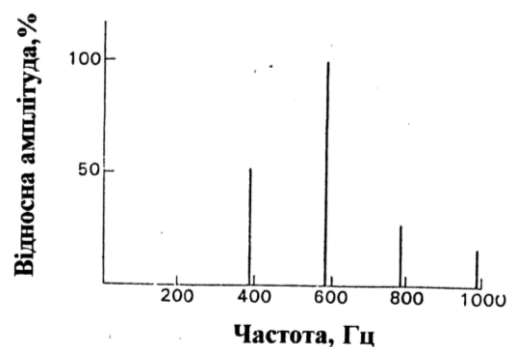


Рис. 8.7. Гармонічний спектр складного коливання

## 8.7. КОЛИВАЛЬНІ ПРОЦЕСИ У ПРИРОДІ

### 8.7.1. Екологічна модель Вольтерра–Лотка

Розглянемо класичний приклад моделі біологічної системи, яка описується двома диференціальними рівняннями – *екологічну модель Вольтерра-Лотка*. Нехай у деякому замкнутому районі мешкають жертви (зайці) та хижаки (вовки). Зайці годуються 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  $N_1$ :

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1. \quad (8.19)$$

Зменшення кількості зайців пропорційне ймовірності зустрічі зайця з вовком, тобто добутку кількостей  $N_1N_2$ . Таким чином, процес зменшення кількості зайців описується рівнянням:

$$\frac{dN_1}{dt} = -bN_1N_2. \quad (8.20)$$

Зміна кількості зайців з урахуванням їх розмноження та можливості зустрічі з вовками буде описуватися рівнянням:

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1 - bN_1N_2. \quad (8.21)$$

Таким чином, кількість вовків буде зменшуватися (за рахунок природної смертності) пропорційно їх кількості  $N_2$  і збільшуватися

пропорційно ймовірності зустрічі із зайцями  $N_1N_2$ . Зміна кількості вовків запишеться рівнянням:

$$\frac{dN_2}{dt} = -cN_2 + dN_1N_2. \quad (8.22)$$

Всі ці міркування призводять до системи двох диференціальних рівнянь:

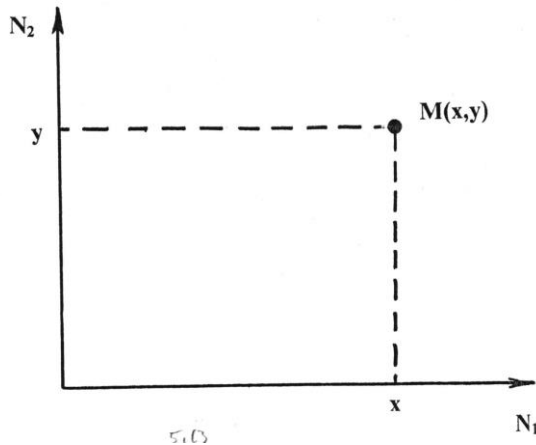
$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= aN_1 - bN_1N_2; \\ \frac{dN_2}{dt} &= -cN_2 + dN_1N_2. \end{aligned} \right\} \quad (8.23)$$

Слід зауважити, що кожному стану біологічної системи “зайці – вовки” відповідає певна пара змінних  $N_1$  і  $N_2$ ; водночас, будь-яка пара значень  $N_1$  і  $N_2$  описує певний стан системи.

Розглянемо можливість графічної інтерпретації згаданого вище. Нехай є система координат, на осях якої відкладені значення змінних  $N_1$  і  $N_2$ .

Кожна точка  $N$  такої площини з координатами  $X$  і  $Y$  відповідає певному стану системи (рис. 8.8). Така площина називається *фазовою площиною*. Під час зміни стану системи у часі змінні  $X$  і  $Y$  змінюються відповідно до системи рівнянь (8.23).

Процес зміни  $X$  і  $Y$  буде відповідати руху точки  $M(X, Y)$ ; сукупність можливих положень цієї точки на фазовій площині називають *фазовою траєкторією*.



**Рис. 8.8. Фазова площина**

Для того, щоб одержати рівняння, що зв'язує безпосередньо  $N_1$  і  $N_2$ , розділимо друге рівняння системи (8.24) на перше, виключивши час  $t$ :

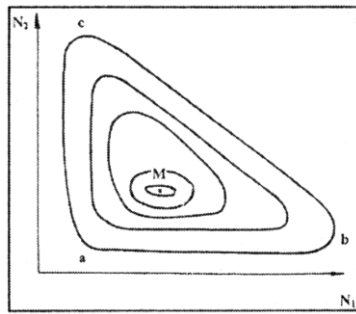
$$\frac{dN_1}{dN_2} = \frac{Q(N_1, N_2)}{P(N_1, N_2)}. \quad (8.24)$$

Розв'язання цього рівняння дає сукупність інтегральних кривих (фазових траєкторій) на площині  $N_1, N_2$  (рис. 8.9).

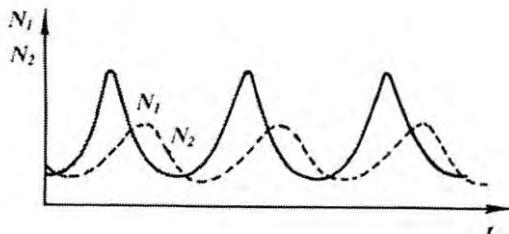
Точки, в яких похідні змінних  $\frac{dN_1}{dt}$  і  $\frac{dN_2}{dt}$  перетворюються в нуль, називаються *особливими точками*. Оскільки швидкості зміни  $\frac{dN_1}{dt}$  і  $\frac{dN_2}{dt}$  в особливій точці дорівнюють нулю, вона відповідає *стаціонарному стану*.

Отже, зростання чисельності зайців відповідає руху від точки  $a$  до точки  $b$  на фазовій площині (див. рис. 8.9); цей процес супроводжується зростанням чисельності вовків, що одержали сприятливі

умови годівлі; але це зростання чисельності хижаків призводить 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 “зайці – вовки” здійснює коливання. Будь-



**Рис. 8.9. Фазовий портрет системи "хижак-жертва" (M – особлива точка)**



**Рис. 8.10. Поведінка змінних  $N_1$  і  $N_2$  у часі**

чисельності зайців випереджає максимум чисельності рисей на один рік. причому максимум чисельності зайців випереджає максимум чисельності рисей на один рік.

який випадковий зовнішній вплив переводить систему в іншу фазову площину.

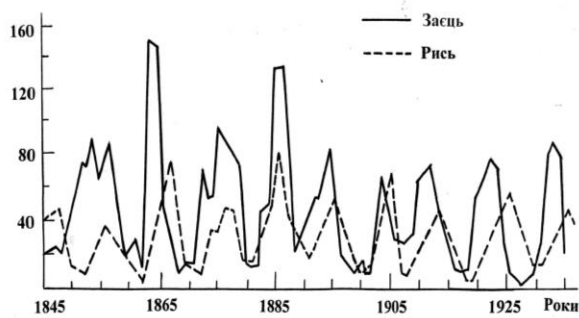
Поведінку змінних  $N_1$  і  $N_2$  у часі наведено на рис. 8.10. Очевидно,

що максимум чисельності жертв завжди випереджає максимум чисельності хижаків.

З цими кривими узгоджуються результати спостережень за коливаннями чисельності івнічноамериканського зайця а рисі в Канаді (рис. 8.11).

Періоди коливань чисельності жертв та хижаків приблизно однакові і становлять 9–10 років, причому максимум



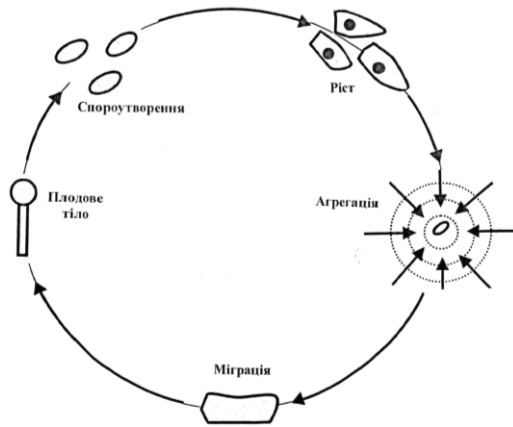


**Рис. 8.11. Результати спостережень за змінами коливань чисельності північноамериканського зайця та рисі в Канаді**

### **8.7.2. Утворення колоній колективними амебами**

Реальні біологічні системи не знаходяться в стані рівноваги, оскільки в них протікають процеси, що супроводжуються дисипацією енергії – переходом частини енергії упорядкованого процесу в енергію неупорядкованого процесу, наприклад, у теплоту або випромінювання. Виникнення дисипативних структур спостерігається і в популяції амеб *Dictyostelium discoideum*. Після виходу зі спор амеби ростуть та розмножуються як одноклітинні організми, доки їм вистачає їжі. Коли харчовий ресурс вичерпується, амеби припиняють репродукцію та вступають у проміжну фазу, що триває близько 8 год. Після цього амеби сповзають до окремих клітин, що виконують функції центрів агрегації. Пояснюється це тим, що найбільш “голодні” амеби випускають сигнал – хімічну речовину  $\alpha$ АМФ. Як тільки внаслідок дифузії ця речовина досягне іншої амеби, то та також виділяє свою порцію  $\alpha$ АМФ і починає переміщатися до першої амеби. Таким чином утворюються концентричні автохвилі руху амеб. Такий процес супроводжується утворенням багатоклітинних колоній, які поводять

себе як єдиний організм. Ця колонія мігрує, доки не знайде ділянку середовища, придатну для формування плодового тіла. З цього часу колонія починає диференціюватися, утворюючи стеблину, яка несе на кінці безліч спор. Цей автокаталітичний процес повторюється періодично (рис. 8.12).



**Рис. 8.12. Утворення колоній у колективних амеб**

Коливальні процеси і хвилі є поширеними явищами живої природи. До ко-ливальних можна віднести такі процеси: биття серця, рух легень, роботу кишечника, вібрації голосових зв'язок, періодичну окиснювально-відновну реакцію Белоусова–Жаботинського, періодичні процеси при гліко-лізі та фотосинтезі, спіральні хвилі в міокарді та сітківці ока, поширення звукових коливань тощо.

### 8.7.3. Природні коливання та рослини

Королівська примула (правильна ботанічна назва примула імператорська) *Primula imperialis* зростає на острові Ява і служить для місцевих жителів своєрідним сенсором, який пророкує виверження вулканів або землетрус. Вважається, що потужним поштовхів земної кори передують слабкі коливання різних частот, в тому числі і ультразвуків, які прискорюють рух поживних соків по капілярах рослини, інтенсифікують процес обміну речовин, в результаті чого квітка розцвітає.

✓ *Для допитливих*

Чутливість таргана (*Blattodeae*) до вібрацій становить  $10^{-7}$ – $10^{-10}$  см; амплітуду коливань у таких границях можна порівняти з діаметром атома водню.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ**

1. Що таке коливання?
2. Які коливання називають гармонічними? Записати і пояснити рівняння гармонічного коливання. Дати визначення амплітуди, фази і початкової фази гармонічного коливання.
3. Що таке період коливань? частота коливань?
4. Які коливання називають згасаючими?
5. Що таке логарифмічний декремент згасання?
6. Яку хвилю називають біжучою? стоячою?
7. Навести приклади коливальних процесів, що зустрічаються у живій природі.

## 9. АКУСТИКА

Галузь фізики, яка вивчає пружні коливання та хвилі звукового, ультразвукового та інфразвукового діапазонів, процеси їх збудження, обробки, поширення, рецепції, взаємодії з речовиною та різноманітні практичні застосування, називається *акустикою*.

### 9.1. ЗВУК ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

В біофізиці *звук* – це пружні збурення, що поширюються в твердих, рідких і газоподібних середовищах, які сприймаються слуховим аналізатором людини та тварин.

Розглянемо основні характеристики звуку:

*Частота*  $\Omega$  звуку характеризується як періодичні коливання, що сприймаються середньою людиною.

Звукові хвилі, що сприймаються людиною, мають частоту в діапазоні  $\Delta\Omega = 20\text{--}20000$  Гц.

*Швидкість поширення звукової хвилі*  $v$  залежить від середовища (табл. 9.1).

*Енергія звукових коливань*  $E$  складається з кінетичної енергії  $E_k$  молекул, що коливаються, і потенціальної енергії  $E_n$ , зміщених відносно положення рівноваги.

*Повна енергія*, яка переноситься звуковою хвилею, визначається так:

$$E_{\max} = 2\pi^2\rho v^2 A^2 V, \quad (9.1)$$

де  $\rho$  – густина середовища, в якому поширюється звукова хвиля;  $V$  – об'єм.

### 9.1. Основні акустичні параметри різних речовин

Речовин а	Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Швидкість звуку $\nu$ , м/с	Питомий хвильовий опір $\rho\nu$ , кг/м <sup>2</sup> · с
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	$1,85 \cdot 10^3$	$3,36 \cdot 10^3$	$6,216 \cdot 10^6$

<sup>1</sup> У літературних джерелах з акустики використовують спеціальні символи:  $\Omega$  – частота,  $\lambda$  – довжина звукової хвилі.

*Об'ємна густина енергії*, тобто повна енергія одиниці об'єму середовища, в якому поширюється звукова хвиля, дорівнює:

$$E_{max}/V = 2\pi^2 \rho \nu^2 A^2 = \frac{1}{2} \Omega^2 \rho A^2. \quad (9.2)$$

*Потужність звукової хвилі (акустична потужність)  $P$*  визначається як енергія  $E_{max}$ , що переноситься звуковою хвилею за одиницю часу  $t$ :

$$P = E_{max}/t. \quad (9.3)$$

*Інтенсивність  $I$  звукової хвилі* – це відношення потужності звукової хвилі до одиниці площі  $S$ , через яку переноситься енергія

звуковою хвилею та яка перпендикулярна напрямку поширення цієї хвилі:

$$I = \frac{P}{S} = E_{max}/St. \quad (9.4)$$

Інтенсивність звуку пов'язана з амплітудою  $A$  максимального зміщення співвідношенням:

$$I = (E_{max}/V)v = 2\pi^2\rho v^2 A^2 v = \frac{1}{2}\Omega^2\rho A^2 v. \quad (9.5)$$

*Звуковим (або акустичним) тиском  $p_a$*  називають додатковий тиск (надлишковий над середнім тиском навколишнього середовища), який утворюється в ділянках згущення частинок в акустичній хвилі:

$$p_a = \Omega\rho v A, \quad (9.6)$$

де  $\Omega$  – колова частота;  $A$  – амплітуда зміщення частинки, яка коливається;  $\rho v$  – питомий хвильовий опір середовища.

Звуковий тиск пов'язаний з інтенсивністю хвилі:

$$I = p_a^2/2\rho v. \quad (9.7)$$

### Приклад

Інтенсивність звукової хвилі, що створена ріжком пастуха на відстані 320 м, дорівнює  $10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>. Визначити величину звукового тиску.

### Розв'язання

Використовуючи співвідношення (9.7), маємо:

$$p_a = (2\rho v I)^{1/2}.$$

Підставляємо числові значення і дані табл.9.1:

$$p_a = (2 \cdot 427 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2)^{1/2} \text{ Н/м}^2 = 2,92 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2.$$

### **Контрольне завдання**

Кудкудакання курки створює додатковий тиск близько  $1 \text{ Н/м}^2$ . Використовуючи дані табл.9.1, розрахувати інтенсивність звуку, що створює курка, в повітрі.

*Відповідь:*  $10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ .

### **9.2. Рівень інтенсивності звукових коливань**

Діапазон інтенсивності звукових коливань, які здатна реєструвати людина, змінюється від мінімального значення, що відповідає порогу слухової чутливості людини ( $I_0 \cong 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ ), до максимального, який відповідає порогу болісних відчуттів ( $I \cong 1 \text{ Вт/м}^2$ ). Через це доцільно використовувати логарифмічну шкалу оцінки інтенсивності звукових коливань.

*Рівень інтенсивності звуку  $L$  оцінюється так:*

$$L = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right), \quad (9.8)$$

де  $I$  – інтенсивність звукової хвилі, яка оцінюється;  $I_0$  – мінімальна інтенсивність.

Тут  $L$  вимірюється у децибелах (дБ). Типові значення рівня інтенсивності звуку наведено в табл. 9.2.

## 9.2. Типові значення рівнів інтенсивності звуку

Джерело звуку	Рівень інтенсивності звуку, дБ
Шелестіння листя	10
Шепіт	20–30
Шум, при якому можна спати	35
Дзижчання комара	40
Читальна зала	40
Спокійна бесіда	55–60
Пральна машина	50–75
Пилосос	60–85
Міська вулиця	75
Голосна розмова	80
Автомобільний сигнал на відстані 6 км	90
Електрична дріль	95
Постріл із рушниці	100
Дискотека	110
Рок-концерт	110–120
Поріг болісних відчуттів	130
Реактивний літак	140–150
Пошкодження барабанної перетинки	160
Запуск космічної ракети	180



### Приклад

Інтенсивність звукового імпульсу, створеного кажаном в процесі ехолокації на відстані декількох сантиметрів, складає  $10^{-2}$  Вт · м<sup>-2</sup>.

Оцінити рівень інтенсивності в децибелах.

### Розв'язання

Рівень інтенсивності звукового імпульсу визначимо за допомогою виразу:

$$L = 10 \lg \left( \frac{I_{\text{имп}}}{10^{-12}} \right),$$

звідки

$$L = 10 \lg \left( \frac{10^{-2}}{10^{-12}} \right) = 10 \lg 10^{10} = 10 \cdot 10 = 100 \text{ дБ.}$$

### Контрольне завдання

Оцінити інтенсивність звуку, що викликає болісні відчуття, використовуючи дані табл.9.2.

*Відповідь:* 10 Вт/м<sup>2</sup>.

### 9.3. Суб'єктивні характеристики звукових хвиль

Звук, який 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, яка характеризує слухові відчуття для даного звуку. Вона 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. Ефект Доплера

*Ефект Доплера* полягає у зміні частоти коливань або довжини хвилі, що сприймається спостерігачем, під час відносного руху джерела коливань та спостерігача.

Якщо джерело звуку та спостерігач рухаються назустріч один одному, частота, що сприймається спостерігачем, перевищує частоту джерела звуку.

Якщо джерело звуку та спостерігач віддаляються один від одного, спостерігач сприймає частоту звуку меншу, ніж частота джерела звуку.

Якщо спостерігач і джерело звуку нерухомі один відносно одного, має місце співвідношення:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}, \quad (9.9)$$

де  $\lambda$  – довжина;  $v$  – швидкість;  $\nu$  – частота звукової хвилі.

Якщо джерело звуку наближається до спостерігача, довжина звукової хвилі визначається так:

$$\lambda = \frac{v - v_a}{\nu}, \quad (9.10)$$

а частота звуку, що сприймається спостерігачем, так :

$$v_a = \frac{v}{v - v_a} \cdot v. \quad (9.11)$$

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 спостерігача має місце співвідношення:

$$v_r = \left(\frac{v}{v + v_r}\right) \cdot v. \quad (9.12)$$

В цьому разі частота джерела, що віддаляється, зменшується в  $\left(\frac{v}{v + v_a}\right)$  разів.

Якщо джерело звуку нерухоме, а спостерігач наближається до нього, частота звукової хвилі, що сприймається спостерігачем, збільшується:

$$v_a' = \left(\frac{v + v_a}{v}\right) \cdot v. \quad (9.13)$$

При віддаленні спостерігача від джерела частота звукової хвилі, що сприймається спостерігачем, зменшується:

$$v_r' = \left(\frac{v - v_r}{v}\right) \cdot v. \quad (9.14)$$

Така зміна частоти (довжини звукової хвилі) в процесі руху джерела звуку (або спостерігача) називається *ефектом Доплера*.

### **Приклад**

Визначити частоту ультразвукової хвилі, що сприймається комахою під час наближення до неї кажана зі швидкістю  $5 \text{ мс}^{-1}$ . Частота ультразвукової хвилі, що генерується кажаном, дорівнює  $60 \text{ кГц}$ .

### **Розв'язання**

Частота звукової хвилі, що сприймається комахою, може бути знайдена із виразу:

$$\nu_a = \frac{\nu}{\nu - \nu_a} \quad \nu = \frac{340}{340 - 5} \cdot 60 \cdot 10^3 = 60,9 \text{ кГц.}$$

### **Контрольне завдання**

Визначити частоту звукової хвилі, відбитої комахою і сприйнятої кажаном, використовуючи дані попередньої задачі.

*Відповідь:*  $61,8 \text{ кГц}$ .

## 9.5. УЛЬТРАЗВУК ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Пружні хвилі з частотами від  $2 \cdot 10^4$  Гц до  $10^9$  Гц називаються *ультразвуком*. До основних особливостей ультразвуку належить його властивість поширюватись по прямій, що дозволяє розглядати цей процес з позицій геометричної акустики (відбивання, заломлення, фокусування). Крім того, оскільки густина потоку енергії пропорційна квадрату частоти, ультразвукові хвилі характеризуються великою енергією.

Питання генерації ультразвуку, ослаблення, поглинання, глибини проникнення в речовину та розбіжності ультразвукової хвилі розглянуто детально в роботі [Посудін, 2008].

## 9.6. ІНФРАЗВУК

*Інфразвук* – пружні хвилі з частотами меншими, ніж області частот, що сприймаються людиною. Діапазон інфразвукових коливань становить від 16–25 Гц до 0,01 Гц. Інфразвукові хвилі характеризуються високою інтенсивністю, здатністю поширюватися вздовж земної поверхні на великі відстані без втрат. У природі джерелами інфразвуку є рослини і дерева, що коливаються, мікросейсмічні коливання земної поверхні, землетруси, урагани, вулканічні виверження, шторми, грозові розряди, цунамі, водоспади, відриви льодовиків та айсбергів, припливи та відливи. В індустріалізованому суспільстві до джерел інфразвуку належать автомобільні, корабельні, авіаційні та ракетні двигуни, сільськогосподарські механізми. Биття серця, коливання легень, робота кишечника, вібрації голосових зв'язок – усе це супроводжується генерацією інфразвуку. Інфразвукові коливання з

рівнем інтенсивності  $< 120$  дБ вважаються помірними, більше – інтенсивними.

### 9.7. ШУМ

Існує кілька визначень терміну *шум*. Перше визначення: шум являє собою звукові коливання, інтенсивність і частота яких змінюються несподівано та аперіодично. Згідно з другим визначенням, шумом є звук, який накладається на другий звук і взаємодіє з ним, тобто небажаний для нашого слуху звук. У третьому сенсі шум – це будь-який звук, який заважає людині. Наприклад, звуки музики є корисними звуками для музиканта і шумом у другому сенсі для людей, що розмовляють, або шумом у третьому сенсі для людини, яка хоче заснути.

Отже, шум являє собою звукові коливання, миттєва амплітуда яких змінюється несподіваним чином. Величина миттєвої амплітуди шуму описується нормальним (гаусовим) розподілом.

### 9.8. Розподіл шуму за інтенсивністю

Шум може бути побутовим, виробничим, промисловим, транспортним, авіаційним. Шум виникає під час розваг, домашніх робіт, використання іграшок, включення тривожної сигналізації, збирання сміття, будівельних та ремонтних робіт, запуску моделей аеропланів, картингів, спортивних автомобілів.

Рекомендовані норми шуму в приміщеннях і на територіях становлять: 30–35 дБ – на територіях заповідників; 34– 37 дБ в спальних приміщеннях (будинки, лікарні, квартири); 56–66 дБ – у приміщеннях магазинів, заводів тощо.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Який процес називають хвильовим?
2. Що таке пружні хвилі?
3. В яких частотних діапазонах знаходяться звукові, ультразвукові та інфразвукові хвилі?
4. Назвати основні характеристики звукових коливань.
5. Що таке суб'єктивні характеристики звукових коливань?
6. Чим визначається повна енергія, що переноситься звуковою хвилею?
7. Що таке рівень інтенсивності звуку?
8. Що таке ефект Доплера?
9. Що таке хвильовий опір?
10. Що називають ультразвуком? Сформулювати характерні ознаки ультразвуку.
11. Що таке інфразвук?
12. Дати визначення терміну “шум”.

## APPENDIX IV

### HEMODYNAMICS

The branch of biophysics that studies the causes, conditions, and mechanisms of blood movement in a closed system of blood vessels and describes this movement on the basis of the laws of hydrodynamics is called hemodynamics.

#### Blood composition

The blood supplies each cell with water, oxygen, nutrients, hormones, and receives the remnants of metabolic products and transmits them to the excretory organs. In addition, the blood is involved in regulating body temperature □ it transfers heat generated by the body from internal structures to the body surface.

Blood is an opaque viscous suspension made up of the liquid part of plasma and the blood cells that hang in it, which are called blood cells. Shaped elements of blood consist of erythrocytes, leukocytes and thrombocytes. Blood plasma is a liquid part of the blood, which consists of salts, carbohydrates, proteins and biologically active compounds dissolved in water.

The density of whole blood varies within  $(1,035-1,055) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; the plasma density is  $(1,025-1,034) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; erythrocytes  $(1,08-1,09) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Blood viscosity is equal to  $(4-5) \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , and plasma –  $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$  for temperatures  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; blood and plasma viscosity depends on the hematocrit (volume ratio of formed elements of blood and plasma) and temperature.



### **Circulatory system. The movement of blood through the vessels**

The circulatory system of animals consists of a set of vessels of different diameters, which form a vicious circle.

According to Hagen-Poiseuille's law, the volume of blood flow is determined by the pressure difference at the beginning and end of the vascular system and the hydrodynamic resistance  $R$ , which occurs due to friction of blood against the vessel walls:

$$R = (p_1 - p_2)/Q = 8l\eta / \pi R^4.$$

The volumetric velocity of blood flow  $Q$  is the volume  $v$  of blood passing through the vessels per unit time  $t$ :

$$Q = v / t.$$

The unit of measurement of volumetric blood flow velocity is ml/s.

The linear velocity of blood flow  $v$  is the ratio of the volumetric velocity of blood flow  $Q$  to the area  $S$  of the cross section of the vessel:

$$v = Q/S.$$

The unit of measurement of the linear velocity of blood flow is cm/s.

The value of  $Q$  remains constant for any part of the circulatory system. The linear velocity  $v$  depends on the cross-sectional area of the vessel. The total area of vessels at the level of capillaries is 700-800 times larger than the cross-sectional area of the aorta, and then, at the level of venules and veins, this area decreases.

The speed of blood flow through the vessels varies from the maximum value ( $40 \times 10^{-2}$  m/s) in the aorta to the minimum (about  $10^{-3}$  m/s) in the capillaries; the speed of blood flow in the veins, before reaching the heart, increases again ( $20 \times 10^{-2}$  m/s).

When a large vessel branches into several small vessels, Poiseuille's law requires that in order to obtain the same flow, the total area of  $\sqrt{n}$  vessels must be many times smaller than the area of the large vessel. Indeed, blood flow  $Q_1$  in a vessel of larger diameter is related to blood flow  $Q_2$  in vessels of smaller diameter:

$$Q_1 = nQ_2.$$

Taking into account the equation of flow continuity leads to the expression:

$$S_1 v_1 = nS_2 v_2.$$

Using Poiseuille's law, we obtain:

$$\pi R_1^4 \Delta p / 8 \eta l = \pi R_2^4 \Delta p / 8 \eta l.$$

From here:

$$\begin{aligned} \pi R_1^2 &= \sqrt{n} \pi R_2^2; \\ \sqrt{n} \pi R_1^2 &= n \pi R_2^2; \\ \sqrt{n} S_1 &= n S_2. \end{aligned}$$

The flow rate in small vessels decreases:

$$v_2 = \frac{v_1}{\sqrt{n}}.$$

The Poiseuille equation can only be applied to a constant flow of liquid through rigid straight tubes. The circulatory system of the body contains vessels with elastic walls; blood is a complex mixture of plasma and shaped elements. Therefore, blood flow and changes in vascular pressure cannot be described by the Poiseuille equation. The degree of deviation of the real situation occurring in the circulatory system from that described by the Poiseuille equation is some dimensionless constant  $\alpha$  :

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

where  $\omega$  – the frequency of pressure fluctuations in the vessel;  $\rho$  – fluid density;  $\eta$  – fluid viscosity.

For the arterial system  $\alpha \approx 6$ , therefore, the Poiseuille equation cannot be used; for small terminal arteries  $\alpha \approx 0,5$  and the Poiseuille equation can be applied. For large values of  $a$ , the velocity distribution profile differs from the parabolic shape, which is inherent in small values.  $\alpha$ .

Analysis of these characteristics shows that with decreasing vascular diameter, the Reynolds number decreases sharply. The movement of blood through most large vessels is laminar; turbulent flow is possible only at the beginning of the aorta (in large animals) and in the branches of large vessels.

Blood is a non-Newtonian fluid and there are certain differences between blood flow and the flow of a Newtonian fluid such as water. If you trace the movement of water through tubes of different diameters, you can

be sure that the viscosity of the water does not change in this case. Blood becomes less viscous when vessels of smaller diameter pass. The dependence of the viscosity on the diameter of the vessel can be explained by the fact that the velocity gradient causes the erythrocytes to concentrate along the flow axis. As a result, layers of blood with less viscosity are formed near the walls of the vessel, and the size of these layers becomes significant relative to the total cross section of the tube with decreasing radius of the vessel.

### **Physical principles of measuring erythrocyte sedimentation rate**

The bulk of the formed elements of blood are erythrocytes, red blood cells.

Erythrocytes contain hemoglobin, a complex protein that carries oxygen from the lungs to the tissues and carbon dioxide from the tissues to the respiratory system.

Due to hemoglobin, the color of erythrocytes is red.

Mammalian erythrocytes have the shape of a biconcave disk - this shape provides the maximum surface area for a given volume, which is important from the point of view of optimal oxygen exchange with the environment. The number of erythrocytes in the blood is  $2\text{-}3\cdot 10^{13}$  for an adult and  $5\text{-}9\cdot 10^{13}$  for a domestic animal; the typical diameter of the erythrocyte disc varies between 6-8  $\mu\text{m}$  in humans and 4-8  $\mu\text{m}$  in animals.

In blood vessels, erythrocytes move in a radial-circular manner. The erythrocyte velocity distribution curve has a flatter profile in the center of the vessel and a steeper one near the walls. During the movement in the shear flow, erythrocytes turn over; in this case, depending on the shear rate, they may be deformed, acquiring an oval or longitudinal shape due to collisions with each other and with the walls.

Typical erythrocyte sedimentation rates are 15-20 mm/h for men, 20-30 mm/h for women and 2-13 mm/h for children.

Erythrocyte sedimentation rate is related to blood viscosity dependence:

$$v \approx \frac{1}{\eta}.$$

The viscosity of the liquid in turn depends on the temperature:

$$\eta = a \cdot e^{\frac{b}{T}},$$

where a and b are constants; T-absolute temperature.

Therefore, taking into account the above formulas, we can prove that the rate of erythrocyte sedimentation in viscous fluid (blood) also depends on temperature:

$$v = a \cdot e^{bT}.$$

The change in the sedimentation rate of particles during temperature change is determined from the expression:

$$\ln v_2 - \ln v_1 = b \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

Measurement of ESR makes it possible to assess the processes that cause an increase in body temperature. As the body temperature rises, the viscosity decreases and the erythrocyte sedimentation rate increases. The increase in erythrocyte sedimentation rate is due to inflammatory processes, acute infectious diseases, chronic localized infections (abscesses), injuries, malignant tumors, pregnancy. The ESR measurement

procedure is especially appropriate in the case of diseases such as temporal arthritis, when the ESR values reach 100 mm/h.

### **Physical methods of blood research**

Direct measurements of erythrocyte diameter. The erythrocytes on the colored film are illuminated so that their image is projected on the screen with a magnification of 1000 times. The disadvantage of this method is the long duration of the measurement process.

Diffraction methods for determining the average diameter of erythrocytes. The method is based on the beam envelope of an erythrocyte and the observation of a diffraction pattern consisting of concentric rings. The diameter of these rings depends on the size of the erythrocyte and the distance between the object and the light source. The device consists of two telescopic cylinders; the outer one contains a light source, and the inner one contains a film with erythrocytes and calibrated holes of a certain diameter. The observer moves the inner cylinder until the diameter of the diffraction pattern is equal to the diameter of the calibrated hole. The values of the average diameter of the erythrocyte are plotted on the handle by which the inner cylinder moves.

Measurement of erythrocyte sedimentation rate. When removing blood from blood vessels, attention should be paid to the study of erythrocyte sedimentation rate (ESR). The rate at which particles settle in a viscous liquid depends on the temperature. As the body temperature rises, the viscosity decreases and the erythrocyte sedimentation rate increases. The increase in erythrocyte sedimentation rate is due to inflammatory

processes, acute infectious diseases, chronic localized infections (abscesses), injuries, malignant tumors, pregnancy.

Estimation of the number of erythrocytes per unit volume. The greater the number of erythrocytes per unit volume, the slower the erythrocyte sedimentation rate. Estimation of the number of erythrocytes in the blood is possible with the help of counting cameras or electronic devices. To use the counting chamber, the blood is diluted in a ratio of 1: 100 or 1: 200. A sample of diluted blood is placed on a microscope slide and analyzed.

The principle of operation of an electronic device for determining the number of blood cells is based on measuring the electrical resistance of blood using two electrodes immersed in this blood. The electrical conductivity of blood depends on the number and size of blood cells, and blood cells have a much higher resistance than blood plasma; we can assume that blood resistance correlates with the hematocrit. Of course, such a device requires pre-calibration of the concentration and size of blood cells, as well as the type of animals whose blood is being tested.

The electronic counter consists of two vessels - wide, which contains blood, and narrow, which is immersed in blood. A narrow vessel has a narrow opening through which blood cells pass due to some discharge of air created by the pump. The system is equipped with electrodes that are connected to a device for measuring electrical conductivity.

In addition, a narrow vessel is connected to a mercury manometer. As a blood cell passes through a narrow hole, an electrical circuit is short-circuited, causing the conductivity meter to generate a pulse whose amplitude depends on the volume of the cell. These pulses are analyzed by an amplitude discriminator, which responds only to pulses of a certain

amplitude, after which they pass (or not) through a pulse gate, which is open when the mercury column closes the electrode manometer and closed if the electrode is closed. This quantifies the volume of blood cells that have passed through the narrow opening and changed the pressure in the vessel.

Another method of determining the number of blood cells is based on dark field microscopy. Diluted blood passes through a thin tube, which is illuminated by a cone-shaped beam formed by a lamp and a dark field condenser (lens and diaphragm with a ring aperture). If there are no blood cells in the tube, light does not pass through the tube. When there is a blood cell in the tube, light is scattered on it, resulting in a light image of the cell in a dark field. This light image enters the photoelectric amplifier through the lens and aperture.

Determination of hematocrit. The technique of ultracentrifugation makes it possible to divide the blood into three fractions: at the bottom of the cuvette are placed erythrocytes; next is a layer of leukocytes and platelets; at the top of the cuvette contains blood plasma.

Thus it is possible to determine the relative number of blood components and hematocrit.

The hematocrit can be determined using a nomogram, on the background of which the capillary is mixed with blood components obtained after ultracentrifugation.

### **Physical principles of blood vessel diseases**

Blood diseases and damage to the walls of blood vessels may be associated with changes in the concentration of erythrocytes and their



increased aggregation, which leads to increased blood viscosity. Changes in the number of red blood cells in the total blood volume contribute to animal disease. Thus, an increase in the number of erythrocytes causes polycythemia - a significant increase in erythrocytes in the blood, which can cause an increase in hematocrit in cattle (total volume of blood cells relative to the total blood volume) from 35% (normal) to 71% and the number of erythrocytes from 5-7.5 to 20-24 million / mm<sup>3</sup>. A decrease in the number of erythrocytes or the concentration of hemoglobin per unit volume of blood leads to a disease such as anemia, which is accompanied by a decrease in the number of erythrocytes and a decrease in the content of hemoglobin per unit volume of blood. In animals, anemia is caused by blood loss due to bleeding, parasites, acceleration of erythrocyte destruction or slowing of erythropoiesis (the process of erythrocyte formation). In the case of sickle cell anemia, a significant increase in blood viscosity is observed at high shear rates. This disease is caused by the presence of pathological hemoglobins in erythrocytes.

Many diseases are associated with increased erythrocyte aggregation in the form of so-called coin columns or more complex conglomerates.

The destruction of the erythrocyte membrane and the release of hemoglobin into the plasma is called hemolysis. The cause of this phenomenon can be chemicals, mechanical irritation, changes in osmotic pressure, the effects of X-ray or ultraviolet radiation, blood transfusion procedure.

Consider the physical principles of vascular disease associated with vessel sealing due to the formation of blood clots on the inner wall, or diffuse dilation of the hole due to pathology of the walls. These diseases can be considered on the basis of the equations of an ideal fluid.

Thrombosis. The formation of compacted masses of blood or condensed lymph in the circulatory system leads to a decrease in the cross section of the vessel. This decrease in the value of the cross section  $S$  of the vessel is accompanied by an increase in the velocity  $v$  of blood flow in places of smaller cross section according to the equation of continuity of flow  $S = \frac{\text{const}}{v}$ ; an increase in the flow velocity  $v$  leads to a decrease in the static pressure  $p$  according to the Bernoulli equation  $p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \text{const}$ . Reducing this pressure below a certain level leads to blockage of the vessel. But because of this, the kinetic energy of moving blood increases, and the opening of the vessel increases. There are oscillations in the walls of the blood vessel, which cause pain.

Aneurysm. In the case of widening of the  $S$  section of the vessel due to pathomorphological changes in the walls, the flow velocity  $v$  decreases (equation of continuity of flow), but the static pressure  $p$  increases (Bernoulli equation). This excess pressure can lead to hemorrhage.

Gas embolism. In the blood vessel, in which for some reason (gas condensation, injury or injury of blood vessels, surgery) formed a gas bubble, due to the flow of the bubble shape is distorted (left and right hemispheres have different radii of curvature). Therefore, according to the Laplace equation, the additional pressures due to the surface tension of the fluid at the left and right boundaries of the separation will be different. The pressure difference can lead to disruption of blood supply, rupture or blockage of the vessel. This pathological process is called gas embolism.

## РОБОТА СЕРЦЯ

The complete work done by the heart during the transfer of  $1 \text{ cm}^3$  of blood depends on the change: height  $m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$ , pressures  $(m/\rho) \cdot (p_2 - p_1)$  and blood flow velocities  $\frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$ , ie:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + \frac{m}{\rho_0} \cdot (p_2 - p_1) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2).$$

Assume that the difference in height between the ventricle and the arterial arch is 0.15 m, the speed of blood flow in this area is 0.4 m/s, and the density is  $103 \text{ kg/m}^3$ . The initial rate of muscle contraction is zero. Note that blood pressure in a healthy person varies from 80 mm Hg. Art. (diastole - dilation of the heart cavities and their filling with blood) up to 120 mm Hg. st (systole contraction of the heart muscle after relaxation, accompanied by injection of blood into the arterial system). However, the minimum pressure set in the arteries causes the aortic valve to close when the pressure is zero. Therefore, the pressure difference is  $\Delta p = (120 \text{ mm Hg.st} - 0) = 1,6 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ .

The complete work performed by the heart during the transfer of  $1 \text{ cm}^3$  of blood is:

$$\begin{aligned} A &= A_1 + A_2 + A_3 = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + \frac{m}{\rho_0} \cdot (p_2 - p_1) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) = \\ &= 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot (0,15) + \frac{10^{-3}}{10^3} \cdot \left(\frac{120-80}{760}\right) \cdot 1,013 \cdot 10^5 + \frac{1}{2} \cdot 10^{-3} \cdot (0,4^2 - 0) = 0,01755 \text{ J}. \end{aligned}$$

The work of the heart for one contraction, which carries  $60 \text{ cm}^3$  of blood, is:

$$A = 1,755 \cdot 10^{-2} \text{ J} \cdot 60 = 1,053 \text{ J}.$$

To this work should be added the work of the right ventricle, which pumps blood into the pulmonary artery, providing a pressure of about 20 mm Hg. Art. ( $2.7 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ ), or 1/6 of blood pressure. The total work done by the heart in one contraction is:

$$A_{tot} = (1 + 1/6) Dj = 1,23 \text{ J}.$$

During the day the heart performs (at a pulse of  $60 \text{ min}^{-1}$ )  $24 \times 3600 = 86400$  beats; heart rate per day is  $A_d 105 \text{ J}$ .

Given that the duration of systole is about  $0.3 \text{ s}$ , the average heart rate during one contraction is:  $N = \frac{A_{3a2}}{t} = 4,1 \text{ W}$ .

### **Blood pressure**

The work of the heart is provided by blood pressure, which acts on the walls of the arteries and is determined by the level of blood compression. The pressure that occurs during a heart contraction is called systolic; The pressure that occurs after the heart relaxes is called diastolic. Blood pressure is measured in mm Hg. and is denoted as the ratio of systolic to diastolic pressure. It is seen that pressure fluctuations occur from almost zero to 120 mm Hg. The difference between systolic and diastolic pressure is the pulse pressure.

### **Blood pressure measurement**

Consider two methods of measuring blood pressure.

The non-invasive method is to listen to the noise generated by pulse waves. Between the shoulder and elbow impose a cuff into which air is pumped. When the blood flow in the radial artery stops, the pulse disappears and the pumping process is stopped. Then the air is released through a valve. This stage is accompanied by a decrease in pressure. When the pressure becomes equal to systolic, the blood is pushed through the artery and a turbulent flow is formed in it, which is accompanied by noises so-called Korotkov tones. Further reduction of pressure causes the restoration of laminar flow and the disappearance of noise. The readings of the manometer at this time correspond to diastolic pressure. Noise in the artery is monitored with a stethoscope (phonendoscope).

The average pressure is determined as follows:

$$\langle p \rangle = \frac{p_c + p_d}{2},$$

where  $p_s$  and  $p_d$  are systolic and diastolic pressures, respectively.

A more accurate expression for determining the average pressure, taking into account the duration of the pulse wave, is:

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

The non-invasive method is accurate, painless and easy to use. But he suffers from possible subjective errors when measuring low blood pressure. In addition, this method lacks information on the shape of the pulse wave.

The direct method involves the direct insertion into the blood vessel of a needle or a specialized tube - a catheter. Modern direct pressure

measurement technology is based on inserting a catheter into a vessel near the skin, or into an artery or vein, sometimes even into the heart itself. The catheter should be short, rigid and not inflated by blood flow to prevent errors in measuring blood pressure. To prevent blood clotting or gas embolism, the catheter is filled with saline. The flow of solution with coagulant (a substance that causes the aggregation of particles) is formed by an elastic bag filled with air. When a catheter is inserted into a vein, blood flow is directed through a valve to a pressure transducer connected to a pressure recording system.

The advantage of the direct method is the possibility of continuous monitoring of the pulse wave shape and higher measurement accuracy compared to the non-invasive method. The disadvantage of this method is the intervention of the catheter into the patient's circulatory system, which leads to pain and injury.

### **MODERN DEVICES FOR MEASURING PRESSURE**

The device for measuring blood pressure is called a tonometer (or sphygmomanometer). Tonometers are divided depending on the principle of operation into mechanical, semi-automatic, automatic.

Semi-automatic tonometers differ from automatic models in that to measure the pressure you need to pump air into the cuff of the device with a pear. Fully automatic electronic blood pressure monitors have a compressor that injects the required pressure into the cuff.

The principle of operation of the device is as follows: when the pressure in the cuff exceeds the blood pressure, the cuff squeezes the artery, blood flow is suspended. When the pressure in the cuff decreases, the artery opens, blood flow through the artery is restored. At a small gleam of an artery vortices of blood create Korotkov's noises. When the artery is fully open, the noise disappears. The electronic circuit registers the fluctuations of the air pressure in the cuff (oscillations) and transforms them into digital values.

## AERODYNAMICS

Aerodynamics is a branch of physics that studies the laws of motion of air (or other gas) and the forces that arise on the surface of the bodies relative to which this motion occurs.

### Particle physics

Particles are individual portions of a solid, liquid, or gaseous substance larger than 1 nm.

The flow of a viscous fluid can be laminar (if the layers of moving fluid are not mixed) or turbulent (when the layers are mixed).

The fluid flow regime is characterized by the Reynolds number, determined by the formula:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\eta},$$

where  $\eta$  – fluid viscosity;  $\rho$  – fluid density;  $D$  – tube diameter.

The transition from laminar to turbulent flow is determined by the critical Reynolds number  $Re_{kr}$ : if  $Re < Re_k$ , laminar flow; at  $Re > Re_k$  the flow is turbulent. For example, for the flow of a viscous incompressible fluid in a cylindrical tube  $Re_k = 2300$ . The laminar process of water transfer in the soil is characterized by values  $Re < 1$ .

### Aerosols and bioaerosols

A special place among the particles is occupied by aerosols - dispersed (colloidal) systems consisting of particles ranging in size from  $10^{-5}$  m to  $10^{-7}$  m and the gaseous medium in which they are suspended. The main source

of biological aerosols are plants that supply spores and pollen to the atmosphere. The latter are spread by air currents. Bioaerosols also include viruses, bacteria and insect particles.

Typical representatives of bioaerosols are bacteria *Bacillus sp.*, *Legionella pneumophila*, *Micropolyspora faeni*, *Mycobacterium tuberculosis*, *Pseudomonas spp.*, *Staphylococcus spp.*, *Streptococcus spp.*; fungi (primarily mold and yeast) *Histoplasma capsulatum*, *Alternaria spp.*, *Penicillium spp.*, *Aspergillus fumigatus*, *Stachybotrys atra*, *Fusarium spp.*, *Cladosporium spp.*; protozoa *Naegleria fowleri*, *Acanthamoeba sp.*; algae *Chlorella*, *Chlorococcum*, *Schizothrix*, *Anabaena*; mites *Dermatophagoides farinae*, *D. Pteronyssinus*, insects *Blatella germanica*, *Periplanetta Americana*, *Blatta orientalis*; remnants of fur (cats, dogs, ferrets, guinea pigs, hamsters, rabbits, rats, mice), pollen and spores of *Betula birch*, *Alnus alder*, *Pinus pine*, *Artemisia wormwood*, *Ambrosia ragweed*.

The branch of biology that studies organic particles that are passively carried in the air is called aerobiology. This science is closely related to palynology, mycology, toxicology, climatology, meteorology, engineering and control of biological pollution. The problems of aerobiology are paid more and more attention every year. As early as 1974, the International Association for Aerobiology (IAA) was founded in The Hague, the Netherlands. Today, the Association has about 800 members, has its own Council, journals and convenes international congresses every four years.

Most developed countries have stations to monitor the behavior and trends of bioaerosols that are dangerous to human health. In addition, aerosols and



bioaerosols play the role of condensation centers and, therefore, will affect the formation of clouds.

Influence of bioaerosols on living organisms. Bioaerosols can provoke diseases and allergic reactions in humans, affect animals and plants, cause disease through air currents. It is known that many bioaerosols can irritate the respiratory tract, in particular the nasopharynx, trachea, lungs, depending on their type and size.

Among the diseases caused by bioaerosols, we can distinguish bronchial asthma - an allergic disease that manifests itself in repeated attacks of expiratory (during exhalation) asthma due to impaired bronchial patency; allergic rhinitis - an allergic reaction manifested by significant swelling of the nasal mucosa, especially in the nasal sinuses; pneumonia - a group of inflammatory processes in the lungs with a predominant lesion of their respiratory tract.

That is why the problem of identification and quantification of atmospheric aerosols and bioaerosols is relevant.

### **Methods of measuring aerosol parameters.**

The device for measuring the characteristics of aerosols is equipped with a weather vane, which allows you to orient the entrance window against the wind direction. Bioaerosols are delivered during the day on a tape covered with adhesive tape. This tape is rotated relative to the entrance window by an electric motor in order to monitor the level of aerosols arriving during the day. The whole system is installed in a high place (for example, on the

roof of the house). Once a day, the tape is removed and analyzed for quantitative and qualitative content of bioaerosols.

### **The movement of atmospheric particles**

If a particle moves in the atmosphere, it is acted upon by gravitational, repulsive forces and the force of internal friction from the air flow according to Stokes' law. The ratio between these forces depends on the physical parameters of the particle, the atmosphere and without the Reynolds dimensional number  $Re$ .

Consider cases that depend on the relationship between the radius of the particle  $r$ , the free path length  $\lambda$  of gas molecules and the Reynolds number  $Re$ .

a)  $r > \lambda$ , алє  $Re = 2rv/\nu < 0,1$  (here  $v$  – particle velocity,  $\nu$  - kinematic viscosity). For a particle of mass  $m$  and volume  $V$  and density  $\rho$ , immersed in a gas of mass  $m_0$  with density  $\rho_0$ , act gravitational ( $F_{gp} = mg = V\rho g$ ) and Archimedean ( $F_0 = m_0g = V\rho_0g$ ) forces, as well as the force of internal friction (viscosity), determined by Stokes' law ( $F_\eta = 6\pi\eta r v$ ), where  $\eta$  – internal friction coefficient (dynamic viscosity).

The sedimentation rate is determined as follows:

$$v_{sed} = Vg(\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \frac{4}{3} \pi r^3 g(\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \frac{2}{9} g(\rho - \rho_0) r^2 / \eta.$$

b)  $r > \lambda$ , алє  $Re = 2rv/\nu > 1$ .

If a certain body is placed in an air flow, the momentum is transferred not only due to the friction forces directed parallel to the surface of the layers and the velocity gradient that occurs, but also because a force

called shape resistance occurs in the air flow direction. This force, due to the different values of pressure on the front and rear sides of the body during its flow, depends on the shape and orientation of the body. If the initial momentum of the body is  $\rho v$ , and the average change in speed  $-v/2$ , then the rate at which the flow decreases its momentum will be equal to  $\rho v \cdot v/2 = 0,5 \rho v^2$ , and the force of resistance is defined as:

$$F_{on} = 0,5 c_m \rho_0 v^2 \cdot S,$$

where  $c_t$  is the coefficient of resistance;  $\rho_0$  - gas density;  $v$  - particle velocity;  $S$  is the cross-sectional area of the particle.

In this case, the balance of forces acting on the particle is calculated by the formula:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho - \rho_0) = 0,5 c_{on} \rho_0 v^2 \cdot \pi r^2.$$

For bioaerosols  $\rho > \rho_0$ , therefore, the last equation can be rewritten as follows:

$$v^2 = 8rg\rho/3\rho_0 c_{on}.$$

Where the sedimentation rate of the particle is:

$$v_{sed} = 2g\rho r^2/9\rho_0 v,$$

where  $v$  is kinematic viscosity.

It was experimentally established that the coefficient of resistance and the Reynolds number are related by the relation:

$$c_{on} = \frac{b}{Re^n},$$

where  $b$  and  $n$  are constants.

For laminar flow  $Re < 2$ ,  $b = 24$ ,  $n = 1$ , a  $c_{on} = \frac{24}{Re}$ ; for turbulent flow  $Re = 500-200000$ ,  $b = 0,44$ ,  $n = 0$ , a  $c_{on} = 0,44$ . Thus, for small values of the Reynolds number ( $Re < 1$ ) the viscosity forces (Stokes' law) are dominant, while for large values of the Reynolds number ( $Re > 1000$ ) dominated by the forces described by Newton's law. Moreover, in the first region, the resistance depends on the Reynolds number, while in the second region, the resistance does not depend on the Reynolds number.

The velocity of the particle at any time is determined by the expression:

$$v_t = v_k - (v_k - v_0)e^{-t/\tau},$$

where  $v_t$  is the velocity of the particle in the vertical or horizontal directions at time  $t$ ;  $v_k$  is the final velocity of the particle;  $v_0$  is the initial velocity of the particle in the horizontal direction ( $v_0 = 0$  for the vertical direction).

### **Aerodynamics of aerial flight**

The bird's wing has a streamlined shape with a rounded front end and a narrow rear end. Due to the flow of such a concave wing of a bird, air particles passing through the upper, more convex surface of the wing, per unit time travel a distance greater than particles passing through the lower surface of the wing and therefore have a greater speed. The asymmetrical flow around the wing causes a circulating flow around the wing contour, which on the convex plane is directed towards the air flow, which leads to an increase in air velocity, and on the concave plane against the flow,

accompanied by a decrease in air velocity. But, according to Bernoulli's equation, where the air flow rate is higher, the medium pressure is lower, and vice versa. Due to the pressure difference between the upper and lower planes of the wing there is a so-called lifting force, which is directed perpendicular to the direction of velocity of the body.

During flight, there are four main forces acting on the wing. In addition to the lifting force, it is necessary to mention the force of gravity directed vertically downwards, the force of traction and the force of frontal resistance, which acts opposite to the direction of velocity of the body.

During the flight, the bird is able to change the angle of attack the angle between the chord of the wing and the direction of air flow, and the swing of the wing down is characterized by an increase in the angle of attack, which increases the lifting force.

## OSCILLATIONS AND WAVES

### Mechanical oscillations

Oscillations are movements or processes that are marked by a certain repetition over time.

Periodic are oscillations that are repeated at regular intervals.

Harmonic oscillations are periodic oscillations of a physical quantity (or any other) depending on time, which occur according to the laws of sine:

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

or cosine

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

where A is the amplitude of oscillations (maximum displacement of the oscillating point from the equilibrium position);  $\omega$  – stake frequency;  $\omega t + \varphi_0$  – phase of oscillations at the time  $t$ ;  $\varphi_0$  – *initial phase* (phase of oscillations at the time  $t=0$ ).

The shortest period of time after which the oscillating system returns to the state in which it was at the initial moment of time, chosen arbitrarily, is called the period of oscillations T. Period T is related to the circular frequency  $\omega$  ratio:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

A quantity equal to the number of oscillations per unit time is called the frequency  $\nu$ . The frequency  $\nu$  is related to the period T as follows:  $\nu$

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

The unit of measurement of frequency - Hz (Hertz) - a unit of measurement in SI of the frequency of periodic processes, which is equal to one oscillation per second:  $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$ .

So:

$$\omega = 2\pi\nu.$$

Енергія гармонічних коливань визначається за формулою:

$$E = \frac{mA^2\omega^2}{2}.$$

### **Fading oscillations**

Oscillations whose amplitude decreases with time due to energy losses by a real oscillatory system are called attenuations.

The equation of damping oscillations has the form:

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

where  $\beta$  – attenuation coefficient.

To quantify the rate of decrease of the amplitude of the attenuating oscillations, use the concept of the logarithmic decrement of the attenuation, which is equal to the natural logarithm of the ratio of the values of the amplitude of the attenuating oscillations at times separated by the period:

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T.$$

### Running wave

A traveling wave can be defined as a perturbation that moves in space with the transfer of energy. Consider a traveling wave, sinusoidal in shape, which propagates from time  $t=0$ , with velocity  $v$  in the direction  $+x$ . The equation of such a wave has the form:

$$y = y_0 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x).$$

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

$$y = y_0 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} x).$$

Size  $\frac{2\pi}{\lambda}$  is called a wave number; it is indicated by a symbol  $k$ .

### Standing wave

Consider two traveling waves  $y_1 = y_0 \sin(\omega t + kx)$  and  $y_2 = y_0 \sin(\omega t - kx)$ , which propagate in opposite directions.

These two waves interact with each other, resulting in the resulting wave:

$$y = y_1 + y_2 = 2 y_{max} \sin \omega t \cos kx.$$

The peculiarity of a standing wave is that the particles oscillate simultaneously, in which case regions with the maximum amplitude of oscillations (heaving) and regions of rest (nodes) are formed. The distance between adjacent nodes (or adjacent antinodes) is half the wavelength.



If  $\cos kx = \pm 1$ , the magnitude of the offset is maximum ( $y = 2y_{max}$ ); the value of  $x$  in this case corresponds to the antinode; if  $\cos kx = 0$ ,  $y = 0$  and the value of  $x$  corresponds to the node.

### **Beating oscillations**

Consider two waves that differ slightly in frequency and propagate in one direction. When observing the behavior of these two waves at a given point in space, oscillations are beaten - periodic fluctuations in intensity at a given point due to the superposition of two waves with slightly different frequencies.

Let the equations of two oscillations have the form:

$$y_1 = y_{max} \cos \omega_1 t,$$

$$y_2 = y_{max} \cos \omega_2 t,$$

Due to the superposition of two oscillations, the resulting oscillation is described by the equation:

$$y = y_1 + y_2 = y_{max} (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t).$$

Using a trigonometric ratio

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

and given the previous expression, we obtain:

$$y = 2y_{max} \cos 2\pi \left( \frac{\nu_1 - \nu_2}{2} \right) t \cos 2\pi \left( \frac{\nu_1 + \nu_2}{2} \right) t. \quad (8.17)$$

Thus, the effective frequency of the resulting oscillation is equal to  $\left(\frac{\nu_1 + \nu_2}{2}\right)$ ; the maximum amplitude of the resulting oscillations occurs when  $\cos 2\pi\left(\frac{\nu_1 - \nu_2}{2}\right)t = \pm 1$ , that is, the amplitude of the resulting oscillations changes with frequency  $\left(\frac{\nu_1 - \nu_2}{2}\right)$ .

### **Decomposition of complex oscillations into a Fourier series**

According to Fourier, any complex oscillation  $y(t)$  can be represented as a combination of a sufficiently large number of sine and cosine waves that form a Fourier series:

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

where  $A_n$  and  $B_n$  is amplitudes of harmonic oscillations;  $\nu_n$  frequency of the  $n$ th oscillation.

The dependence of the relative intensity of harmonics on their frequency is called the harmonic spectrum of a complex oscillation.

### **Oscillatory processes in nature**

#### **Ecological model of Volterra-Lotka**

Consider a classic example of a model of a biological system, which is described by two differential equations - the ecological model of Volterra-Lotka. Let the victims (hares) and predators (wolves) live in some closed area. Hares are fed only plant food, which is always plentiful; wolves only need hares.

We can assume that the change in the number of hares  $\left(\frac{dN_1}{dt}\right)$  proportional to their number  $N_1$ :

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1.$$

The decrease in the number of hares is proportional to the probability of the hare meeting the wolf, ie the product of the amounts of  $N_1N_2$ . Thus, the process of reducing the number of hares is described by the equation:

$$\frac{dN_1}{dt} = -bN_1N_2.$$

The change in the number of hares, taking into account their reproduction and the possibility of meeting with wolves, will be described by the equation:

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1 - bN_1N_2.$$

Thus, the number of wolves will decrease (due to natural mortality) in proportion to their number  $N_2$  and increase in proportion to the probability of encountering hares  $N_1N_2$ . The change in the number of wolves will be written by the equation:

$$\frac{dN_2}{dt} = -cN_2 + dN_1N_2.$$

All these considerations lead to a system of two differential equations:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= aN_1 - bN_1N_2; \\ \frac{dN_2}{dt} &= -cN_2 + dN_1N_2. \end{aligned} \right\}$$

It should be noted that each state of the biological system "hares - wolves" corresponds to a certain pair of variables  $N_1$  and  $N_2$ ; at the same time, any pair of values  $N_1$  and  $N_2$  describes a certain state of the system.

Consider the possibility of graphical interpretation of the above. Suppose there is a coordinate system on the axes of which the values of variables  $N_1$  and  $N_2$  are plotted.

Each point  $N$  of such a plane with coordinates  $X$  and  $Y$  corresponds to a certain state of the system. This plane is called the phase plane. When the state of the system changes over time, the variables  $X$  and  $Y$  change according to the given system of equations.

The process of changing  $X$  and  $Y$  will correspond to the motion of the point  $M (X, Y)$ ; the set of possible positions of this point on the phase plane is called the phase trajectory.

In order to obtain the equation that directly connects  $N_1$  and  $N_2$ , we divide the second equation of the system by the first, excluding the time  $t$ :

$$\frac{dN_1}{dN_2} = \frac{Q(N_1, N_2)}{P(N_1, N_2)}.$$

The solution of this equation gives a set of integral curves (phase trajectories) on the plane  $N_1, N_2$ .

The points at which the variables are derived  $\frac{dN_1}{dt}$  and  $\frac{dN_2}{dt}$  become zero, called special points. Because the rate of change  $\frac{dN_1}{dt}$  i  $\frac{dN_2}{dt}$  at a special point equal to zero, it corresponds to a steady state.

Thus, the increase in the number of hares corresponds to the movement from point a to point b on the phase plane; this process is accompanied by an increase in the number of wolves that have received favorable feeding conditions; but this increase in the number of predators leads to a decrease in the number of victims (transition  $b \rightarrow c$  on the phase plane), which affects the reduction of the number of wolves ( $c \rightarrow a$ ). Thus, the biological system "hares - wolves" oscillates. Any random external influence transfers the system to another phase plane.

Obviously, the maximum number of victims always exceeds the maximum number of predators. The results of observations of fluctuations in the numbers of North American hare and lynx in Canada are consistent with these curves. The periods of fluctuations in the number of victims and predators are approximately the same and are 9-10 years, and the maximum number of hares exceeds the maximum number of lynx by one year.

### **Formation of colonies by collective amoebae**

Real biological systems are not in equilibrium, because they undergo processes that are accompanied by energy dissipation - the transition of part of the energy of an ordered process into the energy of an unordered process, such as heat or radiation. Occurrence of dissipative structures is observed in the population of amoebae *Dictyostelium discoideum*. After leaving the spores, amoebae grow and reproduce as unicellular organisms as long as they have enough food. When the food resource is depleted, amoebae stop reproducing and enter an intermediate phase lasting about 8 hours. After that, amoebae slide to individual cells that perform the functions of centers of aggregation. This is explained by the fact that the most "hungry" amoebae emit a signal - the chemical cAMP. As soon as this substance reaches another amoeba due to diffusion, it also releases its

portion of cAMP and begins to move to the first amoeba. Thus concentric autowaves of amoeba motion are formed. This process is accompanied by the formation of multicellular colonies that behave as a single organism. This colony migrates until it finds a part of the environment suitable for the formation of the fruiting body. From this time the colony begins to differentiate, forming a stem that carries many spores at the end. This autocatalytic process is repeated periodically.

Oscillatory processes and waves are common phenomena of living nature. The following processes can be considered as oscillatory: heartbeat, lung movement, intestinal function, vibrations of vocal cords, periodic redox reaction of Belousov-Jabotinsky, periodic processes in glycolysis and photosynthesis, spiral waves in the myocardium and retina, propagation of sound oscillations, etc.

### **Natural vibrations and plants**

Royal primrose (correct botanical name imperial primrose) *Primula imperialis* grows on the island of Java and serves as a kind of sensor for locals, which predicts volcanic eruptions or earthquakes. It is believed that powerful shocks of the earth's crust are preceded by weak oscillations of various frequencies, including ultrasound, which accelerate the movement of nutrient juices through the capillaries of the plant, intensify metabolism, resulting in the flower blooms.

## **ACOUSTICS**

The branch of physics that studies the elastic oscillations and waves of the sound, ultrasonic, and infrasonic ranges, the processes of their

excitation, processing, propagation, reception, interaction with matter, and various practical applications is called acoustics.

### Sound and its characteristics

In biophysics, *sound* is an elastic perturbation that propagates in solid, liquid and gaseous media, which are perceived by the auditory analyzer of humans and animals.

Consider the main characteristics of sound. *Frequency*  $\Omega^2$  sound is characterized as periodic oscillations perceived by the average person.

Human-perceived sound waves have a frequency in the range  $\Delta\Omega = 20-20000$  Hz.

The speed of sound wave propagation depends on the environment.

The energy of sound oscillations  $E$  consists of the kinetic energy  $E_k$  of the oscillating molecules and the potential energy  $E_p$  displaced relative to the equilibrium position.

The total energy transmitted by a sound wave is determined as follows:

$$E_{\max} = 2\pi^2\rho v^2 A^2 V,$$

where  $\rho$  – the density of the medium in which the sound wave propagates;  $V$  - volume.

The bulk energy density, ie the total energy per unit volume of the medium in which the sound wave propagates, is equal to:

$$E_{\max}/V = 2\pi^2\rho v^2 A^2 = \frac{1}{2} \Omega^2 \rho A^2.$$

Sound wave power (acoustic power)  $P$  is defined as the energy  $E_{\max}$  carried by the sound wave per unit time  $t$ :

$$P = E_{\max}/t.$$

The intensity of the first sound wave is the ratio of the power of the sound wave to the unit area  $S$ , through which the energy is transferred by the sound wave and which is perpendicular to the direction of propagation of this wave:

$$I = \frac{P}{S} = E_{max}/St.$$

The intensity of the sound is related to the amplitude  $A$  of the maximum displacement by the ratio:

$$I = (E_{max}/V)v = 2\pi^2\rho v^2 A^2 v = \frac{1}{2}\Omega^2\rho A^2 v.$$

Sound (or acoustic) pressure  $p_a$  is called the additional pressure (excess over the average ambient pressure), which is formed in areas of condensation of particles in the acoustic wave:

$$p_a = \Omega\rho v A,$$

where  $\Omega$  – stake frequency;  $A$  is the amplitude of the displacement of the oscillating particle;  $\rho v$  – specific impedance of the medium.

Sound pressure is related to the intensity of the wave:

$$I = p_a^2/2\rho v.$$

### **The level of intensity of sound oscillations**



The range of intensity of sound oscillations that a person is able to register varies from the minimum value corresponding to the threshold of human auditory sensitivity ( $I_0 \cong 10^{-12} \text{W/m}^2$ ), to the maximum, which corresponds to the threshold of painful sensations ( $I \cong 1 \text{W/m}^2$ ). Therefore, it is advisable to use a logarithmic scale for estimating the intensity of sound oscillations.

The sound intensity level  $L$  is estimated as follows:

$$L = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right),$$

where  $I$  - intensity of the sound wave being estimated;  $I_0$  - minimum intensity. Here  $L$  is measured in decibels (dB).

### **Subjective characteristics of sound waves**

Sound, which is the object of sound impressions, is evaluated by a living organism subjectively.

The pitch corresponds to the sound quality, which is determined subjectively by hearing and depends mainly on the frequency of sound oscillations. As the frequency increases, the pitch increases and vice versa. Much less pitch depends on the intensity and complexity of the sound.

Sound volume is a quantity that characterizes the auditory sensations for a given sound. It depends on the intensity of sound, acoustic pressure, frequency and shape of sound vibrations.

The timbre of the sound is determined by the spectral composition of the sound, ie the intensity and frequency of overtones relative to the fundamental tone.

### **Doppler effect**

The Doppler effect is a change in the frequency of oscillations or wavelengths perceived by the observer during the relative motion of the oscillation source and the observer.

If the sound source and the observer move towards each other, the frequency perceived by the observer exceeds the frequency of the sound source.

If the sound source and the observer move away from each other, the observer perceives the sound frequency less than the frequency of the sound source.

If the observer and the sound source are fixed relative to each other, there is a relationship:

$$\lambda = \frac{v}{\nu},$$

where  $\lambda$  – length;  $v$  - speed;  $\nu$  – sound wave frequency.

If the sound source approaches the observer, the sound wavelength is determined as follows:

$$\lambda = \frac{v - v_a}{\nu},$$

and the frequency of the sound perceived by the observer, yes:

$$\nu_a = \frac{v}{v - v_a} \cdot \nu.$$

Thus, the frequency of the approaching sound source increases compared to the frequency of the stationary source in  $\left(\frac{v}{v - v_a}\right)$  times.

In the case of removal of the sound source from the observer there is a relationship:

$$v_r = \left( \frac{v}{v + v_r} \right) \cdot v.$$

In this case, the frequency of the source being removed decreases in  $\left( \frac{v}{v + v_a} \right)$  times.

If the sound source is stationary and the observer is approaching it, the frequency of the sound wave perceived by the observer increases:

$$v_a' = \left( \frac{v + v_a}{v} \right) \cdot v.$$

When the observer is removed from the source, the frequency of the sound wave perceived by the observer decreases:

$$v_r' = \left( \frac{v - v_r}{v} \right) \cdot v.$$

This change in frequency (sound wavelength) during the movement of a sound source (or observer) is called the Doppler effect.

### **Ultrasound and its characteristics**

Elastic waves with frequencies from  $2 \cdot 10^4$  Hz to  $10^9$  Hz called ultrasound. The main features of ultrasound include its ability to propagate in a straight line, which allows us to consider this process from the standpoint of geometric acoustics (reflection, refraction, focusing). In addition, because

the energy flux density is proportional to the square of the frequency, ultrasonic waves are characterized by high energy.

The issues of ultrasound generation, attenuation, absorption, depth of penetration into the substance and discrepancies of the ultrasonic wave are considered in detail in the paper.

### **Infrasound**

Infrasound is elastic waves with frequencies lower than the frequency ranges perceived by humans. The range of infrasonic oscillations is from 16-25 Hz to 0.01 Hz. Infrasonic waves are characterized by high intensity, the ability to propagate along the earth's surface over long distances without loss. In nature, the sources of infrasound are oscillating plants and trees, microseismic oscillations of the earth's surface, earthquakes, hurricanes, volcanic eruptions, storms, thunderstorms, tsunamis, waterfalls, glaciers and icebergs, tides. In an industrialized society, the sources of infrasound include automobile, ship, aircraft and rocket engines, agricultural machinery. Heartbeat, lung fluctuations, bowel movements, vocal cord vibrations - all this is accompanied by the generation of infrasound. Infrasonic oscillations with intensity level <120 db are considered moderate, more intense.

### **Noise**

There are several definitions of the term noise. The first definition: noise is a sound oscillation, the intensity and frequency of which change suddenly and aperiodically. According to the second definition, noise is a sound that is superimposed on the second sound and interacts with it, ie sound that is undesirable for our hearing. In the third sense, noise is any sound that interferes with a person. For example, the sounds of music are useful sounds

for a musician and noise in the second sense for people talking, or noise in the third sense for a person who wants to fall asleep.

Therefore, noise is a sound oscillation, the instantaneous amplitude of which changes unexpectedly. The magnitude of the instantaneous noise amplitude is described by the normal (Gaussian) distribution.

### **Noise distribution by intensity**

Noise can be domestic, industrial, industrial, transport, aviation. Noise occurs during entertainment, housework, the use of toys, the activation of alarms, garbage collection, construction and repair work, the launch of models of airplanes, go-karts, sports cars.

The recommended noise norms in the premises and in the territories are: 30-35 dB - in the territories of reserves; 34-37 dB in dormitories (houses, hospitals, apartments); 56-66 dB - in the premises of shops, factories, etc.

## 10. БІОЛОГІЧНА АКУСТИКА

Розділ біофізики, що вивчає процеси утворення звуків людиною та тваринами, 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 (*larynx*) і пов'язані з нею голосові зв'язки, еластичні м'язові волокна яких можуть вібрувати. Звукові хвилі утворюються за рахунок 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 через цю трубку, примушує 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.

У процесі утворення звуків повітря виходить із легень і приводить у рух голосові зв'язки, в результаті чого виникають пружні коливання повітряного середовища. Голосові зв'язки містять еластичні й м'язові волокна, котрі можуть звужуватися і вібрувати. Висота звуку, що формується голосовим апаратом, залежить від напруженості

голосових зв'язок, їхньої форми, довжини ділянки, де відбувається коливання; інтенсивність звуку визначається частотою та тривалістю коливань зв'язок, що залежать відтиску повітря, яке виходить; тембр голосу забезпечується порожнинами, що знаходяться над голосовою щілиною і під нею, зокрема, порожнинами глотки, рота, носа, грудної порожнини, дихальним горлом.

За допомогою голосу і його відтінків, які визначаються висотою, інтенсивністю, тембром та інтервалами часу, тварини, птахи і комахи спілкуються з подібними до себе, подаючи сигнал про навколишню ситуацію, небезпеку, наявність корму тощо.

Так, у свійської свині розрізняють 23 типи голосових сигналів; бджоли можуть подавати 11 різних звуків. Курячі ембріони, коли потрапляють у повітряну камеру яйця, подають три типи звуків. За аналізом пищання курчат можна встановити стать, оскільки у півників тон звуків, які вони подають, нижчий [Стишковская, 1989].

*Птахи.* Нижня гортань (*syrinx*) – кісткова структура, що знаходиться в основі трахеї, виконує функції вокального органу птахів. В гортані, яка перетворює кінетичну енергію повітря, що рухається, в енергію звукової хвилі, знаходяться дві голосові мембрани (*membrana tympaniformis*) – під час проходження повітря між мембранами з великою швидкістю статичний тиск згідно з рівнянням Бернуллі зменшується і мембрани сходяться; отвір закривається, швидкість руху повітря зменшується і статичний тиск збільшується. Процес повторюється, внаслідок чого виникають звукові сигнали, частота яких у птахів знаходиться в діапазоні від 200 Гц до 12 кГц.

*Водні тварини.* Китові (зубаті кити *Odontoceti*, включаючи дельфінів) утворюють звуки за допомогою пари звукових губ (*phonic*

*lips*), розміщених у носовій системі. Дельфіни клацають та свистять. Деякі кити (*Mysticeti*) не мають такої структури; можливо, вони використовують перероблене повітря для утворення низькочастотних звуків для комунікації на великій відстані та навігації.

Крім того, кити застосовують плавці та хвіст для видобування звуків на морській поверхні.

Ластоногі тварини використовують крики, гавкання, ревіння, ричання та пирхання. Морські слони, наприклад, утворюють різноманіття гарчань та ревів. Деякі ластоногі утворюють високочастотні клацання, свистіння та імпульсні звуки, які виникають завдяки іншим системам, ніж голосова.

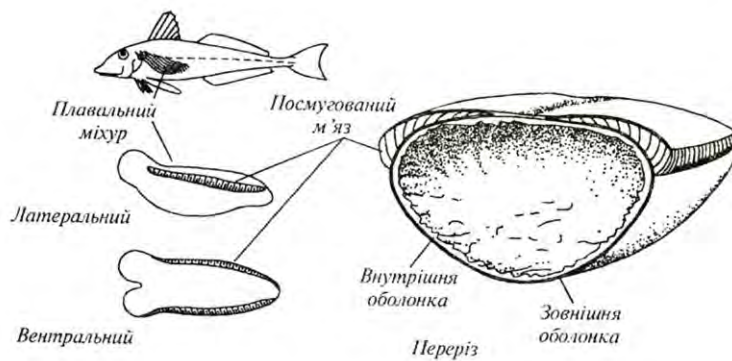
*Риби.* Механізми утворення звуків рибами різні – звуки можуть виникати за рахунок [Посудін та Грицай, 2011]:

*стридуляції* – взаємного тертя різних частин тіла, наприклад, складових частин ротового апарату в процесі харчування (такий мезанізм притаманний *Haemulon plumieri*, представникам заgonу *Tetraodontiformes* та родини *Scaridae*), або завдяки використанню плавців чи хребта (*Galeichtys felis*, *Bagre marinus*, *Gasterosteus aculeatus*, *Apeltes quadracus*, *Amphiprion*, *Hippocampus*, *Syngnathus louisianae*);

*гідродинамічної дії* – утворення звуків під час плавання;

*взаємодії спеціалізованих м'язів з плавальним міхуром* (*Rhinecanthus rectagulus*, *Aplodinotus*, *Holocentrus*, *Therapon*). Структуру м'язів, обладнаних вузькими борозенками, які 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.* Акустична сигналізація комах відіграє важливу роль у процесі комунікації комах в шлюбний період, при просторовій орієнтації в нічний час, для внутрішньовидової диференціації. Утворення акустичних сигналів здійснюється шляхом впливу на опорний субстрат, тертя спеціалізованих ділянок екоскелету, вібрації мембран, використання літальних апаратів [Єськов, 1979].

Багато тварин мають настільки малі розміри, що процес утворення звуку завдяки тільки м'язовим волокнам виявлятиметься вкрай неефективним. Вирішити цю проблему можна лише через помноження частоти звукового сигналу, що здійснюється у стридуляційному апараті комах (*Lepidoptera*, *Coleoptera* та *Hymenoptera*). Незважаючи на різні анатомічні властивості стридуляційних апаратів, принципи їх дії майже однакові. Стрекопальний кантик, розміщений в одній частині апарату, рухається вздовж стрекотальної жилки, яка має періодичну структуру. Розміри елементів цієї структури становлять близько кількох мікрометрів. Протягом кожного м'язового скорочення кантик зачіпає сотні елементів жилки, утворюючи у цьому разі звуки. Так, звуки, що

утворюються цикадою (*Tibicen linnei*) характеризуються рівнем інтенсивності 106 дБ на відстані 0,5 м. Модуляція звуку досягається, коли комаха вовтузиться своє черевце відносно рослини, на якій знаходиться. Так, звуки, що утворюються цикадою (*Tibicen linnei*) характеризуються рівнем інтенсивності 106 дБ на відстані 0,5 м. Модуляція звуку досягається, коли комаха вовтузиться своє черевце відносно рослини, на якій знаходиться

## 10.2. Акустична комунікація тварин

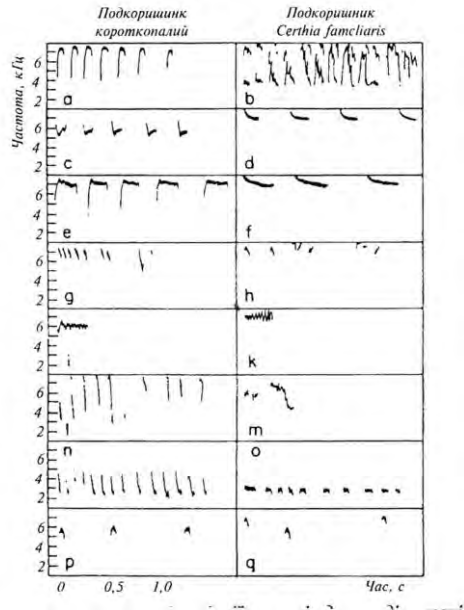
*Акустичні сигнали тварин.* Акустичне спілкування тварин здійснюється завдяки особливостям голосових систем, що дає можливість тваринам утворювати звуки різної інтенсивності, частоти, спектрального складу та тривалості, і, таким чином, здійснювати акустичну комунікацію між окремими тваринами та їх групами.

*Акустичні сигнали птахів.* Акустичні сигнали, що утворюються птахами, відрізняються інтенсивністю, частотою, часовою тривалістю. Їх можна поділити на дві основні 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.10.2.

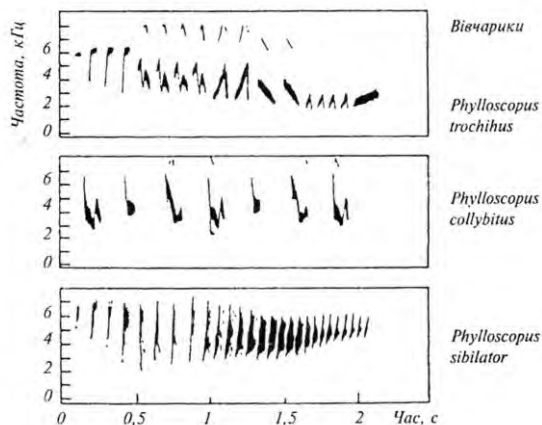
Тут заклики *a-d* використовуються для позначення території та відлякування інших самців - представників цього виду. Якщо птах схоплений, він утворює звуки тривоги *e-f*. Звуки *g-k* призначені для налагодження контакту з родичем; звуки *l-m* використовують під час холодної погоди, щоб зібрати представників цього виду для сумісного сну; звуки *n-o* є сигналами годівлі пташенят, які примушують

останніх відкрити рота; звуки *p-q* закликають пташенят до сну. Крім того, пташині заклики використовуються для наведення птахів до годівниці, у процесі висиджування, для впізнавання пташенят ( якщо птахи мешкають у колоніях), під час міграції тощо.



**Рис. 10.2. Можливі варіації закликів двох видів птахів (пояснення в тексті)**

Співи птахів виконують подвійну функцію. По-перше, вони інформують про власність певної території і попереджають 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.10.3 наведено сонограми співів птахів - представників різних видів одного роду ( вівчариків ).



**Рис. 10.3. Сонограми співів – представників різних видів одного роду. Кожний спів триває п'ять секунд**

Видно, що всі три сонограми значно відрізняються. Характеристики цих сонограм можуть бути використані як таксономічні критерії.

Акустичні сигнали, що утворюються птахами, відрізняються інтенсивністю, частотою, часовою тривалістю. Слід відзначити, що птахи – представники певного виду – впізнають один одного завдяки *амплітудній модуляції*, яка полягає в зміні інтенсивності акустичного сигналу у часі, та *частотній модуляції* – зміні частоти акустичних сигналів.

### 10.3. Акустична комунікація риб

Акустичні сигнали риб поділяються на харчові, нерестові, агресивно-оборонні, групові і пов'язані з турботою про нащадків. Стридуляційні звуки нагадують скрегіт і скрип; частота їх займає значну область – від 20 Гц до 12 кГц. Гідродинамічні звуки складаються з низькочастотних сигналів (20 Гц-5 кГц), які утворюються за рахунок 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.

Звуки, що утворюються рибами, призначені також для захисту території; кожний вид здатний генерувати звуки, що відрізняються частотою та тривалістю звукових імпульсів.

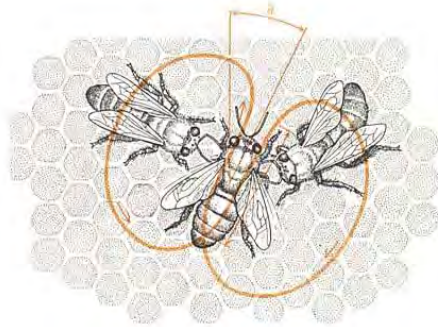
#### **10.4. Акустична комунікація комах**

Бджоли утворюють звуки, зумовлені діяльністю крилових пластин та тораксу. Спектр звуків бджоли займає область 8–12 кГц. Звукові сигнали, які утворюють бджоли, використовуються для передачі іншим бджолам сім'ї інформації про виявлення корму; інтенсивність, частота і тривалість звукових посилок залежать від рівня вентиляції, пори року, температури, наявності корму, відстані до годівниці.

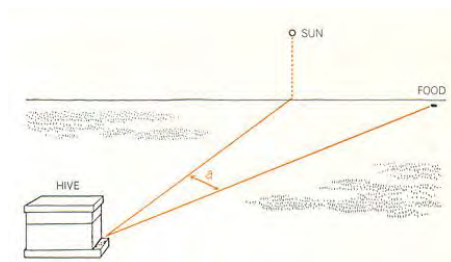
Із усіх бджіл роду *Apis* найбільш довершеною суспільною організацією характеризуються медоносні (*Apis mellifera*) та індійські (*A. indica* або *A. cerana*) бджоли. У процесі спілкування бджоли утворюють звуки, зумовлені діяльністю крилових пластин та органа, що утворює звук – тораксу.

Звукові сигнали, які утворюють бджоли, використовуються для повідомлення членів родини про виявлення корму. В процесі кормової мобілізації так звані фуражири медоносних бджіл виконують своєрідний танок та надають іншим членам вулика інформацію щодо напрямку розташування, джерела харчування, відстані до нього та кількості в ньому пилку і нектару (Рис. 10.4). Тривалість лінійної ділянки вісімки в танці бджоли в 1 секунду відповідає 1 км відстані до джерела корму. Робоча бджола передає

інформацію членам родини щодо відстані від вулика до виявленого корму та напрямку до джерела за допомогою кута  $\alpha$  відносно розташування Сонця [Wenner, A.M. 1964] (Рис. 10.5).

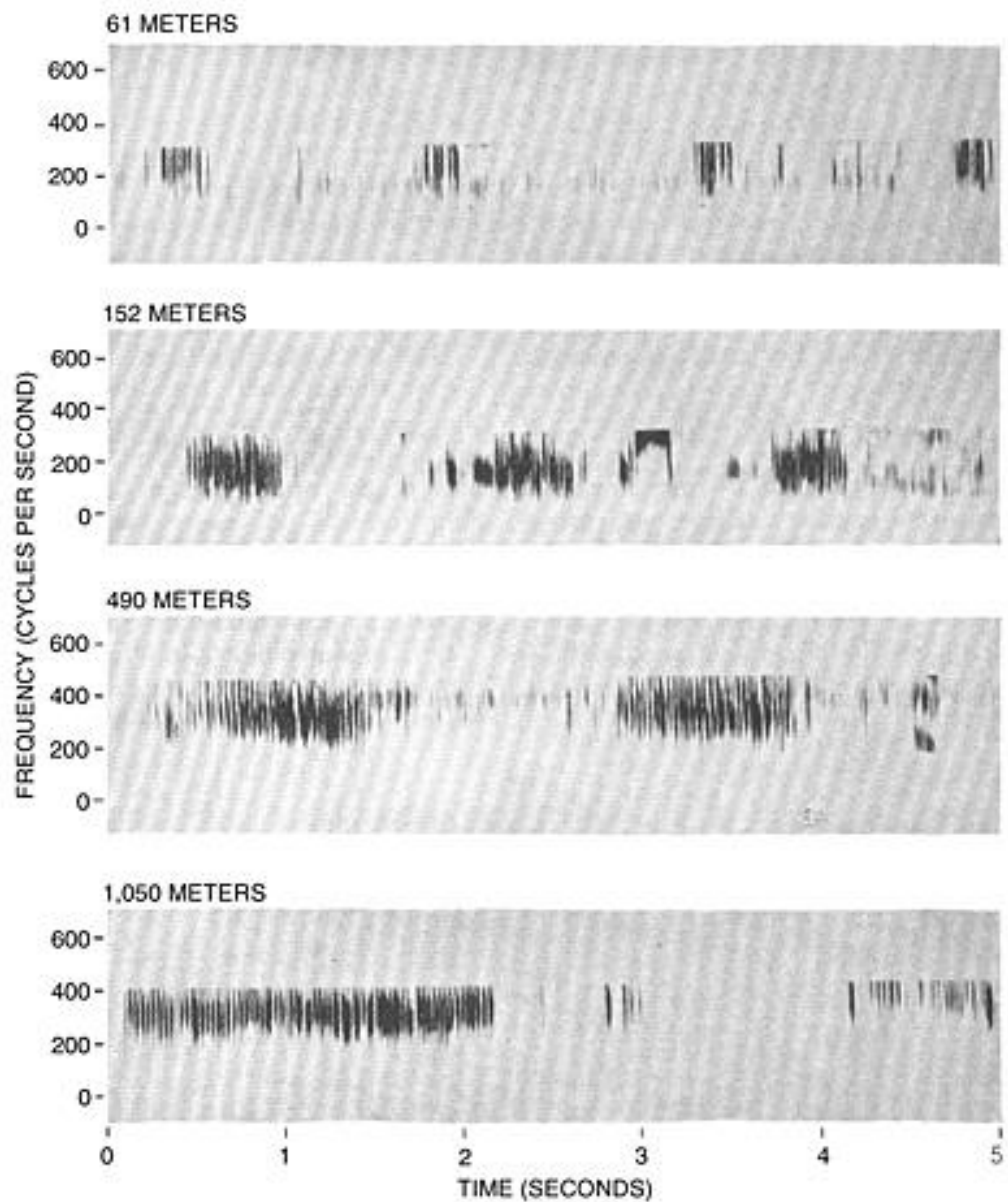


**Рис.10.4.** Виконуючи танець, бджоли, які виявили нектар, надають іншим членам вулика інформацію щодо напрямку розташування, джерела харчування, відстані до нього та кількості в ньому пилку і нектару [Wenner, A.M. 1964].



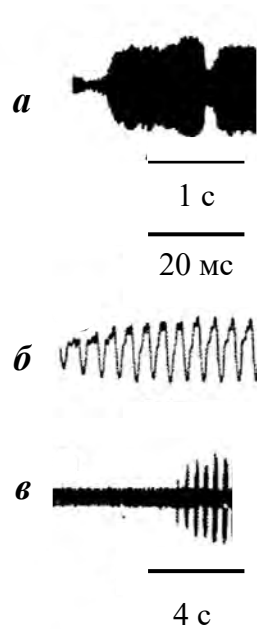
**Рис.10.5.** Робоча бджола передає інформацію членам родини щодо відстані від вулика до виявленого корму та напрямку до джерела за допомогою кута  $\alpha$  відносно розташування Сонця [Wenner, A.M. 1964]

Звукові сигнали, що створюються бджолою під час танцю, несуть інформацію про розташування до джерела корму та відстань до нього (Рис. 10.6).



**Рис.10.6. Звукові спектрограми бджоли. Тривалість звукового сигналу пропорційна відстані до годівниці [Wenner, A.M. 1964].**

Поміж акустичних сигналів, які утворюють бджоли, можна виділити також вібрації тораксу маток. Слід відрізнити два



**Рис. 10.7.** Два типи акустичних сигналів, що створюються матками: *a* – перший тип (“пікання”) як набір звукових повідомлень, частота яких збільшується; *б* – початкове зростання амплітуди першого типу сигналів; *в* – другий тип (“квакання”), що характеризується послідовністю короткочасних (< 200 мс) звуків [Wenner, A.M. 1964]

тип вібраційних сигналів матки – “пікання” та “квакання” (Рис.10.7). Перший тип сигналу характеризується набором звукових повідомлень, частота яких збільшується (Рис.10.7,*a*). Цей тип сигналу характеризується початковим зростанням амплітуди (Рис.10.7,*б*). Другий тип сигналу (Рис.10.7,*в*) характеризується послідовністю короткочасних (< 200 мс) звуків [Wenner, A.M. 1964].



Такі сигнали дозволяють забезпечити акустичну комунікацію першої, що вийшла з ройового маточника, матки зі своїми сестрами, готовими до виходу.

### 10.1. Частотний діапазон та максимальна акустична чутливість живих організмів

#### 10.2.

<b>Організми</b>	<b>Частотний діапазон</b>	<b>Максимальна чутливість</b>
<b>Земні тварини</b>		
Корова	23 Гц – 35 кГц	
Кінь	55 Гц – 33,5 кГц	2 кГц
Вівця	100 Гц – 30 кГц	10 кГц
<b>Морські тварини</b>		
Пляшконосий дельфін	250 Гц – 150 кГц	
Морська свинка	40 Гц – 150 кГц	
Зубатий кит	40 Гц – 325 кГц	
Гладенький кит	Менше, ніж 5000 Гц	
<b>Птахи</b>		
Канарейка	250 Гц – 8 кГц	
Сова	200 Гц – 12 кГц	2 кГц
Курки	125 Гц – 2 кГц	
<b>Риби</b>		
Тріска	2 – 500 Гц	20 Гц
Срібний карась	5 – 2000 Гц	400 Гц
Срібний окунь	250 – 300 Гц	1000 Гц

Більш детальну інформацію про параметри акустичних сигналів, що створюються бджолами, можна знайти в роботах [Wenner, 1964; Еськов Е.К. 1975, 1979, 1981; Kirchner, 1993].

Втім, практичне використання отриманих результатів ускладнюється їх суперечливістю [Тобоев, 2010].

Наземні та водні тварини, птахи, риби, амфібії, рептилії утворюють звуки в межах частотного діапазону, притаманному голосовій системі людини, а саме 20-20000 Гц. Втім, деякі тварини використовують ультразвуковий або інфразвуковий діапазони (Табл. 10.1).

### 10.5. Ехолокація тварин

*Ультразвукова комунікація тварин.* Тварини утворюють та використовують ультразвукові коливання з метою *ехолокації* – випромінювання ультразвукових хвиль у простір та сприймання відбитого сигналу для отримання інформації щодо розташування, розмірів та руху об'єктів або для навігації. Крім того, комахи використовують ультразвук для соціальної комунікації.

*Кажани (Vespertiloidei)* використовують ультразвукові сигнали для знаходження жертв, фруктів та дерев або для орієнтації у просторі. Деякі з них (*Microchiroptera*) видобувають короткочасні клацання, тоді як інші (*Microchiroptera*) генерують частотно-модульовані або з постійною частотою імпульси. Частотний діапазон ультразвукових сигналів, що утворюються кажанами, становить 14000–100000 Гц. Частота імпульсів може варіювати від 4–10 до 150–200 імпульсів за секунду.

### 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:

$$d = \frac{340 \text{ м/с} \cdot 0,25 \text{ с}}{2} = 43 \text{ м}.$$

### Контрольне завдання

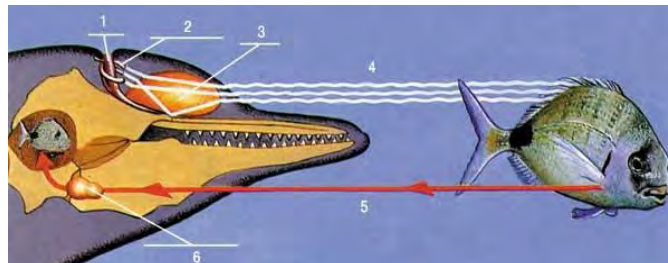
Визначити відстань, яку проходять імпульси кажана, які він посилає їх з частотою 200 імпульсів за секунду.

*Відповідь:* 0,85 м.

*Собаки* Частотний діапазон сприйнятливості ультразвукових коливань собаками становить 18–22 кГц. Цю здатність використовують власники собак для подавання команд спеціальними ультразвуковими свистками.

*Кішки.* Верхня границя сприйнятливості ультразвукових коливань кішками дорівнює 50 кГц, що дає можливість відчувати високочастотні крики жертв та полювати на них.

*Китові,* такі як зубаті кити, дельфіни, ластоногі використовують ультразвукові коливання для знаходження підводних об'єктів та комунікації. Частотний діапазон дельфінів становить 0,25-150 кГц; низькочастотні (0,25-50 кГц) сигнали використовуються для спілкування, тоді як високочастотні (50-150 кГц) – для ехолокації. Кожний дельфін має свою власну гаму ультразвукових свистків, які являють собою ультразвукові імпульси тривалістю 50-128 мкс. Ці сигнали відбиваються від конфокальної за формою кістки у черепі, після чого фокусуються спеціальним органом ліпідної природи (*melon*), який виконує функції лінзи (рис. 10.8).



**Рис. 10.8. Ехолокаційна система дельфіна: 1 – дихальцева порожнина; 2 – носовий мішок; 3 – мелон; 4 – ультразвукові хвилі; 5 луна; 6 – внутрішнє вухо**

Ультразвукові коливання, що генеруються дельфіном, поширюються у водному середовищі зі швидкістю 1500 м/с, відбиваються від підводного об'єкта та потрапляють у заповнені жиром порожнини в кістках нижньої щелепи, звідки передаються до

слухового апарату дельфіна. Завдяки цьому дельфін здатний визначати напрямок до жертви, її місцезнаходження, розміри, форму та швидкість руху

*Риби.* Деякі види риб (*Alosinae*) здатні детектувати ультразвукові сигнали частотою до 180 кГц; інші (*Clupeidae*) – до 4 кГц.

*Комахи.* Природа нагородила метеликів здатністю детектувати ультразвукові сигнали частотою до 80 кГц, що випромінюються кажанами, з тим, щоб запобігти атакам хижаків. Крім того, метелики (*Pyralidae: Ephestia cautella* (Walker), *Ephestia kuehniella* Zeller, *Plodia interpunctella* (Hübner)) самі видобувають ультразвукові коливання крилами для залучання статевих партнерів. Мурашки, представники роду *Ectatomma*, застосовують ультразвукові сигнали з частотою до 75 кГц, що генерується завдяки руху окремих частин тіла, для комунікації.

*Живі організми та інфразвук.* Люди чутливі до інфразвуку проявами жаху, збудження, неспокою, засмучення, нудоти, дисбалансу та просторової дезорієнтації.

Основним наслідком дії інфразвуку на живий організм є порушення органів балансу, а саме – вестибулярного апарату. Для дослідження впливу інфразвуку на людину або тварину використовували спеціальні генератори та гучномовці, які працювали в діапазоні 1–200 Гц з рівнем інтенсивності до 146 дБ. Оцінку впливу інфразвуку здійснювали шляхом реєстрації характеру і ступеня обертання очних яблук пацієнта, які оберталися у протилежних напрямках з частотою 0,7–1,5 с<sup>-1</sup>. Цей періодичний рух під назвою *ністагм* свідчить про порушення вестибулярного апарату. Реєстрацію ністагму здійснюють через вимірювання корнеально-

ретинового потенціалу; техніка вимірювання цього потенціалу називається *електроністагмографією*. Ністагматичний відгук організму залежить від інтенсивності інфразвукового стимулу і тривалості дії його на організм, а також від частоти інфразвукових коливань.

Можливим механізмом впливу інфразвуку на живі організми слід вважати зміщення перілімфи – рідини, що заповнює внутрішнє вухо, за рахунок періодичних змін тиску, які передаються цієї рідині через овальне віконце. В свою чергу, зміщення перілімфи призводять до деформації волоскових клітин.

Психологічний вплив інфразвуку пов'язаний з такими ефектами як нудота, сонливість, летаргія, почуття жаху або боязні. Інфразвук значної інтенсивності спроможний викликати зміни слухової чутливості, пошкодження барабанної перетинки, болісні відчуття, ускладнення мовлення і модуляції голосу, порушення респіраторної активності, зміни  $\alpha$ -ритмів мозку. Кити, слони, бегемоти, носороги, жирафи, алігатори, тигри використовують інфразвук для спілкування між собою на відстані та навігації.

Так, азіатські слони (*Elephas maximus*) утворюють інфразвукові сигнали в діапазоні 14-24 Гц інтенсивністю 70-100 дБ, тоді як африканські слони (*Loxodonta Africana*) утворюють інфразвукові сигнали в діапазоні 14-35 Гц інтенсивністю до 90 дБ. Ці сигнали дозволяють слонам спілкуватися на відстані до кількох кілометрів, запобігати зустрічі з бракон'єрами та попереджати інших слонів щодо небезпечних ситуацій, знаходити джерела води, шукати статевих партнерів, збиратися разом в умовах поганої видимості.

Інфразвук утворюється завдяки руху повітря через носовий прохід. Великі вуха слонів якнайкраще пристосовані для сприймання

інфразвуку. Низькі інфразвукові частоти відповідають великим довжинам хвиль, які відбиваються лише від великих за розмірами об'єктів, що дає можливість слонам спілкуватися у лісі, чагарниках тощо.

Жираф (*Giraffe camelopardalis reticulate*) має здатність генерувати інфразвукові коливання від 15 Гц (60 дБ) до 250-275 Гц (30 дБ) з домінантними частотами в області 20-40 Гц.

Кити (*Cetacea*) використовують інфразвук під час пошуків статевих партнерів та спаровування, оскільки інфразвукові коливання поширюються у водному середовищі на велику відстань (до 4800 км). Крім того, кити здатні паралізувати інфразвуком кальмарів та риб при полюванні.

Тигри (*Panthera tigris*) використовують інфразвукові сигнали частотою 18-20 Гц для спілкування у лісі та чагарниках. Інфразвукова компонента голосного реву тигрів дає можливість лякати та паралізувати жертв.

Хамелеон (*Chamaeleon*) характеризується здатністю генерувати та детектувати інфразвукові хвилі. Представники підродини *Chamaeleonidae* мешкають на деревах, де застосовують інфразвук для залицянь та територіальних домагань, тоді як представники підродини *Brookesiinae*, що мешкають на земній поверхні або в облетілому листі, використовують інфразвук для захисту від ворогів.

Вважається, що птахи, які мігрують, застосовують природні інфразвукові коливання (наприклад, від турбулентних потоків повітря у гірських районах) для навігації.

Є інформація, варта подиву, відповідно до якої тварини запобігають впливу цунамі та покидають небезпечні зони завдяки

їхньої здатності реєструвати інфразвукові коливання, що супроводжують поширення океанських хвиль, та реагувати на них.

### 10.6. Ультразвук та рослини

На острові Калімантан (він же Борнео), який знаходиться в центрі Малайського архіпелагу в південно-східній Азії, зростає хижа рослина непентес (лат. *Nepenthes hemsleyana*). Поряд зі звичайними листами у цієї рослини розвинені своєрідні глечико-подібні листя. Глечик непентеса служить місцем укриття для кажанів виду *Kerivoula hardwickii*. Летюча миша шукає місце для сідала за допомогою ехолокації, випромінюючи ультразвукові хвилі і визначаючи по їх відбиванню відстань до об'єкта та його форму. У цьому їй допомагає особлива увігнута структура всередині глечика *N. hemsleyana*, яка відбиває ультразвук і направляє його назад, до миші. У свою чергу, кажан удобрює непентес своїм послідом, збагаченим азотом.



Рис. 10.9. Глечик непентеса *Nepenthes hemsleyana* служить місцем укриття для кажанів виду *Kerivoula hardwickii*.

Розрізняють такі рівні шуму:

*Слабкий*

30 дБ – шепотіння, тиха бібліотека

*Помірний*

40–50 дБ – помірний дощ, спокійна кімната



*Інтенсивний*

60–80 дБ – будильник, дорожній рух, пилосос

*Дуже інтенсивний*

90–110 дБ – газонокосарка, дріль, рок-музика, автострада, барабани

*Який викликає болісні відчуття*

120–150 дБ – відбійний молоток, пожежна сирена, реактивний двигун

*Шумове забруднення* – це небажані для навколишнього середовища звукові коливання, які утворює людина або механізми. Шумове забруднення навколишнього середовища стало великою загрозою для здоров'я людини. Протягом дня мешканці великих міст примушені терпіти шумові перевантаження на рівні 65–70 дБ і більше. Є прямий зв'язок між інтоксикацією шумом і серцевими хворобами. В зонах великих аеропортів, де рівень шумів досягає 100 дБ, збільшився продаж снотворних ліків, а діти цих районів гірше засвоюють навчальний матеріал. Шум, величиною 90 дБ викликає різноманітні фізіологічні порушення. Верхня границя для людини становить 140 дБ, при 160–170 дБ відбувається руйнування барабанної перетинки вуха людини. Крім того, шум може 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 свої функції 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 (ШПЗ), який визначається шляхом вимірювання порогу слухової чутливості до і після дії шуму. Цей зсув може бути тимчасовим або постійним залежно від параметра шуму (інтенсивності, тривалості, частотного складу).

Слух здатний відновлюватися після припинення дії шуму на рівнях інтенсивності, що не перевищує 30 дБ, вже через 16-24 год. Слід зазначити, що для помірних рівнів шумового впливу процес відновлення слуху характеризується лінійною залежністю від часу у логарифмічному масштабі. Вплив більших рівнів інтенсивності викликає безповоротні пошкодження волоскових клітин, що призводять до сталого порогового зсуву. Експерименти на тваринах, які зазнали впливу акустичного шуму різної частоти, з наступним гістологічним аналізом кількості пошкоджених волоскових клітин у внутрішньому вусі свідчать про те, що поріг слухової чутливості зменшується в області  $10^3$ - $10^4$  Гц. Кількість волоскових клітин, що залишилися, може досягати при цьому лише 40 відсотків від норми.

На здоров'я людини впливає шум невеликої інтенсивності, але тривалий; високочастотний шум; імпульсний шум.

Крім того, шум викликає порушення тиску крові, серцевої діяльності, притупляє увагу, збільшує утомленість, дратівливість.

Звичайно, вплив шуму на людину залежить як від рівня інтенсивності звуку, так і від тривалості дії джерела шуму.

Рекомендовані норми шуму в приміщеннях і на територіях становлять: 30-35 дБ на територіях заповідників; 34-37 дБ у спальних приміщеннях (будинки, лікарні, квартири); 56-66 дБ у приміщеннях магазинів, заводів тощо.

### Аудиторні завдання

1. Інтенсивність звукового імпульсу, створеного кажаном в процесі ехолокації на відстані декількох сантиметрів, складає  $10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>. Оцінити рівень інтенсивності в децибелах.
2. Визначити відстань, яку проходять імпульси кажана, які він посилає з частотою 4 імпульси за секунду. Швидкість поширення звуку у повітрі при 20 °С становить 343 м/с.
3. Визначити відстань, яку проходять імпульси кажана, які він посилає їх з частотою 200 імпульсів за секунду.
4. Оцінити інтенсивність звуку, що викликає болісні відчуття.
5. Визначити, скільком децибелам відповідає шкала рівнів інтенсивностей звуку ( $I_{min} = 10^{-12}$  В/м<sup>2</sup>;  $I_{max} = 10$  В/м<sup>2</sup>).

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Як утворюють звуки ссавці? птахи? риби? комахи?
2. В чому полягає принцип аудіометрії?
3. Назвати основні процеси, що супроводжують взаємодію звукових хвиль з навколишнім середовищем.
4. Чим відрізняються акустичні характеристики води і повітря?
5. Як здійснюється акустична сигналізація птахів? риб? комах?

## 11. АКУСТОБІОЛОГІЯ

Розділ біофізики, що вивчає будову і фізичні принципи функціонування слухового аналізатора тварин, процеси акусторецепції і вплив акустичних сигналів на тварин, зветься *акустобіологією*.

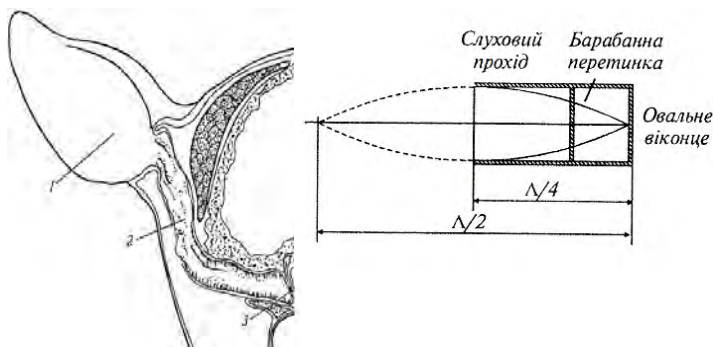
Система, яка перетворює енергію зовнішнього акустичного подразнення у послідовність нервових імпульсів, називається *слуховим аналізатором*. Слуховий аналізатор ссавців складається із зовнішнього, середнього і внутрішнього вуха, пов'язаних з центральною слуховою нервовою системою.

### 11.1. Акусторецепція у ссавців

Слуховий аналізатор людини і високорозвинених тварин складається з зовнішнього, середнього і внутрішнього вух, зв'язаних з центральною слуховою нервовою системою.

*Зовнішнє вухо* складається із *вушної раковини* (звуковловлювача) і *слухового проходу*. Вушна раковина є рупором, який направляє звукові коливання в слуховий прохід. У багатьох тварин (коней, кіз тощо) вушні раковини рухливі; за рахунок скорочення м'язів тварина обертає вушні раковини відносно поздовжньої осі, може нахилити їх уперед, назад, убік з тим, щоб направити раковини у бік розташування джерел звуку і забезпечити краще сприймання звуків. Функції зовнішнього вуха полягають в оптимізації та підсиленні найважливіших звукових частот, що доцільно з точки зору комунікації живих істот 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

звучу 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.



**Рис. 11.1. Формування стоячої хвилі у просторі, створеному слуховим проходом і середнім вухом: 1 – вушна раковина; 2 – слуховий прохід; 3 – барабанна перетинка**

### Приклад

Довжина слухового проходу і середнього вуха людини – 2,5 см. Визначити резонансну частоту слухового аналізатора людини.

### Розв'язання

Підставляючи числові значення у співвідношення між частотою звуку  $\nu$  зі швидкістю поширення  $V$  та довжиною хвилі  $\Lambda$ , маємо:

$$\nu = \frac{v}{\Lambda} = \frac{340 \text{ м/с}}{4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 3400 \text{ Гц.}$$

### Контрольне завдання

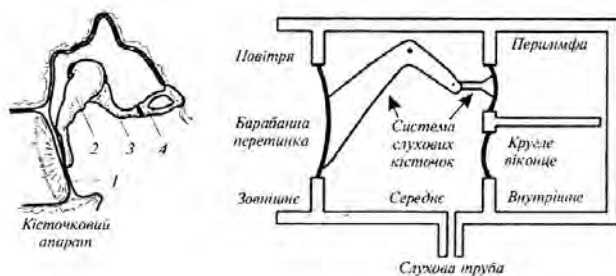
Визначити резонансну частоту для слухового аналізатора слона, довжина слухового проходу і середнього вуха якого складає 20 см.

*Відповідь:* 425 Гц.

Середнє вухо тварини, відокремлене від зовнішнього барабанною перетинкою, складається з барабанної порожнини, слухових кісточок (молоточка, коваделка і стремінця) та слухової труби (рис. 11.2).

Функції середнього вуха обмежуються передачею звукових коливань від зовнішнього середовища до ендолімфи, підсиленням слабких звукових сигналів і забезпеченням безпечного приймання інтенсивних сигналів.

Процес підсилення реалізується за рахунок збільшення тиску, що пов'язано з відміною площі барабанної перетинки та *овального віконця*, яке зв'язане із стремінцем і відокремлює середнє вухо від внутрішнього; підсилення тиску становить близько 20–25 разів.



**Рис. 11.2. Кісточковий апарат середнього вуха та модель, що пояснює функціонування середнього вуха: 1 – барабанна перетинка; 2 – молоточок; 3 – коваделка; 4 – стремінець**

Крім того, кісточковий апарат виконує функції важеля, який дає вигреш в силі приблизно в 2,5 рази. Загальний рівень підсилення звукових коливань середнім вухом становить, таким чином, близько 50–60 разів.

### Приклад

Площа барабанної перетинки –  $S_1 = 55 \text{ мм}^2$ , а площа овального віконця –  $S_2 = 3,2 \text{ мм}^2$ . Виграш у силі важеля, утвореного системою слухових кісточок, становить 1,3. Оцінити рівень підсилення слабких акустичних сигналів у процесі передачі середнім вухом зовнішнього звукового тиску внутрішньому вуху.

### Розв'язання

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, дає виграш в силі, що дорівнює:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{p_1 S_1}{p_2 S_2}.$$

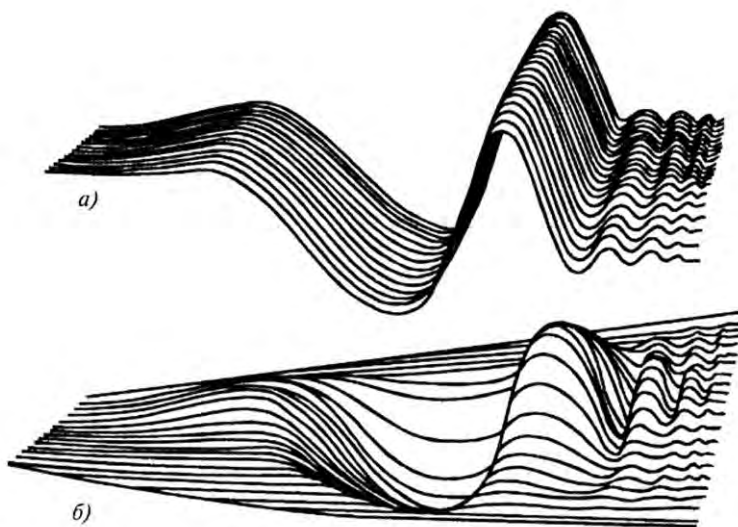
Звідки:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{S_1 l_1}{S_2 l_2} = \frac{55 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} \cdot 1,3 = 22.$$

*Внутрішнє вухо складається з трьох спіральних каналів – вестибулярного, середнього і барабанного, причому середній канал відокремлений від вестибулярного мембраною Рейсснера, а від барабанного – базиллярною мембраною. На проксимальному кінці (що міститься ближче до осі тіла) барабанного каналу знаходиться кругле віконце, що виконує функції демпфера. Акусторецепторами є волоскові*

клітини, які зв'язані з базиллярною мембраною; ці клітини оснащені *війками*. Базиллярна і покривна мембрани, волоскові клітини, з'єднані з *нервовими волокнами*, утворюють *кортієв орган*.

Функції внутрішнього вуха полягають у частотному аналізі звукових сигналів. Згідно з сучасними уявленнями, коливання, збуджені стремінцем в овальному віконці, викликають хвильові рухи базиллярної мембрани у вигляді *біжучої хвилі* (рис. 11.3).

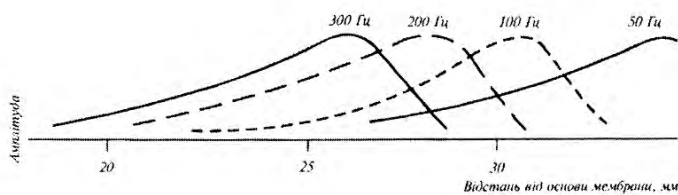


11.4. а) хвильові рухи базиллярної мембрани при низькій частоті; б) при високій частоті

**Рис. 11.3. Хвильові рухи базиллярної мембрани у вигляді біжучої хвилі**

Розташування максимуму біжучої хвилі залежить від частоти звукового сигналу – низькі частоти стимулюють верхівкові ділянки мембрани, тоді як високі – основу мембрани (рис. 11.4).

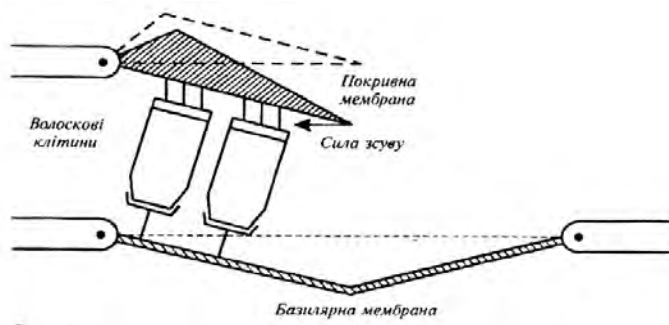




**Рис. 11.4. Залежність розміщення максимуму біжучої хвилі від частоти звукового сигналу**

Зміщення базилярної мембрани передаються волосковим клітинам, над якими знаходиться покривна мембрана. Внаслідок деформації базилярної мембрани покривна мембрана також починає рухатися, але, за рахунок різних систем закріплення обох мембран (дві точки опори у базилярній мембрани й одна – у покривній) на війки волоскових клітин діє з боку покривної мембрани сила зміщення (рис. 11.5); вигин війок призводить до збудження зв'язаних з волосковими клітинами волокон слухового нерва.

Автору теорії біжучої хвилі Георгу фон Бекеші було присуджено в 1961 р. Нобелівську премію. Таким чином, звукова хвиля викликає коливання базилярної мембрани з амплітудою, локалізованою в певних ділянках мембрани. Внаслідок цього має місце локалізоване збудження волоскових клітин кортієвого органа залежно від частоти звукового сигналу.

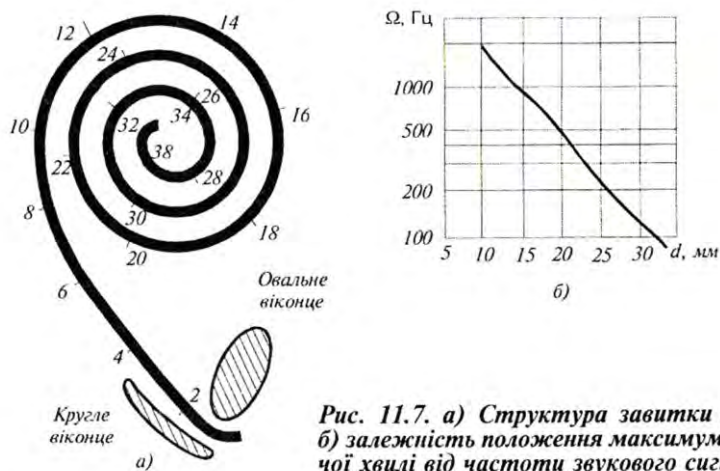


**Рис. 11.5. Виникнення сили зсуву, що діє на волоскові клітини завдяки руху покривної та базилярної мембран**

Таким чином, звукова хвиля викликає коливання базилярної мембрани з амплітудою, локалізованою в певних ділянках мембрани. Внаслідок цього має місце локалізоване збудження волоскових клітин кортієвого органа залежно від частоти звукового сигналу.

Визначення місця знаходження джерела звуку базується на здатності тварини сприймати різницю фаз та інтенсивність звукових хвиль, що досягають лівого та правого вух. Явище визначення напрямку, звідки виникає звук, тваринами, називають *бінауральним ефектом*.

Внутрішнє вухо різних тварин характеризується певними морфологічними особливостями. Структуру завитки корови наведено на рис.11.6 – загальна довжина її становить 38 мм, причому сама завитка скручена в 3,5 оберти. Відгук завитки корови починається з 50 Гц.



**Рис. 11.7. а) Структура завитки корови; б) залежність положення максимуму біжучої хвилі від частоти звукового сигналу**

**Рис. 11.6. Слуховий аналізатор корови: а – структура завитки; 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 являють співучі птахи через складність і значущість їх акустичних комунікаційних систем. Птахам, що ведуть нічний спосіб життя (наприклад, совам), притаманна надзвичайно висока слухова чутливість; у той же час, комунікаційний репертуар їх відносно примітивний.

Слуховий апарат птиці характеризується певними відмінами від слухового аналізатора ссавців. Зовнішнє вухо представлено коротким,

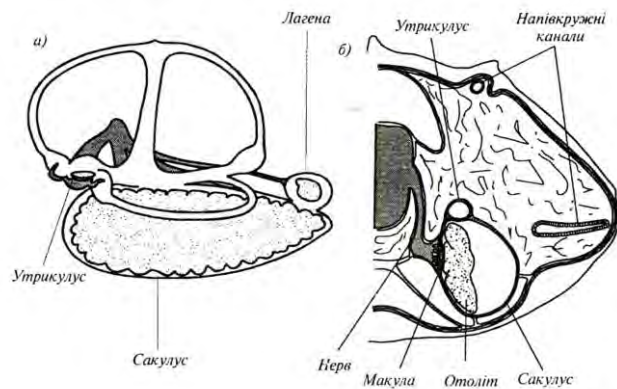
широким і складним за рельєфом слуховим каналом, який веде до барабанної перетинки. У багатьох птахів зовнішня частина слухового каналу оточена спеціалізованими пір'ями, що утворюють своєрідну вирву, яка виконує функції ефективного звукового колектора. Особливо розвинені такі заглиблення параболічної форми у сов. Середнє вухо складається з довгої тонкої кістки, що з'єднує барабанну перетинку з овальним віконцем. Внутрішнє вухо складається із короткої вигнутої завитки, довжина якої становить 4-10 мм. Так, завитка курча має довжину близько 5 мм; відгук 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 невеличкі 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 1-2 кГц.

### 11.3. Акусторецепція у риб

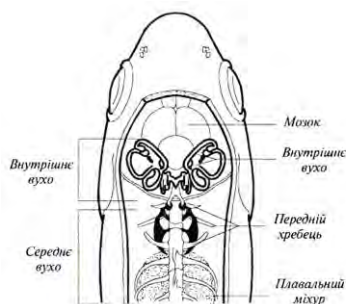
Згідно із загальноприйнятими поглядами слухову функцію несе орган рівноваги - лабіринт, зокрема його нижня частина (*Lagena* та *Sacculus*). Основним акусторецептором риб є отолітовий орган, який складається з отолітів і волоскових клітин (рис. 11.7).

Звукові хвилі проходять через тіло риби з невеликим опором і викликають рух волоскових клітин. Оскільки отоліти мають більшу густину, ніж вода і тканини риби, відгуки отолітів і волоскових клітин на звукові коливання відрізняються. Через різницю рухів отолітів і волоскових клітин відбувається деформація останніх, що надає в мозок інформацію щодо навколишньої звукової ситуації.



**Рис. 11.7. Слуховий аналізатор риби: а – система трьох ортогональних напівкružних каналів; б – переріз черепа на рівні переднього сакулуса**

Розділяють два типи слухових аналізаторів у риби - пов'язаних із плавальним міхуром, та таких, що позбавлені останнього. Так, у кісткових риби 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 позвонки (чотири пари рухливо поєднаних кісточок) внутрішньому вуху (рис.11.8).



**Рис. 11.8. Акусторецептор у кісткових риби (пояснення в тексті)**

Така кісточкова система отримала назву *Веберового апарату*. Плавальний міхур виконує функцію своєрідного резонатора, настроєного на звукові сигнали певної частоти і забезпечуючого їх підсилення. Риби, які не мають плавального міхура, використовують для перетворення звукових коливань у механічні повітряні порожнини, що зв'язані з внутрішнім вухом. Важливу роль у сприйнятті звуку відіграє сейсмоденситивна система з точки зору аналізу акустичної ситуації поблизу джерела звуку і рецесії 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 16-100 Гц та верхню 488-8000 Гц. У цьому діапазоні здатність сприймати більш високі (4000-8000 Гц) звукові частоти належить риbam, які мають плавальний міхур і Веберів апарат; їм же притаманна й більш висока абсолютна чутливість слуху ( -70 дб) порівняно з рибами, що позбавлені плавального міхура ( 0 - -50 дб).

#### 11.4. Акусторецепція у бджіл

Бджоли здатні реагувати на коливання частинок повітря завдяки чутливим органам *sensilla scolopophora*, які розташовані в антенах та у верхніх частинах гомілок кінцівок. Під впливом звуку волоскові сенсили 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.

#### ▼ Для допитливих

Найбільша потужність звуку належить киту (*Balaenoptera*) – 10 Вт; звук було чути на відстані 10000 км.

Найкращий слух у сови (*Tyto alba*) та у віргінського пугача (*Bubo virginianus*).

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Який процес називають хвильовим?
2. Що таке пружні хвилі?
3. В яких частотних діапазонах знаходяться звукові, ультразвукові та інфразвукові хвилі?
4. Назвати основні характеристики звукових коливань.
5. Що таке суб'єктивні характеристики звукових коливань?
6. Чим визначається повна енергія, що переноситься звуковою хвилею?
7. Що таке рівень інтенсивності звуку?
8. Що таке ефект Доплера?
9. Що таке хвильовий опір?
10. Які фізичні процеси відбуваються під час поширення звуку в навколишньому середовищі?
11. Що називають ультразвуком? Сформулювати характерні ознаки ультразвуку.
12. Назвати методи генерації ультразвуку.
13. Від чого залежить глибина проникнення ультразвуку?

14. Чим визначається розбіжність ультразвукової хвилі у середовищі?
15. Пояснити основні механізми впливу ультразвуку на біологічні об'єкти.
16. Що називають кавітацією?
17. Що таке інфразвук?
18. Як впливає інфразвук на людину?
19. Дати визначення терміну “шум”.
20. Як розподіляється шум за інтенсивністю? частотою?
21. Що таке шумове забруднення?
22. Назвати методи вимірювання шуму.
23. У чому полягають функції зовнішнього вуха?
24. За рахунок чого підсилюються звукові сигнали в середньому вусі?
25. Як відбувається аналіз частоти звукових сигналів у внутрішньому вусі?
26. Як використовується ультразвук у тваринному світі?
27. Назвати можливі застосування ультразвуку в медицині.
28. Як впливає інфразвук на живі організми?



## 12. НЮХ І СМАК

### 12.1. Нюх

*Нюх* – це процес сприйняття запаху живим організмом. Нюхові клітини безхребетних розташовані 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.

Для багатьох тварин важливим і навіть вирішальним способом комунікації є висилання хімічних сигналів. Хімічні леткі речовини, що створюються твариною і викликають специфічний відгук у 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 небезпеки, спілкування тварини з потомством, привертання статевих партнерів з метою спаровування і розмноження, орієнтації у просторі та навігації, підтримки певної соціальної ієрархії. Хімічні сигнали характеризуються невисоким розділенням, але вони діють на 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, за швидкості вітру 1 м/с область поширення клуба феромона має довжину 215 м, ширину 4560 м і висоту 108 м, тоді як за швидкості вітру 5 м/с ці параметри становлять: довжина – 1820 м, ширина – 97 м, висота – 48,5 м.

Хімічна комунікація комах здійснюється завдяки феромонам, серед яких найбільш поширені статеві атрактанти. Розглянемо один з таких ідентифікованих феромонів шовковичного шовкопряда *Bombyx mori*. Самець має на голові пару великих антен (рис. 12.1), які збирають бомбікол – атрактант, що надсилає самка. Цей атрактант є сумішшю (10:1) саме бомбікола (складного спирту) та його альдегідної форми бомбікала. Кожна антена метелика складається з основного стержня і великої кількості волосоподібних органів, серед яких знаходяться нюхові волоски. Вартою уваги є здатність антен селективно збирати молекули бомбікола за допомогою клітин-рецепторів, що знаходяться 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. Контакт клітини-рецептора шовкопряда з навколишнім середовищем відбувається через пори оболонки; діаметр кожної пори дорівнює 15 нм, а кількість пор на сенсилі становить 3200. Згідно з сучасними уявленнями, рецептори фактично рахують молекули, що збуджують клітину; коли кількість імпульсів від антени перевищує 200 імпульсів/с, самець реагує і рухається до джерела бомбікола. Механізм хімічної рецепції шовкопряда пов'язаний з поєднанням дифузійних процесів з високоефективною фільтрацією в антенах.



**Рис.12.1. Антена шовкопряда *Bombyx mori***

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, виявленні хижаків, знаходженні статевих партнерів, досягнення місць для нересту та орієнтації. Використання нюху дуже добре доведено у лосося, який починає своє життя в прісних водах річок, де він мешкає від кількох місяців до двох років залежно від виду; за цей проміжок часу він “вводить в свою пам'ять” запах прісної водойми. Далі лосось прямує вздовж течії до океану, де проводить від одного до чотирьох років, досягаючи статевої зрілості. Після цього лосось проходить близько 1500 км океанського простору, щоб досягнути річки, у верхів'ях якої він народився, для виділення ікри. Процес навігації лосося в океані ще не з'ясований достатньо; вважається, що лосось 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 розрізненні корму, для вибору зручних для насиджування місць та під час навігації. Серед птахів, що мають розвинені відчуття запахів, можна відзначити голубів, деяких морських птахів, шпаків, курчат. Цікавим можна вважати метод виявлення нюху у птахів. Промислові компанії з транспортування газу з метою знаходження дефектів у стінках труб накачували в останні такий одорант як кадаверин (трупна отрута); в тому місці, де труба мала отвір, збиралася велика кількість грифів.

## 12.2. Нюховий аналізатор

*Нюховий аналізатор* вищих тварин і людини – спеціалізована система, що забезпечує сприйняття різних пахучих речовин, аналіз та обробку збуджень, що виникають від периферії до центральної нервової системи. Складається нюховий аналізатор з нюхових рецепторних клітин (нейронів), які розміщені в слизовому шарі товщиною близько 60 мкм (рис. 12.2).

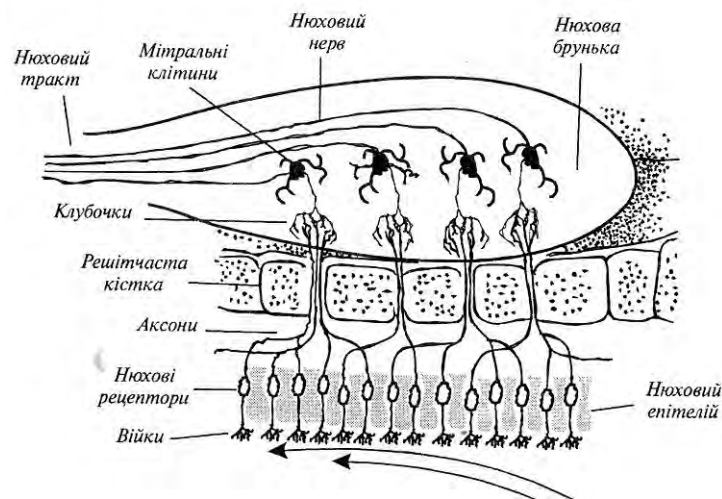


Рис. 12.2. Нюховий аналізатор

Рецепторний шар має нюхові та опорні клітини. З одного боку рецепторний нейрон закінчується війками, що мають контакт із зовнішнім повітрям через слизовий шар; з іншого – відростками (аксонами). Джгути з 10–100 аксонів проходять через отвори в решітчастій кістці і утворюють клубочки, які в свою чергу з'єднуються з двостулковими клітинами і через них – з мозком. Наприклад, у кроля 26000 нейронів поєднуються з 200 клубочками з тим, щоб утворити одну клітину. 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 діють на нюхові рецептори, завдяки чому останні збуджуються. Для того, щоб тварина відчула запах, 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).

### 12.3. Механізми нюху

*Механізми нюху* пов'язані з потраплянням молекул летких органічних сполук у нюховий аналізатор та зв'язуванням їх з рецепторними білками, які спроможні внаслідок цього змінювати мембранний потенціал; 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, кішки) мають специфічний *орган Джакобсона*, призначений для детектування феромонів та низьких концентрацій хімічних сполук природного походження.

Використовують тварини цей орган для спілкування між представниками того ж самого виду. Коли кішка відкриває верхню губу для того, щоб направити феромони на цей орган, здається, що вона посміхається (реакція Феймана).

## 12.4. Методи аналізу запахів

*Ольфактометрія* – це метод вимірювання гостроти нюху. Він застосовується для 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%). 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 поступовим збільшенням концентрації пахучої речовини, доки дегустатор не зреагує на неї. Інтенсивність запаху вимірюється порівнянням запаху, що оцінюється, з опорним запахом (звичайно, *n*-бутанола), зразки якого містять різні концентрації газу. Для оцінки інтенсивності запаху використовується 5-бальна система: від 0 (відсутність запаху) до 5 (дуже сильний запах). Стійкість запаху відповідає кореляції інтенсивності запаху з концентрацією пахучої речовини. Гедонічний тон вказує як людина сприймає той чи інший запах з точки зору відчуття приємних вражень. Характерні ознаки визначаються порівнянням запаху, що оцінюється, з добре відомими запахами.

*Автоматизовані системи типу “електронний ніс”* позбавлені суб’єктивних підходів до оцінки запахів. Такі системи складаються з набору хімічних сенсорів, в основі яких лежить полімерна плівка. Коли газ, що оцінюється, проходить через плівку, він викликає

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 (20–50) сенсорів, які надають специфічну картину сенсорних 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 розділення, знаходження і визначення речовин завдяки неоднаковості їх поведінки в системі із двох фаз, які не змішуються – рухомій і нерухомій. Рухомою фазою у разі використання 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* ґрунтується на утворенні 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 є в повітрі тваринницьких приміщень, створюючи серйозну проблему для працівників та мешканців довкілля, які скаржаться на подразнення слизової оболонки очей, носа, горла, головний біль, нудоту, пронос, кашель, хрипоту, порушення дихання, сонливість тощо.

Сучасна інструментальна техніка дозволяє кількісно оцінити аромат та букет пахоців у сільськогосподарських та харчових продуктах, наявність небажаних запахів, присутність фальсифікаторів та забруднювачів.

## 12.5. Смак

*Смак* – це відчуття, що виникає під час дії хімічних речовин на рецептори язика і порожнини рота. Внаслідок розжовування їжі звільнюються різноманітні за величиною, формою та складністю молекули, що діють на молекули мембрани смакових рецепторів. У комах хеморецептори, що відповідають за смак і нюх, знаходяться на ротових органах, а також на лапках або антенах. У риб і амфібій хеморецептори розташовані на поверхні тіла. У вищих тварин і людини функції хеморецепції звужуються до сприйняття запаху та смаку розчинених речовин.

Людина здатна розрізнити чотири основні типи смаку – *солодкий* (багато органічних сполук, зокрема цукри, сахарин), *солоний* (багато неорганічних сполук, зокрема хлорид натрію, йодид калію), *кислий* (кислоти, іони водню, зокрема оцет, лимонна кислота) та *гіркий* (багато алкалоїдів, зокрема кофеїн, нікотин, хінін, стрихнін). Сільськогосподарські тварини відрізняють ці чотири типи смаку, але можуть надавати перевагу певному смаковому відчуттю: свині – солодкому, велика рогата худоба і коні – солоному. Смакова чутливість залежить від типу смаку – людина спроможна реагувати на  $10^{15}$  молекул стрихніну на язика або на  $10^{20}$  молекул цукру.

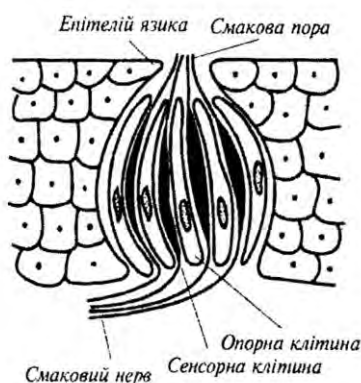


## 12.6. Смаковий аналізатор

*Смаковий аналізатор* – морфологічна система, яка забезпечує сприйняття і 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 у свою чергу містить *смакові цибулини*, які складаються з епітеліальних смакових клітин, пов'язаних з кінцевими розгалуженнями смакових нервових клітин (рис. 12.3).

Кількість цибулин може досягати 10000. На поверхні сосочка язика знаходиться *смакова пора*, через яку смакова цибулина з'єднується з порожниною рота.

Смакова цибулина побудована із саме смакових (кількість їх становить 10–20 на одну цибулину) і опорних клітин; смакова клітина має смакові волоски, які виходять через пору в рідке середовище на поверхні язика.



Можливим механізмом смакової рецепції можна вважати з'єднання смакових речовин з молекулами особливих білків рецепторних клітин, що супроводжується виникненням рецепторних потенціалів.

Рецепторна клітина вивільняє хімічний медіатор (високоактивну хімічну речовину), який збуджує закінчення смакового нерва.

**Рис.12.2. Смакова брунька**

## **12.7. Леткі органічні сполуки у повітрі приміщень**

### **12.7.1. Повітря приміщень**

Якість повітря приміщень означає вміст та природу внутрішнього повітря, яке впливає на здоров'я та комфорт мешканців будівель.

За даними досліджень, проведених у США та Європі, населення індустріалізованих країн проводить понад 90% свого часу у приміщеннях, з них майже 50% – на роботі, де якість повітря часто гірше, ніж ззовні [Indoor Air Pollution,..., 1994].

До основних забруднюючих речовин внутрішнього повітря можна віднести:

- неорганічні забруднюючі речовини (діоксид вуглецю, оксид вуглецю, діоксид азоту, діоксид сірки, озон);

- органічні забруднюючі речовини (леткі органічні сполуки, формальдегід, пестициди, вуглеводні, аліфатичні та аліциклічні вуглеводні, кетони, спирти, глікольєфіри, ефіри, феноли, хлоровані вуглеводні, терпени, альдегіди, ацетати;

- фізичні забруднення (частинки, азбест, мінеральні нитки, радон);

- тютюновий дим у докільлі, продукти згорання, біологічні аерозолі, радіоактивні забруднювачі.

Серед основних небезпечних забруднюючих речовин внутрішнього повітря слід зазначити леткі органічні сполуки (ЛОС) [Korrmann, 2007].

### **12.7.2. Леткі органічні сполуки**

Термін «леткий» відповідає тенденції цих сполук випаровуватися за нормальними температурою та тиском через їх

малу точку кипіння. Розвиток передових технологій у сучасному індустріалізованому суспільстві супроводжується значним збільшенням асортименту ЛОС, що потрапляють у повітря приміщень з різних джерел. Це ароматичні вуглеводні, аліфатичні та аліциклічні вуглеводні, кетони, спирти, прості гліколеві ефіри, складні ефіри, фенольні смоли, хлоровані вуглеводні, терпени, альдегіди, ацетати [Posudin, 2010; Посудін, 2011].

До основних джерел ЛОС належать побутові матеріали, зокрема меблі (дерев'яні поверхні, оброблені лаками, фарбами, політурою тощо); покриття підлог, серед яких паркету, синтетичні покриття, лінолеуми та різноманітні компоненти цих матеріалів, такі як барвники, добавки, розчинники, пластифікатори; килими, порт'єри, покривала, що містять синтетичні нитки, компоненти латексу та клею; книжки, газети, журнали; побутова техніка, зокрема копіювальні машини, тонери, принтери, нагрівачі, вентилятори, кондиціонери; побутова хімія та матеріали, які включають мийні речовини, воски, освіжувачі повітря, шпалери, пластикові покриття, матеріали для клеєння; нові та відновлені будинки; вихлопні гази автомобілів, транспортні речовини, що містять бензин, мастила, автомобільні рідини, компоненти внутрішнього оздоблення нових автомобілів (шкіряні покриття та тканини); тютюновий дим, біологічні частинки, такі як віруси, бактерії, гриби, пилок, послід птахів, комахи, гризуни, екскременти тварин, декоративні рослини.

Найпоширенішим впливом ЛОС у повітрі приміщень слід вважати подразнення органів зору, носоглотки, горла, головний біль, запаморочення, нудоту. Комбінації захворювань, пов'язаних з індивідуальним місцем на роботі чи вдома, називають «синдромом хворого будинку» [Ando, 2002].

## 12.8. Вимірювання якості повітря приміщень

### 12.8.1. Газова хроматографія (ГХ)

Метод розділення, знаходження і визначення речовин, оснований на неоднаковості їх поведінки у системі із двох фаз, які не змішуються (рухомій і нерухомій), називається *хроматографією*. Рухомою фазою може бути рідина (розчин суміші речовин, що аналізуються) або газ (суміш газів), нерухомою – тверда речовина або рідина, адсорбована на твердій речовині, що називають носієм.

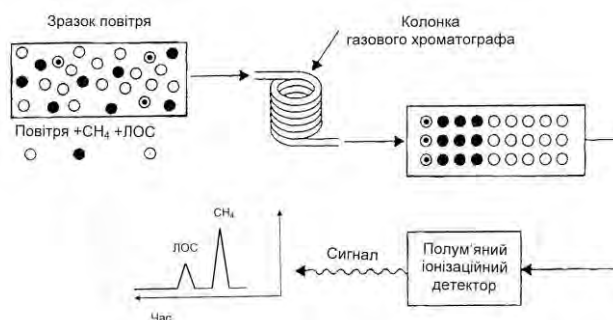
Під час руху рухомої фази вздовж нерухомої кожна компонента суміші осідає (сорбується) на нерухомій фазі (сорбенті) відповідно до матеріалу сорбенту, затримується і сповільнює свій рух. Через те, що різні компоненти мають різну спорідненість, відбувається просторове розділення цих компонентів – одні компоненти затримуються на початку шляху, інші просуваються уперед тощо.

Газова хроматографія передбачає використання інертного газу як рухомої фази та діатоміту (гідратованого селікагелю) як носія; останній розміщують у спіральних або капілярних колонках. Довжина спіральних колонок досягає 50 м при діаметрі 50 мкм.

Механізми осідання компонентів суміші на нерухомій фазі можуть бути різними: розчинена речовина адсорбується (поглинається) поверхнею нерухомої фази; розчинена речовина розчинюється у рідкій фазі, що покриває поверхню твердої речовини; рухомі аніони утримуються катіонами, що ковалентно з'єднані з нерухомою фазою; відділення дрібних молекул, які проникають через пори частинок речовини, від великих; спорідненість одних молекул суміші другим молекулам, що ковалентно зв'язані з нерухомою фазою.

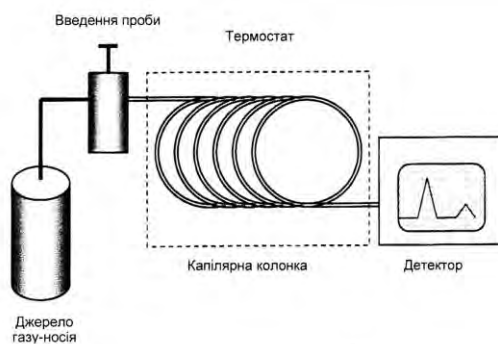
Принцип дії газового хроматографа пояснюється на рис.12.3.

Нехай різні молекули, що аналізуються, мають різні форми, розміри та кількість окремих елементів (атомів). Відповідно, швидкість руху таких молекул буде різною. Якщо всі ці молекули стартуватимуть одночасно, та на фініші детектор буде реєструвати кожну молекулу окремо, у свій власний момент часу. При цьому детектор видає сигнал реєстрації (максимум хроматограми).



**Рис. 12.3. Принцип дії газового хроматографа. Детектування легких органічних сполук та вуглеводнів. По осі ординат – амплітуда сигналу, що реєструється детектором; по осі абсцис – час реєстрації**

Будову газового хроматографа, основними елементами якого є балон з газом-носієм, інжектор, через який запускають газ, що аналізується, капілярна колонка та детектор. наведено на рис.12.4.



**Рис. 12.4. Будова газового хроматографа**

Метод газової хроматографії характеризується високою чутливістю, можливістю одночасного вимірювання великого числа ЛОС.

### 12.8.2. Мас-спектрометрія (МС)

Техніка розділення іонізованих молекул і атомів відповідно їх масам, яка базується на дії магнітних і електричних полів на пучки іонів у вакуумі, називається мас-спектрометрією. Мас-спектрометр складається з системи підготовки речовини, у якій вона перетворюється на газ; пристрою для іонізації молекул газу; засобу виділення іонів певного знаку з плазми та їх прискорення у даному напрямку; дисперсійного елемента, здатного розділити у просторі або у часі іони певного відношення  $m/q$ ; детектора, який здатний кількісно оцінювати іони даного масового числа (сумарної кількості нейтронів і протонів), що проходять крізь вхідну апертуру; вакуумної установки; системи обробки, аналізу і реєстрації інформації.

Принцип дії мас-спектрометра пояснюється на рис.12.5.

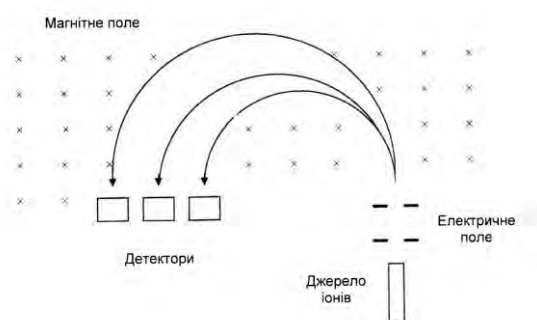


Рис. 12.5. Принцип дії мас-спектрометра

Відомо, що якщо частинка з зарядом  $q$  проходить крізь однорідне поле, то на неї діє сила Лоренца, під впливом якої частинка буде рухатися по криволінійній траєкторії. Баланс сил описується рівнянням:

$$mv^2/r = qvB, \quad (12.1)$$

де  $m$  – маса частинки;  $q$  – її заряд;  $v$  – швидкість руху частинки;  $r$  – радіус кривизни траєкторії;  $B$  – магнітна індукція.

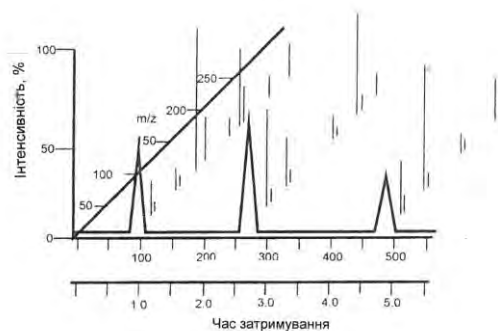
Іони, які проходять послідовно крізь системи магнітного і електричного відхилення, розділяються у просторі відповідно величинам відношення  $m/q$ .

До переваг методу мас-спектрометрії слід віднести високу чутливість та точність вимірювань.

### **12.8.3. Комбінація методів хроматографії та мас-спектрометрії (ГХ/МС)**

Поєднання газової хроматографії та мас-спектрометрії дозволяє поєднати хроматографічне розділення компонентів суміші з мас-спектрометричною ідентифікацією окремих компонентів (рис. 12.6).

Поєднання газової хроматографії з мас-спектрометриєю дає можливість реалізувати інжекцію газової суміші, що аналізується, у колонку газового хроматографа, де компоненти розділяються внаслідок взаємодії з колонкою. Розділені компоненти подаються на вхід мас-спектрометра, який реєструє мас-спектр кожного компонента [Masucci, 2004].



**Рис. 12.6. Хроматографічне розділення компонентів суміші з мас-спектрометричною ідентифікацією окремих компонентів під час застосування ГХ/МС методу**

Таким чином, інформація, яку надає система ГХ/МС, більш багата. Для аналізу компонентів, що аналізуються, у пам'яті комп'ютера є електронна бібліотека, що містить дані щодо кількох тисяч можливих компонентів.

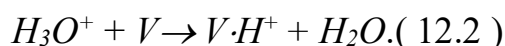
Загальним недоліком ГХ, МС та ГХ/МС систем є висока вартість обладнання, тоді як техніка вимірювань вимагає кваліфікованого персоналу.

#### **12.8.4. Техніка мас-спектрометрії на основі реакцій переносу протона (РПП/МС)**

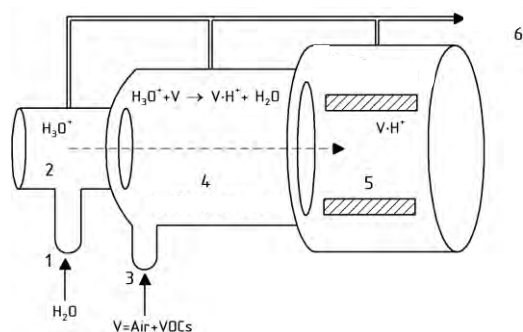
Цей метод ґрунтується на «м'якій» іонізації, пов'язаній з утворенням молекулярних іонів шляхом додавання або відбирання протону [Hansel, 2004; Kato et al., 2004; Lindinger et al., 2005].



Більшість молекул ( $R$ ) іонізуються при додаванні протону ( $R + H^+$ ). В основі реакції переносу протона лежить процес заряджання молекули води, що супроводжується утворенням іону  $H_3O^+$ , з подальшою передачею заряду летким органічним компонентам  $V$ , які аналізуються. При цьому відбувається реакція переносу протона:



Схему РПП/МС-системи наведено на рис. 12.7.



**Рис. 12.7. Схеми РПП/МС системи: 1 – вхід водяної пари; 2 – система утворення іонів; 3 – вхід повітря з ЛОС; 4 – дрейфова камера; 5 – мас-спектрометр; 6 – насос**

Водяна пара під тиском 150 Па подається на вхід 1 системи 2 утворення іонів. Близько 98% пари  $H_2O$  перетворюється у іони  $H_3O^+$ . Повітря з леткими речовинами  $V$ , що аналізуються, подається через вхід 3 у дрейфову камеру 4, куди потрапляють завдяки прикладеному слабкому електричному полю іони  $H_3O^+$ . У дрейфовій камері

відбувається реакція переносу протона, що супроводжується утворенням іонів  $V \cdot H^+$ . Ці іони дрейфують до входу мас-спектрометра 5, де аналізуються. Всі камери системи зв'язані з насосом 6.

Перевагами РПП/МС-системи є висока (близько 1 нл/л) чутливість, можливість вимірювань у реальному часі, швидкодія, простота конструкції, поліпшена ідентифікація компонентів, що аналізуються.

## 12.9 Фіторемедіація

*Ремедіація* – це процес виведення забруднювачів з навколишнього середовища, зокрема з ґрунту, підземних, поверхневих вод та атмосфери з метою захисту здоров'я людини та довкілля. Слово *remedy* (від латин. *remedium* – лікувати) означає застосовувати щось, що знімає біль, лікує, або позбавляє порушень.

### 12.9.1. Основні процеси фіторемедіації

Термін *фіторемедіація* походить від грецького слова *фіто* – «рослина» та латинського *ремедіум* – «лікувати». Процедура фіторемедіації полягає у знезаражуванні ґрунту, води або повітря за допомогою рослин, які здатні містити, зменшувати або обмежувати присутні у навколишньому середовищі метали, пестициди, розчинники, нафту та її похідні та різноманітні забруднюючі речовини.

Відрізняють такі процеси фіторемедіації [Yoo et al., 2006; Yang et al., 2009; Посудін, 2012]:

*Фітотрансформація* (*фітодеградація*) – захоплення, накопичення та перетворення органічних токсичних субстанцій з

грунту, повітря та води; всі ці процеси призводять до хімічних модифікацій забруднюючих речовин шляхом рослинного метаболізму та зменшенню їхньої токсичності.

*Фітоекстрація* – поглинання забруднюючих речовин кореневою системою рослин та їх перенесення у рослинну біомасу.

*Різофільтрація* – руйнування забруднюючих речовин ґрунтовими мікроорганізмами у зоні, що оточує кореневу систему рослини.

*Фітостабілізація* – утворення хімічних субстанцій, які здатні іммобілізувати забруднюючі речовини, за рахунок сорбції, осідання та утворення комплексів.

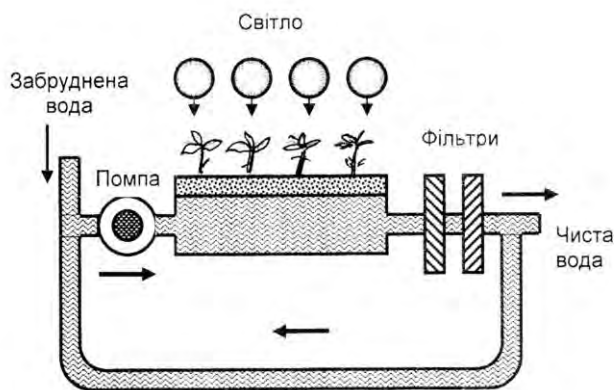
*Фітоволатилізація* – здатність рослин віддаляти забруднюючі речовини з ґрунту чи води та звільнити їх у атмосферу внаслідок фітотрансформації у менш леткі або менш забруднюючі субстанції.

*Різофільтрація* – фільтрація води, що проходить через кореневу масу з вилученням токсичних субстанцій, або залишку поживних речовин; забруднюючі речовини поглинаються корінням (рис. 12.8).

Як приклади таких рослин, що здатні здійснювати фіторемедіацію, можна навести соняшник (*Helianthus annuus*), який вилучає арсен, або цукровий буряк (*Beta vulgaris*), який екстрагує хлорид натрію, що накопичується у сільськогосподарських угіддях внаслідок їх затоплення морською водою.

Взагалі методи фіторемедіації характеризуються такими перевагами та недоліками:

Переваги: низька вартість; використання природних організмів та збереження довкілля.



**Рис. 12.8. Принцип ризофільтрації**

Недоліки: фітореMediaція обмежена площею та глибиною розташування кореневої системи рослин; повільний ріст та низька біомаса вимагають довготривалого процесу ремедіації; потенціальна можливість проникнення забруднювачів у травний тракт споживачів рослинної продукції.

### **12.9.2. ФітореMediaція у космосі**

В 1989 г. Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору (англ. National Aeronautics and Space Administration, NASA) провело дослідження з очищення повітря на космічних станціях. Фахівці НАСА припускають, що ефективно очищення повітря здійснюється щонайменше однією рослиною на площі 100 квадратних футів (9,29 м<sup>2</sup>) будинку або офісу. Перспективними в цьому плані рослинами є [Stutte, 2012]:

*Hedera helix* (Плющ звичайний).

*Chlorophytum comosum* (Хлорофітум, павуче дерево).

*Scindapsus aures* або *Epipremnum aureum* (Епіпремнум золотистий).

*Spathiphyllum "Mauna Loa"* (Спатифіллум).

*Aglaonema modestum* (Аглаонема скромна).

*Chamaedorea sefritzii* (Хамедорея або Бамбукова пальма).

*Sansevieria trifasciata* (Сансевієрія або "тещин язык").

*Philodendron scandens "oxycardium"* (Філодендрон лазячий).

*Philodendron selloum* (Філодендрон Селло).

*Philodendron domesticum* (Філодендрон домашній, "слонове вухо").

*Dracaena marginata* (Драцена облямowana).

*Dracaena fragrans "Massangeana"* (Драцена духмяна Массаджена).

*Dracaena deremensis "Janet Craig"* (Драцена деремская або драконове дерево).

*Dracaena deremensis "Warneckii"* (Драцена деремская Варнеккі).

*Ficus benjamina* (Фікус Бенджаміна).

### 12.9.3. Фіторемедіація радіонуклідів

Найбільш поширеними радіонуклідами є  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{234,235,238}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ . Особливістю радіонуклідів є їх нездатність природно деградувати. Якщо радіонукліди потрапляють у ґрунт, вони або з'єднуються з ґрунтовими частинками, або залишаються у ґрунтового розчині. Надзвичайно високу здатність адсорбувати радіонукліди демонструють ґрунти з глиною завдяки високій загальній поверхні.

Якщо радіонукліди адсорбуються ґрунтом або зв'язуються з ним, вони становляться недоступними для рослин, мікроорганізмів або безхребетних; радіонукліди, що знаходяться у ґрунтового розчині, здатні потрапляти до ґрунтової біоти та рослин.

У природних умовах радіонукліди, що потрапляють у рослини, можуть потрапити в організм травоядних тварин та, відповідно, в організм людини.



**Рис. 12.9. Соняшник (*Helianthus annuus*) є перспективною рослиною з точки зору фітореMediaції радіонуклідів.**

Крім того, радіонукліди можуть потрапити у людський організм через контакт з забрудненими ґрунтом чи водою. Наслідком радіоактивного забруднення людини можуть бути онкологічні захворювання або генетичні мутації [Sagyndyk et al., 2008].

Що стосується ремедіації ґрунту, є два традиційних підходи:

*Викопування* забрудненого радіонуклідами ґрунту з подальшим віддаленням ґрунту або захороненням його у бетонних чи скляних матрицях. Але цей метод дуже кошковий – викопування, упакування, транспортування та розміщення 1 м<sup>3</sup> забрудненого ґрунту коштує 2100 доларів США. Близько 200-300 млрд доларів потрібно витратити на ремедіацію радіонуклідів у воді та ґрунті.

Другий метод передбачає *промивання* ґрунту, що також потребує віддалення ґрунту та певні хімічні операції. Потім очищений від

радіонуклідів ґрунт повертається на своє місце, але він вже містить детергенти, сурфактанти та інші сполуки, які також викликають проблеми для навколишнього середовища, особливо якщо вони потрапляють у ґрунтові води.

Альтернативою цим двом методам є *фітореMediaція*, зокрема такі її різновиди як *фітоекстрація* та *різофільтрація*. ФітореMediaція (або фітодезактивація) – це видалення радіонуклідів з ґрунту за допомогою спеціально вирощуваних на них рослин. Для цього застосовують види, що мають високі коефіцієнти акумуляції радіонуклідів та формуючих значну біомасу. Найбільш цим вимогам відповідає *люпин*, в дещо меншій мірі *люцерна*, також *кукурудза* та *соняшник* при вирощуванні на зелену масу, деякі травосумішки.

Перевагами фітореMediaції є її здатність очищати ґрунт *in situ*, тобто без порушення ґрунтової динаміки. По-друге, рослини після вилучання радіонуклідів можна транспортувати у місця їх заховання. По-третє, процес фітореMediaції зменшує час взаємодії працівників з радіонуклідами.

Кількісне оцінювання ефективності фітореMediaції радіонуклідів можна здійснювати за допомогою *коефіцієнта біоаккумуляції (КБА)*, який дорівнює відношенню кількості радіонуклідів у сухій рослинній тканині до концентрації радіонуклідів у ґрунтовому розчині.

Так, для *КБА* для  $^{137}\text{Cs}$  варіює від 0,01 до 1,0 для стеблини та 38-165 – для кореня; для урану – 0,01- 0,0001; для плутонію – 0,0001.

Процес фітореMediaції  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  може тривати від 5 до 20 років, щоб досягнути повного очищення ґрунту.

Вартість фітореMediaції ґрунту становить 25-100 доларів за тонну ґрунту та 0,6-6,0 доларів за 1 галон (3,786 л) води.

Найкращими з точки зору фітореMediaції є рослини з інтенсивно розвиненою кореневою системою, яка здатна здійснити різofільтрацію, або з розвиненою над земною поверхнею біомасою, що важливо для фітоекстракції.

Два види рослин є перспективними з точки зору різofільтрації: соняшник (*Helianthus annuus*) та водний гіацинт (*Eichornia crassipes*). Обидва здатні накопичувати значну кількість радіонуклідів ( $^{137}\text{Cs}$ , U,  $^{90}\text{Sr}$ ) протягом кількох годин або днів. Ставок біля ЧАЕС було оточено соняшниками, коефіцієнт біоаккумуляції  $^{137}\text{Cs}$  коріння яких складав 4900-8600 [Negri et al., 2000].

Вереск (*Calluna vulgaris*) є потенціальна рослина, яка завдяки зв'язку з мікорізними грибами здатна накопичувати радіонукліди у значній мірі порівняно з іншими рослинами. Вереск росте на підвищеннях Великобританії, які постраждали від Чорнобильського інциденту. Ці регіони характеризуються кислими та торф'яними ґрунтами.

Мікориза верескових необхідна для забезпечення рослини скоріше азотом, ніж фосфором, що особливо важливо для кислих ґрунтів. Не виключено, що мікориза підвищує стійкість верескових до дії важких металів, які утворюються у таких ґрунтах або природним шляхом, або завдяки кислотним дощам.

Коренева система таких видів сосни як *Pinus ponderosa* та *Pinus radiata* здатна асоціювати з ектомікоризою (гриби оточують коріння, але не проникають у нього). Така система здатна поглинати  $\text{Sr}^{90}$  з ґрунту; 6% радіонуклідів накопичувалося у надземній частині рослин протягом 1 місяця [Entry et al., 1994].

Відзначимо представників флори, які демонструють здатність поглинати радіонукліди:



### **Декоративні рослини**

Плющ звичайний (*Hedera Helix*), геміграфіс (*Hemigraphis alternata*), восковий плющ або хойя м'ясиста (*Hoya carnos*), аспарагус густоцвітний (*Asparagus densiflorus*), традесканція пурпурне серце (*Tradescantia pallida*), толстянка портулакова (*Crassula portulaca*), спатіфілум Уоліса (*Spathiphyllum wallisii*), драцена деремська (*Dracaena deremensis*), каланхоє Блосфельда (*Kalanchoe blossfeldiana*), хризалідокарпус жовтуватий (*Chrysalidocarpus Lutescens*), фікус Бенджаміна (*Ficus Benjamina*), ховея Форстера (*Howea forsteriana*), товстянка овальна (*Crassula ovata*), сансев'єрія трьохполоса (*Sansevieria trifasciata*)

### **Злакові та різно трав'я**

Костриця очеретяна (*Festuca arundinacea*), костриця червона (*Festuca rubra* L.), пажитницзя багаторічна (*Lolium perenne* L.), конюшина біла (повзуча) (*Trifolium repens*), роговик ланцетовидний (*Cerastium fontanum*), щириця звичайна (*Amaranthus retroflexus*), традесканція (*Tradescantia bracteata*).

### **Види деревної рослинності**

Червоний клен (*Acer rubrum*), ликвідамбар смолоносний, или амбровое дерево (*Liriodendron tulipifera*), кокосова пальма (*Cocos nucifera*), monterey pine (*Pinus radiata*), сосна промениста (*Pinus radiata*), сосна жовта (*P. ponderosa*), евкаліпт червоний лісовий (*Eucalyptus tereticornis*), чорна ялина (*Picea mariana*), дуб (*Quercus*), ялівець (*Juniperus*).

Переваги фітореMediaції радіонуклідів:

- Технологія передбачає обробку *in situ*, тобто без руйнування ґрунту;

- Рослини зменшують тривалість можливого контакту робітників з радіонуклідами;
- Фіторемедіація може бути застосована упродовж тривалого часу, що збільшує ефективність очищення середовища.
- Недоліки фіторемедіації радіонуклідів:
- Тривалість очищення середовища досить велика. Так, наприклад, для очищення ґрунту від  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  потрібно від 5 до 20 років, щоб досягнути повного очищення [Entry et al., 1994].
- Вартість фіторемедіації ґрунту становить від 25 до 100 доларів США за тонну та від 0.60 доларів до 6 доларів за 1000 галонів води.
- Фіторемедіація радіонуклідів створює певний ризик для оточуючого середовища.

#### 12.9.4. Леткі сполуки зелених листків

Рослини здатні виділяти різні леткі сполуки, які можуть залучати комах, що беруть участь в запиленні, володіти антимікробною активністю, відлякувати травоядних тварин. Крім того, леткі речовини можуть залучати до рослини інших істот, які здатні знищувати шкідників, оскільки харчуються ними в природних умовах.

Леткі органічні сполуки, які є своєрідними сигналами тривоги (рис.12.10), називаються *леткими сполуками зелених листків* (Green leaf volatiles, GLV). До таких летких сполук, які є своєрідними «сигналами тривоги», відносяться терпеноїди, фенілпропаноїди, жирні кислоти, похідні амінокислот, а так само етилен і ізопрен [Scala et al., 2013].

Леткі сполуки рослин в змозі залучати паразитичних або хижих комах, які є природними ворогами травоядних. Наприклад, рослини тютюну (*Nicotiana tabacum*), погризені гусеницями метелика-совки (*Heliothis virescens*), утворюють леткі речовини, які приваблюють наїзників – нападників на цих гусениць [de Moraes et al., 1998]. Це відбувається тільки в денний час, коли активні наїзники. Вночі ж рослини тютюну, пошкоджені гусеницями совок, виділяють інші речовини, що відлякують самок того ж виду совок, які літають в пошуках місця для відкладання яєць.

Ще як приклад залучення комах – ворогів травоядних можна згадати лімську квасоллю, леткі сполуки якої залучають хижих кліщів при пошкодженні листя павутинним кліщем [Takabayashi and Dicke, 1996].

Леткі сполуки можуть виконувати роль сигналів, за допомогою яких погризені комахами рослини попереджають інші рослини про можливу небезпеку. Наприклад, в листі полину у відповідь на леткі сполуки, виділені сусідньою пошкодженою рослиною того ж виду, підвищувалася активність ферменту поліфенолоксидази. Цей фермент, потрапивши в кишечник комахи, взаємодіє з фенольними сполуками рослинної їжі, в результаті чого незамінні амінокислоти стають недоступними для комахи [Karban et al., 2003].

Було виявлено [Korth and Dixon, 1997], що рослини картоплі (*Solanum tuberosum* L.) виробляють захисні леткі сполуки більш швидкими темпами при поїданні листя травоядними в порівнянні з листям, пошкодженими механічним способом.



**Рис. 12.10.** Леткі органічні сполуки зелених листків є своєрідними сигналами тривоги

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ**

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. Освітити 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. У чому полягають сучасні уявлення щодо механізмів смаку?

14. Які сполуки можна віднести до основних речовин, що забруднюють повітря приміщень?
15. Які сполуки називаються леткими?
16. Назвати основні джерела летких органічних сполук.
17. Як впливають ЛОС на людський організм?
18. Пояснити принципи дії газового хроматографа.
19. Пояснити принципи дії мас-спектрометра.
20. У чому складається перевага комбінації методів хроматографії та мас-спектрометрії?
21. Пояснити принцип мас-спектрометрії на основі реакцій переносу протона.
22. Пояснити принципи фіторемедіації.

## **BIOLOGICAL ACOUSTICS**

The branch of biophysics that studies the processes of sound formation by humans and animals, sound signaling and communication of animals (biocommunication) in nature, their orientation in space with the help of echo sounders, is called bioacoustics.

### **Animal sounds**

*Mammals.* The primary source of sound vibrations in highly developed animals is the larynx and associated vocal cords, the elastic muscle fibers of which can vibrate. Sound waves are formed by the action of oscillating structures, which in animals are characterized by a certain size and frequency range of muscle contractions. Most of the muscles of animals, despite their diversity, are not able to oscillate at a frequency exceeding 103 Hz. In mammals, sounds are formed by the upper larynx, which is a cartilaginous tube. The air passing through this tube causes the vocal cords located in the upper part of the larynx to oscillate. Depending on the anatomical features of the animal's vocal apparatus, oscillations of different intensity, frequency, timbre, and time intervals occur. From these characteristics depend on the sounds produced by pets: growling, moaning, grunting, moaning.

In the process of making sounds, air leaves the lungs and sets in motion the vocal cords, resulting in elastic oscillations of the air. The vocal cords contain elastic and muscle fibers that can narrow and vibrate. The pitch of the sound generated by the vocal apparatus depends on the intensity of the vocal cords, their shape, the length of the area where the oscillation occurs; the intensity of the sound is determined by the frequency and duration of oscillations of the connections, which depend on the

impression of the air that comes out; the timbre of the voice is provided by the cavities above and below the glottis, in particular, the cavities of the pharynx, mouth, nose, thoracic cavity, respiratory throat.

With the help of the voice and its shades, which are determined by pitch, intensity, timbre and time intervals, animals, birds and insects communicate with their peers, signaling the surrounding situation, danger, the presence of food and so on.

Thus, in domestic pigs there are 23 types of voice signals; bees can make 11 different sounds. When chicken embryos enter the air chamber, they make three types of sounds. By analyzing the chirping of chickens, you can determine the sex, because roosters have a lower tone of sound.

*Birds.* The lower larynx (*syrinx*) - the bone structure at the base of the trachea, performs the functions of the vocal organ of birds. In the larynx, which converts the kinetic energy of moving air into the energy of a sound wave, there are two vocal membranes (*membrana tympaniformis*) during the passage of air between the membranes at high speed static pressure according to the Bernoulli equation decreases and the membranes converge; the hole closes, the air velocity decreases and the static pressure increases. The process is repeated, resulting in sound signals, the frequency of which in birds is in the range from 200 Hz to 12 kHz.

*Aquatic animals.* Whales (*Odontoceti* toothed whales, including dolphins) make sounds with a pair of phonic lips located in the nasal system. Dolphins click and whistle. Some whales (*Mysticeti*) do not have such a structure; they may use recycled air to produce low-frequency sounds for long-distance communication and navigation.

In addition, whales use their fins and tail to make sounds on the sea surface.

Pinnipeds use screams, barks, roars, growls and flutters. Elephant seals, for example, make a variety of growls and roars. Some pinnipeds produce high-frequency clicks, whistles, and impulse sounds that result from systems other than voice.

*Pisces.* The mechanisms of sound formation by fish are different - sounds can occur due to:

*stridulation* - mutual friction of different parts of the body, for example, components of the oral apparatus in the process of feeding (such a mechanism is characteristic of *Haemulon plumieri*, members of the order *Tetraodontiformes* and the family *Scaridae*), or through the use of fins or spine (*Galeichtys felis*, *Bagreas actele*, *Amphiprion*, *Hippocampus*, *Syngnathus louisianae*);

hydrodynamic action - the formation of sounds during swimming;

interaction of specialized muscles with the swimming bladder (*Rhinecanthus rectagulus*, *Aplodinotus*, *Holocentrus*, *Therapon*). The spectral range of sound oscillations of fish is from 20-50 Hz to 10-12 kHz.

*Insects.* Acoustic insect signaling plays an important role in the process of insect communication during the mating season, with spatial orientation at night, for intraspecific differentiation. The formation of acoustic signals is carried out by influencing the supporting substrate, friction of specialized sections of the ecoskeleton, vibration of membranes, the use of aircraft.

Many animals are so small that the process of making sound due to muscle fibers alone will be extremely inefficient. This problem can be solved only by multiplying the frequency of the sound signal carried out in the stridulation apparatus of insects (*Lepidoptera*, *Coleoptera* and *Hymenoptera*). Despite the different anatomical properties of stridulation apparatus, the principles of their operation are almost the same. The strecotic canticle, located in one part of the apparatus, moves along the



streocotic vein, which has a periodic structure. The dimensions of the elements of this structure are about a few micrometers. During each muscle contraction, the cantilever affects hundreds of vein elements, forming sounds. In this case, the sounds produced by the cicada (*Tibicen linnei*) are characterized by an intensity level of 106 dB at a distance of 0.5 m. the plant on which it is located. Thus, the sounds produced by the cicada (*Tibicen linnei*) are characterized by an intensity level of 106 dB at a distance of 0.5 m. Sound modulation is achieved when the insect crawls its abdomen relative to the plant on which it is located.

### **Acoustic communication of animals**

*Acoustic signals of animals.* Acoustic communication of animals is due to the peculiarities of the vocal systems, which allows animals to form sounds of different intensity, frequency, spectral composition and duration, and thus to carry out acoustic communication between individual animals and their groups.

*Acoustic signals of birds.* Acoustic signals generated by birds differ in intensity, frequency, duration. They can be divided into two main groups - calls and songs. The call can be imagined as an element of a more complex acoustic signal by singing. The dependence of the frequency and intensity of sound signals generated by birds on time is called sonograms.

Birdsongs perform a dual function. First, they inform about the ownership of a certain area and warn of unwanted visitors. Secondly, singing is designed to attract the attention of a sexual partner for the purpose of courtship and mating. In some species of birds, the vocal duo helps to establish close contact between members of the pair and synchronize mutual behavior over time.

Acoustic signals generated by birds differ in intensity, frequency, duration. It should be noted that birds - representatives of a particular species - recognize each other due to amplitude modulation, which is to change the intensity of the acoustic signal over time, and frequency modulation - changing the frequency of acoustic signals.

### **Acoustic communication of fish**

*Acoustic signals of fish* are divided into food, spawning, aggressive-defensive, group and associated with the care of offspring. Stridulatory sounds resemble squeaks and creaks; their frequency occupies a significant area - from 20 Hz to 12 kHz. Hydrodynamic sounds consist of low-frequency signals (20 Hz - 5 kHz), which are formed due to the movement of swimmers and fish bodies, and high-frequency sounds provided by the movement of internal organs. Sounds arising from the interaction of muscles with the swimming bladder occupy the region of 40 Hz - 2.5 kHz and are a series of pulses.

Sounds produced by fish are also designed to protect the territory; each species is able to generate sounds that differ in frequency and duration of sound pulses.

### **Acoustic communication of insects**

Bees make sounds due to the activity of the wing plates and thorax. The range of bee sounds occupies the region of 8-12 kHz. The sound signals generated by bees are used to transmit food detection information to other bees in the family; intensity, frequency and duration of sound links depend on the level of ventilation, season, temperature, availability of food, distance to the feeder.

Of all the bees of the genus *Apis*, the most perfect social organization is characterized by honey bees (*Apis mellifera*) and Indian (*A. indica* or *A. cerana*) bees. In the process of communication, bees make sounds due to the activity of the wing plates and the organ that forms the sound - the thorax.

The beeps are used to notify family members of food detection. In the process of feed mobilization, the so-called foragers of honey bees perform a kind of dance and provide other members of the hive with information about the location, food source, distance to it and the amount of pollen and nectar in it. The duration of the linear section of the figure eight in the dance of the bee in 1 second corresponds to 1 km of distance to the source of food. The worker bee transmits information to family members about the distance from the hive to the detected food and the direction to the source using an angle relative to the location of the Sun.

The sound signals generated by the bee during the dance carry information about the location to the food source and the distance to it.

Among the acoustic signals formed by bees, we can also distinguish the vibrations of the uterine thorax. There are two types of uterine vibration signals - "squeak" and "croak". The first type of signal is characterized by a set of audio messages, the frequency of which increases. This type of signal is characterized by an initial increase in amplitude. The second type of signal is characterized by a sequence of short-term (<200 ms) sounds.

Such signals allow to provide acoustic communication of the first uterus which has left a swarming queen cell with the sisters ready for an exit.

More detailed information about the parameters of acoustic signals generated by bees can be found in the works.

However, the practical use of the obtained results is complicated by their inconsistency. Terrestrial and aquatic animals, birds, fish, amphibians, reptiles produce sounds within the frequency range inherent in the human vocal system, namely 20-20000 Hz. However, some animals use ultrasound or infrasound ranges.

### **Echolocation of animals**

*Ultrasonic communication of animals.* Animals generate and use ultrasonic vibrations for echolocation — the emission of ultrasonic waves into space and the perception of a reflected signal to obtain information about the location, size, and motion of objects, or to navigate. In addition, insects use ultrasound for social communication.

Bats (*Vespertiloidei*) use ultrasonic signals to find prey, fruit and trees or to orient in space. Some of them (*Microchiroptera*) produce short-term clicks, while others (*Microchiroptera*) generate frequency-modulated or constant-frequency pulses. The frequency range of ultrasonic signals generated by bats is 14000–100000 Hz. The pulse frequency can vary from 4-10 to 150-200 pulses per second.

Dogs The frequency range of susceptibility to ultrasonic vibrations in dogs is 18-22 kHz. This ability is used by dog owners to give commands with special ultrasonic whistles.

Cats. The upper limit of the susceptibility of ultrasonic vibrations in cats is 50 kHz, which makes it possible to feel the high-frequency cries of victims and hunt them.

Whales such as toothed whales, dolphins, and pinnipeds use ultrasonic vibrations to find underwater objects and communicate. The frequency

range of dolphins is 0.25-150 kHz; low-frequency (0.25-50 kHz) signals are used for communication, while high-frequency (50-150 kHz) signals are used for echolocation. Each dolphin has its own range of ultrasonic whistles, which are ultrasonic pulses lasting 50-128  $\mu$ s. These signals are reflected from the confocal bone in the skull, and then focused by a special organ of lipid nature (melon), which performs the functions of the lens.

The ultrasonic oscillations generated by the dolphin propagate in the aquatic environment at a speed of 1500 m/s, are reflected from the underwater object and enter the fat-filled cavities in the bones of the mandible, from where they are transmitted to the dolphin's hearing aid. Due to this, the dolphin is able to determine the direction to the victim, its location, size, shape and speed.

Pisces. Some species of fish (*Alosinae*) are able to detect ultrasonic signals up to 180 kHz; others (*Clupeidae*) - up to 4 kHz.

Insects. Nature has endowed butterflies with the ability to detect ultrasonic signals up to 80 kHz emitted by bats in order to prevent predator attacks. In addition, butterflies (*Pyralidae: Ephestia cautella* (Walker), *Ephestia kuehniella* Zeller, *Plodia interpunctella* (Hübner)) themselves produce ultrasonic wing oscillations to attract sexual partners. Ants, members of the genus *Ectatomma*, use ultrasonic signals with a frequency of up to 75 kHz, generated by the movement of individual parts of the body, for communication.

Living organisms and infrasound. People are sensitive to infrasound by manifestations of horror, excitement, anxiety, frustration, nausea, imbalance and spatial disorientation.

The main consequence of the effect of infrasound on a living organism is a violation of the balance organs, namely the vestibular apparatus. To study the effect of infrasound on humans or animals used special generators

and speakers that operated in the range of 1-200 Hz with an intensity level of up to 146 dB.

The impact of infrasound was assessed by recording the nature and degree of rotation of the patient's eyeballs, which rotated in opposite directions with a frequency of 0.7-1.5 s<sup>-1</sup>. This periodic movement called nystagmus indicates a violation of the vestibular apparatus. Registration of nystagmus is carried out through the measurement of corneal-retinal potential; the technique of measuring this potential is called electronystagmography. Nystagmatic response of the body depends on the intensity of the infrasound stimulus and the duration of its action on the body, as well as the frequency of infrasound oscillations.

A possible mechanism of the effect of infrasound on living organisms should be considered the displacement of the perilymph - the fluid that fills the inner ear, due to periodic changes in pressure, which are transmitted to this fluid through the oval window. In turn, the displacement of the perilymph leads to deformation of hair cells.

The psychological effects of infrasound are associated with effects such as nausea, drowsiness, lethargy, feelings of horror or fear. Infrasound of significant intensity can cause changes in auditory sensitivity, damage to the eardrum, pain, complications of speech and voice modulation, impaired respiratory activity, changes in a-rhythms of the brain. Whales, elephants, hippos, rhinos, giraffes, alligators, tigers use infrasound to communicate with each other at a distance and navigate.

Thus, Asian elephants (*Elephas maximus*) generate infrasonic signals in the range of 14-24 Hz with an intensity of 70-100 dB, while African elephants (*Loxodonta Africana*) generate infrasonic signals in the range of 14-35 Hz with an intensity of up to 90 dB. These signals allow elephants to communicate within a few kilometers, prevent encounters with poachers

and warn other elephants about dangerous situations, find water sources, look for sexual partners, gather together in poor visibility.

Infrasound is formed due to the movement of air through the nasal passage. The big ears of elephants are best suited for the perception of infrasound. Low infrasound frequencies correspond to large wavelengths, which are reflected only from large objects, which allows elephants to communicate in forests, shrubs, and so on.

Giraffe (*Giraffe camelopardalis reticulata*) has the ability to generate infrasonic oscillations from 15 Hz (60 dB) to 250-275 Hz (30 dB) with dominant frequencies in the range of 20-40 Hz. Whales (*Cetacea*) use infrasound when searching for sexual partners and mating, as infrasound oscillations propagate over long distances (up to 4,800 km) in the aquatic environment. In addition, whales can paralyze squid and fish by infrasound when hunting. Tigers (*Panthera tigris*) use 18-20 Hz infrasound signals to communicate in forests and shrubs. The infrasonic component of the loud roar of tigers makes it possible to frighten and paralyze victims. Chamaeleon is characterized by the ability to generate and detect infrasonic waves. Representatives of the subfamily *Chamaeleonidae* live in trees, where infrasound is used for courtship and territorial claims, while members of the subfamily *Brookesiinae*, which live on the earth's surface or in a flying leaf, use infrasound to protect against enemies. Migratory birds are thought to use natural infrasonic vibrations (for example, from turbulent air currents in mountainous areas) to navigate. There is surprising information that animals prevent tsunamis and leave dangerous areas due to their ability to record and respond to infrasonic vibrations that accompany the propagation of ocean waves.

## Ultrasound and plants

On the island of Kalimantan (aka Borneo), which is located in the center of the Malay Archipelago in Southeast Asia, grows a carnivorous plant nepenthes (*Latin Nepenthes hemsleyana*). Along with ordinary leaves, this plant has developed a kind of jug-like leaves. The jug of nepenthes serves as a shelter for bats of the species *Kerivoula hardwickii*. The bat searches for a seat by echolocation, emitting ultrasonic waves and determining the distance to the object and its shape by reflecting them. This is helped by a special concave structure inside the jug of *N. hemsleyana*, which reflects the ultrasound and directs it back to the mouse. In turn, the bat fertilizes nepentes with its nitrogen-enriched manure.

## The effect of noise on living organisms

There are the following noise levels:

*Weak* 30 dB - whispers, quiet library;

*Moderate* 40-50 dB - moderate rain, quiet room;

*Intensive* 60-80 dB - alarm clock, traffic, vacuum cleaner;

*Very intense* 90-110 dB - lawn mower, drill, rock music, highway, drums;

*Causing painful sensations* 120-150 dB - jackhammer, fire siren, jet engine.

Noise pollution is undesirable for the environment sound vibrations generated by humans or mechanisms. Noise pollution has become a major threat to human health. During the day, residents of large cities are forced to endure noise overload at the level of 65-70 dB and more. There is a direct link between noise intoxication and heart disease. In areas of large airports, where the noise level reaches 100 dB, sales of sleeping pills have increased, and children in these areas are less able to absorb educational material. Noise of 90 dB causes a variety of physiological disorders. The upper limit for a person is 140 dB, at 160-170 dB there is a destruction of



the eardrum of the human ear. In addition, noise can cause the destruction of the Corti's organ, because the most vulnerable of all the elements of the auditory analyzer from the effects of high-intensity noise are the hair cells of the inner ear. Moreover, if the hair cells are severely damaged, they are no longer able to restore their functions and be replaced by other cells. This can result in partial or complete hearing loss.

To quantify the effect of noise on hearing, use a parameter that characterizes the change in auditory sensitivity  $\Delta$  noise-induced threshold shift, which is determined by measuring the threshold of auditory sensitivity before and after exposure to noise. This shift can be temporary or permanent depending on the noise parameter (intensity, duration, frequency composition).

Hearing is able to recover after the cessation of noise at intensity levels not exceeding 30 dB, after 16-24 hours. It should be noted that for moderate levels of noise exposure, the process of hearing restoration is characterized by a linear dependence of time on a logarithmic scale. Exposure to higher levels of intensity causes irreversible damage to hair cells, leading to a permanent threshold shift. Experiments on animals exposed to acoustic noise of different frequencies, followed by histological analysis of the number of damaged hair cells in the inner ear, indicate that the threshold of auditory sensitivity decreases in the range of 103-104 Hz. The number of remaining hair cells can reach only 40 percent of normal.

Human health is affected by low-intensity but long-lasting noise; high frequency noise; impulse noise.

In addition, the noise causes a violation of blood pressure, heart rate, dulls attention, increases fatigue, irritability.

Of course, the effect of noise on a person depends on both the level of sound intensity and the duration of the noise source.

The recommended norms of noise in rooms and in territories make: 30-35 dB in territories of reserves; 34-37 dB in bedrooms (houses, hospitals, apartments); 56-66 dB in the premises of shops, factories, etc.

## **ACOUSTO BIOLOGY**

The branch of biophysics that studies the structure and physical principles of the functioning of the auditory analyzer of animals, the processes of acoustoreception and the effect of acoustic signals on animals, is called acoustobiology.

A system that converts the energy of an external acoustic stimulus into a sequence of nerve impulses is called an auditory analyzer. The mammalian auditory analyzer consists of the outer, middle, and inner ears connected to the central auditory nervous system.

### **Acoustoreception in mammals**

The human and highly developed auditory analyzer consists of the outer, middle, and inner ears connected to the central auditory nervous system.

The outer ear consists of the auricle (sound collector) and the ear canal. The auricle is a mouthpiece that directs sound vibrations into the ear canal. In many animals (horses, goats, etc.) the auricles are mobile; by contracting the muscles, the animal rotates the auricles relative to the longitudinal axis, can tilt them forward, backward, sideways in order to direct the shells toward the location of sound sources and provide better perception of sounds. The functions of the outer ear are to optimize and amplify the most important sound frequencies, which is appropriate in terms of communication between living beings and their survival. A standing wave is formed in the space created by the ear canal and the middle ear. When the length of this space is equal to a quarter of the wavelength of sound, there is a resonance - a relatively large selective (selective) response of the oscillating system to periodic influence with a

frequency close to the frequency of its own oscillations. During resonance there is a sharp increase in the amplitude of forced oscillations of the system. The maximum sensitivity of the auditory analyzer is manifested precisely to the resonant frequencies.

The middle ear of the animal, separated from the outer eardrum, consists of the eardrum, auditory ossicles (hammer, anvil and stirrup) and the auditory tube.

The functions of the middle ear are limited to the transmission of sound vibrations from the external environment to the endolymph, amplification of weak sound signals and ensuring the safe reception of intense signals.

The amplification process is realized by increasing the pressure, which is associated with the difference in the area of the eardrum and the oval window, which is connected to the stirrup and separates the middle ear from the inner; the pressure gain is about 20-25 times.

In addition, the bone apparatus performs the functions of a lever, which gives a gain in strength of about 2.5 times. The total level of amplification of sound vibrations in the middle ear is thus about 50-60 times.

The inner ear consists of three spiral channels - vestibular, middle and tympanic, and the middle channel is separated from the vestibular membrane by Reissner, and from the tympanic membrane by the basilar membrane. At the proximal end (located closer to the axis of the body) of the drum channel is a round window that acts as a damper. Acoustoreceptors are hair cells that bind to the basilar membrane; these cells are equipped with cilia. The basilar and integumentary membranes, hair cells connected to nerve fibers, form the Corti's organ.

The functions of the inner ear are frequency analysis of sound signals. According to modern ideas, the oscillations excited by the stirrup in the oval window, cause wave movements of the basilar membrane in the form of a traveling wave.

The location of the maximum of the traveling wave depends on the frequency of the sound signal low frequencies stimulate the apical parts of the membrane, while high stimulate the base of the membrane.

The displacements of the basilar membrane are transmitted to the hair cells, above which is the integumentary membrane. Due to the deformation of the basilar membrane, the integumentary membrane also begins to move, but due to different systems of fixation of both membranes (two fulcrums in the basilar membrane and one in the integumentary) on the cilia of hair cells acts from the integumentary membrane displacement force; bending of the cilia leads to the excitation of the fibers of the auditory nerve associated with the hair cells.

The author of the traveling wave theory, Georg von Békéschi, was awarded the Nobel Prize in 1961. Thus, the sound wave causes oscillations of the basilar membrane with an amplitude localized in certain parts of the membrane. As a result, there is a localized excitation of hair cells of the Corti's organ depending on the frequency of the sound signal.

Thus, the sound wave causes oscillations of the basilar membrane with an amplitude localized in certain parts of the membrane. As a result, there is a localized excitation of the hair cells of the Corti's organ depending on the frequency of the sound signal.

Determining the location of the sound source is based on the animal's ability to perceive the phase difference and intensity of sound waves reaching the left and right ears. The phenomenon of determining the

direction from which the sound originates, animals, called the *binaural effect*.

### **Acoustoreception in birds**

Hearing plays a significant role in the daily life of birds during their rest or incubation. In addition, hearing performs important functions in the process of long-distance communication in places with limited visibility. Of particular interest are songbirds because of the complexity and importance of their acoustic communication systems. Birds that lead a nocturnal lifestyle (for example, owls) are characterized by extremely high auditory sensitivity; at the same time, their communication repertoire is relatively primitive.

The bird's hearing aid is characterized by certain differences from the mammalian auditory analyzer. The outer ear is represented by a short, wide and relief of the auditory canal, which leads to the eardrum. In many birds, the outer part of the ear canal is surrounded by specialized feathers, which form a kind of funnel that serves as an effective sound collector. Such deepenings of a parabolic form at owls are especially developed. The middle ear consists of a long thin bone that connects the eardrum to an oval window. The inner ear consists of a short curved curl, the length of which is 4-10 mm. Thus, the curl of the chicken has a length of about 5 mm; curl response starts at 100 Hz.

Birds are able to distinguish amplitude and frequency modulated acoustic signals. Thus, the canary is able to distinguish sound intensity levels of 1.5 dB, while the pigeon - in 3 dB. The ability of birds to respond to small changes in the frequency of acoustic signals is surprising: the frequencies at which birds begin and end their acoustic communication are

approximately 10 Hz in the 500 Hz region and about 20 Hz in the 1-2 kHz region.

### **Acoustoreception in fish**

According to popular belief, the auditory function is carried out by the balance organ - the labyrinth, in particular its lower part (Lagena and Sacculus). The main acoustoreceptor of fish is the otolith organ, which consists of otoliths and hair cells. Sound waves pass through the body of the fish with little resistance and cause the movement of hair cells. Because otoliths are denser than water and fish tissue, responses of otoliths and hair cells to sound vibrations differ. Due to the difference in the movements of otoliths and hair cells, the latter are deformed, which provides the brain with information about the surrounding sound situation.

There are two types of auditory analyzers in fish - those associated with the swim bladder, and those that lack the latter. Thus, in bony fish, the swimming bladder is characterized by multifunctionality - with its help the fish experiences hydrostatic pressure, maintains balance, makes sounds, breathes. The swim bladder is able to expand and contract in response to sound waves and transmit sound information through modified vertebrae (four pairs of movably connected bones) to the inner ear.

This skeletal system is called the Weber apparatus. The swimming bubble performs the function of a kind of resonator, tuned to the sound signals of a certain frequency and providing their amplification. Fish that do not have a swim bladder are used to convert sound vibrations into mechanical air cavities connected to the inner ear. An important role in the perception of sound is played by the seismic sensor system in terms of analysis of the acoustic situation near the sound source and the reception of the displacement of water particles.

The spectrum of perception of sound frequencies, sensitivity to sound vibrations, the ability to recognize sound tones differ in different species of fish. In general, we can talk about the lower limit of 16-100 Hz and the upper 488-8000 Hz. In this range, the ability to perceive higher (4000-8000 Hz) sound frequencies belongs to fish that have a swimming bladder and a Weber apparatus; they also have a higher absolute sensitivity of hearing (-70 dB) compared to fish deprived of a swimming bladder (0-50 dB).

Acoustoreception in bees

**Bees are able to respond to vibrations of air particles due to the sensitive organs sensilla scolopophora, which are located in the antennae and in the upper legs of the limbs. Under the influence of sound, the hairy senses begin to bend; the bending angle depends on the frequency and intensity of the sound. In response to sound signals, acoustoreceptors generate electrical impulses; the number of these pulses and the duration of the intervals between them are determined by the structure of acoustic stimuli. Affects the number of pulses and temperature. The acoustoreceptor system provides bees with binaural hearing, ie the ability to determine the direction to the sound source.**

## SMELL AND TASTE

### Smell

Smell is a process of perception of a smell by a living organism. The olfactory cells of invertebrates are located on the skin; in arthropods, these cells form special organs - sensory; in lower vertebrates olfactory cells are located in olfactory sacs, in higher animals and humans they form the receptor layer of the olfactory cavity.



For many animals, sending important chemical signals is an important and even crucial way to communicate. Chemical volatile substances created by an animal and cause a specific response in other members of the same species are called pheromones or odorants. Animals carry out and realize such olfactory communication for proclamation of the right to this or that territory, paving, foraging, formation of a signal of danger, communication of an animal with posterity, attraction of sexual partners for the purpose of mating and reproduction, orientation in space and navigation, support of a certain social hierarchy. Chemical signals are characterized by low separation, but they act at significant spatial and temporal intervals due to the soil and plants on which the animal deposits pheromones as markers. Pheromone propagation parameters often depend on wind speed: for example, at a wind speed of 1 m/s the pheromone cloud distribution area is 215 m long, 4560 m wide and 108 m high, while at a wind speed of 5 m/s these parameters are: length - 1820 m, width - 97 m, height - 48.5 m.

Chemical communication of insects is due to pheromones, among which the most common sexual attractants. Consider one of these identified pheromones of the silkworm *Bombyx mori*. The male has a pair of large antennae on his head, which collect the bombicol - an attractant sent by the female. This attractant is a mixture (10: 1) of bombikola (complex alcohol) and its aldehyde form of bombikala. Each butterfly antenna consists of a main rod and a large number of hair-like organs, among which are the olfactory hairs. Noteworthy is the ability of antennas to selectively assemble bombicol molecules using receptor cells located on the olfactory hairs of the antenna. The hair together with the receptor is called the sensilla (*sensilla trichodea*).

The number of sensors on each antenna reaches 17,000. Thanks to these receptors, the female is able to attract males at a distance of about one kilometer. The contact of the silkworm receptor cell with the environment

occurs through the pores of the shell; the diameter of each pore is 15 nm, and the number of pores on the sense is 3200. According to modern ideas, receptors actually count the molecules that excite the cell; when the number of pulses from the antenna exceeds 200 pulses / s, the male responds and moves to the source of the bomb. The mechanism of chemical reception of silkworms is associated with a combination of diffusion processes with highly efficient filtering in antennas.

The problem of malaria control (*Anopheles*) is also related to the search for and identification of those attractants that are sent by humans or animals and attract the attention of mosquitoes.

The sense of smell in fish plays a significant role in foraging, detecting predators, finding sexual partners, reaching spawning grounds and orientation. The use of the sense of smell is very well proven in salmon, which begins its life in the fresh waters of rivers, where it lives from several months to two years, depending on the species; during this time, he "instills in his memory" the smell of fresh water. Then the salmon travels along the current to the ocean, where it spends from one to four years, reaching sexual maturity. After that, the salmon travels about 1,500 km of ocean space to reach the river in the upper reaches of which it was born to spawn. The process of navigating the salmon in the ocean is not yet well understood; It is believed that salmon uses a range of factors - geographical features, temperature, magnetic fields, celestial and chemical landmarks. But migration in the river is due to the sense of smell.

The sense of smell in birds as a scientific problem has been discussed in recent decades. It has long been thought that the sense of smell is the prerogative of mammals only. Recent studies have shown that birds use their sense of smell to search for and distinguish food, to choose places where they can sit and to navigate. Among the birds that have developed

sense of smell, we can note pigeons, some seabirds, starlings, chickens. The method of detecting the sense of smell in birds can be considered interesting. Industrial companies transporting gas in order to find defects in the walls of the pipes pumped into the latter such an odorant as cadaverine (cadaveric poison); in the place where the pipe had a hole, a large number of vultures were collected.

### **Olfactory analyzer**

The olfactory analyzer of higher animals and humans is a specialized system that provides the perception of various odorous substances, analysis and processing of excitations arising from the periphery to the central nervous system. The olfactory analyzer consists of olfactory receptor cells (neurons), which are located in the mucous layer with a thickness of about 60  $\mu\text{m}$ .

The receptor layer has olfactory and support cells. On the one hand, the receptor neuron ends with cilia that have contact with the outside air through the mucous layer; on the other - processes (axons). Plates of 10–100 axons pass through holes in the lattice bone and form glomeruli, which in turn connect to the bivalve cells and through them to the brain. For example, in a rabbit, 26,000 neurons combine with 200 glomeruli to form a single cell. This structure of the olfactory receptor increases its sensitivity. During inhalation, about 5–10% of the total amount of air flows through the olfactory slit of the nose. Olfactory substances in a vaporous state act on olfactory receptors, due to which the latter are excited. In order for an animal to smell, it is enough to excite only 40 receptor cells, and each of them must act on one molecule of odorant. A unique property of olfactory receptors is their constant interchangeability (for about 60 days).

## **Mechanisms of smell**

The mechanisms of smell are related to the entry of molecules of volatile organic compounds into the olfactory analyzer and their binding to receptor proteins, which are able to change the membrane potential; electrical signals are transmitted from receptor cells through axons (long processes of cells of the nervous system) to the hypothalamus - a part of the brain that is a cluster of nerve cells; it is in it that the sense of smell is formed, its classification and identification.

Some animals (such as cats) have a specific Jacobson organ designed to detect pheromones and low concentrations of chemical compounds of natural origin.

Animals use this organ to communicate between members of the same species. When a cat opens its upper lip to direct pheromones to that organ, it appears to be smiling (Feyman's reaction).

## **Methods of odor analysis**

*Olfactometry* is a method of measuring olfactory acuity. It is used to determine the threshold of smell, the level of olfactory adaptation and restoration of olfactory function (quantitative olfactometry), as well as to determine a person's ability to perceive and distinguish odors (qualitative olfactometry). For the practical implementation of olfactometry use odor tasters - people who are hypersensitive to odors (the number of such among the general population is about 10%). Tasters are trained to identify certain odors; 6 to 12 experts take part in each odor assessment, after which the evaluation results are averaged. During the procedure, the threshold level, intensity, stability, hedonic tone and characteristic signs of odor are determined. The threshold level of odor is determined by a gradual increase in the concentration of the odorous substance until the taster responds to it.

The odor intensity is measured by comparing the odor being evaluated with the reference odor (of course, n-butanol), samples of which mix different gas concentrations. A 5-point system is used to assess the intensity of the odor: from 0 (no odor) to 5 (very strong odor). Odor resistance corresponds to the correlation of odor intensity with the concentration of odorous substance. The hedonic tone indicates how a person perceives a particular odor in terms of feeling pleasant impressions. Characteristic features are determined by comparing the odor being evaluated with well-known odors.

*Automated electronic nose systems* lack subjective approaches to odor assessment. Such systems consist of a set of chemical sensors based on a polymer film. When the gas being evaluated passes through the film, it causes the film to bend; these mechanical bends are converted into electrical signals proportional to the level of deformation of the film and, consequently, the gas concentration. Because different chemical compounds cause different levels of film bending, such a sensor responds to each compound. An automated system of this type contains a set (20-50) sensors that provide a specific picture of sensory responses of all sensors, characteristic of a particular odor.

Modern methods of quantitative and qualitative evaluation of odors should also include a combined method of gas chromatography and mass spectrometry.

*The method of chromatography* involves the separation, detection and determination of substances due to the heterogeneity of their behavior in the system two phases that do not mix - mobile and stationary. The mobile phase in the case of gas chromatography is a gas (mixture of gases), the stationary phase is a solid or liquid. During the movement of the mobile phase along the stationary, each component of the mixture settles on the stationary phase (sorbent) in accordance with the material of the sorbent

and slows down its movement. Due to the fact that different components have different affinities, there is a spatial separation of these components.

*The mass spectrometric method* is based on the formation of ion beams in vacuum with their subsequent separation by mass in electric and magnetic fields. The use of combined techniques of gas chromatography and mass spectrometry makes it possible to estimate 70-100 volatile components present in the air of livestock premises, creating a serious problem for workers and residents who complain of irritation of the mucous membranes of the eyes, nose, throat, headache, nausea, diarrhea, cough, hoarseness, breathing disorders, drowsiness, etc.

Modern instrumentation allows you to quantify the aroma and bouquet of aromas in agricultural and food products, the presence of unwanted odors, the presence of counterfeiters and contaminants.

## **Taste**

Taste is a sensation that occurs when chemicals act on the receptors of the tongue and mouth. As a result of chewing food, molecules of different size, shape and complexity are released, which act on the molecules of the membrane of taste receptors. In insects, the chemoreceptors responsible for taste and smell are located on the oral organs, as well as on the paws or antennae. In fish and amphibians, chemoreceptors are located on the surface of the body. In higher animals and humans, the functions of chemoreception are narrowed to the perception of smell and taste of solutes.

Man is able to distinguish four main types of taste - sweet (many organic compounds, including sugars, saccharin), salty (many inorganic compounds, including sodium chloride, potassium iodide), sour (acids,

hydrogen ions, including vinegar, citric acid) and bitter ( many alkaloids, including caffeine, nicotine, quinine, strychnine). Farm animals distinguish these four types of taste, but may prefer a certain taste sensation: pigs - sweet, cattle and horses - salty. Taste sensitivity depends on the type of taste - a person is able to respond to 1015 molecules of strychnine on the tongue or 1020 molecules of sugar.

### **Taste analyzer**

Taste analyzer - a morphophysiological system that provides the perception and analysis of chemicals in the mouth. The basis of the taste analyzer are taste buds - structures of the tongue that contain taste buds. The papillae may be mushroom-shaped (at the end of the tongue), leaf-like (on the lateral surfaces of the tongue) and grooved (at the border of the posterior and two anterior thirds of the tongue). Each papilla, in turn, contains taste buds, which consist of epithelial taste cells associated with the final branches of taste nerve cells.

The number of bulbs can reach 10,000. On the surface of the papilla of the tongue there is a taste pore through which the taste bulb connects with the oral cavity.

The taste bud is made up of taste buds (their number is 10-20 per bulb) and support cells; the taste cell has taste hairs that come out through the pores into a liquid medium on the surface of the tongue.

A possible mechanism of taste reception can be considered the combination of taste substances with molecules of special proteins of receptor cells, which is accompanied by the emergence of receptor potentials. The receptor cell releases a chemical mediator (a highly active chemical) that excites the taste buds.

## **Volatile organic compounds in indoor air**

### **Indoor air**

Indoor air quality means the content and nature of indoor air, which affects the health and comfort of building occupants.

According to research conducted in the United States and Europe, the population of industrialized countries spends more than 90% of their time indoors, of which almost 50% - at work, where air quality is often worse than outside.

The main pollutants of indoor air include:

- inorganic pollutants (carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, ozone);
- organic pollutants (volatile organic compounds, formaldehyde, pesticides, hydrocarbons, aliphatic and alicyclic hydrocarbons, ketones, alcohols, glycol ethers, esters, phenols, chlorinated hydrocarbons, terpenes, aldehydes, acetates;
- physical pollution (particles, asbestos, mineral threads, radon);
- tobacco smoke in the environment, combustion products, biological aerosols, radioactive contaminants.

Among the main dangerous pollutants of indoor air should be noted volatile organic compounds.

### **Volatile organic compounds**

The term "volatile" corresponds to the tendency of these compounds to evaporate at normal temperatures and pressures due to their low boiling point. The development of advanced technologies in modern industrialized society is accompanied by a significant increase in the range of VOCs entering the air from various sources. These are aromatic hydrocarbons,



aliphatic and alicyclic hydrocarbons, ketones, alcohols, glycol ethers, esters, phenolic resins, chlorinated hydrocarbons, terpenes, aldehydes, acetates.

The main sources of VOCs include household materials, including furniture (wooden surfaces treated with varnishes, paints, polishes, etc.); floor coverings, including parquets, synthetic coatings, linoleum and various components of these materials, such as dyes, additives, solvents, plasticizers; carpets, drapes, bedspreads containing synthetic threads, latex and glue components; books, newspapers, magazines; household appliances, including copiers, toners, printers, heaters, fans, air conditioners; household chemicals and materials, which include detergents, waxes, air fresheners, wallpaper, plastic coatings, materials for gluing; new and renovated houses; car exhaust gases, transport substances containing gasoline, lubricants, automotive fluids, interior components of new cars (leather and fabrics); tobacco smoke, biological particles such as viruses, bacteria, fungi, pollen, bird droppings, insects, rodents, animal excrement, ornamental plants.

The most common effects of VOCs in the indoor air should be considered irritation of the eyes, nasopharynx, throat, headache, dizziness, nausea. Combinations of diseases associated with an individual place at work or at home are called "sick home syndrome".

## **Measurement of indoor air quality**

### **Gas chromatography**

The method of separation, finding and determination of substances, based on the heterogeneity of their behavior in a system of two phases that do not mix (mobile and stationary), is called chromatography. The mobile

phase can be a liquid (solution of a mixture of substances under analysis) or gas (mixture of gases), stationary - a solid or liquid adsorbed on a solid substance called a carrier.

During the movement of the mobile phase along the stationary, each component of the mixture is deposited (sorbed) on the stationary phase (sorbent) in accordance with the material of the sorbent, delayed and slows down its movement. Due to the fact that different components have different affinities, there is a spatial separation of these components - some components are delayed at the beginning of the path, others move forward and so on.

Gas chromatography involves the use of inert gas as a mobile phase and diatomite (hydrated silica gel) as a carrier; the latter is placed in spiral or capillary columns. The length of the spiral columns reaches 50 m with a diameter of 50  $\mu\text{m}$ .

The mechanisms of sedimentation of the components of the mixture on the stationary phase can be different: the solute is adsorbed (absorbed) by the surface of the stationary phase; the solute dissolves in the liquid phase covering the surface of the solid; mobile anions are held by cations covalently linked to the stationary phase; separation of small molecules that penetrate through the pores of particles of matter from large ones; affinity of some molecules of the mixture to other molecules covalently linked to the stationary phase.

Let the different molecules analyzed have different shapes, sizes and the number of individual elements (atoms). Accordingly, the speed of such molecules will be different. If all these molecules start at the same time, and at the finish the detector will register each molecule separately, at its own point in time. The detector emits a registration signal (maximum chromatogram).

The method of gas chromatography is characterized by high sensitivity, the ability to simultaneously measure a large number of VOCs.

### **Mass spectrometry**

The technique of separating ionized molecules and atoms according to their masses, which is based on the action of magnetic and electric fields on ion beams in vacuum, is called mass spectrometry. A mass spectrometer consists of a substance preparation system in which it is converted to a gas; device for ionization of gas molecules; means for extracting ions of a certain sign from the plasma and their acceleration in this direction; a dispersion element capable of separating in space or time the ions of a certain ratio  $m / q$ ; a detector capable of quantifying ions of a given mass number (total number of neutrons and protons) passing through the input aperture; vacuum installation; information processing, analysis and registration systems.

It is known that if a particle with charge  $q$  passes through a homogeneous field, then the Lorentz force acts on it, under the influence of which the particle will move along a curvilinear trajectory. The balance of forces is described by the equation:

$$mv^2/r = qvB,$$

where  $m$  is the mass of the particle;  $q$  is its charge;  $v$  is the velocity of the particle;  $r$  is the radius of curvature of the trajectory;  $B$  - magnetic induction.

Ions that pass sequentially through the systems of magnetic and electrical deviation are separated in space according to the values of the ratio  $m/q$ .

The advantages of the mass spectrometry method include high sensitivity and accuracy of measurements.

### **Combination of chromatography and mass spectrometry methods**

The combination of gas chromatography and mass spectrometry allows to combine the chromatographic separation of the components of the mixture with the mass spectrometric identification of individual components.

The combination of gas chromatography with mass spectrometry makes it possible to realize the injection of the analyzed gas mixture into a gas chromatograph column, where the components are separated due to interaction with the column. The separated components are fed to the input of the mass spectrometer, which registers the mass spectrum of each component.

Thus, the information provided by the GC/MS system is richer. To analyze the components being analyzed, the computer has an electronic library that contains data on several thousand possible components.

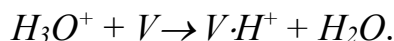
A common disadvantage of GC, MS and GC/MS systems is the high cost of equipment, while the measurement technique requires qualified personnel.

### **Technique of mass spectrometry based on proton transfer reactions**

This method is based on "soft" ionization, associated with the formation of molecular ions by adding or removing a proton.

Most molecules (R) are ionized by the addition of a proton ( $R^+ H^+$ ). The proton transfer reaction is based on the process of charging a water

molecule, which is accompanied by the formation of the  $H_3O^+$  ion, followed by charge transfer to the volatile organic components V, which are analyzed. The proton transfer reaction occurs:



The advantages of RPP / MS system are high (about 1 nl/l) sensitivity, the possibility of real-time measurements, speed, simplicity of design, improved identification of the analyzed components.

### **Phytoremediation**

Remediation is the process of removing pollutants from the environment, including soil, groundwater, surface water and the atmosphere, in order to protect human health and the environment. The word remedy (from the Latin *remedium* - to treat) means to use something that relieves pain, treats, or relieves disorders.

#### **The main processes of phytoremediation**

The term phytoremediation comes from the Greek word *phyto* - "plant" and the Latin *remedium* - "treat". The phytoremediation procedure is to disinfect the soil, water or air with plants that are able to contain, reduce or limit the metals, pesticides, solvents, oil and its derivatives and various pollutants present in the environment.

There are the following processes of phytoremediation:

Phytotransformation (phytodegradation) - capture, accumulation and transformation of organic toxic substances from soil, air and water; all these processes lead to chemical modifications of pollutants by plant metabolism and reduce their toxicity.

Phytoextraction - the absorption of pollutants by the root system of plants and their transfer into plant biomass.

Rhizofiltration - the destruction of contaminants by soil microorganisms in the area surrounding the root system of the plant.

Phytostabilization - the formation of chemical substances that are able to immobilize pollutants due to sorption, sedimentation and complexation.

Phytovolatilization - the ability of plants to remove contaminants from soil or water and release them into the atmosphere due to phytotransformation into less volatile or less polluting substances.

Rhizofiltration - filtration of water passing through the root mass with the removal of toxic substances or residual nutrients; contaminants are absorbed by the roots.

Examples of such plants that can carry out phytoremediation include sunflower (*Helianthus annuus*), which removes arsenic, or sugar beet (*Beta vulgaris*), which extracts sodium chloride, which accumulates in agricultural land due to their flooding by sea water.

In general, methods of phytoremediation are characterized by the following advantages and disadvantages:

Advantages: low cost; use of natural organisms and environmental protection.

Disadvantages: phytoremediation is limited by the area and depth of the root system of plants; slow growth and low biomass require a long process of remediation; potential possibility of penetration of pollutants into the digestive tract of consumers of plant products.

### **Phytoremediation in space**

In 1989, the National Aeronautics and Space Administration, NASA conducted a study on air purification in space stations. NASA experts

suggest that effective air purification is carried out by at least one plant on an area of 100 square feet (9.29 m<sup>2</sup>) of a house or office. Promising plants in this regard are:

- *Hedera helix* (Ivy).
- *Chlorophytum comosum* (Chlorophytum, spider tree).
- *Scindapsus aures* or *Epipremnum aureum* (Epipremnum golden).
- *Spathiphyllum* “Mauna Loa” (Spathiphyllum).
- *Aglaonema modestum*.
- *Chamaedorea sefritzii* (Chamaedorea or Bamboo palm).
- *Sansevieria trifasciata* (Sansevieria or "mother-in-law's tongue").
- *Philodendron scandens* “oxycardium”.
- *Philodendron selloum*.
- *Philodendron domesticum*.
- *Dracaena marginata* (Dracaena bordered).
- *Dracaena fragrans* “Massangeana” (Dracaena fragrant Massagenia).
- *Dracaena deremensis* “Janet Craig” (Dracaena deremensis or dragon tree).
- *Dracaena deremensis* “Warneckii” (Dracaena deremensis Warneckii).
- *Ficus benjamina* (Ficus benjamina).

### **Phytoremediation of radionuclides**

The most common radionuclides are <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>234,235,238</sup>U, <sup>238-241</sup>Pu.

A feature of radionuclides is their inability to degrade naturally. If radionuclides enter the soil, they either bind to the soil particles or remain in the soil solution. Soils with clay show an extremely high ability to adsorb radionuclides due to the high total surface area.

If radionuclides are adsorbed or bound to the soil, they become inaccessible to plants, microorganisms or invertebrates; radionuclides in the soil solution are able to enter the soil biota and plants.

Under natural conditions, radionuclides entering plants can enter the body of herbivores and, consequently, the human body.

In addition, radionuclides can enter the human body through contact with contaminated soil or water. Cancer or genetic mutations can be the result of human radioactive contamination.

As for soil remediation, there are two traditional approaches:

Excavation of soil contaminated with radionuclides with subsequent removal of the soil or its burial in concrete or glass matrices. But this method is very expensive - digging up packaging, transporting and placing 1 m<sup>3</sup> of contaminated soil costs 2100 US dollars. About \$200-300 billion needs to be spent on remediation of radionuclides in water and soil.

The second method involves washing the soil, which also requires soil removal and certain chemical operations. The radionuclide-cleared soil then returns to its place, but it already contains detergents, surfactants and other compounds that also cause environmental problems, especially if they enter groundwater.

An alternative to these two methods is phytoremediation, in particular its varieties such as phytoextraction and rhizofiltration. Phytoremediation (or phytodeactivation) is the removal of radionuclides from the soil with the help of plants specially grown on them. To do this, use species that have high coefficients of accumulation of radionuclides and form a significant biomass. Most of these requirements are met by lupines, to a lesser extent alfalfa, as well as corn and sunflower when grown on green mass, some grass mixtures.



The advantages of phytoremediation are its ability to clean the soil in situ, ie without disturbing the soil dynamics. Secondly, plants after removal of radionuclides can be transported to their places of storage. Third, the process of phytoremediation reduces the time of interaction of workers with radionuclides.

Quantitative evaluation of the effectiveness of phytoremediation of radionuclides can be performed using the bioaccumulation coefficient, which is equal to the ratio of the amount of radionuclides in dry plant tissue to the concentration of radionuclides in the soil solution. Thus, QEA for  $^{137}\text{Cs}$  varies from 0.01 to 1.0 for the stem and 38-165 for the root; for uranium - 0.01-0.0001; for plutonium - 0.0001.

The phytoremediation process of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  can take 5 to 20 years to achieve complete soil clearance.

The cost of soil phytoremediation is \$ 25-100 per ton of soil and \$ 0.6-6.0 per 1 gallon (3,786 liters) of water.

The best from the point of view of phytoremediation are plants with intensively developed root system, which is able to carry out rhizofiltration, or with biomass developed above the earth's surface, which is important for phytoextraction. Two species of plants are promising in terms of rhizofiltration: sunflower (*Helianthus annuus*) and water hyacinth (*Eichornia crassipes*). Both are able to accumulate significant amounts of radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$ , U,  $^{90}\text{Sr}$ ) over several hours or days. The pond near the Chernobyl nuclear power plant was surrounded by sunflowers, the  $^{137}\text{Cs}$  bioaccumulation coefficient of which was 4900-8600.

Heather (*Calluna vulgaris*) is a potential plant that, due to its association with mycorrhizal fungi, is able to accumulate radionuclides significantly compared to other plants. Heather is growing on Britain's

highlands affected by the Chernobyl incident. These regions are characterized by acidic and peat soils.

Heather mycorrhiza is necessary to provide the plant with nitrogen rather than phosphorus, which is especially important for acidic soils. It is possible that mycorrhiza increases the resistance of heather to the action of heavy metals that are formed in such soils, either naturally or due to acid rain.

The root system of pine species such as *Pinus ponderosa* and *Pinus radiata* can be associated with ectomycorrhiza (fungi surround the roots but do not penetrate it). Such a system is able to absorb Sr90 from the soil; 6% of radionuclides accumulated in the aboveground part of plants for 1 month.

Note the representatives of the flora, which demonstrate the ability to absorb radionuclides:

### ***Ornamental plants***

Common ivy (*Hedera Helix*), hemigraphis (*Hemigraphis alternata*), waxy ivy or fleshy hoyo (*Hoya carnosa*), Asparagus denseiflorus (*Asparagus densiflorus*), tradescantia purple heart (*Tradescantia pallida*), Portulaca (*Spathiphyllum wallisii*), *Dracaena deremensis*, *Kalanchoe blossfeldiana*, *Chrysalidocarpus Lutescens*, *Ficus Benjamina*, *Howersa Forster*, *Sansevieria trifasciata*.

### ***Cereals and grasses***

Bonfire (*Festuca arundinacea*), red bonfire (*Festuca rubra L.*), perennial fenugreek (*Lolium perenne L.*), white clover creeping (*Trifolium repens*), lanceolate (*Cerastium fontanum*), amaranthus retroita (*Tradescantia bracteata*).

### ***Types of woody vegetation***

Red maple (*Acer rubrum*), liquidambar resinous, or amber tree (*Liriodendron tulipifera*), coconut palm (*Cocos nucifera*), monterey pine (*Pinus radiata*), radiant pine (*Pinus radiata*), yellow pine (*P. ponderosa*), eucalyptus red forest (*Eucalyptus tereticornis*), black spruce (*Picea mariana*), oak (*Quercus*), juniper (*Juniperus*).

Advantages of phytoremediation of radionuclides:

- The technology involves in situ treatment, ie without soil destruction;
- Plants reduce the duration of possible contact of workers with radionuclides;
- Phytoremediation can be applied for a long time, which increases the efficiency of cleaning the environment.
- Disadvantages of phytoremediation of radionuclides:
- The duration of cleaning the environment is quite long. For example, it takes 5 to 20 years to clear a  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  soil to achieve a complete clearing.
- The cost of soil phytoremediation ranges from \$ 25 to \$ 100 per ton and from \$ 0.60 to \$ 6 per 1,000 gallons of water.
- Phytoremediation of radionuclides poses a certain risk to the environment.

### **Volatile compounds of green leaves**

Plants are able to emit various volatile compounds that can attract insects involved in pollination, have antimicrobial activity, scare away herbivores. In addition, volatile substances can attract other creatures to the plant, which are able to destroy pests because they feed on them in the wild.

Volatile organic compounds, which are a kind of alarm signal, are called volatile compounds of green leaves (Green leaf volatiles, GLV). Such volatile compounds, which are a kind of "alarm", include terpenoids, phenylpropanoids, fatty acids, amino acid derivatives, as well as ethylene and isoprene.

Volatile plant compounds are able to attract parasitic or predatory insects, which are natural enemies of herbivores. For example, tobacco plants (*Nicotiana tabacum*), bitten by the caterpillars of the moth (*Heliothis virescens*), form volatile substances that attract riders - attackers of these caterpillars. This only happens during the day when the riders are active. At night, tobacco plants damaged by scoop caterpillars secrete other substances that scare away females of the same species of scoop, which fly in search of a place to lay eggs.

Another example of the involvement of insects - the enemies of herbivores can be mentioned Lima beans, volatile compounds which attract predatory mites when the leaves are damaged by spider mites.

Volatile compounds can act as signals by which insect-bitten plants warn other plants of possible danger. For example, in the wormwood leaf, the activity of the polyphenoloxidase enzyme increased in response to volatile compounds isolated from a neighboring damaged plant of the same species. Once in the insect's intestines, this enzyme interacts with phenolic compounds in plant foods, making essential amino acids inaccessible to insects.

It was found that potato plants (*Solanum tuberosum L.*) produce protective volatile compounds at a faster rate when eating leaves herbivorous compared to leaves damaged mechanically.

## **13. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

### **13.1. ВСТУП ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ „ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ТА ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ”**

#### 13.1.1. Основні поняття теорії похибок. Прямі та непрямі вимірювання

**Виміряти фізичну величину – це значить порівняти її з іншою однорідною величиною, яка прийнята за одиницю міри, тобто визначити скільки разів міститься в ній однорідна з нею величина, прийнята за одиницю міри.**

Є два види вимірювань – **прямі і непрямі**. При **прямому** вимірюванні величину визначають безпосередньо за допомогою вимірювального приладу (лінійки, секундоміру, термометру, терезів тощо). Так, безпосередньо можна виміряти довжину, час, температуру, масу та деякі інші фізичні величини.

Якщо величину не можна виміряти безпосередньо, застосовують **непряме вимірювання**, а саме: шукану величину розраховують за формулою, яка виражає дану величину через інші, знайдені шляхом прямих вимірювань. Так, наприклад, прискорення вільного падіння обчислюють за формулою  $g = 2h/t^2$ , використовуючи результати прямих вимірювань висоти  $h$  і часу  $t$  вільного падіння тіла.

Будемо позначати істинне значення фізичної величини, що вимірюється, через  $a$ , а результат її виміру – через  $x$ . Ці величини, взагалі кажучи, не співпадають. Величину  $\Delta x = x - a$  називають

похибкою, її модуль  $|\Delta x| = |x - a|$  – абсолютною похибкою, відношення  $\varepsilon = |\Delta x|/a$  – відносною похибкою виміру.

Якщо за одних і тих же умов повторити вимір  $n$  разів, то отримаємо  $n$  результатів,  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ , і відповідно матимемо  $n$  похибок. Отримання того чи іншого результату  $x_i$  – це випадкова подія.

**Випадковою називають подію, яка при реалізації даних умов може відбутись, а може і не відбутись.**

Так, наприклад, при підкиданні монети тризуб може випасти, а може і ні; отже, випадання тризуба – випадкова подія.

Кожна випадкова подія має свою об'єктивну характеристику, яка називається **ймовірністю** і вимірюється позитивним числом  $P$ , яке завжди буде (що випливає з визначення) більшим від одиниці :

$$0 \leq P \leq 1. \quad (13.1)$$

**Ймовірність випадкової події  $P$  визначається відношенням числа випадків, що сприяють даній події, до повного числа рівноможливих випадків.**

Наприклад, якщо у ящик всипати 5 білих і 15 чорних (однакових за розміром, вагою і якістю поверхні) кульок і добре його потрусити, то ймовірність  $P$  витягти (не зазираючи до ящика) білу кульку буде рівною  $5/20 = 0,25$  – бо число рівноможливих випадків тут  $5+15=20$ , а сприяють даній події (вийманню білої кульки) тільки 5 із них. У наведеному вище прикладі з монетою рівноможливих випадків два (тризуб або цифра), а сприяє даній події (випаданню тризуба) тільки один. Отже, ймовірність випадання тризуба  $P = 1/2 = 0,5$ .

Подію, ймовірність якої дорівнює одиниці ( $P = 1$ ), називають **достовірною**.

Подію, ймовірність якої дорівнює нулеві ( $P = 0$ ), називають **неймовірною**.

При великій кількості  $n$  незалежних випробувань ймовірність  $P$  випадкової події визначає частку випробувань, коли дана випадкова подія відбувається. Так, при підкиданні монети 100 разів, тризуб може випасти, наприклад, у 50, 49, 48, 51, 52 випадках.

При вимірюванні певної фізичної величини один єдиний раз за результатом вимірювання  $x$  не можна оцінити ані абсолютної, ані відносної похибок (бо істинне значення  $a$  є невідомим).

Теорія похибок встановлює правила, які дозволяють, виконавши невелику кількість (наприклад, 3, 5, 7) вимірювань, оцінити інтервал

$$a_1 \leq a \leq a_2 \quad (13.2.)$$

(еквівалентний запис:  $[a_1, a_2]$ ), в якому знаходиться істинне значення вимірюваної величини. Цей інтервал називають **довірчим**. Теорія похибок дозволяє також оцінити **достовірність**  $P$  отриманого результату (1).

**Достовірністю**  $P$  (**довірчою ймовірністю**) називають **ймовірність того, що істинне значення вимірюваної величини знаходиться у вказаному довірчому інтервалі (1)**.

Саме достовірність  $P$  визначає ту частку результатів вимірів, які при проведенні великої кількості вимірювань ( $n = 100, 1000$ , або більше; строго кажучи, при  $n \rightarrow \infty$ ) попали б у даний довірчий інтервал.

Якщо, наприклад, для довжини відрізка  $L$  з достовірністю  $P = 0,8$  отримано результат  $0,58 \leq L \leq 0,62$  (м), то це означає, що з тисячі вимірів ( $n = 1000$ ) приблизно 80% результатів матимуть значення між 0,58 м і 0,62 м, а решта (приблизно 20 %) будуть меншими 0,58 м або більшими ніж 0,62 м.

Завдання експериментатора (студента) при визначенні фізичної величини, що вимірюється у прямий спосіб, полягає в наступному.

1. Зробити декілька (3-7) вимірів і знайти середнє арифметичне  $\langle x \rangle$  результатів вимірів:

$$\langle x \rangle = (x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n) / n. \quad (13.2)$$

2. Встановити довірчий інтервал (13.2.), в якому за його (експериментатора) ствердженням знаходиться істинне значення  $a$  фізичної величини. Довірчий інтервал представляють у формі:

$$\langle x \rangle - \Delta \leq a \leq \langle x \rangle + \Delta \quad (13.3)$$

(еквівалентний запис :  $a = \langle x \rangle \pm \Delta$ ; при цьому:

$$a_1 = \langle x \rangle - \Delta,$$

$$a_2 = \langle x \rangle + \Delta).$$

Величину  $\Delta$  у формулі (13.3) називають **довірчою границею похибок** результатів вимірів.

Вказати достовірність  $P$  вищезгаданого ствердження.

Оцінити **точність** експерименту. Її характеризують відносною похибкою



$\mathcal{E}$ , яку обчислюють за наближеною формулою

$$\varepsilon \approx \frac{\Delta}{\langle x \rangle}; \quad (13.4)$$

при цьому відмітимо, що чим менше  $\mathcal{E}$ , тим вище точність.

Подати кінцевий результат у стандартній формі, записавши встановлений довірчий інтервал і вказавши точність і достовірність отриманого результату:

$$a = \langle x \rangle \mp \Delta, \quad \mathcal{E}, \quad P. \quad (13.5)$$

Стандартна форма (13.5) представлення результату вимірювань є єдиною як при прямих, так і при непрямих вимірюваннях.

Точність вимірювання визначається тією найменшою часткою одиниці міри, до якої з упевненістю у правильності результату можна виконати вимірювання. Ступінь точності вимірювань залежить від приладів, що використовуються, і від загальних методів вимірювання, і було б марним витрачанням часу намагатися при вимірюваннях за даних умов перейти цю межу точності. Наприклад, зважуючи тіло масою 200 г на якісних терезах, неважко досягти точності 0,1 мг, тобто точності 0,00005 %. В інших випадках навіть точність 0,1 % є майже недосяжною – наприклад, при вимірюванні температури за допомогою термометрів. Звичайними термометрами можна відраховувати температуру з точністю до 0,1 К, іноді з точністю до 0,05 К. Отже, якщо вимірювана зміна температури становить приблизно 5 К, то точність не перевищуватиме 1 – 2 % вимірюваної величини.

Звідси випливає, що перш ніж приступати до вимірювань, необхідно визначити межі точності, які можна отримати з наявними приладами.

Якщо в лабораторній роботі доводиться вимірювати різні величини і межі можливої точності для кожної вимірюваної величини виявляються різними, то **немає сенсу при окремих вимірюваннях виходити за межі точності найменш точно вимірюваної величини.** Так, при калориметричних вимірюваннях визначення маси води і калориметра із зважування можна б було виконати з точністю, не меншою 0,0001 %. Однак у даному випадку немає сенсу виконувати зважування з такою високою точністю і можна обмежитись зважуванням на менш досконалих терезах з точністю, наприклад, до 0,1 %, оскільки вимірювання зміни температури може бути виконано, як сказано, з точністю лише 1 – 2 %.

### **13.1.2. Види похибок. Математична обробка результатів прямих вимірювань**

1. Перед початком прямих вимірювань перш за все записують назву величини, що вимірюється, назву вимірювального приладу і ціну найменшої його поділки  $C$ .

2. Записують у стовпчик під символом величини, що вимірюється, результати вимірів  $x_i$  і обчислюють за формулою (13.2) середнє арифметичне  $\langle x \rangle$  результатів вимірів.

3. Встановлюють довірчу границю похибок  $\Delta$  результатів вимірів. Для цього враховують два основні види похибок – **систематичні і випадкові.**

**Систематичними** називають похибки, що залишаються постійними за величиною і за знаком при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. Такі похибки мають об'єктивний характер і обумовлені недосконалістю вимірювальних приладів, впливом умов, за яких проводиться дослід, а також недосконалістю методів вимірювання. Деякі систематичні похибки можуть бути виявлені і усунуті. Однак існують і такі систематичні похибки, від яких не можна позбавитись і які обов'язково необхідно враховувати. Такими є похибки, обумовлені недосконалістю приладів, зокрема їх вимірювальних шкал. Як правило, більшість приладів високої якості дає похибку, що не перевищує ціни найменшої поділки їх шкали.

**Випадковими** називають похибки, що непередбачено змінюють свою величину (і знак!) від одного досліду до іншого. Вони обумовлені багатьма неконтрольованими причинами, а також недосконалістю наших органів чуттів. З останньої причини випадкові похибки в значній мірі мають суб'єктивний характер. Випадкові похибки описуються теорією ймовірностей. Вплив випадкових похибок на результат вимірювань можна істотно зменшити при багатократному повторенні досліду: оскільки завищені і занижені (відносно істинного) значення зустрічаються однаково часто, то при обчисленні середнього арифметичного  $\langle x \rangle$  випадкові похибки частково компенсують одна одну, і тому середнє арифметичне менше відрізняється від істинного значення  $a$  фізичної величини, ніж кожен з результатів вимірювань  $x_i$ .

Зменшити вплив систематичних похибок шляхом повторення досліду, звичайно, не можна. Для цього потрібно удосконалити (або взяти більш точний) прилад або змінити метод вимірювань.

У відповідності з наявністю двох видів похибок довірчу границю сумарних похибок  $\Delta$  записують у вигляді суми

$$\Delta = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}, \quad (13.6)$$

де  $\Delta_c$  – довірча границя систематичних похибок, а  $\overset{\circ}{\Delta}$  – довірча границя випадкових похибок. Їм відповідають параметри  $P_c$  – ймовірність того, що систематичні похибки не перевищують  $\Delta_c$ , і  $\overset{\circ}{P}$  – ймовірність того, що випадкові похибки не перевищують  $\overset{\circ}{\Delta}$ .

4.1. Встановлення довірчої границі випадкових похибок,  $\overset{\circ}{\Delta}$ , починають з обчислення **випадкових відхилень** результатів вимірів  $\delta$  за формулою

$$\delta_i = x_i - \langle x \rangle, \quad (13.7)$$

їх квадратів  $\delta_i^2$  та середньоарифметичного  $\langle \delta^2 \rangle$  за формулою

$$\langle \delta^2 \rangle = \frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_i^2 + \dots + \delta_n^2}{n}. \quad (13.8)$$

4.2. Розраховують параметр

$$\sigma_{\text{ср.}} = \sqrt{\frac{\langle \delta^2 \rangle}{n-1}}, \quad (13.9)$$

що має назву **середнього квадратичного відхилення** середніх результатів вимірів.

4.3. Довірчу границю випадкових похибок обчислюють за формулою

$$\overset{\circ}{\Delta} = t \cdot \sigma_{cp}. \quad (13.10)$$

Тут  $t$  – параметр, який визначають з таблиць, розроблених за допомогою теорії ймовірностей. Цей параметр названо параметром Ст'юдента на честь вченого, який розрахував таблицю його значень.

Параметр Ст'юдента залежить від кількості вимірів  $n$  (число  $n$  встановлює експериментатор) і величини параметру  $\overset{\circ}{P}$  (її теж встановлює експериментатор). З таблиці 13.1 видно, що при фіксованому значенні  $\overset{\circ}{P}$  параметр Ст'юдента  $t$  зменшується із збільшенням кількості вимірів  $n$ .

5. При оцінці довірчої границі систематичних похибок,  $\Delta_c$ , вважатимемо, що вона не перевищує ціни найменшої поділки  $C$  вимірювального приладу. В цьому випадку

$$\Delta_c = C, \quad P_c = 1. \quad (13.11)$$

Якщо ж існують додаткові систематичні похибки, що перевищують  $C$ , то користуються формулою  $\Delta_c = C + \Delta_{дод.}$ , де  $\Delta_{дод.}$  – довірча границя додаткових систематичних похибок. Формула для  $\Delta_{дод.}$ , обумовленої

методом вимірювання, якщо вона не є набагато меншою ціни поділки, наводиться в лабораторній роботі.

Табл. 13.1. Коефіцієнти Ст'юдента

Довірча імовірність $\frac{\alpha}{P} \rightarrow$ Число вимірів $n$ $\downarrow$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,999
1								
2	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	636,6
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	31,6
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	12,9
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	8,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	6,9
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	6,0
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	5,4
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	5,0
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	4,8
15	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	4,1
20	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	3,9
40	0,68	0,85	1,1	1,2	1,7	2,0	2,4	3,6
60	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	3,5
120	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	3,4
$\infty$	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	3,3

**Табл. 13.2. Математична обробка результатів вимірів часу двадцяти коливань маятника**

Час $\tau$ вимірювали секундоміром , $C = 0,2$ с.			
$i$	$\tau$ , с	$\delta$ , с	Розрахунки
1	34,2	- 0,07	$\langle \tau \rangle = \frac{34,2 + 34,0 + 34,6}{3} = 34,27 \text{ с};$ $\delta_1 = 34,2 - 34,27 = - 0,07 \text{ с}; \quad \delta_1^2 = 0,005 \text{ с}^2;$
2	34,0	- 0,27	
3	34,6	+ 0,33	
$\langle \tau \rangle = 34,27$		$\sigma_{\text{ср}} = 0,18$ .	$\delta_2 = 34,0 - 34,27 = - 0,27 \text{ с}; \quad \delta_2^2 = 0,073 \text{ с}^2;$ $\delta_3 = 34,6 - 34,27 = + 0,33 \text{ с}; \quad \delta_3^2 = 0,109 \text{ с}^2;$
$\Delta_c = 0,2 \text{ с}; P_c = 1$			
$\overset{\circ}{\Delta} = 0,77 \text{ с}; \overset{\circ}{P} = 0,95$			
$\Delta = 1,0 \text{ с}; P > 0,95$			
$\mathcal{E} = 0,028 \text{ (2,8\%)}$			
Результат:			
$\tau = (34,2 \mp 1,0) \text{ с},$			
$P > 0,95,$			
$\mathcal{E} = 0,028.$			

6. Обчислюють довірчу границю сумарних похибок  $\Delta$  за формулою (5) і відносну похибку  $\mathcal{E}$  за формулою (13.4).

7. Записують результат у стандартній формі (13.5), вказуючи, що його достовірність знаходиться в межах між  $\overset{\circ}{P}$  і  $P_c = 1 : \overset{\circ}{P} < P < 1$  (або  $P > \overset{\circ}{P}$ ).

Нижче наведено приклад розташування результатів і розрахунків при  $n = 3$ ,  $\overset{\circ}{P} = 0,95$ ; (при цьому  $t = 4,3$ ).

Примітка 1. Якщо результати  $x_i$  прямих вимірювань збігаються, то  $\Delta = \Delta_c = C$  і  $P = P_c = 1$ .

Примітка 2. Якщо відносна похибка  $\mathcal{E}$  перевищує 0,2 (20%), то експеримент потрібно повторити, взявши більш точний інструмент (при цьому зменшується  $\Delta_c$ ) або збільшивши кількість вимірювань  $n$  (при цьому зменшується  $\overset{\circ}{\Delta}$ ), або зробивши і те і інше.

### 13.1.3. Математична обробка результатів непрямих вимірювань

Розглянемо величину  $Z$ , що є функцією декількох аргументів – величин  $x, y, \dots$ , які визначаються незалежно одна від одної шляхом прямих вимірювань:

$$Z = f(x, y, \dots). \quad (13.12)$$

Тоді послідовність розрахунків є такою:

1. Середнє значення величини  $Z$  розраховують **один раз**, підставляючи замість аргументів  $x, y, \dots$  їх середні значення:

$$\langle Z \rangle = f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \dots). \quad (13.13)$$



2. Визначають відносну похибку непрямих вимірювань  $\mathcal{E}_Z$  за формулою

$$\mathcal{E}_Z = \left\{ \left| \frac{\partial(\ln f)}{\partial x} \right| \Delta_x + \left| \frac{\partial(\ln f)}{\partial y} \right| \Delta_y + \dots \right\} \quad (13.14)$$

де  $\Delta_x, \Delta_y$  — довірчі границі сумарних похибок вимірювань величин  $x, y, \dots$ . Для полегшення обчислень формулу (13.14) для розрахунку відносної похибки непрямих вимірювань  $\mathcal{E}_Z$  подано у кожній лабораторній роботі.

3. Розраховують довірчу границю сумарних похибок за формулою

$$\Delta_Z = \mathcal{E}_Z \langle Z \rangle. \quad (13.15)$$

В таблиці 3 наведено розраховані за формулами (13.14), (13.15) значення  $\Delta_Z$  і  $\mathcal{E}_Z$  для величин  $Z$ , що виражаються простими функціональними залежностями, які зустрічаються найбільш часто.

4. Записують кінцевий результат у стандартній формі (13.5):

$$Z = \langle Z \rangle \pm \Delta_Z, \mathcal{E}_Z, P_Z. \quad (13.16)$$

**Примітка 1.** Якщо в розрахунках використовують табличне значення, то відповідну довірчу границю похибок визначають як половину одиниці його (табличного значення) останнього значущого розряду з достовірністю, рівною одиниці. Наприклад, в таблиці

	$Z = f(x, y, \dots)$	$\Delta_Z$	$\mathcal{E}_Z$
1	$x + y + \dots$	$\Delta_x + \Delta_y + \dots$	$\frac{\Delta_Z}{\langle x \rangle + \langle y \rangle + \dots}$
2	$x - y$	$\Delta_x + \Delta_y$	$\frac{\Delta_Z}{ \langle x \rangle - \langle y \rangle }$
3	$ax,$ $\partial a = const$	$a \cdot \Delta_x$	$\mathcal{E}_x$
4	$x \cdot y \cdot \dots$	$\mathcal{E}_Z \cdot \langle x \rangle \cdot \langle y \rangle \dots$	$\mathcal{E}_x + \mathcal{E}_y + \dots$
5	$\frac{x}{y}$	$\mathcal{E}_Z \cdot \frac{\langle x \rangle}{\langle y \rangle}$	$\mathcal{E}_x + \mathcal{E}_y$
6	$x^n$	$\mathcal{E}_Z \cdot \langle x \rangle^n$	$n \cdot \mathcal{E}_x$
7	$\sqrt[n]{x}$	$\mathcal{E}_Z \cdot \sqrt[n]{\langle x \rangle}$	$\frac{1}{n} \cdot \mathcal{E}_x$
8	$x^\alpha \cdot y^\beta \cdot \dots$ де $\alpha > 0, \beta > 0$	$\mathcal{E}_Z \cdot \langle x \rangle^\alpha \cdot \langle y \rangle^\beta \cdot \dots$	$\alpha \mathcal{E}_x + \beta \mathcal{E}_y + \dots$
9	$\sin x$	$\Delta_x \cdot  \cos \langle x \rangle $	$\Delta_x \cdot  \operatorname{ctg} \langle x \rangle $
10	$\cos x$	$\Delta_x \cdot  \sin \langle x \rangle $	$\Delta_x \cdot  \operatorname{tg} \langle x \rangle $
11	$\operatorname{tg} x$	$\Delta_x / \cos^2 \langle x \rangle$	$2\Delta_x /  \sin 2 \langle x \rangle $
12	$\operatorname{ctg} x$	$\Delta_x / \sin^2 \langle x \rangle$	$2\Delta_x /  \sin 2 \langle x \rangle $

**Примітка:** у прикладах 1 і 2 спочатку розраховують  $\Delta_Z$ , а потім —  $\mathcal{E}_Z$ . у прикладах 4-8 спочатку розраховують  $\mathcal{E}_Z$ , а потім —  $\Delta_Z$ .

подано значення прискорення вільного падіння  $g = 9,807 \text{ м/с}^2$ ; в цьому випадку  $\Delta_g = 0,0005 \text{ м/с}^2$ ,  $P_g = 1$ . Але якщо табличне значення  $g$  подано як  $g = 9,8 \text{ м/с}$ , то  $\Delta_g = 0,05 \text{ м/с}^2$ ,  $P_g = 1$ .

**Примітка 2.** Якщо прямі вимірювання не можна виконати в однакових умовах, то величину  $Z$  розраховують для кожного окремого вимірювання, а потім знаходять її середнє значення. При цьому для прямих вимірювань беруть до уваги лише довірчу границю систематичних похибок, а відносні похибки прямих і непрямих вимірювань оцінюють тільки для якогось одного вимірювання.

#### 13.1.4. Графічний спосіб представлення результатів експерименту

Для цього у більшості випадків користуються декартовою системою координат; на міліметровому папері уздовж осі абсцис у довільному масштабі відкладають незалежну змінну  $x$  (аргумент), тобто величину, значення якої задає сам експериментатор, а уздовж осі ординат – ту величину  $y$  (функцію  $y = y(x)$ ), яку він при цьому визначає. Через отримані на площині точки проводять неперервну плавну криву. При побудові графіків необхідно дотримуватись наступних правил:

1. Біля кожної з осей (напроти середини або в кінці осі) слід вказати умовне позначення величини  $i$ , через кому, одиниці її вимірювання в обраній системі одиниць (рис. 13.1).

2. Масштаб на кожній осі вибирають так, щоб експериментальні точки не зливалися одна з одною і були розташовані з розумним інтервалом (рис. 13.2). Не слід відкладати на осях значення величин, істотно більших або менших тих значень, в межах яких проводились вимірювання – інакше графік займатиме лише малу частину відведеної для нього координатної площини (рис. 13.3).

При дослідженні залежності однієї фізичної величини від іншої для наочного представлення цієї залежності її зображують графічно.

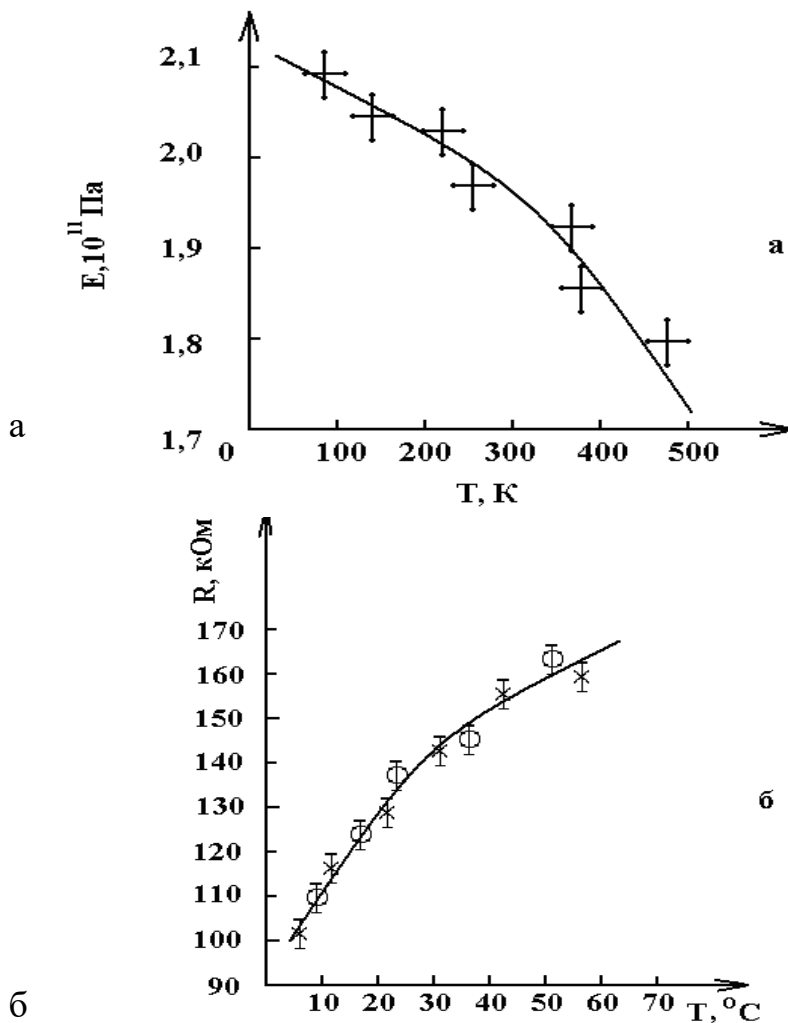
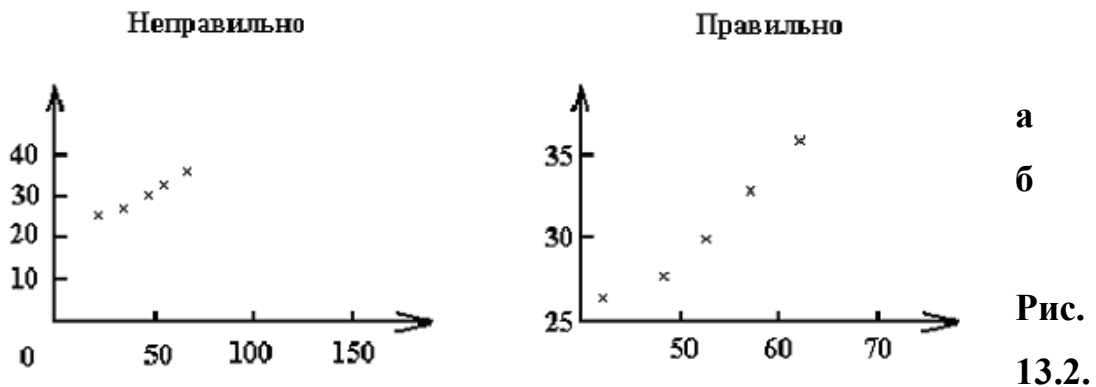


Рис. 13.1. Приклади надписів вздовж осей графіка: а) залежність модуля Юнга  $E$  від температури  $T$ ; б) залежність опору  $R$  міді від температури  $T$  при нагріванні (x) і охолодженні (o).

3. Початок координат не обов'язково повинен збігатися з нульовими значеннями вимірюваних величин.

4. Масштаб має бути простим: в одній поділці масштабу повинна укладатись одиниця (або 10; 100; 0,1 одиниці і т.д.) вимірюваної величини.

5. При вимірюваннях часто зустрічаються величини, що мають дуже мале (або дуже велике) чисельне значення, наприклад,  $5 \cdot 10^{-7}$  м,  $2 \cdot 10^{11}$  Па та ін. У таких випадках загальний коефіцієнт вказується перед одиницею вимірюваної величини ( $L, 10^{-7}$  м;  $E, 10^{11}$  Па). При цьому зникає необхідність вказувати множник біля кожної цифри проти масштабної риски (рис. 13.1). Винесення загального коефіцієнта можна замінити введенням дільних або кратних одиниць. Так,  $5 \cdot 10^{-7}$  м можна замінити на 0,5 мкм.



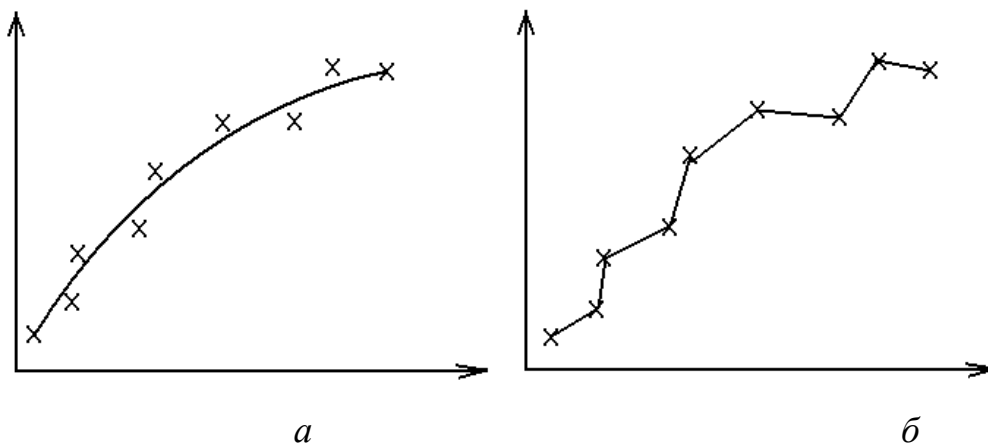
### Вибір масштабу

а) невдалий вибір масштабу для графічного представлення результатів;

б) ті ж дані у збільшеному масштабі.

**Правильно**

**Неправильно**



**Рис. 13.3. Проведення узагальнюючої кривої через точки на графіку**

- а) Через експериментальні точки проводять плавну криву;**
- б) з'єднування експериментальних точок ломаною лінією є помилкою.**

6. Для графічного відображення точності вимірювань досліджуваної величини  $y$  на графіку окрім самої експериментальної точки відкладають вгору і вниз від неї (в тому ж масштабі) вертикальні відрізки, рівні довірчим границям похибок величини  $y$ . Аналогічно, вправо і вліво від експериментальної точки відкладають горизонтальні відрізки (розноски), рівні довірчим границям похибок величини  $x$  (рис. 13.1). Розноски не наносять, якщо довірчі границі уздовж однієї з осей (або обох осей) не виходять за межі розмірів точок на графіку.

7. Через експериментальні точки, нанесені на графік (у вигляді кружків, зірочок або хрестиків), проводять плавну криву в такий спосіб, щоб точки, які відповідають окремим вимірюванням, розташовувалися симетрично по обидві сторони лінії (рис. 13.3).

Товщина лінії має бути у 2-3 рази меншою лінійних розмірів експериментальних точок.

8. Якщо метою роботи є встановлення аналітичної залежності між вимірюваними величинами (або її перевірка), то на графік необхідно також нанести теоретичну лінію, що відповідає цій залежності. При цьому величини, які відкладаються уздовж осей графіка, завжди слід вибирати такими, щоб очікувана теоретична залежність мала вид прямої лінії. Побудова функціональної залежності у вигляді прямої лінії значно полегшує задачу експериментатора.

Наприклад, необхідно перевірити, чи виконується закон Бойля - Маріотта ( $PV = const$  при постійній температурі) для деякого газу. Якщо за отриманими даними побудувати графік залежності  $P$  від  $V$ , то при виконанні закону Бойля - Маріотта експериментальні точки розташуються поблизу гіперболи. Однак встановити візуально, чи є побудована крива гіперболою, досить важко. Якщо ж відкласти уздовж осей величини  $P$  і  $1/V$ , то графік залежності  $P$  від  $1/V$  для ідеального газу буде прямою лінією. В цьому випадку можливі відхилення від прямої лінії (тобто від закону Бойля - Маріотта) зразу ж стануть очевидними.

9. Готовий графік наділяють надписом, що роз'яснює його зміст, і підклеюють у журнал лабораторних робіт.

### 13.1.5. Вивчення ноніусів

**Ноніусом** називається доповнення до звичайного масштабу (лінійного або кругового), яке дозволяє підвищити точність вимірювання з даним масштабом у 10 – 20 разів.



Техніка безпосереднього вимірювання довжин і кутів у наш час досягла високої досконалості. Наприклад, сконструйовано спеціальні прилади (названі **компараторами**), які дозволяють вимірювати довжину з точністю до 1 мікрона ( $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ ). При цьому майже завжди відлікові пристрої обладнані ноніусами.

**Лінійним ноніусом** називається маленька лінійка з поділками, яка може ковзати уздовж великої лінійки (також з поділками), названої **масштабом** (рис. 13.4).

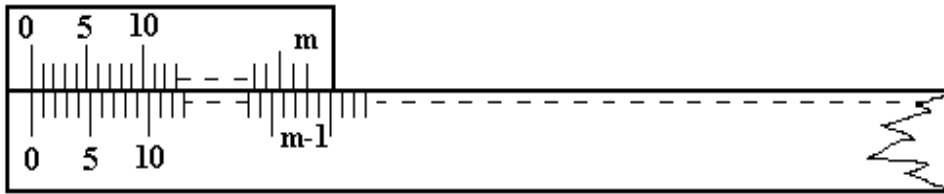


Рис.

#### 13.4. Ноніус

Сумарна довжина всіх  $m$  поділок шкали ноніуса дорівнює довжині  $(m - 1)$  найменших поділок масштабу. Отже, одна поділка ноніуса дорівнює  $\frac{m-1}{m} = (1 - \frac{1}{m})$  поділки масштабу. Саме це дозволяє, користуючись ноніусом, робити відлік з точністю до  $1/m$  частки найменшої поділки масштабу. Позначимо через  $y$  відстань між сусідніми штрихами масштабу, а через  $x$  – між сусідніми штрихами ноніуса. Тоді можна записати, що

$$x = y \cdot (1 - \frac{1}{m});$$

звідси отримуємо:

$$m \cdot x = (m - 1)y.$$

Величина

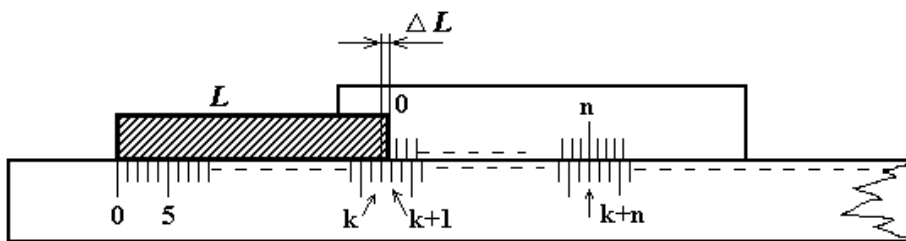
$$\Delta x = y - x = \frac{y}{m} \quad (13.17)$$

має назву **точності ноніуса**, вона визначає максимальну похибку ноніуса.

При будь-якому положенні ноніуса відносно масштабу одна з поділок ноніуса сходиться з деякою поділкою масштабу. Відлік по ноніусу заснований саме на здатності ока фіксувати це сходження поділок ноніуса і масштабу. При вимірюванні довжини відрізка  $L$  розміщують його так, щоб він опинився між нульовою поділкою основного масштабу і нульовою поділкою ноніуса. Припустимо, що при цьому кінець відрізка  $L$  опинився між  $k$ -ою і  $(k + 1)$ -ою поділками масштабу. Тоді можна записати :

$$L = ky + \Delta L,$$

де  $\Delta L$  – невідома поки що частка  $k$ -ої поділки масштабу. Її знаходимо за допомогою ноніуса. Оскільки поділки ноніуса не є рівними поділкам масштабу, то обов'язково знайдеться така  $n$ -на поділка, яка буде найближче підходити до відповідної  $(k + n)$ -ої поділки масштабу.



**Рис.**

### 13.5. Вимірювання за ноніусом

Як бачимо з рис. 13.5

$$\Delta L = ny - nx = n(y - x) = n\Delta x;$$

отже, вся довжина  $L$  визначатиметься формулою:

$$L = ky + n\Delta x. \quad (13.18)$$

Співвідношення (13.18) дозволяє сформулювати правило:  
**довжина відрізка, що вимірюється за допомогою ноніуса, дорівнює числу цілих поділок масштабу плюс точність ноніуса, помножена на номер поділки ноніуса, яка сходиться з деякою поділкою масштабу.**

Похибка, що може виникнути при такому методі відліку, обумовлена неточним сходженням  $n$ -ої поділки ноніуса з  $(k+n)$ -ою поділкою масштабу. Величина її, очевидно, не перевищує  $\frac{1}{2}\Delta x$ . Отже, похибка ноніуса дорівнює половині його точності.

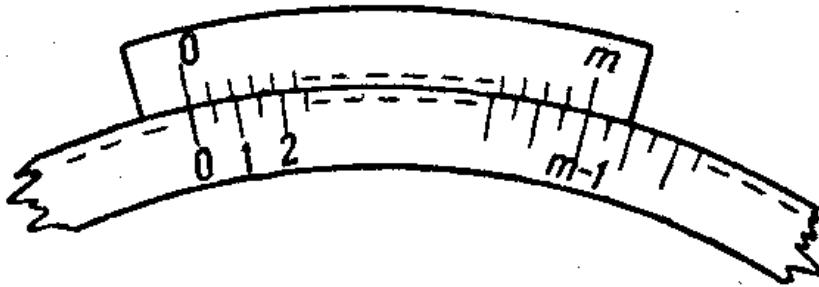
**Круговий ноніус** принципово нічим не відрізняється від лінійного. Це невелика дугова лінійка, що ковзає уздовж круга (**лімба**), розділеного на градуси або ще більш дрібні поділки (рис. 13.6). На лінійці нанесено поділки також у кількості  $m$ , загальна довжина яких дорівнює  $(m - 1)$  поділці лімба, тобто

$$m\lambda = (m - 1)\beta,$$

де  $\lambda$  і  $\beta$  – виражені у градусах або у хвилинах ціни поділок ноніуса ( $\lambda$ ) і найменшої поділки лімба ( $\beta$ ).

Точність кругового ноніуса  $\Delta\lambda$  буде виражається формулою, аналогічною формулі (13.17):

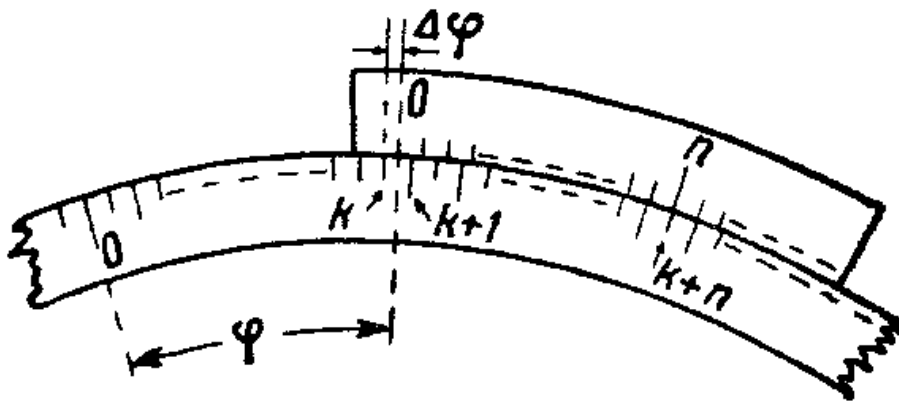
$$\Delta \lambda = \frac{\beta}{m}$$



**Рис. 13.6.** Круговий ноніус

Відраховані від нуля лімбу кути  $\varphi$  (рис. 13.6.а) обчислюються за формулою:

$$\varphi = k \beta + n \Delta \lambda.$$



**Рис. 13.6.а.** Вимірювання кута за допомогою ноніуса

*Запитання і вправи для самоконтролю*

1. Дайте визначення абсолютної та відносної похибок вимірювання.
2. Дайте визначення випадкової події, наведіть приклади.

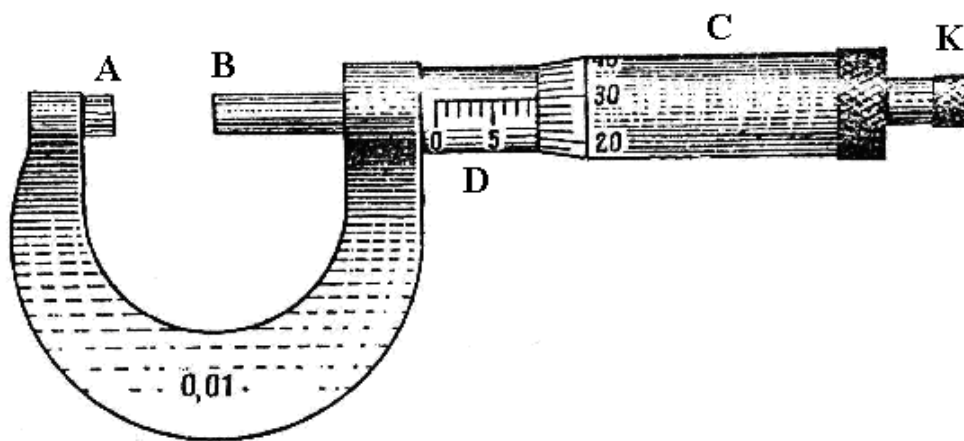
3. Дайте визначення ймовірності випадкової події, проілюструйте його прикладами.
4. Що таке випадкове відхилення результату вимірювання? Чим воно відрізняється від похибки вимірювання?
5. Чим відрізняється похибка вимірювання від довірчої границі похибок?
6. Як визначити довірчу границю систематичних, випадкових та сумарних похибок?
7. Як розрахувати середнє значення величини, що вимірюється у непрямий спосіб?
8. Розкрийте зміст поняття достовірності (довірчої ймовірності).
9. Якою є стандартна форма представлення кінцевого результату вимірювань?

## Вправа 1

### Вимірювання товщини металевої пластинки мікрометром

**Приладдя:** 1) мікрометр, 2) металева пластинка.

**Опис приладу.** Мікрометр (рис. 13.7) використовується для вимірювання діаметрів дротів, кульок і невеликої товщини пластинок. Він має вигляд невеличких лещат, у яких предмет затискається за допомогою гвинта. Крок гвинта звичайно становить 1 мм або 0,5 мм. На стержні гвинта В закріплено барабан С з нанесеною на ньому шкалою, яка має 50 або 25 поділок.

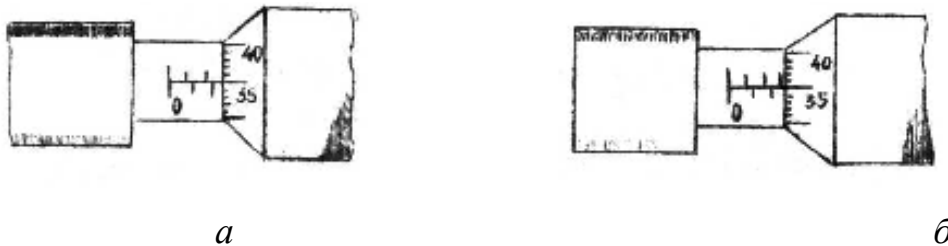


**Рис. 13.7. Зовнішній вигляд мікрометра**

У випадку, коли шкала барабана розділена на 50 поділок, а крок гвинта становить 0,5 мм, ціна поділки барабана дорівнює 0,01 мм. На лінійній шкалі над центральною лінією між поділками нанесено риси для того, щоб знати 1-й чи 2-й оберт здійснює барабан.

При положенні барабана, зображеному на рис. 1.2.9а, довжина вимірюваного тіла становить 2,35 мм. При положенні барабана на рис. 9б довжина вимірюваного тіла дорівнює 2,85 мм, оскільки після другої поділки шкали видно одну риску між 2-ою і 3-ою поділками.

Це свідчить про те, що барабан після другої поділки здійснює 2-ий оберт і, хоч на барабані, як і на рис. 1.2.9а, проти центральної лінії розташована 35-а поділка, результатом виміру є не 2,35 мм, а 2,85 мм. При затиснутому гвинті нуль барабана знаходиться проти нуля лінійної шкали D, а край барабана сходиться із нульовою поділкою шкали. Предмет розміщують між гвинтом і протилежним до нього упором А, потім, обертаючи гвинт за голівку К, доводять його до зіткнення з предметом. За лінійною шкалою відраховують міліметри, а за шкалою барабана – соті частки міліметра.



**Рис. 13.8. Вимірювання розмірів зразка мікрометром.**

Головним джерелом похибок є нерівномірність натискування гвинта на предмет, розмір якого вимірюється. Для усунення цього недоліку сучасні мікрометри обладнані спеціальним пристроєм, який не допускає надто сильного натискування.

**Вимірювання.** Перш ніж користуватись мікрометром, потрібно переконатись, що нулі його шкал збігаються. Пластинку розміщують між гвинтом і протилежним упором і обертанням барабана С підводять торець гвинта до площини пластинки.

Натискування гвинтом на пластинку слід робити тільки рукояткою К, що повертає гвинт. Момент натискування фіксується

слабким тріском. Після цього тріску подальше обертання рукоятки К є непотрібним, а барабана С – неприпустимим. Знімають відліки за шкалами: міліметри – за лінійною шкалою, частки міліметра – за шкалою на барабані.

Товщину пластинки необхідно виміряти поблизу кожного з її чотирьох кутів не менше трьох разів. За наближене значення товщини беруть середнє арифметичне.

## **Вправа 2**

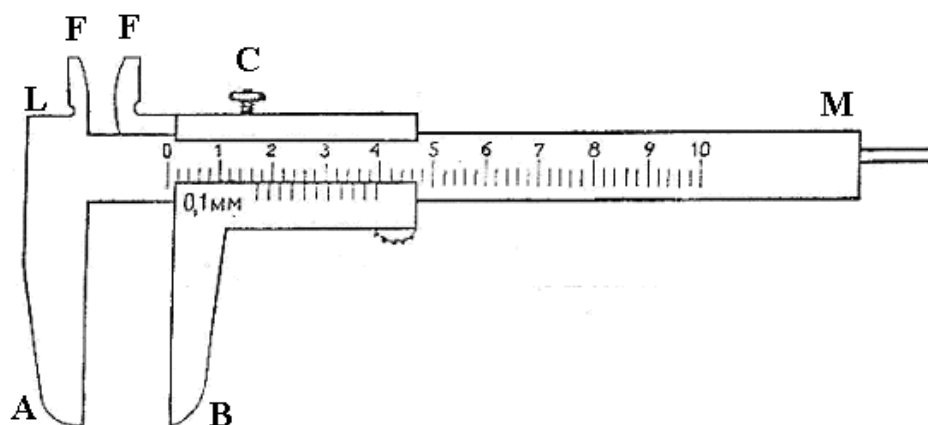
### **Визначення об'єму трубки за допомогою штангенциркуля**

**Приладдя:** 1) штангенциркуль, 2) трубка.

**Опис приладу.** Штангенциркуль складається (рис. 13.9) із розділеного на міліметри масштабу LM, вздовж якого може переміщуватись перпендикулярно до його довжини ніжка СВ із затискувальним гвинтом С, що служить для її закріплення. На скошеному краю ніжки СВ, який прилягає до масштабу, нанесено ноніус; коли ніжки зсунуті уприутул, то нуль ноніуса сходиться із нулем масштабу. Нерухома ніжка LA, закріплена на початку масштабу також перпендикулярно до його довжини, служить упором для вимірюваного тіла. Частини FF обох ніжок служать для вимірювання внутрішніх розмірів тіл.

**Вимірювання.** Для визначення об'єму трубки необхідно визначити її геометричні розміри – довжину і внутрішній та зовнішній діаметри.





**Рис. 13.9. Зовнішній вигляд штангенциркуля**

Для вимірювання довжини розсувають ніжки штангенциркуля і розміщують між ними поздовжньо трубку поблизу шкали, ніжку В підводять так, щоб трубка була трошки затиснута, і роблять відлік. Оскільки ніжка В, а отже і нуль ноніуса перемістилися на довжину трубки, то відраховують на масштабі ціле число поділок міліметрів до нуля ноніуса, а потім дивляться, яка саме поділка ноніуса сходиться із деякою поділкою масштабу. Вимірювання виконують декілька разів, кожного разу повертаючи трубку навколо осі на деякий кут (приблизно  $45^{\circ}$ ). Із усіх отриманих результатів беруть середнє арифметичне.

Для вимірювання зовнішнього діаметру трубки її злегенька затискують між ніжками штангенциркуля А і В. Вимірюють однакове число разів на одному і на протилежному кінцях трубки два взаємно-перпендикулярних діаметра, тримаючи її при цьому перпендикулярно до довжини масштабу. Із усіх результатів беруть середнє.

При вимірюванні внутрішнього діаметру трубки вводять частини FF ніжок штангенциркуля у трубку і розводять їх настільки, щоб обидві вони прилягали до внутрішніх стінок трубки, і виконують

відлік; потім вимірюють інший, перпендикулярний до першого, внутрішній діаметр трубки. Такі ж два вимірювання виконують на протилежному її кінці. Беруть із усіх вимірів середнє. За результатами вимірювань, використовуючи елементарні геометричні формули, обчислюють об'єм трубки.

## 13.2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ ПО МОДУЛЮ 1 „МЕХАНІКА”

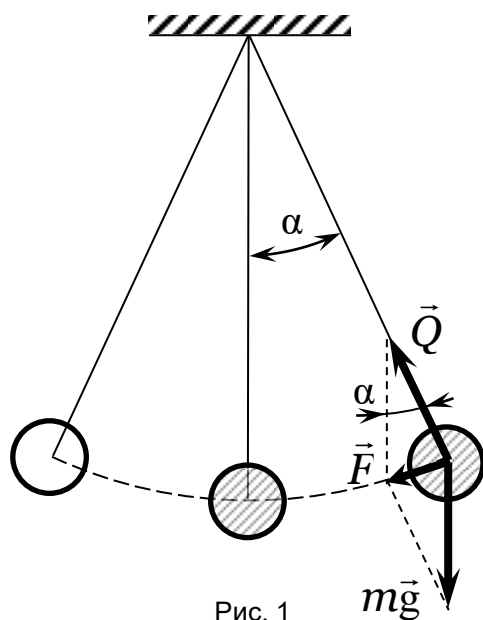
### РОБОТА 1 – 1

#### ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МАЯТНИКА

**Мета роботи:** 1) виміряти прискорення вільного падіння по періоду коливань математичного маятника; 2) вивчити методику математичної обробки результатів прямих і непрямих вимірювань; 3) вивчити закони гармонічного коливального руху.

**Прилади та обладнання:** важка кулька, яка підвішена на легкій нитці, що не розтягується; вертикальна шкала; секундомір.

Рух тіла під дією тільки однієї сили тяжіння називається вільним падінням, а прискорення, якого набуває при цьому тіло, - прискоренням вільного падіння  $g$ .



У даній роботі прискорення вільного падіння визначається за допомогою математичного маятника.

**Математичним маятником** називається матеріальна точка, яка підвішена на тонкій невагомій нитці, що не розтягується. Ця матеріальна точка здійснює коливання у вертикальній площині під дією сили тяжіння.

На практиці математичним

маятником можна вважати важке тіло, яке підвішене на легкій недеформованій нитці, довжина якої в багато разів більша за розміри тіла.

З рис.1 видно, що сила  $F$ , яка повертає маятник в напрямку до положення рівноваги, при малих кутах відхилення  $\alpha$  дорівнює

$$F = mgs\sin\alpha \approx mg\alpha, \quad (1)$$

де -  $\sin\alpha \approx \alpha$  (в радіанах).

Таким чином, сила  $F$  пропорційна куту відхилення маятника від положення рівноваги, отже, пропорційна зміщенню маятника від цього положення. Така сила викликає гармонічний коливальний рух. Період коливань математичного маятника  $T$  залежить від довжини маятника  $l$  і прискорення вільного падіння:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (2)$$

Розв'язуючи (2) відносно  $g$ , одержимо:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}, \quad (3)$$

звідки випливає, що визначення прискорення вільного падіння зводиться до вимірювання довжини маятника та періоду його коливань.

### Порядок виконання роботи

1. Установлюють певну, (якомога більшу) довжину нитки маятника  $l$ . знаходять значення  $l$ , вимірюючи для цього відстань від точки підвісу до центра ваги підвішеного тіла.

2. Відводячи маятник від положення рівноваги на малий кут (5-10°), визначають проміжок часу, за який здійснюється  $N = 50$  повних коливань. Вимірювання повторюють не менше трьох разів.

3. Обробляють результати вимірювань  $l$  і  $t$ .

4. Розраховують середнє значення величини  $\langle T \rangle$  за формулою  $\langle T \rangle = \frac{\langle t \rangle}{N}$  і середнє значення величини  $\langle g \rangle$  за формулою (3).

5. Визначають відносні похибки результатів прямих і непрямих вимірювань:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_t \quad \text{та} \quad \varepsilon_g = 2\varepsilon_\pi + \varepsilon_l + 2\varepsilon_T.$$

6. Розраховують довірчу границю сумарних похибок  $\Delta g = \langle g \rangle \varepsilon_g$

7. Оформлюють звіт і результати заносять у таблицю.

№ п\п	Табличні величини	Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань	
	$\pi$	$l, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$T, \text{ с}$	$g, \text{ м/с}^2$
C				-	-

### Питання та вправи для самоконтролю.

1. Сформулюйте закон всесвітнього тяжіння. Поясніть різницю між вагою і силою тяжіння.

2. Запишіть залежність прискорення вільного падіння від висоти над поверхнею Землі та географічної широти місця.

3. У чому полягає різниця між фізичним і математичним маятниками? Порівняйте вирази для їх періодів коливань.

4. Запишіть диференціальне рівняння гармонічних коливань і його розв'язок. Поясніть зміст понять "зміщення", "амплітуда", "початкова фаза", "період", "частота коливань". Від яких величин залежить повна енергія гармонічних коливань?

**РОБОТА 1 – 2.**  
**ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ НА**  
**ХРЕСТОВИДНОМУ МАЯТНИКУ ОБЕРБЕКА**

**Мета роботи:** 1) вивчити кінематику і динаміку поступального і обертального рухів; 2) використовуючи основний закон динаміки обертального руху, визначити експериментально момент інерції тягарців, закріплених на спицях хрестоподібного маятника, і порівняти результат з теоретичним значення моменту інерції тягарців.

**Прилади та обладнання:** хрестоподібний маятник, чотири однакові тягарці, прискорювальний тягар, секундомір, штангенциркуль, вертикальна шкала.

Хрестоподібний маятник являє собою шків (рис. 1), до якого прикріплені чотири спиці з тягарцями масою  $m_1$  кожний. Ці тягарці за допомогою гвинтів можуть бути закріплені на спицях на будь-якій відстані від осі обертання або ж зняті.

На шків намотується нитка, до кінця якої прикріплюється тягар масою  $m$ . Під дією тягаря нитка, розмотуючись, приводить систему до рівноприскореного обертання. Поступальний рух тягаря  $m$  описується другим законом Ньютона:

$$ma = F, \quad (1)$$

де  $F$  – рівнодіюча сили тяжіння  $mg$  і сили натягу нитки  $T_1$ :

$$F = mg - T_1. \quad (2)$$

Обертальний рух хрестовини описується основним рівнянням динаміки обертального руху,

$$J\beta = M, \quad (3)$$

де  $J$  – момент інерції хрестовини відносно осі обертання,  $\beta$  – її кутове прискорення,  $M$  – момент зовнішньої сили відносно осі обертання. У відповідності з малюнком

$$M = T_2 R, \quad (4)$$

де  $R$  – радіус шківа. Згідно з третім законом Ньютона сили  $\vec{T}_1$  і  $\vec{T}_2$  є рівними за величиною (і протилежними за напрямком):

$$T_1 = T_2 = T.$$

Виключаючи з рівнянь (2), (4) силу натягу нитки, використовуючи (1), (3) та враховуючи зв'язок між лінійним і кутовим прискореннями:

$$\beta = \frac{a}{R}, \quad (5)$$

знаходимо:

$$J = mR^2 \left( \frac{g}{a} - 1 \right). \quad (6)$$

Прискорення  $a$  тягаря  $m$  виражається через шлях  $h$ , пройдений тягарем (висоту падіння), і час  $t$  проходження цього шляху:

$$a = \frac{2h}{t^2}.$$

Вимірюючи час падіння тягаря  $m$  з однієї і тієї ж висоти, отримуємо моменти інерції  $J_1$  і  $J_2$  хрестовини маятника з тягарцями (індекс 1) і без тягарців (індекс 2):

$$J_1 = mR^2 \left( \frac{g}{2h} t_1^2 - 1 \right), \quad J_2 = mR^2 \left( \frac{g}{2h} t_2^2 - 1 \right).$$



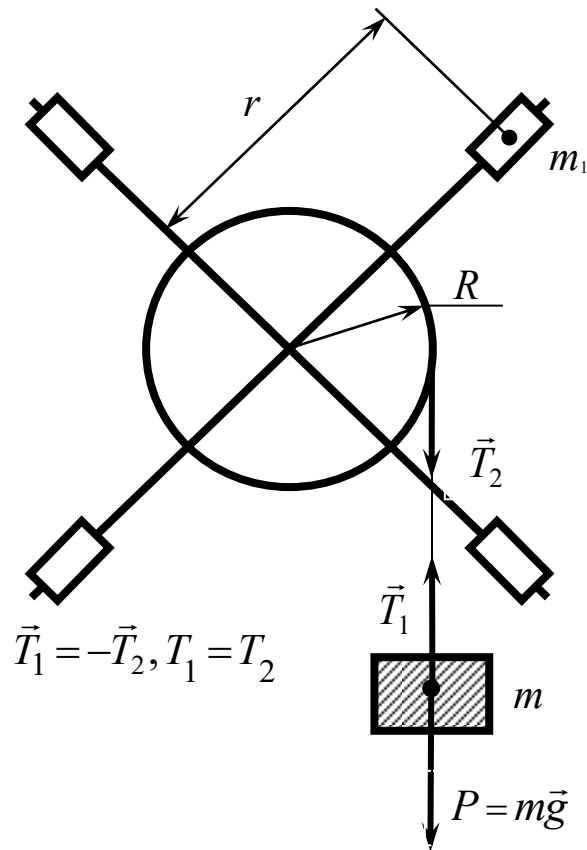


Рис.1

Момент інерції  $J_0$  чотирьох тягарців на спицях визначають двома різними способами :

1) з виразу  $J_0 = J_1 - J_2$ , тобто за формулою:

$$J_0 = \frac{md^2g}{8h}(t_1 + t_2)(t_1 - t_2), \quad \text{де } d = 2R; \quad (7)$$

2) за формулою:

$$J_0^T = 4m_1r^2. \quad (8)$$

В останньому випадку тягарці  $m_1$  приймають за матеріальні точки, що знаходяться на відстані  $r$  від осі обертання.

#### Порядок виконання роботи

1. Записують до таблиці 1 задані значення мас  $m$  і  $4m_1$  і задану викладачем висоту  $h$  падіння тягаря  $m$ .

2. Штангенциркулем вимірюють діаметр шківів  $d$  у двох різних місцях при розмотаній і намотаній нитці і визначають  $\langle d \rangle$ .

3. Розміщують тягарці на спицях на однаковій відстані  $r$  від осі маятника в такій спосіб, щоб маятник знаходився у байдужній рівновазі; визначають  $\langle r \rangle$ . Перш, ніж почати експеримент, перевіряють, чи добре збалансовано маятник.

4. Відмітивши початкове положення тягара  $m$  і надавши йому можливість падати уздовж шкали, визначають  $t_1$  – час падіння тягара з висоти  $h$ . Вимірювання проводять три рази, результати заносять до таблиці 2.

5. Знімають тягарці  $m_1$  зі спиць і знову тричі визначають час падіння  $t_2$  тягара  $m$  з висоти  $h$ .

6. Розраховують середні значення  $\langle t_1 \rangle$  і  $\langle t_2 \rangle$ .

7. Оцінюють довірчі границі сумарних похибок (при достовірності не меншій 0,95) і відносні похибки результатів прямих вимірів і заносять їх до таблиці 2.

8. Знаходять середнє значення  $\langle J_0 \rangle$ , користуючись формулою (7), і оцінюють відносну похибку непрямого виміру за формулою:

$$\varepsilon_{J_0} = \varepsilon_m + \varepsilon_g + \varepsilon_h + 2\varepsilon_d + \varepsilon_{t_1+t_2} + \varepsilon_{t_1-t_2},$$

де

$$\varepsilon_{t_1+t_2} = \frac{\Delta_{t_1} + \Delta_{t_2}}{\langle t_1 \rangle + \langle t_2 \rangle},$$

$$\varepsilon_{t_1-t_2} = \frac{\Delta_{t_1} + \Delta_{t_2}}{\langle t_1 \rangle - \langle t_2 \rangle}$$

і довірчу границю  $\Delta_{J_0}$  за формулою:

$$\Delta_{J_0} = \langle J_0 \rangle \varepsilon_{J_0} .$$

10.Оформлюють звіт і висновки. Впевнюються в тому, що теоретичне значення моменту інерції чотирьох тягарців,  $J_0^T = 4m_1r^2$ , попадає в довірчій інтервал цієї величини:  $J_0 = \langle J_0 \rangle \pm \Delta_{J_0}$ .

**Таблиця 1**

№ п/п	Табличні і задані величини			
	$g, \text{м/с}^2$	$m, \text{кг}$	$4m_1, \text{кг}$	$h, \text{м}$
<b>C</b>				
$\Delta_X$				
$\varepsilon$				

**Таблиця 2**

Результати прямих вимірів				
№ п/п	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$d, \text{м}$	$r, \text{м}$
<b>C</b>				
1				
2				
3				
$\langle X \rangle$				
$\Delta_c$				
$\overset{\circ}{\Delta}$				
$\Delta_X = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}$				
$\varepsilon$				

**Питання та вправи для самоконтролю**

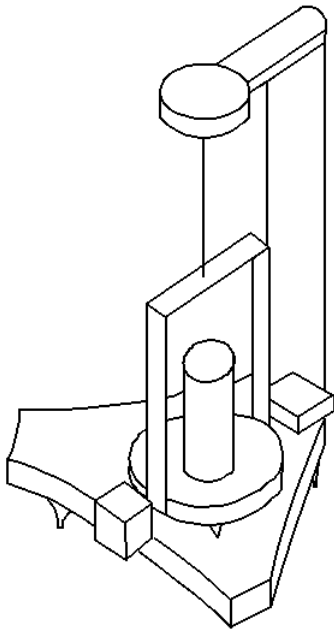
1. Дайте визначення кутових швидкості та прискорення і покажіть, як вони зв'язані з відповідними лінійними величинами.
2. Дайте визначення нормального і тангенціального (дотичного) прискорень і розкрийте їх фізичний зміст.
3. Дайте визначення моментів інерції матеріальної точки та тіла довільної форми; розкрийте фізичний зміст моменту інерції.
4. Як визначається момент сили відносно точки? Відносно осі? Відповідь проілюструйте малюнком.
5. Сформулюйте і запишіть основне рівняння динаміки обертального руху.
6. Запишіть вираз для кінетичної енергії тіла, що обертається навколо нерухомої осі.
7. Як визначається момент імпульсу тіла відносно осі обертання? Сформулюйте закон збереження моменту імпульсу.

**РОБОТА 1 - 3**  
**ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ТІЛА МЕТОДОМ**  
**КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ**

**Мета роботи :** 1) вивчити динаміку обертального руху твердого тіла; 2) визначити момент інерції тіла методом крутильних коливань.

**Прилади та обладнання :** крутильний маятник, циліндр, секундомір, штангенциркуль.

В даній роботі для визначення моменту інерції тіла неправильної форми використовують крутильний маятник, який являє собою підвішений на пружному дроті диск зі скобою (рис.1). Період коливань маятника  $T$  зв'язаний з його моментом інерції співвідношенням:



$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{k}} \quad (1)$$

де  $k$  - модуль кручення підвісу, який чисельно дорівнює моменту сили, що закручує дріт на кут в один радіан.

Для виключення  $k$  з виразу (1) діють таким чином. На диску розміщують циліндр з відомим моментом інерції  $J_u$ . У цьому випадку згідно з (1) період маятника дорівнюватиме:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{J + J_u}{k}} \quad (2)$$

Рис.1

Розв'язуючи сумісно (1) і (2) одержують:

$$J = J_u \frac{T^2}{T_1^2 - T^2} \quad (3)$$

$$J_u = \frac{1}{2}mr^2 = \frac{1}{8}md^2 \quad (4)$$

де  $m$ ,  $d$  - маса і діаметр циліндра.

### Порядок виконання роботи

1. Записують задане значення маси циліндра  $m$ .
2. Вимірюють штангенциркулем діаметр циліндра  $d$  (не менше трьох разів).
3. Крутильний маятник приводять у коливальний рух, повернувши його на невеликий кут (20-30°).

Вимірюють час  $t$  тридцяти коливань ( $N=30$ ). Вимірювання повторюють п'ять разів.

4. На диск ставлять циліндр і, повторюючи вимірювання (див. п.3), визначають час  $t_1$ .

5. Розраховують середні значення  $\langle t \rangle$ ,  $\langle t_1 \rangle$ ,  $\langle d \rangle$ .

6. Обчислюють середнє значення періодів коливань  $(T) = \frac{(t)}{N}$  і  $(T) = \frac{(t_1)}{N}$ , а також середні значення моментів інерції  $J_u$  і  $J$  за формулами (4) і (3).

7. Визначають відносні похибки і довірчі границі сумарних похибок результатів вимірювань, використовуючи формули:

$$\varepsilon_{J_u} = \varepsilon_m + 2\varepsilon_d; \quad \varepsilon_T = \varepsilon_t; \quad \varepsilon_{T_1} = \varepsilon_{t_1};$$

$$\varepsilon_J = \varepsilon_{J_u} + 2\varepsilon_T + \frac{2\Delta T_1 \langle T_1 \rangle + 2\Delta T \langle T \rangle}{\langle T_1 \rangle^2 - \langle T \rangle^2} .$$

8. Оформлюють звіт і висновки заносючи дані в таблицю.

№ п/п	Задані величини	Результати прямих вимірювань				Результати непрямих вимірювань			
	<i>m</i> , кг	<i>d</i> , м	<i>t</i> , с	<i>t<sub>l</sub></i> , с	<i>N</i>	<i>T</i> , с	<i>T<sub>1</sub></i> , с	<i>J<sub>ц</sub></i> , кг · м <sup>2</sup>	<i>J</i> , кг · м <sup>2</sup>

### Запитання та вправи для самоконтролю

1. Дайте визначення моменту інерції матеріальної точки і тіла довільної форми.
2. Запишіть і сформулюйте теорему Штейнера, проілюструйте рисунком.
3. Наведіть відомі Вам моменти інерції тіл симетричної форми.
4. Виведіть формулу кінетичної енергії тіла, що обертається.
5. Дайте визначення моменту імпульсу твердого тіла, що обертається відносно осі обертання.
6. Запишіть і сформулюйте основний закон динаміки обертального руху.



## РОБОТА 1 – 4

### ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ЮНГА ПО ЗГИНУ СТЕРЖНЯ

**Мета роботи:** визначити модуль пружності (модуль Юнга) для сталі.

**Прилади та обладнання:** прилад для визначення модуля Юнга по стрілі прогину, лінійка, штангенциркуль, набір тягарців, індикатор.

Зміну в розміщенні частинок твердого тіла під дією зовнішніх сил називають деформацією. Зміну довжини  $\Delta l$  при односторонньому розтягу (або стиску) називають **абсолютною деформацією**, а відношення  $\frac{\Delta l}{l}$  - відносною деформацією, де  $l$  - початкова довжина.

Деформація викликає виникнення в деформованому тілі пружної сили  $F_{пр}$  :

$$F_{пр.} = -k\Delta l, \quad (1)$$

де  $k$  - коефіцієнт жорсткості, який залежить від матеріалу і форми тіла. Формула (1), що виражає закон Гука, дійсна для пружних деформацій. Сила  $F$ , яка діє на площу поперечного перерізу тіла  $S$ , створює нормальну напругу:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (2)$$

Відповідно до закону Гука

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l}, \quad (3)$$

де  $E$  - модуль Юнга, постійний для даної речовини коефіцієнт, що характеризує її пружні властивості.

З формули (3) випливає, що модуль Юнга чисельно дорівнює напрузі, при якій відносна деформація дорівнює одиниці (тобто  $\Delta l = l$ ).

Модуль Юнга можна визначити по згину стержня прямокутного перерізу (рис.1) за формулою:

$$E = \frac{l^3}{a^3} \cdot \frac{F}{\lambda}. \quad (4)$$

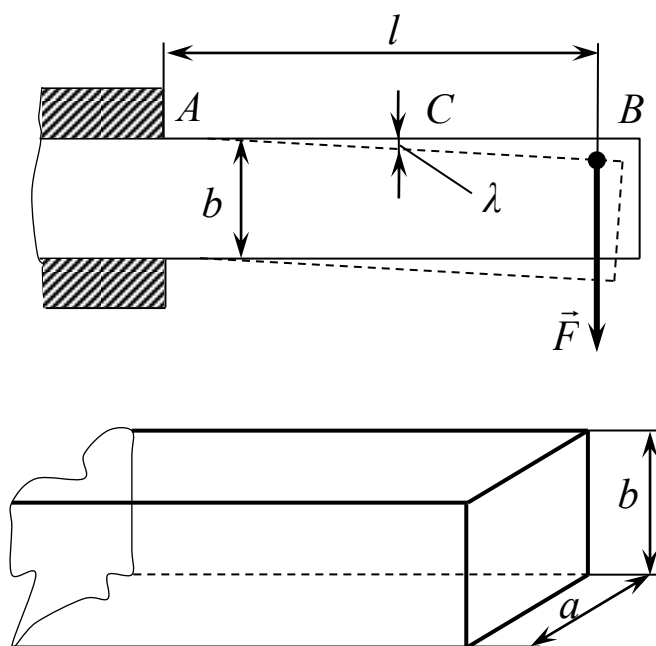


Рис.1

Тут  $l$  - відстань від точки опори стержня  $A$  до точки  $B$  прикладення сили  $F$ ;  $a$  і  $b$  - ширина і товщина стержня в прямокутній частині;  $\lambda$  - стріла прогину (тобто та відстань, на яку опускається при деформації точка  $C$ , яка лежить посередині між  $A$  і  $B$ ). Стріла прогину залежить від величини навантаження, розмірів і форми стержня, а також від модуля Юнга матеріалу стержня.

## Порядок виконання роботи

1. Вимірюють лінійкою довжину  $l$ , стержня від опори  $A$  до точки  $B$  прикладення деформуючої сили (тобто до ребра призми, на якій підвішене тягара).

2. Вимірюють штангенциркулем ширину  $a$ , і товщину  $b$  стержня у вузькій прямокутній його частині.

3. У середньому положенні  $C$  закріплюють стрілочний індикатор таким чином, щоб рухомий щуп був засунутий у корпус індикатора. При утворенні стріли прогину щуп повинен виходити з корпусу індикатора.

4. Поворотом зовнішнього кільця з насічкою на боковій поверхні встановлюють шкалу індикатора в нульове положення.

5. Чашку підвісу послідовно навантажують плоскими важками масою від 1 до 5 кг, а потім розвантажують до 0 кг. Для кожного навантаження  $F = mg$  по шкалі індикатора визначають два положення стріли прогину  $\lambda$  (при навантаженні і розвантаженні).

6. Будують графіки залежності  $F$  від  $\lambda$  при навантаженні і розвантаженні (вони практично зливаються в одну пряму лінію, що проходить через початок координат, оскільки при вказаних навантаженнях деформація згину є пружною).

7. Користуючись графіком, визначають величину  $\left(\frac{F}{\lambda}\right)$  як відношення ординати правого кінця графіка до відповідної абсциси (таке відношення називають кутовим коефіцієнтом).

8. Розраховують середнє значення модуля Юнга за формулою (4) і відносно похибку вимірювань за формулою

$$\varepsilon_E = 3\varepsilon_l + \varepsilon_a + 3\varepsilon_b + \varepsilon_\lambda + \varepsilon_F$$

9. Визначають довірчу границю  $\Delta_E = \varepsilon_E(E)$  сумарних похибок при  $P \geq 0,95$ .

10. Оформлюють звіт і висновки, вносячи дані в таблицю:

№ п/п	Прямі виміри									Непрямі виміри	
	l, м	a, м	b, м	λ навантаження			λ розвантаження			F/ λ, Н/м	E, Па
				для m <sub>1</sub>	для m <sub>2</sub>	для m <sub>3</sub>	для m <sub>1</sub>	для m <sub>2</sub>	для m <sub>3</sub>		
С											

### Питання і вправи для самоконтролю

1. Дайте визначення абсолютної і відносної, пружної і непружної та залишкової деформації.
2. Перелічіть відомі види деформації.
3. Запишіть і сформулюйте закон Гука (в загальному вигляді і для одностороннього розтягу або стиску).
4. Розкрийте фізичний зміст модуля Юнга
5. Нарисуйте діаграму розтягу і вкажіть точки, що відповідають границям пружності і міцності. Вкажіть границі виконання закону Гука і границі пластичних деформацій.
6. Поясніть відмінності в пружних властивостях пластичних і крихких, а також аморфних і кристалічних тіл.

## РОБОТА 1 – 5

### ПЕРЕВІРКА ОСНОВНОГО ЗАКОНУ ДИНАМІКИ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ТВЕРДОГО ТІЛА ЗА ДОПОМОГОЮ МАЯТНИКА МАКСВЕЛЛА

**Мета роботи:** 1) засвоїти основні питання кінематики і динаміки обертального руху твердого тіла; 2) визначити експериментально прискорення центра мас маятника і порівняти його з теоретичним значенням.

**Прилади:** маятник Максвелла, секундомір, штангенциркуль, лінійка.

Маятник Максвелла – це невеликий диск (маховичок), що туго насаджений на валик і під дією сили тяжіння може опускатися на двох нитках, які попередньо намотані на валик маховичка (див .рис. 1).

Дві нитки під час руху вниз розмотуються на всю довжину. Маховик, що розкрутився, продовжує обертальний рух у тому ж напрямку, намотуючи нитку на вісь. Внаслідок цього він підіймається угору і при цьому гальмує свій рух. Піднявшись до верхньої точки, диск знову буде спускатися вниз і т.д. Маховичок буде коливатися, рухаючись то угору, то вниз; тому такий пристрій і називають маятником.

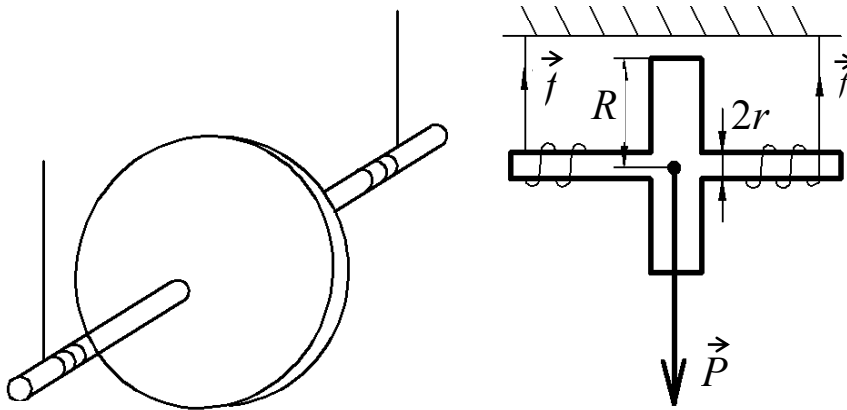


Рис.1

Позначимо через  $P$  силу тяжіння, що діє на маятник, а через  $f$  силу натягу однієї нитки. Тоді рівняння поступального руху маховика запишеться у вигляді:

$$P - 2f = ma, \quad (1)$$

де  $m$  – маса маятника;  $a$  – прискорення його центра мас. Рівняння для обертального руху буде мати вигляд:

$$2fr = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

де  $r$  – радіус валика;  $\omega$  – кутова швидкість обертального руху диска;  $J$  – момент інерції маятника. Останній дорівнює сумі моментів інерції валика  $J_1$  і диска  $J_2$ :

$$J = J_1 + J_2. \quad (3)$$

Валик є однорідним циліндром, тому

$$J_1 = \frac{1}{2} m_1 r^2, \quad (4)$$

де  $m_1$  – маса валика.. Момент інерції диска з коаксіальним отвором в

ньому визначається з виразу

$$J_2 = \frac{1}{2} m_2 (R^2 - r^2), \quad (5)$$

де  $R$  – радіус диска;  $r$  – радіус отвору;  $m_2$  – маса диска.

Враховуючи, що  $a = r \frac{d\omega}{dt}$ , з рівнянь (1) і (2) знаходимо:

$$a = \frac{P}{m + \frac{J}{r^2}} = \frac{mg}{m + \frac{J}{r^2}}. \quad (6)$$

Якщо диск і валик виготовлені з одного і того ж самого матеріалу і радіус валика набагато менше радіуса диска (тобто  $r \ll R$ ), формула (6) спрощується і набуває вигляду:

$$a \approx 2g \left( \frac{r}{R} \right)^2. \quad (7)$$

Прискорення центра мас маятника можна визначати також за формулою:

$$a \approx \frac{2S}{t^2}, \quad (8)$$

де  $S$  – шлях, пройдений центром мас від крайнього верхнього положення до крайнього нижнього,  $t$  – час одного повного розкручування маятника. Надалі позначимо через  $a_T$  прискорення центра мас, розраховане теоретично за формулою (7) з використанням відомих значень  $r$  і  $R$ , а через  $a_e$  – вимірне експериментально (тобто отримане при підстановці в (8) результатів вимірювань  $S$  і  $t$ ).

Мета даної роботи – порівняти експериментальне  $a_e$  та теоретичне  $a_T$  значення прискорення і проаналізувати можливі причини розбіжності одержаних результатів.

### **Порядок виконання роботи**



1. Вимірюють за допомогою штангенциркуля діаметри  $d$  і  $D$  валика та диска в трьох різних місцях і визначають їх радіуси

$$r = \frac{d}{2} \quad \text{і} \quad R = \frac{D}{2} .$$

Результати вимірювань заносять до таблиці.

2. Помітивши початкове положення маятника, пускають його падати вздовж шкали і в момент пуску включають секундомір. Визначають час повного розкручування. Вимірювання  $t$  виконують тричі для одного і того ж самого значення  $S$ . Результати вимірювань заносять до таблиці.

3. За середніми значеннями  $S$ ,  $t$ ,  $R$  і  $r$  визначають експериментальне  $a_e$  та теоретичне  $a_T$  значення прискорення центра мас за формулами (8) і (7). Результати обчислень заносять до таблиці.

4. Оцінюють довірчі границі сумарних похибок і відносні похибки результатів прямих вимірювань.

5. Визначають довірчі границі сумарних похибок непрямих вимірювань за формулами

$$\Delta_{a_e} = \langle a_e \rangle \varepsilon_{a_e}; \quad \varepsilon_{a_e} = \varepsilon_S + 2\varepsilon_t$$

$$\Delta_{a_T} = \langle a_T \rangle \varepsilon_{a_T}; \quad \varepsilon_{a_T} = \varepsilon_g + 2(\varepsilon_R + \varepsilon_r)$$

6. Порівнюють значення  $a_e$  і  $a_T$  з урахуванням довірчих границь їх сумарних похибок. Аналізують можливі причини розбіжності результатів.

№ п/п	Табличні величини	Результати прямих вимірювань				Результати непрямих вимірювань		
		$g$ , м/с <sup>2</sup>	$R$ , м	$r$ , м	$S$ , м	$t$ , с	$a_e$ , м/с <sup>2</sup>	$a_t$ , м/с <sup>2</sup>

	-						
--	---	--	--	--	--	--	--

### Запитання і вправи для самоконтролю

1. Дайте визначення кутової швидкості та кутового прискорення.
2. Як зв'язані лінійна та кутова швидкості, лінійне та кутове прискорення?
3. Що таке момент сили?
4. Що таке момент інерції, в яких одиницях він вимірюється? Наведіть приклади моментів інерції тіл симетричної форми.
5. Запишіть і сформулюйте основний закон динаміки обертального руху.
6. Дайте визначення моменту імпульсу, запишіть і сформулюйте закон збереження моменту імпульсу і наведіть приклади, що ілюструють цей закон.

## ФІЗИЧНИЙ МАЯТНИК

Період гармонічних коливань фізичного маятника  $T$  визначається за формулою

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}, \quad (1)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $L$  – приведена довжина фізичного маятника, яка у свою чергу визначається із співвідношення:

$$L = \frac{J}{md}, \quad (2)$$

де  $J$  – момент інерції маятника відносно осі качань  $O$ ;  $m$  – маса маятника;

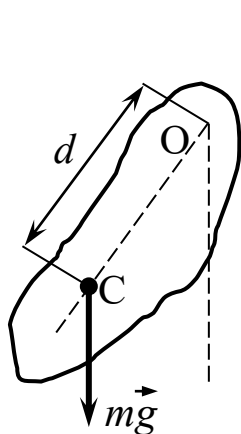


Рис.1

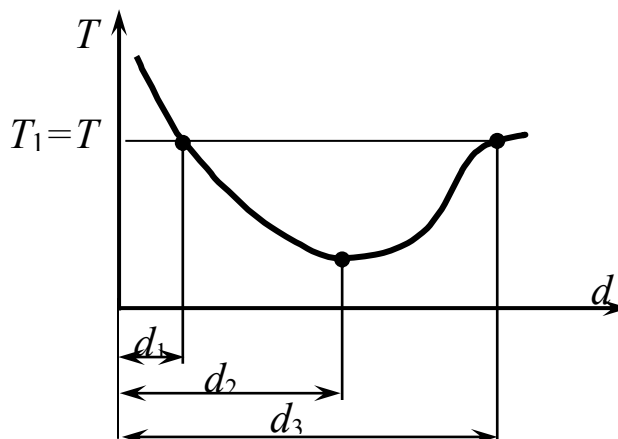


Рис.2

$d$  – відстань від осі качань до центра мас маятника  $c$  (рис.1).

Згідно з теоремою Штейнера  $J = J_c + md^2$ , де  $J_c$  – момент інерції маятника відносно осі, що проходить через центр мас (і паралельно осі качань).  $J_c$  можна записати у вигляді  $J_c = md_0^2$ , де  $d_0$  – радіус інерції. Використовуючи останні два співвідношення, замість рівняння (2) отримуємо

$$L = \frac{d^2 + d_0^2}{d} . \quad (3)$$

Беручи до уваги формулу (3), для періоду коливань (1) маємо:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{d^2 + d_0^2}{gd}} . \quad (4)$$

З рівняння (4) випливає, що період коливань  $T$  фізичного маятника є функцією аргументу  $d$ , тобто  $T = T(d)$ . Графік залежності  $T = T(d)$  наведено на рис.2. Можна показати, що функція  $T = T(d)$  має мінімум при  $d = d_0$ , а при  $d \rightarrow 0$  та  $d \rightarrow \infty$  прямує до нескінченності.

З графіка видно, що кожному періоду коливань відповідають два значення  $d$ :  $d_1 < d_0$  та  $d_2 > d_0$ . Використовуючи рівність  $T(d_1) = T(d_2)$ , можна довести, що  $L = d_1 + d_2$ .

Враховуючи це співвідношення, з формули (1) отримуємо:

$$g = 4\pi^2 \frac{d_1 + d_2}{T^2} . \quad (5)$$

## РОБОТА 1 – 6

### ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБОРОТНОГО МАЯТНИКА

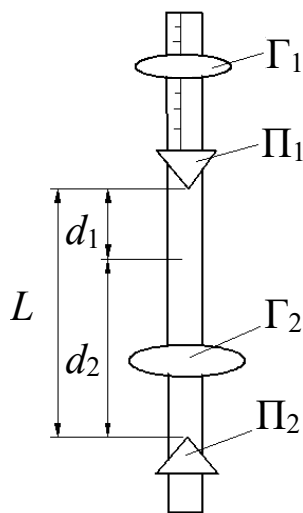


Рис.1

**Мета роботи:** 1) вивчити гармонічні коливання; 2) виміряти прискорення вільного падіння.

**Прилади та обладнання :** стержень з призмою, секундомір.

Фізичний маятник, що використовується у даній роботі, називають оборотним. Він складається з металевого стержня, на якому закріплено призми  $P_1$  і

$P_2$  і тягарі  $G_1$  і  $G_2$  (рис.1). Один з них закріплено жорстко, а другий може переміщуватися уздовж стержня і закріплюватися гвинтом. Положення тягарців підібрано так, що періоди  $T_1$  і  $T_2$  коливань маятника відносно призм  $P_1$  і  $P_2$  збігаються. При збігу періодів відстань між призмами дорівнює приведеній довжині маятника  $L = d_1 + d_2$ . В роботі ця відстань становить  $0,730 \pm 0,001$  м.

#### Порядок виконання роботи

1. Відхиляють маятник від положення рівноваги на малий кут ( $5-8^\circ$ ) і, пропустивши 1-2 коливання, визначають за допомогою секундоміра час  $t_1$  п'ятдесяти повних коливань. Вимірювання величини  $t_1$  повторюють тричі.

2.Перевертають маятник і тричі вимірюють час  $t_2$  п'ятдесяти повних його коливань у новому положенні.

3.Результати всіх шести вимірювань часу  $t$  обробляють за стандартною формою.

4.Розраховують середнє значення періоду  $\langle T \rangle$  за формулою  $\langle T \rangle = \langle t \rangle / 50$

5. Розраховують середнє значення величини  $\langle g \rangle$  , використовуючи формулу (5).

5.Розраховують відносні похибки  $\varepsilon_T = \varepsilon_t$  та  $\varepsilon_g = \varepsilon_L + 2\varepsilon_T$  .

6.Розраховують довірчу границю сумарних похибок вимірювань величини  $g$  при достовірності  $P \geq 0,95$  , тобто  $\Delta_g = \langle g \rangle \varepsilon_g$  .

7.Оформляють звіт і висновки, для чого заносять дані в таблицю.

№ п/п	Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань	
	$t, c$	$L, m$	$T, c$	$g, m/c^2$

### Запитання та вправи для самоконтролю

1.Дайте визначення гармонічних коливань на поясніть зміст понять "амплітуда", "частота", "циклічна частота", "період", "фаза".

2. Які коливання називають вільними (власними) ?
3. Що таке фізичний маятник? Приведена довжина фізичного маятника.
4. Які сили називають квазіпружними? Наведіть приклади.
5. Дайте визначення моменту інерції твердого тіла і радіуса інерції.
6. Запишіть і сформулюйте теорему Штейнера та наведіть рисунок, що її ілюструє.
7. Поясніть, як і чому прискорення вільного падіння залежить від широти місцевості.

## РОБОТА 1 – 7

### ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ПО КРИВІЙ ЗАЛЕЖНОСТІ ПЕРІОДУ КОЛИВАНЬ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА ВІД ПОЛОЖЕННЯ ТОЧКИ ПІДВІСУ.

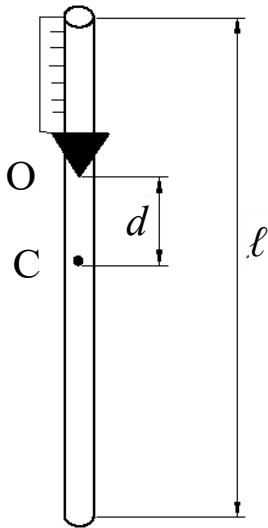


Рис.1

**Мета роботи:** 1) вивчити гармонічні коливання; 2) визначити приведену довжину маятника та прискорення вільного падіння.

**Прилади та обладнання:** металевий стержень з опорною призмою, секундомір. Фізичний маятник, що використовується в даній роботі, являє собою однорідний металевий стержень завдовжки близько 1 м (рис.1). На стержні є шкала і пересувна опорна

призма, яку можна закріпити у будь-якому місці стержня.

### Порядок виконання роботи

1. Опорну призму закріплюють на самому кінці стержня-маятника. Ребрам опорної призми маятник ставлять на підставку; відхиливши його від положення рівноваги на малий кут ( $\leq 4^\circ$ ), вимірюють за допомогою секундоміра час 50 повних коливань і обчислюють їх період.

2. Повторюють вимірювання (див. п.1) через кожні 4 см і дані заносять у таблицю. Треба одержати 10-12 значень періоду (періоди



можуть відрізнятися на соті долі секунди, їх необхідно визначити дуже ретельно).

3. За даними таблиці будують графік функції  $T=T(d)$  (див. рис.2 на стор.104). По осі абсцис відкладають відстань між серединою стержня і ребром опорної призми, по осі ординат - значення періоду. Через експериментальні точки, нанесені на графік, проводять плавну криву так, щоб приблизно однакова кількість точок була розташована по обидві сторони кривої. Графік необхідно будувати тільки на міліметровому папері.

4. Паралельно осі абсцис проводять пряму так, щоб вона двічі перетинала криву  $T=T(d)$ . Знаходять значення ординати  $T$  та абсцис  $d_1$  і  $d_2$  точок перетину і визначають приведену довжину  $L = d_1 + d_2$ . Прискорення вільного падіння  $g$  обчислюють за формулою (5), наведеною, мінімум для трьох значень приведеної довжини і періоду; потім знаходять середнє арифметичне.

№ п/п	Результати прямих вимірювань		Результати непрямих вимірювань		
	$d, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$T, \text{ с}$	$L, \text{ м}$	$g, \text{ м/с}^2$

### Запитання та вправи для самоконтролю

1. Що таке фізичний маятник? За яких умов його коливання є гармонічними?
2. Що таке приведена довжина фізичного маятника?
3. Дайте визначення моменту інерції твердого тіла та радіуса інерції, виразіть радіус інерції однорідного стержня через його довжину.

4. Сформулюйте теорему Штейнера і наведіть рисунок, що її ілюструє.

5. Розкрийте математичний та фізичний зміст поняття фази коливань. На яку величину змінюється фаза за час, що дорівнює періоду? Відповідь обґрунтуйте.

7. За яких умов виникає явище невагомості?

## РОБОТА 1 – 8

### ВИЗНАЧЕННЯ ЛОГАРИФМІЧНОГО ДЕКРЕМЕНТУ ЗАГАСАННЯ КОЛИВАНЬ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА

**Мета роботи:** 1) вивчити загасаючі коливання; 2) визначити логарифмічний декремент загасання і коефіцієнт загасання коливань.

Фізичний маятник, що використовується в даній роботі, має вигляд стержня з тягарцем на кінці /рис.1/. Стержень підвішений на кронштейні за допомогою шарикового підшипника. На підставці у площині коливань встановлено шкалу, яка дозволяє вимірювати амплітуду. Наявність сил тертя призводить до того, що енергія маятника, який вільно коливається, витрачається на роботу з їх подолання і з часом зменшується. В результаті цього зменшується амплітуда коливань. Отже, вільні (власні) коливання завжди загасають і тому, строго кажучи, не є гармонічними.

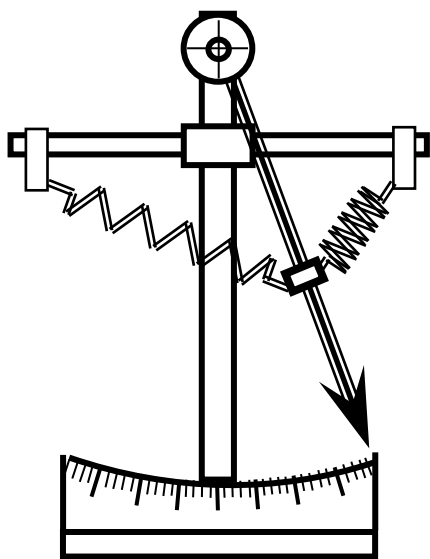


Рис. 1

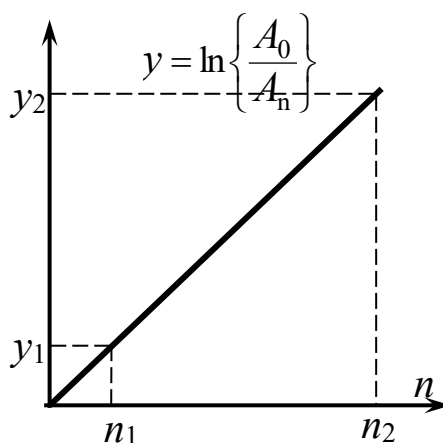


Рис. 2

Амплітуда цих загасаючих коливань зменшується за експоненціальним законом:

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}. \quad (1)$$

тут  $A_0$  – амплітуда в початковий момент часу,  $t=0$ ;  $\beta$  – параметр системи, який називається **коефіцієнтом загасання**. Згідно з рівнянням (1) за час  $\tau = 1/\beta$  амплітуда загасаючих коливань зменшується в  $e$  разів. Величину  $\tau$  називають **часом релаксації** системи; за цей час відбувається  $N = \tau/T = 1/\beta T$  повних коливань (тут  $T$  – період коливань).

Коефіцієнт загасання  $\beta$  враховує наявність сил тертя (за відсутності тертя  $\beta=0$ ). Для зміни величини  $\beta$  фізичний маятник, що використовується в даній роботі, має поновлюючі пружини. Для характеристики загасання коливань поряд з коефіцієнтом загасання користуються безрозмірною величиною  $\delta = \frac{1}{N} = \beta T$ , яка називається **декрементом загасання** (або логарифмічним декрементом).

Логарифмічний декремент загасання  $\delta$  визначається як натуральний логарифм відношення амплітуд, що відрізняються за часом, на період:

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}. \quad (2)$$

Виходячи з формули (1), можна довести, що для будь-якого цілого числа  $n$  має місце співвідношення

$$\ln \frac{A(t)}{A(t+nT)} = n\delta = n\beta T \quad (3)$$

### Порядок виконання роботи.

1. За допомогою установочних гвинтів встановлюють підставку маятника горизонтально.

2. За відсутності поновлюючих пружин відхиляють маятник на невеликий кут ( $\leq 10^\circ$ ), відраховують по шкалі кількість поділок  $A_0$  (тут  $A_0 = A(0)$ ) і відпускають маятник. Потім відраховують  $n=10$  повних коливань і знову вимірюють амплітуду. Результат позначають через  $A_n$  (тут  $A_n \equiv A(nT)$ ).

3. Встановлюють те ж саме значення  $A_0$  і повторюють вимірювання (див. п.2) для  $n = 20, 30, 40, 50, 60, 70$ . Результати заносять у табл.1.

4. Вимірювання (див. п.п.2,3) повторюють за наявності поновлюючих пружин. Результати заносять у табл.2.

5. Обчислюють значення  $A_n/A_0$  та  $\ln\left(A_0/A_n\right)$  і заносять їх у відповідні таблиці.

6. Для маятника з пружинами і без них будують на одному і тому ж самому графіку за даними таблиці 1 та 2 залежності відношення амплітуд  $A_n/A_0$  від кількості коливань  $n$ .

Одержані криві порівнюють між собою.

7. Для маятника з пружинами будують графік, відкладаючи по осі абсцис кількість коливань  $n$ , а по осі ординат – значення

$y = \ln\left(A_0/A_n\right)$ . Логарифмічний декремент загасання визначають,

знаходячи нахил одержаної прямої лінії (див. рис.2, де хрестиком позначено експериментальні точки):

$$\delta = \frac{y_2 - y_1}{n_2 - n_1}.$$

8. Аналогічно обчислюють логарифмічний декремент загасання  $\delta_0$  для маятника без пружин.

9. За допомогою секундоміра визначають періоди  $T$  і  $T_0$  коливань маятника з пружинами і без них, вимірюючи проміжки часу  $t$  50 повних коливань:

$$T = \frac{\langle t \rangle}{50}; \quad T_0 = \frac{\langle t_0 \rangle}{50}.$$

Розраховують коефіцієнт загасання  $\beta = \delta / T$ ,  $\beta_0 = \delta_0 / T_0$

маятника з пружинами і без них та відповідний час релаксації

$$\tau = 1 / \beta, \quad \tau_0 = 1 / \beta_0.$$

Розрахунки заносять у табл.3.

1. Результати розрахунків для маятника без пружин

$N$	$A_n$	$A_n/A_0$	$\ln(A_n/A_0)$	$\delta_0$
10				
20				
...				
70				

## 2. Результати розрахунків для маятника з пружинами

$N$	$A_n$	$A_n/A_0$	$\ln(A_n/A_0)$	$\delta$
10				
20				
...				
70				

3.

№ п/п	Результати непрямих вимірювань							
	$t_0, \text{с}$	$t, \text{с}$	$T_0, \text{с}$	$\beta_0, \text{с}^{-1}$	$\tau_0, \text{с}$	$T, \text{с}$	$\beta, \text{с}^{-1}$	$\tau, \text{с}$
				1				

### Запитання та вправи для самоконтролю

1. Складіть диференціальне рівняння власних незагасаючих коливань і залишіть його розв'язок.
2. Складіть диференціальне рівняння власних коливань з урахуванням сил тертя; запишіть його розв'язок і зробіть аналіз.
3. Як залежить амплітуда загасаючих коливань від часу? Запишіть вираз і проілюструйте графіком.
4. Що таке коефіцієнт загасання? Який його фізичний зміст?
5. Дайте визначення логарифмічного декременту загасання; покажіть, як він зв'язаний з коефіцієнтом загасання і розкрийте його фізичний зміст.

## 14. МАТЕМАТИЧНИЙ ДОДАТОК

### 14.1. Вектори. Дії з векторами

#### 14.1.1. Проекція вектора

14.1.1.1. Проекції векторів  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  на вісь  $x$  – це довжини відрізків  $a_x$ ,  $b_x$ ,  $c_x$  відповідно, що визначаються так, як показано на рис. 14.1.1.

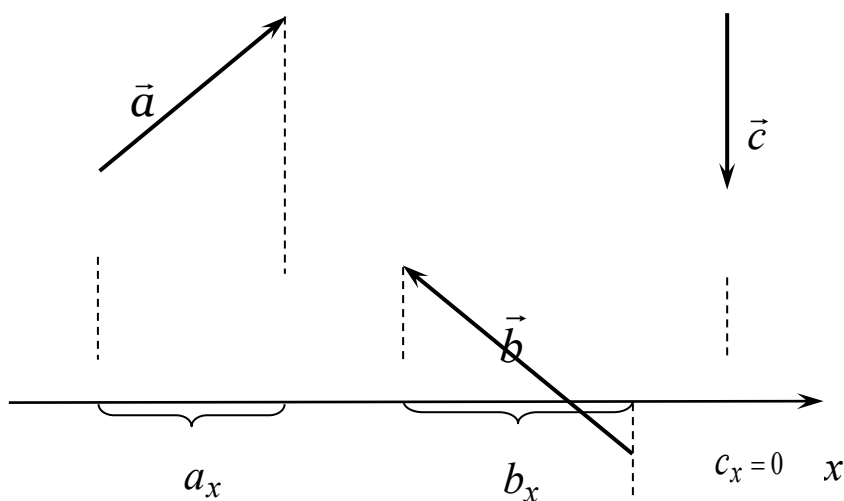


Рис. 14.1.1

7.1.1.2. Проекція вектора  $\vec{a}$  на осі  $x$  та  $y$  знаходять так, як це продемонстровано на рис.14.1.2. Величини проєкцій на осі  $x$  та  $y$  дорівнюють відповідно:

$$a_x = a \cos \alpha \quad \text{та} \quad a_y = a \sin \alpha.$$

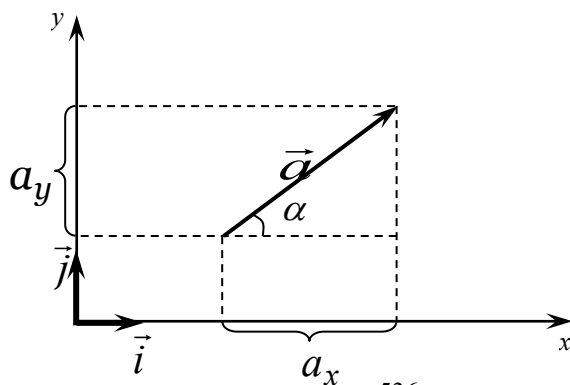


Рис. 14.1.2



Використовуючи одиничні вектори  $\vec{i}, \vec{j}$  (вектори одиничної довжини, що направлені вздовж осей  $x$  та  $y$ , так звані направляючі орти), у векторній формі можна записати:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j}.$$

**Приклад.** Використаємо значення проекцій сил, що діють на осі  $x$  та  $y$  при русі тіла по похилій площині вниз (рис. 14.1.3). У векторній формі другий закон Ньютона для тіла на похилій площині має вигляд:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F} + \vec{F}_{\text{тер}}.$$

У проекціях на осі:

на вісь  $x$ :

$$ma = mg \sin \alpha - F - F_{\text{тер}};$$

на вісь  $y$ :

$$0 = -mg \cos \alpha + N.$$

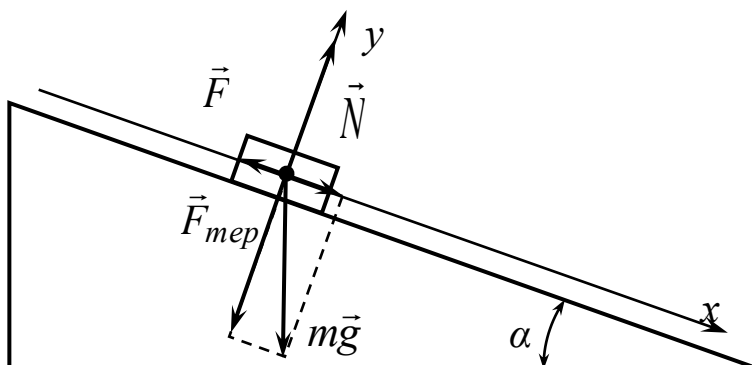


Рис. 14.1.3

**14.1.1.3.** У просторі довільний вектор  $\vec{a}$  можна виразити через його проєкції на осі, використовуючи поняття про одиничні вектори  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  вздовж цих осей:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}.$$

**Приклад.** У механіці використовується поняття радіус - вектор матеріальної точки. Радіус-вектор є вектором, що направлений з початку координат у точку, в якій знаходиться матеріальна точка в даний момент часу (рис. 14.1.4). Таким чином, радіус-вектор  $\vec{r}$  має початок у точці  $(0,0,0)$ ;  $(x_1, y_1, z_1)$  - координати його кінця. З іншого боку  $x, y, z$  є проєкціями вектора  $\vec{r}$  на осі  $x, y, z$ . Можна записати:

$$\vec{r} = x_1 \vec{i} + y_1 \vec{j} + z_1 \vec{k}.$$

Величина модуля вектора  $\vec{r}$  може бути виражена через величини проєкцій радіус-вектора на осі  $x, y, z$ :

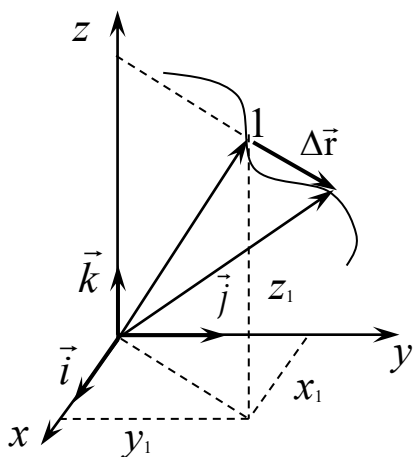


Рис. 14.1.4

$$|\vec{r}| = r = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}.$$

### 14.1.2. Добуток вектора на скаляр

Добутком скалярної величини  $c$  на вектора  $\vec{a}$  є вектор  $c \cdot \vec{a}$ , що має напрямок вектора  $\vec{a}$ , а його величина (модуль) дорівнює добутку скаляра  $c$  на модуль вектора  $\vec{a}$ , тобто:  $|c \cdot \vec{a}| = c |\vec{a}|$ .

На рис. 14.1.5 показано, що залежно від величини  $c$  модуль вектора  $c \cdot \vec{a}$  може приймати значення як менше, ніж модуль вектора  $\vec{a}$  ( $c < 1$ ),

так і більше, ніж модуль вектора  $\vec{a}$  ( $c > 1$ ). Зрозуміло, що в випадку  $c = 1$  вектор  $c \cdot \vec{a} = \vec{a}$ .

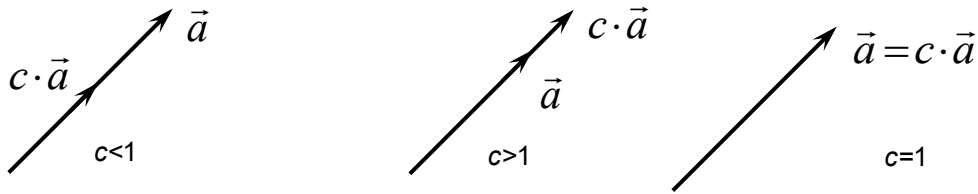


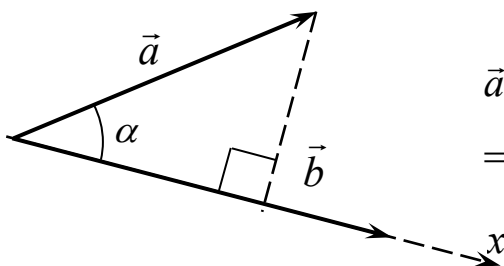
Рис. 14.1.5

### 7.1.3. Скалярний добуток двох векторів

**Скалярним добутком** двох векторів є скалярна величина, що чисельно дорівнює добутку абсолютних значень векторів  $\vec{a}$  та  $\vec{b}$ , помноженому на косинус кута між ними (рис. 14.1.6):

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| |\vec{b}| \cos \alpha.$$

Можна переписати визначення скалярного добутку в іншому вигляді:



$$\begin{aligned} \vec{a} \cdot \vec{b} &= |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \alpha = \\ &= a \cdot b \cdot \cos \alpha = a_x \cdot b. \end{aligned}$$

Рис. 14.1.6

Тут  $a_x$  – проекція вектора  $\vec{a}$  на вісь, що збігається з напрямком вектора  $\vec{b}$ .

У загальному випадку двох векторів у просторі їх скалярний добуток виражається через проекції цих векторів на всі три осі координат:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z.$$

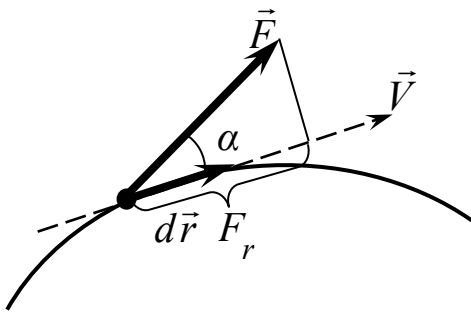


Рис. 14.1.7

**Приклади.** 1. Елементарна механічна робота є скалярним добутком вектора сили на вектор переміщення (рис. 14.1.7):

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F_r dr.$$

Тут  $F_r = F \cos \alpha$  – проекція сили на напрямок переміщення.

2. Миттєва потужність – це відношення елементарної роботи до часу, за який ця робота виконана:

$$N = \frac{dA}{dt}.$$

З іншого боку, використовуючи визначення роботи, отримаємо вираз, що свідчить про те, що миттєва потужність є скалярним добутком векторів сили та миттєвої швидкості (див. рис. 14.1.7):

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

#### 7.1.4. Векторний добуток двох векторів

**Векторним добутком** двох векторів є вектор, який позначається  $[\vec{a} \times \vec{b}] = \vec{c}$  або  $\vec{a} \times \vec{b} = \vec{c}$  на відміну від позначення скалярного добутку  $\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| |\vec{b}| \cos \alpha$ .

**Векторним добутком** двох векторів називається третій вектор, що знаходиться так:

а) величина вектора  $\vec{c}$ , тобто модуль векторного добутку (модуль вектора  $\vec{c}$ ) дорівнює:

$$|\vec{c}| = \left| [\vec{a} \times \vec{b}] \right| = |\vec{a}| |\vec{b}| \cdot \sin \alpha;$$

б) за напрямком вектор  $\vec{c}$  направлений перпендикулярно до площини, в якій лежать вектори  $\vec{a}$  та  $\vec{b}$ . Напрямок вектора  $\vec{c}$  визначається за правилом правого гвинта (рис. 14.1.8).

Таким чином важливо, який вектор в добутку стоїть першим, тобто:

$$[\vec{a} \times \vec{b}] = \vec{c}, \quad [\vec{b} \times \vec{a}] = -\vec{c}.$$

На відміну від скалярного добутку, для якого виконується умова:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{a},$$

векторний добуток характеризується властивістю:

$$[\vec{a} \times \vec{b}] = -[\vec{b} \times \vec{a}],$$

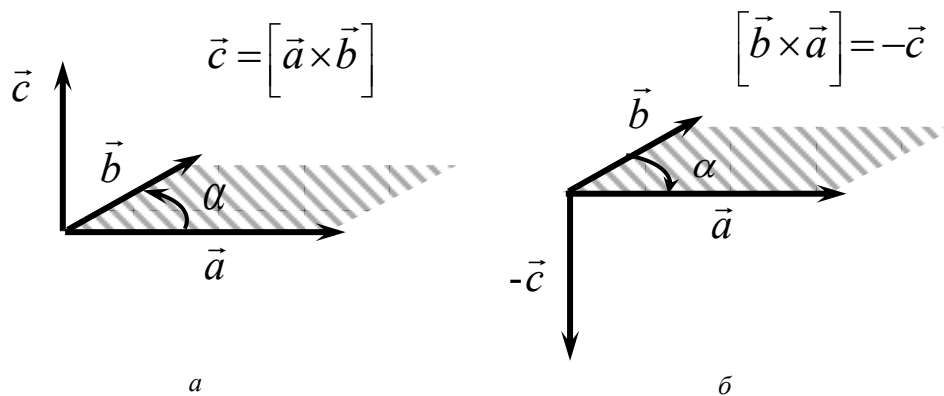


Рис. 14.1.8

тобто переставлення місцями векторів у векторному добутку змінює напрям вектора векторного добутку на протилежний.

**Приклади:** 1. Лінійна швидкість зв'язана з кутовою швидкістю співвідношенням, яке в векторній формі є векторним добутком кутової швидкості на радіус – вектор:

$$\vec{V} = [\vec{\omega} \times \vec{r}].$$

Вектор лінійної швидкості є векторним добутком двох інших векторів – кутової швидкості та радіус-вектора.

### 7.1.5. Сума та різниця векторів

**Сума двох векторів** – це третій вектор, що знаходиться за „правилом паралелограма” (рис. 14.1.9, а).

Таким чином, сумою двох векторів є третій вектор, що побудований, як діагональ паралелограма, сторонами якого є ці два вектори. У випадку, коли є більш, ніж два вектори, можна користуватись ще й таким правилом: у кінець першого вектора переміщують (паралельним перенесенням) початок другого, в кінець

другого, аналогічно, поміщають початок третього і т.д. Сумою векторів буде вектор, що з'єднає початок першого з кінцем останнього вектора. На рис. 14.1.9, б продемонстрована процедура знаходження суми трьох векторів  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  та  $\vec{c}$ .

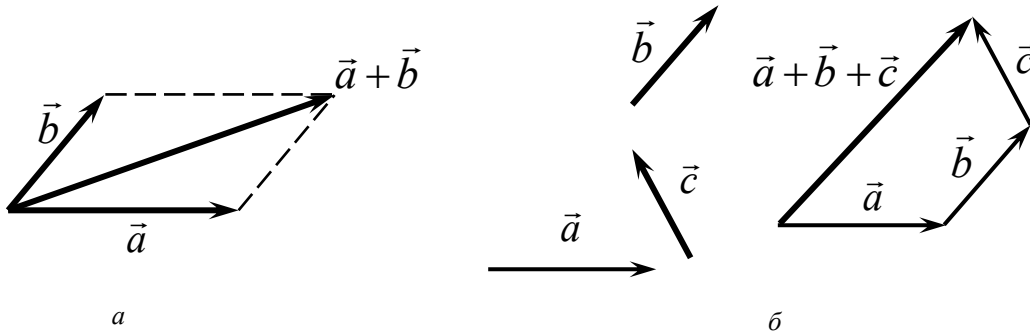


Рис.14.1.9

**Різниця векторів** – це третій вектор, що з'єднує кінці двох векторів, які виходять з однієї точки. Напрямок вектора різниці двох векторів вибирають у бік того вектора, від якого віднімають. Це видно з рис. 14.1.10, а та б.



Рис. 14.1.10

Різниця двох векторів за величиною (модулем) може бути більшою, ніж кожен з векторів, різницю яких знаходять. У багатьох фізичних задачах йдеться про зміну векторної фізичної величини за якийсь відрізок часу, яка є різницею кінцевого та початкового значення даної фізичної векторної величини.

**Приклади.** 1. У процесі руху положення матеріальної точки характеризується радіус-вектором. При переході від одного значення

радіус-вектора  $\vec{r}_1$  у момент часу  $t_1$  до  $\vec{r}_2$  у наступний момент часу  $t_2$  вектор  $\vec{r}$  змінився на

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1.$$

Вектор, що з'єднує початкове та кінцеве положення радіус-вектора називається вектором **переміщення** (див. рис. 14.1.4). Вектор переміщення, таким чином, є зміною радіус-вектора чи **приростом радіус-вектора**.

2. При абсолютно пружному ударі (а. п. у.) кулька масою  $m$  відбивається від перешкоди зі швидкістю, що за величиною дорівнює швидкості падіння на перешкоду. При падінні перпендикулярно поверхні вектор швидкості змінюється на вектор, рівний за величиною та протилежний за напрямком (рис. 14.1.11 а).

$$|\Delta(m\vec{V})| = 2mV.$$

Зміна імпульсу матеріальної точки  $\Delta(m\vec{V})$  дорівнює різниці векторів імпульсу після удару та до удару (рис. 14.1.11, б). Модуль цієї різниці (зміна імпульсу) буде вдвічі більшим, ніж величина імпульсу  $mV$ , тобто:

$$|\Delta(m\vec{V})| = 2mV.$$

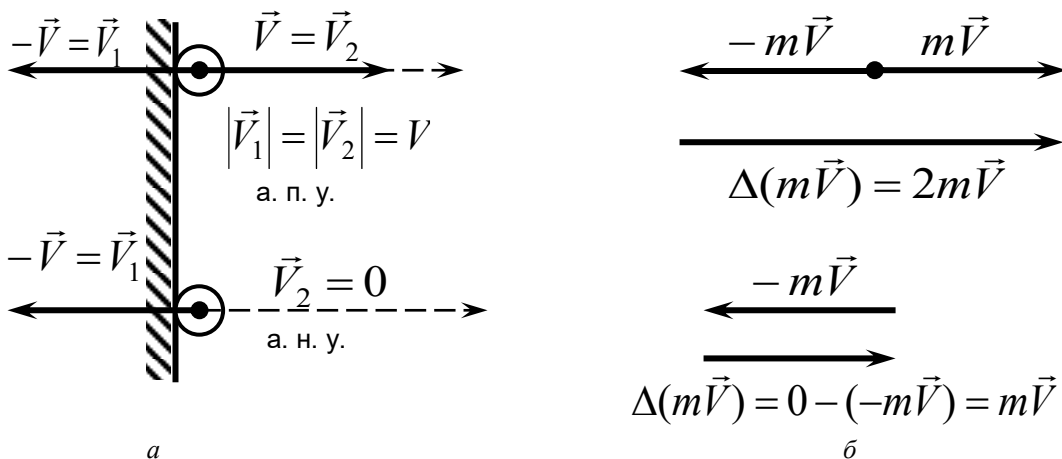


Рис. 14.1.11



При абсолютно непружному ударі (а. н. у.) кулька зупиняється (як пластилінова кулька, що прилипла до стінки при ударі), а її швидкість стає рівною нулю (рис. 14.1.11 а та б). В цьому випадку величина зміни імпульсу буде вдвічі менша, ніж при абсолютно пружному ударі:  $\Delta(m\vec{V}) = 0 - (-m\vec{V}) = m\vec{V}$ , тобто  $|\Delta(m\vec{V})| = mV$ .

Висновки цієї простої механічної задачі на визначення зміни імпульсу, що базуються на знаходженні різниці двох векторів, неодноразово використовуються в різних розділах фізики, наприклад при підрахунку тиску ідеального газу; тиску, що створює світло на поверхні з різними відбивальними властивостями тощо.

## 7.2. Похідна функції

Нехай  $y$  є функцією аргументу  $x$ . Цю функціональну залежність запишемо в вигляді  $y(x)$ . При зміні аргументу на величину  $\Delta x$  значення функції зміниться на величину  $\Delta y$ . **Похідною** називається границя, до якої наближається відношення приросту функції до приросту аргументу, при якому пройшов цей приріст (при наближенні  $\Delta x$  до нуля)

$$y' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}.$$

Похідна характеризує швидкість зміни функції  $y$  при зміні аргументу  $x$ .

**Найпростіші похідні**, якими користувалися у навчальному посібнику:

$$y = c, \quad \text{постійна величина, що не залежить від } x \quad y' = 0$$

$y = cx$ , лінійна залежність	$y' = c$
$y = cx^2$ квадратична залежність	$y' = 2cx$
$y = cx^n$ показникова функція (загальний випадок)	$y' = ncx^{n-1}$
$y = \frac{c}{x}$ (тобто $n=-1$ у попередній формулі)	$y' = -\frac{c}{x^2}$
$y = e^x$	$y' = e^x$
$y = \sin x$	$y' = \cos x$
$y = \cos x$	$y' = -\sin x$

**Приклади. 1.** Миттєва швидкість – це похідна радіус-вектора за часом, тобто границя, до якої наближається відношення приросту радіус-вектора до часу  $\Delta t$ , за який цей приріст відбувся, при  $\Delta t \rightarrow 0$ .

$$\vec{V} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}, \quad \text{при } \Delta t \rightarrow 0 \quad \text{або} \quad \vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{r}'.$$

Значення проекції швидкості на одну з осей, наприклад на вісь  $x$ :

$$V_x = \frac{dx}{dt}.$$

Зазначимо, що тут функцією є радіус-вектор  $\vec{r}$ , координатами –  $x, y, z$ , а аргументом – час  $t$ . Тому похідну беремо за часом  $t$ .

2. У загальному випадку довільного криволінійного руху вводиться поняття вектора миттєвого прискорення в довільній точці траєкторії. Миттєве **прискорення** – це похідна вектора швидкості за часом:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} \quad \text{при } \Delta t \rightarrow 0 \quad \text{або} \quad \vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt}.$$

Значення проєкції прискорення на одну з осей, наприклад на вісь  $x$  :

$$a_x = \frac{dV_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Таким чином, прискорення  $\vec{a}$  є похідною  $\vec{V}$  за часом та другою похідною  $\vec{r}$  за часом.

3. Миттєва потужність є похідною роботи за часом, характеризує швидкість виконання роботи:

$$N = \frac{dA}{dt}.$$

### 7.3. Невизначений та визначений інтеграл

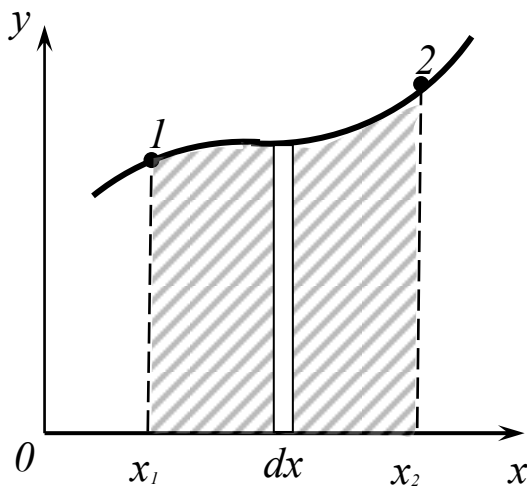


Рис. 14.1.12

Інтегрування – операція, зворотна до диференціювання. Інтегрування полягає в знаходженні суми нескінченно малих величин, внаслідок чого отримують скінчену величину. Так, довжина дуги довільної кривої дорівнює сумі нескінченно малих відрізків  $\Delta l \rightarrow 0$ , які називають

диференціалами та позначають  $dl$ . Довжина дуги кривої може бути виражена сумою нескінченно великої кількості відрізків:  $L = \sum_{i=1}^n \Delta l_i$ , або

через позначення інтеграла  $L = \int_0^L dl$ .

Визначений інтеграл від неперервної функції  $y(x)$  – це площа під кривою, що заштрихована на рис. 14.1.12. Значення аргументу  $x_1$  та  $x_2$  називають нижньою та верхньою межею інтегрування. Очевидно, що ця площа складається з площ нескінченно вузьких прямокутників  $y(x)dx$ .

Визначений інтеграл, що чисельно рівний площі під кривою  $y(x)$ , записують у вигляді:

$$\int_{x_1}^{x_2} y(x) dx.$$

Для визначеного інтеграла можна записати:

$$\int_{x_1}^{x_2} y(x) dx = F(x) \Big|_{x_1}^{x_2} = F(x_2) - F(x_1),$$

де знаходження значення функції  $F(x)$  і є суттю інтегрування.

Оскільки інтегрування є дією зворотною до знаходження похідної та диференціала, то невизначений інтеграл (без меж інтегрування) буде рівний функції  $F(x)$  з точністю до довільної константи, тобто:

$$\int y(x) dx = F(x) + \text{const}.$$

У курсі фізики найчастіше використовують інтеграли від показникової функції  $x^n$ . Такий інтеграл дорівнює:

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + \text{const}; \quad n \neq -1.$$

У випадку  $n=-1$  отримують функцію, що називається натуральним логарифмом (логарифм з основою  $e \approx 2,7$ ):

$$\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + \text{const}.$$



## 15. ДОДАТКИ

### *15.1. Фізичні величини та одиниці їх вимірювання*

Фізичні закони встановлюють найсуттєвіші взаємозв'язки між фізичними поняттями, що описують важливі явища в фізиці. Ці взаємозв'язки подаються у вигляді математичних співвідношень між фізичними величинами, що вводяться для характеристики даного фізичного явища чи групи таких явищ.

Фізичні величини – це властивість, яка є спільною в якісному відношенні до багатьох матеріальних об'єктів, та індивідуальною для кожного з них у кількісному відношенні. Так, властивість всіх матеріальних тіл зберігати стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, що має назву „інерція” має міру, фізичну величину „маса”. Тому можна сказати, що **маса є мірою інертності матеріальних тіл.** Аналогічно, тепловий рух молекул характеризується фізичною величиною „**температурою по термодинамічній шкалі температур (або абсолютною температурою)**”, тобто **температура є мірою кінетичної енергії теплового руху молекул.** Однорідними фізичними величинами є такі, що характеризують ту ж саму властивість. Наприклад, маса Землі, комбайна чи автомобіля – однорідні, а швидкість автомобіля та його маса – неоднорідні величини.

Значення фізичної величини є кількісною характеристикою даної фізичної величини з позначенням одиниці її вимірювання. Число, яким виражається значення фізичної величини, отримується в результаті вимірювання. Фізичну величину вимірюють, тобто

порівнюють (зіставляють) зі значенням однорідної їй фізичної величини, що прийнята за одиницю. Таке порівняння (вимірювання) проводиться з використанням технічних засобів (засобів вимірювання).

Наприклад, число, яке виражає значення довжини предмета, отримується порівнянням його довжини зі значенням довжини еталона метра. Ця ж довжина може бути подана іншим числом, отриманим порівнянням її з еталоном дюйма, ярда. Тому для однозначності подання значення фізичної величини число дають з обов'язковим позначенням відповідної одиниці вимірювання. Для того, щоб можна було виконувати дії над значеннями фізичних величин, вони повинні бути виражені через одиниці, які пов'язані між собою за певними правилами, тобто утворюють **систему одиниць вимірювання фізичних величин**. У більшості країн світу нині обов'язковою для використання є система одиниць СІ (Система Інтернаціональна), що прийнята на XI Генеральній конференції по мірах і вагах? одиниці якої мають назву - **одиниці СІ**.

Система одиниць будується так, що для кількох різнорідних фізичних величин обумовлюються матеріальні об'єкти або явища, які можуть бути відтворені з достатньою точністю. Ці об'єкти або явища використовуються для зберігання та відтворення певних значень фізичних величин, тобто вони є **еталонами** одиниць. Одиниці величин, для яких обумовлено відтворення за допомогою еталонів, називаються **основними**.

Кожна фізична величина характеризується розмірністю, яка виражає зв'язок даної фізичної величини з величинами, які є основними у певній системі одиниць. Запис розмірності величини прийнято виконувати за правилами запису алгебраїчних виразів, позначаючи

основні величини великими літерами: довжину, шлях, відстань –  $L$ , масу –  $M$ , час –  $T$ , силу електричного струму –  $I$ , термодинамічну температуру –  $\theta$ , кількість речовини –  $N$ , силу світла –  $J$ . Наприклад, розмірність сили  $[F] = LMT^{-2}$ . На практиці частіше використовують позначення основних величин системи СІ і записують розмірність, наприклад сили в вигляді  $[F] = \text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$ .

Над розмірностями фізичних величин можна виконувати деякі алгебраїчні дії. Правила роботи з розмірностями такі: 1) ліва частина алгебраїчного рівняння повинна мати таку ж розмірність, як і права; 2) при додаванні (відніманні) значень величин вони можуть бути тільки однорідними, тобто мати однакові розмірності (при запису вказується спільна розмірність); 3) множення, ділення, піднесення до степеня виконується як із звичайними змінними; 4) відношення однорідних величин є безрозмірним, тобто не має розмірності. Це значить, що до алгебраїчного виразу розмірності в цьому випадку основні величини входять у нульовому ступені.

Використання методу розмірностей дозволяє досить просто знайти грубі помилки у математичних описах фізичних моделей. Якщо при запису розмірностей величин, які входять до рівняння порушуються правила 2) або 3); то при опису модуля явища допущено помилку. За правилом 4) тригонометричні функції безрозмірні. Значення безрозмірної величини не залежить від вибору системи одиниць.

При розв'язуванні задач дії над розмірностями можна замінити діями над одиницями, записуючи похідні одиниці через основні одиниці системи. Позначення одиниць слід застосовувати після числових значень величин і поміщати їх в одному рядку (без перенесення всього або частини позначення в наступний рядок). Між



останньою цифрою числа і позначенням одиниці слід залишати пропуск.

Якщо числове значення величини є десятковим дробом, то позначення одиниці слід записувати після усіх цифр. Стандартом не допускається поміщати позначення одиниць в один рядок з формулою, що виражає залежність між величинами. При необхідності пояснень величин розмірностей у формулі запис їх виконується окремо.

Літерні позначення одиниць, які входять у добуток, слід відокремлювати крапками на середній лінії (як знаками множення). У літерних позначеннях відношень одиниць як знак ділення має застосовуватися лише одна похила або горизонтальна риска. Допускається використовувати позначення одиниць у вигляді добутку позначень одиниць, піднесених до степеня (додатних і від'ємних).

При використанні похилої риски позначення одиниць у чисельнику та знаменнику слід поміщати в рядок, добуток позначень одиниць у знаменнику необхідно брати в дужки.

При використанні похідної одиниці, що складається з двох і більше одиниць, не допускається комбінувати літерні позначення та найменування одиниць, тобто для одних одиниць наводити позначення, а для інших – найменування.

## ***15.2. Вказівки щодо розв'язування задач***

1. При оформленні розв'язаної задачі вказувати основні закони та формули, на яких базується розв'язок та давати письмове обґрунтування цих законів. Потрібно пояснювати буквені позначення у формулах. Якщо при розв'язку задачі використовується формула,

яка отримана для часткового випадку, що не виражає який-небудь фізичний закон, чи не є визначенням якої-небудь фізичної величини, то її необхідно отримати.

2. Дати рисунок, що пояснює зміст задачі ( у тих випадках, коли це можливо). Виконати його треба ретельно (за допомогою олівця, лінійки, циркуля).

3. Супроводжувати розв'язок задач короткими, але вичерпними поясненнями.

4. Всі початкові значення величин в умові задачі потрібно перевести у СІ. Наприклад, потрібно переводити км/год у м/с, градуси в радіани, градуси °С у градуси Кельвіна (К)

5. Отримати розв'язок задачі в загальному вигляді, тобто виразити величину, яку знаходимо, в буквених позначеннях величин, що задані в умові задачі. При такому способі розв'язку не проводяться обчислення проміжних величин.

6. Підставити в праву частину отриманої робочої формули замість символів величин позначення одиниць вимірювань, провести з ними відповідні дії і переконатись у тому, що результат відповідає тій одиниці, яку знаходимо ( дивись приклади розв'язків типових задач нижче).

7. Підставляти в робочу формулу числові значення величин можна лише тоді, коли вони виражені у СІ. Недотримання цього правила призводить до невірному результату.

8. При підстановці в робочу формулу, а також при запису відповіді, числові значення величин потрібно записувати, як добуток десяткового дробу з однією значущою цифрою перед комою на відповідну ступінь десяти. Наприклад, радіус Землі 6400 км потрібно

записати у вигляді  $6,4 \cdot 10^6$  м, а замість 0,00123 потрібно записати  $1,23 \cdot 10^{-3}$ .

9. Оцінити, де це можливо, правдоподібність чисельної відповіді. В ряді випадків така оцінка допоможе знайти хибність отриманого результату. Наприклад, коефіцієнт корисної дії теплової машини не може бути більше одиниці, електричний заряд не може бути менше елементарного заряду електрону, швидкість тіла не може бути більше швидкості світла та тощо.

### ***15.3. Визначення основних одиниць системи СІ***

В системі СІ прийнято **сім основних** та **дві додаткові** одиниці. **Одиниця вимірювання** – це значення фізичної величини, взяте за основу порівняння кількісного оцінювання однорідних величин.

#### **Основні:**

**1 метр (1 м)** – **одиниця довжини**, що дорівнює відстані, яку проходить у вакуумі плоска електромагнітна хвиля за  $1/299\,792\,458$  частку секунди (або дорівнює  $1650763,73$  довжин хвиль ( $\lambda = 6,057802105938 \cdot 10^{-7}$  м) у вакуумі випромінювання, що відповідає переходу між рівнями  $2p_{10}$  і  $5d_5$  атома кріптону – 86).

**1 кілограм (1 кг)** – **одиниця маси** – дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма ціна поділки вагів  $4 \cdot 10^{-8}$ .

**1 секунда (1 с)** – **одиниця часу** – інтервал часу, що дорівнює  $9\,192\,631\,770$  періодам випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома стронцію – 133.

**1 Кельвін (1 К)** – **одиниця термодинамічної температури** – дорівнює  $1/273,16$  частині термодинамічної температури потрійної

точки води (точка рівноваги води у твердій, рідкій та газоподібній фазах).

**1 моль (1 моль)** – одиниця кількості речовини – дорівнює кількості речовини термодинамічної системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці – 12 масою 0,012 кг. Структурні елементи повинні бути специфіковані і можуть бути атомами, молекулами, іонами, електронами й іншими частинками або специфікованими групами частинок.

**1 ампер (1 А)** – одиниця сили струму – дорівнює силі незмінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини та дуже малої площі поперечного перерізу, які містяться у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричиняє виникнення на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії, що дорівнює  $2 \cdot 10^{-7} \text{Н}$ .

**1 кандела (1 кд)** – одиниця сили світла – дорівнює силі світла, що випромінюється з поверхні площею  $1/600000 \text{ м}^2$  повного випромінювача в перпендикулярному до цієї площі напрямку при температурі випромінювача, яка дорівнює температурі твердіння платини ( $T = 2042 \text{ К}$ ) при тиску  $101525 \text{ Па}$  (або дорівнює силі світла, що випромінюється в заданому напрямку джерелом, що випромінює монохроматичне світло частотою  $540 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$ , енергетична сила світла якого в цьому напрямку становить  $1/683 \text{ Вт/ср}$ ).

### *Додаткові*

**1 радіан (1 рад)** – одиниця плоского кута – дорівнює куту між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу.

**1 стерадіан (1 ср)** – одиниця тілесного кута – дорівнює тілесному куту з вершиною в центрі сфери, який вирізує на поверхні

сфери площу, що дорівнює площі квадрата зі стороною, що дорівнює радіусу сфери.

Всі інші одиниці вимірювань фізичних величин є похідними від наведених вище основних фізичних величин.

#### 15.4. Основні фізичні сталі (округлені значення)

Фізична стала	Позначення	Значення
Прискорення вільного падіння	$g$	9,81 м/с <sup>2</sup>
Гравітаційна стала	$G$	$6,67 \cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> /(кг · с <sup>3</sup> )
Постійна Авогадро	$N_A$	$6,025 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Універсальна газова стала	$R$	8,31 Дж / (моль · К)
Стала Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К
Елементарний заряд	$e$	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Атомна одиниця маси	<i>a. o. m.</i>	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Маса електрона	$m_e$	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Маса нейтрона	$m_n$	$1,675 \cdot 10^{-27}$ кг
Маса протона	$m_p$	$1,672 \cdot 10^{-27}$ кг
Електрична стала	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	$\mu_0$	$1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Стала Планка	$h$	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с

**15.5. Множники і приставки для утворювання кратних та часткових одиниць і їх найменування**

Приставка		Множник	Приставка		Множник
Найменування	Позначення		Найменування	Позначення	
екса	Е	$10^{18}$	деці	д	$10^{-1}$
пета	П	$10^{15}$	санти	с	$10^{-2}$
тера	Т	$10^{12}$	мілі	м	$10^{-3}$
гіга	Г	$10^9$	мікро	мк	$10^{-6}$
мега	М	$10^6$	нано	н	$10^{-9}$
кіло	К	$10^3$	піко	п	$10^{-12}$
гекто	Г	$10^2$	фемто	ф	$10^{-15}$
дека	да	$10^1$	атто	а	$10^{-18}$

**15.6. Позасистемні одиниці, які допущені до застосування в навчальному процесі**

Величина	Одиниця		
	Найменування	Позначення	Співвідношення з одиницею СІ
Час	хвилина	хв	60 с
	година	год	3600 с
	доба	доб	86400 с
Плоский кут	градус	.....°	( $\pi/180$ )
	хвилина	.....'	рад=1,74·10 <sup>-2</sup> рад
	секунда	....."	( $\pi/10800$ ) рад=2,91·10 <sup>-4</sup> рад ( $\pi/648000$ ) рад=4,85·10 <sup>-6</sup> рад
Об'єм, місткість	літр	л	10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup>
Енергія	електрон-вольт	еВ	1,60·10 <sup>-19</sup> Дж
Маса	тонна	т	1000 кг
	атомна одиниця маси	а.о.м.	1,66·10 <sup>-27</sup> кг
Оптична сила	діоптрія	дптр	1 м <sup>-1</sup>
Відносна величина	процент	%	10 <sup>-2</sup>
	проміле	‰	10 <sup>-3</sup>
	мільйонна	млн <sup>-1</sup>	10 <sup>-6</sup>
	частка		
Логарифмічна величина	бел	Б	-
	децибел	дБ	-

**15.7. Густина рідин  
(умовах)**

**15.8. Густина газів ( при нормальних умовах)**

<b>Рідина</b>	<b>Густина, кг/м<sup>3</sup></b>	<b>Газ</b>	<b>Густина, кг/м<sup>3</sup></b>
Азот рідкий(77К)	$0,79 \cdot 10^3$	Водень	0,09
Бензин	$0,70 \cdot 10^3$	Гелій	0,18
Вода (при 4 °С)	$1,00 \cdot 10^3$	Кисень	1,43
Вода морська	$1,03 \cdot 10^3$	Повітря	1,29
Гліцерин	$1,26 \cdot 10^3$	Озон	2,14
Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$	Окис вуглецю	1,25
Спирт	$0,80 \cdot 10^3$	Хлор	3,21

**15.9. Густина твердих тіл**

<b>Тверде тіло</b>	<b>Густина, кг/м<sup>3</sup></b>	<b>Тверде тіло</b>	<b>Густина, кг/м<sup>3</sup></b>
Алюміній	$2,70 \cdot 10^3$	Мармур	$2,70 \cdot 10^3$
Алмаз	$3,50 \cdot 10^3$	Мідь	$8,93 \cdot 10^3$
Барій	$3,50 \cdot 10^3$	Нікель	$8,90 \cdot 10^3$
Ванадій	$6,02 \cdot 10^3$	Свинець	$11,30 \cdot 10^3$
Вісмут	$9,80 \cdot 10^3$	Срібло	$10,50 \cdot 10^3$
Залізо	$7,88 \cdot 10^3$	Сталь	$7,80 \cdot 10^3$
Золото	$19,3 \cdot 10^3$	Скло	$2,60 \cdot 10^3$
Літій	$0,53 \cdot 10^3$	Цезій	$1,90 \cdot 10^3$
Лід	$0,90 \cdot 10^3$	Цинк	$7,15 \cdot 10^3$



**15.10. Молярна маса і відносна молекулярна маса газів**

Газ	Молярна маса, кг/моль	Відносна молекулярна маса
Азот	$28 \cdot 10^{-3}$	28
Водень	$2 \cdot 10^{-3}$	2
Повітря	$29 \cdot 10^{-3}$	29
Гелій	$4 \cdot 10^{-3}$	4
Кисень	$32 \cdot 10^{-3}$	32
Вуглекислий газ	$44 \cdot 10^{-3}$	44

**15.11. Відносні атомні маси (заокруглені значення)  $A$ , та порядкові номери  $Z$  деяких елементів**

Елемент	Символ	$A$	$Z$	Елемент	Символ	$A$	$Z$
Азот	N	14	7	Літій	Li	7	3
Алюміній	Al	27	13	Магній	Mg	24	12
Аргон	Ar	40	18	Марганець	Mn	55	25
Барій	Ba	137	56	Мідь	Cu	64	29
Берилій	Be	9	4	Молібден	Mo	96	42
Ванадій	V	51	23	Натрій	Na	23	11
Водень	H	1	1	Неон	Ne	20	10
Вольфрам	W	184	74	Нікель	Ni	59	28
Вуглець	C	12	6	Олово	Sn	119	50
Гелій	He	4	2	Платина	Pt	195	78
Залізо	Fe	56	26	Ртуть	Hg	201	80
Золото	Au	197	79	Сірка	S	32	16
Калій	K	39	19	Срібло	Ag	108	47
Кальцій	Ca	40	20	Уран	U	238	92
Кисень	O	16	8	Хлор	Cl	35	17

**15.12. Маса атомів легких ізотопів**

ІЗОТОП	СИМВОЛ	Маса, а.о.м.	ІЗОТОП	СИМВОЛ	Маса, а.о.м.
Нейтрон	${}^1_0n$	1,00867	Бор	${}^{10}_5B$	10,01294
				${}^{11}_5B$	11,00930
Водень	${}^1_1H$	1,00783	Вуглець	${}^{12}_6C$	12,00000
	${}^2_1H$	2,01410		${}^{13}_6C$	13,00335
	${}^3_1H$	3,01605		${}^{14}_6C$	14,00324
Гелій	${}^3_2He$	3,01603	Азот	${}^{14}_7N$	14,00307
	${}^4_2He$	4,00260			
Літій	${}^6_3Li$	6,01513	Кисень	${}^{16}_8O$	15,99491
	${}^7_3Li$	7,01601		${}^{17}_8O$	16,99913
Берилій	${}^7_4Be$	7,01693			
	${}^9_4Be$	9,01219			

**15.13. Період піврозпаду радіоактивних ізотопів**

ІЗОТОП	СИМВОЛ	Період піврозпаду	ІЗОТОП	СИМВОЛ	Період піврозпаду
Актиній	${}^{225}_{89}Ac$	10 діб	Іод	${}^{131}_{53}I$	8 діб
Кобальт	${}^{60}_{27}Co$	5,3 роки	Стронцій	${}^{90}_{38}Sr$	27 років
Магній	${}^{27}_{12}Mg$	10 хв	Фосфор	${}^{32}_{15}P$	14,3 діб
Радій	${}^{226}_{86}Ra$	1620 років	Церій	${}^{144}_{58}Ce$	285 діб
Радон	${}^{222}_{86}Rn$	3,8 діб			

### 15.14. Маса та енергія спокою деяких частинок

Частинка	$m_0$		$E_0$	
	кг	а. о. м.	Дж	МеВ
Електрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	239
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
$\alpha$ -частинка	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733
Нейтральний $\pi$ -мезон	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14498	$2,16 \cdot 10^{-11}$	135

### 15.15. Грецький алфавіт

<i>Літера</i>	<i>Назва</i>	<i>Літера</i>	<i>Назва</i>
<i>A, <math>\alpha</math></i>	<b>альфа</b>	<i>N, <math>\nu</math></i>	<b>ню</b>
<i>B, <math>\beta</math></i>	<b>бета</b>	<i>E, <math>\xi</math></i>	<b>ксі</b>
<i>G, <math>\gamma</math></i>	<b>гамма</b>	<i>O, <math>\omicron</math></i>	<b>омікрон</b>
<i>D, <math>\delta</math></i>	<b>дельта</b>	<i>P, <math>\pi</math></i>	<b>пі</b>
<i>E, <math>\epsilon</math></i>	<b>епсилон</b>	<i>R, <math>\rho</math></i>	<b>ро</b>
<i>Z, <math>\zeta</math></i>	<b>дзета</b>	<i>S, <math>\sigma</math></i>	<b>сигма</b>
<i>H, <math>\eta</math></i>	<b>ета</b>	<i>T, <math>\tau</math></i>	<b>тау</b>
<i>Θ, <math>\theta</math></i>	<b>тета</b>	<i>Y, <math>\upsilon</math></i>	<b>іпсилон</b>
<i>I, <math>\iota</math></i>	<b>йота</b>	<i>Φ, <math>\phi</math></i>	<b>фі</b>
<i>K, <math>\kappa</math></i>	<b>капа</b>	<i>X, <math>\chi</math></i>	<b>хі</b>
<i>L, <math>\lambda</math></i>	<b>лямбда</b>	<i>Ψ, <math>\psi</math></i>	<b>псі</b>
<i>M, <math>\mu</math></i>	<b>мю</b>	<i>Ω, <math>\omega</math></i>	<b>омега</b>

### 15.16. Латинський алфавіт

<i>Літера</i>	<i>Назва</i>	<i>Літера</i>	<i>Назва</i>
<i>Aa</i>	<b>а</b>	<i>Nn</i>	<b>ен</b>
<i>Bb</i>	<b>бе</b>	<i>Oo</i>	<b>о</b>
<i>Cc</i>	<b>це</b>	<i>Pp</i>	<b>пе</b>
<i>Dd</i>	<b>де</b>	<i>Qq</i>	<b>ку</b>
<i>Ee</i>	<b>е</b>	<i>Rr</i>	<b>ер</b>
<i>Ff</i>	<b>еф</b>	<i>Ss</i>	<b>ес</b>
<i>Gg</i>	<b>ге, жє</b>	<i>Tt</i>	<b>те</b>
<i>Hh</i>	<b>га, аш</b>	<i>Uu</i>	<b>у</b>
<i>Ii</i>	<b>і</b>	<i>Vv</i>	<b>ве</b>
<i>Jj</i>	<b>йот, жи</b>	<i>Ww</i>	<b>дубль-ве</b>
<i>Kk</i>	<b>ка</b>	<i>Xx</i>	<b>ікс</b>
<i>Ll</i>	<b>ель</b>	<i>Yy</i>	<b>ігрек</b>
<i>Mm</i>	<b>ем</b>	<i>Zz</i>	<b>зет(зета)</b>

## ЛІТЕРАТУРА РЕКОМЕНДОВАНА

Посудін Ю.І., Бойко В.В., Годлевська О.О., Залоїло І.А. Біофізика. Київ., Ліра-К. 507 с., 2016.

Посудін Ю.І. Біофізика. Київ. Урожай. 222 с., 1995.

Посудін Ю.І. Методи неруйнівної оцінки якості та безпеки сільськогосподарських і харчових продуктів. Київ: Арістей. 407 с., 2005.

Посудін Ю.І. Фізика. Біла Церква: Вид-во БНАУ, 2008. -463 с.

Бойко В.В. та ін. Фізика. Підручник для студентів вищих навчальних закладів України. : Київ.: Видавництво „Ліра-К”, 2016. – 476 с.

## ВИКОРИСТАНА

Біофізика. Підручник / П. Г. Костюк, В. Л. Зима, І. С. Магура та ін. – К.: Обереги, 2001.–544 с.

Вайс А.А. 2015а. Фитомасса хвои с учетом распределения деревьев в сосновых древостоях. Сельское, лесное и водное хозяйство. 2015. № 6. URL: <http://agro.snauka.ru/2015/06/2454>

Вайс А.А. 2015б. Аллометрические закономерности соотношения фитомассы хвои и диаметров деревьев в сосновых разнополотных древостоях Приангарского района. Международный журнал экспериментального образования. № 11. С. 303-305.

Гиммельрейх Г.А. 1979. Локомоторный аппарат домашних животных как целое в динамике и статике. Киев: 75 с.

Еськов Е. К. 1975. Фонорецепторы медоносной пчелы. Биофизика. Т. 20. С. 646–651.

Еськов Е. К. 1979. Акустическая сигнализация общественных насекомых. М.: Наука.–209 с.

Квитко К.В., Матвеев В.В., Чунаева А.С. 1978. Двигательная и поведенческая формы активности хламидомонады и их изменения, вызванные мутациями. Движение и поведение одноклеточных животных. 2: 130-158.

Костюк В.В. 1982. Влияние ограниченной подвижности на развитие скелета грудной конечности крупного рогатого скота. Автореф. дис. ... канд. вет. наук. Киев.-23 с.

Люттге У., Хигинботам Н. 1984. Передвижение веществ в растениях. Пер. с англ. под ред. Ю.Я. Мазеля, П.В. Мельникова и Э.Е. Хавкина/ Под ред. и с предисл. А. Е. Петрова-Спиридонова.-М.: Колос. 408 с.

Мак-Комас А.Дж. 2001. Скелетные мышцы (строение и функции). Киев: Олимпийская литература.-404 с.

Масюк Н.П. 1973. Морфология, систематика, экология, географическое распространение рода *Dunaliella* Teod. и перспективы его практического использования. — К.: Наук. думка.

Нобел П. 1973. Физиология растительной клетки. М.: Мир. 287 с.

Плотноядное растение с Борнео заманивает летучих мышей особой акустикой. 2015. <http://scientificrussia.ru/articles/plotoiadnoe-rastenie-s-borneo>

Подорванов В.В. Термогенез у растений. 2014. Укр. ботан. журн. 71, № 1.-С.96-103.

Посудін Ю.І. 1998. Вимірювання гравітаксиса водоростей як засіб біомоніторингу водних середовищ. Наук.вісник НАУ. №3:15-21.

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

Посудін Ю.І. 2004. Біофізика рослин. Нова книга, Вінниця. 252 с.

Посудін Ю.І. 2012. Моніторинг довкілля з основами метрології. Київ: Printline. 432 с.

Посудін Ю.І., Грицай В.Й. Біофізика водного ередовища. Вид-во Нац. Університета біоресурсів і природокористування України. 2011.- 126 с.

Рейвн П., Эверт Р., Айкхорн С. Современная ботаника. В 2-х т. Пер. с англ. - М.: Мир, 1990.; Т.1 - 348с., Т.2 - 344с.

Стишковская Л.Л. 1989. О чем говорят животные. М.: Агропромиздат. 192 с.

Тобоев, В.А. 2010. Подход к разработке акустической диагностики физиологического состояния пчел. Сб. материалов Международной научно-практической конференции «Современное пчеловодство. Проблемы, опыт, новые технологии» (Ярославль, 12-13 августа 2010 г.). Ярославль, С. 149-152.

Турчанинова В.В. 2006. Изучение термогенеза у растений при низкотемпературном стрессе. Автореферат диссертации по теме "Изучение термогенеза у растений при низкотемпературном стрессе". Иркутск.

Шмидт-Ниельсен К. 1987. Размеры животных: почему они так важны? Москва: Мир. Пер. с англ. В. Ф. Куликова и И. И. Полетаевой. Под ред. Н. В. Кокшайского.-287 с.

Alexander R.M. Animal Mechanics. University of Washington Press, Seattle, 1968.-346 p.

Ar A., Rahn H. and Paganelli C..V.1979. The avian egg: mass and strength. The Condor 81: 331-337.

Augee, M., Gooden, B., Musser, A. (2006). Echidna : extraordinary egg-laying mammal (PDF) (2nd ed.). CSIRO. p. 3. ISBN 978-0-643-09204-4.

Brinkmann K. Keine Geotaxis bei *Euglena*// Z. Pflanzenphysiol., 59: P.12-16.

Colombetti, G., Lenci, F., and Diehn, B. 1982. Responses to photic, chemical and mechanical stimuli. 3: 169–195. In: The Biology of *Euglena*. Buetow (Ed.). Acad. Press, New York.

De Moraes C. M., Lewis W. J., Paré P. W., Alborn H. T., Tumlinson J. H. 1998 Herbivore-infested plants selectively attract parasitoids. *Nature*. 393: 570-573.

Dhaka A., Viswanath V., and Patapoutian A. 2006. TRP Ion Channels and Temperature Sensation. *Annu. Rev. Neurosci.* 29:135–61

Dunaliella: Physiology, Biochemistry and Biotechnology 1992. /M. Avron, A. Ben-Amotz (eds.). CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo.

Entry J.A., Rygiewicz P.T., Emmingham W.H. 1994. Strontium-90 uptake by *Pinus ponderosa* and *Pinus radiata* seedlings inoculated with ectomycorrhizal fungi/ *Environmental Pollution*. 86: 201-206.

Fensom D.S. Possible mechanisms of phloem transport: Other possible mechanisms// *Enc. Plant Physiol.*, 1975.-V.1.-P.354-366.

Gates D.M. *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag: New York-Heidelberg-Berlin, 1980.- 611 p.

Ghiradella, H. 1994 Structure of butterfly scales: patterning in an insect cuticle. *Microsc. Res. Tech.* 27, 429-438.

Granier A. 1985. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.* 42: 193–200.

Häder D.-P., Liu S.-M. Motility and Gravitactic orientation of the Flagellate, *Euglena gracilis*, Impaired by Artificial and Solar UV-B Radiation// *Curr. Microbiol.*, 1990.-V.21.-P.161-168.



Hepworth D.G., Vincent J.F.V. 1999. The growth response of the stems of genetically modified tobacco plants (*Nicotiana tabacum* “Samsun”) to flexular stimulation. *Annals of Botany*.83:39-43.

Irving L. and J. Krog. 1955. Temperature of skin in the Arctic as a regulator of heat. *J Appl Physiol*. 7:355–364.

Jahn T.L. and Bovee B.C. 1968. Locomotive and motile response in *Euglena*. In: *The Biology of Euglena*, D.E. Buettner, ed. N.Y., London. Acad.Press. 1: 45-107.

Kentwood D.W. 2007. *The ecology & behavior of amphibians*. University of Chicago Press. 264–266.

Kinoshita S. and Yoshioka S. 2005. Structural colors in nature: the role of regularity and irregularity in the structure. *ChemPhysChem*. 6 (8): 1443–1459.

Kirchner W. 1993. Acoustical communication in honeybees. *Apidologie*, Springer Verlag.24 (3):297–307.

Kleiber M. 1932. Bodysize and animal metabolism. *Hilgardia*. 6: 315-333.

Land, M. F. 1972. The physics and biology of animal reflectors. *Prog.Biophys. Mol. Biol*. 24: 75–106.

Lebert M., Häder D.-P. 1996. How *Euglena* tells up from down. *Nature*.379: 590.

Mc-Comas A.J. 1996. *Skeletal Muscle. Form and Function*. Champaign, IL : Human Kinetics.

McIntosh L. 1994. Molecular biology of the alternative oxidase. *Plant Physiol*. 105: 781-786

Melkonian, M. and Robenek, H. 1984. The eyespot apparatus of flagellated green algae: a critical review. *Progress in Phycol. Res*. 3: 195–268.

Miller, R. E., Grant, N. M., Giles, L., Ribas-Carbo, M., Berry, J., Watling, J. R. & Robinson, S. A. (2011). In the heat of the night - alternative pathway respiration drives thermogenesis in *Philodendron bipinnatifidum*. *New Phytologist*, 189 (4), 1013-1026.

Möller A., Sagasser S., Wiltschko W., Schierwater B., 2004. Retinal cryptochrome in a migratory passerine bird: a possible transducer for the avian magnetic compass. *Naturwissenschaften*. 91 (12): 585–588.

Montheith J.L., Unsworth M. 1990. *Principles of Environmental Physics*. 2nd ed. Edward Arnold: London.–291 p.

Münch E. *Die Stoffbewegungen in der Pflanze*. Jena: Gustav Fischer, 1930.

Nagaishi H., Oshima N. 1992. Ultrastructure of the motile iridophores of the neon tetra. *Zool. Sci.* 9, 65–75

Paganelli. C. V., Olszowka A. and Ar A. 1974. The avian egg: surface area, volume and density. *Condor* 76:319-325.

*Plant Ecophysiology*. M.N.V. Prasad, ed. John Wiley & Sons, Inc.: New York, 1996.-542 p.

Rahn H., Paganelli C.V., and Ar A. 1975. Relation of avian egg weight to body weight. *Auk*. 92: 750-765.

Ringo D.I. 1967. the arrangement of subunits in flagellar fibers. *J. Ultrastruct. Res.* 17:266-277.

Rüffer U., Nultsch W. 1985. High-speed cinematographic analysis of the movement of *Chlamydomonas*. *Cell Motility*. 5: 251-263.

Sagyndyk K.S., Aidossova S.S. and Prasad M. N. V. 2008. Chapter 13. Floristic Composition at Kazakhstan's Semipalatinsk Nuclear Test Site: Relevance to the Containment of Radionuclides to Safeguard Ecosystems and Human Health (pages 281–294). In: *Trace Elements as Contaminants*

and Nutrients: Consequences in Ecosystems and Human Health. John Wiley & Sons, Inc. M. N. V. Prasad, ed.

Schmidt-Nielsen K. 1997. *Animal physiology: adaptation and environment*. 5th edition. Cambridge University Press. pp. 561-607.

Seymour R.S. 2004. Dynamics and precision of thermoregulatory responses of eastern skunk cabbage *Symplocarpus foetidus*. *Plant Cell Environ.* 27: 1014–1022.

Seymour R.S., Schultze-Motel P. 1997. Heat-producing flowers. *Endeavour*. 21: 125–129.

Sheehy J.F. Radiation. In: *Instrumentation for Environmental Physiology*. Cambridge University Press: Cambridge-London-NY-New Rochelle-Melbourne-Sydney, 1985.- P.5-28.

Shoevaert, D., Krishnaswamy, S., Couturier, M., and Marano, F. 1988. Ciliary beat and cell motility of *Dunaliella*: computer analysis of high speed micro-cinematography. *Biol. Cell.* 62: 229.

Sybesma C. 1989. *Biophysics, an introduction*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers. 478 p.

Videler J.J. 1993. *Fish Swimming*. Chapman & Hall. London-Glasgow-New York-Tokyo-Melbourne-Madras. 260 p.

Volkov A. G. and Ranatunga D.R.F. 2006. Plants as Environmental Biosensors. *Plant Signal Behav.* 1(3): 105–115.

Weevers T. *Fifty Years of Plant Physiology*. Waltham, Mass: Chronica Botanica, 1949.

Wenner, A.M. 1964. Sound communication in honey bees. *Sci. Amer.* 210:116-124.

Willmer P., Stone G., Johnston I. 2000. *Environmental Physiology of Animals*. Blackwell Science Ltd. –644 p.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ**  
**І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**Бойко Володимир Васильович**  
**Залоїло Ігор Анатолійович**  
**Годлевська Оксана Олександрівна**

**ПРАКТИКУМ**  
**З БІОФІЗИКИ**

**Ч.1. БІОМЕХАНІКА**

**Навчальний посібник**  
**для вищих навчальних закладів**

**Надруковано з оригінал-макету, наданого авторами**

Підписано до друку \_\_\_\_ . \_\_\_\_ .2021

Формат 60x84 1/16.

Папір офсетний. Друк офсетний.

Гарнітура \_\_\_\_ . Ум. друк. арк. \_\_\_\_ Обл.-вид. арк. \_\_\_\_

Наклад 250 прим. Зам. № \_\_\_\_

Видавництво « \_\_\_\_\_ »