

**Ю.І. ПОСУДІН**

**БІОФІЗИКА  
І МЕТОДИ АНАЛІЗУ  
НАВКОЛИШНЬОГО  
СЕРЕДОВИЩА**



**Ю.І. ПОСУДІН**

**БІОФІЗИКА  
І МЕТОДИ АНАЛІЗУ  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Київ  
2011



***Ю.І. ПОСУДІН***

**БІОФІЗИКА  
І МЕТОДИ  
АНАЛІЗУ  
НАВКОЛИШНЬОГО  
СЕРЕДОВИЩА**

Затверджено  
Міністерством  
освіти і науки України  
як підручник для  
студентів вищих  
навчальних закладів

**Київ - 2011**



УДК 577.3  
ББК 28.07  
П 61

**Посудін Ю.І. Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища:** Підручник.–  
К.: 2011.–331 с.; іл.–бібліогр.: С.321–326.  
ISBN 978-966-2122-01-5

Основною метою підручника “Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища” є ознайомлення студентів з фізичним оточенням живих організмів; вивчення впливу фізичних факторів середовища на живі організми та їх здатності сприймати ці фактори, реагувати на них і таким чином взаємодіяти з навколишнім середовищем та адаптуватися до нього; висвітлення сучасних фізичних методів контролю навколишнього середовища та принципів дії приладів, що застосовуються для вимірювання параметрів навколишнього середовища та аналізу його стану; контроль знань студентів за допомогою завдань та задач практичного характеру, запитань, тестів.

Структура підручника передбачає знайомство з необхідним теоретичним матеріалом. Після кожного розділу подано приклади розв’язку практичних проблем та контрольні завдання для самостійної роботи. Для поточного контролю знань студентів пропонуються практичні завдання та тести: *альтернативні* (які вимагають відповіді “так” чи “ні”); *вибіркові* (коли студенту необхідно знайти одну вірну відповідь серед декількох запропонованих); *акордно-вибіркові* (коли треба знайти декілька вірних відповідей серед декількох запропонованих); *парно-вибіркові* (коли необхідно утворити з двох запропонованих рядів відповідей вірні пари); *репродуктивні* (відповіді на які можна знайти в відповідному розділі підручника); *конструктивні* (прямих відповідей на які нема в підручнику; студент повинен створити відповідь самостійно).

Підручник адресується студентам екологічних, сільськогосподарських, лісгосподарських, ветеринарних та інших спеціальностей, які мають справу з вивченням живих організмів та оточуючого їх середовища; він може бути також використаний студентами біологічних, медичних та педагогічних спеціальностей.

#### **Рецензенти:**

*Л.П. Бучацький,*

доктор біологічних наук, професор, провідний науковий співробітник біологічного факультету Київського національного університету ім. Тараса Шевченка;

*В.М. Боголюбов,*

кандидат технічних наук, доцент Національного університету біоресурсів і природокористування України;

*А.П. Відьмаченко,*

доктор фізико-математичних наук, професор, зав. відділом фізики тіл сонячної системи Головної астрономічної обсерваторії НАН України

Затверджено Міністерством освіти і науки України як підручник для студентів вищих навчальних закладів (лист № 1/11-7476 від 06.08.2010 р.)

**УДК 577.3  
ББК 28.07**

ISBN 978-966-2122-01-5

© Посудін Ю.І., 2011

*“Biophysics includes everything  
that is interesting  
and excludes everything that is not”  
(K.S. Cole)*

## ПЕРЕДМОВА

*Біофізика* – це наука, яка вивчає фізичні механізми та фізико-хімічні процеси, що лежать в основі життєдіяльності біологічних об’єктів; вона застосовує фізичні принципи, фізичні методи та фізичні прилади для вивчення живих систем.

*Навколишнє природне середовище* – це сукупність природних і змінених діяльністю людини абіотичних, хімічних та біотичних факторів, що оточують та діють на живі організми або екосистеми, а саме на ріст, розвиток та виживання живих організмів.

Населення земної кулі, яке досягне у 2050 році 9 млрд, а також численні представники фауни і флори взаємодіють з навколишнім середовищем шляхом обміну енергією та речовиною.

Застосування сучасних технологій з метою забезпечення людства продуктами харчування, безумовно, впливає на навколишнє середовище. Асортимент хімічних препаратів, що використовують для інтенсифікації цього виробництва, з кожним роком збільшується. Потрапляючи в атмосферу, ґрунт, воду, ці забруднювачі мігрують до рослин та організму тварин і таким чином можуть впливати на здоров’я людини.

Ще одне джерело шкідливих речовин – різноманітні машини та механізми, які спричиняють забруднення середовища відходами нафтопродуктів, важкими металами, поверхнево-активними речовинами.

Серйозним джерелом забруднення навколишнього середовища у сільському господарстві є відходи тваринництва й рослинництва, включаючи стоки із залишками пестицидів і добрив, що потрапляють у ґрунт, ґрунтові води, водойми й завдають непоправної шкоди фауні та флорі.

Хімічні елементи й сполуки, які потрапляють в атмосферу, можуть поглинати сонячне проміння, викликаючи зміни температури атмосфери (парниковий ефект), або брати участь у хімічних реакціях, що спричиняють опади у вигляді кислотних дощів чи виникнення озонових дірок.

Не можна не враховувати згубної дії на навколишнє середовище експлуатації військової техніки, освоєння космосу, техногенних аварій та екологічних катастроф.

Отже, вивчення взаємодії живих організмів з навколишнім середовищем в умовах демографічного зростання, збільшення світового використання добрив, дефіциту орної землі, збільшення концентрації двоокису вуглецю в атмосфері, вичерпання паливних запасів та порушення екологічної рівноваги, є надто невідкладним.

У підручнику *“Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища”* описано фізичне оточення живих організмів, зокрема такі зовнішні фізичні фактори як тиск, вітер, гравітація, вібрації, природні коливання та хвилі, акустичні фактори та шум, вологість і температура, природні випромінювання, опади; здатність живих організмів реагувати на зміни зовнішніх факторів завдяки рецепторним системам, тобто здійснювати механо-, граві-, акусто-, термо- та фоторецепцію та обирати оптимальні умови існування; явища та процеси, які характеризують взаємодію живих організмів з навколишнім середовищем з позицій явищ перенесення – необоротних процесів, важливих з точки зору життєдіяльності живого організму, внаслідок яких між ним та навколишнім середовищем відбувається зміна ентропії та просторове перенесення фізичних величин – маси (вода та розчинені речовини, водна пара та гази, частинки), імпульсу (особлива увага приділяється турбулентним явищам у граничному шарі атмосфери та методу вихрової коваріації)б електрики та теплоти; енергетичний баланс фізичних та біологічних систем з навколишнім середовищем; принципи дії приладів для вимірювання параметрів навколишнього середовища та можливі застосування сучасних методів аналізу його стану (особливо автоматизованих та дистанційних систем).

Основною метою підручника *“Біофізика та методи аналізу навколишнього середовища”* є вивчення:

- фізичного оточення живих організмів;
- впливу фізичних факторів середовища на живі організми та їх здатності сприймати ці фактори, реагувати на них і таким чином взаємодіяти з навколишнім середовищем та адаптуватися до нього;
- сучасних фізичних методів вимірювання параметрів навколишнього середовища та аналізу його стану, зокрема систем автоматизованого та дистанційного контролю навколишнього середовища;
- процесів, які характеризують взаємодію живих організмів з навколишнім середовищем з позицій явищ перенесення;
- основних принципів енергетичного балансу фізичних та біологічних систем з довкіллям.

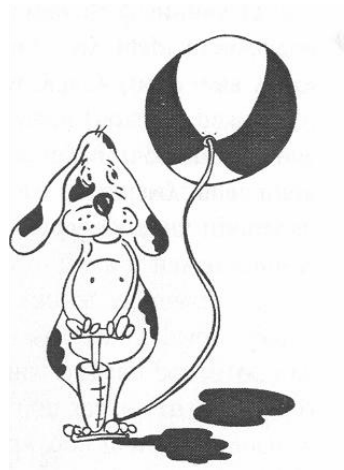
Необхідність видання підручника обумовлена недостатнім методичним забезпеченням дисциплін *“Біофізика та фізичні методи аналізу”*, *“Біофізика навколишнього середовища”*, *“Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища”*, які передбачені в програмах підготовки фахівців за напрямками 040106 *“Екологія”* та 051400 *“Біотехнологія”*.

Вивчення дисципліни *“Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища”* неможливе без практичної та прикладної підготовки студентів. Саме з цією метою підручник містить приклади розв’язку практичних проблем та контрольні завдання для самостійної роботи. Для поточного контролю знань студентів пропонуються тести: *альтернативні* (які вимагають відповіді *“так”* чи *“ні”*); *вибіркові* (коли студенту необхідно знайти одну вірну відповідь серед декількох запропонованих); *акордно-вибіркові* (коли треба знайти декілька вірних відповідей серед декількох запропонованих); *парно-вибіркові* (коли необхідно утворити з двох запропонованих рядів запитань та відповідей вірні пари); *репродуктивні* (відповіді на які можна знайти в відповідному розділі підручника); *конструктивні* (прямих відповідей на які немає у підручнику, але студент повинен дати відповідь самостійно). Інформативний матеріал представлений у додатку.

Підручник може бути також використаний студентами сільськогосподарських, лісгосподарських, ветеринарних, біологічних, медичних та педагогічних спеціальностей, які мають справу з вивченням живих організмів та оточуючого їх середовища.

# І. ФІЗИЧНЕ ОТОЧЕННЯ ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ

## 1. ТИСК



### 1.1. Атмосферний тиск

*Тиск  $p$*  – це фізична величина, що характеризує інтенсивність нормальних (перпендикулярних до поверхні) сил, з якими одне тіло діє на поверхню другого. Середня величина тиску на будь-яку площину дорівнює відношенню середнього значення сили, що діє перпендикулярно цій площині, до її площі:

$$p = \sum_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS}. \quad (1.1)$$

Якщо сили розподілені вздовж поверхні рівномірно, то тиск  $p$  на будь-яку частину поверхні дорівнює:

$$p = \frac{F}{S}, \quad (1.2)$$

де  $F$  – сума прикладених перпендикулярно до поверхні сил;  $S$  – площа цієї частини.

Одиниця вимірювання тиску в системі СІ – *паскаль*;  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ .

Позасистемні одиниці та їх зв'язок з паскалем:

$$1 \text{ атм} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1013,25 \text{ мбар} = 760 \text{ мм рт. ст.};$$

$$1 \text{ мбар} = 100 \text{ Па} = 1 \text{ гПа} = 0,75006 \text{ мм рт. ст.};$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 1 \text{ тор} = 1,3332 \text{ мбар} = 133,32 \text{ Па};$$

$$1 \text{ Па} = 9,87 \cdot 10^{-6} \text{ атм} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$$

*Атмосферний тиск* – це тиск стовпа атмосферного повітря на одиницю площі земної. Викликається цей тиск вагою розташованого вище стовпа атмосфери, яка являє собою суміш газів, твердих та рідких частинок. Грубо, атмосферу можна представити як сухе повітря разом з водяною паром.

Середній атмосферний тиск на рівні моря становить  $1,01325 \cdot 10^5$  Па. В цілому, атмосферний тиск залежить від висоти, простору і часу. Горизонтальний розподіл атмосферного тиску визначається рухом поверхневих мас повітря. Густина і температура атмосферного повітря також залежать від висоти (табл.1.1).

### 1.1. Залежність густини і температури атмосферного повітря від висоти

Висота $h$ , км	Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Температура $T$ , °C
0	1,225	15,00
2	1,007	2,00
4	0,909	-4,49
6	0,660	-23,96
8	0,526	-36,94
10	0,414	-49,90
12	0,312	-56,50
14	0,228	-56,50
16	0,166	-56,50
18	0,122	-56,50
20	0,089	-56,50
22	0,065	-54,58
24	0,047	-52,59
26	0,034	-50,61
28	0,025	-48,62
30	0,018	-46,64

**Примітка:** Зверніть увагу на те, що температура атмосфери змінюється із збільшенням висоти несподіваним чином: до 12 °C температура зменшується, в межах 12–20 °C є сталою, від 20 °C до 30 °C – збільшується. Пояснення такої поведінки температури атмосфери можна знайти пізніше, коли буде розглядатися тема “Температура атмосфери”.

Уявлення про те, що молекули повітря рівномірно розподілені по об'єму – помилково; ці молекули знаходяться у полі тяжіння Землі. Крім того, на них впливає тепловий рух. Сумісна дія поля тяжіння та теплового руху призводять до такого стану, при якому концентрація та тиск газу зменшуються із зростанням висоти над землею. Зменшення атмосферного тиску з висотою  $h$  визначається за *барометричною формулою*:

$$p(h) = p(0)\exp\left(-\frac{M_A g h}{RT}\right) = p(0)\exp\left(-\frac{m g h}{kT}\right), \quad (1.3)$$

де  $M_A$  – молярна маса газу (для повітря  $M_A = 0,029$  кг/моль);  $m$  – маса молекули газу;  $p(0)$  – тиск на рівні моря.

#### Приклад

Визначити атмосферний тиск на висоті 10 км.

#### Розв'язання

Використовуючи барометричну формулу (1.3), отримуємо:

$$\begin{aligned} p_A(h) &= p_A(0) e^{[-(g M_A / RT_A)]h} = \\ &= 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot e^{-\frac{0,029 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 10^4 \text{ м}}{8,3145 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 223,25 \text{ К}}} = \\ &= 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot e^{-1,531} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,2163 = 0,219 \cdot 10^5 \text{ Па}. \end{aligned}$$

### 1.2. Тиск води

Абсолютний тиск  $p$  на глибині  $d$  від поверхні рідини перевищує тиск  $p_A$  на величину  $\rho g h$ , яка відповідає тиску, що утворює вага стовпчика рідини  $d$  і площею  $S$ :

$$p = p_A + \rho g d, \quad (1.4)$$

де  $p_A$  – атмосферний тиск;  $\rho$  – густина рідини;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $d$  – глибина.

#### Приклад

Визначити тиск на глибині 1000 м океану, якщо густина води  $1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а атмосферний тиск  $1,01325 \cdot 10^5$  Па.

### Розв'язання

Використовуємо рівняння ( 1.4 ):

$$p = p_A + \rho g d = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} + (1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3) (9,8 \text{ м/с}^2) (10^3 \text{ м}) = 9,9 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

### 1.3. Вплив тиску на живі організми

*Вплив зменшення тиску на здоров'я людини.* Люди, які досягають значних висот без спеціального обладнання (альпіністи, пілоти повітряних куль та мешканці високогірних районів) приречені до так званої *гірської хвороби*. Зменшення атмосферного тиску призводить до певних фізіологічних наслідків. Розглянемо вплив зменшення атмосферного тиску з висотою на людину.

*1500 м.* У першу чергу страждає від зменшення тиску сітківка ока; на таких висотах мозок має порушення у здатності керувати ночним зором.

*2500 м.* Підйом на кожні 100 м відносно цієї висоти супроводжується зменшенням фізичної активності людини приблизно на 1 %.

*3000 м.* Перебування на цих висотах викликає зменшення рівня насиченості крові киснем до 90 % та погіршення ночного зору на 12–15 %. Виникає ейфорія, фізична гіпоксія, перші ознаки гірської хвороби проявляються у вигляді слабких змін пульсу та швидкості дихання, починається *анорексія* – повна відсутність апетиту та бажання їсти при об'єктивній потребі в їжі; зменшення ваги тіла приблизно на 1 кг за тиждень. Всі ці симптоми значно підсилюються в діапазоні висот 3000–4000 м.

*4200 м.* Сходження до цих висот супроводжується зменшенням насичення крові киснем до 85 %, що викликає серйозне погіршення зору, пригнічення розумової здатності та пам'яті, м'язової активності. Первинними симптомами гірської хвороби є задишка, *тахікардія* (збільшення числа серцевих скорочень до 100 ударів за хвилину); нездужання, пов'язане з відчуттям дискомфорту, нудота та блювання; безсоння, втомиленість та апатія.

*4800 м.* Насичення крові киснем зменшується до 79 %. Спостерігаються серйозні зміни емоціонального стану, такі як ейфорія, агресивність, роздратування.

*5400 м.* Насичення крові киснем продовжує зменшуватися до 71 %, що викликає проблеми у діяльності мозку.

*6000 м.* Втрата свідомості через 5–15 хв перебування на цих висотах та смерть через більш тривале перебування.



7500 м. Критичне зменшення рівня насиченості крові киснем призводить до смерті.

Таким чином, фізіологічний вплив зменшення атмосферного тиску та недостатнього постачання організму киснем характеризується *гіпоксією*, яка характеризується збільшенням пульсу та частоти дихання на висотах 3150–4750 м, погіршенням розумової здатності та м'язової активності, зміною емоціонального стану в діапазоні висот 4750–6100 м та швидкою втратою нейром'язового контролю, знепритомлюванням, припиненням дихання та можливою смертю на висотах 6100–7260 м.

Механізм гірської хвороби можна пояснити місцевим розширенням кровоносних судин мозку як відгук на гіпоксію, що призводить до збільшення кров'яних потоків та відповідно тиску у кровоносних капілярах або загальним звуженням судин легеневої циркуляції, яка при постійній серцевій активності також викликає збільшення капілярного тиску.

*Вплив зменшення тиску на тварин.* Певні тварини здатні пристосовуватися до зменшення атмосферного тиску та адаптуватися до перебування у гірських регіонах.

Ропухи, мешканці озера Тітікака, що розташоване на висоті 3812 м, використовують поширені вигини шкіри, які забезпечують необхідний газообмін; високий рівень гематокриту та концентрації еритроцитів призводить до інтенсифікації транспортування кисню.

*Черепашки* характеризуються достатньою толерантністю до гіпоксії завдяки їх здатності до анаеробного метаболізму та шунтування кровоносних судин при неможливості їх вентиляції.

*Мули*, що використовуються як транспортні засоби під час альпіністських експедицій в діапазоні висот 5250–6000 м, здатні розраховувати свої фізичні можливості і відмовляються переносити вантаж, якщо ці можливості знаходяться за межами безпечних границь.

Інші тварини також можуть знаходитися у високогірних районах: *вікунья* (5000–6000 м), *домашні вівці* (до 5250 м) та *коні* (до 4600 м). За звичай, тварини, що живуть у гірських районах, мають підвищені рівні кількості еритроцитів та гемоглобіну.

Однак рекорди висоти належать птахам, що мігрують над Тибетським плато та Гімалайськими горами, зокрема: *кондорам* (7600 м), *гірським гусям* (8534 м), *клушиці* (9000 м) та *білоголовому сипу* (11278 м). Перетинання високогірних регіонів призводить до структурних змін гемоглобіну, що забезпечує здатність птахів літати на великих висотах.

*Вплив зменшення тиску на рослини.* Зміни клімату, що спостерігаються із збільшенням висоти, індукують морфологічні та фізіологічні зміни в рослинах та рослинних екосистемах. Дуже часто рослини у горах мають компактні або карликові форми, вузькі та густоопушені листки. В альпійській зоні (3230–3660 м) можна знайти суттєві зміни якісних та кількісних характеристик фауни, які викликаються як зменшенням тиском, так й вітром, вологістю, опадами, температурою, сонячним випромінюванням та газообміном.

*Фізіологічний вплив збільшення тиску на живий організм.* Якщо людина пірнає у глибину, тиск оточуючої води збільшується на 1 атм кожні 10 м (тобто,  $\Delta p = 1$  атм, якщо  $\Delta d = 10$  м). Тиск з боку оточуючої води передається внутрішнім частинам тіла, через що встановлюється стан рівноваги – зовнішній тиск зрівноважується внутрішнім. Якщо пірнальник опустився на глибину 30 м, тиск в його легенях становитиме відповідно до рівняння (1.4) 4 атм. Під час підйому на поверхню, де тиск дорівнює 1 атм, тиск у легенях дорівнює 3 атм. Цей різницевий тиск викликає розрив легень або *пневмоторакс*.

Коли людина вдихає повітря, кров наповнюється розчиненим азотом, якого у повітрі 79 %. Згідно з *законом Генрі* кількість розчиненого у рідині газу залежить від парціального тиску цього газу.

Кров пірнальника здатна на глибині містити велику кількість розчиненого азоту. Але, якщо пірнальник швидко підіймається, надлишок азоту виходить з розчину у вигляді газових бульбашек, які здатні блокувати постачання крові певним тканинам та важливим органам. Комплекс болісних симптомів, що відчуває внаслідок швидкого підймання пірнальник, називається *кесоною хворобою* (від французького слова “*caisse*” – груди). Ця хвороба призводить до втомленості, болі у суглобах, висипу, свербіжу, запаморочення, нудоти, дезорієнтації, невралгічних болісних відчущань, паралічу і навіть смерті.

У кровоносній судині, в якій з певних причин утворилась бульбашка газу, за рахунок потоку форма бульбашки спотворюється (ліва й права півсфери мають різні за величиною радіуси кривизни). Отже, згідно з рівнянням Лапласа, додаткові тиски, зумовлені поверхневим натягом рідини на лівій та правій межах поділу, будуть відрізнятися. Ця різниця тисків може призвести до розриву або закупорки судини. Така ситуація називається *газовою емболією*.

Крім того, на великих глибинах пірнальник приречений до отруєння киснем, яким насичуються тканини, або двоокисом вуглецю, який за-

ходить у повітрі, що видихається, та накопичується у шоломі пірнальника.

*Адаптація водних тварин до глибини.* Глибоководне середовище характеризується високим гідростатичним тиском, який збільшується приблизно на 1 МПа ( $10^6$  Па) через кожні 100 м. Втім, у глибинах океану мешкають водні тварини, які здатні витримувати значні тиски до десятків або сотень атмосфер. Діапазон глибин, в яких існують водні тварини, становить: 200–300 м (максимальна глибина близько 900 м) – котики, *Callorhinus*; 457 м – тюлень Ведделя, *Leptonychotes weddelli*; 500–2000 м – глибоководний вугор, *Synaphobranchus kaupi*; більше, ніж 500 м – імператорський пінгвін, *Aptenodytes fosteri*; близько 1500 м – північний морський слон, *Mirounga angustirostris*; 2000–3000 м – кашалот, *Physeter catodon*; 7250 м – морський їжак, *Echinoidea*; 7360 м – морська зірка, *Asteroidea*; 8370 м – ошибнева риба, *Ophidiidae*; 10190 м – морський огірок (голотурія), *Holothurioidae*.

Тривалість перебування під водою цих тварин варіює від 12 хв для імператорського пінгвіна до 30 хв для тюленів та більше однієї години для кашалота.

Жак Пікард, який вивчав морські глибини, спостерігав через ілюмінатор сконструйованого ним батискафа креветок та риб на глибині 10912 м.

Деяких безхребетних та бактерій було знайдено на дні Мар'янської западини (глибина 11043 м, тиск близько 110 МПа).

Такі здатності морських тварин пояснюються так званим *пірнальним рефлексом ссавців*, в основі якого лежить стратегія економії кисню та який включає:

*Брадикардію* – зменшення частоти серцевих скорочень. Морські тварини здатні зменшувати частоту серцевих скорочень; так, ондатра зменшує пульс від 320 на водній поверхні до 34 ударів за хвилину на глибині, а тюлень від 107 до 68 ударів за хвилину відповідно.

*Звуження периферійних судин*, що викликає зменшення потоків крові, які досягають кінцівок, з тим, щоб забезпечити постачання кров'ю та киснем життєво важливих органів, таких як серце та мозок.

*Зсув крові* – перенесення плазми крові до грудної порожнини з тим, щоб запобігти злипанню легень під час пірнання. Слід відзначити здатність морських тварин видихати повітря з високою ефективністю.

Так, кити можуть видихати за один прийом 88 % повітря, що містилося в легенях, тоді як людина може видохнути за раз лише 12 % повітря.

Здатність тварин зменшувати об'єм легень дає можливість запобігти надходженню атмосферних газів у кровоносні судини. Більшість кисню морських тварин знаходиться у м'язах та крові, тоді як лише близько 5 % кисню – в легенях.

Один з основних адаптаційних механізмів морських тварин пов'язаний з їх здатністю розподіляти та накопичувати кисень. Під час вдихання кисень постачається з атмосферного повітря та переноситься у легені, після чого – у кров, яка містить гемоглобін – молекулу, що відповідає за транспортування кисню всьому організму. .

Тварини-пірнальники використовують кисень з крові, яка має високе значення об'єму та гематокриту (кількості кров'яних клітин). Внаслідок цього тканини скелетних м'язів тварини містять близько 47 % загального кисню організму. Саме завдяки великим значенням гемоглобіну можна пояснити темно-червоний колір м'язів морських тварин. Накопичення кисню здійснюється міоглобіном, основна функція якого полягає у зв'язуванні кисню. Міоглобін характеризується більшою спорідненістю до кисню, ніж гемоглобін. Коли кров проходить через м'язи, кисень переноситься з крові до м'язів. Оскільки кількість міоглобіну у морських тварин у 3–10 разів вища, ніж у земних тварин, то саме морські тварини здатні накопичувати кисень з високою ефективністю.

Людина здатна накопичувати кисень близько 20 мл на 1 кг маси тіла, тоді як пігвіни – 55, а тюлені Ведделя – 87 мл на 1 кг маси тіла.

#### **1.4. Розчинність газів у рідинах**

Закон Рауля зв'язує тиск насиченої пари над розчином з його складом; він формулюється так: *парціальний тиск насиченої пари компонента розчину прямо пропорційний його мольній частці у розчині, причому коефіцієнт пропорційності дорівнює тиску насиченої пари над чистим компонентом*

$$p_a = X_A p_A, \quad (1.5)$$

де  $p_a$  – парціальний тиск компонента  $A$  при рівновазі з розчином;  $X_A$  – молярна частка компонента  $A$  у розчині;  $p_A$  – тиск насиченої пари чистого компонента  $A$  при даній температурі.

Багато ситуацій виникає у навколишньому середовищі, пов'язаних з переходом газів у рідину та навпаки. Як приклад можна навести аерацію річок та озер шляхом перенесення ксню у воду; розчинений кисень вельми суттєвий для підтримки життєдіяльності риб та інших форм життя у гідросфері.

Рівень розчинності газу у рідині залежить від типу газу, природи рідини, тиску та температури. Основним розчинником в умовах довкілля є вода. До злегка розчинених у воді газів можна віднести  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$  та  $He$ . Такі газт як  $NH_3$  та  $H_2S$ , наприклад, добре розчиня.ться у воді. В природі багато газів утворюють досить розведені розчини.

Розглянемо розчин, який утворюється газом В в ідеальному розчиннику А (наприклад, кисень у воді). Згідно закону Генрі розчинність газу прямо пропорціна тиску:

$$X_B = \frac{p_B}{K}, \quad (1.6)$$

де  $X_B$  – розчинність газу;  $p_B$  – тиск;  $K$  – стала Генрі, яка залежить від типу газу, розчинника та температури ( рис. ).

Стала Генрі,

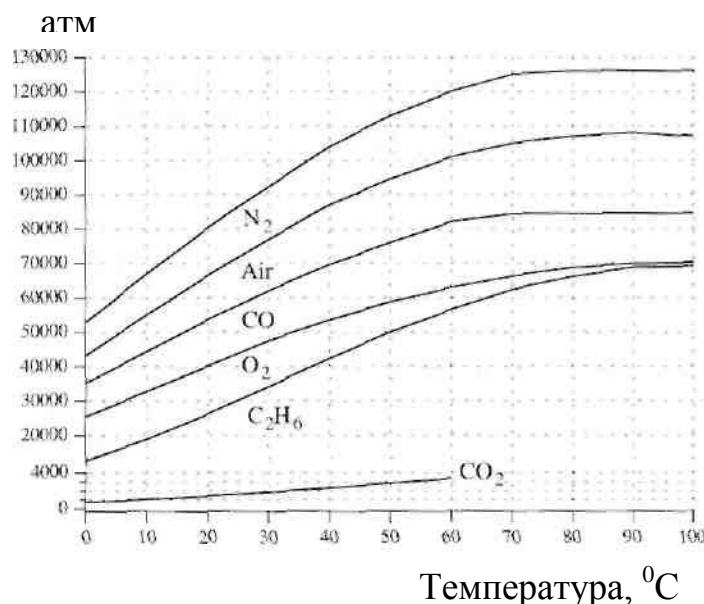


Рис. 1.1. Залежність сталої Генрі від типу газів та температури [Datta, 2002]

## 1.2. Значення сталої Генрі для деяких газів, розчинених у воді [Henry and Heinke, 1996]

(°C)	O <sub>2</sub>		H <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> S		CH <sub>4</sub>		CO <sub>2</sub>	
	МПа	10 <sup>4</sup> атм	МПа	10 <sup>4</sup> атм	МПа	10 <sup>4</sup> атм	МПа	10 <sup>4</sup> атм	МПа	10 <sup>4</sup> атм	МПа	10 <sup>4</sup> атм
0	2580	2,55	5870	5,79	5360	5,29	27,2	0.0268	3010	2,24	73,8	0,0728
10	3310	3,27	6450	6,36	6770	6,68	37,2	0.0367	3810	2,97	105	0,104
20	4060	4,01	6920	6,83	8150	8,04	48,9	0.0483	4550	3,76	144	0,142
30	4810	4,75	7390	7,29	9365	9,24	61,7	0.0609	5270	4,49	189	0,186
40	5420	5,35	7610	7,51	10540	10,4	75,5	0.0745	3010	5,20	236	0,233

### Приклад

Визначити кількість розчиненого кисню  $n_{O_2}$  (мг/л) у річці при температурі 0 °С у насиченому стані. Атмосферний тиск дорівнює 100 кПа.

### Розв'язання

Згідно табл.  $K(0\text{ °C}) = 2580\text{ МПа}$ .

Враховуючи, що повітря містить 20,9 % кисню та використовуючи вираз ( 1.5 ) для закону Рауля, одержимо:

$$p(O_2) = 0,209 \cdot 100\text{ кПа} = 20900\text{ Па}.$$

Звідси, за законом Генрі ( вираз ( 1.6) ):

$$X(O_2) = \frac{20900}{2580 \cdot 10^6} = 8,1 \cdot 10^{-6}.$$

Маса кисню визначиться так:

$$m(O_2) = 8,1 \cdot 10^{-6} \cdot 32\text{ г/моль} = 2,59 \cdot 10^{-4}\text{ г}.$$

Масова частка кисню дорівнює:

$$\nu = \frac{2,59 \cdot 10^{-4}}{2,59 \cdot 10^{-4} + 18,0} = 14,4 \cdot 10^{-6}.$$

Звідси концентрація розчиненого кисню у річці при температурі 0 °С становить

$$n_{O_2} = 14,4\text{ мг/л}.$$

### Контрольне завдання

Визначити кількість розчиненого кисню  $n_{O_2}$  (мг/л) у річці при температурі 20 °С у насиченому стані. Атмосферний тиск дорівнює 100 кПа. Як змінюється розчинність кисню із збільшенням температури?

Відповідь: 9,2 мг/л.

### 1.5. Вимірювання тиску

Прилад для вимірювання атмосферного тиску називається *барометром*. Є два основних типи барометрів: барометр-анероїд та трубка Бурдона.

*Барометр-анероїд* містить анероїдну капсулу, що складається з двох тонких (0,2 мм товщиною) металевих гофрованих мембран (рис. 1.2).

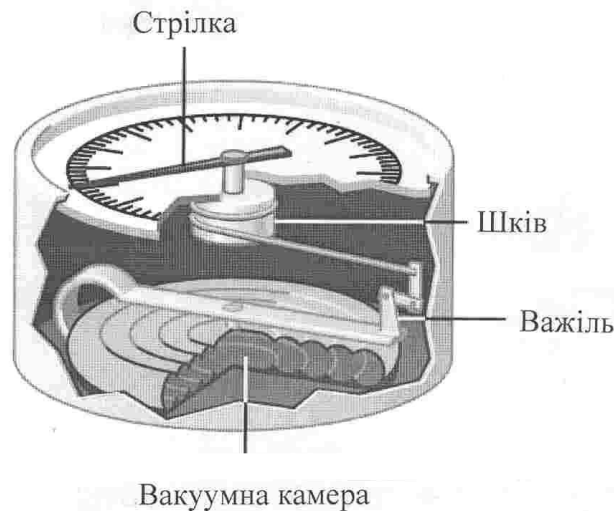


Рис. 1.2. Барометр-анероїд

В середині капсули повітря відкачано (тиск становить  $10^{-2}$  гПа) або капсулу заповнюють інертним газом при тиску 65 гПа. Кількість капсул у сучасних приладах може досягати 14. Мембрани знаходяться у напруженому стані завдяки гофрованій поверхні та дії пружини.

Перевагою барометра-анероїда є його компактність, механічна міцність, здатність до транспортування. Ці прилади можуть бути застосовані в системах автоматичного вимірювання тиску, оскільки механічні

переміщення анероїдних капсул легко перетворити в електричний сигнал. Недоліком барометра-анероїда є невисока точність вимірювань.

*Трубка Бурдона* являє собою плоску скривлену трубку, яка випрямляється завдяки зміні атмосферного тиску.

Просторове пересування трубки перетворюється у рух зв'язаною з нею індикаторною стрілкою (рис. 1.3).

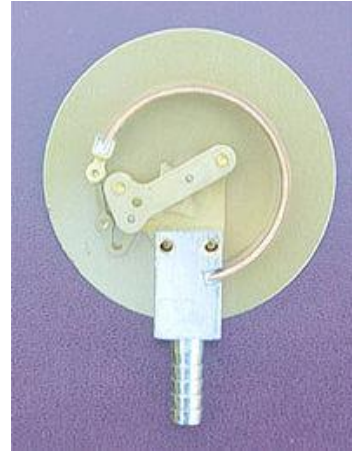


Рис. 1.3. Трубка Бурдона



Рис. 1.4. Барограф



*Цифровий барометричний сенсор тиску.* Цей прилад, виготовлення якого стало можливим завдяки сучасним технологіям, складається з двох кремнієвих сплавів, з'єднаних між собою прошарком діоксиду кремнію (рис. 1.5). Кремнієві сплави виконують функції обкладинок конденсатора, тоді як товщина діоксиду кремнію та відповідно ємність конденсатора залежать від прикладеного атмосферного тиску.

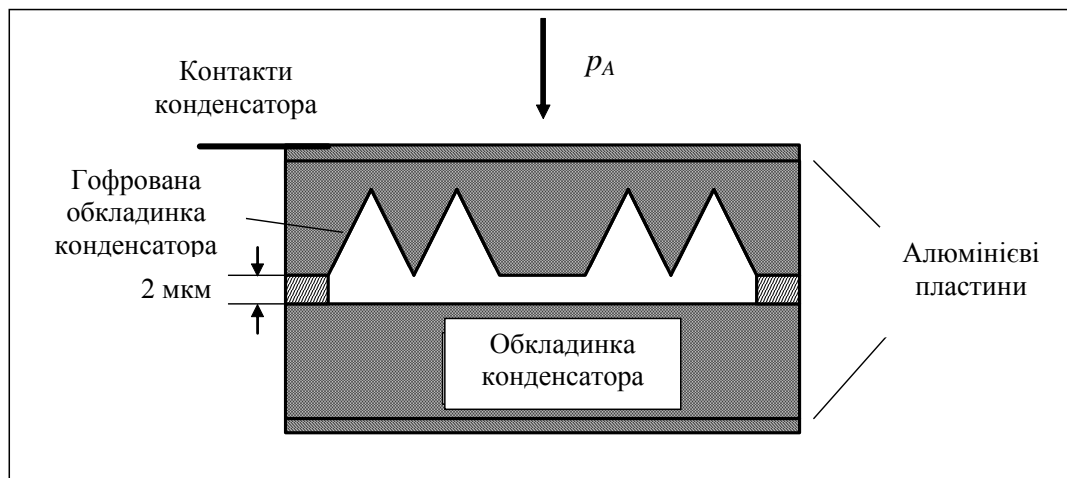


Рис. 1.5. Цифровий барометричний сенсор тиску

*П'єзоелектричний сенсор тиску.* Кристалічні речовини, в яких при стисненні або розтягненні в певних напрямках виникає електрична поляризація навіть за відсутності електричного поля, називаються *п'єзоелектриками*. Явище виникнення зарядів на поверхні п'єзоелектрика під впливом механічних деформацій називається *прямим п'єзоефектом*, а поява механічних деформацій під впливом електричного поля – *оберненим п'єзоефектом*. До п'єзоелектриків належать кварц, дигідрофосфат амонію (АДР), сульфат літію, сегнетова сіль, титанат барію тощо. П'єзоелектричні перетворювачі знайшли своє застосування як датчики механічних коливань та вібрацій.

Схему п'єзоелектричного сенсора тиску наведено на рис. 1.6.

Перевагою п'єзоелектричних сенсорів є їх компактність, лінійна залежність електричного сигналу від механічного навантаження, здат-

ність мати високу стабільність у широкому температурному діапазоні (до  $1000^{\circ}\text{C}$ ).

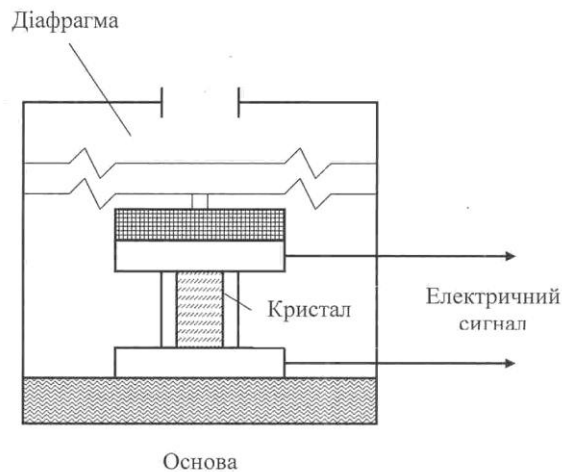


Рис. 1.6. Схема п'єзоелектричного сенсора тиску

### Аудиторні завдання

1. Визначити атмосферний тиск на висоті:
  1. вершини Евересту ( 8848,82 м );
  2. траси реактивного лайнера ( 10650 м );
  3. вершини Ельбрусу ( 5633 м );
  4. нижньої границі стратосфери ( 20 км ).
2. На якій висоті атмосферний тиск зменшується до 0,5 атм? Температура повітря 260 К.
3. Визначити тиск на глибині:
  1. Мар'янської западини ( 10912 м );
  2. яку досягає північний морський слон ( 1500 м );
  3. занурювання військового підводного човна ( 900 м );
  4. мешкання глибоководних риб ( 8370 м ).

### **Альтернативний тест**

Чи вірно ствердження, що атмосферу можна уявити як сухе повітря разом з водяною парою? Так Ні

### **Акордно-вибірковий тест**

Знайти вірну відповідь на запитання

*“Який прилад для вимірювання атмосферного тиску може мати високу стабільність у широкому (до 1000 °C) діапазоні?”*

*1. Барограф; 2. Трубка Бурдона; 3. П'єзоелектричний сенсор тиску; 4. Цифровий барометричний сенсор тиску; 5. Барометр-анероїд.*

### **Парно-вибірковий тест**

Знайти відповідні пари “вплив-назва”

*Фізіологічний вплив збільшення тиску на живий організм характеризується:*

*а. Розривом легень*

*1. Газова емболія*

*б. Блокуванням постачання крові до важливих органів*

*2. Пневмоторакс*

*в. Утворенням бульбашок газу у кровоносній судині*

*3. Кесонова хвороба*

### **Репродуктивні тести**

1. Сформулювати закон Рауля
2. Сформулювати закон Генрі
3. Пояснити механізми адаптації водних тварин до глибини

### **Конструктивні тести**

1. Чому атмосферний тиск змінюється з висотою? Які параметри атмосферного повітря також залежать від висоти?

2. Чому молекули атмосфери не збираються на поверхні Землі під впливом сили тяжіння?
3. До яких висот можна використовувати барометричну формулу і чому?
4. Побудувати графік залежності тиску від висоти  $p(z)$  для інтервалу висот  $z = 0-30$  км.
5. Назвати симптоми кесонової хвороби.
6. Що таке “газова емболія”?
7. Чим пояснити виділення пухирців двоокису вуглецю у газованому напою або шампанському після відкриття пляшки?

## 2. ВІТЕР



### 2.1. Причини виникнення вітру

*Виникнення вітру.* Рух повітря відносно земної поверхні називається *вітром*. На утворення повітряних потоків впливають такі чинники:

1. *Градiєнти тиску*, які забезпечують рух повітря від області високого тиску до області низького тиску.

2. *Гравітаційна сила*, яка прискорює рух повітря до величини  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ . Дія вертикального градiєнта тиску зрівноважується гравітаційною силою.

3. *Сила тертя*, яка визначається як:

$$F = -\mu v, \quad (2.1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт внутрішнього тертя, який залежить від характеру підстилаючої поверхні;  $v$  – швидкість вітру. Сила тертя пропорційна швидкості вітру і має протилежний останньому напрямок.

4. *Сила Коріоліса*, яка відхиляє напрямок руху повітря (вправо в північній півкулі, вліво – в південній). Визначається ця сила за виразом:

$$F_k = 2\rho v\omega \sin\varphi, \quad (2.2)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $v$  – швидкість руху повітря;  $\omega$  – кутова швидкість обертання Землі ( $7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$ );  $\varphi$  – широта місцевості.

Розглянемо причини виникнення сили Коріоліса. В системі відліку, що обертається, матеріальна точка, яка рухається не паралельно осі цього обертання, відхиляється за напрямком, перпендикулярним до її швидкості. На Землі цей ефект, зумовлений її добовим обертанням, призводить до того, що вільнопадаючі тіла відхиляються до сходу, а тіла, що рухаються вздовж земної поверхні, відхиляються в північній півкулі вправо від напрямку руху, в південній – вліво. На еква-

торі  $\sin\varphi = 0$  і  $F_k = 0$ ; на полюсах  $\sin\varphi = 1$ , отже сила Коріоліса максимальна.

5. *Відцентрова сила*, яка визначається за формулою:

$$F_6 = \frac{mv^2}{r}, \quad (2.3)$$

де  $r$  – радіус криволінійної траєкторії. При великих швидкостях і малих радіусах кривизни  $F_6$  може значно перевищувати градієнтну силу (тропічні циклони, смерчі).

6. *Морські побережжя* є джерелами різниці температур між водою та землею поверхнею. Влітку вранці температура води та берега однакова; ополудні берег нагрівається скоріше, оскільки великі маси води здатні поглинати сонячне випромінювання без нагрівання. Крім того, відбите від земної поверхні випромінювання нагріває поверхневий шар повітря. Все це сприяє появі температурного градієнта (наприклад,  $t_6 = 18^\circ\text{C}$ ;  $t_6 = 27^\circ\text{C}$ ).

Взимку, коли температура води перевищує температуру берега, ситуація змінюється (наприклад,  $t_6 = 18^\circ\text{C}$ ;  $t_6 = 13^\circ\text{C}$ ), і вітер прямує з берега до водної поверхні.

## 2.2. Параметри вітру

До основних параметрів вітру належать швидкість, напрямок і поривчастість.

*Швидкість вітру* вимірюється в  $\text{м/с}$ , хоча можуть застосовуватися такі одиниці як *вузол* або  $\text{км/г}$  (табл.2.1).

### 2.1. Зв'язок між одиницями швидкості вітру

$\text{м/с}$	<i>вузол</i>	$\text{км/г}$
1,000	1,943	3,600
0,515	1,000	1,853
0,278	0,540	1,000

Залежно від швидкості руху  $v$  розрізняють вітер: помірний ( $v = 5\text{--}8 \text{ м/с}$ ); сильний ( $v > 14 \text{ м/с}$ ); штормовий ( $v = 20\text{--}25 \text{ м/с}$ ); ураганний ( $v > 30 \text{ м/с}$ ). В Антарктиці швидкість вітру сягає  $65 \text{ м/с}$ , у тропіках –  $110 \text{ м/с}$ . Швидкість вітру  $v$  залежить від висоти  $h$  над рівнем моря:  $v = 5 \text{ м/с}$  ( $h = 20 \text{ м}$ );  $v = 20\text{--}25 \text{ м/с}$  ( $h = 300 \text{ м}$ );  $v = 60\text{--}80 \text{ м/с}$  ( $h = 10\text{--}17 \text{ км}$ ). Швидкість вітру та його дія оцінюються за допомогою *шкали*

Бофорта (табл.2.2), яку запровадив у 1805 році Френсіс Бофорт на основі візуальних спостережень за вітром та його наслідками.

## 2.2. Шкала Бофорта

Бал	Характеристика	м/с	вузол	км/год	Наслідки
1	2	3	4	5	6
0	Безвітря	0,0–0,2	< 1	< 1	Дим прямує вертикально
1	Легкий вітерець	0,3–1,5	1–3	1–5	Дим повільно дрейфує
2	Легкий бриз	1,6–3,3	4–6	6–11	Шурхіт листя, вітер відчувається, анемометр починає обертатися
3	М'який бриз	3,4–5,4	7–10	12–19	Листя та гілки починають рухатися
4	Помірний бриз	5,5–7,9	11–16	20–28	Невеликі гілки дерев починають гнутися, підіймається пил
5	Свіжий бриз	8,0–10,7	17–21	29–38	Невеликі дерева починають рухатися
6	Сильний бриз	10,8–13,8	22–27	39–49	Великі гілки рухаються, шум у проводах
7	Близький до штормового вітер	13,9–17,1	28–33	50–61	Дерева гнуться, важко йти
8	Штормовий вітер	17,2–20,7	34–40	62–74	Гілки ламаються
9	Сильний штормовий вітер	20,8–24,4	41–47	75–88	Гілки відриваються, руйнування дахів

Продовження табл. 2.2.

1	2	3	4	5	6
10	Шторм	24,5–28,4	48–55	89–102	Дерева вириваються з ґрунту, руйнування будинків
11	Шалений шторм	28,5–32,6	56–63	103–117	Поширене руйнування дерев та будинків
12	Ураган	> 32,7	> 64	> 118	Серйозні руйнування будинків та дерев

*Напрямок вітру* визначають відносно сторін світу і позначають або в *румбах* (всього їх 16): північний, північно-східний, східний тощо, або в *поділках*: одна поділка має  $5^0$  або  $10^0$  залежно від необхідної точності вимірювань.

*Поривчатість вітру* – це скачкоподібні підсилення і послаблення швидкості  $\Delta v$  вітру;  $\Delta v = \pm 3$  м/с при  $v = 5–10$  м/с; ;  $\Delta v = \pm 5–7$  м/с при  $v = 11–15$  м/с.

### 2.3. Стресові ситуації, пов'язані з вітром

Вітер надзвичайної інтенсивності часто має специфічні назви – шторм, ураган, тайфун, торнадо.

*Шторм* – це вітер зі швидкістю від 51 до 102 км/год. Вітер такої інтенсивності оцінюється у 7–10 балів за шкалою Бофорта.

*Ураган* – це тропічний шторм, швидкість поширення якого варіює від 119 до 257 км/год; він супроводжується грозами, зливами та повеннями. Такий вітер спостерігається у північній Атлантиці; аналогічні явища у Тихому океані називають “*тайфунами*”. Тривалість ураганів від 1 до 30 днів. Оцінюють урагани згідно зі шкалою Сафіра-Сімсона (табл. 2.3).



### 2.3. Шкала Сафіра-Сімсона оцінки ураганів

Категорія	Швидкість, км/год	Наслідки
1 (мінімальний)	119–153	Руйнування дерев, рухомих будинків, часткове затоплення прибережних районів
2 (помірний)	154–177	Суттєве пошкодження рослинності, виривання дерев, затоплення прибережних доріг
3 (великий)	178–279	Руйнування малих будинків, затоплення прибережної території на відстань до 13 км
4 (екстремальний)	210–249	Руйнування дахів, вікон, повне руйнування рухомих будинків, затоплення до 10 км
5 (катастрофічний)	> 249	Руйнування будинків, промислових підприємств, необхідність в евакуації населення в зоні 8–16 км

*Смерч* – сильний маломасштабний вітер з вертикальною віссю, що має велику швидкість обертання. В Америці його називають *торнадо*. Причиною смерча є великі градієнти тиску, нестійкість нижнього шару атмосфери (до 2 км), яка виникає при зіткненні сухих холодних повітряних мас з теплими і вологими. Діаметр смерча сягає 100 м над водною поверхнею, від декількох десятків метрів до декількох сот метрів – над землею поверхнею. Висота смерчу – 100 м. Характерна особливість – спіралеподібний рух повітря навколо вертикальної осі. Швидкість руху становить 50–100 м/с, а інколи 250 м/с, причому є вертикальна компонента швидкості величиною 70–90 м/с. Тривалість смерчу – від декількох хвилин до декількох годин. Як приклади можна навести смерчі в США: в 1925 р., коли загинуло 695 людей і в 1999 р., який викликав десятки загиблих.

Для оцінки смерчів використовують *шкалу Фудзі* (табл.2.4).

#### 2.4. Шкала Фудзі оцінки смерчів

Категорія	Швидкість, км/год	Наслідки
F <sub>0</sub> (легкий)	64–115	Руйнування телевізійних антен, труб, дерев, вікон
F <sub>1</sub> (помірний)	116–179	Перевертання автомобілів, виривання дерев з корінням
F <sub>2</sub> (значний)	180–251	Знесення дахів, перевертання рухомих будинків
F <sub>3</sub> (суворий)	252–330	Руйнування металевих будівель, зсунення зовнішніх стін, полягання лісів та угідь
F <sub>4</sub> (спустошливий)	331–416	Падіння стін, перенесення металевих та бетонних конструкцій на велику відстань
F <sub>5</sub> (неймовірний)	417–509	Перенесення будинків на велику відстань, руйнування шкіл, мотелів
F <sub>6</sub> (неуявлений)	510–606	Автомобілі летять у повітрі

*Суховій* – вітер, що виникає при високій температурі (більше 25 °С) і вкрай низькій відносній вологості (менше 30 %). Спостерігаються суховії в степових та лісостепових зонах України. Швидкість руху повітря сягає 5–20 м/с.

*Пилові бурі* виникають на оголених земельних ділянках, на розпиленому і висушеному ґрунті, на розорених схилах. Основним фактором, що сприяє пиловій бурі, є сильний вітер (понад 10 м/с) і відносна вологість, що не перевищує 50 %. В Україні в степовій зоні відбувається за рік 4–5 днів з пиловими бурями, а в деяких областях – 10–15 днів на рік.

*Бора* – сильний, холодний і поривчастий вітер, що походить з області невисоких горних хребтів і пересувається у бік теплого моря. Утворюється в холодну пору року, коли над холодним континентом виникає область підвищеного тиску, а над теплим морем – область низького тиску. Над хребтом переріз повітряного потоку зменшується, а швидкість збільшується. Швидкість вітру під час бори досягає 40–60 м/с, температура повітря може зменшуватися до  $-20^{\circ}\text{C}$ . Тривалість бори – 1–3 дні.

#### **2.4. Вплив вітру на живі організми**

Здатність комах, які літають, орієнтуватися відносно такого зовнішнього стимулу як вітер, тобто рухатися до цього стимулу або від нього, називається *анемотаксисом*. Комахи прагнуть летіти вздовж вітру, якщо вони знаходяться у контакті з клубом феромону, або повертати проти напрямку вітру або перпендикулярно йому, якщо цей контакт втрачений. *Феромони* (від грецького *pherein* – нести або переносити та *hormōn* – збуджувати або стимулювати) – це молекули, що переносяться вітром і використовуються комахами у пошуках статевих партнерів та для комунікації. Крім того, комахи можуть контролювати своє положення під час польоту спостереженням за наземними об'єктами.

Мухи мають рецепторні органи на антенах, які чутливі до вітру і допомагають змінити положення тіла відповідно до напрямку і швидкості вітра.

Жуки можуть орієнтуватися відповідно до напрямку вітру завдяки джонстонівському органу на антенах.

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.2.1), 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. Отже, вітровий режим безсумнівно впливає на продуктивність бджіл.

Крім того, бджола отримує інформацію через *рецептори тиску*, які знаходяться на стінках медового мішка: тиск зменшується, якщо мішок спорожнюється.

Сенсорні волоски сарани збуджуються при їх зміщенні під впливом вітру і реагують на вітер шляхом підвищення частоти генерації електричних імпульсів від 50–70 Гц до 245 Гц.

Вітер без сумніву впливає на рослини. Вітер викликає настичні рухи рослин, стимулює перенесення теплоти та маси, зміни опору граничного шару приземного повітря, зміну рослинної архітектури.

На відкритих місцях вітер може придушувати розвиток рослинності, особливо дерев, які ростуть на відкритих місцях; вплив вітру призводить до затримки їх росту та викривленню стовбура, збільшення транспірації в умовах низької вологості, поширення міграції насіння, плодів, спор, перенесення частинок ґрунту та агрохімічних препаратів.

Під час ураганів можливе перенесення рослин і тварин на великі відстані, що впливатиме на склад лісових суспільств. Негативними наслідками дії сильних вітрів є інтенсифікація процесу випаровування, видування посівів, пошкодження сходів, повітряна ерозія, вилягання зернових культур, вітровали і буреломи.

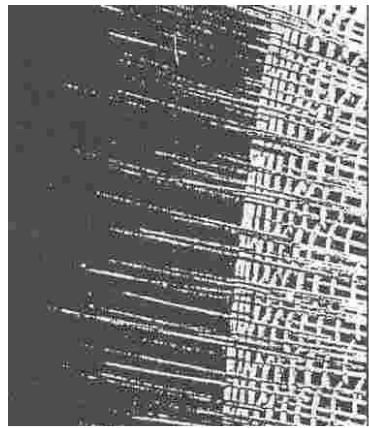


Рис.2.1. **Фрагмент складного ока бджоли: між фасетками розміщені чутливі волоски, що діють як рецептори повітряних потоків**

## **2.5. Вимірювання параметрів вітру**

Прилади, що визначають швидкість руху повітряних потоків, називаються *анемометрами*. Принцип дії полягає в перетворенні енергії поступального руху повітря в механічне обертання різноманітних вертушок, вітрових коліс або гвинтів. Найпоширенішими є анемометри чашечкового та пропелерного типів.

Анемометр *чашечкового типу* складається з трьох-чотирьох півсферичних чашок (рис. 2.2). Порогова чутливість чашечкового анемометра становить від 90 мм/с до 2,24 м/с. Анемометри цього типу прості та чутливі. Анемометр *пропелерного типу* містить тричотирилопатевий пропелер, вісь якого показує напрямок вітру (рис.2.3). Гранична чутливість пропелерного анемометра становить 1,1 м/с; використовують ці прилади для вимірювання швидкості вітру до 90 м/с. Перевагою анемометра пропелерного типу порівняно з чашечковим є його мала вага (пропелер може бути виготовлений з пластмаси), у три рази більша швидкість обертання і можливість вимірювань слабких повітряних потоків.



Рис. 2.3. Анемометр чашечкового типу



Рис. 2.3. Анемометр пропелерного типу

*Термоанемометр* оснований на реєстрації впливу повітряного потоку на температуру нагрітого провідника або тіла. Анемометри цього типу складаються з тонкого (порядка кількох мікрометрів) провідника, по якому пропускають електричний струм. Опір провідника залежить від температури; під час дії вітру температура провідника та його опір зменшуються.

Вимірювання опору провідника дає можливість оцінити швидкість вітру.

*Ультразвуковий анемометр* використовує той факт, що звук (ультразвук) поширюється більш швидко у напрямку, в якому діє вітер. Звичайно ультразвуковий анемометр вимірює три компоненти вітрового вектора у тривимірному просторі. Вздовж кожної осі розташовано дві пари “передавач-приймач” на відстані 0,1–0,5 м (рис. 2.4).

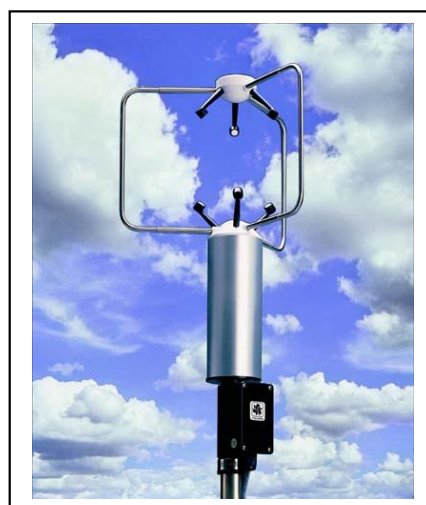


Рис. 2.4. Ультразвуковий анемометр

Передавач посилає неперервні або імпульсні ультразвукові хвилі. Час проходження хвилею відстані між передавачем та приймачем залежить від того, збігається чи ні напрямок поширення вітру з ультразвуковою хвилею.

Швидкість вітру, яку вимірюють ультразвукові анемометри, досягає 30 м/с. Недоліком ультразвукових анемометрів є залежність швидкості поширення ультразвуку від температури, вологості, атмосферного тиску, що потребує відповідної калібрування приладів. Крім того, електронне обладнання підвищує вартість приладів цього типу.

*Доплерівський анемометр* діє на основі ефекту Доплера: при опромінюванні об'єкта, який рухається зі швидкістю  $V$ , ультразвуковою хвилею певної довжини хвилі  $\Lambda$  відбувається розсіювання хвилі, причому частота (довжина хвилі) розсіяної ультразвукової хвилі залежить від швидкості руху об'єкта. Доплерівський зсув  $\Delta\Omega$  частоти ультразвукової хвилі, розсіяної під кутом  $\theta$  об'єктом, що рухається зі швидкістю  $v$ , описується виразом:

$$\Delta\Omega = \frac{4\pi v}{\Lambda} \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi, \quad (2.4)$$

де  $\varphi$  – кут між напрямком швидкості  $v$  і напрямком поширення ультразвукової хвилі. Доплерівські анемометри здатні вимірювати швидкість вітру на висотах до 1 км; точність вимірювання становить 5 %.

*Визначення напрямку вітру* здійснюється *флюгерами*, які являють собою металеву пластину прямокутної форми, що обертається навколо вертикальної осі. Для одночасного вимірювання швидкості і напрямку руху повітря використовують *анеморумбометр*. Кількість обертань повітряного гвинта цього приладу перетворюється в послідовність електричних імпульсів, частота яких пропорційна швидкості вітру, а фазовий зсув залежить від напрямку.

### Аудиторні завдання

1. Назвати причини, що призводять до утворення вітру.
2. Перевести одиницю вимірювання швидкості вітру “вузол” у “м/с” та “км/год”.

### Альтернативний тест

Чи вірно ствердження, що сила Коріоліса максимальна на полюсах: Так Ні

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “Характеристика вітру - наслідки”

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| <i>а. Легкий вітерець</i>       | <i>1. Руйнування будинків</i>               |
| <i>б. Помірний ураган</i>       | <i>2. Дим повільно дрейфує</i>              |
| <i>в. Катастрофічний ураган</i> | <i>3. Автомобілі летять у повітрі</i>       |
| <i>г. Штормовий вітер</i>       | <i>4. Листя та гілки починають рухатися</i> |
| <i>д. М'який бриз</i>           | <i>5. Гілки ломаються</i>                   |
| <i>е. Неуявлений смерч</i>      | <i>6. Виривання дерев</i>                   |

### Акордно-вибірковий тест

Знайти вірну відповідь на запитання

*“Які причини виникнення вітру викликаються добовим обертанням Землі?”*

- 1. градієнти тиску; 2. сила Коріоліса; 3. гравітаційна сила; 4. відцентрова сила; 5. сила тертя.*

### Репродуктивний тест

В чому полягає перевага:

1. Допплерівського анемометра? 2. анемометра пропелерного типу?

### Конструктивні тести

1. Пояснити причини виникнення сили Коріоліса. Перевірити розмірність правої та лівої частин рівняння 2.2.
2. Як залежить сила Коріоліса від широти місцезнаходження?
3. Як залежить швидкість вітру від висоти? Чому дорівнює швидкість вітру на границі тропосфери? На якій висоті швидкість вітру становить 150 м/с?
4. Чому чутливість анемометрів чашечкового та пропелерного типів різна?
5. У чому проявляється позитивний вплив вітру на живі організми?





### 3. ГРАВІТАЦІЯ



#### 3.1. Визначення гравітації

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

$$F = G \frac{mM_3}{R_3^2}, \quad (3.1)$$

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

Гравітаційна взаємодія між тілами здійснюється за рахунок *гравітаційного поля*. Основною властивістю цього поля є те, що на будь-яке тіло масою  $m$ , розміщене в цьому полі, діє сила гравітації:

$$\vec{F}_{cp} = m\vec{E}_\gamma, \quad (3.2)$$

де вектор  $\vec{E}_\gamma$  не залежить від  $m$  і називається напруженістю гравітаційного поля:

$$\vec{E}_\gamma = \frac{\vec{F}_{cp}}{m}. \quad (3.3)$$

Враховуючи рівняння (3.1), можна отримати вираз:

$$\vec{E}_\gamma = -\frac{GM_3}{R_3^3} \vec{R}. \quad (3.3)$$

Напруженість поля тяжіння визначається силою, що діє з боку поля на матеріальну точку одиничної маси і збігається з напрямком дії сили тяжіння. В кожній точці гравітаційного поля відношення сили, що діє на матеріальну точку, до її маси є величиною сталою і називається прискоренням вільного падіння  $\vec{g}$ . Біля поверхні Землі  $\vec{g} =$

9,80 м/с<sup>2</sup>. Для точок, що розміщені поблизу поверхні Землі, прискорення вільного падіння  $\bar{g}$  дорівнює напруженості  $\vec{E}_g$  гравітаційного поля.

Таким чином, універсальна взаємодія між будь-якими видами фізичної матерії називається тяжінням або гравітацією.

### 3.2. Вплив гравітації на живі організми

*Гравітаксис водоростей.* На відміну від інших зовнішніх стимулів гравітація існує завжди і не змінюється за величиною; її не можна увімкнути чи вимкнути. Вертикальна міграція водних мікроорганізмів являє собою поведінковий механізм пошуків оптимального з точки зору їх росту та репродукції положення у водному середовищі. Водні 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 високих інтенсивностях сонячного випромінювання вони використовують негативний фототаксис, прямуючи у глибину з тим, щоб запобігти руйнівній 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), у той час як *Chlamydomonas nivalis*, *Peridinium gatunense*, *Amphidinium catereae*, *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. Важка частина клітини утворює обертаючий момент, який установлює 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. Перша гіпотеза не здатна пояснити, чому молодим популяціям *E. 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, згідно з якою гравітаксис є активним фізіологічним процесом, в основі якого лежить різниця густини тіла клітини (1,05 г/мл) та середовища (1,00 г/мл), в 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 оцінювання гравітаксису водоростей наведено на рис. 3.1. Система складається з таких елементів як: 1 – мікроскоп; 2 – відеокамера; 3 – система обробки інформації; 4 – монітор спостереження за популяцією; 5 – монітор спостереження за окремою клітиною; 6 – комп'ютер.

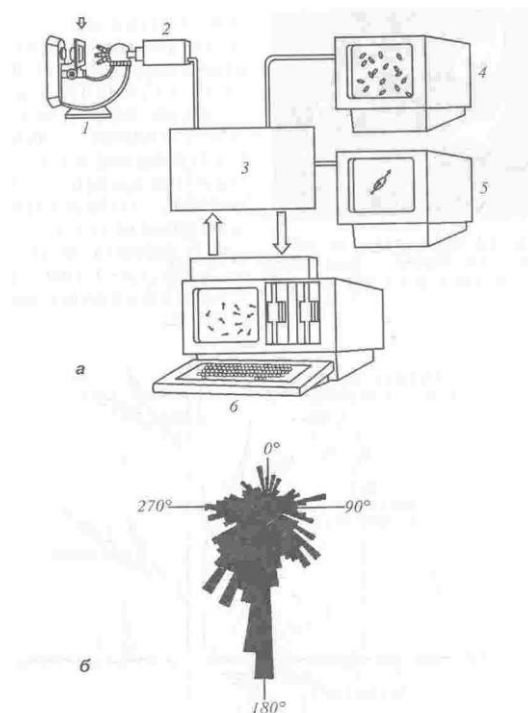


Рис. 3.1. **Гравітаксис водоростей:** *а* – типова схема спостереження та оцінювання гравітаксису водоростей; *б* – гістограма кутового розподілу клітин зеленої водорості *Dunaliella salina* під час гравітаксису.

*Гравітропізм рослин.* Ростову реакцію рослин, яка викликає вигин або викривлення її певної частини у бік зовнішнього стимулу, називають *тропізмом*. Якщо рух направлений до стимулу, кажуть про *позитивний тропізм*; якщо в протилежний бік – про *негативний тропізм*.

Коли зовнішнім стимулом є гравітаційна сила, то реакція рослини на неї називається *гравітропізмом*. Рослина, покладена в горизонтальне положення, направляє паросток догори (*негативний гравітропізм*), а корінь – донизу (*позитивний гравітропізм*). Таким органам рослини як столони, ризоми, бокові гілки, що ростуть під прямим кутом до напрямку дії гравітаційної сили, притаманний *діагравітропізм*, а органам, напрямок росту яких знаходиться в інтервалі 0-90° до вертикалі, – *плагіотропізм*. Якщо органи не чутливі до гравітації, їх називають *агравітропними*. Типові гравітропні відгуки стебла та коріння рослин наведено на рис. 3.2.

### 3.3. Вимірювання гравітропізму

У більшості експериментів використовується гравітаційне прискорення на рівні 1 g чи менше, що досягається орієнтуванням органа (колеоптіля 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.

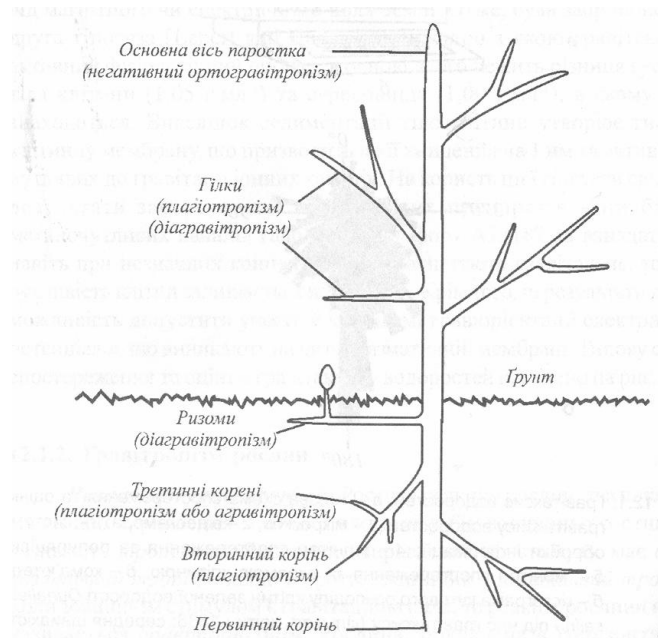


Рис. 3.2. Типові гравітропні відгуки стебла та коріння росли-

#### Аудиторні завдання

1. Дати визначення гравітації.
2. Сформулювати закон всесвітнього тяжіння.

#### Альтернативний тест

1. Чи вірно ствердження, що гравітаційна взаємодія між тілами здійснюється за рахунок гравітаційного поля? Так Ні
2. Гравітація існує завжди і не змінюється за величиною Так Ні

#### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “Вплив гравітації – реакція організмів”

<i>а. Гравітаксис</i>	<i>1. Рослина у горизонтальному положенні направляє корінь донизу</i>
<i>б. Позитивний гравітропізм</i>	<i>2. Ріст органів під прямим кутом до на- прямку дії гравітаційної сили</i>
<i>в. Негативний гравітропізм</i>	<i>3. Ріст органів під кутом 0-90° до на- прямку дії гравітаційної сили</i>
<i>г. Діагравітропізм</i>	<i>4. Нечутливість органів до гравітації</i>
<i>д. Плагіотропізм</i>	<i>5. Рослина у горизонтальному положенні направляє паросток догори</i>
<i>е. Агравіотропізм</i>	<i>6. Реакція рослини на гравітаційну силу</i>
<i>ж. Гравітропізм</i>	<i>7. Вертикальна міграція мікроорганізмів</i>

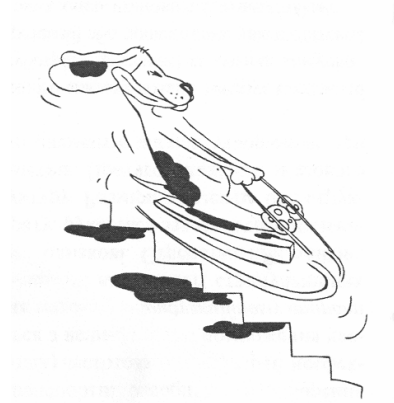
### **Репродуктивний тест**

Які гіпотези пояснюють механізми гравітаксису?

### **Конструктивні тести**

1. Що таке кліноостат? Пояснити принцип його дії.
2. Пояснити суть експериментів, метою яких є вивчення впливу гравітації на живі організми.

## 4. ВІБРАЦІЇ



### 4.1. Параметри вібрацій

*Вібрації* (від лат. *vibratio* – коливання) – механічні коливання матеріальних систем, що відбуваються з великою (більше 1 коливання за секунду) частотою та невеликою амплітудою. Транспортні засоби, промислові агрегати, будівельні механізми і машини є джерелами вимушених механічних коливань, що утворюються в ґрунті. Основна частина коливальної енергії переноситься поверхневими хвилями, які поширюються в поверхневому шарі ґрунту (10–15 м).

Вібрації характеризуються такими параметрами:

*Зміщення* – відстань від положення рівноваги, на якій знаходиться частинка або тіло, що коливається, в даний момент часу. Вимірюється у міліметрах або мікрометрах.

*Амплітуда вібрацій* – максимальне зміщення частинки або тіла, що коливається, від стану рівноваги.

*Фаза коливань* – частина періоду (часу одного повного коливання), протягом якого частинка або тіло відхиляється від стану рівноваги.

*Частота коливання* – кількість коливань, які здійснює частинка або тіло, що коливається, за одиницю часу. Одиниця частоти в системі СІ – Гц.

*Швидкість* – відношення зміни зміщення частинки або тіла, що коливається, до проміжку часу, за який вона відбулася. Одиниця швидкості в системі СІ – м/с.

*Прискорення* – відношення зміни швидкості коливання частинки або тіла, що коливається, до проміжку часу, за який вона відбулася. Одиниця прискорення в системі СІ – м/с<sup>2</sup>.

Вібрацію оцінюють за рівнями *коливальних (вібраційних) швидкостей* в октавних смугах частот (в децибелах):

$$L_v = 20 \lg(\nu/\nu_0), \quad (4.1)$$

де  $\nu$  – значення коливальної швидкості;  $\nu_0$  – опорна коливальна швидкість.

Типові значення вібраційних швидкостей для різних джерел вібрації наведено в табл. 4.1.

#### 4.1. Основні джерела вібрацій

Джерело	Вібраційна швидкість, мм/с
Рейковий транспорт	0,3–160
Промислові установки	0,05–5
Будівельна техніка	0,002–1,6
Автотранспорт	0,005–0,07
Денний фон у місті	0,006–0,02
Нічний фон у місті	0,003–0,01
Безпечний «геологічний» рівень	0,225
Безпечний фізіологічний рівень	0,12

#### 4.2. Вплив вібрацій на організм людини

Людський організм – це складна система, що має велику кількість рухливих елементів. Кожний такий елемент характеризується певними ступенями свободи та власною частотою коливань. У цілому, організм людини чутливий до різних зовнішніх вібраційних параметрів, таких як інтенсивність, частота, тривалість вібрацій протягом контакту тіла з джерелом вібрацій. Наприклад, грудна клітина разом з черевною частиною характеризується резонансною частотою 3–6 Гц; очне яблуко відповідає на резонансні частоти в області 60–90 Гц; шелепна система – в області 300–400 Гц, хоча може реагувати на більш високі частоти в діапазоні 600–900 Гц.

Людський організм здатний сприймати дію ритмічних коливань, які утворюються різноманітними механізмами та інструментами, з якими організм перебуває в контакті. Вплив вібрацій на організм людини різноманітний: порушуються функції вестибулярного апарату, респіраторної та кардіоваскулярної систем, зорового аналізатора, м'язових веретен.

Стосовно людини, вібрації слід розглядати як небажані рухи, що призводять до *вібраційної хвороби* – професійного захворювання, яке зумовлене дією вібрацій та супроводжується порушеннями серцево-судинної та центральної нервової систем, дегенеративними змінами кісткових тканин, пошкодженнями слухового аналізатора.

Розрізняють загальну та локалізовану дію вібрацій.



*Загальна вібрація* виникає внаслідок впливу регулярно діючих джерел вібрацій на водіїв тракторів, скреперів або бульдозерів, які знаходяться на поверхні, що вібрує. Ці вібрації частотою 1–80 Гц передаються на все тіло працівника. Вібраційна хвороба, що зумовлена дією загальної вібрації, характеризується значними змінами в центральній нервовій системі, викликає дистонію (зміну тону) судин. Вібрації частотою менше, ніж 1 Гц призводять до *кінетоз* – порушення загального стану людини, що викликається дією прискорень, що виникають у процесі різноманітних переміщень тіла у просторі, на вестибулярний апарат, а також комплексом захворювань серцевої, травної та ендокринної систем.

*Локальна вібрація* викликається постійно діючими вібраційними інструментами такими, як відбійні молотки, циркулярні пили, електродрилі тощо. Локальна вібрація передається через руки та передпліччя. Частотний діапазон локальної вібрації становить 8–100 Гц. Основні симптоми є спазми судин кінцівок, порушення циркуляції крові в судинах, набуття пальців (хвороба „білих пальців”). Тривала дія локальної вібрації може призвести до більш серйозних порушень, таких як гангрена.

У дітей, які довго грають в комп'ютерні ігри, став спостерігатися симптом «тремтіння рук».

*Противібраційні заходи.* Максимальна чутливість рук працівників, які використовують вібраційні інструменти, становить 8–16 Гц. Заходами, що дозволяють зменшити вплив вібрацій, є застосування антивібраційних перчаток, які містять шар в'язкопружного матеріалу; обмеження часу перебування працівника на поверхні, що вібрує; механічна ізоляція джерел вібрації або поверхонь, на яких розташовані ці джерела; установлення поглинаючих вібрацію сидінь; використання антивібраційних амортизаторів.

### **4.3. Вібрації та тварини**

Багато комах мають настільки малі розміри, що процес утворення звуку завдяки тільки м'язовим волокнам виявляється вкрай неефективним. Вирішити цю проблему можна лише через помноження частоти звукового сигналу, що здійснюється у *стридуляційному апараті* комах. Незважаючи на різні анатомічні властивості стридуляційних апаратів, принципи їх дії майже однакові. Стрекотальний кантик, розміщений в одній частині апарату, рухається вздовж стрекотальної жилки, яка має періодичну структуру. Розміри елементів цієї структури становлять близько декількох мікрометрів. Протягом кожного

м'язового скорочення кантик зачіпляє сотні елементів жилки, утворюючи при цьому звуки високої частоти.

Завдяки активності стридуляційного апарату комаха генерує поздовжні хвилі, які поширюються вздовж субстрату (рослини) як сигнал комунікації, демонстрації територіальних претензій або привертання уваги статевих партнерів. Швидкість поширення таких хвиль становить близько 500 м/с.

Високою чутливістю до вібрацій характеризуються павуки (*Araneida*). Павуки відрізняють живу жертву від мертвої завдяки коливанням павутини, які відбуваються з частотою близько 50 Гц. Причому, павуки здатні відрізнити за допомогою своїх восьми кінцівок коливання, що утворюються комахою-жертвою від тих, що виникають завдяки вітру або статевому партнеру. Коливання передаються вздовж радіальних ниток павутини; здатність реєструвати часову затримку коливань між окремими нитками величиною 1 мс дає можливість мисливцю точно визначити напрямок до джерела коливань.

Нічні пустельні скорпіони (*Scorpionida*) визначають місцезнаходження жертви за вібраціями піску на відстані до 0,5 м. На кожній з восьми кінцівок є рецептор вібрації, який генерує електричні розряди у відповідь на зміщення близько 0,1 нм на відстані до 15 см. Сукупність відгуків здатна орієнтувати скорпіона на джерело вібрації.

Таргани (*Blattodeae*) здатні сприймати коливання з порогом  $10^{-9}$  м (амплітуда цих коливань дорівнює діаметру молекули водню!) в діапазоні частот 1000–5000 Гц, які виникають завдяки руху повітря або поверхні, на якій вони знаходяться.

Мешканець водойм клоп-стародуб знаходить здобич за коливаннями поверхні води амплітудою в 1 мкм і частотою 100–500 Гц.

Мурашки-листорези здатні реагувати на зміщення близько  $1,3 \cdot 10^{-7}$  см і частотою 1–23 кГц.

Водомірка-самка знаходить самця за коливаннями води з частотою 20 Гц.

Реакція бджоли на вібрації субстрату, на поверхні якого вона знаходиться, відбувається за рахунок субгенуальних органів (*s.scolopophora*) на гомілках передніх кінцівок.

#### 4.4. Вимірювання вібрацій

Залежно від параметрів вібрацій, які вимірюються (зміщення, швидкість, прискорення, фаза, частота) розрізняють такі прилади: *вібрметри, велометри, акселерометри, фазометри, частотоміри*. Пристрій, що перетворює вібраційні параметри у відповідний електрич-

ний сигнал, називається *перетворювачем*. Розглянемо принцип дії основних типів перетворювачів.

*Перетворювачі опору* – в основі цих приладів лежить залежність опору провідника від його довжини та перетворення механічного руху в зміну електричного опору за допомогою реостата або напівпровідника, що викликає відповідні зміни напруги або струму в системі реєстрації. Вібраційний процес викликає коливання рухливого контакту реостата та відповідні зміни опору. Сучасні технології дозволяють використати тонкі плівки або печатні електричні схеми, які дають можливість мініатюризувати такі перетворювачі.

*П'єзоелектричні перетворювачі* базуються на явищі п'єзоелектричного ефекту – здатності деяких матеріалів (кварц, титанат барію, турмалін, ніобат літію, сульфат натрію) утворювати електричні заряди під час деформації або механічної напруги. Під час вібрування основи на поверхнях кристала виникає напруга, що пропорційна прискоренню. Перевагою такого перетворювача є компактність, висока чутливість, спроможність давати покази в широкому частотному діапазоні.

*Електродинамічні перетворювачі*. Принцип дії перетворювача базується на явищі електромагнітної індукції – виникненні електричного струму в замкнутому провідному контурі під час зміни потоку магнітної індукції, що охоплюється цим контуром. Внаслідок руху провідника у формі котушки у магнітному полі на кінцях провідника виникає напруга, величина якої залежить від магнітної індукції, довжини провідника та швидкості його руху. Різновидами електромагнітних перетворювачів є *індуктивні перетворювачі*, що працюють на основі явища самоіндукції; *ємнісні перетворювачі*, що використовують залежність ємності конденсатора від відстані між обкладинками; *перетворювачі на основі ефекту Холла* – виникненні різниці потенціалів у провіднику зі струмом, розміщеному у магнітному полі.

*Перетворювач швидкості (велометр)* генерує електричний сигнал, величина якого пропорційна швидкості руху тіла, що вібрує. Цей перетворювач, що монтується на вібруючій поверхні, характеризується високою чутливістю, але має значні розміри.

*Перетворювач прискорення (акселерометр)* генерує електричний сигнал, величина якого пропорційна прискоренню, яке набуває тіло, що вібрує. Перетворювачі такого типу відрізняються високою чутливістю, широким частотним діапазоном, компактністю.

*Фотоелектричний перетворювач* складається з електричного моста, одне плече якого є фоторезистором, розміщеним на тілі, що коливається та освітлюється через діафрагму. Під час коливань відбува-

ються зміщення фоторезистора, рівень освітлення змінюється, що впливає на величину опору цього плеча і дисбаланс моста.

*Лазерний віброметр.* На об'єкт, вібрації якого оцінюються, направляють випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера (10,6 мкм). Відбите випромінювання накладається на падаюче випромінювання та утворює биття, характер яких залежить від руху об'єкта. Для збільшення чутливості приладу промінь лазера модулюють за частотою. Перевагою приладу є висока чутливість, яка досягає 50 нм, а також можливість дистанційного вимірювання вібрацій.

## 5. КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ



### 5.1. Основні визначення

*Коливання* – це рухи або процеси, які відзначаються певною повторюваністю у часі.

*Вільними (власними)* називаються коливання, які відбуваються за відсутності зовнішніх впливів на коливальну систему і виникають внаслідок будь-якого початкового відхилення цієї системи від стану її стійкої рівноваги.

*Періодичними* є коливання, що повторюються через однакові проміжки часу.

Процес поширення коливань у суцільному середовищі називається *хвильовим процесом* або *хвилею*. Механічні збурення (деформації), що поширюються в пружному середовищі, називаються *пружними* (або механічними) хвилями. Пружні хвилі бувають *поздовжніми*, якщо частинки середовища коливаються у напрямку поширення хвилі, і *поперечними*, якщо частинки середовища коливаються в площинах, перпендикулярних напрямку поширення хвилі.

### 5.2. Землетруси

*Землетруси* – це підземні поштовхи та коливання земної поверхні, що виникають внаслідок раптових зміщень та розривів у земній корі або верхній частині мантії (оболонки, що розташована між земною корою та ядром), які передаються на велику відстань у вигляді пружних коливань. Землетруси є також джерелами коливань земної поверхні та підземних поштовхів, що викликаються природними причинами.

Землетруси характеризуються графічним розподілом місць виникнення поштовхів – *гіпоцентрів*, інтенсивністю, тривалістю, механізмами виникнення та тими руйнуваннями, які вони спричиняють. Розміщена над гіпоцентром ділянка земної поверхні, в межах якої інтенсивність поштовхів досягає найбільшої величини, називається *епіцентром*.

Під час зміщень та розривів у земній корі виникають *сейсмічні хвилі*, які викликають поштовхи. Розрізняють три типи сейсмічних хвиль.

*P-хвилі* – хвилі стиснення, які викликають коливання молекул у напрямку поширення хвилі; вони рухаються швидше, ніж всі інші типи хвиль та можуть поширюватися через будь-які речовини.

*S-хвилі* – хвилі зсуву. Вони поширюються більш повільно, ніж *P-хвилі* та не можуть проходити через водні середовища. Молекули речовини коливаються у перпендикулярному до поширення *S-хвилі* напрямку.

*L-хвилі* – поверхневі хвилі, які беруть активну участь у руйнуванні наземних об'єктів.

Схему поширення сейсмічних хвиль стиснення та зсуву наведено на рис. 5.1.

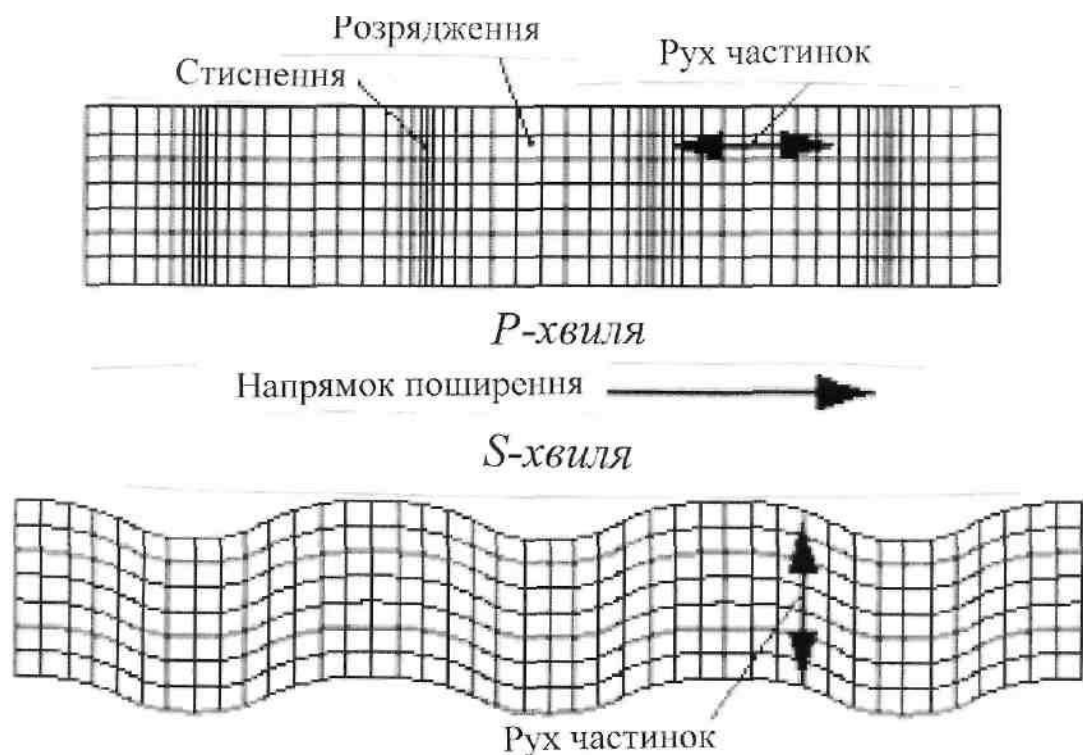


Рис. 5.1. Сейсмічні хвилі стиснення та зсуву

### 5.3. Цунамі

Слово "цунамі" походить від двох японських слів: "tsu" – гавань та "намі" – хвиля. Утворюється цунамі завдяки природним порушенням рівноваги великих мас води (землетруси, виверження вулканів, зсуви ґрунту, падіння метеоритів). Причиною, що найчастіше викли-

кає цунамі, є підводні землетруси, які призводять до зміщення морського дна та його вертикального руху.

Період хвилі становить від хвилин до кількох годин (що відповідає відстані між максимумами) до сотень кілометрів (звичайна морська хвиля має період 10 с, що відповідає відстані 150 м).

Причому, у глибокій воді цунамі має невелику амплітуду (60 см через 2 год після землетрусу), яка поширюється зі швидкістю від 500 до 1000 км/год; у зоні узбережжя швидкість зменшується приблизно до 70 км/год, але амплітуда збільшується до 24–30 м. Енергія цунамі оцінюється близько  $20 \cdot 10^{15}$  Дж (20 петаДж). Ця енергія вдвічі перевищує енергію всіх зарядів, що використовувалися протягом II світової війни, включаючи два атомних вибухи, але приблизно на два порядки менша, ніж енергія самого землетрусу.

#### **5.4. Вплив природних коливань на тварин**

Багато тварин можуть реагувати на природні коливання. Наближення шторму відчувають кити, деякі риби, медузи, дельфіни, чайки, дрібні рачки. Перші ознаки землетрусу сприймають свійські тварини, залишаючи будівлі.

Доведено, що тварини здатні детектувати Р-хвилі та ультразвукові хвилі, що генеруються під час землетрусу, навіть якщо ці хвилі занадто слабкі для сенсорних систем людини. Отже, тварини відчувають ці хвилі і збуджуються або стають нервовими.

Хоча внаслідок землетрусів та цунамі, що мали місце протягом останніх років, загинуло багато людей, жодних жертв серед тварин не спостерігалось. Є багато прикладів у літературі, які свідчать про здатність таких тварин як собаки, кішки, коні, кози, олені, курки, риби, рептилії, комахи виявляти незвичайну поведінку перед землетрусом.

Так, собаки та кішки підбирають своє потомство та залишають місце мешкання; кози відмовляються йти у загін; свині верещать; курки залишають сідало серед ночі; птахи залишають свої гнізда; риби стають неспокійними.

Є. Є. Новогрудський із співавторами у книзі «Інфразвук» наводить приклади таких спостережень. Так, у Туркменистані у м. Казанджику (4 листопада 1946 р.) за кілька годин до землетрусу незвично поводити себе вівці, ревли верблюди, вили собаки, невчасно співали півні. Про ашхабадський землетрус (13 жовтня 1948 р.) тут написано, що за дві години до поштовху коні у стайнях почали голосно іржати, відривалися від прив'язі, вибігали із стійл. Чергові конюхи вертали їх на місце. А за 15 хв до поштовху коні знову захвилювалися, та так, що не тільки вибігли із стійла, а й вибили ворота стаєнь і розбіглися по

території. Катастрофічний поштовх зруйнував будівлі стаєн, але жодного коня там уже не було.

Китайські дослідники ідентифікували 58 видів свійських та диких тварин, які здатні передбачати землетруси. Як приклад згадується землетрус магнітудою 7,3 бали у 1975 р. у місті Хайченг, адміністрація якого організувала евакуацію 1 млн мешканців на основі висновків, зроблених внаслідок спостереження за дивною поведінкою тварин напередодні землетрусу.

Серед можливих механізмів сенсорного сприймання природних коливань відмічаються здатність тварин реагувати на ультразвукові чи інфразвукові коливання, що супроводжують розриви кристалічних порід, що передують землетрусу; на магнітні поля, що утворюються поблизу епіцентра землетрусу; різноманітні електричні поля у водному середовищі; іонізацію повітря, що викликається електричними градієнтами у повітрі.

Втім, всі ці гіпотези та припущення щодо здатності тварин провіщати землетруси потребують ретельної експериментальної перевірки.

Хоча ми не здатні прогнозувати окремі землетруси, найбільші світові землетруси мають досить відому географічну картину, через що передбачення місця відбування та інтенсивності можливих великих землетрусів є досить реальним.

### **5.5. Вимірювання природних коливань**

*Оцінювання землетрусів.* Один із методів оцінювання інтенсивності землетрусів пов'язаний з вимірюванням енергії, яка вивільняється під час геофізичного процесу. Для цього використовують *шкалу Ріхтера*. Інтенсивність землетрусів змінюється в широких межах – від тих, що зумовлюють легкі тремтіння земної кори, які реєструються лише чутливими приладами, до тих, які спричиняють руйнування будинків. Енергія вимірюється сейсмографом – приладом, шкала якого побудована у логарифмічному масштабі. Згідно зі шкалою Ріхтера, амплітуда  $M$  землетрусу (магнітуда) оцінюється за виразом:

$$M = \lg A - \lg A_0, \quad (5.1)$$

де  $A$  – максимальна амплітуда коливання, що вимірюється сейсмографом;  $A_0$  – функція, яка відповідає амплітуді землетрусу певної інтенсивності, що зареєстрована на певній відстані від епіцентра.

Шкалу Ріхтера наведено в табл. 5.1.



### 5.1. Шкала Ріхтера для оцінювання інтенсивності землетрусів

Бал	1–2	3	4	5	6	7	8
Енергія, Дж	$4,47 \cdot 10^5$	$7,94 \cdot 10^7$	$2,51 \cdot 10^9$	$7,94 \cdot 10^{10}$	$2,51 \cdot 10^{12}$	$7,94 \cdot 10^{13}$	$2,51 \cdot 10^{15}$

Так, інтенсивність 2 бали звичайно відповідає мікроземлетрусам; їх людина не відчуває, а лише реєструє апаратура. Землетруси інтенсивністю 4,5 бала і більше реєструються сейсмографами по всьому світу. Потужні землетруси мають інтенсивність 8 балів і більше.

Землетруси можна класифікувати за категоріями відповідно до їх магнітуд (табл. 5.2).

### 5.2. Класифікація землетрусів за магнітудами

Землетрус	Магнітуда	Землетрус	Магнітуда
Незначний	3–3,9	Сильний	6–6,9
Легкий	4–4,9	Дуже сильний	7–7,9
Помірний	5–5,9	Катастрофічний	8 та більше

Шкала Ріхтера не враховує пошкодження і руйнування, спричинені землетрусом. Крім того, логарифмічний масштаб, покладений в основу шкали Ріхтера, призводить до певних непорозумінь у спробі інтерпретувати землетруси населенням: так, землетрус інтенсивністю 6 балів може бути оцінений як вдвічі більший, ніж землетрус інтенсивністю 3 бали.

Другий підхід враховує не параметри саме землетрусу, а його вплив на людство. В даному випадку використовується *модифікована шкала Меркаллі* (табл. 5.3).

*Принцип дії сейсмографа.* Класичним приладом для вимірювання сейсмічних коливань є маятник, поєднаний з записуючим пером, яке залишає слід на барабані, розташованому на платформі.

Під час виникнення землетрусу маятник продовжує коливання в постійній площині, тоді як барабан рухається у відповідь на поштовхи, що реєструється пером самозаписуючого пристрою (рис. 5.2).

### 5.3. Модифікована шкала Меркаллі оцінки наслідків землетрусів

Бал	Ознаки землетрусу
1	Не відчувається людьми
2	Відчувається у спокійній обстановці на верхніх поверхах
3	Відчувається в приміщеннях; здається, що під вікнами проїжджає легкий грузовик. Коливаються висячі предмети.
4	Здається, що проїжджає важкий грузовик. Дзвенять віконні стекла, посуд. Скриплять двері.
5	Відчувається на вулиці. Просипаються люди. Скляні предмети розбиваються.
6	Відчувається усіма. Налякані люди вибігають на вулицю. Пересовуються меблі.
7	Важко стояти на ногах. Відчувається водіями машин під час руху. Дзвенять великі дзвони.
8	Важко вести автомобіль. Руйнуються цегляні стіни, труби, башти, пам'ятники. Виникають тріщини у сирому ґрунті.
9	Загальна паніка. Руйнуються каркаси будівель, утворюються суттєві тріщини в ґрунті.
10	Руйнується більшість споруд та фундаментів. Серйозні пошкодження гребель та насипів. Руйнуються мости.
11	Серйозна деформація залізничних колій. Виходять з ладу підземні трубопроводи.
12	Практично повне руйнування. Порушення лінії горизонту. Здіймаються у повітря окремі предмети.

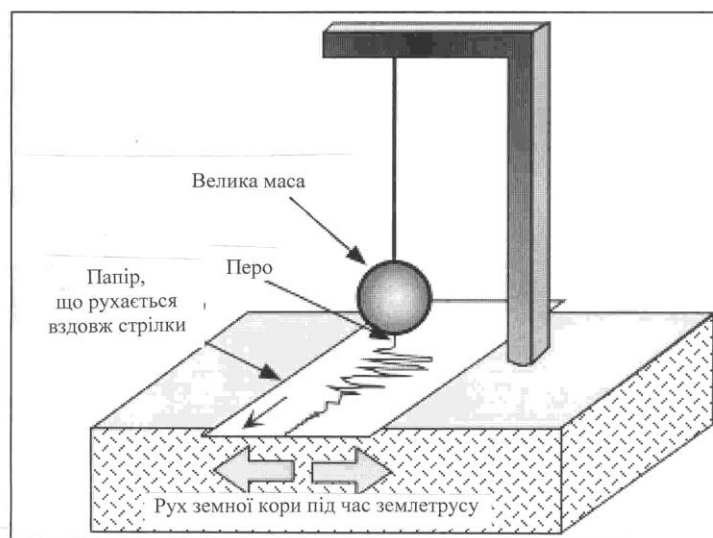


Рис. 5.2. Схема маятникового сейсмографа

Схему типового приладу для оцінювання землетрусів (*сейсмографа*) наведено на рис. 5.3. Основу приладу складає котушка, приєднана до тіла маятника, що рухається у магнітному полі. Цей рух супроводжується виникненням у котушці електричного струму, який вимірюється. Коливання рухомої частини сейсмографа фіксуються системою реєстрації приладу у вигляді *сейсмограми*, яка показує значне підсилення амплітуди коливань під час землетрусу (рис. 5.4).

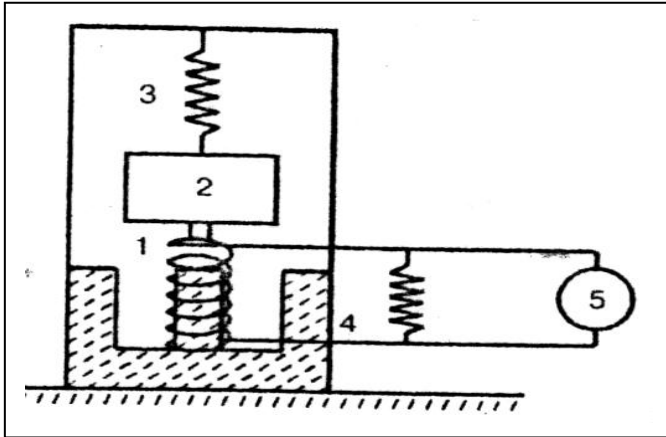


Рис. 5.3. Схема типового приладу для оцінювання землетрусів

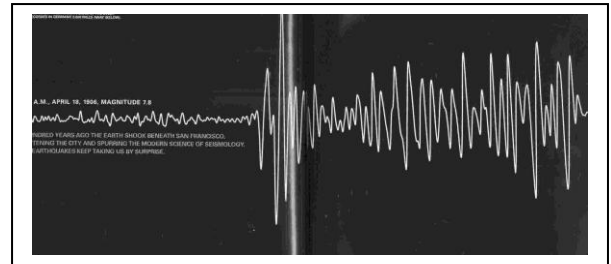


Рис. 5.4. Сейсмограма

*Застосування супутників.* За допомогою супутника DEMETER (**DE**tecton of **E**lectro-**M**agnetic **E**missions **T**ransmitted from **E**arthquake **R**egions" – „Детектування електромагнітних випромінювань з районів землетрусів”) стало можливим визначити високий рівень кореляції між сейсмічною активністю поблизу південної Японії та електронною густиною іоносфери і температурою напередодні потужного землетрусу магнітудою 7,1 бала, який відбувся у серпні-вересні 2004 року.

*VAN-метод.* Цей метод, назва якого є скороченням прізвищ авторів – грецьких вчених (**V**arotsos, **A**lexopoulos, **N**omicos) передбачає занурення металевих стержнів у ґрунт у зоні передбачуваного землетрусу з подальшою реєстрацією електричних сигналів, індукованих землетрусом.

*Оцінювання цунамі.* Застосування методу ультразвукової діагностики морського дна в Індійському океані в районі Бірманського плато, надало можливість спостерігати гребінь висотою 1500 м та великий рів довжиною кілька кілометрів, які були викликані зсувами земної кори. Такий прилад, що називається *сонар* (від англ. фрази **S**ound

Navigation And Ranging) може бути застосований для раннього попередження землетрусів та цунамі.

Систему попередження цунамі розроблено та впроваджено в зоні Алеутських островів (Аляска) (рис. 5.5).

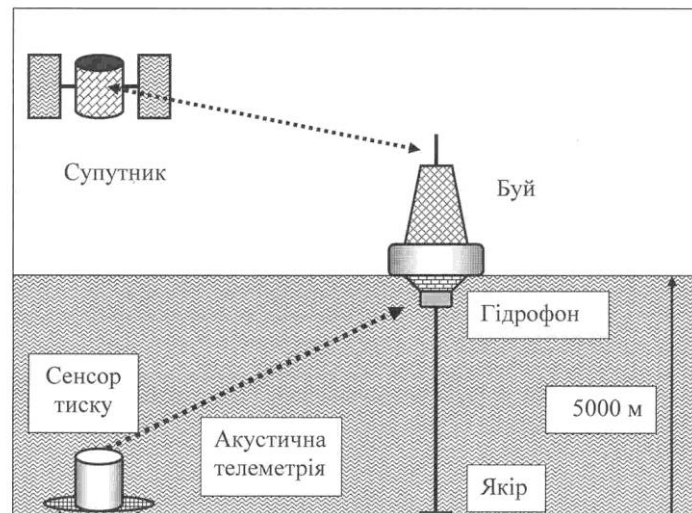


Рис. 5.5. Система попередження цунамі в зоні Алеутських островів (Аляска)

Вона складається з чутливого (менше, ніж 1 см) сенсора тиску, виконаного з кристала кварцу, який розміщений на морському дні. Коли виникає хвиля цунамі, сенсор посилає акустичний сигнал на буй, розташований на водній поверхні; цей сигнал перетворюється в радіосигнал, який сприймається супутниковою тривожною системою, яка попереджає мешканців даної зони через мобільний зв'язок.

### Аудиторні завдання

1. Дати визначення вібрації.
2. Назвати основні характеристики вібрації.

### Альтернативний тест

Чи вірні ствердження:

1. що  $P$ -хвилі рухаються швидше інших хвиль та поширюються через будь-яку речовину: Так Ні
2. що  $S$ -хвилі не можуть проходити через водні середовища: Так Ні

3. що *L*-хвилі беруть активну участь у руйнуванні наземних об'єктів: Так Ні

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “Бал землетрусу—ознака землетрусу за шкалою Меркаллі”

- |              |  |
|--------------|--|
| <i>a. 3</i>  | <i>1. Руйнуються мости</i>               |
| <i>б. 4</i>  | <i>2. Практичне повне руйнування</i>     |
| <i>в. 7</i>  | <i>3. Дзвенять великі дзвони</i>         |
| <i>г. 10</i> | <i>4. Коливаються висячі предмети</i>    |
| <i>д. 12</i> | <i>5. Дзвенить віконне скло та посуд</i> |

### Акордно-вибірковий тест

Знайти вірне ствердження

*Перевагою модифікованої шкали Меркаллі є:*

*1. логарифмічний масштаб; 2. враховує інтенсивність землетрусів; 3. враховує вплив на людство; 4. враховує параметри землетрусу.*

### Репродуктивний тест

1. Що таке магнітуда? Знайти формулу магнітуди та розшифрувати її.
2. Чому для попередження землетрусу використовують реєстрацію саме *P*-хвилі?

### Конструктивні тести

1. Відомо, що логарифмічний масштаб, покладений в основу шкали Ріхтера, призводить до певних непорозумінь в спробі інтерпретувати землетруси населенням; чи не можна використати звичайний масштаб для оцінки землетрусів?

2. Який метод оцінювання вібрацій доцільно використовувати при дистанційних вимірюваннях? Пояснити фізичні принципи цих вимірювань.

3. 28 травня 1995 р. на Сахаліні відбувся землетрус. Загинуло 2000 мешканців. Місто Нефтегорськ, де були зафіксовані поштовхи у 9 балів, було практично зруйновано. Оцінити енергію землетрусу та оцінити його за шкалою Меркаллі.

4. У 1988 р. в м. Спітак (Арменія) відбувся землетрус магнітудою 6,9 балів, який призвів до загибелі 25000 мешканців [[http://en.wikipedia.org/wiki/Spitak\\_Earthquake](http://en.wikipedia.org/wiki/Spitak_Earthquake)]; у 1994 р. відбувся землетрус поблизу м. Лос-Анжелес (США) магнітудою 6,7 балів, який став причиною загибелі 72 та поранення 12000 мешканців. Чим пояснити таку різницю в кількості жертв при майже однакових магнітудах землетрусів?

5. Чи можна запобігти впливу землетрусів? Які альтернативні заходи можна запропонувати, щоб запобігти впливу природних факторів?

#### **Домашнє завдання**

Знайдіть в літературі перелік найбільш руйнівних землетрусів, що відбулися за останні десятиріччя.

## 6. АКУСТИЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА



### 6.1. Хвилі в пружному середовищі

Пружним називається середовище, деформації якого, що викликаються зовнішніми впливами, зникають після припинення цих впливів. Процес поширення коливань у суцільному середовищі називається *хвильовим процесом* або *хвилею*. Механічні збурення (деформації), що поширюються в пружному середовищі, називаються *пружними* (або *механічними*) *хвилями*. Пружні хвилі бувають *поздовжніми*, якщо частинки середовища коливаються у напрямку поширення хвилі, і *поперечними*, якщо частинки середовища коливаються в площинах, перпендикулярних напрямку поширення хвилі. Пружна хвиля називається *гармонічною*, якщо відповідні їй коливання частинок середовища є гармонічними.

Пружні хвилі, що мають частоту в діапазоні 20–20000 Гц, називаються *звуковими*; з частотами  $> 20000$  Гц – *ультразвуковими* і  $< 20$  Гц – *інфразвуковими*.

Галузь фізики, яка досліджує пружні коливання та хвилі звукового, ультразвукового та інфразвукового діапазонів, процеси їх збудження та поширення, взаємодію їх з речовиною та різноманітні застосування, називається *акустикою*.

### 6.2. Характеристики звукових коливань

*Інтенсивність звуку* – це середня за часом енергія, що переноситься за одиницю часу хвилею через одиницю площі, перпендикулярної напрямку поширення хвилі:  $I = E/St$ . Одиниця вимірювання інтенсивності  $Вт/м^2$ .

Діапазон інтенсивностей звуку, що оточують нас, є дуже великий. Мінімальний за інтенсивністю звук (наприклад, дзижчання бджоли, шелестіння листя) становить  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>, тоді як максимальний (наприклад, ревіння двигуна реактивного літака) дорівнює  $I_{\text{макс}} = 10$  Вт/м<sup>2</sup>. Отже, діапазон інтенсивностей можливих звуків варіює в межах 13 порядків.

Важливим параметром шуму є *рівень інтенсивності звуку*  $L$ , який оцінюється так:

$$L = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (6.1)$$

де  $I$  – інтенсивність звукової хвилі,  $I_0$  – мінімальна інтенсивність. Тут  $L$  вимірюється в децибелах (дБ).

Типові значення рівня інтенсивності звуку наведено в табл. 6.1.

#### 6.1. 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

#### Контрольне завдання

Визначити інтенсивність звуку, що викликає болісні відчуття, використовуючи дані табл. 6.2.

*Відповідь:* 1 Вт/м<sup>2</sup>.

*Швидкість поширення звукових хвиль* становить 330 м/с для газів; 1493 м/с для рідини; 5100 м/с для металів (алюмінію).



Принципові властивості звукових коливань такі.

1. Звукові коливання поширюються через середовище, викликаючи коливання частинок цього середовища та відповідні зміни густини та тиску; ці хвилі не можуть поширюватися у вакуумі.
2. Звукові хвилі переносять механічну енергію.
3. Звукові хвилі є поздовжніми хвилями, оскільки частинки збудженого середовища рухаються у напрямку поширення хвилі.

*Суб'єктивні характеристики звукових хвиль.* Звук, який є об'єктом звукових вражень, оцінюється живим організмом суб'єктивно.

*Висота звуку* відповідає якості звука, 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. Гучність звуку складним чином 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.

*Характеристики ультразвукових коливань.* До основних особливостей ультразвуку належить його властивість поширюватися 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.

*Характеристики інфразвукових коливань.* 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.

### 6.3. 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 спроможні коливатися з частотою, що перевищує  $10^3$  Гц. У ссавців звуки утворюються верхньою гортанню, що являє собою хрящеву 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.

*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 зачинається, 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 стридуляції – взаємного тертя різних частин тіла, наприклад складових частин ротового апарату в процесі харчування; гідродинамічної дії – утворення звуків під час плавання; взаємодії спеціалізованих м'язів з плавальним міхуром. Спектральна область звукових коливань риб становить від 20–50 Гц до 10–12 кГц.

*Комахи.* 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. Стрекотальний кантик, розміщений в одній частині апарату, рухається вздовж стрекотальної жилки, яка має періодичну структуру. Розміри елементів цієї структури становлять близько декількох мікрометрів. Протягом кожного м'язового скорочення кантик зачіпляє сотні елементів жилки, утворюючи при цьому звуки високої інтенсивності та частоти.

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 (рис. 6.1).



Рис. 6.1. Цикада *Tibicen linnei*

#### **6.4. Фізичні процеси, що супроводжують поширення звуку у навколишньому середовищі**

Серед основних процесів, які характеризують взаємодію звукових хвиль з навколишнім середовищем, слід відзначити поглинання, послаблення, відбивання, заломлення, дифракцію, розсіювання.

*Послаблення звуку* супроводжується зменшенням звукового тиску із збільшенням відстані до джерела звуку. Залежно від структури звукового випромінювача тварини, послаблення звуку при збільшенні відстані в 2 рази становить 6–12 дБ.

*Відбивання звуку* має місце, коли розміри навколишніх поверхонь значно перевищують довжину звукової хвилі і коли розміри жорсткості поверхні менші за довжину звукової хвилі. Процес відбивання звуку реалізується на границях розподілу “повітря-грунт”, “повітря-вода”, а також між шарами повітря з різними рівнями температури або вологості. Під час утворення звуків тваринами може відбуватися взаємодія звукових хвиль: одна з них поширюється безпосередньо між випромінювачем і приймачем, а інша відбивається від поверхні землі. За рахунок інтерференції ці дві хвилі компенсують одна одну через те, що відбита хвиля змінює свою фазу. Для запобігання процесу інтерференції тварина мусить підійматися над земною поверхнею. Наприклад, цвіркуни спроможні чути один одного на відстані в декілька метрів на поверхні ґрунту; ця відстань збільшується до 50 м, якщо комахи підіймаються над поверхнею.

*Поглинання звуку* пов’язано з переходом звукової енергії у теплову та поширенням звуку в інші середовища. У повітрі і воді більше загасають високочастотні звукові сигнали; поглинання звуків збільшується від  $10^{-2}$  до  $10^2$  дБ/100 м у повітрі та від  $10^{-4}$  до 1 дБ/100 м у морській воді під час збільшення частоти звуку від 100 Гц до 10 КГц. Крім того, на поглинання звуку впливають температура і вологість повітря.

*Заломлення звуку* викликається різкими або поступовими змінами швидкості поширення звукової хвилі, які залежать від температури та густини середовища. Так, швидкість поширення звуку збільшується на 0,6 м/с внаслідок збільшення температури на  $1^{\circ}\text{C}$ .

У сонячний день температура зменшується із відстанню від земної поверхні, так само як і швидкість поширення звуку. Це викликає заломлення звукової хвилі вгору. Вночі ситуація змінюється і звук „знаходить” канали поширення вздовж земної поверхні.

*Дифракція або розсіювання звуку* пов’язані із зміною напрямку поширення звукової хвилі під час її взаємодії з об’єктами. Якщо розміри об’єкта розмірні з довжиною хвилі, відбувається огинання об’єкта (дифракція) або зміна траєкторії поширення хвилі (розсіювання). Такі процеси відбуваються під час поширення звуку крізь рослинні покриви.

*Поширення звуків у водному середовищі.* Вода має багато відмінного від повітря з точки зору поширення звуку. Низькочастотні звукові сигнали під час поширення у воді набувають меншого впливу з боку розсіювання або поглинання, завдяки чому відстань, на якій спостерігаються ці сигнали, значна. Наприклад, низькочастотні звуки,

що утворюються китом *Balaenoptera physalus*, можна чути на відстані у кілька десятків міль.

Акустичні характеристики води і повітря значно відрізняються; через це зміщення частинок води і швидкість цього зміщення приблизно в 3600 разів менші, ніж у повітрі. Саме тому, границя розподілу “повітря-вода” відіграє роль своєрідного рефлектора звукових коливань. Наявність таких границь має важливе значення для акустичної комунікації водних організмів.

### 6.5. 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.* Всі акустичні сигнали, що утворюються птахами, можна поділити на дві основні групи – *заклики* і *співи*. Заклик можна уявити як елемент більш складного акустичного сигналу – співу. Залежність частоти та інтенсивності звукових сигналів, що утворюються птахами, від часу називають *сонограмами*.

Пташині заклики відрізняються змістом. Можливі варіації закликів двох видів птахів наведено на рис. 6.2.

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.

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. Навіть сонограми співів птахів, представників різних видів одного роду, значно відрізняються.

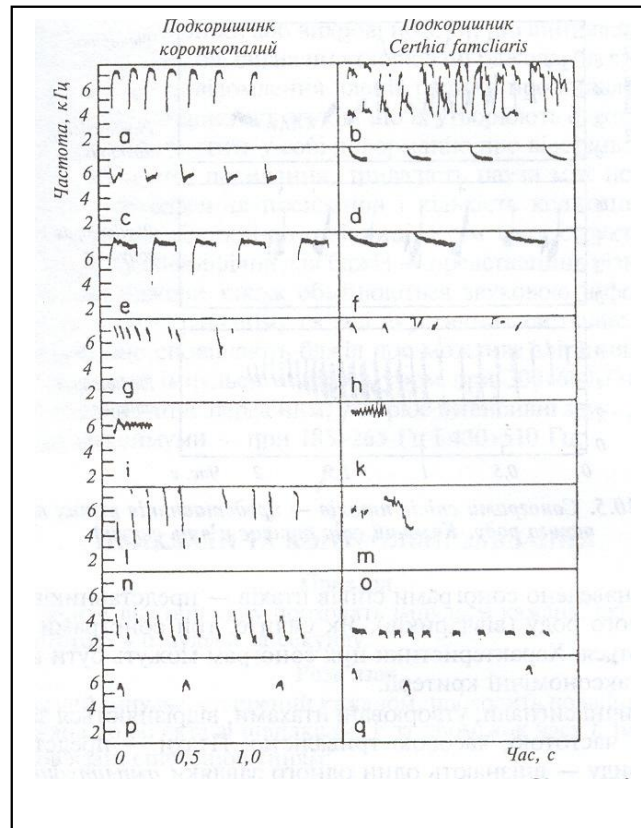


Рис. 6.2. **Можливі варіації закликів двох видів птахів – підкоришника короткопалого та підкоришника *Certhia familiaris*** (пояснення в тексті)

Акустичні сигнали, що утворюються птахами, відрізняються інтенсивністю, частотою, часовою тривалістю. Слід зазначити, 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.

*Акустичні сигнали риб* поділяють 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 внаслідок взаємодії м'язів з плавальним міхуром займають область 40 Гц–2,5 кГц і являють собою серію імпульсів.

*Акустичні сигнали комах.* Бджоли у процесі спілкування утворюють звуки, зумовлені діяльністю крилових пластин та тораксу.

Спектр звуків бджоли займає область 8–12 кГц, в якій можна виділити три максимуми – 75–190 Гц, 210–400 Гц і 450–550 Гц. Інтенсивність і спектральне положення цих максимумів залежить від рівня вентиляції, пори року, температури, наявності корму. Одержані відомості, що бджоли здатні видавати ультразвукові (20–22 кГц) коливання, в яких можливо беруть участь високочастотні гармоніки або вихрові потоки, що виникають під час польоту бджоли. Звукові сигнали, які утворюють бджоли, використовуються для повідомлення членів родини про виявлення корму. Частотна характеристика звуків, що їх утворюють бджоли під час своєрідного танку, містить в собі інформацію про відстань до корму.

Тривалість звукового посилення, тривалість паузи між посиленнями, частота проходження посилення і кількість коливань у посиленні залежать від відстані до годівниці. Крім того, структура акустичного сигналу специфічна для бджіл – представниць різних рас. У період роїння бджоли також обмінюються звуковою інформацією, яка закладена у спектральному складі акустичних сигналів: так, звукові сигнали, що сповіщають бджіл про можливе злітання, являють собою поодинокі імпульси з максимумом при 300–660 Гц; рій, що вилетів з вулика і літає перед ним, утворює інтенсивні звуки, в спектрі яких є два максимуми – при 185–265 Гц і 430–510 Гц.

Наземні та водні тварини, птахи, риби, амфібії, рептилії утворюють звуки в межах частотного діапазону, притаманному голосовій системі людини, а саме 20 – 20 000 Гц; втім, деякі тварини використовують ультразвуковий або інфразвуковий діапазони (табл. 6.2).

*Ультразвукова комунікація тварин.* Тварини утворюють та використовують ультразвукові коливання з метою *ехолокації* – випромінювання ультразвукових хвиль у простір та одержання 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 короточасні 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.

6.2. Частотний діапазон та максимальна акустична чутливість живих організмів

Живі організми	Частотний діапазон	Максимальна чутливість
<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

*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. 6.3).



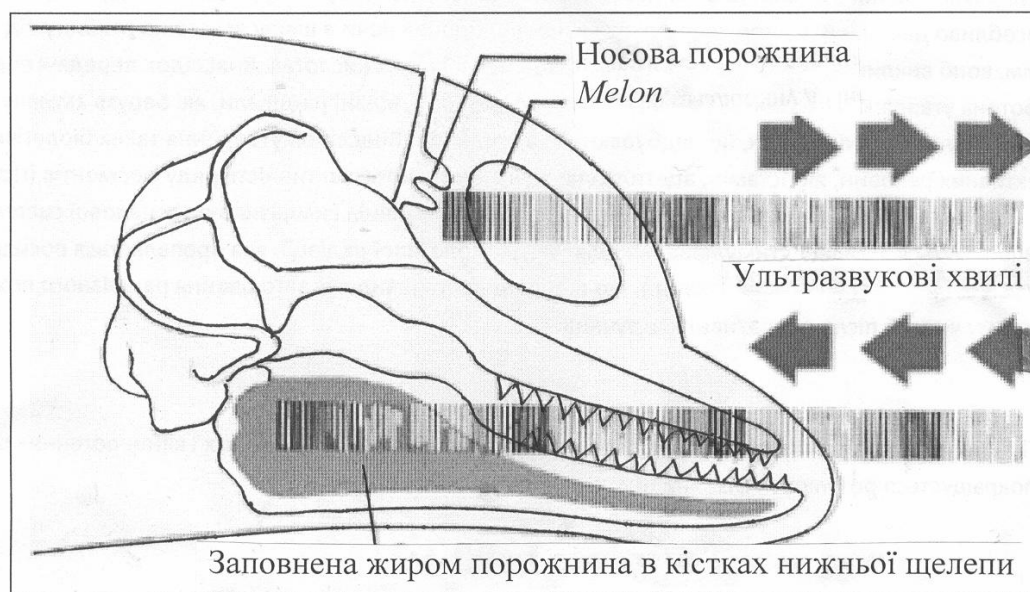


Рис. 6.3. Ехолокаційна система дельфіна

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, 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 атаці хижака. Крім того, метелики (*Pyrallidae*: *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 дослі-

дження 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.

### 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 посиляє 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 посиляє 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>;  $I_{max} = 10$  Вт/м<sup>2</sup>).

### Контрольні запитання

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?

### Альтернативні тести

Чи вірні ствердження, що звукові хвилі:

1. можуть поширюватися у вакуумі: Так Ні
2. переносять механічну енергію: Так Ні
3. є позовжними хвилями: Так Ні

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “тварина – спосіб утворення звуків”

- |                  |   |
|------------------|---|
| а. ссавці        | 1. застосування стридуляційного апарату             |
| б. птахи         | 2. за рахунок взаємодії м'язів з плавальним міхуром |
| в. водні тварини | 3. застосування гортані                             |
| г. риби          | 4. за допомогою пари звукових губ                   |
| д. комахи        | 5. за рахунок нижньої гортані                       |

### Акордно-вибірковий тест

Знайти вірне ствердження

Азіатські слони *Elephas maximus* утворюють інфразвукові сигнали в діапазоні:

1. 14-35 Гц інтенсивністю до 90 дБ; 2. 14-25 Гц інтенсивністю 70-100 дБ; 15 Гц (60 дБ) - 250-275 Гц (30 дБ).

### Репродуктивні тести

1. В чому полягає подвійна функція співів птахів?

2. Які тварини використовують інфразвук для спілкування між собою?

### **Вибірковий тест**

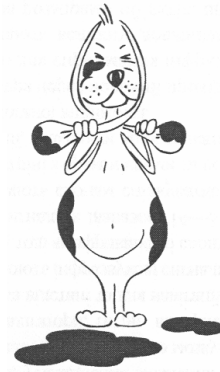
*Який частотний діапазон акустичної чутливості відповідає пляшко-носому дельфіну:*

1. 23 Гц–35 кГц; 2. 250 Гц–150 кГц; 3. 250 Гц–8 кГц; 4. 2 Гц–500 Гц.

### **Конструктивний тест**

Пояснити принцип та призначення електроністагмографії.

## 7. ШУМ



### 7.1. Основні визначення

Є декілька визначень терміну *шум*. Перше визначення: шум являє собою звукові коливання, інтенсивність і частота яких змінюються несподівано та аперіодично. Згідно з другим визначенням, шум – це звук, який накладається на інший 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.

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 автомобілей.

### 7.2. Розподіл шуму за інтенсивністю

Важливим параметром шуму є *рівень інтенсивності звуку*  $L$ , який можна записати так:

$$L = 20 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right), \quad (7.1)$$

де  $p$  – звуковий тиск;  $p_0 = 20 \cdot 10^{-6}$  Па.

*Еквівалентний рівень звуку* визначається за виразом:

$$L_{екв} = 10 \lg \left[ (1/T) \int_0^T 10^{L/10} dt \right], \quad (7.2)$$

де  $L$  – миттєвий рівень інтенсивності звуку;  $T$  – час усереднення (звичайно, 1, 8 або 24 год).

Графічне зображення еквівалентного рівня звуку наведено на рис. 7.1.

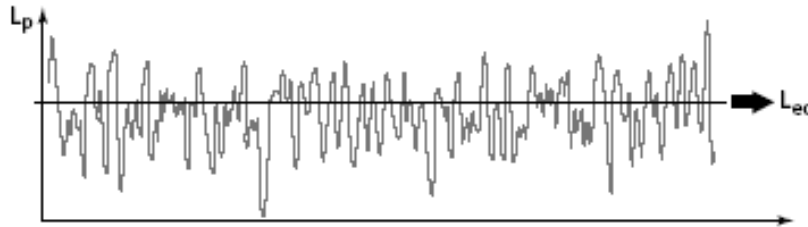


Рис. 7.1. Еквівалентний шум

#### Приклад

Розглянемо чотири часових інтервали тривалістю 15 хв, протягом яких рівні інтенсивності звуку становили 55, 58, 56 та 70 дБ відповідно. Визначити еквівалентний рівень звуку, що утворювався за годину.

#### Розв'язання

Відповідно до формули ( 8.2 ) можна записати:

$$L_{екв} = 10\lg\left(\frac{1}{4}\right)(10^{55/10} + 10^{58/10} + 10^{56/10} + 10^{70/10}) = 64,5 \text{ дБ.}$$

### 7.3. Сумарний шум

Якщо діють два або більше нескорельованих джерел шуму, сумарний шум описується виразом:

$$L_{сум} = 10\lg \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10}, \quad (7.3)$$

де  $L_i$  – рівень інтенсивності звуку кожного джерела;  $N$  – кількість джерел.

#### Приклад

Окремі вклади в шум п'яти машин становили: 85, 88, 80, 70 та 95 дБ. Визначити сумарний шум, що відчувається у місці розташування машин.

#### Розв'язання

Використовуючи рівняння ( 7.3 ), отримуємо:

$$L_{сум} = 10\lg (10^{85/10} + 10^{88/10} + 10^{80/10} + 10^{70/10} + 10^{95/10}) = 96,25 \text{ дБ.}$$

#### 7.4. Розподіл шуму за частотою

Крім того, інтенсивність звуків, що оточують нас, залежить від частоти. Якщо середня потужність (сума інтенсивностей всіх гармонік, що складають шум) є величиною сталою в певному частотному діапазоні, такий шум називають *білим*. У цьому випадку шум містить усі звукові частоти. Якщо шум переважно складається з високочастотних звукових коливань, він називається *фіолетовим* (за аналогією зі світловими коливаннями); якщо домінують низькочастотні звукові коливання, шум називають *рожевим*. Спектральна густина потужності шуму розподілена за законом  $1/f^\beta$ .

Так, для білого шуму  $\beta = 0$ , для рожевого та блакитного  $\beta = 1$ , для коричневого та фіолетового  $\beta = 2$ , для чорного  $\beta > 2$ . Білий шум має всі звукові частоти в рівних пропорціях: наприклад, частотний діапазон 40–60 Гц має таку ж потужність, як діапазон 4000–4020 Гц. Сірий шум сприймається як звук однакової гучності на всіх частотах.

У коричневому шумі переважають низькочастотні компоненти.

У рожевому шумі також більше низькочастотних складових, але на долю інших спектральних компонентів припадає значно більше енергії, ніж у коричневого шуму. Частотний спектр рожевого шуму плоский у логарифмічному масштабі: він містить однакову потужність в діапазонах 40–60 Гц та 4000–6000 Гц. Зменшення густини потужності на октаву становить 3 дБ для рожевого шуму та 6 дБ – для коричневого; збільшення густини потужності на октаву на 3 дБ характерно для блакитного шуму та на 6 дБ – для фіолетового.

Спектри шумів різних кольорів

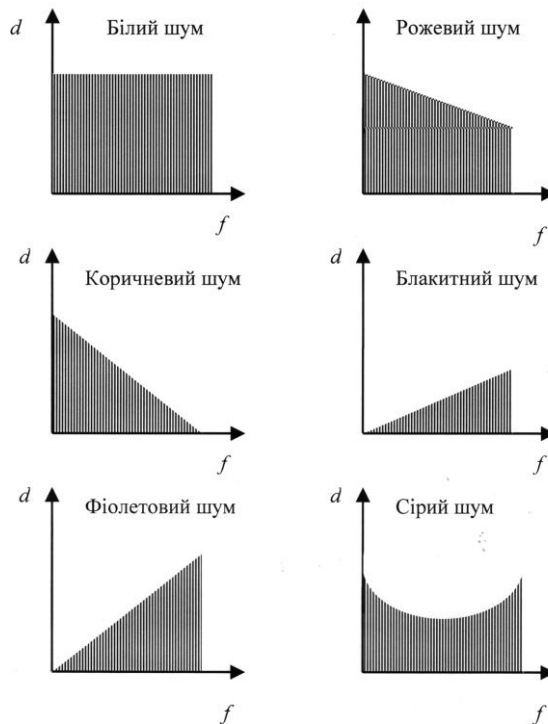


Рис. 7.2. Розподіл шуму за частотою (пояснення в тексті)

#### 7.5. Вплив шуму на живі організми

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 (ІШПЗ)*, 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 спроможний 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 викли-

кає 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.

Моніторинг шуму передбачає планування розташування джерел шуму, врахування та запис побажань та скарг мешканців як під час планування, так й після нього, оцінювання відповідності активності джерел шуму законотворчим нормам та актам, вимірювання рівнів шуму у польових умовах, підрахунки рівнів шуму, картографування розташування джерел шуму, тренінг спеціалістів, використання захисних та шумоізоляційних засобів, підготовку звітів для мешканців або адміністрації регіону, архівування даних.

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.

## **7.6. Вимірювання рівнів шуму**

Для оцінювання рівнів шуму використовують шумоміри і аналізатори шуму. Принцип дії шумоміра полягає в перетворенні звукового тиску в електричний сигнал мікрофоном. Цей сигнал підсилюється і калібрується. Типовий діапазон рівнів інтенсивності, які оцінюються шумоміром, становить 30–140 дБ. Розглянемо основні конструкції конденсаторів, призначених для вимірювання шумів.

*Конденсаторний мікрофон* складається з двох пластин, одна з яких займає фіксоване положення, а друга є діафрагмою (рис. 7.3).

Під впливом звукової хвилі діафрагма вигинається, відстань між пластинами та ємність конденсатора відповідно змінюються, що викликає зміну електричного сигналу в системі реєстрації.

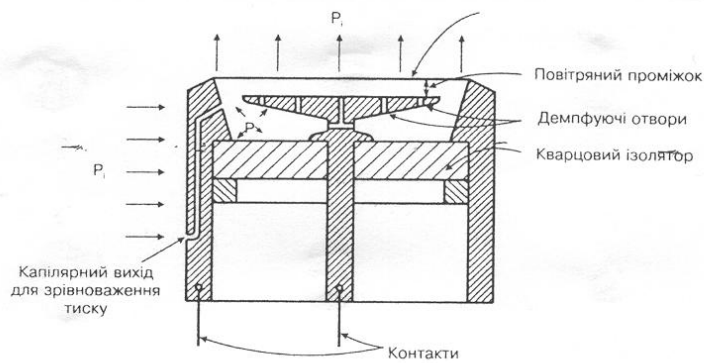


Рис. 7.3. Схема конденсаторного мікрофона

*П'єзоелектричний мікрофон* також містить діафрагму, але вона пов'язана з п'єзокристалом, який під впливом звукової хвилі перетворює механічні коливання діафрагми в електричний сигнал.

*Електретний мікрофон* базується на використанні електрета – діелектрика, що тривало зберігає поляризований стан після зняття зовнішньої дії, яка викликає поляризацію. Таким електретом в даній конструкції мікрофона є полімерна плівка, поєднана з металізованим електродом, який утворює з фіксованим електродом конденсатор (рис. 7.4). Під впливом звукової хвилі величина заряду на обкладинках конденсатора за рахунок електретного ефекту змінюється, що призводить до відповідної зміни електричного сигналу.

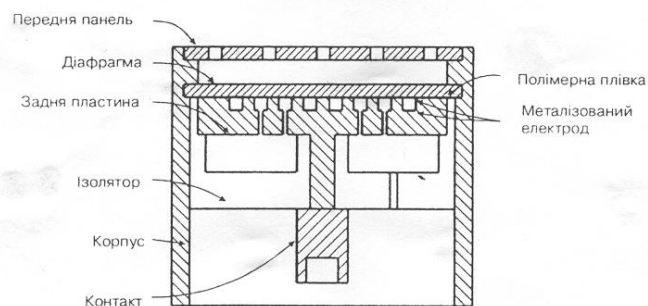


Рис. 7.4. Схема електретного мікрофона

*Аналізатори частоти шуму*, що працюють у режимі реального часу або використовуючи швидке Фур'є перетворення, дозволяють оцінити шумовий сигнал на кожній частоті одночасно. Результати

аналізу виводяться на дисплей і демонструють залежність рівня інтенсивності звуку від частоти.

### 7.7. Звукова ізоляція

Якщо джерело небажаного звуку знаходиться у сусідній кімнаті, то безпосереднє пропускання звуку через стінку залежить від ізоляційних властивостей останньої.

Звукова ізоляція  $R$  стінки визначається за виразом:

77

$$R = 10 \lg I_i / I_t, \quad (7.4)$$

де  $I_i$  – інтенсивність джерела небажаного звуку;  $I_t$  – інтенсивність звуку, який проходить через стінку.

Якщо звук поширюється через стінку дифузно, то інтенсивність джерела небажаного звуку визначиться так:

$$I_i = p_a^2 / 2\rho v, \quad (7.5)$$

$p_a$  – звуковий (або акустичний) тиск, який утворюється в ділянках згущення частинок в акустичній хвилі;  $\rho v$  – питомий хвильовий опір середовища.

Використовуючи рівняння (6.1) та (7.1), можна отримати вираз для рівня звукової ізоляції:

$$R = 10 \lg \left( \frac{p_a^2}{4\rho v} \right) - \left( \frac{p_a^2 A}{4\rho v S_{cm}} \right), \quad (7.6)$$

де  $A$  – загальне поглинання звуку у кімнаті, де він сприймається (ефективна площа, через яку проходять всі звуки, помножена на коефіцієнт поглинання);  $S_{cm}$  – площа стінки.

Отже, рівень звукової ізоляції дорівнює:

$$R = L_e - L_0 + 10 \lg \left( \frac{A}{S_{cm}} \right), \quad (7.7)$$

де  $L_e$  та  $L_0$  – рівень тиску звуку у кімнатах, де знаходиться джерело звуку та де звук сприймається відповідно.

### Приклад

Дві кімнати відділені одна від другої стіною площею  $12 \text{ м}^2$ . Рівень тиску звуку у кімнатах, де знаходиться джерело звуку та де звук сприймається, становить  $L_e = 110 \text{ дБ}$  та  $L_0 = 63 \text{ дБ}$ . Визначити рівень звукової ізоляції стіни, якщо поглинання звуку в другій кімнаті дорівнює  $A = 3 \text{ м}^2$ .

### Розв'язання

Використаємо рівняння ( 7.7 ):

$$R = L_e - L_0 + 10 \lg \left( \frac{A}{S} \right) = 110 \text{ дБ} - 63 \text{ дБ} + 10 \lg \left( \frac{3}{12} \right) = 47 - 10 \cdot 0,6 = 41 \text{ дБ}.$$

*Час реверберації* – це швидкість, з якою звук загасає до рівня  $1/10^6$  початкової інтенсивності (що відповідає зменшенню рівня інтенсивності на 60 дБ). Час реверберації пропорційний об'єму  $V$  кімнати та обернено пропорційний поглинанню  $A = \sum S_i \alpha_i$ :

$$T(c) = 0,16V / \sum S_i \alpha_i, \quad (7.8)$$

де  $S_i$  – площа кожної поверхні, через яку проходить звук;  $\alpha_i$  – коефіцієнт поглинання кожної поверхні.

Оскільки коефіцієнт поглинання залежить від частоти (див. табл. 7.2), на практиці вимірюють усереднений за частотою час реверберації  $\langle T \rangle$ :

$$\langle T \rangle = \frac{T(500 \text{ Гц}) + T(1000 \text{ Гц}) + T(2000 \text{ Гц})}{3}. \quad (7.9)$$

### Приклад

Під час будівництва наукової лабораторії технічні вимоги вимагають досягнення часу реверберації  $0,8 \text{ с}$ . Розміри лабораторії  $7 \times 9 \times 3 \text{ м}$ . Приміщення має двері площею  $2 \text{ м}^2$  та вікно площею  $6 \text{ м}^2$ , розміщені на стінці  $7 \times 3 \text{ м}$ . Знайти реальний час реверберації.

### Розв'язання

Підберемо матеріали, необхідні для обладнання лабораторії (табл. 7.1).

#### 7.1. Кількість матеріалів, необхідних для обладнання лабораторії

Поверхня	Покриття	Площа, $\text{м}^2$
Підлога	Лінолеум	63
Двері	Дерево	2
Стіни (за винятком дверей та вікна)	Бетонний блок	88
Стеля	Штукатурка	63
Вікно	Скло	6

Визначаємо коефіцієнти поглинання, використовуючи табл. 7.2.

## 7.2. Значення коефіцієнта поглинання для різних матеріалів залежно від частоти звуку

Матеріал	Коефіцієнт поглинання звуку, $\alpha$				
	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц
Штукатурка	0,15	0,10	0,05	0,05	0,05
Цегла	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Бетон	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Скло	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
Двері	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Лінолеум, паркет	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Килим на підлозі	0,03	0,06	0,15	0,30	0,04

Обчислюємо загальне поглинання  $A$  звуку у лабораторії, де він сприймається, як добуток ефективної площі  $S$ , через яку проходять всі звуки, помножену на коефіцієнт поглинання  $\alpha$ , для частот 500, 1000 та 2000 Гц:

Підлога(лінолеум):  $A = S_{\text{підл}}[\alpha(500 \text{ Гц})] = 63 \cdot 0,04 = 2,52 \text{ м}^2$ ;  
 $A = S_{\text{підл}}[\alpha(1000 \text{ Гц})] = 63 \cdot 0,05 = 3,15 \text{ м}^2$ ;  
 $A = S_{\text{підл}}[\alpha(2000 \text{ Гц})] = 2 \cdot 0,05 = 0,1 \text{ м}^2$ .

Двері:  $A = S_{\text{дв}}[\alpha(500 \text{ Гц})] = 2 \cdot 0,08 = 0,16 \text{ м}^2$ ;  
 $A = S_{\text{дв}}[\alpha(1000 \text{ Гц})] = 2 \cdot 0,08 = 0,16 \text{ м}^2$ ;  
 $A = S_{\text{дв}}[\alpha(2000 \text{ Гц})] = 2 \cdot 0,08 = 0,16 \text{ м}^2$ .

Стіни:  $A = S_{\text{ст}}[\alpha(500 \text{ Гц})] = 88 \cdot 0,06 = 5,28 \text{ м}^2$ ;  
 $A = S_{\text{ст}}[\alpha(1000 \text{ Гц})] = 88 \cdot 0,07 = 6,16 \text{ м}^2$ ;  
 $A = S_{\text{ст}}[\alpha(2000 \text{ Гц})] = 88 \cdot 0,09 = 7,92 \text{ м}^2$ .

Стеля:  $A = S_{\text{ст}}[\alpha(500 \text{ Гц})] = 63 \cdot 0,10 = 6,30 \text{ м}^2$ ;  
 $A = S_{\text{ст}}[\alpha(1000 \text{ Гц})] = 63 \cdot 0,05 = 3,15 \text{ м}^2$ ;  
 $A = S_{\text{ст}}[\alpha(2000 \text{ Гц})] = 63 \cdot 0,05 = 3,15 \text{ м}^2$ .

Вікно:  $A = S_{\text{в}}[\alpha(500 \text{ Гц})] = 6 \cdot 0,05 = 0,30 \text{ м}^2$ ;  
 $A = S_{\text{в}}[\alpha(1000 \text{ Гц})] = 6 \cdot 0,04 = 0,24 \text{ м}^2$ ;  
 $A = S_{\text{в}}[\alpha(2000 \text{ Гц})] = 6 \cdot 0,03 = 0,18 \text{ м}^2$ .

Визначаємо суму загального поглинання для частот 500, 1000 та 2000 Гц:

$$A(500 \text{ Гц}) = 14,56 \text{ м}^2$$

$$A(1000 \text{ Гц}) = 12,86 \text{ м}^2$$

$$A(2000 \text{ Гц}) = 14,56 \text{ м}^2$$

Обчислюємо час реверберації для частот 500, 1000 та 2000 Гц:

$$T(500 \text{ Гц}) = 2,08 \text{ с}$$

$$T(1000 \text{ Гц}) = 2,35 \text{ с}$$

$$T(2000 \text{ Гц}) = 2,65 \text{ с.}$$

Знаходимо усереднений за частотою час реверберації:

$$\langle T \rangle = (2,08 \text{ с} + 2,35 \text{ с} + 2,65 \text{ с})/3 = 2,36 \text{ с.}$$

Це значення перевищує те, що задано технічними вимогами.

### Аудиторні завдання

1. Надати всі визначення шуму.
2. Що таке еквівалентний шум?
3. Як визначають сумарний шум?

### Альтернативні тести

Чи вірні ствердження, що на здоров'я людини впливає:

1. шум невеликої інтенсивності, але тривалий.      Так    Ні
2. височастотний шум.      Так    Ні
3. імпульсний шум.      Так    Ні

Чи вірно ствердження, що:

“Слух здатний відновлюватися після припинення дії шуму на рівнях інтенсивності, що не перевищують 30 дБ, вже через 16–24 хвилини”.      Так    Ні

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “мікрофон для вимірювання шуму – принцип дії”

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <i>а. конденсаторний мікрофон</i>   | <i>1. оцінювання шумового сигналу на всіх частотах одночасно</i>                        |
| <i>б. п'єзоелектричний мікрофон</i> | <i>2. використання поляризованого стану діелектрика після припинення зовнішньої дії</i> |
| <i>в. Електретний мікрофон</i>      | <i>3. перетворення механічних коливань на електричний сигнал</i>                        |
| <i>г. Аналізатор частоти шуму</i>   | <i>4. вигин діафрагми та зміна ємності конденсатора</i>                                 |

### **Акордно-вибірковий тест**

Знайти вірне ствердження:

*Руйнування барабанної перетинки відбувається внаслідок дії шумів на рівні: 1. 65-70 дб; 2. 90 дб; 3. 100 дб; 4. 160-170 дб.*

### **Репродуктивні тести**

1. Що таке індукований шумом пороговий зсув?
2. Який шум називають рожевим і чому?
3. Чим визначається звукова ізоляція?
4. Що таке час реверберації?

### **Вибірковий тест**

Які норми шуму рекомендовані в заповідниках:

1. 10–15 дб; 2. 30–35 дб; 3. 34–37 дб; 4. 56–60 дб; 5. 80–95 дб.

### **Конструктивний тест**

В чому полягає моніторинг шуму?



## 8. ВОЛОГІСТЬ



### 8.1. Параметри вологості

Вода може існувати в атмосфері в трьох фазах – рідкій, газоподібній і твердій. Газоподібна фаза води називається *парою*. Пара, яка знаходиться в термодинамічній рівновазі з рідиною (тобто в стані, коли число молекул, що переходить із рідини в пар, дорівнює числу молекул, що повертаються в рідину за одиницю часу), називається *насиченою*. Під *вологістю* повітря розуміють наявність водяної пари у повітрі. Повітря, що містить водяну пару, називають *вологим*, а те, що не містить – *сухим*.

Розглянемо основні параметри вологості повітря.

*Абсолютна вологість повітря  $a$*  – кількість водяної пари у грамах, що знаходиться в  $1 \text{ м}^3$  повітря ( $\text{г/м}^3$ ).

*Пружність (парціальний тиск) водяної пари  $e$*  – тиск, який матиме водяна пара, що знаходиться в газовій суміші, якщо б вона одна займала об'єм, що дорівнює об'єму суміші при тій же температурі.

*Пружність насиченої пари  $E$*  – граничне значення тиску, яке відповідає рівновазі між парою і водою, тобто насиченому стану повітря при даній температурі. Пружність насиченої пари залежить від температури. Зв'язок пружності насиченої пари  $E$  з абсолютною температурою  $T$  має вигляд:

$$\lg E = 9,4 - \frac{2345}{T}, \quad (8.1)$$

де  $E$  – у мілібарах (гектопаскалях);  $T$  – у кельвінах.

*Відносна вологість повітря  $r$*  – відношення пружності водяної пари  $e$  до пружності насиченої пари  $E$  при даній температурі:

$$r = \frac{e}{E} \cdot 100\%. \quad (8.2)$$

Дефіцит вологості  $d$  – різниця між пружністю насиченої пари  $E$  і пружністю водяної пари  $e$  при даній температурі:

$$d = E - e. \quad (8.3)$$

Точка роси  $T_d$  – температура, при якій повітря, якщо його охолодити при сталому тиску, стає насиченою водяною паром.

## 8.2. Вплив вологості на живі організми

*Вплив вологості на організм людини.* Людський організм бере участь у таких процесах теплообміну як випаровування (через потовиділення), теплову конвекцію та теплове випромінювання. Перший процес суттєво залежить від вологості: при високих рівнях вологості повітря ефективність потовиділення тіла людини зменшується. Комбінація високих температур та високої вологості провокує обмеження теплообміну між кровоносними судинами людини та довкіллям через теплопровідність. Така ситуація може призвести до *гіперпірексії* – підвищення температури тіла вище  $41,1^{\circ}\text{C}$ . Кількість крові, що досягає внутрішніх органів тіла зменшується, що може викликати *тепловий удар* (*гіпертермію*).

Оптимальними рівнями відносної вологості для людини в домашніх умовах можна вважати діапазон від 30 % до 65–70 %, хоча рекомендований інтервал становить 30–50 %.

*Вплив вологості на тварин* Відносна вологість відіграє значну роль у життєдіяльності наземних тварин. Дійсно, повітря, що оточує тварину, містить менше вологи, ніж її власне тіло. Втрати води живим організмом відбуваються за рахунок кінцевих продуктів обміну речовин. Постачання організму водою забезпечується в процесі годівлі та пиття. Чим вища відносна вологість, тим менша різниця між зовнішнім та внутрішнім середовищами тварини і тим відповідно менша потреба в зниженні втрат води або в протидії їм. Слід зазначити, що всі тварини відрізняються здатністю пристосовуватися до певних значень відносної вологості. На це впливає спосіб життя і навколишні умови. Про це свідчить також залежність від вологості температури тіла амфібій, рептилій, комах. Суттєво впливає вологість на поширення наземних тварин, які через спосіб підтримання водного балансу залишаються “водними” – земноводних, наземних ракоподібних, нематод, дощових черв’яків, моллюсків тощо. Зазвичай, вони мешкають там, де відносна вологість близька до 100 %.

*Вплив вологості на мікроорганізми.* Виживання мікроорганізмів, що мешкають у повітрі приміщень, залежить від відносної вологості.

Активність інфекційних бактерій та вірусів зводиться нанівець в інтервалі відносної вологості 40–70 %. Алергенні кліщі та гриби припиняють свою активність, якщо рівень відносної вологості не перевищує 50 %, тоді як максимальна активність спостерігається при 80 %. Спори плісені та кліщі викликають такі захворювання людини як алергія та астма. Оптимальним з точки зору здоров'я людини слід вважати відносну вологість повітря приміщень 40–60 %.

Рослини мають надземну частину, що зазнає такі ж втрати води, як і тварина, але підземна частина має безпосередній контакт з середовищем, з якого постачається вода. Крім того, вода є не тільки зовнішнім фактором, але й ресурсом, що забезпечує життєдіяльність рослини. Саме тому відносна вологість значно впливає на швидкість втрати води при транспірації. Простір листка в районі продихів характеризується майже насиченим станом повітря, тоді як тиск водяної пари в атмосферному повітрі залежить від відносної вологості повітря та його температури. Якщо відносна вологість повітря підвищується, рівень транспірації зменшується, оскільки вода випаровується легше у сухе повітря, ніж у насичене. І навпаки – низькій рівень відносної вологості стимулює дифузію води з продихового простору у зовнішнє повітря.

### 8.3. Вимірювання вологості

*Аспіраційний психрометр Асмана* (прилад було створено у XIX сторіччі А.Р. Асманом) містить вентилятор 1, який обдуває два термометри – змочений 2 та сухий 3; ціна поділки термометрів становить 0,2 °С. Термометри розміщені у металевих захисних трубках 4, які потім з'єднані в одну. Резервуар одного з термометрів обмотаний батистом, що змочується. При вимірюванні вологості психрометр встановлюють вертикально і обдувають повітрям обидва термометри за допомогою вентилятора (рис. 8.1).

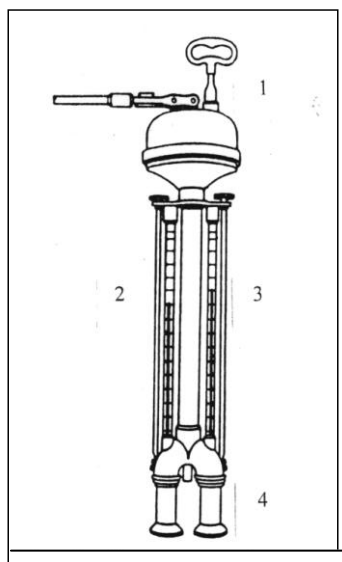


Рис. 8.1. Аспіраційний психрометр Асмана

З поверхні резервуара змоченого термометра відбувається випаровування води, яке залежить від вологості навколишнього повітря. За допомогою аспіраційного психрометра можна визначити пружність водяної пари  $e$  за психрометричною формулою:

$$e = E_1 - A(t_C - t_{3M})p_A, \quad (8.4)$$

де  $E_1$  – пружність насиченої пари, яка відповідає температурі змоченого термометра;  $A$  – психрометричний коефіцієнт ( $A = 6,62 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , якщо швидкість руху повітря становить 3 м/с);  $t_C$  – температура сухого термометра;  $t_{3M}$  – температура змоченого термометра;  $p_A$  – атмосферний тиск (в мм рт.ст. або паскалях).

Пружність насиченої пари  $E_1$ , яка відповідає температурі змоченого термометра, та пружність насиченої пари  $E$ , яка відповідає температурі сухого термометра, визначають у мм рт.ст. (табл.1 додатка) або в паскалях (табл. 2 додатка).

Недоліком аспіраційного психрометра є те, що вентилятор захоплює повітря тільки на відстані декількох сантиметрів, що не дає змогу точно визначити вологість на певних ділянках. Крім того, величина психрометричного коефіцієнту  $A$  залежить від швидкості вентиляції, температури та типу психрометра. Величина  $A = 6,62 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  достовірна для швидкостей вентиляції, що перевищують 3 м/с. Залежність величини  $A$  від швидкості вентиляції наведено в табл. 8.1.

#### 8.1. Залежність величини психрометричного коефіцієнту $A$ від швидкості вентиляції

Психрометричний коефіцієнт $A \cdot 10^{-4}, \text{ K}^{-1}$	13,0	9,0	7,8	7,1	6,7
Швидкість вентиляції, м/с	0,12	0,50	1,00	2,00	4,00

Залежність абсолютної похибки вимірювань вологості аспіраційним психрометром з ціною поділки  $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$  від температури (табл.8.2) свідчить, що похибками можна знехтувати при температурах, що перевищують  $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ , тоді як зменшення температури викликає суттєве збільшення похибок.

## 8.2. Залежність абсолютної похибки вимірювань вологості від температури

Відносна вологість, %	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C
10	6,0	3,2	2,0	1,3
50	6,3	3,5	2,2	1,3
100	6,7	4,0	2,5	1,9

Психрометр Асмана може бути застосований для автоматизованих вимірювань вологості повітря (рис. 8.2). З цією метою прилад обладнаний судиною з достатньою для довготривалих вимірювань кількістю води, помпою для її накачування та контактними термометрами, які подають результати вимірювань у пам'ять системи реєстрації.



Рис. 8.2. Автоматизований аспіраційний психрометр Асмана

*Психрометр Августа.* Прилад містить два термометри, закріплені на одній оправі. Резервуар одного з термометрів обмотаний бати́стом, що змочується. Сухий термометр вимірює температуру навколишнього повітря. З поверхні резервуара змоченого термометра відбувається випаровування води, яке залежить від вологості навколишнього повітря. Температура, яку показує зволожений термометр, завжди менша, ніж температура, яку показує сухий термометр.

Отже, обидва термометри завжди показують певну психрометричну різницю температур  $\Delta t = t_C - t_{ЗМ}$ , яка залежить від відносної вологості. Чим більша відносна вологість, тим менша психрометрична різниця. Якщо відносна вологість  $r = 100 \%$ , психрометрична різниця  $\Delta t = 0$ . На основі вимірювань температур сухого та змоченого термометрів визначають відносну вологість за допомогою таблиці, що нанесена на панелі приладу (див. додаток).

*Волосяний гігрометр.* Дія приладу базується на здатності знежиреної волосини змінювати свою довжину при зміні вологості (рис. 8.3). Водяна пара спроможна конденсуватися в капілярних порах людської волосини. Збільшення вологості призводить до зменшення угнутості менісків води в порах, завдяки чому волосина видовжується. Видовження волосини відбувається пропорційно логарифму відносної вологості. Пучок таких волосин використовують в *гігрографі* – приладі для безперервного запису відносної вологості повітря (рис. 8.4).

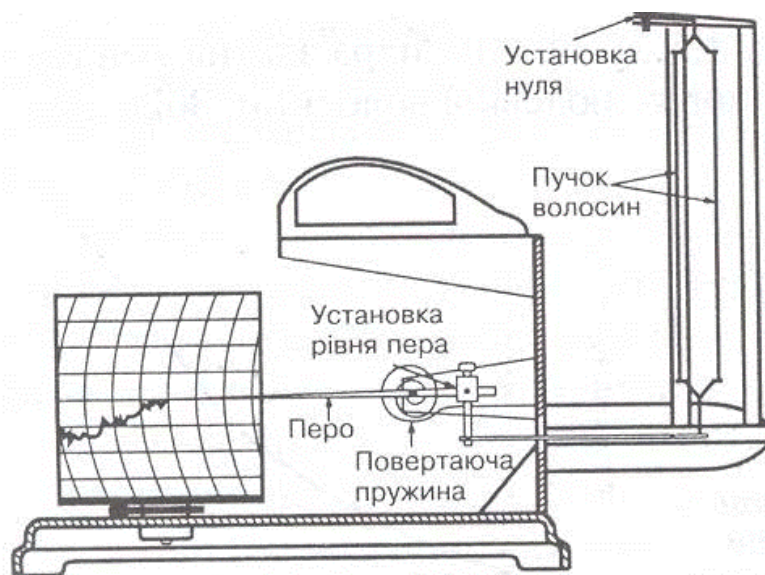


Рис.8.4. Схема волосяного гігрографа

Інші матеріали можуть бути застосовані як сенсори в гігрометрах – нейлон, бавовна, кишкова мембрана корови або свині. Перевагою волосяних гігрометрів є незалежність результатів вимірювань від температури – при зміні температури від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  величина похибки вимірювань знаходиться в інтервалі 1-3 %; кишкова мембрана демонструє найбільшу чутливість до зміни вологості. Волосяні гігрометри мають просту конструкцію та невисоку ціну. Недоліком волосяних гігрометрів є збільшення часового відгуку від температури. З табл.8.3 видно, що зменшення температури призводить до значного збільшення відгуку.

### 8.3. Вплив температури на часовий відгук (в секундах) різних гігрометрів.

Тип сенсо- ра	20 °С	10 °С	0 °С	-10 °С	-20 °С	-30 °С
Звичайна волосина	30	40	55	175	400	800
Ламінована волосина	10	10	12	15	20	30
Кишкова мембрана	6	10	20	50	100	200

Ще одним недоліком гігрометрів є явище гістерезису – якщо гігрометр зберігається протягом декількох днів в сухому приміщенні, результати вимірювання вологості можуть значно (до 15 %) відрізнятися від тих, що отримані за допомогою гігрометра, який тримали в вологому приміщенні. Через це гігрометри такого типу вимагають постійного калібрування.

*Вимірювання вологості за допомогою номограм.* Взаємозв'язок між параметрами вологості може бути представлений графічно за допомогою номограм.

#### Приклад

Визначити за допомогою номограм пружність  $e$  водяної пари, пружність  $E$  насиченої пари, що відповідає температурі сухого термометра, та пружність  $E_I$  насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра, відносну вологість  $r$ , дефіцит вологості  $d$  і точку роси  $T_d$ , якщо температура сухого термометра 30 °С, а температура змоченого термометра 19 °С.

#### Розв'язання

1. На горизонтальній осі номограм (рис. 8.5) з точки, що відповідає температурі змоченого термометра 19 °С (точка  $A$ ), проводимо вертикальну лінію  $AB$  до перетину з кривою  $r = 1,0$  (точка  $B$ ).

2. З точки  $B$  проводимо горизонтальну лінію  $BV$  до перетину з лівою вертикальною віссю номограм (точка  $V$ ). На цій осі визначаємо пружність  $E_I$  насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра:  $E_I = 22,5$  гПа.

3. З точки  $B$  проводимо похилу лінію  $BD$  до перетину з вертикальною лінією  $ГД$ , що відповідає температурі сухого термометра 30 °С (точка  $Д$ ).

4. З точки  $Д$  проводимо горизонтальну лінію  $ДЖ$  до перетину з лівою віссю номограм (точка  $Ж$ ), яка дає значення пружності  $e$  водяної пари при даній температурі:  $e = 15$  гПа.

5. З точки  $Г$ , що відповідає температурі сухого термометра, проводимо вертикальну лінію  $ГЗ$  до перетину з кривою  $r = 1,0$  (точка  $З$ ).

6. З точки  $З$  проводимо горизонтальну лінію  $ЗІ$  до перетину з лівою вертикальною віссю номограм (точка  $І$ ). На цій осі визначаємо пружність  $E$  насиченої пари, що відповідає температурі сухого термометра:  $E = 42,5$  гПа.

7. З точки  $D$  проводимо лінію  $DK$ , паралельну найближчій кривій номограми, до перетину з правою вертикальною віссю номограми (точка  $K$ ), яка дає значення відносної вологості при даній температурі:  $r = 0,35$ .

8. На лівій вертикальній осі визначаємо різницю між значеннями  $E$  та  $e$  (відстань  $IЖ$ ), яка відповідає дефіциту вологості:  $d = 42,5 - 15 = 27,5$  гПа.

9. Знаходимо точку  $L$  перетину прямої  $ДЖ$  з кривою  $r = 1,0$  (точка  $L$ ) і визначаємо на горизонтальній осі номограми точку роси:  $T_d = 12^\circ\text{C}$ .

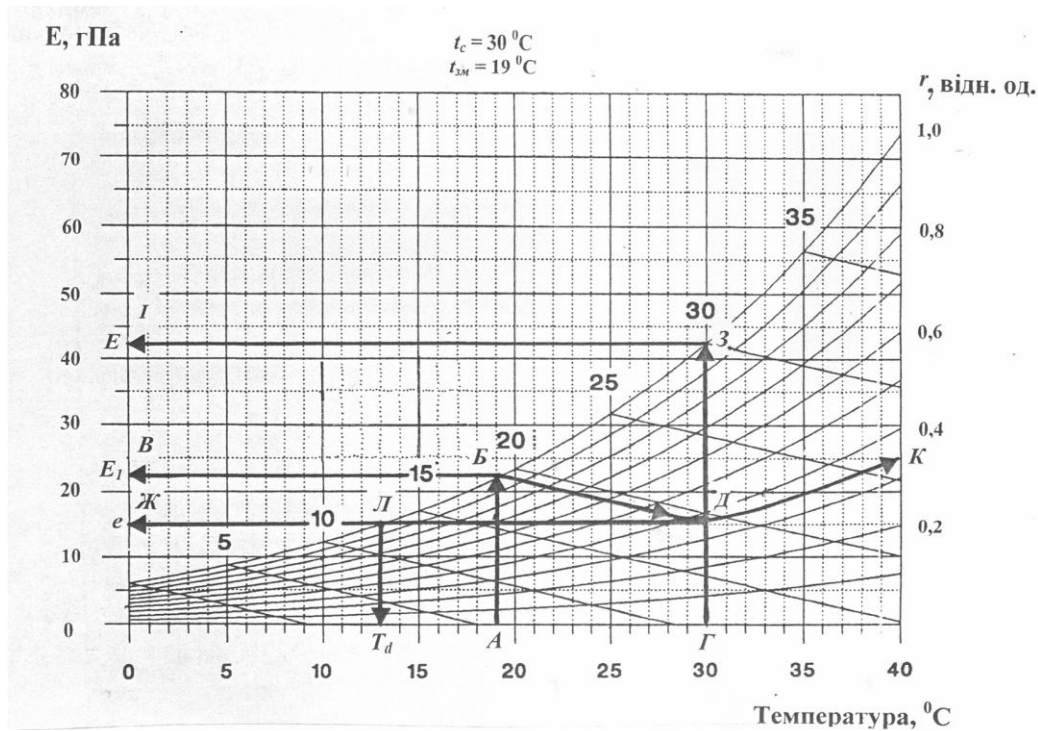


Рис. 8.5. Процедура визначення параметрів вологості за допомогою номограми

#### Контрольне завдання

Визначити за допомогою номограми (рис. 8.6) пружність  $e$  водяної пари, пружність  $E$  насиченої пари, що відповідає температурі сухого термометра, та пружність  $E_1$  насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра, відносну вологість  $r$ , дефіцит волості  $d$  і точку роси  $T_d$ , якщо температура сухого термометра та температура змоченого термометра визначаються за таблицею згідно з варіантом, що встановлений викладачем.

Варіант	Температура сухого термометра	Температура змоченого термометра
1	28	23
2	32	28
3	35	30
4	31	20
5	25	18
6	36	32



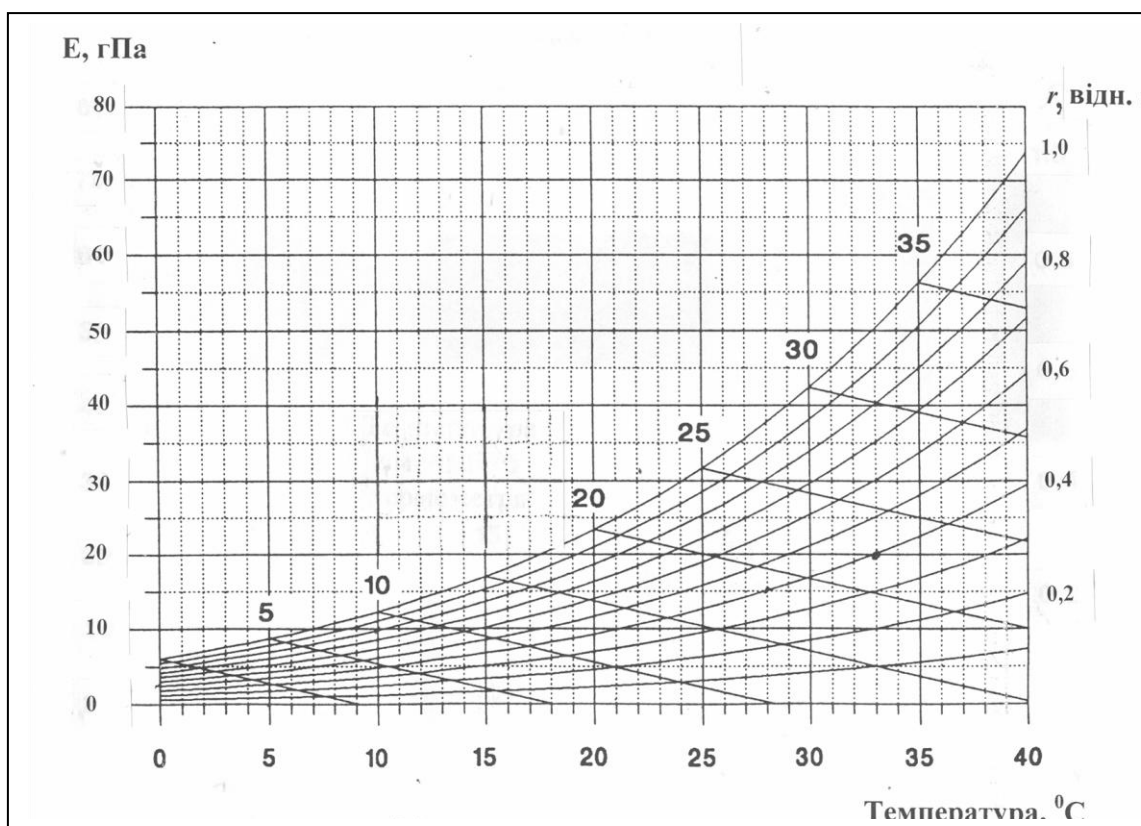


Рис. 8.6. Номограма для вимірювання параметрів вологості

Вимірювання вологості за віртуальними психрометричними таблицями. Використовуючи ці таблиці (для цього треба зайти в Інтернеті на сайт <http://www.met.rdg.ac.uk/~swshargi/MicroMetSoft.html>), можна за атмосферним тиском, температурами сухого і змоченого термометрів визначити пружність водяної пари  $e$ , пружність насиченої пари  $E$ , абсолютну вологість  $a$ , відносну вологість повітря  $r$ , масову частку води  $q$  та точку роси  $T_d$ .

**Сорбційний гігрометр.** В основу приладу покладено вимірювання залежності електропровідності вологосорбуючої плівки від вологості середовища, яке аналізується. Вологочутливий елемент гігрометра виготовлений з полікарбонату з намотаними на нього провідниками з паладієво-срібного стопу; на корпус елемента нанесено вологосорбуючу стрічку, що містить сіль  $LiCl$ .

**Ємнісний гігрометр.** Основу приладу становить гігроскопічна полімерна плівка, з обох боків якої розташовані пористі металеві електроди, що утворюють конденсатор ємністю близько 500 пФ (рис. 8.7). Внаслідок поглинання плівкою молекул води об'єм плівки збільшується, відстань між електродами також збільшується, що призво-

дить до зміни ємності конденсатора. Ємнісний гігрометр застосовується для вимірювання відносної вологості.

Перевагою приладу є його компактність (розміри приладу становлять  $6 \text{ мм}^2$ ), слабка залежність результатів вимірювань від зовнішньої температури, лінійність шкали в області 0–80% відносної вологості, швидкодія, малі значення гістерезису.

Недоліком приладу є вплив зовнішніх забруднень на результати вимірювань. Гігрометри цього типу використовують у засобах автоматизованого контролю вологості повітря.

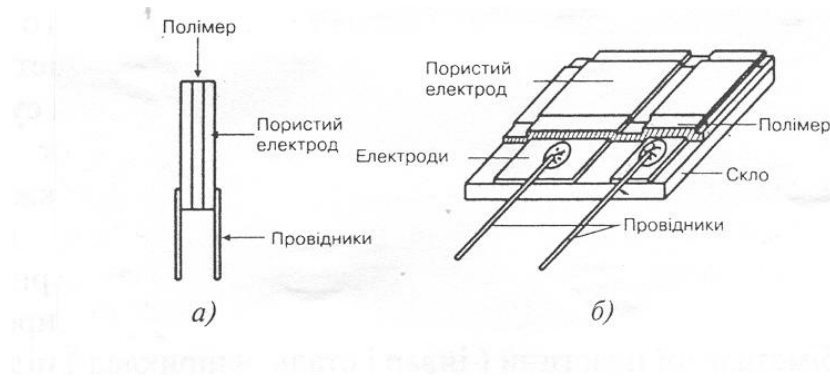


Рис. 8.7. Ємнісний гігрометр: а – гігроскопічна полімерна плівка з металевими електродами; б – конструкція гігрометра

*Конденсаційний гігрометр.* Один з методів оцінки абсолютної вологості заснований на вимірюванні точки роси. Якщо плоску гладеньку поверхню охолоджувати, можна спостерігати конденсацію вологи на ній. Температура поверхні в цей момент дуже близька до той, при якій повітря стає насиченою водяною парою, тобто до точки роси. Залишається тільки точно виміряти цю температуру. На рис. 8.8 видно, що конденсаційний гігрометр складається з маленького дзеркала, на яке нанесено тонкий антикорозійний шар золота.

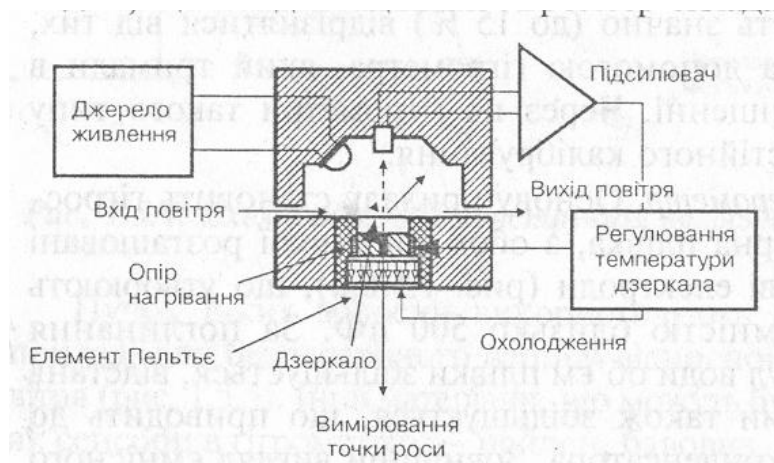


Рис. 8.8. Конденсаційний гігрометр

Дзеркало охолоджується напівпровідниковим елементом, що працює на основі ефекту Пельтьє, і опромінюється фотодіодом. Коли поверхня дзеркала покривається росю, поверхня дзеркала починає розсіювати оптичне випромінювання; вертикальна компонента розсіяного випромінювання реєструється фотодетектором, електричний сигнал з виходу якого підсилюється і подається на систему підігрівання дзеркала. Нагріте дзеркало знову може бути охолоджено і процес вимірювань продовжується. Визначення температури дзеркала за допомогою термодетектора дає можливість оцінити абсолютну вологість повітря.

Перевагою приладу є його висока чутливість, можливість вимірювання абсолютної вологості в широкому інтервалі температур ( $-80 - +100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) з точністю близько  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Недоліком приладу є спотворення результатів вимірювання при низьких температурах, необхідність контролювати якість поверхні дзеркала, складність конструкції, дорожнеча.

#### 8.4. Вологість ґрунту

Ґрунт складається з твердих частинок, пори між якими заповнені повітрям (*сухий ґрунт*) або водою (*ґрунтовий розчин*). Але ці дві ситуації – екстремальні. Взагалі в порах є і повітря, і вода.

*Вологість відносно сухої маси* – відношення маси води до сухої маси:

$$\theta_m = \frac{m_b}{m_c} = \frac{\rho_b b S}{\rho_c c S} = \frac{\rho_b b}{\rho_c c}, \quad (8.5)$$

де  $\rho_b$  і  $\rho_c$  – густина води і сухого ґрунту.

*Вологість у процентах сухої маси* визначається за виразом:

$$P_m = \theta_m \cdot 100\%. \quad (8.6)$$

*Об'ємна вологість* – відношення об'єму води до загального об'єму ґрунту:

$$\theta_v = \frac{V_b}{V_{cp}} = \frac{b S}{S D} = \frac{b}{D}. \quad (8.7)$$

*Об'ємна вологість у процентах* визначається як:

$$P_v = \theta_v \cdot 100\% = 100\% \frac{b}{D}. \quad (8.8)$$

### 8.5. Вимірювання вологості ґрунту

*Гравіметричний метод* базується на визначенні маси води і маси сухого ґрунту. Зразок ґрунту нагрівають до  $105^{\circ}\text{C}$  до отримання сталої ваги; процес триває 10–12 год. Вологість ґрунту визначають як відношення маси втраченої води до маси сухого ґрунту. Якщо потрібно оцінити об'ємну вологість, останнє відношення помножують на відношення об'ємної щільності ґрунту до густини води. Перевагою методу є можливість брати зразки безпосередньо з ґрунту за допомогою бура, простота процесу обчислень, невисока вартість обладнання. До недоліків належать складність визначення води в ґрунті з неоднорідним профілем, потреба у багатьох зразках при дослідженнях залежності вмісту води від часу та простору, руйнівність методу та його довготривалість.

*Нейтронний метод* використовує оцінку послаблення потоку швидких нейтронів атомами водню, що містяться в ґрунтовій воді. Металевий зонд діаметром близько 40 мм, що містить джерело швидких нейтронів (суміш радону та берилію, 2–5 мКі, або суміш  $^{241}\text{Am}$  та берилію, 100 мКі) і детектор повільних нейтронів устромляють у ґрунт (рис. 8.6).

Швидкі нейтрони (4,5–5,0 MeV або 1–12 MeV) поширюються радіально в ґрунті. Внаслідок пружних зіткнень з ядрами речовини ґрунту вони втрачають свою кінетичну енергію; рівень послаблення швидких нейтронів пропорційний кількості атомів водню, суттєвим джерелом яких є ґрунтова вода. Повільні нейтрони (0,025 eV) оточують зонд, деякі з них потрапляють на детектор. Сигнал з виходу детектора через кабель подається на систему реєстрації.

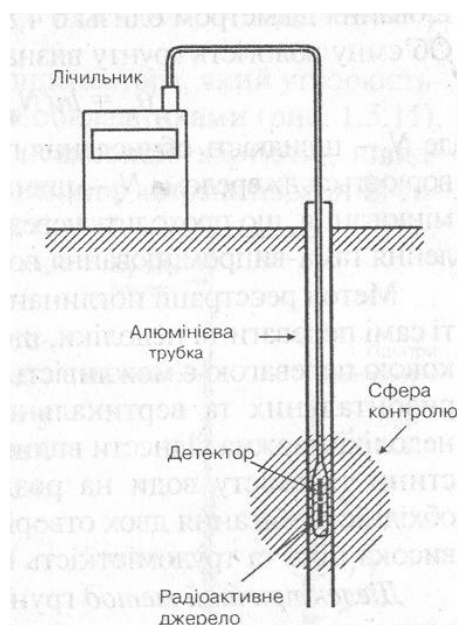


Рис. 8.6. Нейтронний метод визначення вологості ґрунту

*Перевагами* методу є можливість оцінки води в великих ґрунтових об'ємах, здатність вимірювати об'ємну вологість ґрунту, неруйнівність методу, швидкодія, здатність вимірювати вологість ґрунту протягом довгого періоду часу.

*Недоліками* є необхідність роботи з радіоактивними джерелами, потреба у калібруванні приладу, дорожнеча обладнання, неточність вимірювань поблизу ґрунтової поверхні.

*Вимірювання поглинання гама-випромінювання.* Метод передбачає визначення вологості ґрунту у шарах товщиною 1–2 см. Принцип методу полягає в оцінці залежності рівня поглинання гама-випромінювання від вмісту ґрунтової води за умову постійності щільності ґрунту. Як джерело гама-випромінювання використовують  $^{137}\text{Cs}$  (25 мКі). Потік випромінювання діаметром близько 4,8 мм формується коліматором. Об'ємну вологість ґрунту визначають за виразом:

$$\theta_v = \ln(N_d/N_e)/\mu d, \quad (8.9)$$

де  $N_d$  – швидкість лічіння гама-випромінювання, що утворюється джерелом;  $N_e$  – швидкість лічіння гама-випромінювання, що проходить через ґрунт;  $\mu$  – коефіцієнт послаблення гама-випромінювання водню;  $d$  – товщина зразка.

Метод реєстрації поглинання гама-випромінювання має ті ж самі переваги та недоліки, що й нейтронний метод. Додатковою перевагою є можливість вимірювань на незначних горизонтальних та вертикальних відстанях; до додаткових недоліків належать вплив неоднорідності ґрунтової щільності та вмісту води на роздільну здатність методу, необхідність строгого збігу двох отворів від джерела та детектора, висока вартість та трудоємність процесу вимірювань.

*Діелектричний метод* заснований на вимірюванні частотної залежності комплексної діелектричної проникності ґрунту  $\varepsilon(\omega)$ :

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_p(\omega) + i\varepsilon_y(\omega), \quad (8.10)$$

де  $\varepsilon_p(\omega)$  – реальна частина  $\varepsilon(\omega)$ ;  $\varepsilon_y(\omega)$  – уявна частина  $\varepsilon(\omega)$ ;  $i$  – корінь квадратний з  $-1$ ;  $\omega$  – кутова частота.

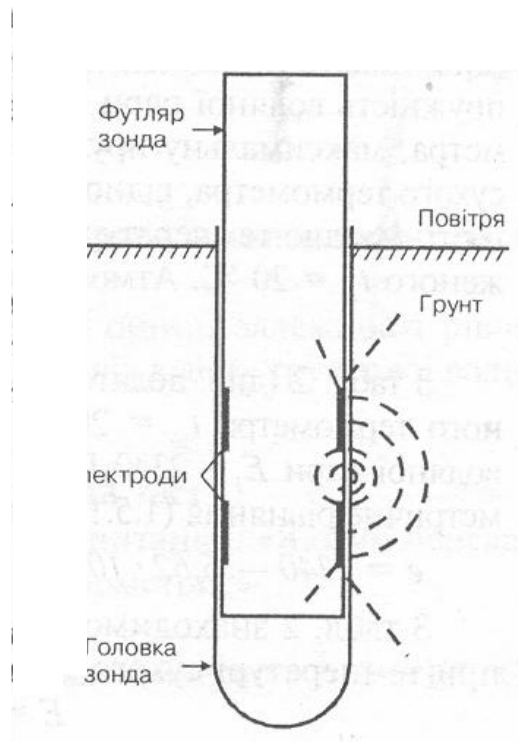
Діелектрична проникність речовини характеризує поляризацію діелектриків під впливом зовнішнього електричного поля; вона показує, у скільки разів сила взаємодії між зарядами у вакуумі перевищує силу взаємодії між тими ж зарядами в даному середовищі. Через екранізацію вільних зарядів зв'язаними, які утворюються внаслідок по-

ляризації середовища, виникає ослаблення взаємодії зарядів. Діелектрична проникність води є майже сталою величиною (близько 80), тоді як діелектрична проникність ґрунту дуже чутлива до об'ємної вологості ґрунту. Наприклад, зміні вмісту води у ґрунті від 20 % до 21,8 % відповідає зміна діелектричної проникності ґрунту від 3 до 5.

На практиці, вимірювання діелектричної проникності ґрунту здійснюють за допомогою декількох підходів:

1) визначення опору між двома електродами, розміщеними в ґрунті. Сенсор такого типу компактний, але проблема полягає в тому, що опір ґрунту суттєво залежить від концентрації іонів у ґрунті, через що процес вимірювань потребує калібрування;

2) вимірювання ємності конденсатора, який утворюється вологим ґрунтом між двома обкладинками (рис. 8.7).



**Рис. 8.7. Вимірювання ємності конденсатора, що утворюється вологим ґрунтом між двома обкладками**

Цей метод характеризується невисокою вартістю, швидкодією, він може бути застосований в автоматизованих системах вимірювання вологості ґрунту. Недоліком методу є необхідність калібрування;

Діелектричні методи характеризуються здатністю надавати абсолютні величини вмісту води у ґрунті, вони можуть постачати інформацію з будь-якої глибини ґрунту з високою точністю.

*Метод часової рефлектометрії* передбачає генерацію високочастотного електромагнітного імпульсу та його поширення у ґрунт за допомогою двоелектродної або коаксимальної лінії (рис.8.8). Вимірюється час між моментом посилення імпульсу та його реєстрації приймачем після відбивання від ґрунту.

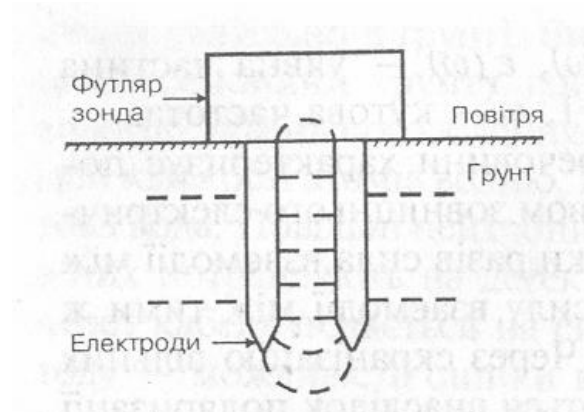


Рис. 8.8. Метод часової рефлектометрії

Швидкість поширення імпульсу в такій системі визначається за виразом:

$$v = c/\varepsilon, \quad (8.11)$$

де  $c$  – швидкість світла у вакуумі;  $\varepsilon$  – діелектрична проникність речовини.

Для чистої води ( $\varepsilon = 80$ ) швидкість поширення імпульсу становить  $3,3 \cdot 10^7$  м/с, тоді як в вологому ґрунті ( $\varepsilon = 16$ ) ця швидкість дорівнює  $7,5 \cdot 10^7$  м/с.

Перевагою методу часової рефлектометрії є швидкодія; метод пропонує вимірювання об'ємної вологості ґрунту та не потребує калібрування. Недоліком є вплив солоності води на результати вимірювань.

### Аудиторні завдання

Використовуючи психрометричне рівняння та дані табл.2 (див. додаток), знайти насиченість водяної пари  $e$ , максимальну насиченість водяної пари  $E$ , при температурі змоченого термометра, максимальну насиченість водяної пари  $E$  при температурі сухого термометра, відносну вологість повітря  $r$  та дефіцит вологості  $d$  для заданих значень температури сухого та змоченого термометрів. Атмосферний тиск становить 105 Па.

Варіант	Температура сухого термометра $t_c, ^\circ\text{C}$	Температура змочено- го термометра $t_{зм}, ^\circ\text{C}$ .
1	25	20
2	27	22
3	33	22
4	30	24
5	24	18
6	30	19

### Аудиторні завдання

Використовуючи формулу ( 8.1 ), знайти пружність насиченої пари  $E$  (мбар) при температурі 313 К.

### Альтернативні тести

Чи вірно ствердження, що:

1. гравіметричний метод базується на визначенні маси води і маси сухого ґрунту: Так Ні

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “Метод вимірювання вологості ґрунту – принцип його реалізації”

- |  |  |
|--|--|
| <i>а. гравіметричний метод</i>         | <i>1.реєстрація часу проходження імпульсу після його відбивання від ґрунту</i> |
| <i>б. нейтронний метод</i>             | <i>2. вимірювання частотної залежності діелектричної проникності ґрунту</i>    |
| <i>в. метод часової рефлектометрії</i> | <i>3. оцінка рівня поглинання гама-випромінювання</i>                          |
| <i>г. оцінка потоку нейтронів</i>      | <i>4. визначення маси води і сухого ґрунту</i>                                 |
| <i>д. діелектричний метод</i>          | <i>5.оцінювання послаблення потоку швидких нейтронів</i>                       |



### **Акордно-вибірковий тест**

Знайти вірні відповіді на запитання

*“Якими перевагами характеризуються емнісні гігрометри?”*

*1. невисока ціна; 2. проста конструкція; 3. лінійність шкали в інтервалі 0-80 % відносної вологості; 4. можливість вимірювання вологості в інтервалі температур від  $-80$  до  $+100$  °C.*

### **Репродуктивні тести**

1. Що треба зробити, щоб застосувати психрометр Асмана для автоматизованих вимірювань вологості повітря?
2. Від чого залежить величина психрометричного коефіцієнту?

### **Конструктивний тест**

Пояснити механізми впливу солоності води на результати вимірювань об'ємної вологості ґрунту за допомогою методу часової рефлектометрії.

## 9. ТЕМПЕРАТУРА



### 9.1. Температурні шкали

*Температура* – фізична величина, що характеризує стан термодинамічної рівноваги макроскопічної системи. Температура характеризує, наскільки гарячим чи холодним є тіло.

Кількісне вимірювання температури можливе завдяки використанню термометра та впровадженню температурних шкал. *Термометр* – це прилад для кількісної оцінки температури будь-якої системи.

Один із перших термометрів “флорентійський термоскоп” (1610 р.) містив у трубці воду або вино. Великий герцог Тоскани, Фердинанд II, запропонував спирт як робочу речовину термометра, який мав 50 поділок, але не мав нуля.

Далі – датський астроном Реомюр (Ole Roemer) у 1743 р. запропонував шкалу між температурою танення льоду ( $0^{\circ}\text{R}$ ) та температурою кипіння води ( $80^{\circ}\text{R}$ ).

Німецький виробник інструментів Фаренгейт (Daniel Gabriel Fahrenheit) у 1724 р. розробив температурну шкалу на основі розміщення термометра у: 1) суміші морської солі, льоду та води ( $0^{\circ}\text{F}$ ); 2) цієї ж суміші, але без солі ( $30^{\circ}\text{F}$ ); у ротовій порожнині здорової людини ( $96^{\circ}\text{F}$ ) [D.G. Fahrenheit. *Phil Trans. (London)*, 1724.-33.-78]. Температура кипіння води на цій шкалі відповідала  $212^{\circ}\text{F}$ , а замерзання  $32^{\circ}\text{F}$ . Останній інтервал було поділено на 180 поділок – градусів Фаренгейта (рис. 9.1).

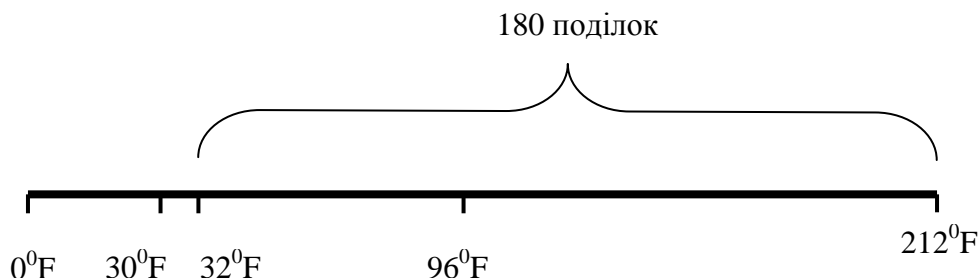


Рис. 9.1. Схема побудови шкали Фаренгейта (пояснення в тексті)

У 1745 р. Цельсій (Anders Celsius) зі Швеції застосував шкалу між температурою танення льоду ( $0^{\circ}\text{C}$ ) та температурою кипіння води ( $100^{\circ}\text{C}$ ). Ця шкала отримала назву *Міжнародної стоградусної шкали (Цельсія)*.

У 1933 р. Кельвін (Lord Kelvin, William Thompson) розробив *Термодинамічну температурну шкалу (Кельвіна)*, в основу якої було покладено використання *потрійної точки* речовин – точки на діаграмі стану, що відповідає рівноважному існуванню трьох фаз речовин. Так, потрійна точка води дорівнює  $273,16\text{ K}$ , а температура кипіння води  $373,16\text{ K}$ .

*Одиниці температури:*

$$\left. \begin{aligned} {}^{\circ}\text{C} &= K - 273,15; \\ K &= {}^{\circ}\text{C} + 273,15; \\ {}^{\circ}\text{C} &= 5/9({}^{\circ}\text{F} - 32); \\ {}^{\circ}\text{F} &= 9/5{}^{\circ}\text{C} + 32. \end{aligned} \right\} (9.1)$$

## 9.2. Температура атмосфери

*Тепловим режимом* атмосфери називають характер розподілу та зміни температури в атмосфері. Перенесення тепла між поверхнею Землі та атмосферою відбувається за рахунок таких шляхів тепловіддачі як *теплова конвекція, турбулентність, молекулярна теплопровідність та тепловипромінювання*. Найважливішими є турбулентність і теплова конвекція. Суттєво впливає на розподіл температури приземного шару повітря рослинний покрив.

За характером зміни температури з висотою атмосферу поділяють на *тропосферу* ( $220\text{ K}$ ), *стратосферу* ( $260\text{ K}$ ), *мезосферу* ( $180\text{ K}$ ), *термосферу* та *екзосферу* ( $2000\text{ K}$ ). Розподіл температури атмосфери з висотою наведено на рис. 9.2.

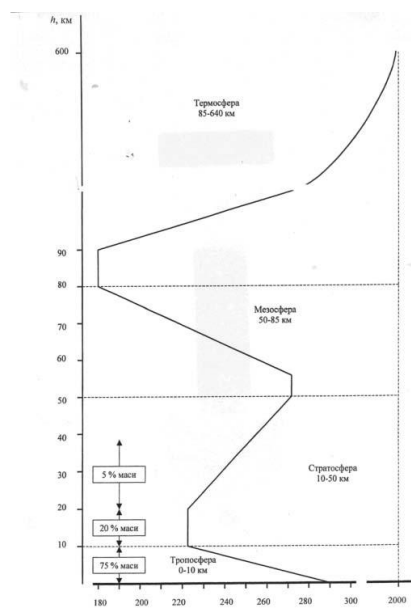


Рис. 9.2. Розподіл температури атмосфери з висотою

Сонце можна порівняти з абсолютно чорним тілом, температура якого дорівнює 6000 К. Спектральна область сонячного випромінювання становить 200–5000 нм; максимум випромінювання припадає на 500 нм.

Земна поверхня діє як абсолютно чорне тіло з температурою 288 К. Спектральна область випромінювання становить 4–50 мкм з максимумом 10 мкм.

Термін *тропосфера* походить від грецького слова *tropos*, що означає “змішувати”. У цьому шарі, що займає висоту близько 10 км, відбувається вертикальне перемішування повітря завдяки нагріванню земної поверхні короткохвильовим сонячним випромінюванням. Молекули двоокису вуглецю  $CO_2$ , метану  $CH_4$ , закису азоту  $N_2O$  та інших поглинають довгохвильове випромінювання земної поверхні та нагріваються. В тропосфері температура зменшується з висотою через переміщення повітря в горизонтальному напрямку.

*Стратосфера* займає область 10–50 км. Ультрафіолетова компонента сонячного випромінювання здатна розщепити молекулу кисню  $O_2$  на синглетний кисень  $O$ , що взаємодіє з  $O_2$  та утворює  $O_3$ . Температура стратосфери збільшується з висотою. У температурному режимі стратосфери відіграє роль озон  $O_3$ , який поглинає короткохвильове сонячне випромінювання, що викликає нагрівання стратосфери. Озоновий шар займає область висот 10–50 км з максимумом на висоті 20–25 км. Температура стратосфери залежить від густини озону – де вона більше, температура вище.

У *мезосфері* (від грецького *mesos* – середній), що займає область висот 50–85 км, температура зменшується з висотою, оскільки тут відбувається значне перемішування повітря завдяки вітру, швидкість якого досягає 150 м/с.

У *термосфері* (від грецького *thermos* – теплота), в області 85–640 км та *екзосфері* (від грецького *exo* – зовні), в області 500–1000 км температура зростає з висотою за рахунок високої кінетичної енергії молекул газів, що обумовлена поглинанням високоенергетичного сонячного випромінювання залишками кисню. Температура частинок термосфери може досягати 2000 °С, хоча там існує велика розрідженість повітря. Ультрафіолетове сонячне випромінювання викликає іонізацію молекул (іоносфера). Висока енергія частинок дає можливість покидати атмосферу.

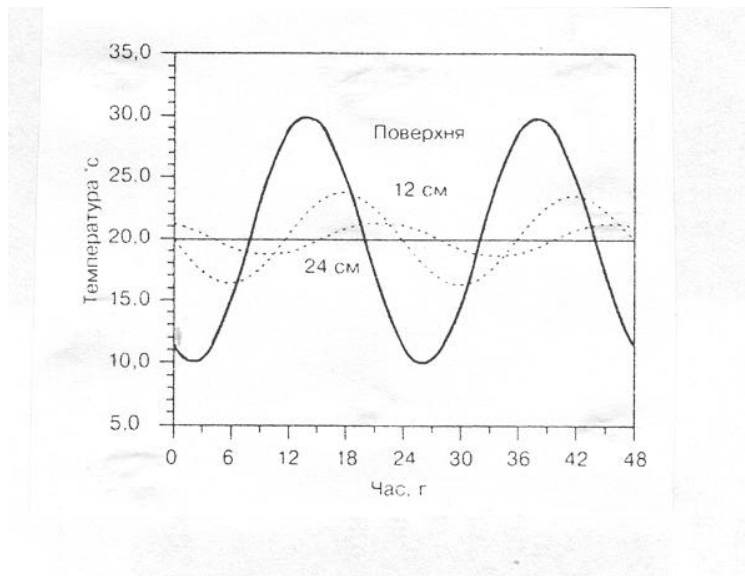
### 9.3. Температура ґрунту

Температура ґрунту залежить від таких факторів як *теплообмін з повітрям (теплопровідність і конвекція); тепловипромінювання;*

теплопровідність у ґрунті; хімічні і фізичні процеси, такі як випаровування, зволоження, конденсація.

Важливим фактором, який впливає на тепловий потік, що надходить у ґрунт, є колір останнього. Роль його зводиться в зміні альбедо і, таким чином, радіаційного балансу. Суттєво впливає на тепловий потік у ґрунт наявність ізолюючих шарів (гравію, соломи тощо) на поверхні. Нагрівання та охолодження ґрунту залежить від його теплоємності і теплопровідності. Теплоємність залежить від пористості і вологості ґрунту.

*Розподіл температури ґрунту з глибиною і часом.* На рис.9.3 наведено типові криві залежності температури ґрунту від часу та глибини. Видно, що максимальні зміни температури відбуваються на поверхні ґрунту, тоді як з глибиною амплітуда змін зменшується і набуває певний часовий зсув: якщо максимальна температура земної поверхні досягає близько 14 год, то з глибиною цей максимум “запізнюється” на 4 год для  $z = 12$  см і 7 год для  $z = 24$  см.



**Рис. 9.3. Типові криві залежності температури ґрунту від часу і глибини**

Розглянемо рівняння, що описує зміну температури в ґрунті, якщо відома температура поверхні. Ця модель передбачає, що властивості ґрунту однорідні за глибиною; крім того, враховується синусоїдний характер зміни температури з часом. З такими припущеннями рівняння, що моделює залежність температури ґрунту від глибини  $z$  і часу  $t$ , має вигляд:

$$T(z,t) = \langle T \rangle + A(0) \exp(-z/D) \sin[\omega(t-\delta) - z/D], \quad (9.2)$$

де  $\langle T \rangle$  - середня температура ґрунтової поверхні,  $A(0)$  – амплітуда зміни температури на поверхні,  $D$  – глибина загасання (  $D = 0,1$  м для вологого ґрунту і  $D = 0,03 \div 0,06$  м для сухого ґрунту ).

У багатьох випадках потрібно знати діапазон коливань температури на певній глибині. З врахуванням того, що функція синуса змінюється від  $-1$  до  $+1$ , останнє рівняння можна переписати так:

$$T(z,t) = \langle T \rangle \pm A(0) \exp(-z/D), \quad (9.3)$$

де знак “+” відповідає максимальній, а знак “–” – мінімальній температурі.

Щорічна зміна температури ґрунту з глибиною подібна за характером добовій зміні, за винятком іншої частоти (  $\omega = 2\pi/365$  ) за умову, що  $D$  становить близько 2 м.

#### Приклад

На якій глибині температура вологого ґрунту не відрізняється на  $\pm 0,5$  °С від середньої щодобової температури земної поверхні, якщо амплітуда зміни температури на поверхні становить  $\pm 15$  °С?

#### Розв’язання

Перепишемо рівняння ( 9.3 ) у вигляді:

$$\frac{z}{D} = - \ln \frac{T(z) - \langle T \rangle}{A(0)}.$$

Підставляємо числові дані:

$$\frac{z}{D} = - \ln \frac{0,5}{15} = 3,4.$$

Визначимо  $z$  для  $D = 0,1$  м:

$$z = 3,4D = 3,4 \cdot 0,1 = 0,41 \text{ м.}$$

#### Контрольне завдання

Побудувати графік залежності коливань температури ґрунту від глибини ( до 30 см ), якщо максимальна і мінімальна температури на поверхні становлять  $T_{\max} = 35$  °С і  $T_{\min} = 15$  °С, а коефіцієнт загасання  $D = 0,1$  м.

*Визначення глибини загасання.* Рівняння ( 9.2 ) і ( 9.3 ) використовують для опису зміни температури ґрунту з глибиною. З врахуванням того, що під час вимірювання температура ґрунту не змінюється за синусоїдним законом, можна оцінити глибину загасання  $D$ . Розв'яжемо рівняння ( 9.3 ) відносно  $T(z,t) - \langle T \rangle$  для двох різних глибин  $z_1$  і  $z_2$ :

$$\left. \begin{aligned} T(z_1) &= \langle T \rangle \pm A(0)\exp(-z_1/D); \\ T(z_2) &= \langle T \rangle \pm A(0)\exp(-z_2/D). \end{aligned} \right\} \quad (9.4)$$

Припускаючи, що амплітуда зміни температури на відповідних глибинах становить

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= T(z_1) - \langle T \rangle; \\ A_2 &= T(z_2) - \langle T \rangle, \end{aligned} \right\} \quad (9.5)$$

можна отримати вирази:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= A(0)\exp(-z_1/D); \\ A_2 &= A(0)\exp(-z_2/D). \end{aligned} \right\} \quad (9.6)$$

Звідси, виключивши  $A(0)$ , знайдемо глибину загасання:

$$D = \frac{z_1 - z_2}{\ln A_2 - \ln A_1}. \quad (9.7)$$

#### 9.4. Температура водойм

Зміна температури в водоймах відбувається не так, як у ґрунті. Теплоємність води в 2–7 разів перевищує теплоємність ґрунту. Крім того, температурний режим водойми визначається сонячним випромінюванням, яке проникає в глибину і нагріває воду. Впливає на зміну температури і турбулентність, завдяки чому інтенсивність теплоперенесення значно зростає. В цілому, в водному середовищі через високу теплоємність не відбуваються різкі зміни температури; температурні умови тут більш стабільні, ніж на суші.

У річках з повільною течією та озерах влітку поверхневі води нагріваються скоріше, ніж глибинні шари. Теплові випромінювання поглинається шаром води завтовшки 1–2 м. Цей верхній теплий шар називається *епілімніоном*, тоді як холодний нижній – *гіполімніоном*. Між ними розташований проміжний шар *металімніон*, в якому температура змінюється дуже швидко при невеликих змінах глибини. Наявність таких шарів призводить до утворення температурного градієнта.

Озера мають характерну температурну стратифікацію, яка залежить від пор року (рис. 9.4). Взимку поверхневий лід має температуру  $0^{\circ}\text{C}$ , тоді як під ним вода має температуру  $3,94^{\circ}\text{C}$  (густина води при цьому максимальна). Низька температура і зменшення проникності сонячного випромінювання призводить до придушення біологічної продуктивності озера. Влітку поверхнева вода нагрівається швидко і в верхніх шарах відбувається постійне перемішування води, що сприяє росту фітопланктону. Таким чином, продуктивність озер залежить від теплової стратифікації.

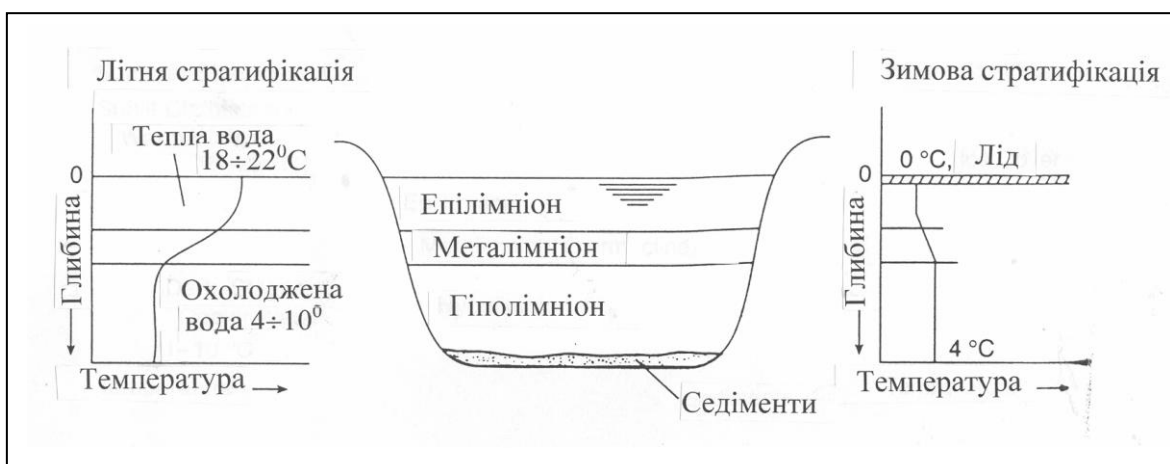


Рис.9.4.Теплова стратифікація по глибині озера улітку та зимою

### 9.5. Вплив температури на живі організми

Всі живі організми поділяють на *ендотермів*, які регулюють температуру тіла за рахунок внутрішньої теплопродукції, та *ектотермів*, які живляться від зовнішніх джерел тепла. Наприклад, ссавці і птахи є ендотермами, а інші тварини – ектотермами.

Ендотермні організми здатні підтримувати температуру тіла на постійному ( $35\text{--}40^{\circ}\text{C}$ ) рівні; саме через це вони віддають теплоту назовколишньому середовищу. Втрати тепла сповільнюються завдяки теплоізоляції, функції якої виконуюють волосяний покрив, підшкіряний жир, оперення, а також за допомогою регуляції кровотоку під поверхнею шкіри. Слід зазначити, що незважаючи на високу теплоізоляцію, процес збереження тепла у ендотермних тварин досягається завдяки інтенсивним метаболічним затратам.

В умовах спекотного і сухого клімату ендотермні тварини мають перевагу, обумовлену невеликим значенням відношення “поверх-



ня-маса” і високою теплоємністю. Через те, що тканини в основному складаються з води, теплоємність цих тканин становить  $c_v = 4186,8 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$  для інтервалу температур  $0\text{--}40^\circ\text{C}$ . Отже, чим більше тварина, тим більшу кількість теплоти містить її тіло при даній температурі. Важливу роль у процесі тепловіддачі відіграє регуляція кровотоку: при високих температурах кровоносні судини шкіри розширюються і тепловіддача збільшується.

Якщо температура зовнішнього середовища перевищує верхню границю термонеutralної зони, тепло активно розсіюється за допомогою процесу випаровування: або потовиділення, або теплової задишки (*поліпное*). Процес потовиділення не завжди супроводжується випаровуванням вологи. Ефективним засобом збереження в організмі тепла і води є дихання через рот (а не тільки через ніс). Тварина (наприклад, собака), яка страждає від перегрівання, вдихає через ніс, а видихає через рот, забезпечуючи додаткове випаровування з поверхні язика.

Вплив високих температур викликає збільшення швидкості обміну речовин, що сприяє підвищенню продукції теплоти. Крім того, процеси дихання і випаровування спричиняють зневоднення організму. Збільшення температури більше норми називається *гіпертермією*. Коли сільськогосподарських тварин, мешканців європейських країн, транспортують у тропічні або субтропічні зони, вони приречені на дію теплових стресів. Втрата апетиту, ураження здатності споживати, перетворювати та використовувати корми, порушення терморегуляції та обміну речовин – все це призводить, у свою чергу, до сповільнення розвитку тварин та зменшення тваринницької продукції.

У спекотну зволожену погоду тваринам важко віддавати тепло через те, що процеси випаровування неефективні. Фізична робота, яку змушені виконувати тварини, призводить до небезпечного підвищення температури тіла. Аналогічна ситуація відбувається, коли собаку закривають у машині, що знаходиться на сонці; продукти дихання насичують повітря водяною парою і подальші втрати теплоти стають неможливими. Перевищення температурою значень  $41,5\text{--}42,5^\circ\text{C}$  призводить до серйозного порушення функціонування організму і втрати свідомості, тобто до *теплого удару*. Неприятливий вплив високих температур пов’язаний з відносною вологістю повітря – чим менша відносна вологість, тим вища вірогідність зневоднення організму. Безумовно, суттєву роль відіграє тривалість дії високих температур.

Ефективним засобом протидії низьким температурам у ендотермних організмів є волосяний покрив або підшкірний жир, які вико-

нують функції теплоізолятора (теплопровідність хутра та жиру, як можна впевнитися з табл. 9.1, невисока).

#### 9.1. Теплопровідність деяких речовин

Речовина	Теплопровідність, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	Температура, $^{\circ}\text{C}$
<i>Гази</i>		
Повітря	0,0237	–10
«	0,0243	0
«	0,0250	10
«	0,0257	20
«	0,0264	30
«	0,0270	40
«	0,0277	50
Гелій	0,138	20
Водень	0,172	20
Азот	0,0234	20
Кисень	0,0238	20
<i>Рідкі та тверді речовини</i>		
		0
Вода	0,565	20
«	0,599	40
«	0,627	20
Бетон	2,43	20
Деревина	0,126	20
Пластмаса	0,04	
<i>Біологічні речовини</i>		20
Жир	0,205	20
Шкіра	0,502	20
М'язи	0,4	20
Хутро	0,036–0,063	

Зміна теплопровідності під час тепловіддачі здійснюється за рахунок інтенсивності периферійного кровотоку, або теплоізоляційної ефективності волосяного покриву або оперення. Регуляція шкіряного кровотоку забезпечується шунтуванням артеріальної крові (рис.9.5): у шкірі судини звужуються, тоді як потоки крові внутрішніх органів збільшуються. Теж саме відбувається у підшкіряному жирі.

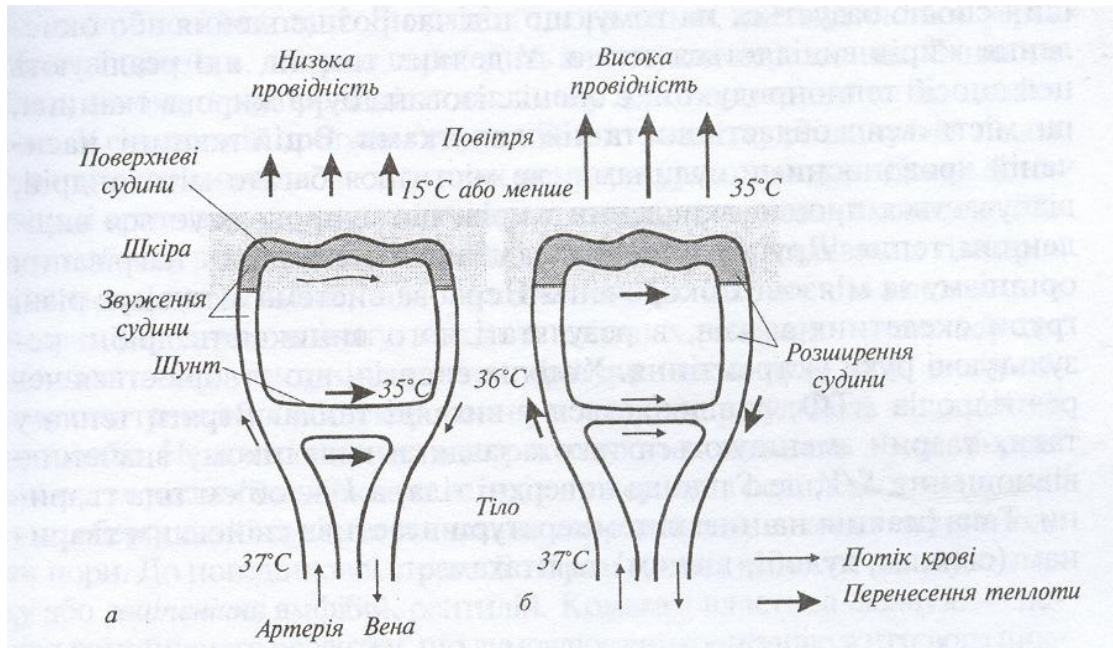


Рис. 9.5. Роль підшкірного кровотоку в регуляції теплопровідності тканин організму

Теплокровні тварини здатні адаптуватися до зміни температури навколишнього середовища шляхом зміни розмірів та форми тіла або окремих частин тіла. Так, африканський слон (*Loxodonta africana*) має зовнішні вуха, площа поверхні яких досягає 20 % загальної площі тіла тварини. Нагадаємо, що для слона масою 4000 кг теплові витрати досягають 4650 Вт. Рух зовнішніх вух дає можливість слону реалізувати ефективну терморегуляцію тіла. Розподіл температури вух слона залежно від температури довкілля наведено на рис. 9.6.

Видно, що з підвищенням зовнішньої температури від 18 °С до 32,1 °С посилюється потік крові в кровоносних судинах.

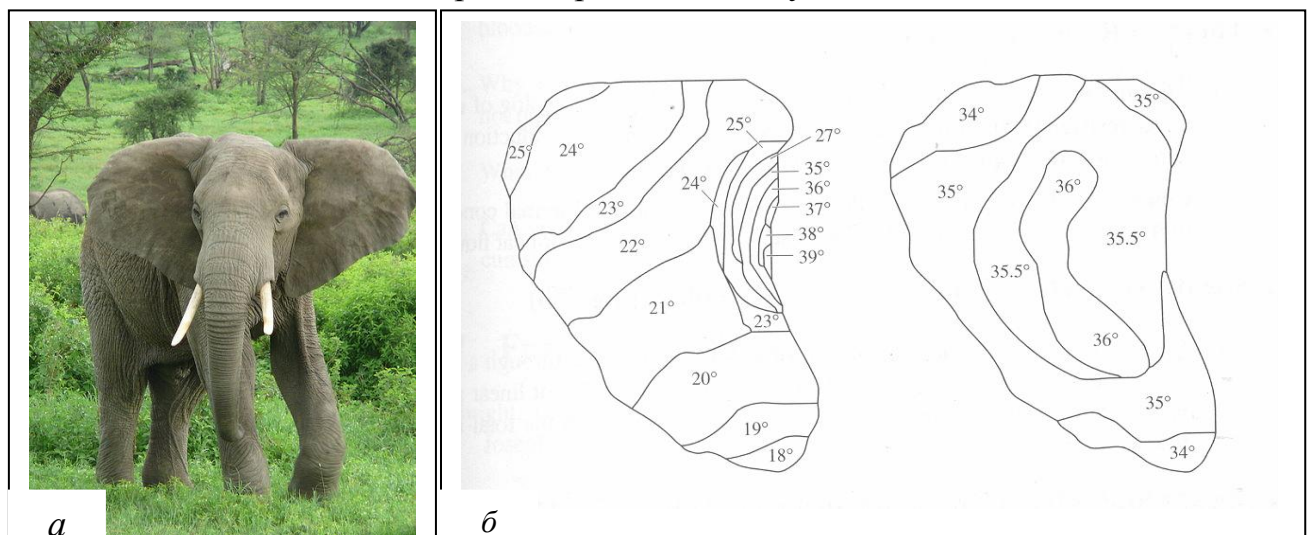


Рис. 9.6. Перенесення теплоти з поверхні зовнішніх вух слона: а – зовнішній вигляд африканського слона (*Loxodonta africana*); б – розподіл температури вуха слона залежно від температури довкілля

Шерсть позбавлена кровопостачання, тому її теплоізоляційні властивості змінюються при зміні кута нахилу волосся і товщини волосяного покриву тварини (рис. 9.6).

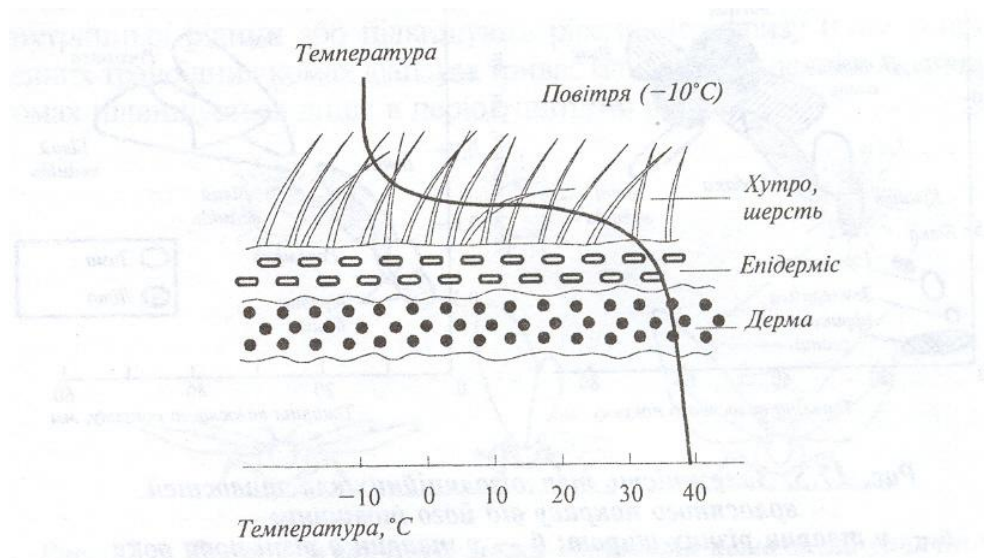


Рис. 9.7. Градієнт температури, що встановлюється на волосяному та шкіряному покриттях тварини

Якщо температура зовнішнього середовища менша нижньої границі термонеutralної зони, в процес залучається *термогенез*. Розрізняють два типи термогенезу – за рахунок активації по всьому організму ферментативних систем обміну жирів і через появу тремтіння.

Перший спосіб ґрунтується на тому, що під час розщеплення або окислення жирів виділяється тепло. У деяких тварин, які реалізують цей спосіб теплопродукції, є спеціалізована бура жирова тканина, що знаходиться в області шиї та проміж лопатками. В цій тканині, яка насичена кровоносними судинами і містить багато мітохондрій, відбувається процес окислення жирів, що супроводжується виділенням тепла.

Другий спосіб передбачає можливість нагрівання організму за рахунок м'язових скорочень. Нервова система активізує різні групи скелетних м'язів, внаслідок чого виникають дрібні результуючі рухи – тремтіння. Хімічна енергія, що утворюється через гідроліз АТФ, звільняється у вигляді тепла. Втрати тепла у таких тварин зменшуються також за рахунок невеликого значення відношення “поверхня/об’єм”.

Пінгвіни, які мешкають в екстремальних кліматичних умовах (температура повітря мінус 50 °С, швидкість руху повітря 160 км/г) рятуються від холоду, утворюючи великі скупчення (кількістю до 6000 особин біомасою до 100 т). Така агрегація птахів дає можливість зекономити 80 % тепла порівняно із звичайними птахами.

Вівцебики також утворюють взимку угруповання кількістю до 100, а тюлені – до 1000–1500 голів. Процеси агрегації також притаманні дрібним птахам, рептиліям та комахам під час холодної погоди.

Багато тварин, амфібій, рептилій, риб, безхребетних, комах використовують як прості підземні нори довжиною від кількох сантиметрів, так й розвинені підземні мережі тунелів та камер довжиною до кількох сот метрів. Так, американський байбак викопує близько 1 м<sup>3</sup> ґрунту, переміщуючи 320 кг ґрунту.

Використання нір дає можливість арктичним птахам мешкати при температурі 10–20 °С під сніговим покривом, тоді як зовнішня температура становить –10 °С.

Ще один спосіб адаптуватися до зовнішньої температури є використання тваринами певного забарвлення. Відомо, що біле та світле забарвлення характеризується більшим відбиванням сонячного випромінювання, тоді як чорне або темне призводить до його поглинання. Здатність змінювати забарвлення шкіри залежно від температури повітря демонструють хамелеони, ропухи, ящірки. Лабораторні експерименти з південноамериканською ропухою *Bokermannohyla alvarengai* довели, що під час утримання тваринки у темряві або при низькій (20 °С) температурі шкіра її становиться темною, тоді як умови освітлення або більш висока температура (30 °С) викликають посвітління шкіри.

Чорний колір спини пінгвінів дає можливість накопичити тепло завдяки сонячному випромінюванню в умовах суворого клімату Антарктиди.

Ектотермні організми отримують теплоту з навколишнього середовища за рахунок сонячного (прямого, розсіяного і відбитого) випромінювання, атмосферного випромінювання; теплообмін здійснюється шляхом теплопровідності, конвекції, випаровування і випромінювання.

У ектотермних організмів теплопровідність тіла висока, оскільки вони погано ізольовані. Внаслідок цього тепло, яке виділяється через обмінні процеси, швидко переходить у навколишнє середовище. З іншого боку, висока теплопровідність дозволяє легко поглинати тепло з довкілля.



В ектотермів протягом еволюційного розвитку розвинулася певна стратегія виживання в стресових температурних умовах. Деякі ектотермні організми спроможні змінювати частоту серцевих скорочень або кровотоку в поверхневих тканинах, завдяки чому нагрівання тіла проходить значно швидше, ніж охолодження. Ектотерми, що мешкають в умовах холодного клімату, мають у клітинах речовини-антифризи, що дозволяє витримувати температури нижче нуля; інші використовують тремтіння або скорочення м'язів, або регулюють кровоток крізь шкіру. Існують ектортерми, в тканинах яких не утворюються кристалики льоду. Можлива поведінкова терморегуляція за рахунок вибору місця або орієнтації тіла.

### 9.6. Вимірювання температури

*Рідинний термометр* – прилад для вимірювання температури, оснований на тепловому розширенні рідини. Явище теплового розширення рідини описується рівнянням:

$$\Delta V = \beta V \Delta T, \quad (9.8)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення рідини;  $\Delta V$  – зміна об'єму;  $\Delta T$  – зміна температури.

Рідина в термометрі підіймається завдяки тому, що коефіцієнти об'ємного розширення  $\beta$  рідини та скла значно відрізняються:  $1,81 \cdot 10^{-4} (^\circ\text{C})^{-1}$  у ртуті;  $10,6 \cdot 10^{-4} (^\circ\text{C})^{-1}$  у спирта;  $9,16 \cdot 10^{-4} (^\circ\text{C})^{-1}$  у толуена;  $0,25 \cdot 10^{-4} (^\circ\text{C})^{-1}$  у скла.

Рідинний термометр складається з тонкостінного скляного резервуара, з'єднаного зі скляним капіляром; для вимірювання температури термометр обладнаний шкалою (рис. 9.8).

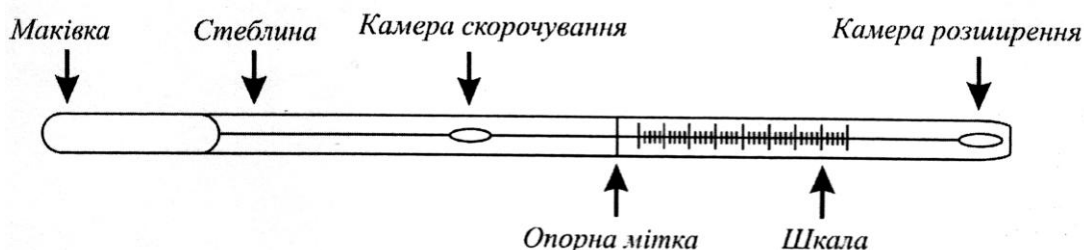


Рис. 9.8. Рідинний термометр

Як робочу рідину термометра вибирають такі речовини.

*Ртуть* – діапазон температур, у межах яких ртуть ще рідка: від температури замерзання  $-38,83^\circ\text{C}$  до  $+356,7^\circ\text{C}$ . Саме через це ртутні

термометри використовують для вимірювання високих температур. Ртуть використовують найчастіше через те, що вона існує у чистій формі, не погіршується з часом і не взаємодіє зі склом. Ртуть, на відміну від води, не розширюється під час затвердіння та не псує скляний капіляр; дуже важко помітити, коли вона замерзає. Саме через це ртутні термометри використовують для вимірювання високих температур.

*Ртуть + талій* – цей сплав дозволяє збільшити нижню границю вимірювання температури до  $-61,1^{\circ}\text{C}$ .

*Спирт* – етиловий має температуру замерзання  $-117,3^{\circ}\text{C}$ , а метиловий  $-138,5^{\circ}\text{C}$ ; отже термометри зі спиртом доцільно застосовувати для вимірювання низьких температур.

*Галій*, який має температуру плавлення  $30^{\circ}\text{C}$ , а температуру кипіння  $+2204^{\circ}\text{C}$ , може бути використаний у термометрах, призначених для вимірювання високих температур. Сплав галію, індію та олова (*галістан*) має температуру замерзання  $-20^{\circ}\text{C}$ ; цей сплав використовують при виготовленні побутових градусників.

*Толуен* – має температуру плавлення  $-95,1^{\circ}\text{C}$ , а температуру кипіння  $110,5^{\circ}\text{C}$ .

Але останні дві речовини не такі стійкі як ртуть і можуть повільно розкладатися на сонці.

*Термометри опору* – прилади, принцип яких оснований на властивості матеріалів змінювати електричний опір під впливом температури. Провідники в таких вимірюваннях називаються *терморезисторами*, а напівпровідники – *термісторами*.

Для провідників залежність опору від температури має вигляд:

$$R = R_0 ( 1 + \alpha \Delta T ), \quad (9.9)$$

де  $R$  – опір провідника при температурі  $T$ ;  $R_0$  – опір при температурі  $T_0$ ;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору провідника;  $\Delta T = T - T_0$  ( де  $T_0 = 273,16 \text{ K} = 0^{\circ}\text{C}$  ).

Для терморезисторів використовують такі метали як платина, нікель, мідь. Платина характеризується стабільністю параметрів в умовах корозії, дії хімічних сполук. Платина не окислюється, піддається механічній обробці, має високу температуру плавлення і відзначається високим рівнем чистоти. Всі ці фактори впливають на стабільність залежності опору платинового провідника від температури. Платинові терморезистори характеризуються малими габаритами та компактністю (рис. 9.9).



Рис. 9.9. Платиновий терморезистор

Перевагою мідних терморезисторів є широкі зміни опору при зміні температури та практично лінійний відгук на температуру. Нікель має нелінійний характер залежності опору від температури. Нікель і мідь характеризуються меншою вартістю порівняно з платиною.

Для напівпровідників опір зменшується з підвищенням температури за формулою:

$$R = ae^{b/T}, \quad (9.10)$$

де  $a$  і  $b$  – сталі, що залежать від напівпровідника;  $T$  – температура.

Типовими напівпровідниками, які використовуються як термістори, є кремній та германій. Розміри термісторів можуть досягати 0,2 мм. Термістори є більш чутливими до зміни температури порівняно з терморезисторами: вони можуть реагувати на зміни температури близько  $10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Інтервал температур, які вимірюють термістори, становить від  $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Термоелектричні термометри* використовують термоелектричні явища, які проявляються у взаємозв'язку теплових та електричних процесів у твердих тілах. Одним із таких термоелектричних явищ є *ефект Зеебека* – виникнення електрорушійної сили (е.р.с.) в електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників, контакти яких мають різну температуру (рис. 9.10).

Типові термопари складаються з металів або сплавів, таких як мідь-константан, залізо-константан, платина-платина/родій. Температурні інтервали таких термоелектричних термометрів визначаються вибором певної термопари: хромель-алюмель – від  $-200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; залізо-мідь – від  $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; мідь-константан – від  $-200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

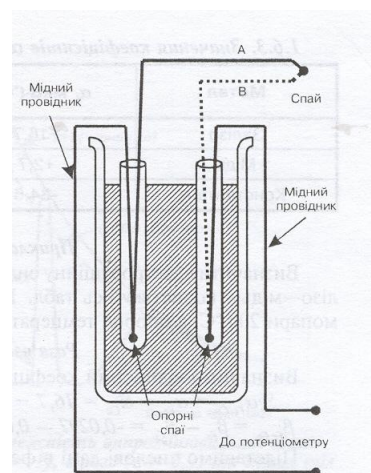


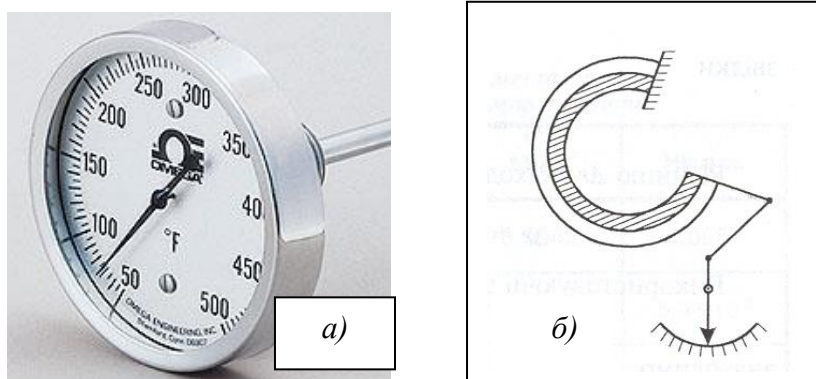
Рис. 9.10. Термоелектронний термометр



Недоліком таких термометрів є невисока точність (яка перевищує  $1^{\circ}\text{C}$ ), а також невеликі значення електрорушійної сили, що виникає в електричному ланцюзі.

Подолати цей недолік можна за рахунок послідовного з'єднання декількох термопар, які утворюють у цьому разі *термобатарею*.

*Біметалевий термометр* оснований на тепловому розширенні твердих тіл, зокрема на деформації біметалевої пластини (наприклад, інвар і сталь) під впливом температури (рис. 9.11).



**Рис. 9.10. Біметалевий термометр:**  
**а – зовнішній вигляд; б – біметалева пластина**

Оскільки метали мають різні значення коефіцієнтів об'ємного розширення, пластина при зміні температури буде деформуватися. Залежність переміщення кінця біметалевої пластини від температури лінійна, а шкала приладу – рівномірна.

*Оптична пірометрія* базується на використанні залежності випромінювальної здатності розжареного тіла від температури. Отже, визначити температуру будь-якого тіла можна шляхом порівняння інтенсивності його випромінювання на певній довжині хвилі з інтенсивністю стандартного випромінювання.

Оптичний пірометр складається з джерела випромінювання та оптичної системи, до якої входить мікроскоп, калібрована лампа та фільтр з вузькою смугою пропускання (рис. 9.12,а).

Процедура вимірювання температури передбачає порівняння яскравості тіла, що досліджується, та каліброваної лампи. Вимірювання проводять на довжині хвилі  $655\text{ нм}$ . Шляхом регулювання струму, що проходить через нитку розжарювання лампи, зрівноважують яскравості тіла і лампи. Внаслідок цього зображення нитки зникає на фоні яскравості тіла (рис. 9.12,б). Ручка потенціометра, що регулює величину струму, прокалібрована в одиницях температури.

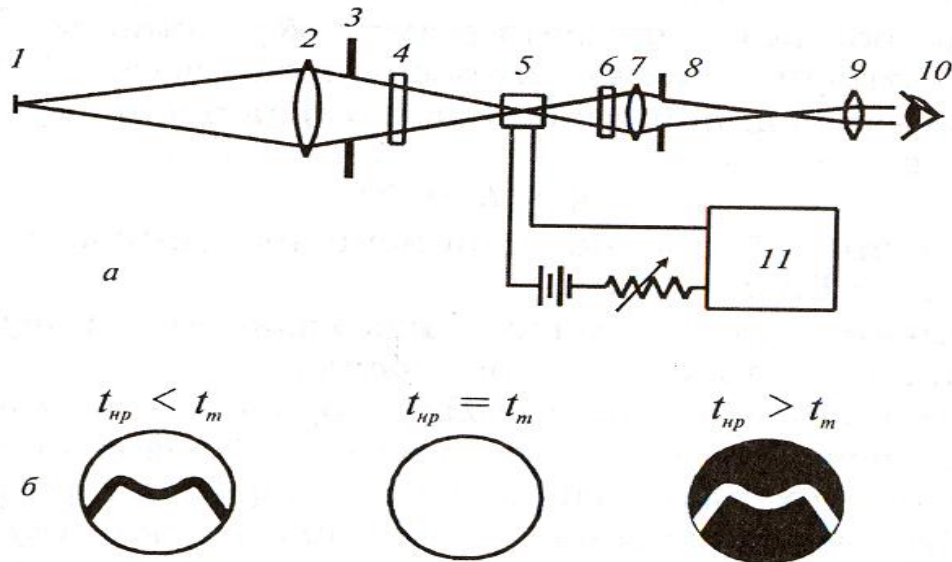


Рис. 9.12. Оптичний пірометр: *а* – принцип дії приладу; *б* – зображення нитки електролампи пірометра та тіла, що досліджується, залежно від температури нитки  $t_{нр}$  і тіла  $t_m$

*Радіотермометри* використовуються для вимірювання температури природних поверхонь. Відомо, що енергетична яскравість природної поверхні визначається за виразом:

$$L_e = \varepsilon \sigma T_s^4, \quad (9.11)$$

де  $\varepsilon$  – випромінювальна здатність поверхні ( $0 < \varepsilon < 1$ );  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ );  $T_s$  – температура поверхні.

Отже, вимірювання енергетичної яскравості природної поверхні дає можливість оцінити її температуру. На практиці вимірюють енергетичну яскравість у смузі довжин хвиль, звичайно в області 8–13 мкм, де спостерігається вікно прозорості атмосфери і випромінювальна здатність тіл максимальна. Через це температура атмосфери не впливає на результати вимірювань температури поверхні, а випромінювання Сонця цілком поглинається атмосферою і також не заважає вимірюванням. Звичайно радіометри складаються з оптичної системи (лінз, дзеркал, фільтрів), яка фокусує потік випромінювання певної довжини хвилі на детектор – термістор або термобатарей.

Цей потік підвищує температуру детектора, вихідний електричний сигнал з виходу якого проградуирований в одиницях температури.

Застосування інфрачервоної відеокамери, яка здатна реєструвати спектральний розподіл температури, дає можливість утворювати теплові зображення об'єкта, що досліджується.

Використовують пірометри для вимірювання температури більшої, ніж  $600^{\circ}\text{C}$ .

*Кварцовий п'єзоелектричний термометр* являє собою цифровий прилад, в основі якого лежить вимірювання резонансної частоти п'єзокристала. Кожний кристал має свою власну резонансну частоту, яка залежить від температури. Прилади такого типу характеризуються високою чутливістю та роздільною здатністю ( $10^{-4}^{\circ}\text{C}$ ). Діапазон температур, що вимірюються, становить від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+230^{\circ}\text{C}$ . До недоліків належать складність електронної системи та відповідна висока вартість приладів.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке поліпное?
2. Що таке гіпотермія?
3. Як реагують тварини на екстремальні температурні умови?
4. Як здійснюють тварини поведінкову реакцію на температуру?
5. Який термометр доцільно використовувати при дистанційному зондуванні атмосфери. Пояснити принцип його дії.

### **Аудиторні завдання**

*Порівняти процеси терморегуляції ендотермних та ектотермних організмів.*

### **Репродуктивний тест**

Термометр якого типу слід обрати для вимірювання температури  $-130^{\circ}\text{C}$ ?

### **Альтернативний тест**

Чи вірно ствердження, що:

1. Перевагою нікелевих терморезисторів є практично лінійний відгук на температуру.      Так      Ні

2. Радіотермометри використовуються для вимірювання температури природних поверхонь. Так Ні

### Акордно-вибірковий тест

Знайти вірні відповіді на запитання

*Яку робочу речовину рідинного термометра необхідно обрати для вимірювання температури лави вулкану (близько 1160 °C)?*

1. Ртуть; 2. Ртуть + талій; 3. Етиловий спирт; 4. Метиловий спирт; 5. Галій; 6. Толуен.

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “рідина в термометрі – діапазон температур, в межах якого можливе її застосування”

а. Ртуть	1. -95,1-+110,5 °C
б. Толуен	2. -117,3-+78,5 °C
в. Спирт	3. -38,83-+356,7 °C

### Конструктивні тести

1. Температурний коефіцієнт опору  $\alpha$  можна визначити як:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt},$$

де  $R$  – опір при температурі  $T$ . Припускаючи, що  $\alpha$  є стала величина, показати, що:

1. залежність опору від температури має вигляд:

$$R = R_0 e^{\alpha(T - T_0)},$$

де  $R_0$  – опір при температурі  $T_0$ ;

2. Використовуючи розкладання експоненціальної функції в ряд ( $e^x \approx 1 + x$ ;  $x \ll 1$ ), довести, що:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \text{ для } \alpha(T - T_0) \ll 1.$$

2. Як розробив температурну шкалу Д. Фаренгейт?

3. Завдяки чому температура стратосфери збільшується з висотою?



## 10. ПРИРОДНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ



### 10.1. Параметри сонячного випромінювання

До природних випромінювань належать сонячне, атмосферне та випромінювання земної поверхні.

Сонце є основним зовнішнім джерелом світла та енергії для Землі та її атмосфери, завдяки якому існує життя на планеті. Сонце являє собою розжарену кулю радіусом  $6,96 \cdot 10^8$  м, маса якої становить  $1,991 \cdot 10^{30}$  кг. Відстань між Сонцем і Землею дорівнює  $1,496 \cdot 10^{11}$  м. Склад сонячного середовища – водень ( 64 % ), гелій ( 32 % ) і суміш важких елементів ( 4 % ). Температура Сонця у центрі –  $2 \cdot 10^7$  °С, на поверхні – 6000 °С. За такої високої температури відбувається іонізація молекул сонячного середовища та ядерні реакції. Ці процеси супроводжуються виділенням великої кількості енергії. Сонце можна порівняти з абсолютно чорним тілом, температура якого дорівнює 6000 К.

*Інтенсивність сонячного випромінювання.* Спостереження за Сонцем за допомогою піргеліометра супутника *Nimbus* дало можливість визначити інтенсивність сонячного випромінювання в межах  $1369\text{--}1375$  Вт/м<sup>2</sup> (середнє значення  $1373$  Вт/м<sup>2</sup>; ця величина отримала назву *сонячної сталої*).

Загальна сонячна енергія становить для сфери радіусом  $d = 1,496 \cdot 10^{11}$  м:

$$E = IS = 1373 \text{ Вт/м}^2 \cdot 4\pi d^2 \text{ м}^2 = 1373 \text{ Вт/м}^2 \cdot 4 \cdot 3.14 \cdot (1,496 \cdot 10^{11})^2 \text{ м}^2 = 3,88 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

Потужність сонячного випромінювання на поверхні Землі (враховуємо, що Земля обертається і площа, що опромінюється, у 4 рази менша, ніж уся площа поверхні):

$$P = 1373 \text{ Вт/м}^2 \cdot \pi R_z^2 = 1373 \cdot 12,75 \cdot 10^{13} \text{ м}^2 = 1,74 \cdot 10^{17} \text{ Вт.}$$
$$I = P/S = (1,74 \cdot 10^{17} \text{ Вт}) / (5.1 \cdot 10^{14} \text{ м}^2) = 342 \text{ Вт/м}^2.$$

У цілому, середня інтенсивність сонячного випромінювання коливається від  $250$  Вт/м<sup>2</sup> (субтропічні регіони) до  $80$  Вт/м<sup>2</sup> (хмарні регі-

они); на інтенсивність сонячного випромінювання впливають пора року, час доби, широта, відстань між Сонцем та Землею, поглинання сонячного випромінювання земною атмосферою.

В Україні середня інтенсивність сонячного випромінювання варіює від 185–215 Вт/м<sup>2</sup> (Крим) до 115–145 Вт/м<sup>2</sup> (Полісся).

*Розподіл сонячного випромінювання за інтенсивністю.* Сонячне випромінювання за інтенсивністю розподіляється так: дві третини у вигляді *прямого* сонячного світла, одна третина у вигляді *дифузно розсіяного* світла.

Пряме сонячне випромінювання відповідає тому випромінюванню, що вимірюється на земній поверхні перпендикулярно їй за виключенням дифузного випромінювання.

Дифузне випромінювання відповідає випромінюванню, що розсіюється на частинках атмосфери або відбивається від них.

Пряма сонячна інсоляція дорівнює сонячній сталій за винятком втрати на поглинання та розсіювання. Сонячна стала залежить від відстані між Сонцем та Землею, сонячних циклів; втрати сонячного випромінювання залежать від часу дня (кут підняття Сонця), хмарного покриву, вмісту вологості та різних забруднювачів.

Випромінювальні властивості Сонця описуються рівнянням:

$$E_{C\downarrow} = E_C \cos \theta + E_{D\downarrow}, \quad (10.1)$$

де  $E_{C\downarrow}$  – сумарна енергетична освітленість сонячним випромінюванням земної поверхні;  $E_C \cos \theta$  – енергетична освітленість земної поверхні прямим сонячним випромінюванням, а  $E_{D\downarrow}$  – те ж, дифузним сонячним випромінюванням.

Середні значення сумарної енергетичної освітленості та за рахунок дифузного сонячного випромінювання становлять:  $E_{C\downarrow} = 900$  Вт/м<sup>2</sup>;  $E_{D\downarrow} = 200$  Вт/м<sup>2</sup> (чисте небо);  $E_{C\downarrow} = 800$  Вт/м<sup>2</sup>;  $E_{D\downarrow} = 350$  Вт/м<sup>2</sup> (небо наполовину покрито купчастими хмарами);  $E_{C\downarrow} = E_{D\downarrow} = 300$  Вт/м<sup>2</sup> (небо повністю покрито хмарами).

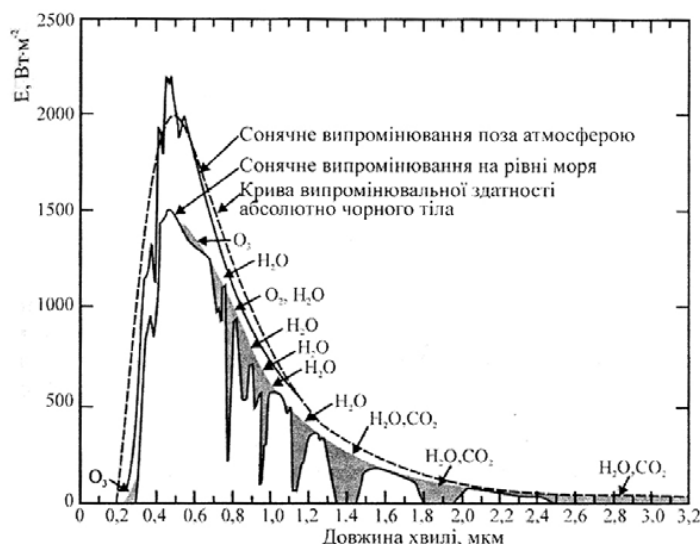
Сонячна інтенсивність розподіляється так: 19 % прямого сонячного випромінювання поглинається атмосферою, зокрема такими газами як озон, двоокис вуглецю, водна пара, кисень, азот; 20 % сонячного випромінювання відбивається хмарами; 6 % розсіюється атмосферою; 4 % відбивається земною поверхнею; 51 % поглинається земною поверхнею (грунтом та водою), після чого це випромінювання з'являється у вигляді латентної теплоти (23 %), відчутної теплоти (7 %), інфрачервоного випромінювання земної поверхні (21 %).

Близько 23 % становить дифузне сонячне випромінювання.

*Спектральний склад сонячного випромінювання.* Спектр сонячного випромінювання становить 200–5000 нм; максимум випромінювання припадає на 500 нм. Спектр сонячного випромінювання, який досягає земної поверхні складається з ультрафіолетової (200–400 нм), видимої (400–700 нм) та інфрачервоної (більше 700 нм) частин (табл. 10.1). На ультрафіолетову частину спектра припадає 5 %, на видиму 35 % і на інфрачервону – 60 % сонячного випромінювання. Спектр сонячного випромінювання поза атмосферою та на земній поверхні зображено на рис.10.1.

#### 10.1. Діапазони спектра оптичного випромінювання

Діапазон довжин хвиль, нм	Спектральна область випромінювання
	Ультрафіолетова область
100–280	<i>УФ-С</i>
280–315	<i>УФ-В</i>
315–380	<i>УФ-А</i>
	Видима область
380–440	<i>Фіолетове світло</i>
440–495	<i>Синє світло</i>
495–580	<i>Зелене світло</i>
580–640	<i>Жовте світло</i>
640–760	<i>Червоне світло</i>
	Інфрачервона область
760–2500	<i>Близька</i>
2500–25000	<i>Середня</i>
25000–500000	<i>Далека</i>



**Рис.10.1. Спектр сонячного випромінювання**



*Періодичність сонячного випромінювання.* Циклічні зміни сонячної активності відомі як сонячні цикли. Розрізняють сонячні цикли з періодичністю 11, 22, 87, 210 та 2300 років.

Як довів видатний вчений сучасності О.Л.Чижевський (1897-1964), для органічного світу Землі суттєвими є як сонячна енергія, так і періодичні зміни сонячної активності. Сонце, а також плями та протуберанці, що виникають на його поверхні, являють собою джерела електромагнітного випромінювання, які впливають на магнітне поле Землі та на рівень іонізації земної атмосфери. Потоки заряджених частинок, що надходять від Сонця, спричиняють магнітні бурі на Землі. Крім того, Сонце, як це доведено дослідженнями вченого, посилює назрівання і поширення деяких захворювань на Землі (холери, грипу, дифтерії, чуми, менінгіту, червоного тифу, малярії тощо). Виявлено, що життєві функції патогенних мікроорганізмів безпосередньо зв'язані з полями фізичної природи, які генеруються Сонцем. Порівнюючи статистичний матеріал про грипозні епідемії з результатами спостережень за сонячною активністю, О.Л. Чижевський одержав гідну подиву відповідність кривих, які характеризують динаміку двох явищ (рис. 10.2).

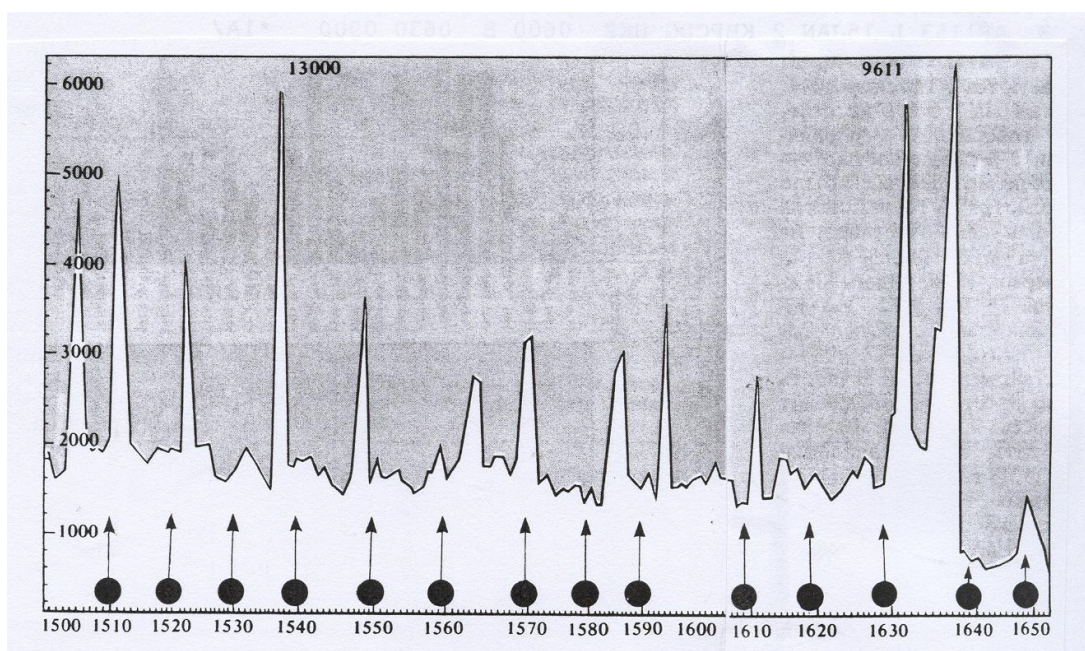
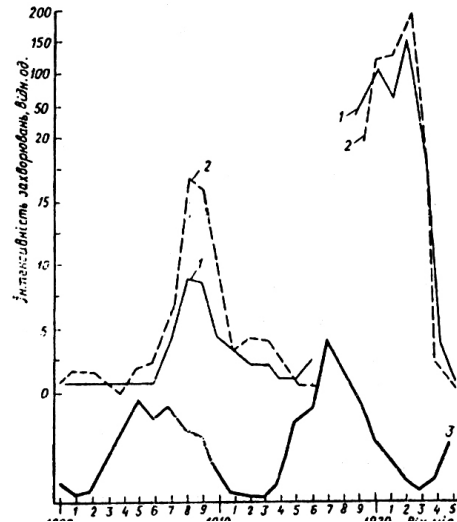


Рис. 10.2. Кореляція сонячної активності та епідемій чуми

Аналогічна кореляція була виявлена при порівнянні кривих захворювання поворотним тифом у Росії й Україні (з 1899 по 1925 р.) та сонячної активності (рис.10.3).

О. Л. Чижевський дійшов висновку, що в роки підвищеної діяльності Сонця епідемії чуми мають більшу вірогідність виникнення і поширення, ніж у роки невисокої сонячної активності. Автор застерігає вважати Сонце причиною епідемій на Землі – світло може бути лише другорядним фактором їх появи. Діяльність Сонця треба розглядати як регулятор епідемій у часі.

Факти нашого повсякденного життя свідчать про вплив сонячного випромінювання на стан і здоров'я живих істот, а саме на функції нервової системи, процеси дихання й кровообігу тощо. Все це ще раз підтверджує достовірність наукових гіпотез О. Л. Чижевського.



**Рис. 10.3. Кореляція кривих захворювання поворотним тифом у Росії й Україні та сонячної активності**

## **10.2. Вплив сонячного випромінювання на живі організми**

*Вплив випромінювання видимої області спектра.* Сонячне випромінювання є одним з найважливіших зовнішніх факторів, які впливають на живий організм. Вплив сонячного випромінювання пов'язаний з такими основними параметрами світла як *інтенсивність світла (освітленість)*, *спектральний склад* та *тривалість освітлення (фотоперіод)*. Деякі птахи і комахи спроможні реагувати на *поляризацію* оптичного випромінювання.

Під впливом сонячного випромінювання відбуваються *фотобіологічні реакції* – фізичні або хімічні зміни в живих організмах. Серед фотобіологічних реакцій, які характеризуються впливом на живі організми, можна виділити енергетичні, інформаційні та деструктивно-модифікуючі реакції.

*Енергетичні реакції* – це реакції, за яких світлова енергія внаслідок синтезу нових органічних молекул трансформується в хімічну.

Прикладом таких реакцій може бути *фотосинтез* – процес перетворення зеленими рослинами та фотосинтезуючими мікроорганізмами енергії Сонця в енергію хімічних зв'язків органічних речовин.

Важливий шлях хімічних реакцій під час фотосинтезу – це перетворення двоокису вуглецю та води в вуглеводи та кисень (рис. 10.4).

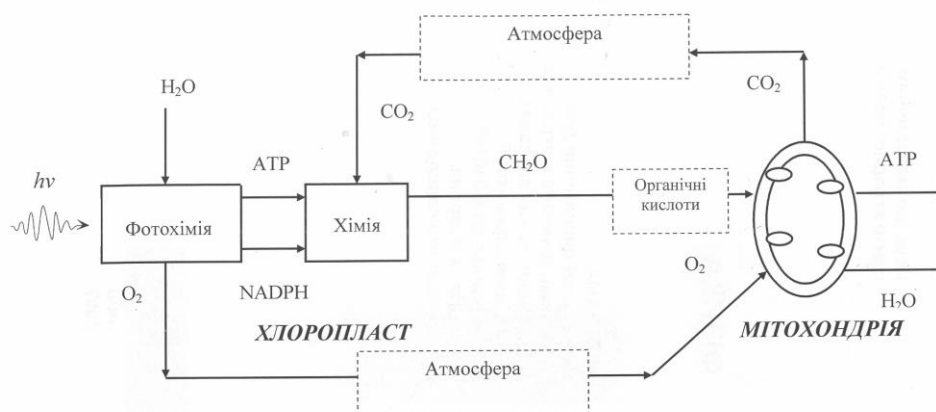
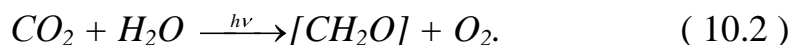


Рис. 10.4. Шляхи це перетворення двоокису вуглецю і води в вуглеводи та кисень під час фотосинтезу

Сумарну реакцію можна описати рівнянням:



Вуглеводи, що утворюються внаслідок цієї реакції, містять більше енергії, ніж вихідні речовини (тобто  $CO_2$  та  $H_2O$ ).

Таким чином, за рахунок енергії Сонця енергетично бідні речовини  $CO_2$  та  $H_2O$  перетворюються у високоенергетичні продукти – вуглеводи та кисень

У процесі дихання (в мітохондріях) кисень, що поглинається з атмосфери, використовується для окислення вуглеводів з утворенням врешті-решт двоокису вуглецю та води та відповідним виділенням енергії. Ця енергія накопичується у вигляді високоенергетичної сполуки АТР, яка використовується для здійснення рослинним організмом важливих життєвих функцій.

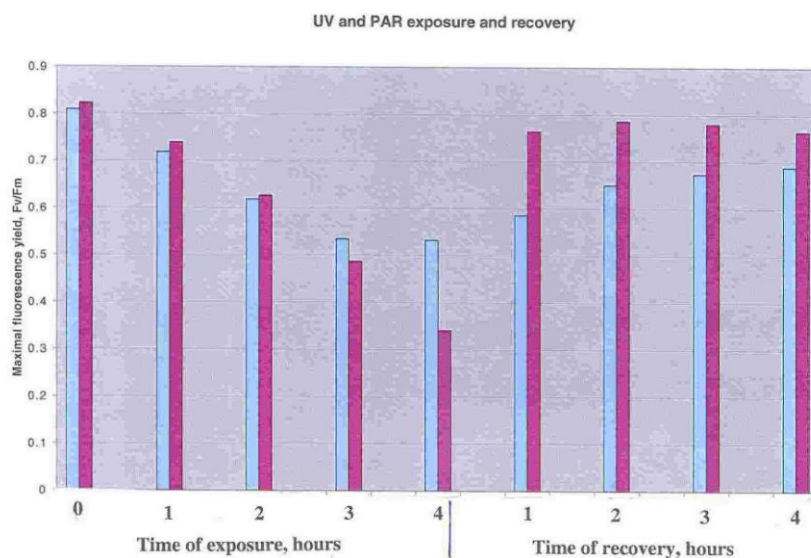
Більша частина поглинутої хлорофілом енергії витрачається на фотохімічні реакції; невелика частина поглинутої енергії витрачається на тепло або флуоресценцію:

$$E_{\text{погл}} = E_{\text{фх}} + E_{\text{тепл}} + E_{\text{фл}}. \quad (10.3)$$

Встановлено, що близько 5 % енергії збудження перетворюється у випромінювання енергії хлорофілом. Співвідношення між флуоресценцією хлорофілу і загальним процесом фотосинтезу носять досить складний характер; слід однак зауважити, що процес реєстрації флуоресценції хлорофілу зеленого листка рослини може бути використаний для аналізу стану рослини під впливом різноманітних стресів як в лабораторних, так і в польових умовах.

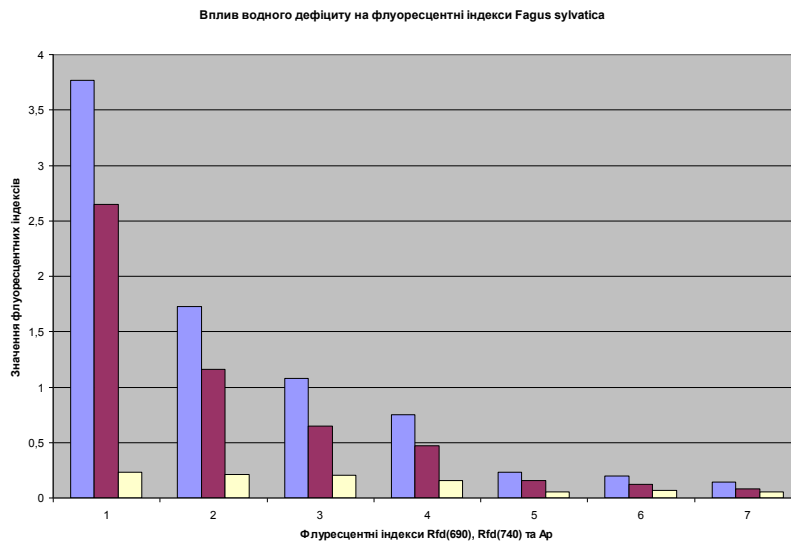
Одним з таких стресів є висока освітленість рослин та водоростей фотосинтетично активним та ультрафіолетовим випромінюванням. Опромінювання фотосинтетичних організмів інтенсивним світлом викликає інгібування фотосинтезу (фотоінгібування). Цей процес пов'язаний з руйнуванням білка *D1*, який знаходиться у реакційному центрі фотосистеми *ФСII* і з яким зв'язані молекула хлорофілу  $P_{680}$  та акцептор  $Q_B$ .

Так, морські водорості протягом життєвого циклу зазнають впливу високих освітленостей. Кількість світла, що отримує водорість, залежить від положення Сонця, хмарності і, особливо, від припливів та відливів. Безсумнівно, світловий режим впливає на фотосинтетичну активність водорості і, отже, на її флуоресцентні параметри. Причому, водорості здатні оновлювати фотосинтетичну активність після припинення дії високих інтенсивностей світла (рис. 10.5 ).



**Рис. 10.5. Оновлювання фотосинтетичної активності після припинення дії високих інтенсивностей світла**

ресцентні параметри рослин наведено на рис. 10.6.



**Рис. 10.6. Вплив водного дефіциту на флуоресцентні параметри рослини**

*Інформаційні реакції* – це реакції, при яких світло є керуючим сигналом, що викликає через спеціалізовані механізми утворення фотопродуктів та забезпечує інформацію щодо навколишнього середовища. До інформаційних належить *фоторух* – рух або зміна руху організмів, що викликаються світлом. Світло – це важливий зовнішній фактор, який завдяки фоторуху використовується рухливими організмами (в першу чергу – водоростями та найпростішими) для пошуків оптимальних умов існування.

*Деструктивно-модифікуючі реакції* – це реакції, пов'язані з пошкодженням світлом молекул біологічного субстрату, що призводить до летальних або мутаційних наслідків. До цього типу реакцій належить *фотосенсибілізація* – процес, при якому світлова енергія, поглинута молекулами, що мають хромофори (сенсибілізатори), передається іншим молекулам, не спроможним самотійно поглинати світло. Це явище поширене у природі: відомо, що деякі дикорослі рослини містять сильнодіючі хімічні сполуки; тварини, які поїдають ці рослини, стають чутливими до світла в непігментованих ділянках шкіри, особливо навколо очей, рота, вух та копит, де волосяний покрив рідкий. У ролі хімічних сполук, які підвищують чутливість тварин до світла (фотосенсибілізаторів), виступає *гіперіцин* та *фагонірин*. Гіперіцин – червоний пігмент, що міститься у листках, стеблинах та квітках представників родини *Guttiferae*, зокрема: *Hypericum perforatum* (зверобій), *H. crispum*, *H. pulchrum*, *H. leucoptycodes*, *H. maculatum*. Загальна назва

захворювань – *гіперіцизм*. Основні симптоми – свербіж, виникнення пухирців розміром з горошину (які лопаються), кон'юнктивіт, стоматит, гарячковий стан, запальний процес (навіть у мозку), збудження або пригнічення. Тварина починає тертися, вносить інфекцію і може загинути через 8–10 год. *Фагопіризм* викликається спорідненим гіперіцину рослинним пігментом *фагопірином*, який присутній у представників *Fagopyrum* (*F.esculentum* або *Poligonum fagopyrum*) – гречки посівної. Фагопірин також має фотосенсибілізуючий вплив на свиней, худобу, курчат. Можливі захворювання овець, свиней, коней (які поїдають на сонці гречку, просо, шведську конюшину) на шкірну екзантему, яка відсутня на пігментованих ділянках тіла; у овець, коней і великої рогатої худоби із білими мітками виникають дерматити, стоматити, а також опіки на місцях, позбавлених пігментації.

До деструктивно-модифікуючих реакцій належить також *фотодеградація продуктів*, що зумовлюється спільною дією хімічних сполук і оптичного випромінювання (ультрафіолетового або видимого діапазонів). Так, у процесі технологічної обробки молоко та молочні продукти зазнають спільної дії сенсibilізаторів і світла. Сенсibilізаторами є амінокислоти та білки молока, ибофлавін, метіонін, залишки ненасичених жирних кислот, вітамін А, аскорбінова кислота. В результаті фотосенсибілізації молоко може мати неприємний запах, який оцінюють як пригорілий, капустяний, металевий, маслянистий, картонний. Свіже м'ясо і м'ясні продукти, які зазнали дії випромінювання джерел видимого або ультрафіолетового діапазонів, стають згіркими або змінюють забарвлення. Свіжість м'яса та його яскраво-червоний колір пов'язують звичайно з міоглобіном. Під впливом ультрафіолетового випромінювання (яке використовують для знищення мікроорганізмів) міоглобін бере участь у процесах окислення або денатурації, що супроводжується втратою кольору м'яса; крім того, має місце збільшення згірклості жирової частини м'яса.

Для зведення до мінімуму фотодеградаційних явищ необхідно використовувати освітлення з довжиною хвилі більше 500 нм (саме у цій області спектра відмічено знижену фотохімічну активність оптичного випромінювання), або рекомендувати упаковку і тару для продуктів, виготовлених із матеріалів, що поглинають випромінювання тієї частини спектра, яке спричинює фотодеградацію.

### **10.3. Вплив випромінювання ультрафіолетової області спектра на живі організми**

Ультрафіолетовий діапазон ділиться на три основних ділянки: УФ-С (100–280 нм), УФ-В (280–315 нм) і УФ-А (315–380 нм).

Вважається, що УФ-С-випромінювання є надзвичайно небезпечним для живих організмів; УФ-В-випромінювання може викликати специфічні, але не завжди руйнівні ефекти в живих організмах; УФ-А-випромінювання не являє собою небезпеки. Сонячне ультрафіолетове випромінювання уражає нуклеїнові кислоти і білки, викликає еритему, канцерогенні ефекти, кон'юнктивіт, ослаблює фотосинтетичну активність рослинних організмів, інгібує рухомість та орієнтацію мікроорганізмів у просторі. Таким чином, живі організми вимушені розробляти власну стратегію щодо оптимізації їх стану та положення у навколишньому середовищі з точки зору забезпечення процесу життєдіяльності під впливом випромінювання видимого діапазону і, в той же час, запобігання руйнівній дії випромінювання ультрафіолетового діапазону.

Дія ультрафіолетового опромінювання сприяє утворенню вітаміну *D*, який характеризується антирахітним впливом; причому, найсприятливішим є ультрафіолетове випромінювання з максимумом при 297 нм.

Крім того, ультрафіолетове випромінювання характеризується бактерицидною дією; для цього найкраще використовувати довжини хвиль порядку 254 нм. Реалізовані бактерицидні ефекти пов'язані насамперед з деструкцією клітинних білків і тімоноуклеїнової кислоти (яка бере участь у процесах розмноження та ділення клітин). Ультрафіолетове опромінювання повітря в виробничих приміщеннях дає можливість протягом півгодини знищити 63 % бактерій і 45 % спор плісневих грибів.

Застосовуючи на практиці ультрафіолетове випромінювання, слід пам'ятати, що технологія його використання вимагає ретельного, чіткого вивіреного дозування і врахування спектральних характеристик. Відомо, що ультрафіолетове випромінювання різних спектральних діапазонів може проявляти бактерицидну і антирахітичну дію, але може бути й причиною виникнення кон'юнктивіту, еритеми або онкологічних захворювань (рис. 10.6).



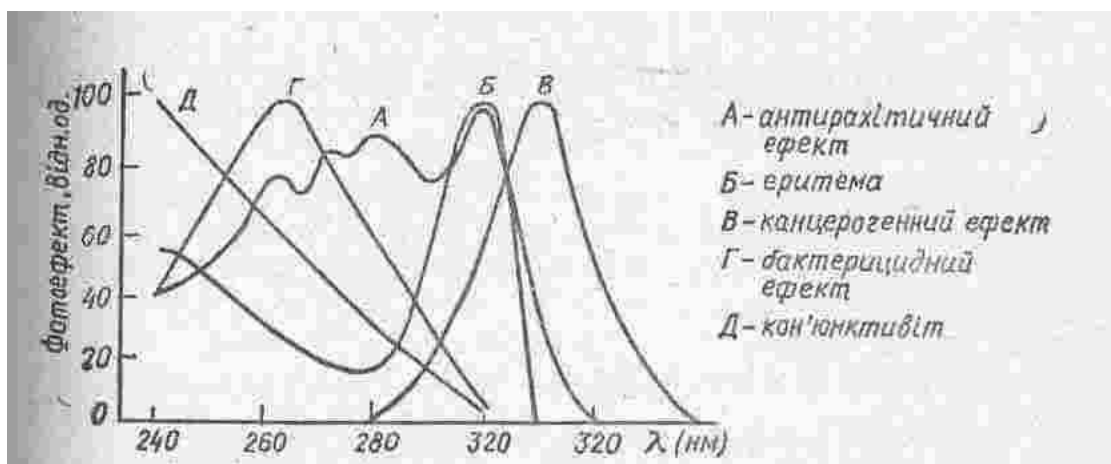


Рис. 10.6. Спектральний розподіл біологічних ефектів в ультрафіолетовій області спектра

Тому використовувати ультрафіолетове випромінювання слід з обережністю, впевнившись у характері і механізмах його дії.

#### 10.4. Атмосферне випромінювання

На земну поверхню діє довгохвильове випромінювання атмосфери, за яке відповідають в першу чергу такі гази як водні пари, двоокис вуглецю та озон. Ці компоненти поглинають та випромінюють в області: вода – 5–7 мкм, а також на довжинах хвиль, що перевищують 17 мкм; двоокис вуглецю – поблизу 4,5 мкм та на довжинах хвиль більших ніж 13,5 мкм; озон – поблизу 9,6 мкм. Крім того, атмосферні аерозолі беруть участь у тепловому випромінюванні.

В цілому, спектр випромінювання атмосфери займає область 5–100 мкм; енергетична світність атмосфери визначається за виразом:

$$M_{A\uparrow} = \sigma T_A^4, \quad (10.4)$$

де  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ ),  $T_A$  – температура уявного абсолютно чорного тіла, яким можна моделювати атмосферу.

На практиці, всі природні тіла можуть бути розглянуті в інтервалі звичайних температур як сірі тіла, що характеризуються випромінювальною здатністю  $\varepsilon$ . Енергетична світність сірого тіла визначається як  $M = \varepsilon \sigma T^4$ .

За рахунок енергетичної світності атмосфери земна поверхня освітлюється; енергетична освітленість земної поверхні дорівнює енергетичній світності атмосфери ( $E_{A\downarrow} = M_{A\uparrow}$ ). Середні значення  $M_{A\uparrow}$  становлять:  $170 \text{ Вт/м}^2$  (чисте небо, сухе повітря);  $310 \text{ Вт/м}^2$  (чисте небо, вологе повітря);  $380 \text{ Вт/м}^2$  (небо наполовину покрито купчастими



ми хмарами);  $380 \text{ Вт/м}^2$  (небо повістю покрито хмарами). Слід відмітити, що атмосферне випромінювання направлено як до земної поверхні, так і догори.

### 10.5. Випромінювання земної поверхні

За рахунок поглинутого випромінювання земна поверхня становиться джерелом власного довгохвильового випромінювання, направленого в атмосферу.

Енергетична світність земної поверхні визначається за виразом:

$$M_{3\uparrow} = \varepsilon \sigma T_3^4, \quad (10.5)$$

де  $\varepsilon$  – випромінювальна здатність земної поверхні (табл. 10.2).

Земна поверхня діє як сіре тіло з температурою 288 К. Спектральна область випромінювання становить 4–50 мкм з максимумом 10 мкм.

Випромінювання земної поверхні майже повністю поглинається атмосферою (зокрема водяною парою, двоокисом вуглецю та озоном), за винятком своєрідних спектральних ділянок – так званих “вікон прозорості”, через які випромінювання спроможне проходити у космос. Так, для випромінювальної здатності земної поверхні 0,95 та температури 288 К енергетична світність земної поверхні становить  $M_3 = 371 \text{ Вт/м}^2$ .

### 10.6. Альbedo

Відношення потоку світла, що дифузно вібивається природною поверхнею, до падаючого потоку, називається *альbedo* (див. табл. 10.2).

Сумарна енергетична світність земної поверхні визначається так:

$$M_{3\Sigma} = \varepsilon \sigma (T_3^4 - T_A^4), \quad (10.6)$$

де  $T_3$  і  $T_A$  – температури земної поверхні та атмосфери відповідно.

10.2. Значення альбедо  $a$  і випромінювальної здатності  $\varepsilon$  природних поверхонь

Тип поверхні	Додаткові характеристики	Альбедо $a$	Випромінювальна здатність $\varepsilon$
Вода	-малі кути зеніту -великі кути зеніту	0,03–0,10 0,10–0,50	0,92–0,90 0,92–0,97
Сніг	-старий -свіжий	0,40–0,70 0,45–0,95	0,82–0,89 0,90–0,99
Лід	-морський -гірський	0,30–0,40 0,20–0,40	0,92–0,97 -
Пісок	-сухий -вологий	0,35–0,45 0,20–0,30	0,84–0,90 0,91–0,95
Грунт	-сухий -вологий -вологі необроблені угіддя	0,20–0,35 0,10–0,20 0,05–0,07	0,95 0,97 -
Штучні поверхні	-бетон -асфальт	0,17–0,27 0,05–0,10	0,71–0,88 0,88–0,95
Сільськогосподарські поля	-лука -посіви -сади	0,16–0,26 0,10–0,25 0,15–0,20	0,90–0,95 0,90–0,99 0,90–0,95
Ліси	-листяні -листяні без листя -хвойні	0,20 0,10–0,20 0,05–0,15	0,98 0,97–0,98 0,97–0,99

### 10.7. Вимірювання природних випромінювань

*Класифікація радіометрів.* Прилади, призначені для вимірювання природних випромінювань, називаються радіометрами. Сенсори радіометрів можуть бути поділені на два типи: теплові і квантові детектори.

*Теплові детектори.* В основі дії сенсорів цього типу лежить поглинання випромінювання та його перетворення в теплову енергію такої форми, яку можна вимірювати.

До основних типів теплових детекторів належать *калориметри*, в яких реєструються зміни температури матеріалу детектора; *термопари* та *термобатареї*, в яких реєструється електрорушійна сила (напруга) в електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різномірних провідників, контакти яких мають різну температуру; *болометри*, принцип дії яких полягає в реєстрації залежності опору провідника, напівпровідника або надпровідника від температури; *піроелектричні детектори*, в основі яких лежить використання залежності поляризації піроактивного кристалу від зміни його температури при опромінюванні; струм, що проходить через кристал, реєструється.

*Квантові детектори*. Ці сенсори базуються на поглинанні енергії фотона, звільненні електронів та утворенні електричного струму. Кінцевим параметром, що реєструється, може бути напруга, зміна швидкості висилання електронів або провідність сенсора. Залежно від цього радіометри з квантовими детекторами поділяють на *фотогальванічні детектори*, в яких реєструється напруга, що виникає на фотоелементі під впливом зовнішнього випромінювання; *фотовипромінювальні детектори*, принцип дії яких полягає в перетворенні енергії оптичного вимірювання в електричну внаслідок зовнішнього (*фотоелектронні помножувачі*) або внутрішнього (*фотодіоди*) фотоефекту; *фотопровідні детектори*, що використовують аналіз залежності електропровідності матеріалу детектора від потоку випромінювання, що потрапляє на цей матеріал.

*Вимірювання прямого сонячного випромінювання*. Для вимірювання прямого сонячного випромінювання використовують піргеліометр, поверхня детектора якого орієнтована перпендикулярно до потоку випромінювання. Прилад складається з металевого циліндра, на дні якого розташований детектор (калориметр), системи діафрагм для потрапляння на детектор лише прямого сонячного випромінювання та металевих заслінок. Калориметр обладнаний ванною, по якій циркулює рідина.

Вимірювання температури рідини на вході та виході ванни дозволяє оцінити швидкість теплового потоку і, таким чином, поглинуту сонячну енергію. Зовнішній вигляд піргеліометра наведено на рис.10.7.

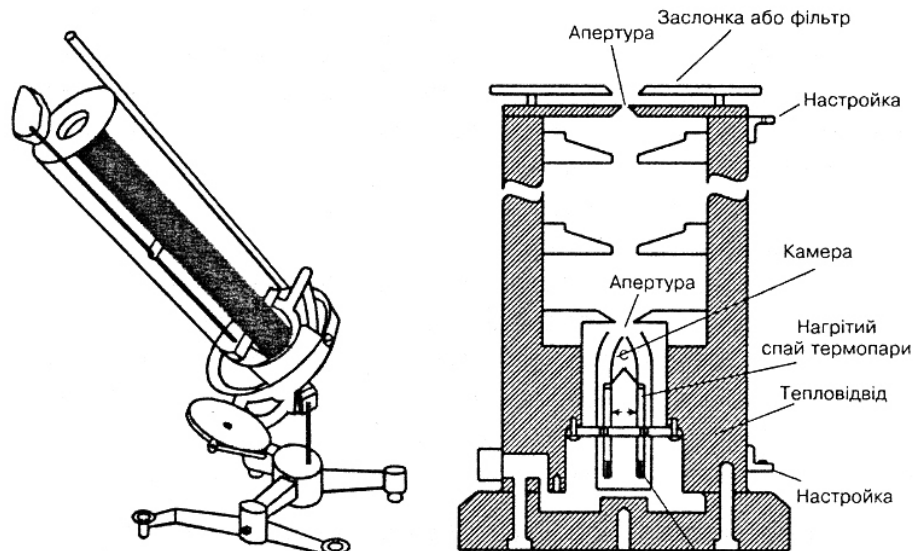


Рис. 10.7. Піргеліометр

Піргеліометри такого типу використовують як первинні стандарти для вимірювання сонячного випромінювання, оскільки вони мають високу стабільність і відтворюваність результатів, точність вимірювань може досягати  $\pm 0,2 \%$ . Модифікації приладів передбачають застосування термопар або термобатарей як детекторів.

Точність цих приладів становить  $\pm 0,4\text{--}0,5 \%$ , що обумовлює їх застосування як піргеліометрів першого або другого класів. Витримування часових інтервалів під час користування металевими заслінками, що регулюють рівень опромінювання детектора, з відповідним відліком температури є дуже суттєвою операцією, яка разом з процедурою калібрування приладу ускладнює технологію вимірювань.

*Вимірювання сумарного випромінювання.* Для вимірювання сонячного випромінювання, що потрапляє на горизонтальну поверхню з цілої півсфери (кут зору  $2\pi$  ср) використовують *піранометри*. Розрізняють два типи таких приладів – з реєстрацією *вертикальної* теплової різниці між поверхнею детектора та його оточенням або *горизонтальної* теплової різниці між чорною та білою поверхнею елементів детектора, розміщених в одній площині.

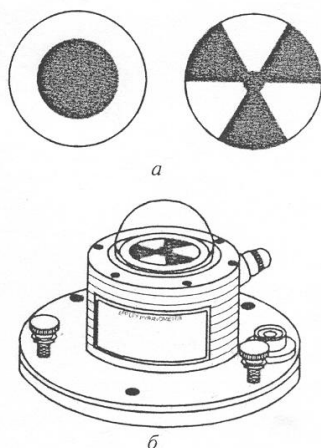


Рис. 10.8. Піранометр:  
а – детектори піранометра; б – піранометр з чорно-білим детектором

*Вимірювання сумарного випромінювання.* Для вимірювання сонячного випромінювання, що потрапляє на горизонтальну поверхню з цілої півсфери використовують *піранометри*. Розрізняють два типи таких приладів – з реєстрацією *вертикальної* теплової різниці між поверхнею детектора та його оточенням або *горизонтальної* теплової різниці між чорною та білою поверхнею елементів детектора, розміщених в одній площині.

Принцип дії піранометра першого типу пояснюється на рис.10.8. Піранометр містить зіркоподібний детектор, чутливими елементами якого є зафарблені у чорний та білий колір термопари.

Чорні поверхні поглинають сонячне випромінювання інтенсивніше, ніж білі поверхні. Контроль теплообміну між чорними та білими секторами детектора дає можливість оцінити сонячне випромінювання. Прилади обладнані системою температурної стабілізації, оптичної компенсації зміни показів при відхиленнях відгуку від закону косинуса, набором широкосмугових спектральних фільтрів.

Залежно від чутливості піранометри поділяють на класи: перший ( $\pm 0,1 \%$ ); другий ( $\pm 0,5 \%$ ) та третій ( $\pm 1,0 \%$ ). Слід зазначити, що величина електрорушійної сили, індукованої сонячним випромінюванням на кінцях термопар, досягає 10 мВ. Для вимірювання таких величин потрібні чутливі інструменти – такі як електронні потенціометри. Крім того, піранометри слід встановлювати на відкритих місцях або платформах.

Перевагою термоелектричних приймачів є їх здатність давати відліки в будь-який ділянці спектра з постійною чутливістю. Прилади характеризуються високою лінійністю і дають відлік в абсолютних одиницях.

До недоліків належать невисока чутливість і велика інерційність. Прилади вимагають також частого контролю чистоти поверхні півсфер та якості осушувальної рідини між ними.

*Вимірювання дифузного сонячного випромінювання.* Дифузне сонячне випромінювання вимірюють за допомогою рухомих дисків або циліндрів, які спроможні утворити тінь на детектор піранометра. Ці захисні системи повинні рухатися навколо осі, перпендикулярній земній поверхні для врахування обертання Сонця (рис.10.9).

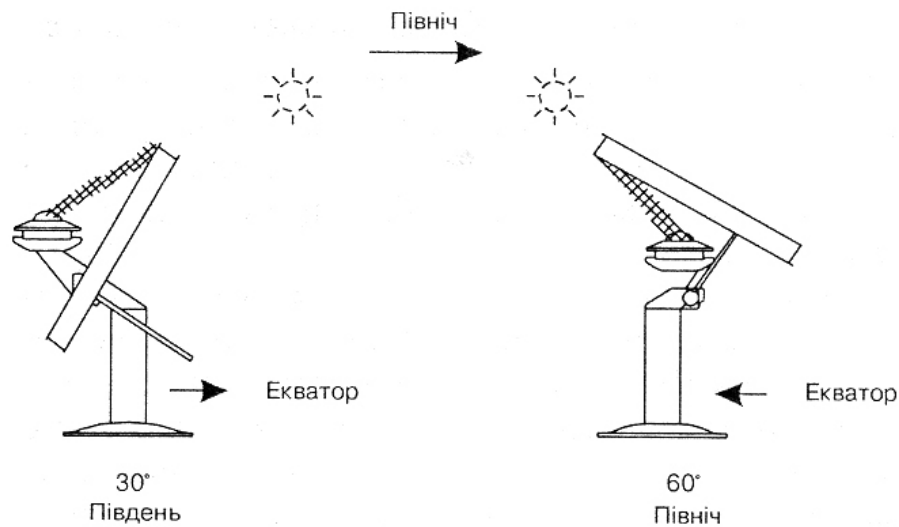


Рис. 10.9. Вимірювання дифузного сонячного випромінювання

*Вимірювання альбедо.* Альбедо є часткою сумарного випромінювання, що відбивається природною поверхнею. Для вимірювання альбедо необхідно два піранометри – один направлений догори і вимірює сумарне випромінювання, тоді як інший направлений до земної поверхні для вимірювання відбитого випромінювання. Конструктивно обидва піранометри можуть бути поєднані на одній механічній оправі (рис.10.10).



Рис. 10.10. Зовнішній вигляд альбедометра

Така система називається *альбедометром* (або *балансометром*). Детектор цього приладу містить термобатарею. Для запобігання впливу роси і вітру передбачено обдування детектора повітряним потоком за допомогою вентилятора. Звичайно альбедометри розміщують на висоті 1–2 м над землею поверхнею.

*Вимірювання довгохвильового випромінювання.* Вимірювання довгохвильового випромінювання атмосфери та земної поверхні здійснюється за допомогою *піргеометра*, який являє собою піранометр, в якому скляні півсфери замінені на купол, що виконує функції інфрачервоного фільтра. Спектральна область пропускання цього фільтра становить 0,3–100 мкм. Звичайно, використовують поліетиленову плівку або інтерференційні фільтри. Крім того, термопари приладу не фарбують. Чутливість приладу дорівнює  $\pm 10 \%$ .



Рис. 10.11. Піргеометр

*Піроелектричні методи.* Суть цих методів полягає в використанні залежності поляризації піроактивного кристалу від зміни його температури при опромінюванні. Активною речовиною є сегнетоелектрики. Піроелектричні прилади характеризуються швидкодією, високою чутливістю і великим діапазоном енергії, що вимірюються.

*Фотоелектричні методи.* Принцип дії цих приладів полягає в перетворенні енергії оптичного вимірювання в електричну внаслідок зовнішнього (*фотоелектронні помножувачі*) або внутрішнього (*фотодіоди*) фотоефекту.

*Спеціалізовані оцінки випромінювання.* В біології розгляд деяких специфічних фотохімічних процесів, таких як фотосинтез, внаслідок якого відбувається перетворення світлової енергії в хімічну, або транспірація, що супроводжується втратою водяної пари рослиною, оптичне випромінювання видимої області спектра (400–700 нм) відіграє панівну роль. Випромінювання цієї області спектра називається *фо-*

тосинтетично активним випромінюванням (ФАВ). Для оцінювання цього випромінювання вимірюють повну кількість фотонів, отриманих чи поглинутих в певній спектральній області, або загальну енергію випромінювання.

Кількість отриманих фотонів вимірюється в *ейнштейнах* (символ  $E$ ). Енергія одного моля фотонів дорівнює:

$$1 \text{ ейнштейн} = 1 E = N_A h\nu = 1 \text{ моль фотонів}, \quad (10.7)$$

де  $N_A$  – число Авогадро ( $6,023 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>);  $h\nu$  – енергія одного фотона. Видно, що величина енергії, еквівалентна 1  $E$ , залежить від частоти (довжини хвилі).

В табл.10.3 наведено співвідношення між одиницями оптичного випромінювання, що вимірюється у природних умовах.

10.3. Співвідношення між  $\text{мкЕ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  та  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$

$E, \text{мкЕ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$E, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$
3000	705,0
2500	587,5
2000	470,0
1500	325,5
1000	235,0
500	117,5

В літературі, для оцінювання співвідношення оптичного випромінювання з фотосинтетичною активністю рослин використовують *густину потоку фотосинтетичних фотонів (ГПФФ)*, яка має одиницю вимірювання  $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  або  $\text{моль} \cdot \text{фотони} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Для сонячного випромінювання існує фактор перетворення цієї одиниці в фотометричні:

$$1 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \approx 51 \text{ лк}. \quad (10.8)$$

#### Приклад

Енергетична освітленість земної поверхні в смузі фотосинтетично активного випромінювання (ФАВ) становить  $500 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Визначити густину потоку фотосинтетичних фотонів (ГПФФ), припускаючи, що енергія сонячного випромінювання дорівнює  $2,35 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

#### Розв'язання



Енергія, що відповідає потоку фотонів через одиницю поверхні за одиницю часу ( густина потоку фотосинтетичних фотонів ), ілена на мль фотонів, дорівнює загальній енергії  $E$  фотонів,що проходять через одиницю поверхні за одиницю часу , поділений на енергію одного фотона  $E_f$ :

$$ГПФФ ( \text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} ) / 1 \text{ моль} = E ( \text{Дж} ) / S ( \text{м}^2 ) \cdot t ( \text{с} ) \cdot E_f ( \text{Дж} ).$$

Звідси

$$ГПФФ = 500 ( \text{Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} ) \cdot 1 \text{ моль} / 2,35 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} = \\ = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

### Контрольне завдання

Чому дорівнює густина потоку енергії ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ) в смузі ФАВ, якщо ГПФФ становить  $1000 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ?

*Відповідь:*  $238 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “радіометр – тип випромінювання, для вимірювання якого він призначений”

- |                        |  |
|------------------------|--|
| <i>а. піранометр</i>   | <i>1. для вимірювання низхідного (атмосферного) або висхідного (земної поверхні) довгохвильового випромінювання в межах цілої півсфери</i> |
| <i>б. альбедометр</i>  | <i>2. для вимірювання прямого сонячного випромінювання при умові нормального падіння</i>   |
| <i>в. піргеліометр</i> | <i>3. для вимірювання сонячного випромінювання, що поступає з цілої півсфери ( кут зору <math>2\pi \text{ ср}</math> )</i>                 |
| <i>г. піргеометр</i>   | <i>4. для вимірювання сумарного та відбитого випромінювання</i>  |

### Репродуктивний тест

В чому полягають гіпотези О. Л. Чижевського щодо періодичності сонячної активності?

### Альтернативний тест

Чи вірно ствердження, що:

Точність піранометра першого класу становить  $\pm 1,0 \%$ . Так Ні

### Акордно-вибірковий тест

Знайти вірні відповіді на запитання

*“Якими перевагами характеризуються термоелектричні детектори?”*

*1. слабка залежність від температури; 2. проста конструкція; 3. здатність давати відліки в будь-якій ділянці спектру з постійною чутливістю; 4. швидкодія; 5. дають відлік в абсолютних одиницях; 6. висока лінійність.*

### **Конструктивні тести**

1. Пояснити механізми впливу вологості повітря на випромінювальні властивості атмосфери.

2. Чим пояснити шкідливу дію на організм людини ультрафіолетового (УФ-С) випромінювання?

## 11. ОПАДИ



### 11.1. Параметри опадів

Будь-які форми води, такі як дощ, паморозь, сніг, град, снігова та льодова крупа, що падають на земну поверхню, називаються *опадями*.

Перехід від туману (хмари) до дощу визначається швидкістю руху дощових краплин, яка залежить від їхнього розміру. Частинки туману мають сферичну форму та розмір менший, ніж 0,1 мм; краплини дощу мають сплюснуту форму та розміри від 0,1 мм до 9 мм.

Розглянемо основні параметри опадів – твердих або рідких продуктів конденсації водяної пари, що падають з хмар чи осаджуються з повітря на земну поверхню.

*Кількість опадів*, що випали, вимірюють товщиною (в міліметрах) того шару, який би утворився на земній поверхні, коли б опади не стікали, не випаровувалися і не просочувалися у ґрунт.

*Інтенсивність опадів* відповідає кількості опадів у міліметрах, яка випадає за 1 хв. За інтенсивністю опади поділяють на слабкі, помірні та сильні. Якщо інтенсивність опадів перевищує 1 мм за 1 хв, то такі опади належать до злив.

*Тривалість опадів* – параметр, що характеризує, як довго тривають опади.

Треба розрізняти ці параметри – помірний дощ протягом доби може дати 120 мм опадів, тоді як під час зливи цю кількість опадів можна зареєструвати за 20 хв. Отже, кількість опадів у розглянутих двох прикладах однакова, а інтенсивність і тривалість – різні.

Розглянемо процеси, які пов'язані з опадами.

*Випаровування* – перехід речовини з рідкого стану в газоподібний (пару). За рік з поверхні Світового океану випаровується близько  $450 \cdot 10^3$  км<sup>3</sup> води, а з поверхні суші – близько  $70 \cdot 10^3$  км<sup>3</sup>. Швидкість випаровування залежить від вологості повітря, температури поверхні, вітру.

*Конденсація* – перехід речовини внаслідок охолодження або

тиску з газоподібного стану в рідкий. Конденсація можлива при температурах, менших критичних для даної речовини. Критичною температурою для атмосферної води є температура плавлення льоду (273,2 К). Необхідною умовою конденсації є наявність центрів конденсації, функції яких в атмосфері виконують дрібні частинки – аерозолі або іонізовані атоми. Основними продуктами конденсації є *туман, роса, іній, паморозь, ожеледь* тощо.

Процес одночасної конденсації і розсіювання водяної пари в атмосфері супроводжується утворенням *хмар*. Воду, яка випадає на земну поверхню з хмар у рідкому або твердому стані називають *атмосферними опадами*. За зовнішнім виглядом розрізняють такі типи опадів як *дощ, сніг, крупа, град, мряка* тощо. Відповідно до характеру випадання опади поділяють на *облогові, зливові та мрячні*. Стресову ситуацію можуть викликати град і зливові дощі.

*Град* – це продукт конденсації водяної пари у грозових хмарах, де висхідні потоки повітря рухаються зі швидкістю більше, ніж 10 м/с, а температура становить  $-20...-30^{\circ}\text{C}$ . У 1993 р. у Кіровоградській області градини мали розміри курячого яйця; град завдав шкоди – загинуло 35 тис. га сільськогосподарських посівів. У 1984 р. у Таджикистані випав град, причому маса градин досягала 880 г.

*Зливи* – це дощі з інтенсивністю більш, ніж 0,5 мм за хвилину. Для Українських Карпат найхарактерніші зливи, що викликають селеві та зливові потоки. Зливові дощі призводять до вимивання рослин навіть на невеликих схилах, пошкодження посівів, водної ерозії ґрунту.

## **11.2. Взаємодія опадів з навколишнім середовищем**

Під час взаємодії опадів з елементами рослинного покриву (листя, гілки, стовбури) частина опадів затримується рослиною та не досягає землі. Цей процес називається *інтерцепцією*. Частина води, що затримується, випаровується в атмосферу.

Процес інтерцепції залежить від типу рослинності (хвойний чи листяний покрив, дерева, кущі чи трава), структури та густини рослинного покриву, метеорологічних факторів (параметрів опадів, сонячного освітлення, вітру). Контроль інтерцепції важливий з точки зору вивчення процесів утворення кислотних дощів та їх впливу на лісові екосистеми.

### 11.3. Ізотопи в опадах

Ядро характеризується *масовим числом*  $A$  (загальним числом нуклонів), *атомним номером*  $Z$  (що дорівнює числу протонів та порядковому номеру хімічного елемента в періодичній системі) та *числом нейтронів*  $N = A - Z$ .

Ядро позначається символом  ${}^A_ZX$ , де  $X$  – символ хімічного елемента. Наприклад,  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$  означає, що масове число заліза дорівнює 56, а атомний номер – 26.

Ядра з однаковими атомними номерами  $Z$ , але з різними масовими числами  $A$  та числами нейтронів  $N$  називаються *ізотопами* (від грецьких слів *ίσος* (iso-, "рівний", "той же самий") та *τόπος* ("місце")).

Наприклад, йод  ${}^{127}\text{I}$  має масове число  $A=127$ , число протонів  $Z=53$  і число нейтронів  $N=74$ ; у той же час у природі існують ізотопи йоду  ${}^{123}\text{I}$ ,  ${}^{125}\text{I}$  та  ${}^{131}\text{I}$ , в яких число нейтронів  $N$  становить 70, 72 та 78 відповідно. Як приклад наведемо ізотопи вуглецю  ${}^{11}_6\text{C}$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{13}_6\text{C}$ ,  ${}^{14}_6\text{C}$ .

*Стабільні ізотопи* характеризуються відсутністю радіоактивного розпаду у часі.

Молекула води складається з двох атомів: водню  $H$  та кисню  $O$ . Ці елементи мають такі стабільні ізотопи:  ${}^1\text{H}$ : 99.9844%;  ${}^2\text{D}$ : 0,0156%;  ${}^{16}\text{O}$ : 99,763%;  ${}^{17}\text{O}$ : 0,0375%;  ${}^{18}\text{O}$ : 0,1995%.

### 11.4. Фракціонування ізотопів

Застосування сучасних методів аналізу показує, що різні ізотопи елементів поведуть себе по-різному у фізичних процесах (важкі ізотопи мають меншу рухливість та швидкість дифузії) та хімічних реакціях (атоми різних ізотопів відрізняються розмірами та атомною вагою). Наявність такої різниці у поведінці ізотопів називається *фракціонуванням ізотопів*.

Поширеність стабільних ізотопів виражається як відношення двох найпоширеніших ізотопів у зразку до такого ж відношення ізотопів у міжнародному стандарті. Позначається така поширеність дельта-функцією:

$$\delta_{\text{sample}} = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / (R_{\text{standard}})] \times 1000, \quad (11.1)$$

де  $R_{\text{sample}}$  – відношення  ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$  або  ${}^2\text{H}/{}^1\text{H}$  у зразку та  $R_{\text{standard}}$  – для міжнародного стандарту.

Оскільки різниця між відношеннями у зразку та міжнародному

стандарті незначна, вона виражається у "промиле" (одна десята процента або одна тисячна; позначається як ‰).

У табл. 11.1 наведено міжнародні стандарти та абсолютні відношення для деяких ізотопів у навколишньому середовищі. Такі елементи як водень та кисень мають кілька міжнародних стандартів.

11.1. Міжнародні стандарти та абсолютні відношення для деяких ізотопів у навколишньому середовищі.

Елемент	$\delta$ величина	Відношення, що вимірюється ( $R_{sample}$ )	Назва міжнародного стандарту	Величина стандарту ( $R_{standard}$ )
Водень	$\delta D$	$^2H/^1H$	Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)	0,00015575
		$^2H/^1H$	Standard Light Antarctic Precipitation (SLAP)	0,000089089
Кисень	$\delta^{18}O$	$^{18}O/^{16}O$	Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)	0,0020052
		$^{18}O/^{16}O$	Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)	0,0020672
		$^{18}O/^{16}O$	Standard Light Antarctic Precipitation (SLAP)	0,0018939

### 11.5. Стабільні ізотопи у процесі опадів

Протягом водного циклу відношення ізотопів змінюються завдяки процесам випаровування та конденсації. Глобальний клімат, регіональна топографія та розподіл вологості впливають на ці зміни. Ядра атомів відповідають за фізичні властивості води: легкі молекули води скоріше випаровуються з поверхні океанів та збагачують атмосферну пару легкими ізотопами  $^{16}O$ . Теж саме можна сказати про рослини, які збагачують атмосферу легкими ізотопами через транспірацію. Отже, маси атмосферного повітря з легкими ізотопами рухаються

до півночі, де вони охолоджуються та покидають атмосферу у вигляді опадів, збагачених важкими ізотопами  $^{18}\text{O}$  (рис. 11.1), тоді як в атмосфері залишаються легкі ізотопи  $^{16}\text{O}$ .

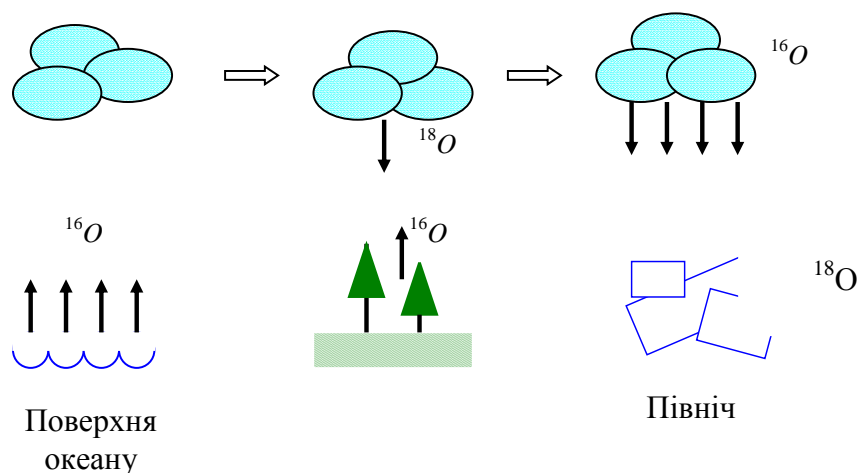


Рис. 11.1. Рух маси атмосферного повітря з легкими ізо-  
топами

Таким чином, застосування техніки стабільних ізоотопів в екогідрології дає можливість вивчити походження та вік великих мас води, оцінити рівень їх перемішування, визначити місцезнаходження та параметри водних потоків.

#### 11.6. Вимірювання опадів

Прилад для збирання та вимірювання рідких опадів протягом певного проміжку часу називається *дощоміром* (наприклад, кількість опадів у мм протягом 24 год).

Дощомір складається з ємності, відкритої зверху, яка містить два елементи – колектор і приймач (рис. 11.2).

Колектор має циліндричну або конусоподібну форму; площа отвору його становить близько  $100\text{--}200\text{ см}^2$ . Приймач обладнаний шкалою для вимірювання зібраної води. Для запобігання випаровування на поверхню води наносять шар нафти товщиною 5 мм. Вершина приладу розташована на висоті 30 см від земної поверхні. Вся конструкція розміщується на бетонному фундаменті.

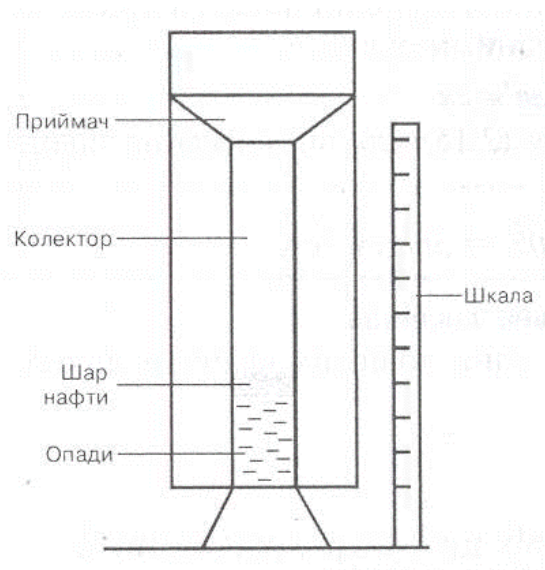


Рис.11.2. Дощомір

*Нахилені черпаки* використовуються на автоматизованих станціях за спостереженням погоди. Вони складаються з двох черпаків трикутної форми, з'єднаних з одного боку. Вся конструкція може обертатися навколо горизонтальної осі (рис.11.3). Під час дощу один з черпаків заповнюється водою та перекидається; з цього моменту починає заповнюватися другий черпак.

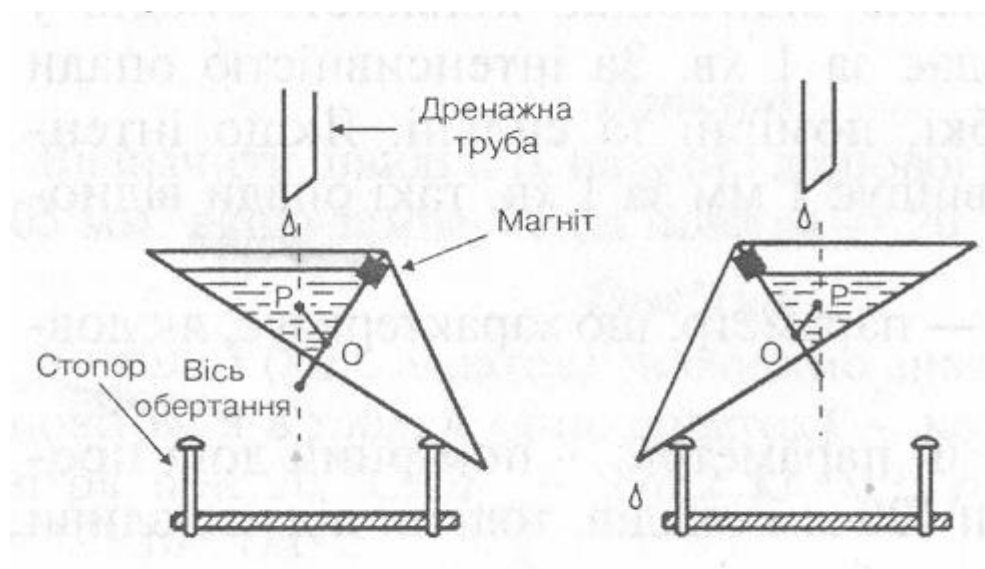


Рис.11.3. Вимірювання опадів за допомогою нахилених черпаків



Невеликий магніт виконує функції контакту, що замикає електричний ланцюг. Кількість опадів відповідає кількості замикань ланцюга, тоді як час між двома замиканнями дає можливість оцінити інтенсивність дощу.

*Сифонний дощомір* являє собою циліндричний резервуар, обладнаний поплавком, що поєднується з пером самописа (рис. 11.4). За допомогою сифону резервуар звільнюється від води, коли кількість її досягне певного рівня, і перо самописа повертається в початковий стан.

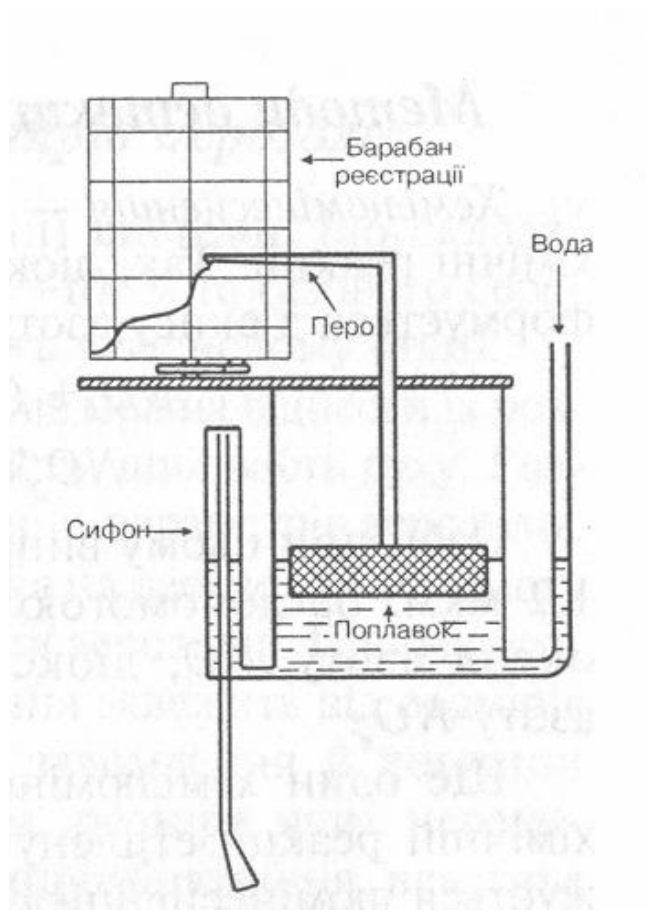


Рис. 11.4. Сифонний дощомір

*Ваговий опадомір* базується на постійному контролі ваги води, зібраної в контейнері, за допомогою вимірювальної системи. Контейнер поєднаний з пружинним механізмом та шкалою (рис. 11.5). Процес запису опадів триває від 24 год до 7 діб.

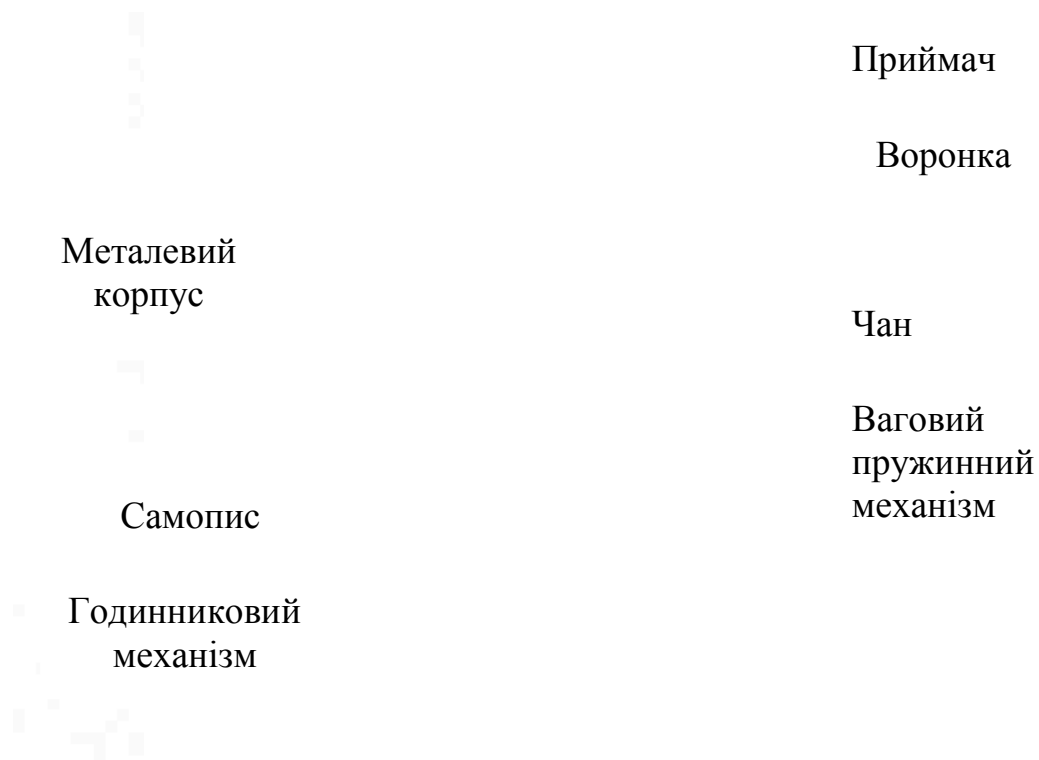


Рис. 11.5. Ваговий дощомір

*Дистанційне зондування.* Оцінювання опадів на відстані здійснюється за допомогою радіолокаційних засобів, зокрема *Допплерівського локатора*, який дозволяє оцінити швидкість руху дощових краплин, або *поляриметричного Допплерівського локатора*; останній дає можливість визначати горизонтальні та вертикальні розміри дощових краплин.

Застосування *супутників* дає можливість здійснювати аналіз та прогнозування опадів. З цією метою використовують супутники, що рухаються на геостаціонарних орбітах, тобто по колу над екватором; до них належать GOES-8, GOES-10, GMS-5, Metsat-6, та Metsat-7, або низькоорбітальні супутники, такі як TRMM, NOAA-15, -16, -17, DMSP F13, F14, F15.

Слід відзначити супутник *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* сумісного виробництва США та Японії, призначений для моніторингу опадів у тропіках. Він обладнаний радіолокатором для детектування опадів, системою побудови зображень, радіометром видимої та інфрачервоної облсті, сенсором блискавок та хмар. Така супутникова система дає можливість аналізувати глобальні опади протягом

року та надавати візуальні зображення опадів з космосу.

*Вимірювання туману.* Туман є важливим джерелом вологи та поживних речовин для лісових екосистем. Оцінювання туману дає можливість одержати інформацію щодо кислотних дощів, водного балансу, взаємодії туману з рослинними покривами. Густина туману становить  $0,05 \text{ кг/м}^3$ ; діаметр краплин 1–40 мкм.

Туман збирають за допомогою *пасивного струнного колектора*, який містить циліндр 21x45 см із загальною площею  $945 \text{ см}^2$ . Краплини туману осідають на 460 вертикальних тефлонових струнах та скочують донизу для подальшого аналізу (рис. 11.6).

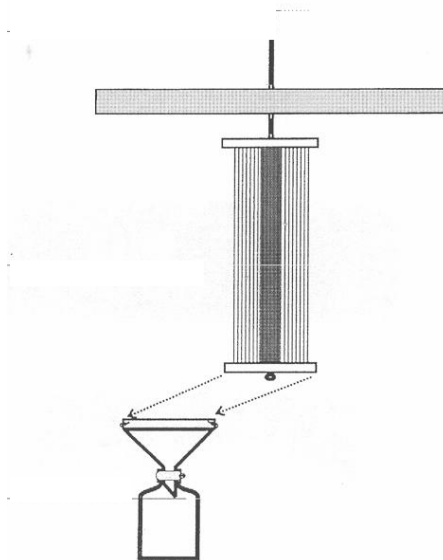


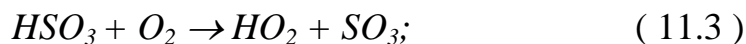
Рис. 11.6. Пасивний струнний колектор для вимірювання туману

### 11.7. Кислотні дощі

*Кислотні дощі* виникають завдяки природним та індустріальним викидам оксидів сірки та азоту в атмосферу, де вони перетворюються в частинки сульфатів і нітратів, що змішуються з водяною парою та утворюють сірчану та азотну кислоти, які повертаються на земну поверхню за рахунок седиментації або у вигляді опадів. Сірка потрапляє в атмосферу в результаті руйнування біосфери, вулканічної діяльності, випаровування води з поверхні океанів. Азот надходить в атмосферу внаслідок ґрунтової емісії окису азоту, грозових розрядів, горіння біомаси, спалювання природного палива, роботи двигунів внутрішнього згорання, активності транспорту.

Всі ці гази розширюються у вертикальних і горизонтальних напрямках; під час цих переміщень забруднюючі речовини зазнають певних фізико-хімічних перетворень за рахунок індукованих сонячним

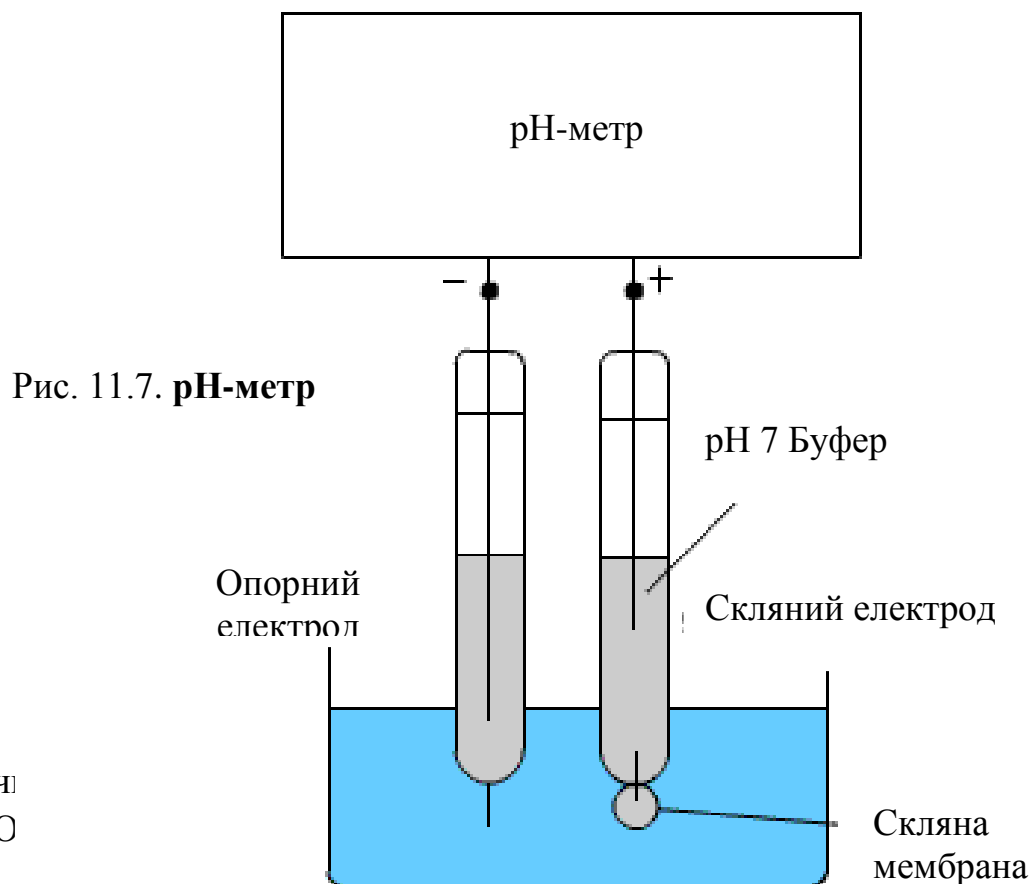
світлом хімічних реакцій:



Результатом цих реакцій є утворення сірчаної або азотної кислот.

### 11.8. Вимірювання забруднень в опадах

**pH-метрія.** Принцип дії pH-метра полягає в вимірюванні концентрації водневих іонів, яка визначає рівень кислотності. Ці іони утворюються завдяки реакції кислот, розчинених у дощовій воді, з водою. Типовий pH-метр складається зі спеціального скляного електрода, зв'язаного з електронним вимірювачем (рис. 11.7). Шкала кислотності варіює від 0 (максимальна кислотність) до 7 (нейтральна ситуація) і до 14 (максимальна лужність). Чистий дощ має pH 5,6; діапазон рівнів pH від 0 до 5 відповідає кислотному дощу.



розчину.

Одиниця вимірювання електропровідності – *Сіменс* (А/В). Питома електропровідність вимірюється у *Сі/м*. Під час вимірювання електропровідності об'єктів навколишнього середовища використовують такі одиниці питомої електропровідності як *децисіменс на метр* (дСі/м) або *мікросіменс на сантиметр* (мкСі/см).

Шкала електропровідності варіює від 0,05 мкСі/см для чистої води; 5 мкСі/см для демінералізованої води; 10–500 мкСі/см для водних потоків;  $10^5$  мкСі/см для концентрованих кислотних та лужних середовищ.

*Іон-обмінна хроматографія* – це процес розділення іонів та полярних молекул, які мають електричні заряди, завдяки кулонівській взаємодії. Взагалі, *хроматографія* (від грецьких слів *χρῶμα*: *chroma* – колір та *γραφειν*: *grafein* – писати) – це метод розділення, знаходження і визначення речовин, оснований на неоднаковості їх поведінки в системі із двох фаз, які не змішуються, – *рухомій* і *нерухомій*.

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 адсорбцію, розчинення, кулонівську взаємодію, спорідненість одних молекул іншим, відбувається просторове розділення цих компонентів – одні компоненти затримуються на початку шляху, інші просуваються уперед тощо. На рис. 11.8 наведено механізми осідання компонентів суміші на нерухомій фазі: *а* – адсорбція; *б* – розчинення; *в* – кулонівська взаємодія; *г* – відділення дрібних молекул від великих; *д* – спорідненість одних молекул іншим.

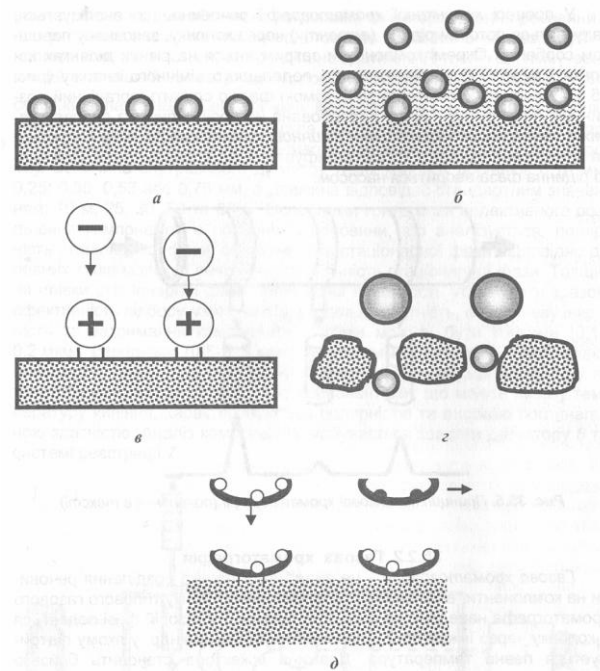


Рис. 11.8. Механізми осідання компонентів суміші на нерухомій фазі

Суть іон-обмінної хроматографії полягає в тому, що стаціонарна фаза містить функціональні іонні групи, які взаємодіють з іонами компонентів, що мають протилежні заряди. Схему типового іон-обмінного хроматографа (*The 761 Compact IC System*) наведено на рис. 11.9.

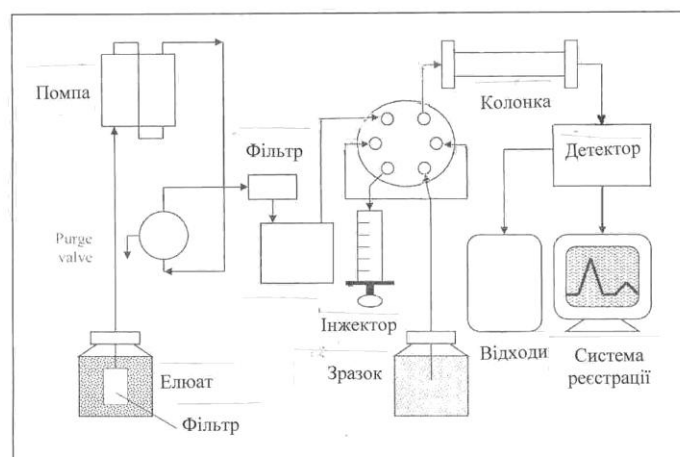


Рис. 11.9. Схема іон-обмінного хроматографа 761 Compact IC

Прилад містить колонку для розділення суміші на компоненти, інжектор для постачання суміші у колонку, судини з елюатом та зразком, помпу високого тиску, яка забезпечує швидкість потоку від 0,2 до 2,5 мл/хв, детектор, систему реєстрації. Крім того, прилад обладнаний системою захисту колонки від руйнування, коливань температури, електромагнітних випромінювань.

Чутливість іон-обмінного хроматографа становить  $10^{-9}$ .

### Практичні завдання

#### Стабільні ізотопи

Чому дорівнює  $\delta^{18}O$ , якщо відношення двох найпоширеніших ізотопів  $^{18}O/^{16}O$  у зразку до такого ж відношення ізотопів у міжнародному стандарті становить  $-10\text{‰}$ ?

#### Перехід від туману до дощу

Перехід від туману (хмари) до дощу характеризується швидкістю руху краплин, яка пов'язана з їх розміром. На рис.11.10 наведено залежність швидкості руху водяних краплин від їх радіуса: краплини радіусом  $< 100\text{ мкм}$  належать хмарам, при більших радіусах – дощу.

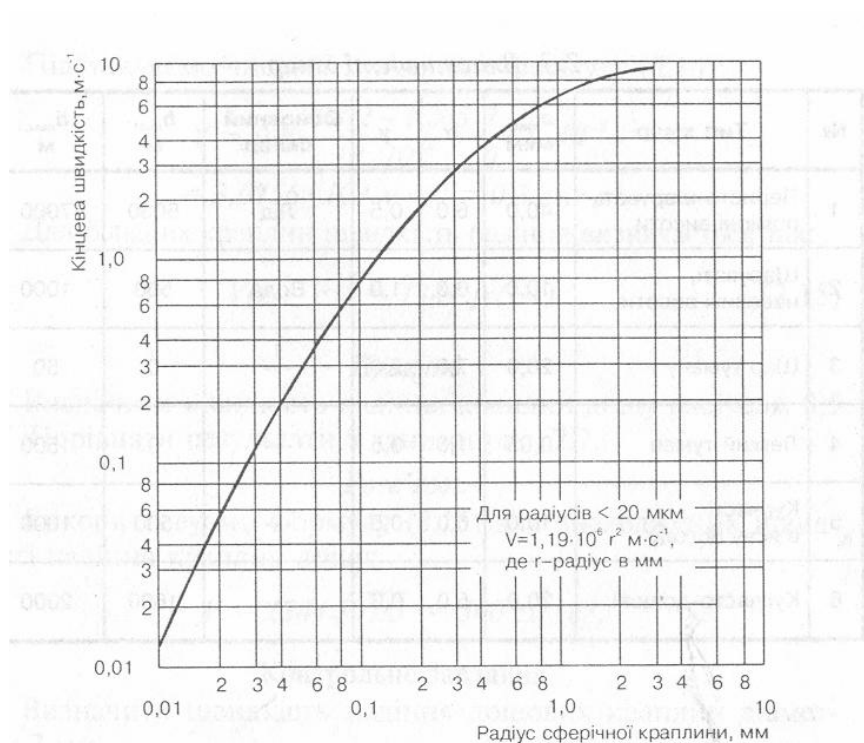


Рис. 11.10. Залежність швидкості падіння краплин дощу від діаметру (тиск 760 мм рт. ст., температура  $20^{\circ}\text{C}$ )

Функція розподілу краплин хмари за розмірами має вигляд:

$$N(a) = N_0 a^\alpha \exp(-ba^\gamma), \quad (11.6)$$

де  $\alpha$  і  $\gamma$  - константи, що залежать від властивостей хмар ( табл. 11.2 ),  $b = \frac{\alpha}{(a_{\max})^\gamma \gamma}$ .

### 11.2. Властивості хмар

№	Тип хмар	$a_{\max}$ мкм	$\alpha$	$\gamma$	Основний склад	$h_{\min}$ м	$h_{\max}$ м
1	Перисто-шаруваті, по- мірні висоти	40,0	6,0	0,5	Льод	5000	7000
2	Шаруваті, невеликі висоти	10,0	6,0	1,0	Вода	500	1000
3	Шар туману	20,0	7,0	2,0	-“-	0	50
4	Легкий туман	0,05	1,0	0,5	-“-	0	1500
5	Купчасті в ясну погоду	10,0	6,0	0,5	-“-	500	1000
6	Купчасто-дощові	20,0	5,0	0,3	-“-	1600	2000

### Контрольне завдання

Побудувати нормалізований розподіл за розмірами, що належать різним типам хмар (№ 1-6 з табл.11.2). Нормалізований розподіл відповідає  $N/N_0 = 1$  при  $a = a_{\max}$ .

Розподіл аерозолів за розмірами описується рівнянням:

$$N(a) N_0 a^{-\beta}, \quad (11.7)$$

де  $a$  – радіус аерозолію,  $\beta \cong 3$  для радіусів, що знаходяться в межах  $0,1 \text{ мкм} < a < 1 \text{ мкм}$ .

### Швидкість падіння дощових краплин

Швидкість падіння дощових краплин визначається за законом Стокса:

$$v = g \frac{(\rho_{кр} - \rho_{пов})}{\eta} \cdot \frac{2R^2}{9}, \quad (11.8)$$

де  $\rho_{кр}$  – густина краплини;  $\rho_{пов}$  – густина повітря;  $\eta$  – в'язкість повітря;  $g$  – при-



скорення вільного падіння;  $R$  – радіус краплини.

### Приклад

Визначити швидкість падіння дощової краплини радіусом 0,005 мм, якщо температура повітря становить 20 °С.

### Розв’язання

З табл.3 (див. Додаток) знаходимо значення густини води і повітря, а з табл.4 (див. Додаток) – коефіцієнта в’язкості повітря при 20 °С:  $\rho_{кр} = 998,2 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{пов} = 1,205 \text{ кг/м}^3$ ,  $\eta = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Підставляємо числові значення у формулу ( 11.8 ):

$$v = 9,8 \frac{998,2 - 1,205}{18 \cdot 10^{-6}} \frac{2}{9} (5 \cdot 10^{-6})^2 = 3,0156 \cdot 10^{-3} \text{ м/с} = 0,3 \text{ см/с}.$$

Для більш великих краплин швидкість падіння визначається так:

$$v \text{ (см/с)} = 1344 \sqrt{r \text{ (см)}}. \quad ( 11.9 )$$

### Приклад

Визначити швидкість падіння краплин дощу радіусом 0,5 мм. Порівняти результати з даними рис.11.10.

### Розв’язання

Використовуємо формулу ( 11.9 ) для знаходження швидкості падіння краплин дощу:

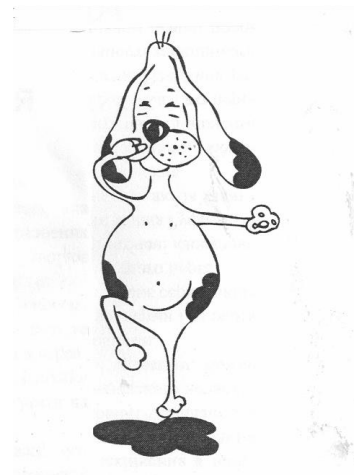
$$v = 1344 \sqrt{0,05} = 300 \text{ см/с}.$$

### Контрольне завдання

Визначити швидкість падіння дощових краплин діаметром 7 мм.  
Відповідь: 7,95 м/с.

## II. РЕЦЕПЦІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ СЕРЕДОВИЩА

### 12. МЕХАНОРЕЦЕПЦІЯ



#### 12.1. Визначення механорецепторів

Складним чином 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, призначені для трансформації механічного стимулу в активність нервової клітини, що 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).

#### 12.2. 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. 12.1.

Вільні нервові закінчення є найпоширенішими рецепторами 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* діаметром 100–500 мкм, яка височіє над поверхнею шкіри.

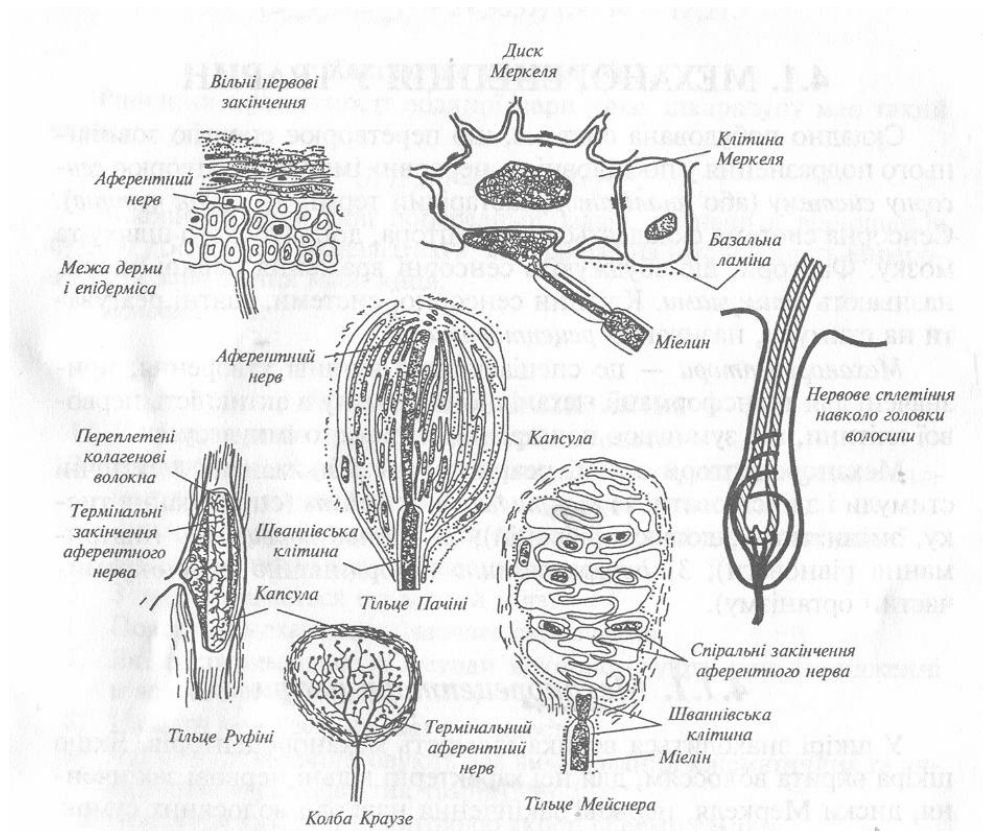


Рис. 12.1. Типи механорецепторів

Кожна клітина Меркеля з'єднується з термінальним диском аферентного нервового волокна. Кількість дисків Меркеля в одній корпускулі може досягати 30–50. Цей тип механорецепторів можна зустріти, наприклад, на губах тварин.

*Нервові закінчення навколо волос* являють собою 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 волос. Наприклад, у вусі кроля одне волокно охоплює близько 300 волосяних фолікулів на площі 1 см<sup>2</sup>. У тварин у волосяному покриві зустрічаються чутливі

волоски – *вібриси*, які локалізуються навколо ротового отвору. Кожна вібриса може бути оточена більш, ніж 100 волокнами, що забезпечує її високу чутливість.

*Тільця Мейснера* виявляються в шкірі, позбавленої волосяного покриву. Вони знаходяться в сосочковому шарі дерми і мають конусо- або еліпсоподібну форму. Довжина тілець Мейснера становить 90–120 мкм. Зовні кожне тільце покрито тонкою капсулою, 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. 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 обплітене товстими м'якотними волокнами.

*Колби Краузе* знаходяться в підсосочковому шарі дерми і являють собою сферичні утворення, покриті капсулою. Внутрішнє середовище пронизане розгалуженою мережою закінчень аферентного нерва.

*Тільці Руфіні* мають веретеноподібну форму та оточені капсулою. Діаметр рецептора досягає 150 мкм. Основу кожного тільця Руфіні становить складним чином переплетені колагенові волокна, які зв'язані з численним розгалуженнями аферентного нервового волокна.

Згідно з гіпотезою про механорецепторне перетворення на мембрані виникає рецепторний потенціал внаслідок того, що під впливом стимулу зростає проникність мембрани для йонів  $\text{Na}^+$  і  $\text{Ca}^{++}$ , які переміщуються в напрямку їх електрохімічних градієнтів. Величина рецепторного потенціалу варює залежно від інтенсивності зовнішнього подразнення. З досягненням рецепторним потенціалом певної порогової величини відбувається збудження *потенціалу дії*, який поширюється в сенсорному волокні. Частота нервових імпульсів у цьому волокні лінійно залежить від інтенсивності подразника.

### 12.3. Вестибулорецепція

Оцінка положення і переміщення тіла у просторі, засноване на визначенні напрямку дії лінійного чи обертального прискорення, становить суть *вестибулорецепції*. Цей тип рецепції реалізується за допомогою *вестибулярного апарату*, який розміщений у внутрішньому вусі складається з *переддвер'я* і *трьох напівкруглих каналів*, розташованих взаємоперпендикулярних площинах (рис.12.2).

У порожнині переддвер'я знаходяться рецепторні клітини з волосками, занурені в желеподібну масу, яка містить кристали карбонкальцію – так звані *отоліти*.

Якщо голова людини або тварини нахиляється, напівкруглі канали набувають прискорення, тоді як ендолімфа залишається на місці через силу інерції.

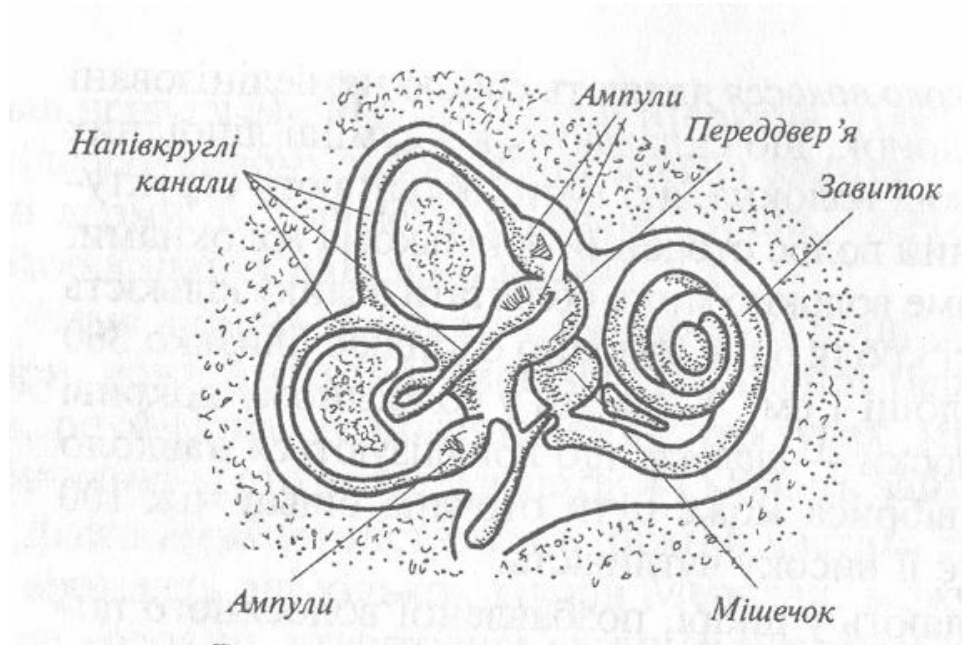


Рис. 12.2. Вестибулярний апарат

Внаслідок цього отоліти зміщуються і згинають волоски, що призводить до збудження нервових клітин, які зв'язані з рецепторними клітинами, і передачі інформації до мозку про положення голови або тіла у просторі (рис.12.3).

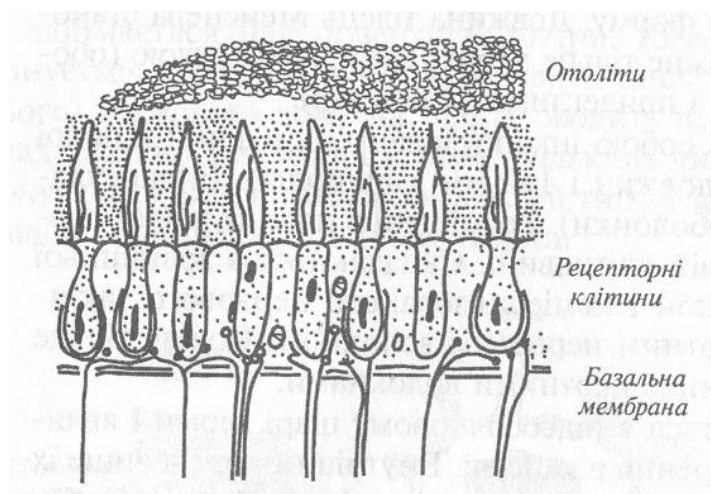


Рис.12.3. Вміст порожнини переддвер'я

Обидва внутрішніх вуха являють собою *білатеральну* рецепторну систему: якщо під час обертання голови ліві напівкруглі канали набувають прискорення, то праві канали набувають сповільнення. У мозку відбувається порівняння та аналіз частоти посилення біопотенціалів, які надходять з обох систем.

#### 12.4. Інтерорецепція

Рецептори, локалізовані в серцево-судинній системі та внутрішніх органах, які здатні сприймати подразники різної природи, називаються *інтерорецепторами*. Інтерорецептори поділяють 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 зв'язані з сухожиллями (рис.12.4); вони надають інформацію про *видовження м'яза*.

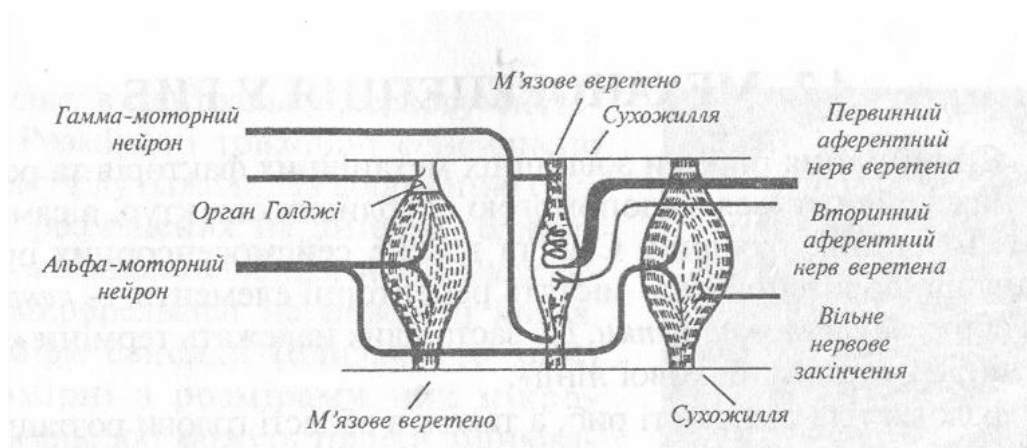


Рис. 12.4. М'язове веретено

М'язове веретено являє собою інкапсуловану групу тонких і спеціалізованих м'язових ниток. Оскільки капсула, де знаходяться ці нитки, має веретеноподібну форму, ці нитки називають *внутрішньоверетенними*. Вони зв'язані з сухожиллями; причому, кінці цих ниток містять скоротливі білки, тоді як середня частина позбавлена їх. Чутливий 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 виник-

нення біопотенціалів, частота яких залежить від рівня зміни довжини середньої частини.

Сухожильний орган Гольджі являє собою тонку капсулу, всередині якої є сухожилля, що зв'язує 15–20 м'язових волокон (рис.12.5).

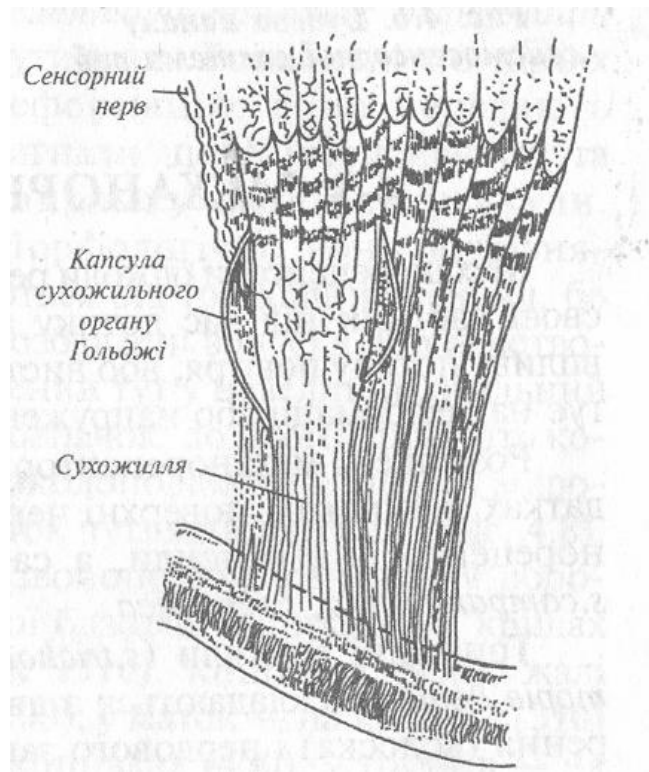


Рис. 12.5. Сухожильний орган Гольджі

Кожний орган має аферентний нерв, який посилає потенціали в центральну нервову систему під час скорочення м'яза. Орган Гольджі реагує на *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. Механорецептори, які розташовані поблизу поверхні шкіри (наприклад, тільця Мейснера), реагують на такі механічні стимули як стиск, вигин, розтяг. Такі утворення виконують функції рецепторів *дотику*. Механо-

рецептори, які знаходяться в глибині шкіри (наприклад, тільця Пачіні), реагують на *зміну тиску*. Механорецептори опорно-рухового апарату (*інтерорецептори*) дають інформацію про *зміну довжини м'язів або напруги*, що виникають у них. Вестибулорецептори реагують на *лінійне або обертальне прискорення*.

### 12.5. Механорецепція у риб

Сприймання рибами зовнішніх механічних факторів та реакція на них здійснюється за допомогою особливих структур, а саме: ампул Лоренціні, пухирців Саві та власне сейсмосенсорних органів (каналів, борозенок), які містять рецепторні елементи – *невромасти* або *сейсмосенсорні пупки*. До застарілих належать терміни “бокова лінія” та “органи бокової лінії”. Вздовж тіла більшої кількості риб, а також в області голови, розташована сейсмосенсорна 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, зв'язані з чутливими клітинами (*neuromasts*). До кожної такої клітини підходить нерве закінчення (рис. 12.6).

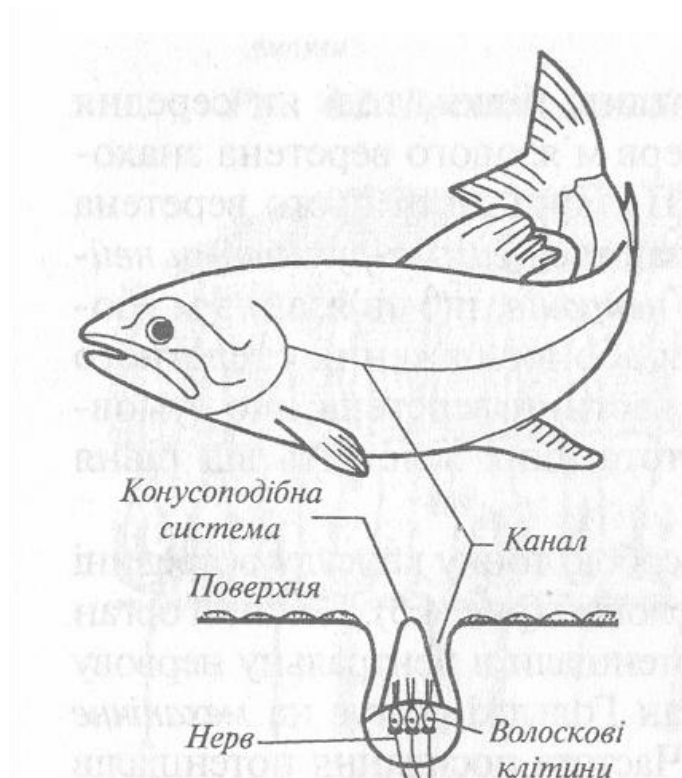


Рис. 12.6. Будова каналу сейсмосенсорної системи риб



Потік води, що рухається, викликає деформацію волосків, що сприяє утворенню електричних потенціалів та їх передачі у нервову систему. Такі сейсмодатчики системи, які спроможні реагувати на мінутні зміщення води, забезпечують інформацією щодо напрямку руху водних потоків та наявності турбулентних течій, викликаних присутніми у водному середовищі членів зграї або ворогів.

## 12.6. Механорецепція у комах

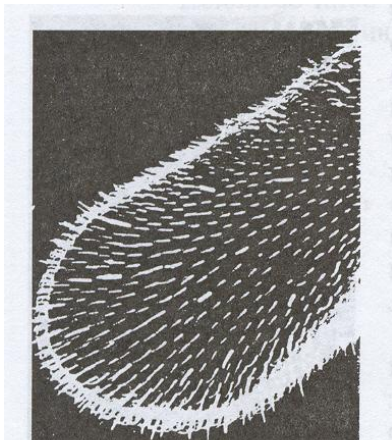


Рис. 12.7. Трихоїдна сенсила як рецептор дотику

Механорецептори бджоли реагують на механічні деформації певної своєї частини під час дотику або контакту з твердим субстратом, впливу потоку повітря, або виступають як пропріорецептор, відкликаючись на деформації або напруги м'язів та зовнішнього скелета. Розміщені механорецептори бджоли на вусиках, ротових придатках, кінцівках, поверхні черевця. Чутливими елементами механорецепторів є сенсили, а саме: *sensilla trichodea*, *s.scolopophora*, *s.campaniformia*, *s.schaetica*. Трихоїдні сенсили (*s.trichodea*), які виконують функції рецепторів дотику, складаються з двох частин – спеціалізованого кутикулярного утворення (волоска) і нервового закінчення, яке знаходиться в контакті з цим утворенням (рис. 12.7).

Подразнення волоска передається розташованій біля його основи нервовій клітині і через її відростки потрапляє у центральну нервову систему. Розміщені трихоїдні сенсили по всьому тілу бджоли. За допомогою тих сенсил, що розташовані на антенах, бджола має можливість виявляти та аналізувати мікрорельєфи на поверхні квітів. Розміри сенсиль (близько 10 мкм) соразмірні розмірам цих мікрорельєфів, які можуть трошки змінюватися від краю квітки до центра; аналіз цих змін дає інформацію відносно розташування нектару. Трихоїдні сенсили, що розміщені у місці зчленування голови та грудей, виконують також функції гравіорецепторів. Тиск голови на груди залежить від положення голови бджоли відносно тіла: реєструючи рівень тиску за допомогою волосків, бджола спроможна контролювати положення у просторі свого тіла, а також вимірювати кути шестикутних чарунок при їх побудові. Реакція бджоли на механічні напруги та деформації відбувається завдяки сенсилам, що розташовані на голові та кінцівках (*s.scolopophora*), а також на

гострому кінці жала (*s.campaniformia*). На відміну від трихоїдних ці сенсили спеціалізуються як *пропріорецептори пружних деформацій* кутикули. Розміщені по лініях деформацій, вони передають сигнали щодо інтенсивності та напрямку вигинів кутикули. Морфологічно вони відрізняються від трихоїдних сенсил, бо позбавлені волоска, який перетворений тут у невеликий овальний ковпачок, до якого підходить колоколоподібний кінцевий відросток чутливої клітини. Колоколоподібні сенсили у робочій 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.

Ще одна спеціалізована форма механорецепторів – *джонстонів орган* (*s. chaetica*), який знаходиться на другому членику антени. Стимуляція цього органу відбувається під час обмацування антенами різних предметів та руху бджоли у повітрі.

Рецептори таргана розташовані на гомілках; рецептори вібрації клопа-стародуба знаходяться в дистальних ділянках кінцівок; рецептори мурашок-лісторезів знаходяться в суглобах передніх кінцівок; рецептори бджоли на вібрації субстрату, на поверхні якого вона знаходиться, відбувається за рахунок субгенуальних органів (*s.scolopophora*) на гомілках передніх кінцівок.

### Репродуктивні тести

1. Що таке механорецептор?
2. На які механічні стимули реагують механорецептори?
3. Назвати механорецептори шкіри.

### Альтернативний тест

Чи вірне ствердження, що диски Меркеля можна зустріти на губах тварин?                      Так    Ні

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “Тип механорецептора – його ознаки”

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| а. Вільні нервові закінчення | 1. Тільця веретеноподібної форми діаметром до 150 мкм                              |
| б. Диски Меркеля             | 2. Інкапсуловані закінчення в шкірі розмірами 4-5 мм завдовжки та 1-2 мм завширшки |

*в. Тільця Мейснера*

*г. Тільця Пачіні*

*е. Колби Краузе*

*ж. Тільця Руфіні*

*3. Сферичні утворення в підсосочковому шарі дерми*

*4. Тільця конусо- або еліпсоподібної форми довжиною 90-120 мкм*

*5. Тактильна корпускула діаметром 100-500 мкм, що височіє над поверхнею шкіри*

*6. Розвинена мережа нервових волокон у поверхневих структурах дерми*

### **Вибіркові тести**

Знайти вірні ствердження:

- 1. М'язові веретена надають інформацію про: а. напругу в сухожіллі; б. обертальне прискорення; в. видовження м'яза.*
- 2. За допомогою яких структури сприймаються рибою зовнішні механічні фактори? а. ампул Лоренціні; б. пухирців Саві; в. трихоїдних сенсил; г. сейсмоденситетних органів.*

### **Акордно-вибірковий тест**

Знайти вірні відповіді на запитання

*“Коли механорецептори бджоли реагують на механічні деформації?”*

- 1. Під час дотику;*
- 2. Під час контакту з твердим субстратом;*
- 3. Під впливом потоку повітря.*

### **Конструктивні тести**

- 1. Які функції виконує Джонстонів орган бджоли?*
- 2. Як сприймається рибою потік води?*

## 13. ГРАВІРЕЦЕПЦІЯ



### 13.1. Комахи та гравітація

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

При побудові цих 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. 3.3). У звичайному стані голова опирається на два хітинових виступи грудей (*XB*) вище центра маси (рис. 3.3, *a*).

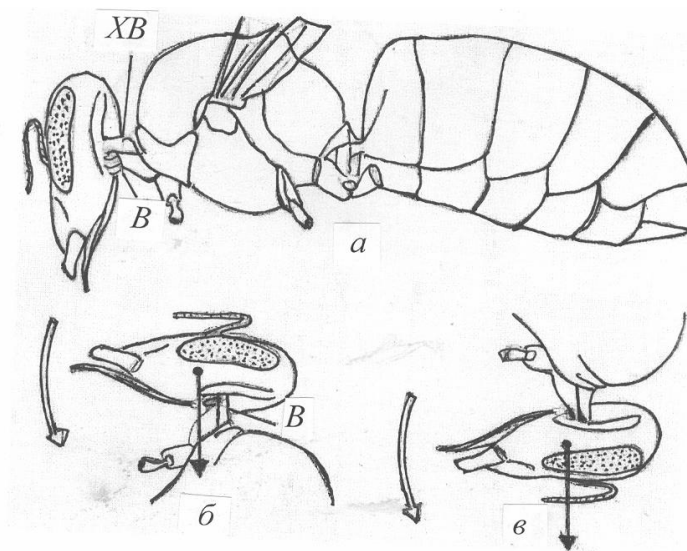


Рис. 3.3. Орган рівноваги бджоли

При вертикальному розміщенні бджоли головою догори нижня її частина тисне на груди (рис. 3.3 б), причому чутливі волоски *В* сприймають цей тиск; при розміщенні головою донизу ситуація змінюється (рис. 3.3 в). Таким чином, реєструючи рівень тиску голови на груди за допомогою волосків, бджола здатна контролювати положення у просторі свого тіла та стільників.

### 13.2. Гравірецепція рослин

Клітини на верхніх ділянках стебла чи кореня підлягають дії такої ж гравітаційної сили, що і на нижніх ділянках. Отже, такий зовнішній стимул як гравітація 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 *статолітів*.

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. 13.1).

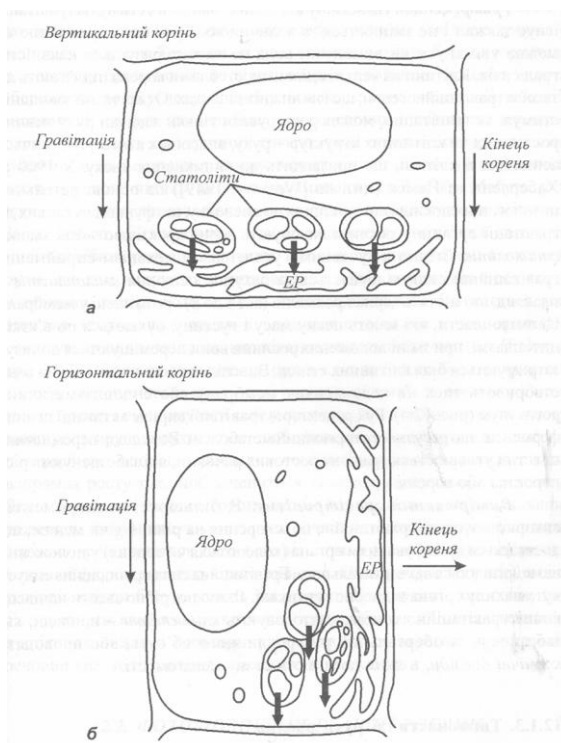


Рис. 13.1. Схематичне пояснення механізму гравірецепції: *а* – однорідний тиск статолітів на ендоплазматичний ретикулум при вертикальній орієнтації коріння; *б* – перерозподіл статолітів при горизонтальній орієнтації коріння, що обумовлює неоднорідний тиск статолітів на ендоплазматичний ретикулум *ЕР*

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

### **Акордно-вибірковий тест**

Знайти вірну відповідь на запитання:

*“Які органи бджоли виконують функції гравіорецепторів?”*

1. гомілки; 2. трихоїдні сенсили; 3. восьмий членик антени; 4. субгенуальні органи; 5. джонстонів орган; 6. хітинові виступи грудей.

### **Репродуктивні тести**

1. Які органи рослини виконують функції гравіорецепторів?
2. В чому полягає механізм сприймання гравітаційної сили рослинами?

## 14. АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ



### 14.1. 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. 14.1). При рівності довжини цього простору чверті довжини хвилі звуку має місце *резонанс* – відносно великий селективний (вибірний) відгук коливальної системи на періодичний вплив з частотою, близькою до частоти її власних коливань. Під час резонансу відбувається різке зростання амплітуди вимушених коливань системи. Максимальна чутливість слухового аналізатора проявляється саме до резонансних частот.

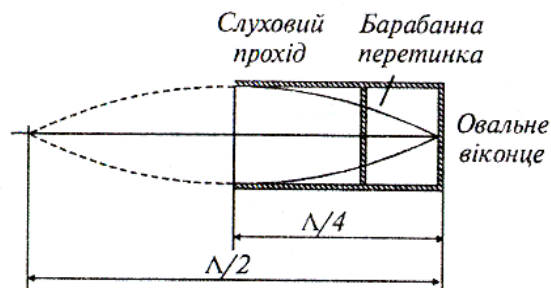
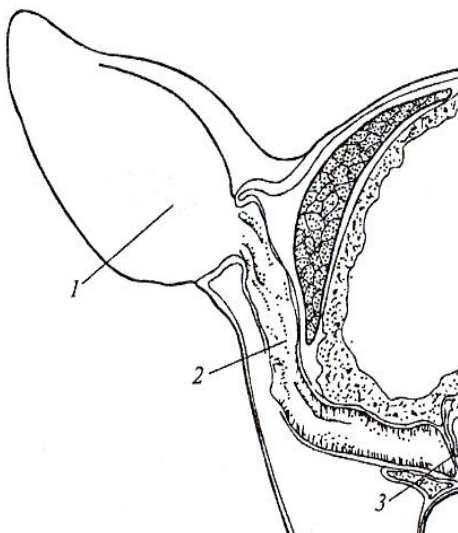
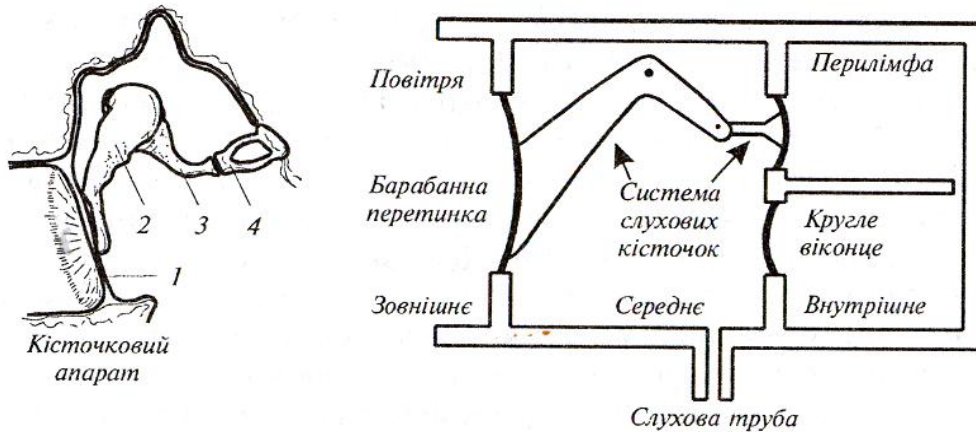


Рис. 14.1. **Формування стоячої хвилі у просторі, створеному слуховим проходом і середнім вухом:** 1 – вушна раковина; 2 – слуховий прохід; 3 – барабанна перетинка

*Середнє вухо* тварини, відокремлене від зовнішнього барабанною перетинкою, складається з барабанної порожнини, слухових кісточок (молоточка, коваделка і стремінця) та слухової труби (рис. 14.2). Функції середнього вуха обмежуються передачею звукових коливань від зовнішнього середовища до ендолімфи, підсиленням слабких звукових сигналів і забезпеченням безпечного приймання інтенсивних сигналів.



**Рис. 14.2. Кісточковий апарат середнього вуха та модель, що пояснює функціонування середнього вуха:**

1 – барабанна перетинка; 2 – молоточок; 3 – коваделка; 4 – стремінець

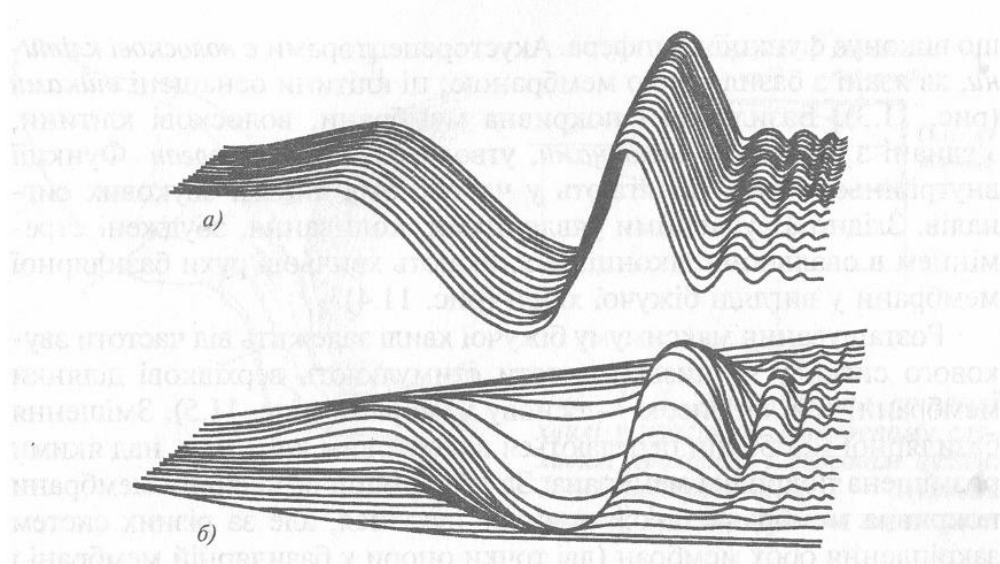
Процес підсилення реалізується за рахунок збільшення тиску, що пов'язано з відміною площі барабанної перетинки та *овального віконця*, яке зв'язане із стремінцем і відокремлює середнє вухо від внутрішнього; підсилення тиску становить близько 20–25 разів.

Крім того, кісточковий апарат виконує функції важеля, який дає вииграш в силі приблизно в 2,5 рази. Загальний рівень підсилення звукових коливань середнім вухом становить, таким чином, близько 50–60 разів.

*Внутрішнє вухо* складається з трьох спіральних каналів – *вестибулярного, середнього і барабанного*, причому середній канал 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*.

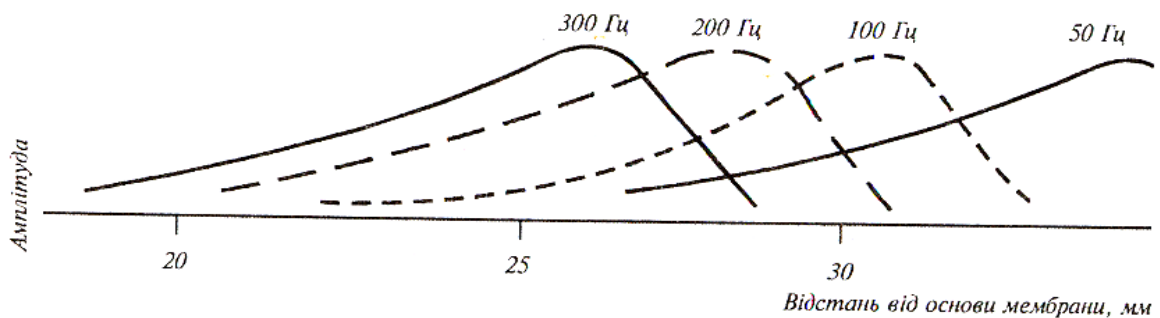


Функції внутрішнього вуха полягають у частотному аналізі звукових сигналів. Згідно з сучасними уявленнями, коливання, збуджені стремінцем в овальному віконці, викликають хвильові рухи базилярної мембрани у вигляді *біжучої хвилі* (рис. 14.3).



**Рис. 14.3. Хвильові рухи базилярної 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. 14.4).



**Рис. 14.4. 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. 14.5); вигин війок призводить до збудження зв'язаних з волосковими клітинами волокон слухового нерва.

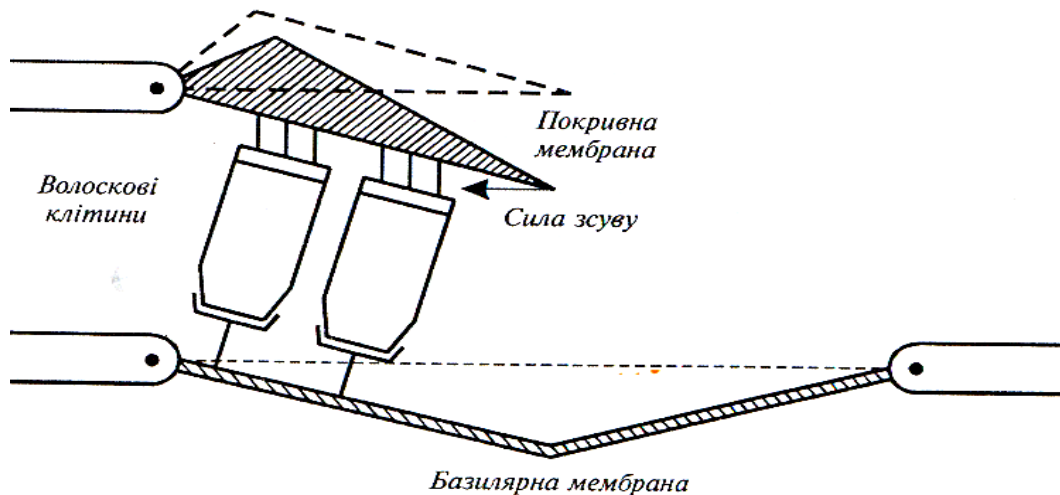


Рис. 14.5. Виникнення сили зсуву, що діє на волоскові клітини завдяки руху покривної та базилярної мембран

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.

## 14.2. 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 відмінностями від слухового аналізатора ссавців. Зовнішнє вухо має короткий, широкий і складний за рельєфом слуховий канал, 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 – із короткої вигнутої завитки, довжина якої становить 4–10 мм.

Птахи спроможні розрізняти амплітудно- та частотно-модульовані акустичні сигнали. Так, канарка в змозі розрізняти рівні інтенсивності звуку в 1,5 дБ, тоді як голуб – в 3 дБ. Варта подиву здатність птахів реагувати на невеличкі зміни частоти акустичних сигналів: частоти, з якими починають і закінчують своє акустичне спілкування птахи, становлять близько 10 Гц в області 500 Гц та близько 20 Гц в області 1–2 кГц. Діапазон чутливості і здатність розрізняти високі тони у птахів кращі, ніж у нижчих тварин.

### 14.3. 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. 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 надсилає в мозок інформацію щодо навколишньої звукової ситуації.

Розділяють два типи слухових аналізаторів у риб – пов'язаних з плавальним міхуром, та таких, що позбавлені останнього. Так, у кісткових риб плавальний міхур багатофункціональний – за допомогою його риба відчуває гідростатичний тиск, підтримує рівновагу, утворює звуки, дихає. Плавальний міхур спроможний розширюватися і скорочуватися у відповідь на звукові хвилі і передавати звукову інформацію через модифіковані хребці (чотири пари рухливо поєднаних кісточок) внутрішньому вуху. Така кістчочкова система отримала назву *Веберова апарата*. Плавальний міхур виконує функцію своєрідного резонатора, настроєного на звукові сигнали певної частоти та який забезпечує їх підсилення. Риби, які не мають плавального міхура, вико-

ристовуюють для перетворення звукових коливань у механічні повітряні порожнини, що пов'язані з внутрішнім вухом. Важливу роль у сприйнятті звуку відіграє сейсмоденсорна система з точки зору аналізу акустичної ситуації поблизу джерела звуку і рецепції зміщення частинок води.

Спектр сприймання звукових частот, чутливість до звукових коливань, здатність розпізнавати звукові тони відрізняються у різних видів риб. У цілому можна говорити про нижню межу 16–100 Гц та верхню 488–8000 Гц. У цьому діапазоні здатність сприймати більш високі (4000–8000 Гц) звукові частоти належать 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).

#### 14.4. Акусторецепція у комах

Бджоли спроможні реагувати на коливання частинок повітря та субстрату, на якому вони знаходяться, завдяки чутливим органам *sensilla scolopophora*, які розташовані в антенах та у верхніх частинах гомілок кінцівок.

Слуховий аналізатор метелика-совки складається з розташованої на грудному боці *тимпанальної мембрани*, за якою знаходиться повітряна порожнина, що перетинається зв'язками. Одна з них містить нервові чутливі волокна, які реагують на механічні та акустичні стимули ультразвукової частоти, що дає можливість метелику сприймати опромінювання кажанами і різко кидатися донизу.

У бражника слуховий аналізатор розташований на нижнегубних щупальцях, які мають повітряні порожнини в перших двох сегментах. Область спектральної чутливості становить 15–170 кГц з максимумом при 20–40 кГц, тобто теж належить ультразвуковому діапазону.

Тимпанові мембрани мають сарана, цикади, золотовочки.

#### 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.

### 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:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{S_1 l_1}{S_2 l_2} = \frac{55 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} \cdot 1,3 = 22.$$

### Репродуктивні тести

1. У чому полягають функції зовнішнього вуха?
2. За рахунок чого підсилюються звукові сигнали в середньому вусі?
3. Як відбувається аналіз частоти звукових сигналів у внутрішньому вусі?

### Альтернативний тест

Чи вірне ствердження, що згідно теорії Г. Бекеші попередній частотний аналіз відбувається у внутрішньому вусі? Так Ні

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “Організм-ознаки слухового аналізатора”

*а. Людина та ссавці*

*1. Короткий, широкий і складний слуховий канал*

*б. У птахів*

*2. Наявність лабіринту*

*в. У риб*

*3. Чутливі сенсори, розміщені в антенах*

г. У комах

4. Формування стоячої хвилі у просторі, створеному слуховим проходом і середнім вухом

### **Акордно-вибірковий тест**

Знайти вірні ствердження:

*Зовнішнє вухо забезпечує: а. підсилення слабких акустичних сигналів; б. попередній частотний аналіз акустичних сигналів; в. точний частотний аналіз акустичних сигналів; г. забезпечення безпечного приймання інтенсивних сигналів.*

### **Вибірковий тест**

1. Знайти вірні відповіді на запитання “Яка хвиля утворюється у внутрішньому вусі?”:  
*а. стояча; б. біжуча; в. гармонічна.*

### **Конструктивний тест**

Від чого залежить розміщення максимуму біжучої хвилі на базиллярній мембрані?

## 15. ТЕРМОРЕЦЕПЦІЯ



### 15.1. Механізми терморцепції

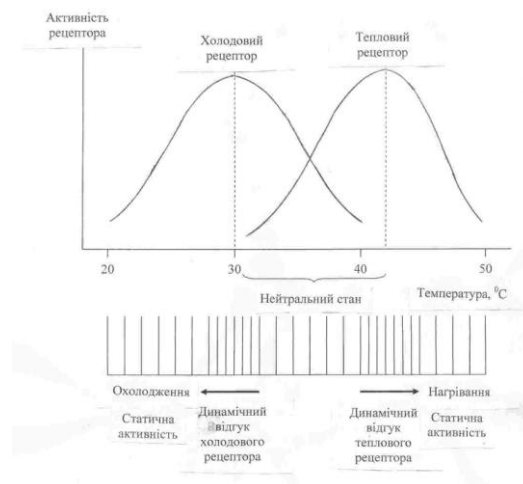
*Терморцепція* – це сприймання зміни температури нервовою тканиною, терморцепторами, що супроводжується виникненням нервових імпульсів, з наступним передаванням сигналу в центральну нервову систему.

Щодо механізмів терморцепції живих організмів не існує єдиної думки. Згідно з однією гіпотезою (Frey M.), терморцепторна система складається з окремих рецепторів, що сприймають тепло і холод, і розміщені у тільцях Руффіні та колбах Краузе відповідно. Інша гіпотеза (Nafe J.) припускає сприймання температури єдиними терморцепторами, якими є нервові закінчення стінок маленьких артеріол, що знаходяться у шкірі. При цьому холод спричинює звуження, а тепло – розширення кровоносних судин; механічні переміщення, таким чином, перетворюються на сигнали нервової системи. Жодна із запропонованих теорій не є вичерпною; деякі експериментальні факти знаходять задовільне пояснення, інші – ні.

Терморцептори ссавців розташовані в шкіряному покриві та на зовнішньому боці язика. Згідно з результатами досліджень, глибина розташування теплових рецепторів становить 0,28–0,30 мм, а холодових – 0,10–0,17 мм.

Терморцептори шкіри являють собою модулятори частоти – вони перетворюють певну інтенсивність температурного подразнення в певну частоту електричних імпульсів. Нервові волокна, що йдуть від теплових рецепторів, активні в області 20–47 °С, причому максимальна частота спостерігається при 38–43 °С; волокна від холодових рецепторів активні в діапазоні 10–35 °С з максимальною частотою імпульсів близько 25 °С (рис. 15.1). У проміжній області імпульси виникають з боку як теплових, та і холодових рецепторів; ця ситуація відповідає нейтральному стану, коли не відчувається ні тепло, ні холод. Максимальний сталий розряд теплових рецепторів становить 3,7 імп/с, а холодових – 10 імп/с.

Раптове підвищення температури шкіри призводить до різкого короткочасного підсилення частоти імпульсів протягом 1–2 с, після чого відбувається повернення частоти до сталого рівня. Зниження температури також викликає збільшення частоти імпульсів з подальшим встановленням нової частоти імпульсації, більш високої, ніж при початковій температурі.



**Рис. 15.1. Терморецептори шкіри та зміна частоти електричних імпульсів, які вони генерують, залежно від інтенсивності теплового подразнення**

У риб є шкіряні терморецептори; крім того, сейсмосенсорні системи і мозок також чутливі до температури. Акули і скати мають на поверхні голови ампули Лоренціні, які реагують серед різних подразників й на температуру.

Температурна рецепція добре розвинена у ямкоголових змій та у деяких питонів (*Crotalus*, *Viperidae*, *Boidae*, *Pythonidae*). Ямкоголова змія має специфічні ямки на голові, на дні кожної з яких знаходиться перепонка площею  $3 \times 4 \text{ мм}^2$  та товщиною 10–15 мкм, які містять близько 3500 нервових закінчень. Тварина здатна реагувати на зміни зовнішньої температури порядку  $0,002^\circ\text{C}$ ; підвищення температури на  $0,4^\circ\text{C}$  викликає збільшення частоти електричних імпульсів з 18 до 68 Гц. Крім того, змія спроможна визначати напрямок до джерела тепла. Все це дає можливість їй знаходити в темряві здобич – теплокровну тварину, яка генерує інфрачервоне випромінювання в області 10 мкм; спектральна чутливість терморецепторів змії становить 0,5–15 мкм.



Цвіркуни і багатоножки сприймають температуру повітря антенами, а ґрунту – лапками. На антенах знаходяться терморецептори також у бджоли, сарани, клопа.

### 15.2. Теплова чутливість тварин

Живі організми здатні виявляти адаптивну поведінку щодо температурних градієнтів; рух організму у бік джерела температури або від нього називається *термотаксисом*. Нематоди (*Caenorhabditis elegans*), які паразитують на теплокровних тваринах, переміщуються до більш високих температур. Термотаксис мають личинки та дорослі особини дрозодфіли (*Drosophila*). Слимаки також рухаються у бік температури, якій віддається перевага. Очевидно, термотаксис дає можливість кліщу вароа знаходити бджолу.

Смітні кури (*Alectura lathami*) широко поширені у східній Австралії. Представники цих птахів будують великі (діаметром 4 м та висотою 1,5 м) гнізда з обпалого листя та компосту. Яйця (близько 16-24 шт.) закопуються у компостний матеріал, де вони зберігаються при температурі 33–35 °С. Температура регулюється півником, який розриває чи засипає купу компостного матеріалу.

Більшість прісноводних риб мають температуру замерзання власних рідин на 0,5 °С меншу, ніж температуру замерзання прісної води. Температура замерзання сироватки прісноводних риб варіює від –0,50 °С до –0,65 °С. Тому навіть якщо температура води в річках чи озерах спадає до точки замерзання, у живих організмів ще є можливість вижити.

Селективне накопичення в зонах оптимальних температур спостерігається у риб, рептилій, найпростіших та водоростей, які знаходять ці зони шляхом вертикальних міграцій.

В океанах максимальна температура води становить близько 30 °С, а мінімальна калиться в межах від –1,7 °С до –1,9 °С. Температура замерзання сироватки морських риб варіює від –0,50 °С до –0,8 °С. Отже, мешканці морських вод, такі як *Boreogadus saida*, *Lycodes turneri*, *Liparis koefoedi*, *Gymnacanthus tricuspis*, *Icelus spatula*, мають внутрішні рідини суперохолодженими на близько 0,8 °С. Вижити в таких екстремальних умовах риbam допомагають антифризи глікопротеїнової природи. Деякі риби (наприклад, *Salvelinus alpinus*) запобігають впливу небезпечних низьких температур завдяки міграції з солених вод у прісні, температура яких перевищує точку замерзання внутрішніх рідин.

Щодо максимальних температур водного середовища, то варто зазначити пустельні джерела, температура води в яких досягатиме +40

$^{\circ}\text{C}$  і в яких мешкають риби, представники родин *Cyprinodontidae* та *Terapontidae*, а також роду *Tilapia*. Ці риби плавають поблизу кромки джерел, де вода охолоджується.

### Репродуктивний тест

Як впливає зниження зовнішньої температури на частоту електричних імпульсів терморецепторів?

### Альтернативний тест

Чи вірне ствердження, що нервові волокна, що йдуть від теплових рецепторів, активні в області  $10\text{--}35^{\circ}\text{C}$ ? Так Ні

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “Організм-спосіб знаходження оптимальних температурних умов”

- |   |  |
|---|--|
| a. Кліщ вароа   | 1. Міграція з солених вод у прісні                     |
| б. Смітні кури  | 2. Термотаксис   |
| в. Риби, представники <i>Salvelinus alpinus</i>                     | 3. Побудова великих гнізд з обпалого листя та компосту |
| г. Риби, представники <i>Cyprinodontidae</i> та <i>Terapontidae</i> | 4. Знаходження біля краю джерела                       |

### Вибірковий тест

Знайти вірне ствердження:

Ямкоголова змія здатна реагувати на зміни зовнішньої температури: а. до  $0,002^{\circ}\text{C}$ ; б. в діапазоні  $38\text{--}43^{\circ}\text{C}$ ; в. в діапазоні  $33\text{--}35^{\circ}\text{C}$ .

### Конструктивний тест

Знайти в літературних джерелах або в Інтернеті визначення та ознаки поліпное; гіпотермії.



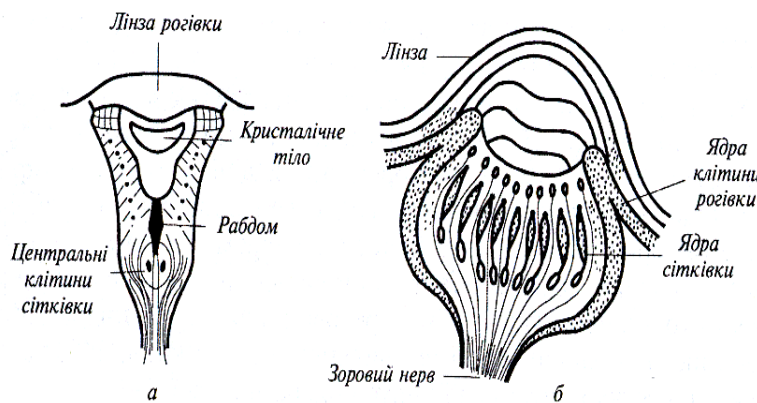
## 16. ФОТОРЕЦЕПЦІЯ



Основне призначення фоторецепторної системи живих організмів – забезпечення інформацією про стан умов навколишнього середовища, зокрема, інтенсивності світлового стимулу, просторових і часових характеристик, за допомогою яких організм здатний орієнтуватися відносно одного з найважливіших зовнішніх факторів – світла. Просторові та часові зміни інтенсивності та напрямку світлового потоку можуть викликати відповідні зміни рухової та поведінкової активності цих організмів.

### 16.1. Фоторецепція у комах

Реакція на світло у комах здійснюється за допомогою двох складних очей і трьох простих (рис.16.1). Складається просте око з прозорої лінзи, шару зорових клітин (близько 800) і зорового нерва.



**Рис. 16.1 Просте око комах:** *а* – латеральне; *б* – дорсальне

На сітківці простого ока не формується зорове зображення; в той же час, прості очі в змозі сприймати такі параметри оптичного випромінювання як інтенсивність, період і спектральний склад. Вважається, що прості очі здатні реагувати на сутінки або світанок, забезпечуючи орієнтацію комах в умовах зниженої освітленості.

Складні очі мають фасеточну структуру, яка формує мозаїчну картину. Складається складне око з набору *оматидій*, кількість яких становить 25000 у жуків, 8000–10000 у бджіл, 4000 у мух, 100–1000 у мурашок. Основними елементами омати́дія є кришталева лінза (рогівка), кришталевий конус, пігментні клітини, фоторецептор, рабдом (ретинальна клітина). Зовнішній вигляд складного ока показано на рис.16.2,*а*, а омати́дія – на рис.16.2,*б*. У бджоли, наприклад, до внутрішнього кінця кришталевого конуса приєднано вісім радіально розташованих зорових клітин, завдяки яким комаха спроможна сприймати поляризацію відбитого сонячного випромінювання і здійснювати орієнтацію у просторі.

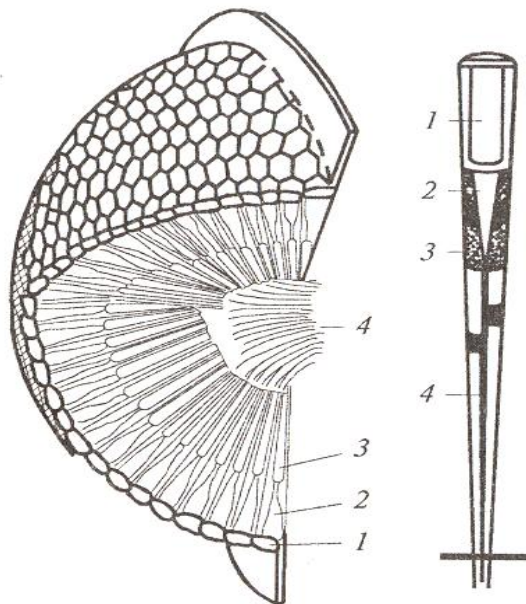


Рис. 16.2. Складне око бджоли:

*а* – фасеткова структура складного ока (1 – рогівка; 2 – кришталевий конус; 3 – палички сітківки; 4 – зоровий нерв); *б* – структура омати́дія (1 – кришталева лінза; 2 – кришталевий конус; 3 – пігментна клітина; 4 – ретинальна клітина)

Щодо здатності комах сприймати колір, то слід зазначити, що взагалі стимулюючою дією характеризуються довжини хвиль у діапазоні 250–700 нм. Вважається, що метелики, мухи і деякі жуки реагують на синій колір; бджоли – на червоний, жовтий, зелений і синьо-зелений. Крім того, комахам притаманна чутливість до ультрафіолетового випромінювання. Але можливим поясненням відвідування комахами кольорових квітів є їх здатність розрізняти інтенсивність випромінювання, відбитого від різних частин квітки.

## 16.2. Зоровий аналізатор риб

Структуру ока риби наведено на рис.16.3. Для захисту рогівки від великих тисків і піску око має *оболонку* – тверде прозоре утворення.

Коефіцієнти заломлення оболонки, рогівки і води приблизно однакові. Фокусування ока на об'єкт здійснюється за допомогою *втягуючого м'яза*, який пересуває кришталик вздовж оптичної осі рогівки.

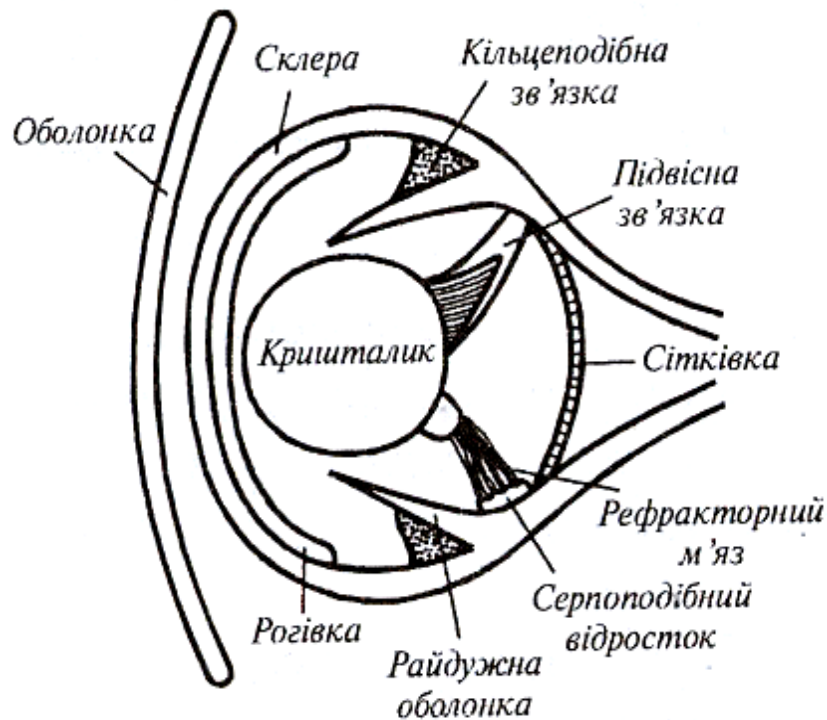


Рис. 16.3. Зоровий аналізатор риби

### 16.3. Зоровий аналізатор птахів

Зоровий аналізатор птахів призначений не лише для створення зорових зображень; функції його полягають також у формуванні кольорових образів, що важливо з точки зору розпізнавання статевих партнерів, суперників та ворогів. Більшість птахів проводить весь свій час у пошуках корму, але спосіб життя у них різний. Вони можуть вести денний або нічний спосіб життя; деякі з них літають високо над поверхнею землі. Все це накладає відбиток на будову і функції зорового аналізатора, що сформувався протягом еволюції. Можна розрізнити чотири основних типи будови ока у птахів (рис. 16.4): *рурчастий (циліндричний)* тип ока зустрічається у сов; *плоский* – притаманний курям; *кулеподібний* – характерний для птахів-хижаків; *плоско-сферичний* можна знайти у співочих птахів. Таким чином, птахи відрізняються не лише формою ока, а й його внутрішньою структурою. Очні яблука більшості птахів обладнані двома специфічними при-

строями для підвищення гостроти зору – центральною ямкою і гребінцем.

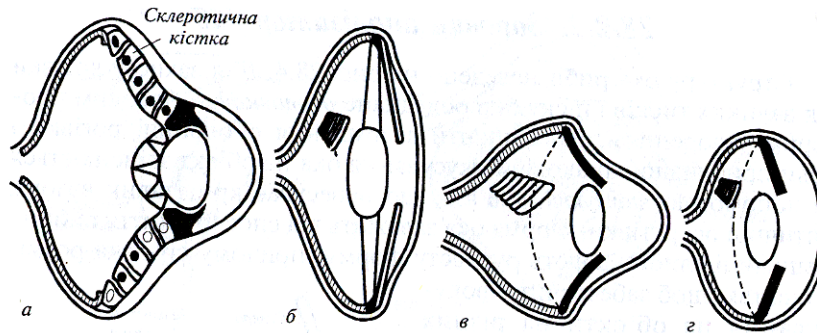


Рис. 16.4. Основні типи будови ока у птахів:

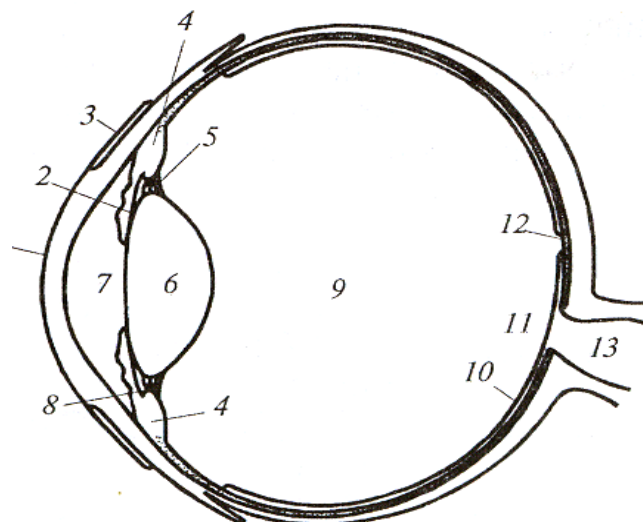
*а* – рурчастий (циліндричний); *б* – плоский; *в* – кулеподібний;  
*г* – плоскосферичний

#### 16.4. Зоровий аналізатор ссавців

Сенсорна інформація щодо навколишнього середовища сприймається людиною або твариною у вигляді змін таких параметрів як інтенсивність світла, довжина світлової хвилі, форма, розміри і положення об'єкта. Основний елемент *зорового аналізатора* (сенсорної системи, яка перетворює оптичні стимули в послідовність нервових імпульсів) є *око*; його призначення – фокусування зображення на сітківку, регуляція кількості світла, яке бере участь у формуванні зображення, перетворення зображення фоторецепторною системою ока і передача інформації в мозок.

Будову ока ссавців у горизонтальній площині наведено на рис. 16.5.

Рис. 16.5. Будова ока ссавців: 1 – рогівка; 2 – райдужна оболонка; 3 – кон'юнктива; 4 – війчастий м'яз; 5 – зв'язки; 6 – кришталік; 7 – передня камера; 8 – зв'язки; 9 – склоподібне тіло; 10 – сітківка; 11 – оптичний диск; 12 – центральна ямка; 13 – зоровий нерв





Зовнішній захисний шар, що оточує очне яблуко, називається *склерою*. На передній частині ока склера переходить у прозору шарувату структуру, що називається *рогівкою*. Задні дві третини ока вкриті пігментований шар – *судинна оболонка*. Саме в цій оболонці знаходиться *сітківка*, яка містить фоторецептори. Світло потрапляє в око крізь рогівку в *передню камеру*; так само, як і *задня камера*, вона заповнена прозорою рідиною – *водянистою вологою*. Між передньою і задньою камерами розташована *райдужна оболонка*, яка виконує функції діафрагми. Завдяки скороченню або розслабленню м'язів змінюється величина діаметра *зіниці* – отвору, через який світло проходить у задню частину ока. За райдужною оболонкою знаходиться *кришталік*, радіус кривизни якого може бути змінений за допомогою *війчастого тіла*. Простір між кришталіком та сітківкою заповнений *склоподібним тілом* – желатиноподібною рідиною. На сітківці, якої врешті-решт досягає світло, є *оптичний диск*, до якого сходяться нервові волокна. Там же розташована *центральна ямка*, яка є місцем найкращого зору.

Цікаво розглянути властивості зорового аналізатора деяких тварин, які в процесі еволюції набули специфічні риси, наприклад коня. Очне яблуко коня асиметричне (рис. 16.6); рогівка розташована поблизу верхньої ділянки ока; сітківка посунута відносно оптичної осі ока.

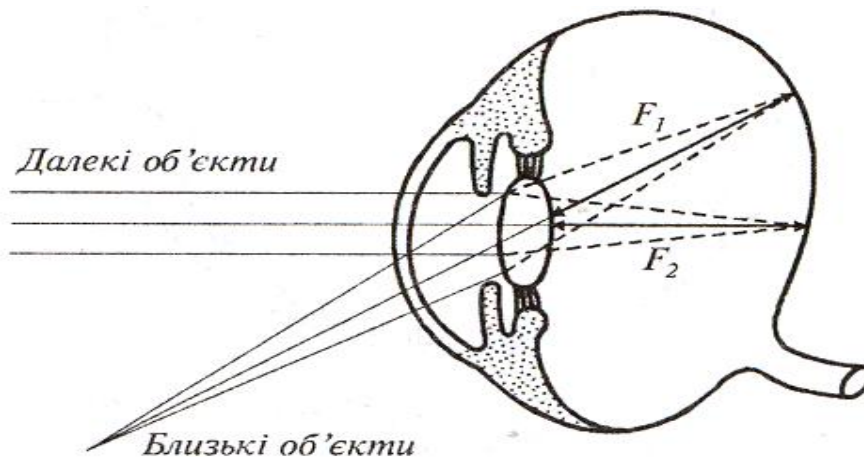


Рис. 16.6 Асиметрична форма очного яблука коня

Війчасті м'язи відіграють незначну роль у зміні радіуса кривизни кришталіка. Здатність коня фокусувати зоровий аналізатор на об'єкти, що розташовані на різних відстанях, досягається простим нахилом голови. З кожною зміною положення голови коня змінюється



фокусна відстань – від 40 до 45 мм. Ще однією особливістю зорового аналізатора коня є форма зіниці – у молодих коней вона кругла, після 5–6 років форма зіниці наближається до еліпсоїдної.

### 16.5. Механізми зору ссавців

Світловий потік, що потрапляє в око, зазнає заломлення на роговій оболонці ( $n = 1,376$ ;  $r = 7,8$  мм). Після цього має місце заломлення під час переходу з рогової оболонки в передню камеру ( $n = 1,336$ ). Подальше заломлення відбувається в кришталіку, показник заломлення якого поступово зростає від 1,386 до 1,406 в напрямку його ядра. За кришталіком прямує внутрішня камера ока ( $n = 1,336$ ).

Таким чином, структура ока включає чотири сферичних межі розподілу середовищ з різними показниками заломлення (рис. 16.7).

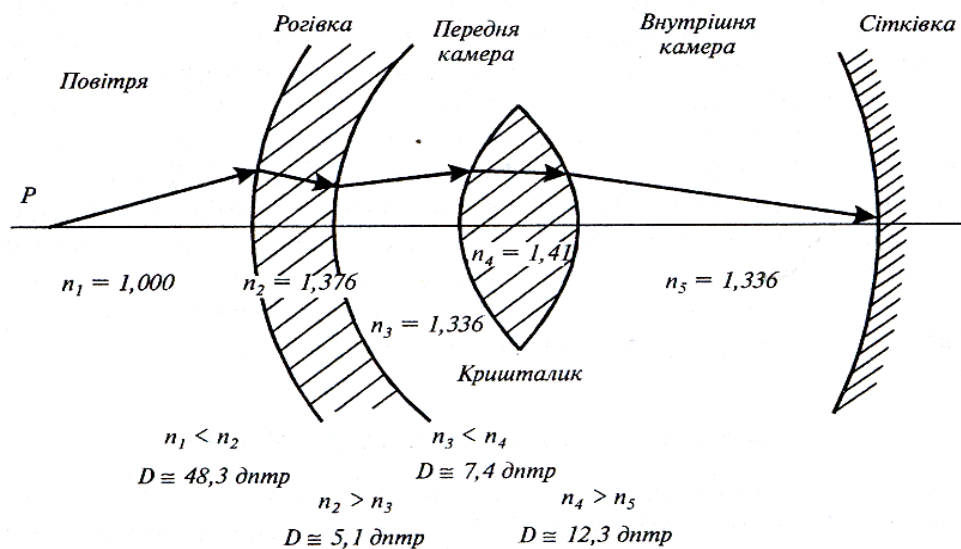


Рис.16.7. Заломлювальна здатність ока

Сітківка ссавців складається з п'яти типів клітин – фоторецепторних, біполярних, горизонтальних, амакринових і гангліозних (рис. 16.8). Фоторецепторні клітини (палички і колбочки) знаходяться в контакті з біполярними клітинами, які здійснюють зв'язок з гангліозними клітинами. Останні передають потенціал дії мозку. Горизонтальні клітини з'єднують по горизонталі фоторецепторні і гангліозні клітини; амакринові з'єднують по горизонталі біполярні і гангліозні клітини.

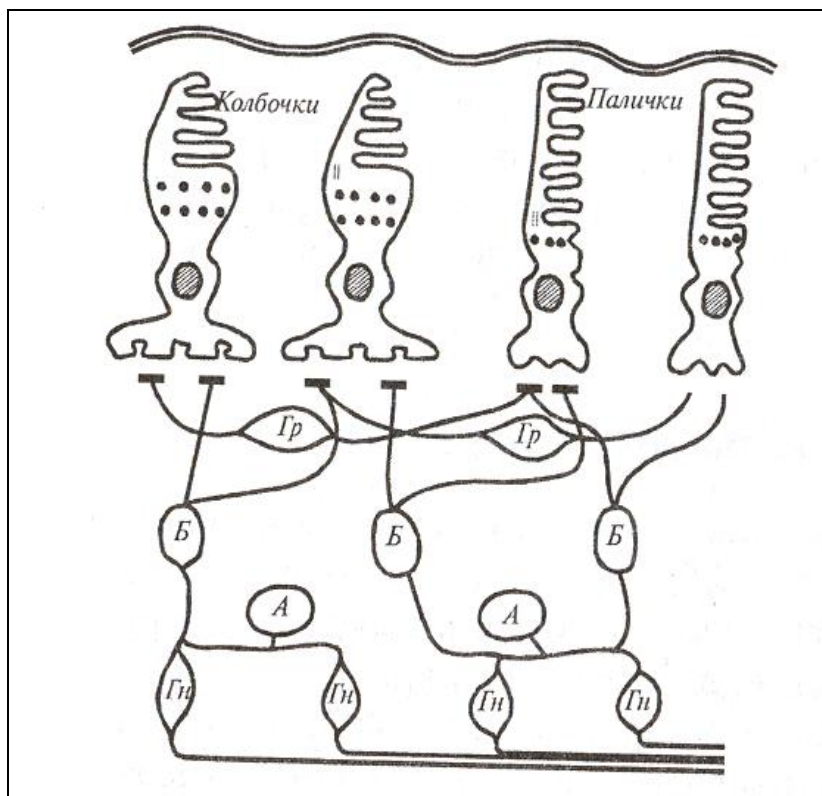


Рис. 16.8. Основні типи клітин сітківки:  
 $\Phi P$  – фоторецепторні;  $B$  – біполярні;  $Гр$  – горизонтальні;  
 $A$  – амакринові;  $Гн$  – гангліозні

Фоторецепторні клітини містять зорові пігменти – *родопсин* у паличках і *йодопсин* в колбочках. Максимальна світлова чутливість родопсину припадає на 510 нм в блакитно-зеленій області спектра. Внаслідок освітлення родопсин бере участь у послідовності хімічних реакцій, відомих як родопсиновий цикл. Поглинання родопсином кванта світла призводить до його хімічного розкладу на більш прості компоненти; закінчується родопсиновий цикл зворотною рекомбінацією простих компонентів у родопсин. Всі ці процеси супроводжуються появою рецепторного потенціалу. Таким чином, зір являє собою складний ланцюг ініціації світлом фотохімічних реакцій у зорових пігментах, перетворень молекул фотопігментів, зміни проникності мембрани фоторецептора, утворення електричного потенціалу в фоторецепторній мембрані і передачі електричного імпульсу від зорового нерва мозку.

### Репродуктивний тест

Пояснити будову зорового аналізатора ссавців.

### Альтернативний тест

Чи вірне ствердження, що максимальна світлова чутливість родопсину припадає на 690-740 нм?                      Так    Ні

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “Тварина—ознаки зорового аналізатора”

- |                  |   |
|------------------|---|
| <i>а. Комахи</i> | <i>1.Наявність центральної ямки та гребінця</i> |
| <i>б. Риби</i>   | <i>2.Асиметрична форма очного яблука</i>        |
| <i>в. Кінь</i>   | <i>3.Наявність втягуючого м’яза</i>             |
| <i>г. Птахи</i>  | <i>4.Наявність оматидія</i>                     |

### Вибірковий тест

Знайти вірне ствердження:

Кришталик ока ссавців характеризується таким показником заломлення  $n$ : 1,00; 1,336; 1,376; 1,41.

### Акордно-вибірковий тест

Знайти вірні відповіді на запитання

1. “Які типи будови ока притаманні птахам?”  
*а. плоский; б. асиметричний; в. кулеподібний; г. рурчастий; д. плоскосферичний.*
2. Сітківка ссавців містить такі клітини: *а. фоторецепторні; б. біполярні; в. горизонтальні; г. амакринові; д. гангліозні; е. рабдом.*

### Конструктивні тести

1. Навести всі процеси, що відбуваються після поглинання родопсином кванта світла.
2. Знайти в літературі гіпотези щодо функцій, які виконує гребінець ока птаха.



### III. ФІЗИКА ЯВИЩ ПЕРЕНЕСЕННЯ

#### 17. ЗМІНА ЕНТРОПІЇ



##### 17.1. Параметри термодинамічної системи

*Термодинамічна система* – сукупність макроскопічних тіл, які можуть взаємодіяти між собою та з іншими тілами (зовнішнім середовищем) шляхом обміну з ними енергією та речовиною.

Існує три типи термодинамічних систем:

1) *ізолювана система*, яка не обмінюється із зовнішнім середовищем ні енергією, ні речовиною (рис.17.1);

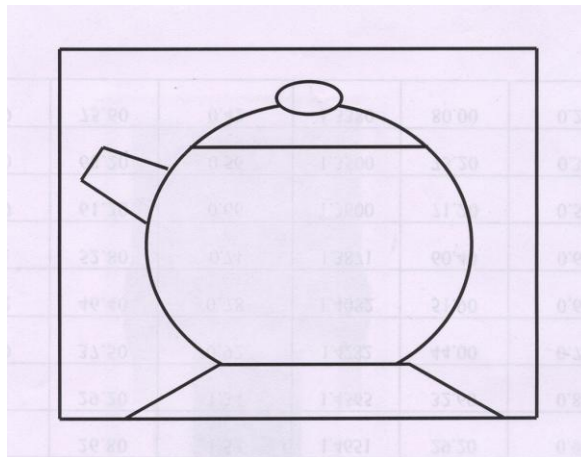


Рис. 17.1. Ізолювана термодинамічна система

2) *замкнута система*, яка обмінюється із зовнішнім середовищем енергією, але в ній відсутній обмін речовиною (рис.17.2);

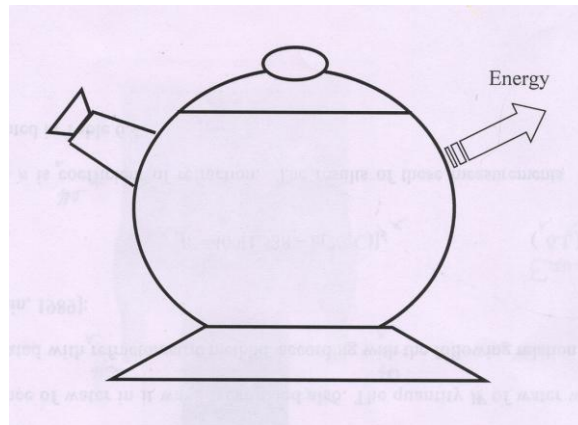


Рис. 17.2. Замкнута термодинамічна система

3) *відкрита система*, в якій відбувається обмін із зовнішнім середовищем енергією та речовиною (рис. 17.3).

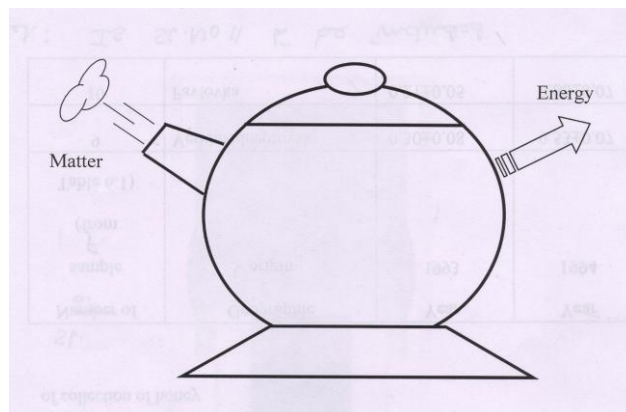


Рис. 17.3. Відкрита термодинамічна система

Будь-яка термодинамічна система характеризується *термодинамічними параметрами* – тиском  $p$ , об'ємом  $V$ , температурою  $T$ , масою  $m$ , молярною концентрацією  $n$ . Сукупність цих параметрів визначає *термодинамічний стан* системи. Зміна хоча б одного з параметрів призводить до зміни термодинамічного стану системи.

Якщо параметри термодинамічної системи мають цілком певні значення і не змінюються з часом за незмінних зовнішніх умов, то така система перебуває у *рівноважному стані*. Такий стан характеризується відсутністю в системі потоків (наприклад, потоків енергії чи ре-

човини).

Перехід системи з одного стану в інший, що супроводжується зміною термодинамічних параметрів, називається *термодинамічним процесом*.

*Внутрішня енергія*  $U$  включає енергію хаотичного (теплого) руху всіх мікрочастинок системи (молекул, атомів, іонів) та енергію взаємодії цих частинок. Внутрішня енергія характеризує стан термодинамічної системи, тобто є *функцією стану системи*.

*Оборотним* називають процес, що являє собою послідовність рівноважних станів, якщо термодинамічна система проходить від початкового стану до кінцевого, причому система може повернутися в початковий стан без остаточних змін в навколишньому середовищі.

*Необоротним* називають процес, який відбувається через послідовність нерівноважних станів та супроводжується необоротними змінами в навколишньому середовищі (рис. 17.4). До необоротних належать процеси, при яких відбувається направлене просторове перенесення речовини, теплоти, імпульсу (дифузія, теплопровідність, в'язка течія).

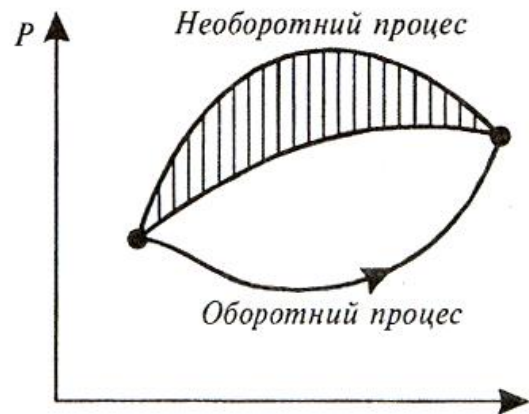


Рис. 17.4. Графіки зворотного і незворотного процесів

## 17.2. Перший закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки являє собою узагальнення закону збереження енергії і враховує можливі зміни внутрішньої енергії.

Розглянемо термодинамічну систему, яка знаходиться в процесі переходу від початкового стану до кінцевого, під час якого теплота  $Q$  поглинається (або виділяється) і робота  $A$  виконується системою (або над системою). Прикладом такої термодинамічної системи може бути газ, який переходить з початкового стану  $p_n, V_n$  до кінцевого стану  $p_k, V_k$ . Доведено, що відповідно до закону збереження енергії під час будь-якого переходу системи з першого стану у другий зміна внутрішньої енергії  $\Delta U = U_k - U_n$  буде незмінною та дорівнювати різниці між кількістю теплоти  $Q$ , що одержується системою, та роботою  $A$ ,

яка здійснюється системою проти зовнішніх сил. Отже, величина  $Q - A$  визначається повністю початковим і кінцевим станами; називається ця величина *змінною внутрішньої енергії системи*  $\Delta U$ :

$$\Delta U = U_k - U_n = Q - A. \quad (17.1)$$

Тут  $A > 0$ , якщо робота виконується системою проти зовнішніх сил і  $A < 0$ , якщо робота виконується над системою.

Перехід системи з одного стану в інший супроводжується зміною  $\Delta U$  внутрішньої енергії. Зміну  $\Delta U$  внутрішньої енергії можна оцінювати шляхом вимірювання теплоти  $Q$ , яка поглинається або виділяється системою, та виконаною роботою  $A$ . На основі останнього рівняння можна сформулювати *перший закон термодинаміки – теплота, що надається системі, витрачається на зміну внутрішньої енергії системи та на виконання системою роботи проти зовнішніх сил*:

$$\Delta U = Q - A. \quad (17.2)$$

Якщо система набуває нескінченно малих змін стану, перший закон термодинаміки записується так:

$$dU = dQ - dA. \quad (17.3)$$

У літературі можна зустріти таку форму запису першого закону термодинаміки, як  $dU = \delta Q - \delta A$ , де символи  $\delta$  означають, що теплота  $Q$  і робота  $A$  не є функціями стану і, отже, не можуть бути повними диференціалами.

Розглянемо кілька спеціальних випадків.

1. *Ізольована система* не взаємодіє з навколишнім середовищем; тепловий потік відсутній ( $dQ = 0$ ), робота дорівнює нулю ( $dA = 0$ ); отже  $\Delta U = 0$ , тобто внутрішня енергія ізольованої системи залишається сталою ( $U = \text{const}$ ).

2. *Циклічний процес*, який починається з одного стану і закінчується тим же станом, характеризується зміною внутрішньої енергії  $\Delta U = 0$ , отже  $Q = A$ . Отже, неможливо створити механізм, який би виконував роботу, що перевищує одержану ним енергію.

3. *Відкрита система* характеризується потоком речовини  $dU_{\text{реч}}$ , тобто



$$dU = dQ + dA + dU_{\text{реч.}} \quad (17.4)$$

або

$$dU = dQ - pdV + \sum_1^n \mu_k dN_k, \quad (17.5)$$

де  $\mu_k$  – хімічний потенціал, що відповідає вільній енергії одного моля компонента  $k$ . Відомо, що живі організми потребують постійного припливу вільної енергії (в першу чергу, енергії Сонця); без усієї вільної енергії організм припиняє свою життєдіяльність. За умовою сталого тиску та сталої температури вільна енергія відома як *вільна енергія Гіббса*:

$$G = \sum_k n_k \mu_k. \quad (17.6)$$

### 17.3. Другий закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки виражає загальний закон збереження і перетворення енергії, але він нездатний визначити напрямок протікання процесів.

Нагадаємо, що всі реальні процеси мають переважні напрямки. Наприклад, тепловий потік прямує від нагрітого тіла до холодного, яке знаходиться з ним у контакті, але не навпаки. Поява другого закону термодинаміки обумовлена необхідністю відповісти на запитання, які процеси в природі можливі, а які – ні.

Другий закон термодинаміки має декілька формулювань:

- 1) Р. Клаузіус, 1850 р.: *неможливий круговий процес, єдиним результатом якого є передача теплоти від холодного тіла до гарячого;*
- 2) У.Томсон, 1851 р.: *неможливий процес, єдиним результатом якого є виконання роботи внаслідок охолодження теплового резервуара.*

Розглянемо тепловий двигун, ефективність роботи якого характеризується *коефіцієнтом корисної дії (ККД)*, що дорівнює відношенню кількості теплоти, перетвореної двигуном у механічну роботу  $A$ , до кількості теплоти  $Q_1$ , одержаної від нагрівника (рис. 16.5):

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (17.7)$$

де  $Q_2$  – кількість теплоти, яку робоче тіло віддає холодильнику ( $Q_2 > 0$ ).

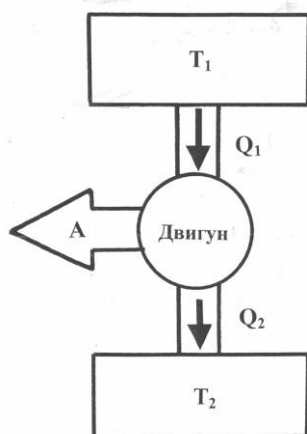


Рис. 17.5. Схема теплового двигуна

На рис. 17.6, *а–в* наведено графічні ілюстрації теплових двигунів, можливість або неможливість дії яких диктується другим законом термодинаміки. Другому закону термодинаміки відповідає тепловий двигун, зображений на рис. 17.5. Неможливий тепловий двигун, який би перетворював теплоту, отриману від нагрівника, в еквівалентну їй роботу (рис. 17.6, *а*). Для передачі теплоти від холодильника нагрівнику потрібно виконати роботу над робочим тілом (рис. 17.6, *б*); така ситуація реалізується в холодильних установках. Неможливий і такий тепловий двигун, в якому б здійснювалася передача теплоти від холодильника нагрівнику без виконання роботи (рис. 17.6, *в*).

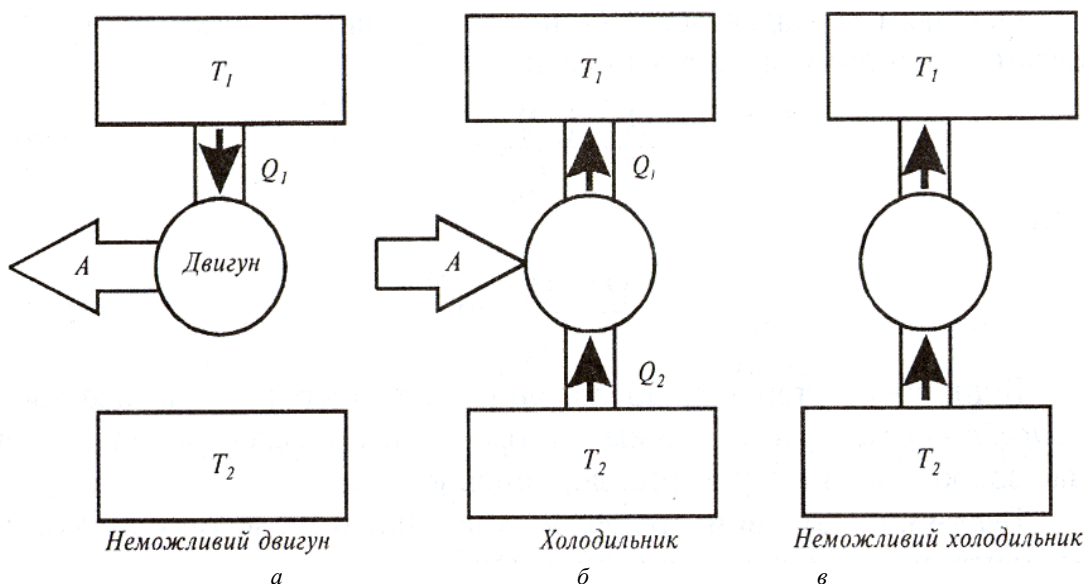


Рис. 17.6. Графічні ілюстрації теплових двигунів, можливість або неможливість дії яких диктується другим законом термодинаміки

## 17.4. Ентропія

Кількісне формулювання другого закону термодинаміки має вигляд:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (17.8)$$

де  $Q_1$  – кількість теплоти, яку нагрівник віддає робочому тілу;  $Q_2$  – кількість теплоти, яку забирає холодильник;  $T_1$  – температура нагрівника;  $T_2$  – температура холодильника. Тут знак “=” відповідає оборотним, а знак “<” – необоротним процесам.

Розглянемо оборотний цикл Карно, для якого вираз (17.8) можна записати так:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (17.9)$$

або

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (17.10)$$

звідки:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0. \quad (17.11)$$

Оскільки  $Q_2$  віддається робочим тілом холодильнику, то  $Q_2 < 0$ , і останнє рівняння можна записати:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{(-Q_2)}{T_2} = 0, \quad (17.12)$$

або

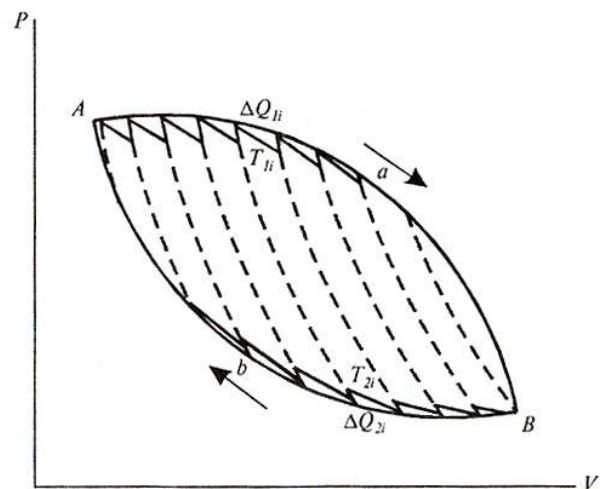
$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0. \quad (17.13)$$

Відношення теплоти до абсолютної температури називається *приведеною теплотою*. Таким чином, сума приведених теплот під час оборотного циклу Карно дорівнює нулю.

Будь-який коловий процес можна уявити як велику кількість елементарних циклів Карно (рис. 17.7):

$$\sum_i \frac{\Delta Q_{1i}}{T_{1i}} + \sum_i \frac{\Delta Q_{2i}}{T_{2i}} = 0. \quad (17.14)$$

Рис. 17.7. Коловий процес як нескінченна кількість елементарних циклів Карно



Якщо перейти до нескінченної кількості елементарних циклів Карно, то суми в останній формулі перетворюються в інтеграли:

$$\int_{AaB} \frac{dQ}{T} + \int_{AbB} \frac{dQ}{T} = 0, \quad (17.15)$$

або

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0. \quad (17.16)$$

Підінтегральний вираз  $\frac{dQ}{T}$  являє собою повний диференціал функції  $S$ , яка залежить від стану системи і не залежить від шляху, яким система прийшла до цього стану; вона визначається лише початковим та кінцевим станами оборотного процесу:

$$\frac{dQ}{T} = dS. \quad (16.17)$$

Функція  $S$  називається *ентропією*. Цей термін, який походить від грецького слова *ἐντροπία* (перетворення), було вперше запроваджено Клаузіусом у 1865 р. для визначення міри необоротного розсіювання енергії. Вимірюється ентропія у Дж/К.

### 17.5. Рівноважна термодинаміка

*Ентропія та її властивості.* Розглянемо термодинамічну систе-

му, яка у станах  $A$  та  $B$  характеризується функціями  $S_A$  та  $S_B$ . Функція  $S$  такої системи залежить лише від початкового та кінцевого станів необоротного процесу:

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}, \quad (17.18)$$

де  $dQ$  – елементарна теплота, що поглинається системою протягом малих змін стану;  $T$  – температура нагрівника.

Зміна ентропії  $dS$  визначається за виразом:

$$dS = \frac{dQ}{T}. \quad (17.19)$$

Під час необоротного процесу система віддає більше теплоти навколишньому середовищу, внаслідок чого ентропія зростає:

$$dS > \frac{dQ}{T}. \quad (17.20)$$

Класична (рівноважна) термодинаміка описує системи, які знаходяться у рівноважному стані (тобто не обмінюються з навколишнім середовищем ні енергією, ні речовиною) або здійснюють необоротні процеси.

Таким чином, *основні тенденції зміни ентропії* можна сформулювати так.

1. *В ізольованій системі, в якій проходять оборотні процеси, ентропія зберігає стале значення:*

$$dS = 0; S = \text{const}. \quad (17.21)$$

2. *В ізольованій системі, в якій проходять необоротні процеси, ентропія зростає та досягає максимального значення:*

$$dS > 0. \quad (17.22)$$

Будь-який термодинамічний процес в ізольованій системі характеризується зростанням ентропії:

$$dS \geq 0. \quad (17.23)$$

Другий закон термодинаміки для необоротних процесів показує напрямок процесу: необоротні процеси завжди відбуваються у напрямку зростання ентропії. Отже, можна ввести ще одне визначення ентропії: це така функція стану системи, яка визначає напрямок протікання довільного процесу: в ізольованій системі ентропія зберігає сталі значення під час оборотних процесів, зростає під час необоротних процесів та досягає максимального значення у разі термодинамічної рівноваги.

### 16.6. Нерівноважна термодинаміка

Нерівноважна термодинаміка описує дисипативні системи – такі відкриті термодинамічні системи, що діють далеко від стану рівноваги в навколишньому середовищі, з яким вони обмінюються енергією та речовиною.

**Стаціонарний стан.** Біологічні системи є відкритими термодинамічними системами, оскільки вони обмінюються з навколишнім середовищем енергією і речовиною. Так, рослини поглинають фотосинтетично активне випромінювання, віддають енергію навколишньому середовищу у вигляді тепла, одержують із ґрунту поживні речовини, беруть участь у газообміні. Такий безперервний обмін супроводжується зміною нерівноважних станів; життєдіяльність організму, таким чином, являє собою сукупність різних нерівноважних процесів.

Результатом такого обміну організму з навколишнім середовищем є досягнення *стаціонарного стану*, в якому, незважаючи на відсутність термодинамічної рівноваги, зберігаються незмінними протягом тривалого проміжку часу деякі фізичні і хімічні властивості термодинамічної системи. Моделі стаціонарного та нерівноважного станів наведено на рис. 17.8 а,б. Тут є вхідний та вихідний потоки, але рівень води в резервуарі залишається сталим.

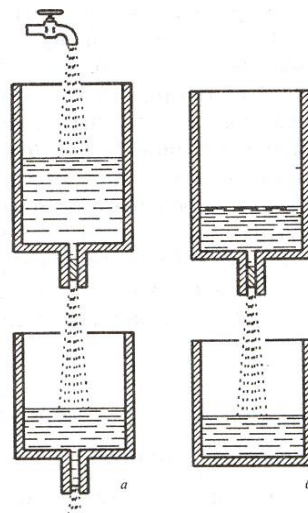


Рис. 17.8. Моделі стаціонарного (а) та нерівноважного (б)

Зміну ентропії, яку було введено у класичній термодинаміці, можна представити в рамках нерівноважної термодинаміки так:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (17.24)$$

де  $d_e S$  – зміна ентропії системи за рахунок обміну енергією та речовиною із зовнішнім середовищем;  $d_i S$  – зміна ентропії внаслідок необоротних процесів, що відбуваються в системі.

Для *ізолюваної* системи, яка не обмінюється із зовнішнім середовищем ні енергією, ні речовиною, мають місце такі співвідношення:

$$d_e S = 0 \text{ та } d_i S \geq 0. \quad (17.25)$$

Для *замкнутої* системи, що обмінюється із зовнішнім середовищем енергією, обмін речовиною відсутній, можна записати:

$$d_e S = \frac{dQ}{T} = (dU + pdV)/T \text{ та } d_i S \geq 0. \quad (17.26)$$

Для *відкритої* системи, в якій відбувається обмін із зовнішнім середовищем енергією і речовиною, справедливі такі співвідношення:

$$d_e S = (dU + pdV)/T + dS_{\text{реч}} \text{ та } d_i S \geq 0, \quad (17.27)$$

де  $dS_{\text{реч}}$  – зміна ентропії за рахунок потоку речовини.

Таким чином, вираз для зміни ентропії під час необоротних процесів є однаковим для будь-якої термодинамічної системи:

$$d_i S \geq 0 \quad (17.28)$$

Отже, для будь-якої термодинамічної системи (ізолюваної, замкнутої або відкритої) має місце співвідношення  $d_i S \geq 0$  відповідно до другого закону термодинаміки.

Зміна ентропії  $d_e S$  за рахунок обміну з навколишнім середовищем може бути додатною, від’ємною або дорівнювати нулю.

Процеси зміни ентропії внаслідок взаємодії з зовнішнім середовищем можуть бути пов'язані з припливом ентропії в систему ( $d_e S > 0$ ) або відтоком з останньої ( $d_e S < 0$ ).

Якщо  $d_e S \geq 0$ , то така ситуація відповідає розкладанню складної біологічної системи на прості структури, що супроводжується руйнуванням клітин, припиненням життєвих процесів та життєдіяльності в цілому.

Зменшення ентропії свідчить про ускладнення організації системи, утворення більш складних структур, ріст тканин. Таким чином, на противагу класичній термодинаміці ізольованих систем, яка визначає ентропію лише для рівноважних станів, нерівноважна термодинаміка відкритих систем визначає ентропію для будь-якого нерівноважного стану.

Якщо система знаходиться у стаціонарному стані, ентропія всієї відкритої системи зберігається, тобто повна зміна ентропії дорівнює нулю ( $dS = 0$ ). Якщо зміна ентропії дорівнює нулю, то  $d_e S = -d_i S$  (збільшення ентропії за рахунок внутрішніх необоротних процесів компенсується припливом від'ємної ентропії внаслідок взаємодії системи із зовнішнім середовищем); оскільки  $d_i S > 0$ , то  $d_e S < 0$ , причому  $|d_e S| = d_i S$ . Ця умова виконується, якщо ентропія, що утворюється усередині системи, повністю розсіюється в довкілля. Можна, таким чином, стверджувати, що відкриті системи в стаціонарному стані живляться *негентронією* (від'ємною ентропією).

На противагу рівноважній термодинаміці ізольованих систем, яка визначає лише ентропію рівноважних станів, нерівноважна термодинаміка (відкритих систем) вводить поняття потоку ентропії.

### 17.7. Термодинамічні сили та термодинамічні потоки

Одним з найважливіших понять термодинаміки необоротних процесів є зміна ентропії у часі. Диференціювання рівняння ( 17.24 ) призводить до такого виразу:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_e S}{dt} + \frac{d_i S}{dt}, \quad ( 17.29 )$$

де  $\frac{dS}{dt}$  – зміна ентропії за часом, яку називають *швидкістю продукції ентропії*.

Останнє рівняння свідчить про те, що швидкість зміни ентропії системи являє собою суму швидкості обміну ентропією між системою



та навколишнім середовищем та швидкості виникнення ентропії усередині системи внаслідок необоротних процесів.

У стаціонарному стані баланс ентропії визначається за виразом:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_e S}{dt} + \frac{d_i S}{dt} = 0, \quad (17.30)$$

що свідчить про те, що утворення ентропії в системі  $\frac{d_i S}{dt}$  компенсується відтоком додатної ентропії у зовнішнє середовище, так що загальна зміна ентропії дорівнює нулю.

У реальній ситуації розвиток живих організмів супроводжується зменшенням загальної величини їх ентропії, але слід враховувати, що в інших ділянках зовнішнього середовища відбуваються процеси, що характеризуються утворенням додатної ентропії.

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. Для кількісної оцінки величин  $d_e S$  та  $d_i S$  для опису будь-якого необоротного процесу вводять терміни *термодинамічна сила*  $F$  та *термодинамічний потік*  $J = \frac{dX}{dt}$ , де  $dX$  – зміна фізичної величини за проміжок часу  $dt$ .

Зміну ентропії  $d_i S$  можна виразити через ці терміни, незважаючи на природу термодинамічних сил та термодинамічних потоків:

$$d_i S = F dX. \quad (17.31)$$

Всі необоротні процеси, що відбуваються у біологічних системах, можна описати рівняннями, які являють собою зміну ентропії як суму  $k$  всіх змін, викликаних необоротними потоками  $dX_k$ :

$$d_i S = \sum_k F_k dX_k \geq 0; \quad (17.32)$$

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum_k F_k \frac{dX_k}{dt} \geq 0. \quad (17.33)$$

Таким чином, загальна форма продукції ентропії за рахунок необоротних процесів матиме вигляд:

$$\sigma = \frac{d_i S}{dt} = \sum_k F_k \frac{dX_k}{dt} = \sum_k F_k J_k, \quad (17.34)$$

де  $F_k$  – рушійні сили;  $J_k$  – потоки.

Розглянемо як приклад зв'язку зміни ентропії з необоротними процесами ізолювану систему (рис. 17.9), що складається з двох відсіків з неоднаковою температурою ( $T_1 > T_2$ ).

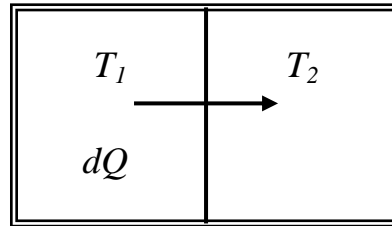


Рис. 17.9. Ізолювана система, що складається з двох відсіків з неоднаковою температурою ( $T_1 > T_2$ )

Тут  $dQ$  – кількість теплоти, що переходить з першої частини системи у другу за проміжок часу  $dt$ . Оскільки ця система ізолювана,  $d_e S = 0$ . Об'єми двох частин однакові, отже  $dA = 0$ .

Перший закон термодинаміки для кожної частини можна записати так:

$$dU_1 = dQ_1; \quad dU_2 = dQ_2. \quad (17.35)$$

Оскільки втрати теплоти ( $-dQ_1$ ) першою частиною системи дорівнюють припливу теплоти у другу частину ( $dQ_2$ ), можна записати рівняння:

$$-dQ_1 = dQ_2 = dQ. \quad (17.36)$$

Загальна зміна ентропії за рахунок необоротних процесів  $d_i S$  виражається за виразом:

$$d_i S = -\frac{dQ}{T_1} + \frac{dQ}{T_2} = \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) dQ. \quad (17.37)$$

Швидкість продукції ентропії можна одержати, якщо поділити останнє рівняння на  $dt$ :

$$\frac{d_i S}{dt} = \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \frac{dQ}{dt}. \quad (17.38)$$

Отже, швидкість продукції ентропії  $\frac{d_i S}{dt}$  за рахунок необоротних процесів дорівнює добутку термодинамічної сили  $F_k$  (різниці обернених величин температур  $\left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$  та термодинамічного потоку  $J_Q = \frac{dQ}{dt}$ .

### 17.8. Явища перенесення

Необоротні процеси, внаслідок яких у фізичній системі відбувається просторове перенесення маси, імпульсу, енергії, ентропії, електричного заряду тощо, називаються *процесами (явищами) перенесення*. Процеси перенесення, в яких градієнт певної властивості викликає потік тієї ж самої фізичної властивості, називаються *прямими процесами перенесення*. Прикладами прямих процесів є дифузія (потік частинок викликається градієнтом концентрації), теплопровідність (потік тепла викликається градієнтом температури), рух електричних зарядів (потік електричних зарядів викликається градієнтом потенціалу електричного поля). Якщо градієнт однієї фізичної властивості призводить до потоку іншої, йдеться про *непрямі (перехресні) процеси перенесення*. Як приклади можна навести термодифузію або ефект Соре (потік частинок викликається градієнтом температури), дифузійну теплопровідність або ефект Дюфуа (потік тепла викликається градієнтом концентрації), термоелектричні явища (потік електричного заряду викликається градієнтом температури). Можливі процеси перенесення наведено на рис. 17.10.

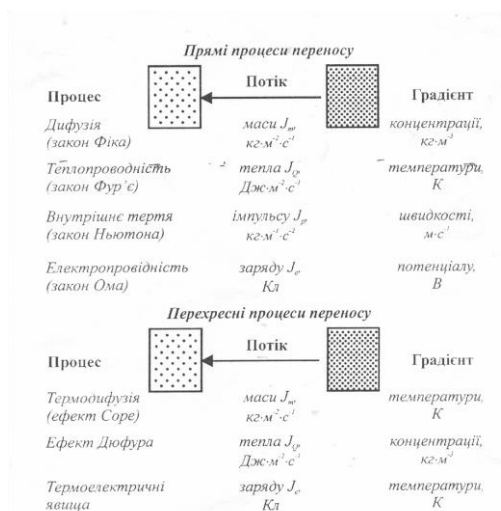


Рис.17.10.  
Можливі процеси перенесення

Якщо при досягненні рівноваги термодинамічною системою сили і потоки, що викликаються цими силами, зникають, то внаслідок невеликих відхилень від рівноваги слід очікувати лінійні співвідношення між термодинамічними силами та потоками.

На основі узагальнення відомих емпіричних фактів було сформульовано лінійний закон термодинаміки необоротних процесів: кожний потік являє собою лінійну комбінацію рушійних сил

$$J_k = \sum_{j=1}^N L_{kj} F_j, \quad (17.39)$$

де  $J_k$  – потік;  $L_{kj}$  – лінійний феноменологічний коефіцієнт;  $F_j$  – рушійна сила,  $N$  – загальна кількість рушійних сил у системі.

## Практичні завдання

### Приклад

Знайти зміну ентропії у процесі плавлення 2 кг льоду, що має температуру  $0^\circ\text{C}$ .

### Розв'язання

Зміна ентропії визначається виразом:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T},$$

де  $S_1$  і  $S_2$  – значення ентропії в початковому і кінцевому станах.

Плавлення льоду масою  $m$  за температури  $T$  супроводжується зміною ентропії:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \frac{m\lambda}{T},$$

де  $\lambda$  – питома теплота плавлення ( $3,35 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ).

Звідси:

$$\Delta S = \frac{2 \text{ кг} \cdot 3,35 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}}{273 \text{ К}} = 2454 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}.$$

### Приклад

Визначити зміну ентропії при нагріванні та плавленні 0,1 кг олова, якщо початкова температура олова становить  $20^\circ\text{C}$ , питома теплоємність  $230 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , питома теплота плавлення  $60,2 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ , а температура плавлення  $231,9^\circ\text{C}$ .

### Розв'язання

Зміна ентропії під час ізобарного нагрівання від температури  $T_1$  до температури  $T_2$  визначається за виразом:

$$\Delta S = cm \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = cm \ln \frac{T_2}{T_1},$$

де  $dQ = cmdT$ ;  $c$  – питома теплоємність за сталого тиску.

Зміна ентропії під час плавлення маси  $m$  кристалічної речовини дорівнює:

$$\Delta S = \frac{m\lambda}{T_{пл}},$$

де  $Q = m\lambda$  – теплота плавлення;  $\lambda$  – питома теплота плавлення;  $T_{пл}$  – температура плавлення. Отже, зміна ентропії під час нагрівання та плавлення олова визначається так:

$$\Delta S = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_n} + \frac{m\lambda}{T_{пл}},$$

де  $T_n$  – початкова температура речовини.

Підставляємо числові дані в останнє рівняння:

$$\Delta S = 230 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 0,1 \text{ кг} \times \ln(505,05 / 293,15) + (0,1 \text{ кг} \times 60,2 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}) / (505,05 \text{ K}) = 24,37 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

### Контрольне завдання

Визначити зміну ентропії під час плавлення 0,3 кг свинцю, якщо питома теплота плавлення  $24,7 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ , а температура плавлення  $327,4^\circ\text{C}$ .

Відповідь:  $\Delta S = 12,34 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

## 18. ПЕРЕНЕСЕННЯ МАСИ: ВОДА ТА РОЗЧИНЕНІ РЕЧОВИНИ



Процес перенесення маси відбувається в живих клітинах, ґрунті, рослинах, атмосфері. Розглянемо як приклад перенесення маси в системі ґрунт-рослина-атмосфера.

### 18.1. Перенесення маси в ґрунті

Ґрунт складається з твердої (речовини неорганічного та органічного походження), рідкої (вода) та газоподібної ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  та водна пара) фаз. Частинки ґрунту та розчинені речовини (такі як Na, K, Ca, Mg, Cl,  $NO_3$ ,  $SO_4$ ,  $HCO_3$ ) утворюють *ґрунтовий розчин*. Проміжки між ґрунтовими частинками ґрунту називаються *порами*. Розміри пор варіюють від 10 мкм до 1000 мкм.

Рух рідини через пористе середовище підлягає лінійному закону термодинаміки необоротних процесів ( 16.39 ) та описується *рівнянням Дарсі*:

$$J_e = L_e \cdot F \quad (18.1)$$

Або

$$\frac{dQ}{Sdt} = -K \frac{h_2 - h_1}{L} = K \frac{\Delta h}{L}. \quad (18.2)$$

Тут  $J_e = \frac{dQ}{Sdt}$ ;  $L_e = -K$ ;  $F = \frac{\Delta h}{L}$ , де  $\frac{dQ}{Sdt}$  – густина потоку води;  $K$  – коефіцієнт пропорційності (гідравлічна провідність, коефіцієнт фільтрації, проникність пористого середовища);  $S$  – площа, через яку переноситься потік води;  $\Delta h = h_2 - h_1$  – різниця рівнів манометрів, розташова-

них на висоті  $h_2$  та  $h_1$  відносно опорного рівня;  $\frac{\Delta h}{L}$  – гідравлічний градієнт (рис. 18.1).

Гідравлічна провідність ґрунту  $K$  змінюється від  $1 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$  (або менше) для сухого непористого ґрунту до  $1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$  (або більше) для вологого пористого ґрунту. Зокрема,  $K = 1 \cdot 10^{-13} - 1 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$  для насиченої пористої глини та  $K = 1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$  для насиченого водою піщаного ґрунту.

Зазвичай ґрунт покритий сухою кіркою, гідравлічна провідність якої дорівнює  $K = 1 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$ .

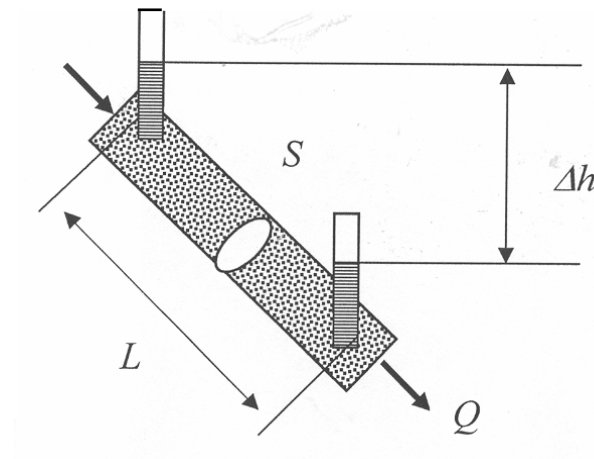


Рис. 18.1. Потік рідини через пористе середовище

Одиниці густини потоку води, гідравлічної провідності та гідравлічного градієнту, які входять у закон Дарсі, залежать від того, відносно чого розглядається потенціальна енергія води – маси, об'єму чи ваги:

Одиниця	Густина потоку	Гідравлічна провідність	Гідравлічний градієнт
Потенціальна енергія/маса	кг/м <sup>2</sup> ·с	кг·с/м <sup>3</sup>	Дж/кг·м
Потенціальна енергія/об'єм	м/с	м <sup>3</sup> ·с/кг = = м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> ·Па <sup>-1</sup>	Па/м
Потенціальна енергія/вага	м/с	м/с	м/м

Закон Дарсі справедливий для повільних та в'язких потоків, таких як ґрунтові потоки води.

## 18.2. Перенесення маси (дифузія)

Розчинені речовини і розчинник переміщуються через напівпроникні мембрани шляхом *дифузії* – взаємного проникнення речовин, що стикаються одна з одною внаслідок теплового руху частинок речовини. Дифузія відбувається у напрямку зменшення концентрації речовини і призводить до її рівномірного розподілу за об'ємом, який вона займає.

Лінійний закон термодинаміки необоротних процесів у випадку дифузії має вигляд *закону Фіка*:

$$J_m = L_m \cdot F_m \quad (18.3)$$

або

$$J_m = \frac{dm}{Sdt} = -D \frac{d\rho}{dx}. \quad (18.4)$$

Так, компоненти рівняння ( 17.39 ) конкретизуються у випадку дифузії як  $J_m = \frac{dm}{Sdt}$ ;  $L_m = -D$ ;  $F_m = \frac{d\rho}{dx}$ , де  $\frac{dm}{Sdt}$  – густина потоку речовини (маса речовини, що дифундує за час  $dt$  через площу  $S$ );  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $S$  – площа, через яку переноситься речовина;  $\frac{d\rho}{dx}$  – градієнт густини.

Одиниці вимірювання густини потоку речовини –  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ; коефіцієнта дифузії –  $\text{м}^2/\text{с}$ ; градієнта густини –  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$ .

Коефіцієнт дифузії  $D$  залежить від природи і молекулярної маси речовини та розчинника. У випадку дифузії через клітинну мембрану коефіцієнт дифузії характеризує швидкість надходження молекул речовини у цитоплазму (рідку речовину клітини). Напрямок потоку частинок і градієнта концентрації (який направлений у бік зростання концентрації) протилежні; саме через це в останній формулі присутній знак «мінус».

Вільна дифузія є важливим процесом, необхідним для руху розчинених речовин у клітинах та тканинах рослин. Зміна концентрації розчиненої речовини внаслідок дифузії залежно від положення та часу визначається за допомогою *другого закону Фіка*:



$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (18.5)$$

Розв'язок останнього рівняння слід шукати у вигляді:

$$c = \frac{c_0}{2(\pi Dt)^{1/2}} e^{-x^2/4Dt}, \quad (18.6)$$

де  $c_0$  – кількість речовини, що проходить через одиницю площі в момент часу  $t = 0$  на початку осі  $x$  (тобто  $x = 0$ ), а  $c$  – концентрація в точці  $x$  у будь-який більш пізній момент часу  $t$ .

Видно, що в початковій точці ( $x = 0$ ) концентрація дорівнює  $\frac{c_0}{2(\pi Dt)^{1/2}}$ . Для оцінки того, як далеко частинки речовини продифундують від початкової точки за час  $t$ , використовують відстань  $x_e$ , на якій концентрація зменшується до  $1/e$  (або 37%) вихідного значення. Концентрація спадає до 37% від вихідної величини, коли показник ступеня при  $e$  в останньому рівнянні дорівнюватиме  $-1$ .

Звідси

$$x_e = (4Dt)^{1/2}. \quad (18.7)$$

Розглянемо типові значення коефіцієнтів дифузії малих молекул у водному розчині та газів у повітрі (табл. 18.1).

18.1. Коефіцієнти дифузії малих молекул у водному розчині та газів у повітрі [Nobel,1983]

Речовина	Коефіцієнт дифузії, $m^2 \cdot s^{-1}$	Речовина	Коефіцієнт дифузії, $m^2 \cdot s^{-1}$
Глюкоза	$0,67 \cdot 10^{-9}$	$Na^+$ (з $Cl^-$ )	$1,5 \cdot 10^{-9}$
Гліцин	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$CO_2$ (у розчині)	$1,7 \cdot 10^{-9}$
Цукроза	$0,52 \cdot 10^{-9}$	$CO_2$ (газ)	$1,5 \cdot 10^{-5}$
$Ca^{2+}$ (з $Cl^-$ )	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$H_2O$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
$K^+$ (з $Cl^-$ )	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$O_2$	$1,9 \cdot 10^{-5}$

### 18.3. Дифузія через клітини

Молекули проходять через мембрани завдяки *пасивному транспортуванню* – дифузії через ліпідний бішар, який є непроникним для іонів калію, натрію, кальцію, хлору, для малих гідрофільних молекул, таких як глюкоза, та макромолекул (білки, РНК). У той же час клітинна мембрана є проникною для неполярних (таких як кисень) та полярних (таких як вода та двоокис вуглецю) молекул тому, що ці молекули малі та незаряджені. Процес перенесення цих молекул через мембрану здійснюється завдяки *простій дифузії* – переміщенню молекул з області високої концентрації в область низької концентрації за рахунок довільного руху (рис. 18.2).

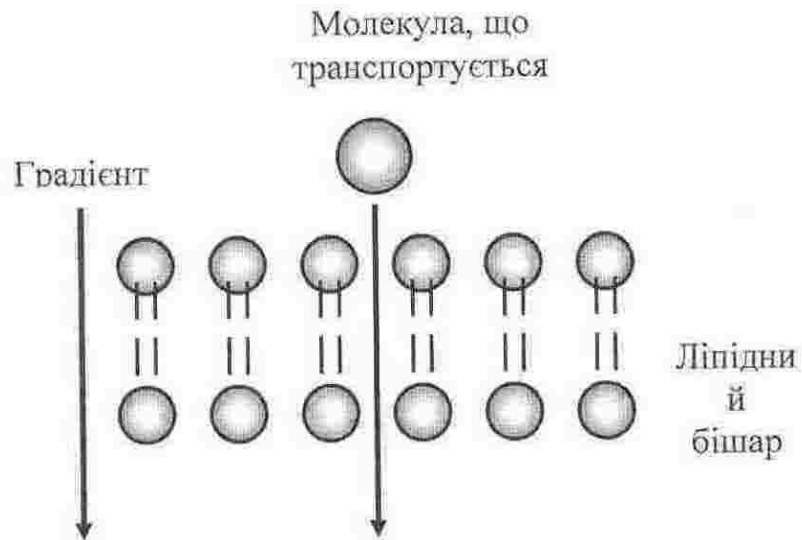


Рис. 18.2. Проста дифузія

Коефіцієнт дифузії  $D$  залежить від природи і молекулярної маси речовини та розчинника. У випадку дифузії через клітинну мембрану коефіцієнт дифузії характеризує швидкість надходження молекул речовини у цитоплазму (рідку речовину клітини). Напрямок потоку частинок і градієнта концентрації (який направлений у бік зростання концентрації) протилежні; саме через це в останній формулі є знак «мінус».

Для внутрішньоклітинних масштабів дифузія є достатньо швидким процесом. У той же час, на великих відстанях дифузія є вкрай повільним процесом. Наприклад, мінеральні поживні речовини, що переносяться ксилемним соком, не змогли б піднятися по рослині за рахунок дифузії для того, щоб підтримати життєдіяльність цієї рослини.

#### 18.4. Стаціонарна дифузія крізь шар речовини

Розглянемо шар речовини, який розділяє два середовища з різною концентрацією, що знаходяться у стаціонарному стані, при якому всі параметри системи, тобто концентрації, не залежать від часу (рис. 18.3):  $C_{A1}$  (координата  $x$ ) та  $C_{A2}$  (координата  $x = L$ ).

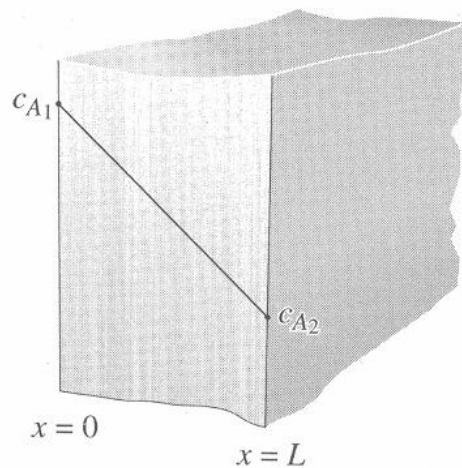


Рис.18.3. Розподіл концентрації у шарі речовини, що розділяє два середовища

Вважаємо, що кожна концентрація в обох середовищах однорідна. Оскільки система знаходиться у стаціонарному стані, дифузія речовини, яка описується другим законом Фіка (рівняння ( 18.5 ), матиме вигляд:

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0. \quad (18.8)$$

Граничні умови можна записати у вигляді:

$$C_A(x=0) = C_{A1}, \quad (18.9)$$

$$C_A(x=L) = C_{A2}. \quad (18.10)$$

Рішення рівняння ( 18.8 ) знаходимо за виразом:

$$C_A = (C_{A2} - C_{A1})x/L + C_{A1}, \quad (18.11)$$

який свідчить на користь лінійної залежності концентрації від товщини шару речовини в інтервалі концентрацій від  $C_{A1}$  до  $C_{A2}$ .

Потік маси речовини завдяки дифузії у цьому випадку матиме вигляд:

$$J_{S,x} = -D \frac{dC_A}{dx} = -DS(C_{A2} - C_{A1})/L = DS(C_{A1} - C_{A2})/L. \quad (18.12)$$

### 18.5. Осмос

*Осмос* – це дифузія речовини (звичайно розчинника) через напівпроникну мембрану, що розділяє розчин та чистий розчинник.

Перенесення молекул розчинника обумовлено *осмотичним тиском*. Вирівнювання концентрацій по обидві сторони мембрани, яка пропускає малі молекули розчинника, але заважає проходженню великих молекул розчиненої речовини, можливе лише при однобічній дифузії розчинника (рис. 18.4).

Саме тому *осмос завжди відбувається у напрямку від чистого розчинника до розчину (або від розведеного розчину до концентрованого)*. Можна сказати, що осмос – це процес перенесення води через напівпроникну мембрану з області високої концентрації води в область малої.

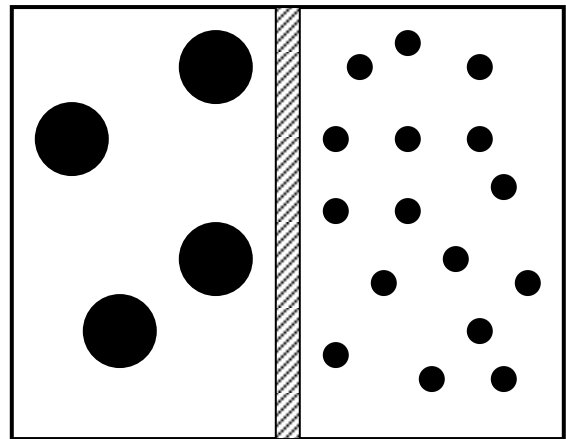


Рис. 18.4. Осмос як дифузія речовини через напівпроникну мембрану від розведеного розчину до концентрованого

Дифузія припиниться, коли буде досягнутий певний, осмотичний тиск у розчині. Осмотичний тиск можна виміряти – він дорівнює тому надлишковому тиску, який потрібно прикласти з боку розчину, щоб припинити осмос. Біологічні рідини являють собою розведені водні розчини, в яких вода займає до 95 % об'єму; отже, осмотичні потоки через біологічні мембрани викликають водні потоки з областей високої концентрації води (розведені розчини) в області низької концентрації води (більш концентровані розчини).

У вакуолях рослинних клітин містяться розчини солей, цукри, органічні кислоти та амінокислоти. Внаслідок цього клітини постійно осмотично поглинають воду та утворюють внутрішній гідростатичний тиск, який називають *тургорним*. Цей тиск направлений на клітинну оболонку і робить її пружною. Одночасно клітинна оболонка протидіє осмотичному тиску; ця дія клітинної оболонки на цитоплазму характеризується *осмотичним потенціалом*. Коли встановлюється динамічна рівновага, надходження води у клітину припиняється.

Таким чином, *осмотичний тиск* – це тиск розчину на напівпроникну мембрану, яка відокремлює його від розчинника або від розчину з меншою концентрацією. Осмос і дифузія мають схожі, але й відмінні риси. Обидва процеси проходять спонтанно, у напрямку від більших концентрацій до менших внаслідок випадкового руху молекул і залежать від температури. В той же час осмос відрізняється тим, що з ним пов'язане зміщення об'єму речовини, тоді як дифузія відбувається у тому ж самому об'ємі.

Осмотичний тиск визначається виразом, який називається *рівнянням Вант-Гоффа*:

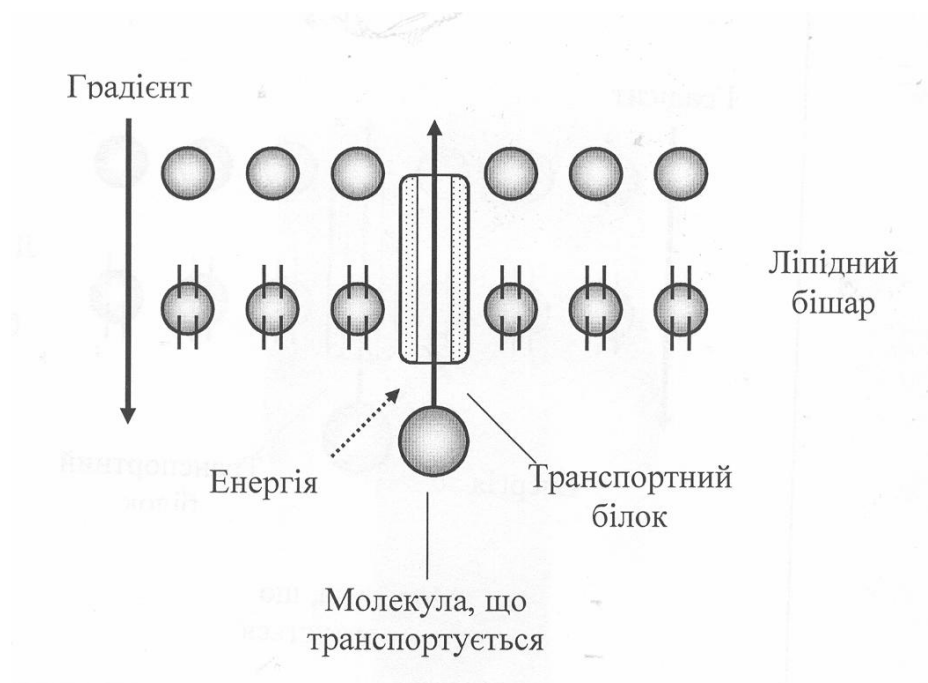
$$p_{осм} = RTC_A, \quad (18.13)$$

де  $R$  – універсальна газова стала ( $R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ );  $T$  – абсолютна температура,  $C_A$  – молярна концентрація розчиненої речовини.

### 18.6. Активне транспортування

Зазвичай, вода постачається кореневій системі рослини завдяки простій дифузії. Що стосується мінеральних солей, то концентрація ґрунтового розчину досить мала, через що ці солі можуть постачатися лише за рахунок активної дифузії.

*Активне транспортування* – це процес, завдяки якому розчинені молекули (речовини) рухаються у напрямку від меншої концентрації до більшої, що дозволяє клітинам кореневої системи накопичувати достатньо мінеральних солей. У рослинних клітинах цей процес відбувається за допомогою *протонного насосу*, який використовує енергію АТФ, що розщеплюється  $H^+$ -АТФазою, локалізованою у мембрані. Фермент створює великий електричний потенціал та градієнт рН, що призводить до виникнення рушійної сили для поглинання речовин, які переносяться разом з іонами  $H^+$ . Завдяки протонному насосу іони  $H^+$  рухаються з клітини у зовнішнє середовище, через що концентрація цих іонів у зовнішньому середовищі перевищує ту, що є усередині клітини (рис. 18.5). Це перенесення водневих іонів призводить до появи мембранного потенціалу – внутрішнє середовище клітини заряджене негативно відносно зовнішнього середовища.



**Рис.18.5 Активне транспортування**

Прикладом активного транспортування є перенесення через мембрану клітин кореневої системи мінеральних солей – нітратів ( $NO_3^-$ ), які

потрібні рослині для утворення білків та росту. Усередині кореневої клітини нітрати мають більшу концентрацію, ніж зовні, у ґрунті, де вони розчиняються у ґрунтовій воді. Саме тому цим молекулам треба подолати концентраційний градієнт.

У попередніх розділах зазначалося, що основними механізмами перенесення води є молекулярна дифузія та об'ємний потік. На великих відстанях перенесенням води керує об'ємний потік, який викликається градієнтом тиску.

### 18.7. Коренева система

Поглинання рослиною води та мінеральних поживних речовин із ґрунту здійснюється за допомогою кореневої системи. Надійний контакт коріння з ґрунтом забезпечується завдяки великій кількості коренів та кореневих волосків у рослини. Наприклад, можна навести параметри кореневої системи чотиримісячної рослини жита: середня кількість коренів –  $1,38 \cdot 10^7$ ; загальна площа кореневої системи –  $232 \text{ м}^2$ ; кількість кореневих волосків –  $1,4 \cdot 10^{10}$ ; сумарна площа коренів та кореневих волосків –  $631 \text{ м}^2$ . Причому, сумарна площа поверхні кореневих волосків може досягати 60 % загальної площі кореневої системи.

Протягом свого руху через кореневу систему вода, що поглинута кореневим волоском, перетинає епідерміс і транспортується або *апопластним шляхом* – через клітинні стінки, або *симпластним шляхом* – через цитоплазму по плазмодесмах, які являють собою найдрібніші цитоплазматичні тяжі, що сполучають протопласти сусідніх клітин (рис. 18.6).

*Апопластний шлях.* Вільний простір між клітинами або клітинними оболонками, завдяки якому здійснюється рух води та розчинених речовин від кореневої системи до судин ксилеми через клітинні стінки, називається *апопластом*. Цей рух переривається непроникними для води *поясками Каспарі*, що знаходяться в ендодермі.

*Симпластний шлях.* Транспортування води та низькомолекулярних розчинених речовин через численні плазмодесми клітин епідермісу, кори, ендодерму та періциклу до судин ксилеми називається *семипластом*. Типові рослинні клітини містять близько  $10^3$ – $10^5$  плазмодесм діаметром 50–60 нм.

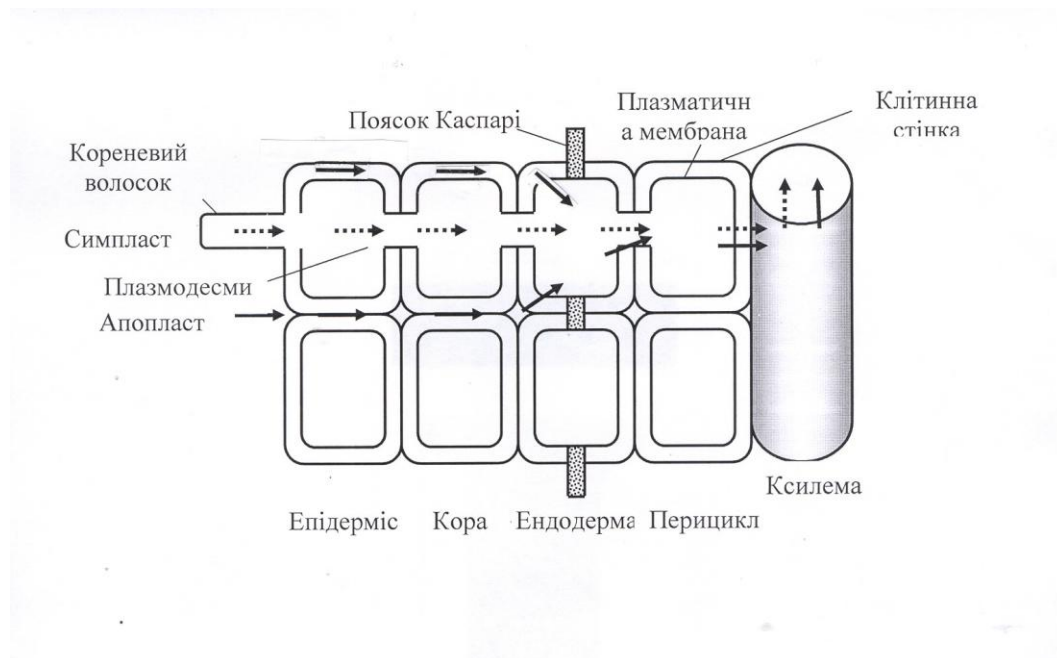


Рис. 18.6 Рух води та розчинених речовин через кореневу систему

### 18.8. 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. 18.7

*Механізми ксилемного транспортування.* 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 *не-*



змочування стінки рідиною. Розглянемо капіляр, занурений у змочуючу рідину.

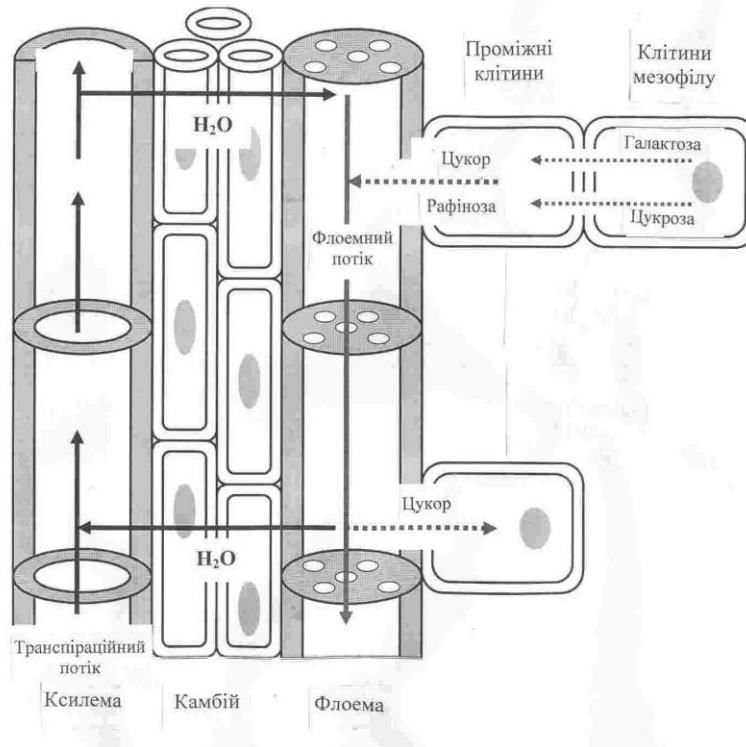


Рис.18.7 Провідні елементи ксилеми та флоеми

Сили притягання, які виникають між молекулами рідини і капіляра, примушують рідину підійматися по стінці капіляра, що призводить до викривлення поверхні рідини та утворення негативного тиску. Внаслідок цього рідина підіймається по капіляру доти, поки гідростатичний тиск не зрівноважить додатковий тиск. Умову рівноваги можна описати за виразом:

$$\frac{2\sigma}{R} = \rho gh, \quad (18.14)$$

де  $\rho$  – густина рідини;  $R$  – радіус кривизни меніска;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $h$  – висота, на яку підіймається рідина. Звідси можна визначити висоту піднімання рідини:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}, \quad (18.15)$$

де  $r = R \cos \theta$  – радіус капіляра;  $\theta$  – крайовий кут (рис. 18.8.

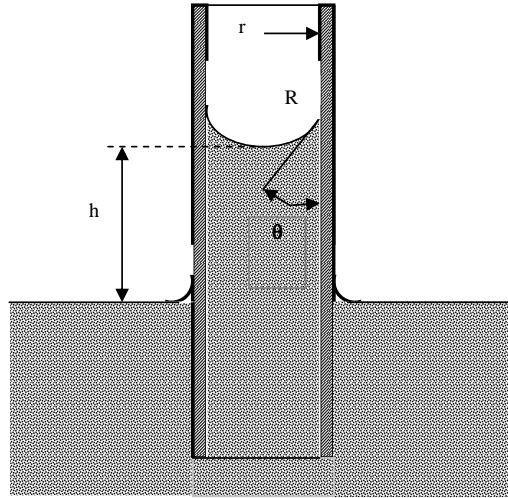


Рис.18.8 Підіймання рідини у капілярі.

Розглянемо на конкретному прикладі судину ксилеми радіусом 20 мкм: згідно з формулою ( 18.10 ) вода в судині підійметься на висоту:

$$h = \frac{2 \cdot 72,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1} \cos 90^\circ}{998,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = \frac{1,49 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2}{20 \cdot 10^{-6} (\text{м})} = 0,745 \text{ м}.$$

### 18.9. Об'ємний потік

Отже, додатковий тиск у судинах ксилеми не здатний забезпечити піднімання рідини в рослинах висотою більше одного метра. На великих відстанях перенесенням 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 законом 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 та обернено пропорційний довжині трубки  $l$  і коефіцієнту в'язкості  $\eta$  рідини

$$J_v = \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\pi \cdot R^4}{8 \cdot l} \cdot (p_1 - p_2), \quad (18.16)$$

де  $J_v$  – об'ємна швидкість течії рідини;  $V$  – об'єм рідини.

Узагальнена форма закону Пуазейля матиме вигляд:

$$J_v = L_v \Delta p, \quad (18.17)$$

де  $L_v$  – феноменологічний коефіцієнт.

З рівняння (18.11) 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.

### 18.10. 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 системі рослини. Флоема являє собою тканину, що складається з кількох типів клітин. Але на відміну від ксилеми провідні елементи флоеми містять протоплазму (див. рис. 18.7). 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.

*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 флоєми, високу (50–250 см/г) швидкість транслокації на великій відстані, одночасне транспортування речовин у протилежних напрямках, початковий процес перенесення асимілятів з мезофільних клітин листка до ситоподібних елементів флоєми (*завантаження флоєми*), транспортування асимілятів по ситоподібних елементах та остаточне перенесення асимілятів із ситоподібних елементів до клітин органів, в яких вони накопичуються (*розвантаження флоєми*).

Найвірогіднішою вважається *гіпотеза потоку під тиском* (E. Münch, 1930), яка базується на перенесенні маси розчиненої речовини від джерела до органів, де вона накопичується, за рахунок градієнта гідростатичного (тургорного) тиску в ситоподібних елементах (див. рис. 18.7). Завантаження флоєми відбувається завдяки транспортуванню цукрів від мезофілу через тонкі пучки, серединну жилку та листовий черешок до ситоподібних елементів флоєми. Збільшення концентрації розчинених речовин у цих елементах призводить до зменшення водного потенціалу та відповідного осмотичного поглинання води з сусідньої ксилеми. Гідростатичний (тургорний) тиск на цьому кінці флоєми збільшується. В той же час, на протилежному кінці флоєми цукри покидають флоєму, а вода повертається в ксилему. Тиск зменшується, а в цілому вздовж флоєми утворюється градієнт тиску, який обумовлює потік рідини від листа до коріння. Цей градієнт описується законом Пуазейля.

### **18.11. Вимірювання потоків соку**

*Сік* – це рідина, що транспортується в ксилемі через трахеїди та судини або у флоємі через ситоподібні трубки. Ксилемний сік містить воду та мінеральні солі, а флоємний – 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. Суть методу полягає у зануренні у стовбур дерева двох пустотілих голок, які містять термопари – робочу та опорну (рис. 18.9). Одна голка (з робочою термопарою) має нагрівник,

завдяки якому утворюється потік теплоти. Швидкість потоку соку  $F$  визначається за виразом:

$$F = 0.428 S_a [(T_m - T_d)/T_d]^{1,231}, \quad (18.18)$$

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.

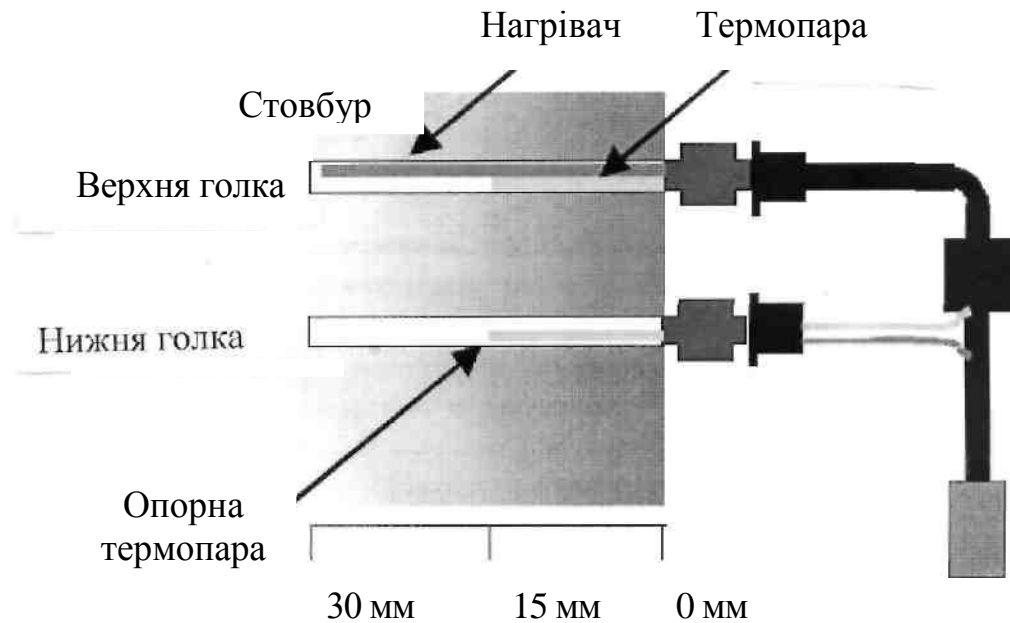


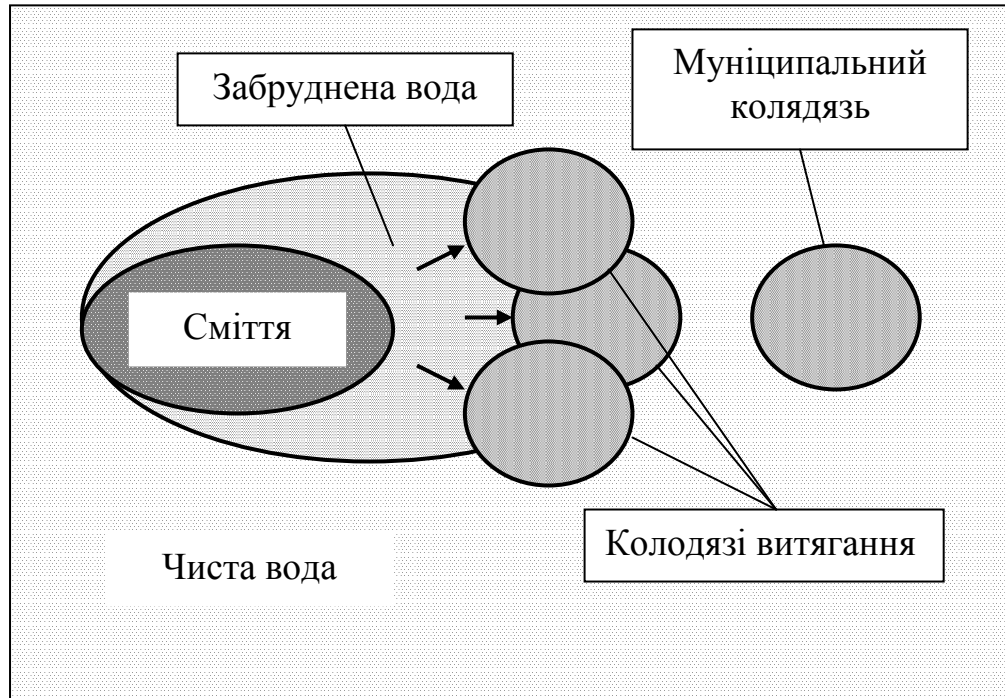
Рис. 18.9. Сенсор Гранье

Сенсори Гранье характеризуються невисокою вартістю, механічною міцністю та надійністю.

### 18.12. Перенесення води під час ремедіації

**Утримання забруднювачів.** Для іммобілізації забруднювачів застосовують *гідравлічні бар'єри*. Принцип дії гідравлічного бар'єра полягає у маніпулюванні водним тиском, який утворюється внаслідок додавання або вилучання води. Ключовим моментом цієї технології є можливість окреслити та зафіксувати зону забруднення з метою її захоплення, що здійснюється за допомогою системи траншей або колодязів. У такій дренажній системі забруднена вода збирається та відкачується (рис. 18.10).

Зрозуміло, що розміри таких забруднених зон не можуть бути необмежено великими.



**Рис. 18.10. Вилучення забрудненої води за допомогою гідравлічного бар'єра**

Можливо застосування колодязів, в яких утворюється підвищений тиск, з метою обмеження поширення забруднених вод. Глибина гідравлічних бар'єрів досягає 50 м, а периметр мож простиратися до кількох кілометрів.

*Накачування та обробка.* Поширеним є метод *накачування та обробки* забруднених ґрунтових вод. Забруднена вода відкачується для подальшої обробки, тоді як замість неї у забруднену зону накачується чиста вода (рис. 18.11).

Замість води у ґрунт може накачуватися повітря; оскільки в'язкість повітря менша, ніж води, такий метод вимагає менше енергії і є менш коштовним.

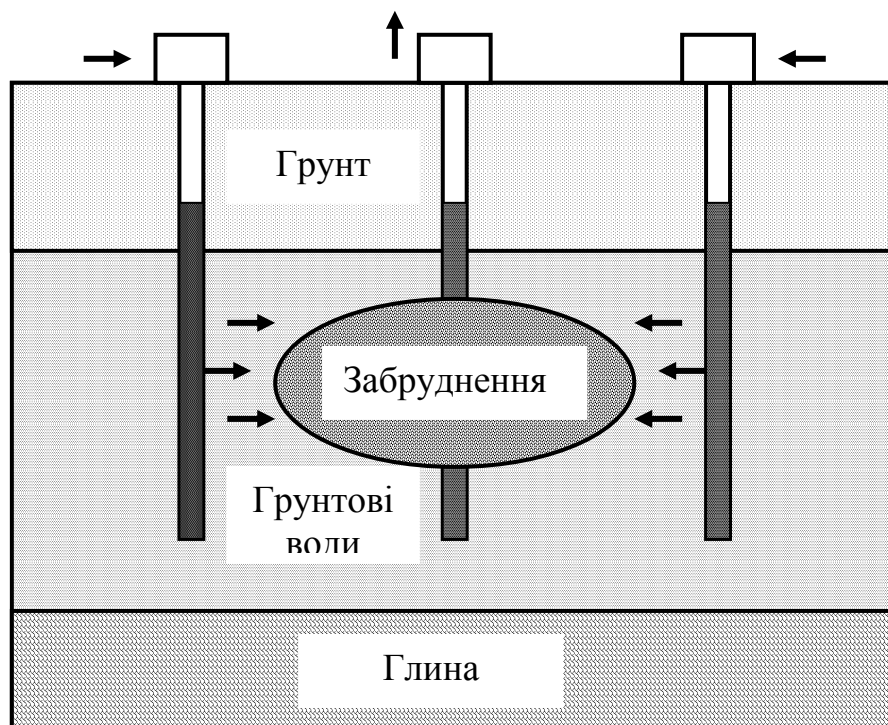


Рис. 18.11. Вилучення забрудненої води за допомогою методу накачування та обробки

Ще одна модифікація гідравлічних бар'єрів передбачає застосування реактивних матеріалів, які розташовують на шляху забруднених потоків. Ці матеріали забезпечують перетворення забруднювачів у безпечні для навколишнього середовища форми.

### 18.13. Перенесення забруднювачів рослиною

*Принципи фітореMediaції.* Термін *фітореMediaція* походить від грецького слова *фіто* – “рослина” та латинського *ремедіум* – “лік, засіб проти чогось”. Процедура фітореMediaції 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 забруднювачі.

Відрізняють такі процеси фітореMediaції:

- *Фітоекстрагування* – вилучення та зосередження субстанцій з навколишнього середовища у біомасі рослини.

- *Фітостабілізація* – зменшення рухомості субстанцій у навколишньому середовищі.
- *Фітоперетворення* – хімічна модифікація субстанцій навколишнього середовища внаслідок рослинного метаболізму (обміну речовин) завдяки інактивації, деградації або іммобілізації цих субстанцій.
- *Фітостимуляція* – збільшення активності мікроорганізмів у ґрунті, що призводить до деградації забруднювачів.
- *Фітоволатилізація* (від лат. *volatilis* – леткий, швидкий) – вилучення субстанцій з ґрунту або води з їх подальшим перетворенням у менш отруйні субстанції.
- *Ризофільтрація* – фільтрація води, що проходить через кореневу масу з вилученням токсичних субстанцій, або залишку поживних речовин; забруднювачі поглинаються корінням.

Деякі типи фіторемедіації наведкно на рис. 18.12.

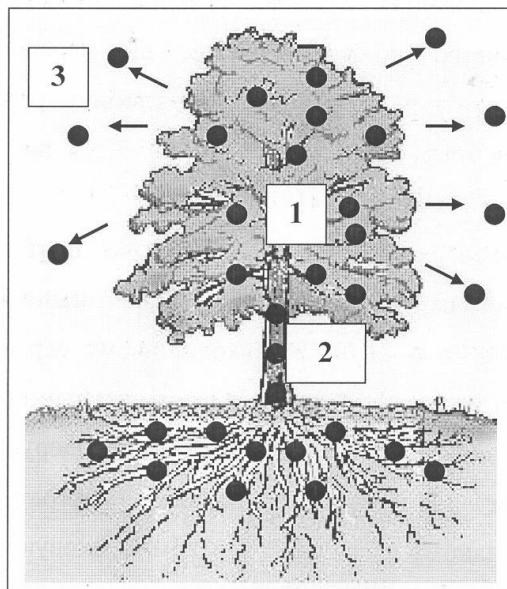


Рис. 18.12. Деякі типи **фіторемедіації**: 1 – фітоекстрагування; 2 – фітотрансформація; 3 – фітоволатилізація

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.



## Практичні завдання

### Закон Дарсі

#### Приклад

Визначити об'ємну густину потоку води  $J_v$  через верхній шар ґрунту товщиною 5 мм, якщо гідростатичний тиск  $P$  змінюється від  $-2,0$  МПа поблизу поверхні ґрунту до  $-1,5$  МПа на глибині 5 мм.

#### Розв'язання

Використовуємо рівняння Дарсі:

$$J_e = -K \frac{\Delta P}{L} =$$
$$= -(1 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}) \left[ \frac{(-2,0 \cdot 10^6 \text{ Па}) - (-1,5 \cdot 10^6 \text{ Па})}{5 \cdot 10^{-3} \text{ м}} \right] = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}.$$

#### Контрольне завдання

Визначити об'ємну густину потоку води, який проходить через стовп пресованого піску довжиною 150 см та поперечним перерізом  $250 \text{ см}^2$ , якщо гідравлічна провідність піску дорівнює 15 м/добу.

Відповідь: 0,023 см/с.

### Дифузія

#### Приклад

Оцінити, скільки часу потрібно малим іонам та молекулам у водному розчині, щоб продифундувати на 50 мкм – відстань, що дорівнює перерізу типової клітини листка. Використати типові значення коефіцієнта дифузії  $D = 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

#### Розв'язання

Використовуючи рівняння (18.7) одержимо:  $t = x_e^2 / 4D = (50 \cdot 10^{-6} \text{ м})^2 / 4 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} = 0,6 \text{ с}$ .

#### Контрольне завдання

Оцінити, скільки часу потрібно малим іонам та молекулам у водному розчині, щоб продифундувати на відстань 1 м.

Відповідь:  $2,5 \cdot 10^8 \text{ с} \approx 8$  років.

#### Контрольне завдання

Оцінити час, необхідний для дифузії водяної пари, вуглекислого газу та кисню, якщо типові значення відстані, яку необхідно пройти газам у міжклітинному просторі, становить 1 мм. Використати дані табл. 18.1.

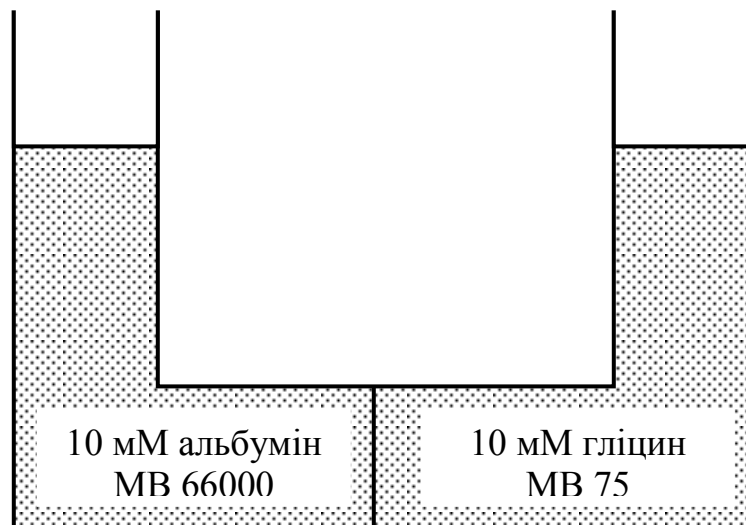
Відповідь: Від 10 до 16 мс.

Таким чином, для внутрішньоклітинних масштабів та у повітрі дифузія є достатньо швидким процесом, тоді як на великих відстанях дифузія є вкрай повільним процесом. Наприклад, мінеральні поживні речовини, що переносяться ксилемним соком, не змогли б піднятися по рослині за рахунок дифузії для того, щоб підтримати життєдіяльність цієї рослини.

### ***Осмос***

#### **Приклад**

В якому напрямку буде рухатися вода?

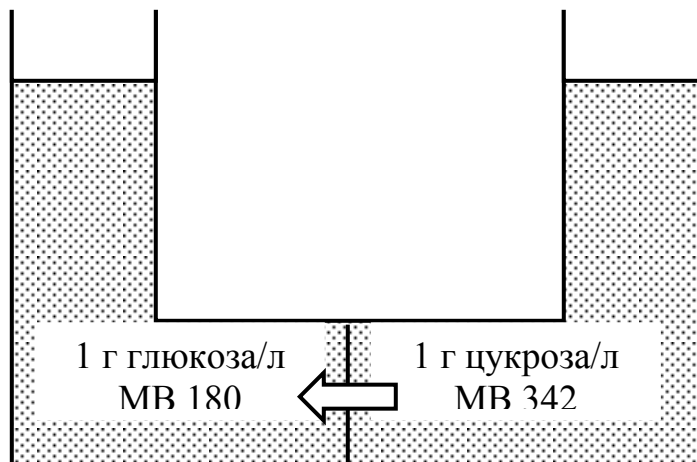


#### **Розв'язання**

Молекулярна маса альбуміна приблизно у 1000 разів більша, ніж молекулярна маса гліцина. Але концентрація молекул альбуміна дорівнює концентрації молекул гліцина (10 мМ). Отже в такій системі потік води буде відсутній.

### Приклад

В якому напрямку буде рухатися вода?

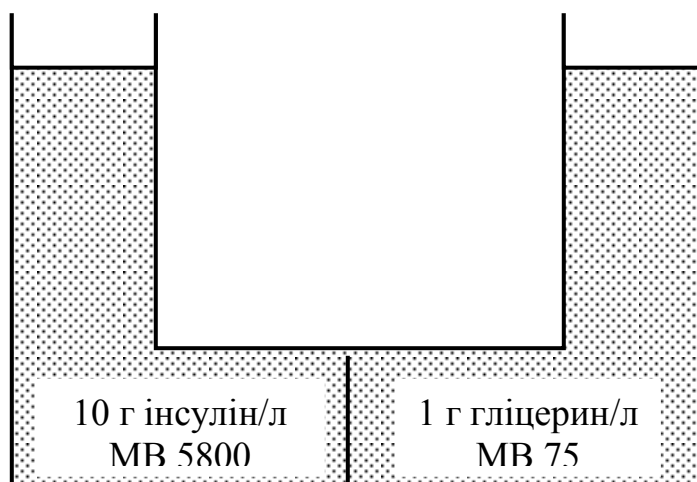


### Розв'язання

Концентрація обох розчинів однакова ( 1г/л ), але кількість молекул глюкози у літрі перевищує кількість молекул цукрози у літрі. Отже, в такій системі буде спостерігатися потік води до більшої концентрації розчинених частинок.

### Контрольне завдання

В якому напрямку буде рухатися вода? Зробити пояснення.



Отже, осмотичний тиск у рослині – один із найважливіших факторів, який впливає на розподіл води і розчинених речовин у рослинних тканинах.



## 19. ПЕРЕНЕСЕННЯ МАСИ:

### ВОДЯНА ПАРА ТА ГАЗИ



#### 19.1. Транспірація

Процес випускання рослиною води в атмосферу за допомогою листя називається *транспірацією*. Цей процес є дуже важливим етапом водного циклу; він забезпечує повертання в атмосферу більшої кількості води, ніж при випаровуванні її з поверхні річок та озер. Отже, вкрай важливими є проблеми вивчення механізмів транспірації, структури транспіраційної системи рослини та з'ясування впливу зовнішніх факторів на швидкість втрати води рослиною через транспірацію. Близько 90 % води, що надходить у рослину через кореневу систему, втрачається рослиною через листя завдяки транспірації. Рослини постачають в атмосферу велику кількість води: так, сонячник втрачає щоденно 1-2 л води, тоді як дуб – близько 600 л води щоденно.

Процес транспірації істотно залежить від анатомії листка (рис. 19.1).

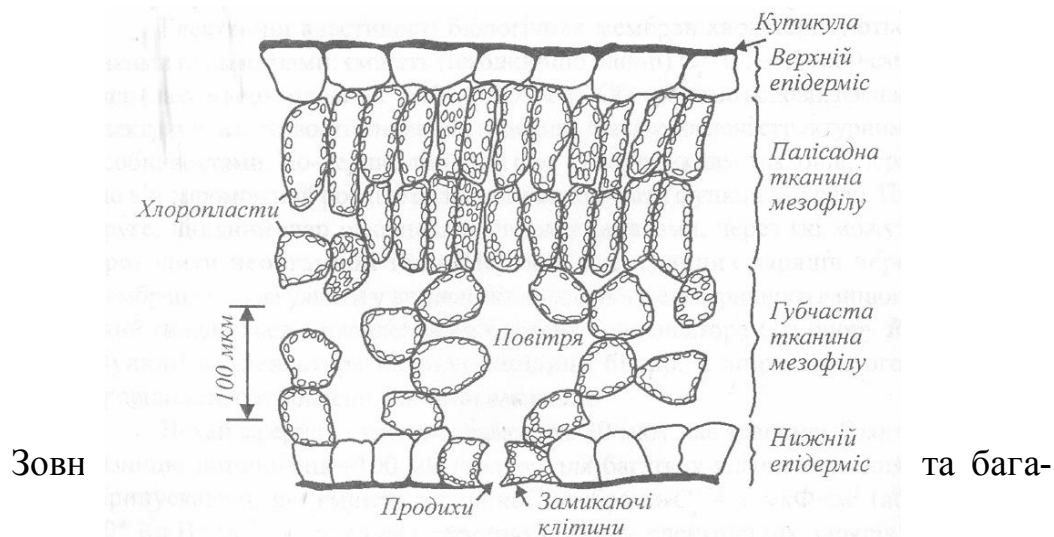


Рис. 19.1 Схематичний поперечний переріз рослинного листка

тошаровою восковою *кутикулою*, яка вкриває епідерміс листка. Оскільки кутикулярні воски гідрофобні, вони утворюють суттєвий опір дифузії води та водяної пари з розташованих під кутикулою клітин. Таким чином, кутикула запобігає випаровуванню води безпосередньо з поверхні епідермальних клітин та захищає епідермальні і мезофільні клітини від висихання.

Цілісність епідермісу та кутикули порушується дрібними порами, які називаються *продихами*. Кожна пора оточена парою *закриваних клітин*, які виконують функції гідравлічних клапанів, що регулюють отвір пори. Внутрішній простір листка містить мезофільні клітини та повітряні проміжки між ними. Об'єм цих проміжків може досягати 70 % від загального об'єму листка. Продихи у відкритому стані забезпечують обмін газами  $CO_2$ ,  $O_2$  та водяною парою з навколишньою атмосферою.

Під час *транспірації* відбувається випаровування води з поверхні вологих клітин продихового простору та дифузія водяної пари через міжклітинні повітряні проміжки листка.

Водна пара, що покинула поверхню клітин, дифундує в продиховий простір і залишає листок через продихи. Цей процес, відомий як *продихова транспірація*, забезпечує 90–95 % втрат води з листя. Решта води втрачається завдяки *кутикулярній транспірації*, оскільки незначна кількість води все ж таки здатна проходити через кутикулу. Ефективність цього транспіраційного процесу залежить від товщини кутикулярного шару. Рослини, що мешкають в умовах інтенсивної освітленості, характеризуються товстою кутикулою, яка запобігає втратам вологи рослиною.

Вуглекислий газ дифундує з атмосфери через відкриті продихи до поверхні клітин листка, тоді як кисень, що утворюється внаслідок фотосинтезу, переміщується у зворотному напрямку також за рахунок дифузії.

*Рушійна сила транспірації*. Концентрація молекул водяної пари, що визначається відношенням маси пари до її об'єму, називається *густиною пари*  $d$ . Вимірюється густина пари в  $г/м^3$ . У той же час, концентрація водяної пари може бути виражена як тиск, що утворюють молекули водяної пари. З урахуванням цього доцільно ввести такі поняття як *парціальний тиск водяної пари*  $e$  – це тиск, який матиме водяна пара, що знаходиться в газовій суміші, якщо б вона одна займала

об'єм, що дорівнює об'єму суміші при тій же температурі.

Густина пари  $d$  може бути виражена через парціальний тиск  $e$  водяної пари (Па або мм. рт. ст.):

$$d_{sl}(T_l) = eM/RT, \quad (19.1)$$

де  $M$  – молярна маса;  $R = 8,3143$  Дж/моль·К – газова стала;  $T$  – абсолютна температура.

Водяна пара дифундує у напрямку від області високого тиску до області низького тиску. В структурі листка внутрішні повітряні проміжки насичені або майже насичені водяною парою через те, що мезофільні клітини характеризуються великою площею, з якої відбувається випаровування води. В той же час, зовнішня атмосфера, що оточує листок, містить низьку концентрацію водяної пари і є ненасиченою. Таким чином, між внутрішнім та зовнішнім середовищами листка є градієнт концентрації або парціального тиску, який є рушійною силою транспірації.

Цей градієнт визначається за виразом:

$$J_m \approx C_l - C_n \approx e_l - e_n. \quad (19.2)$$

Тут  $(C_l - C_n)$  – градієнт концентрації;  $(e_l - e_n)$  – градієнт водяної пари між внутрішнім та зовнішнім середовищами листка (індекси „l” та „n” відповідають внутрішньому та зовнішньому середовищам листка).

Повітря та гази рухаються вздовж концентраційних градієнтів, від високих концентрацій до низьких. Завдяки цьому двоокис вуглецю проходить з повітря усередину листка, а водяна пара і кисень залишають листок. Речовина, яка рухається, відчуває опір завдяки силам внутрішнього тертя, що виникають під час взаємодії речовини з поверхнею або стінками внутрішніх просторів. Цей опір дифузійному потоку пропорційний відстані, вздовж якої відбувається потік, та обернено пропорційний коефіцієнту дифузії.

Якщо врахувати опори, які відчуває речовина з боку листка  $R_l$  та граничного шару повітря  $R_{ep}$ , то рівняння, що описує транспіраційний потік буде мати вигляд:

$$J_m \approx \frac{e_l - e_n}{R_l + R_{ep}}. \quad (19.4)$$

Швидкість транспірації, тобто швидкість, з якою водяна пара залишає листок, описується рівнянням:

$$E = \frac{d_{sl} - rd_{sn}}{R_l + R_{ep}} = \frac{d_{sl} - rd_{sep}}{R_l + k_2 \left( \frac{A^{0.3} B^{0.2}}{v^{0.5}} \right)}, \quad (19.5)$$

де  $E$  вимірюється у  $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $d_{sl}$  – густина насичення водяної пари у внутрішньому середовищі листка ( $\text{кг/м}^3$ );  $d_{sa}$  – густина насичення водяної пари у зовнішньому повітрі ( $\text{кг/м}^3$ );  $r$  – відносна вологість (відносні одиниці);  $A$  та  $B$  – розміри листка (у напрямку руху повітряного потоку та у перпендикулярному напрямку відповідно);  $v$  – швидкість вітру ( $\text{м/с}$ );  $k_2 = 200 \text{ с}^{1/2} \cdot \text{м}^{-1}$ .

Таким чином, перенесення маси у рослині відбувається завдяки зменшенню водного тиску (утворення негативного тиску) у верхній частині рослин через дифузію води, яка залишає листок через продиhi і потрапляє в атмосферне повітря. Цей безперевний рух води від кореневої системи до листя називається *транспіраційним потоком*.

Процес транспірації істотно залежить від сонячного випромінювання, температури, вологості повітря, двоокису вуглецю, постачання води та мінерального живлення, атмосферних забруднень та вітру.

#### Приклад

Визначити швидкість транспірації  $E$  (тобто швидкість, з якою водяна пара залишає листок) для листка розмірами  $A = B = 0,05 \text{ м}$ , якщо температура листка  $T_l = 27,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура повітря  $T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , швидкість вітру  $v = 0,1 \text{ м/с}$ , відносна вологість  $r = 0,8$ , внутрішній опір листка  $r_l = 500 \text{ с/м}$ , стала  $k_2 = 200 \text{ с}^{1/2} \cdot \text{м}^{-1}$ .

#### Розв'язання

Швидкість транспірації описується рівнянням (19.5). Густину насичення водяної пари у внутрішньому середовищі листка  $d_{sl}$  та у зовнішньому повітрі  $d_{sn}$  знайдемо із співвідношення між густиною  $d$  та пружністю водяної пари  $p$ , значення якої наведено в табл. 1, 2 (див. додаток) для даної температури  $T$ :

$$d = \frac{pM}{RT_l}, \quad (19.6)$$



де  $M$  – молекулярна маса ( для водяної пари  $M = 18,02$  г/моль);  $R = 8,3143$  Дж/моль·К – універсальна газова стала.

Отже, густина насичення водяної пари у внутрішньому середовищі листка  $d_{sl}$  для температури  $27,1$  °С дорівнює:

$$d_{sl} = \frac{pM}{RT_n} = \frac{3586 \cdot 18,02}{8,31 \cdot (273 + 27,1)} = \frac{64619,72}{2493,831} = 25,91 \text{ г/м}^3.$$

Пружність водяної пари при температурі  $27,1$  °С визначаємо з табл. 2 (додаток) як  $p = 3586$  Па.

Густина насичення водяної пари у зовнішньому повітрі  $d_{sn}$  для температури  $20$  °С дорівнює:

$$d_{sn} = \frac{pM}{RT_n} = \frac{2337 \cdot 18,02}{8,31 \cdot (273 + 20)} = \frac{42112,74}{2434,83} = 17,30 \text{ г/м}^3.$$

Пружність водяної пари при температурі  $20$  °С визначаємо з табл. 2 (додаток) як  $p = 2337$  Па.

Обчислимо величини:

$$A = 0,05^{0,3} = 0,4071; B^{0,2} = 0,05^{0,2} = 0,549; v = 0,1^{0,5} = 0,316.$$

Знаходимо опір граничного шару повітря:

$$R_{ep} = k_2 \left( \frac{A^{0,3} \cdot B^{0,2}}{v^{0,5}} \right) = 200 \text{ с}^{1/2} \text{ м}^{-1} \left( \frac{0,4071 \cdot 0,549}{0,316} \right) = 141,45 \text{ с/м}.$$

Підставляємо всі дані у рівняння ( 19.5 ) і знаходимо швидкість транспірації:

$$\begin{aligned} E &= \frac{d_{sl} - rd_{sn}}{R_n + R_{ep}} = \frac{d_{sl} - rd_{s2p}}{R_n + k_2 \left( \frac{A^{0,3} B^{0,2}}{v^{0,5}} \right)} = \frac{25,91 - 0,8 \cdot 17,3}{500 + 141,45} = \\ &= 0,0188 \text{ г/м}^2 \cdot \text{с} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{с}. \end{aligned}$$

### Контрольне завдання

Визначити швидкість транспірації  $E$  для листка розмірами  $A = B = 0,01$  м, якщо температура листка  $T_l = 10,8$  °С, температура повітря  $T_n = 10$  °С, швидкість вітру  $v = 2,0$  м/с, відносна вологість  $r = 0,6$ , внутрішній опір листка  $r_l = 1000$  с/м, стала  $k_2 = 200$  с<sup>1/2</sup>·м<sup>-1</sup>.

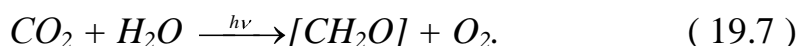
Відповідь:  $E = 0,5 \cdot 10^{-5}$  кг/ м<sup>2</sup>·с.

### 19.2. Газообмін

Рослини під дією сонячного світла синтезують органічні сполуки з неорганічної сировини. Цей процес називається *фотосинтезом*.

Важливий шлях хімічних реакцій під час фотосинтезу, який здійснюється у хлоропластах, – це перетворення двоокису вуглецю та води в вуглеводи та кисень.

Сумарну реакцію можна описати рівнянням:



Вуглеводи, що утворюються внаслідок цієї реакції, містять більше енергії, ніж вихідні речовини (тобто  $CO_2$  та  $H_2O$ ).

Таким чином, за рахунок енергії Сонця енергетично бідні речовини  $CO_2$  та  $H_2O$  перетворюються у високо енергетичні продукти – вуглеводи та кисень.

У процесі дихання (в мітохондріях) кисень, що поглинається з атмосфери, використовується для окислення вуглеводів з утворенням врешті-решт двоокису вуглецю та води та відповідним виділенням енергії. Ця енергія накопичується у вигляді високоенергетичної сполуки АТФ, яка використовується для здійснення рослинним організмом важливих життєвих функцій.

Рух таких газів як кисень, двоокис вуглецю та водяна пара між рослиною та атмосферою називається *газообміном*.

Рослини позбавлені будь-якого активного механізму, призначеного для транспортування газів. Вони використовують для цього лише дифузію. Ось чому рослинні клітини розташовані поблизу поверхні листка з тим, щоб скоротити відстань проходження газів. Гази надходять через продихи, після чого дифундують всередині листка. Процеси газообміну відзначаються наявністю компромісу між процесами транспірації водяної пари та надходженням двоокису вуглецю під час

фотосинтезу. Рослини повинні витратити воду, щоб отримати двоокис вуглецю. Але така ситуація призводить до висихання рослини. Концентрація кисню у продиховому просторі збільшується завдяки дії світла під час фотосинтезу, тоді як концентрація двоокису вуглецю зменшується. Для компенсації зменшення двоокису вуглецю необхідно відкривати продихи, Але це призводить до збільшення інтенсивності транспірації. Отже, рослина постійно шукає компроміс між кількістю двоокису вуглецю та втратами води через продихи через газообмін.

### 19.3. Вимірювання газообміну

*Застосування ізотопів.* Основні принципи застосування техніки ізотопів висвітлено у розділі 15 “Опади”. Зараз розглянемо застосування стабільних ізотопів для вимірювання асиміляції CO<sub>2</sub>.

Вуглець C як хімічний елемент має два стабільних ізотопи (<sup>12</sup>C, <sup>13</sup>C) та шість радіоізотопів (<sup>9</sup>C, <sup>10</sup>C, <sup>11</sup>C, <sup>14</sup>C, <sup>15</sup>C, <sup>16</sup>C). Ізотоп <sup>12</sup>C містить 6 протонів, 6 електронів та 6 нейтронів; ізотоп <sup>13</sup>C – 6 протонів та електронів, але 7 нейтронів; ізотоп <sup>14</sup>C також містить 6 протонів та електронів, але 8 нейтронів. Інші ізотопи вуглецю мають більше або менше нейтронів порівняно з кількістю протонів, що є причиною їх нестабільності.

Поширення стабільних ізотопів вуглецю становить 98,89 % для <sup>12</sup>C та 1,11 % для <sup>13</sup>C. У табл. 19.1 наведено значення міжнародного стандарту та абсолютного відношення ізотопів для вуглецю.

19.1. Міжнародний стандарт та абсолютне відношення ізотопів для вуглецю

Елемент	Величина $\delta$	Відношення, що вимірюється ( $R_{sample}$ )	Назва міжнародного стандарту	Величина стандарту ( $R_{standard}$ )
Вуглець	$\delta^{13}C$	$^{13}C/^{12}C$	Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)	0.0112372

*Фракціонування ізотопів вуглецю під час фотосинтезу.* Якщо відношення ізотопів  $^{13}C/^{12}C$  постійно в атмосфері, то під час процесу фотосинтезу відбувається швидка дифузія <sup>12</sup>C через продихи та стінки рослинних клітин. Якщо атмосферний вуглець характеризується відношенням  $\delta^{13}C \sim -7\text{‰}$ , то в рослинах відбувається збільшення відношення до  $\delta^{13}C \sim -24\text{--}34\text{‰}$  для звичайних рослин та до  $\delta^{13}C \sim -6\text{--}19\text{‰}$  – для рослин, що ростуть у пустелі.

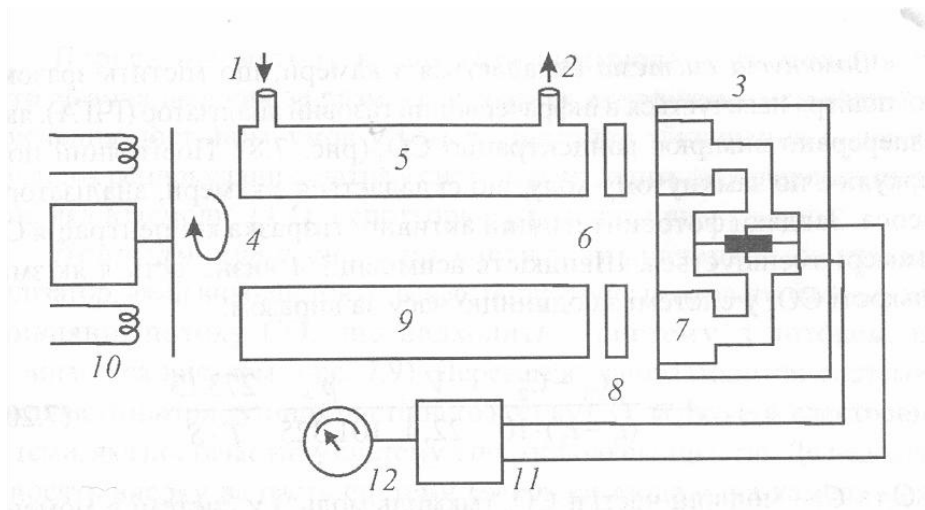
Рослини  $C_3$ - та  $C_4$ -типу мають  $\delta^{13}C$   $-27\text{‰}$  та  $-12\text{‰}$  відповідно. Крім того, принципові зміни вуглецю  $^{13}C$  пов'язані з фотосинтетичним процесом. Рослини  $C_3$ -типу характеризуються більш суттєвими змінами пропорцій ізотопу вуглецю відносно відношення ізотопів в атмосфері під час фіксації двоокису вуглецю, ніж рослини  $C_4$ -типу.

Отже, ця різниця може бути використана як критерій належності рослин тому чи іншому типу.

*Інфрачервоні газові аналізатори.* Принцип дії інфрачервоного газового аналізатора (ІЧГА) полягає в реалізації здатності асиметричних молекул (до яких належить  $CO_2$ ) поглинати інфрачервоне випромінювання на певних довжинах хвиль. Основні смуги поглинання  $CO_2$  знаходяться в області 4,25 мкм, 2,66 мкм, 2,77 мкм та 14,99 мкм.

Інфрачервоні газові аналізатори мають високу точність вимірювань, простоту та надійність в експлуатації. Сучасні ІЧГА характеризуються роздільною здатністю на рівні  $0,1\text{--}1,0\text{ мкмоль}\cdot\text{моль}^{-1}$  при визначенні  $CO_2$ -обміну поверхнею листка площею  $10\text{ см}^2$  (відомо, що рівень  $CO_2$  в атмосфері становить  $340\text{ мкмоль}\cdot\text{моль}^{-1}$ ).

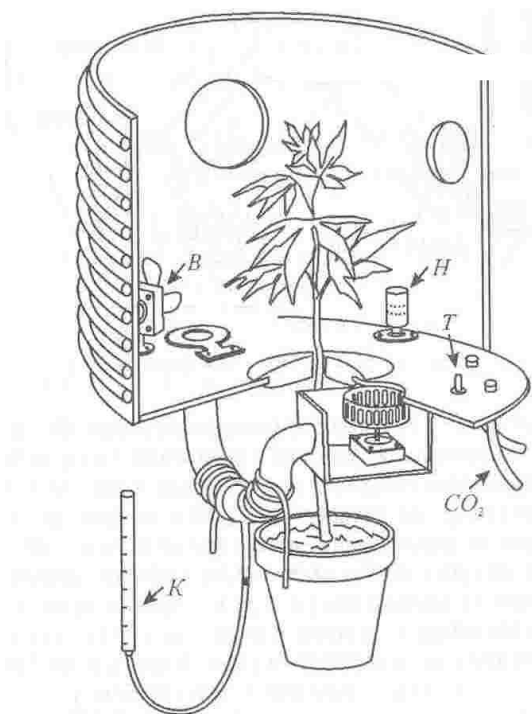
Конструкції сучасних ІЧГА складаються з джерела інфрачервоного випромінювання, газової кювети та детектора. Схему двопроменевого ІЧГА наведено на рис. 19.2. Випромінювання джерела ділиться на два потоки – основний та еталонний, які проходять паралельно через дві кювети. Якщо ці потоки дорівнюють один одному, то система перебуває у рівновазі. Із зміною концентрації газу в основній кюветі рівновага порушується, сигнал розбалансування посилюється та реєструється. Двопроменева система здатна виключити зміни інтенсивності джерела випромінювання за рахунок старіння або коливань напруги живлення.



**Рис.19.2. Двопроменева схема газового аналізатора:**

*1 – вхід газового потоку; 2 – вихід газового потоку; 3 – система реєстрації; 4 – модулятор; 5 – кювета з газом, що аналізується; 6 – діафрагма; 7 – камера поглинання; 8 – оптичні фільтри; 9 – опорна кювета; 10 – джерела інфрачервоного випромінювання; 11 – підсилювач; 12 – вимірювач*

*Одночасні вимірювання транспірації та асиміляції CO<sub>2</sub>.*  
 Конструкція камери для одночасної оцінки транспірації та асиміляції CO<sub>2</sub> складається з камери, в якій розміщена рослина (рис. 19.3).



**Рис. 19.3. Інфрачервоний газовий аналізатор для вимірювання концентрації CO<sub>2</sub> та оцінки швидкості транспірації:** *B – вентилятор; H – гігрометр; T – термометр; CO<sub>2</sub> – система постачання газу; K – бюретка для визначення кількості конденсованої вологи*

Камера обладнана системами контролю освітлення, температури, вологості та повітряного потоку. Концентрація CO<sub>2</sub> визначається за

допомогою інфрачервоного газового аналізатора, а швидкість транспірації оцінюють шляхом визначення кількості конденсованої вологи, яка збирається у бюретці.

#### 19.4. Забруднення навколишнього середовища транспортними засобами

Серед всіх основних джерел антропогенного хімічного забруднення транспортні засоби постачають вихід в атмосферу біля однієї третини летких органічних речовин (вуглеводнів), окисів азоту, свинцю і більш ніж дві третини окису вуглецю. Сучасне суспільство неможливо уявити без автомобільного транспорту; парк автомобілів зростає з кожним роком. Автомобіль змінив атмосферу міст за рахунок вихлопів газів, що містять токсичні речовини. Так, 75% свинцю, який знаходиться у високооктановому бензині у вигляді тетраетила свинцю, переходить в атмосферу; кожний автомобіль протягом року викидає в повітря 1кг цього металу. Крім того, двигун внутрішнього згорання постачає 350 г інших токсичних речовин на кожний літр використаного палива.

Серед них одне з основних місць посідає окис вуглецю; тільки в США автотранспорт викидає щорічно  $102 \cdot 10^6$  т цього газу. Заміна мастила в автомобілях, витік його з картерів, розпліскування бензина або дизельного топлива під час заправки автомобілів – все це призводить до забруднення водних джерел і водоносних шарів ґрунту. Слід відмітити, що проникність бензину в ґрунт в сім разів вища, ніж води; навіть такі мізерні концентрації бензину як  $1 \text{ млн}^{-1}$  спроможні зробити неприйнятною для пиття значну кількість ґрунтових вод. Розподіл забруднень, за які відповідає автомобільний двигун, наведено в табл. 19.2.

19.2. Розподіл забруднень ( $\text{мг/м}^3$ ), які викидає автомобільний двигун

Компонент	Двотактні двигуни		Чотиритактні двигуни	
	холостий хід	100%-не навантаження	холостий хід	100%-не навантаження
Двоокис вуглецю	1,7	2,2	1,2	2,1
Оксид вуглецю	1100	1100	700	1300
Акролеїн	24	31,2	2,9	0,86
Оксиди азоту	650	900	90	87
Двоокис сірки	1600	1700	1800	1800
Сажа	0,18	0,09	0,12	0,07
Паливна пара	3	25	3	25

Особливу небезпеку для здоров'я людини являють леткі органічні сполуки, які потрапляють у повітря з вихлопними газами, а також через бензин, мастила та інші продукти, що зберігаються у гаражах. Джерелами летких органічних сполук є крісла та компоненти внутрішнього інтер'єру автомобіля.

Рис. 19.4 зображує можливі шляхи виходу забруднювачів в атмосферу під час роботи двигуна. Експлуатація кислотних акумуляторних батарей викликає виділення водню, кисню, вуглекислого газу, а також аерозолів сірчаної кислоти.

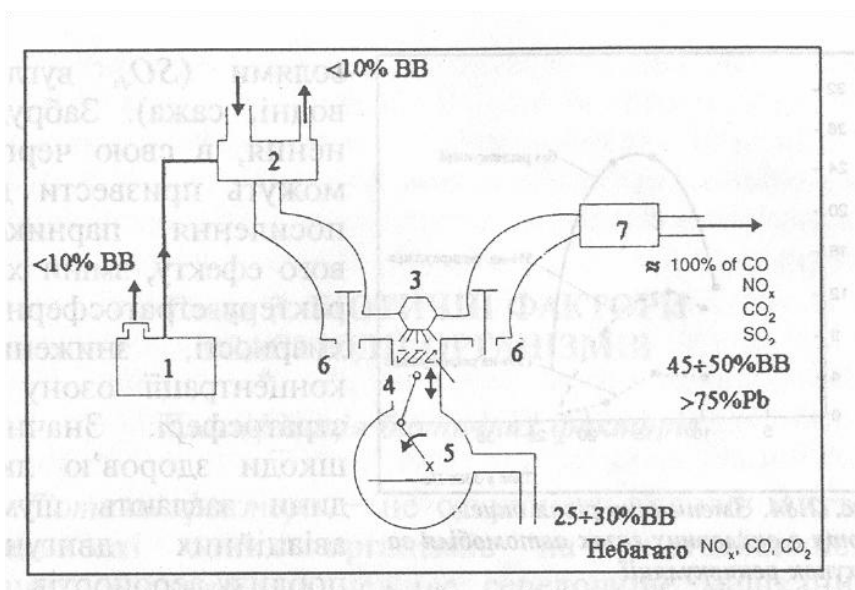
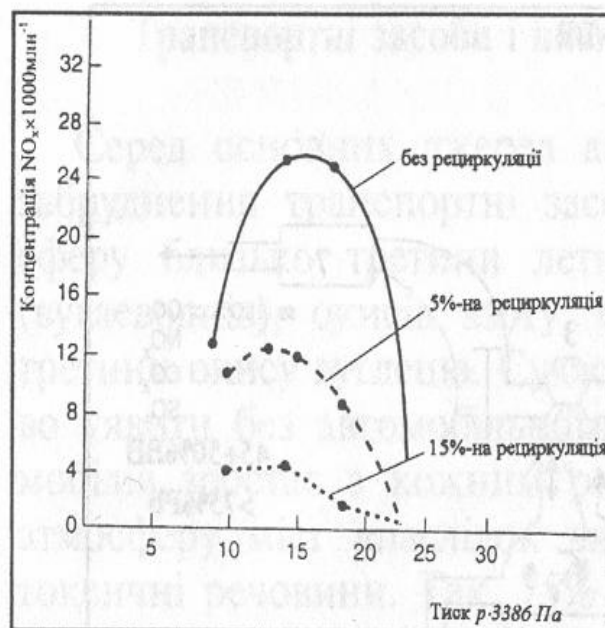


Рис. 19.4. Шляхи виходу забруднювачів в атмосферу під час роботи автомобільного двигуна: 1 – паливний бак; 2 – карбюратор; 3 – джерело іскри; 4 – циліндр; 5 – поршень; 6 – клапан; 7 – глушник; BB – вуглеводні

Запобігти забрудненню атмосфери вихлопними газами можна за рахунок вдосконалення камери згорання та її елементів, зменшення рівня шкідливих домішок в відпрацьованих газах, нейтралізації токсичних компонентів цих газів. Як приклад можна навести процес зменшення рівня оксидів азоту в автомобільному двигуні за рахунок зниження температури циліндрів, модифікації системи запалювання, упровадження рециркуляції вихлопних газів. На рис. 19.5 наведено демонстрація впливу процесу рециркуляції на вміст оксидів азоту в вихлопних газах автомобіля.



**Рис. 19.5. Зменшення рівня оксидів азоту в вихлопних газах автомобіля за рахунок рециркуляції**

Автомобіль є джерелом не тільки хімічного забруднення атмосфери, але й постачальником постійного монотонного шуму, різьких звуків, сигналів, скреготу під час гальмування.

Авіаційний транспорт також вносить певні зміни в навколишнє середовище. По-перше, польоти надзвукових транспортних літаків сприятимуть підвищенню вмісту вологості в стратосфері. Крім того, літаки забруднюють стратосферу газами ( $CO$ ,  $NO$ ,  $SO_2$ ) та аерозолями ( $SO_4$ , вуглеводні, сажа). Забруднення, в свою чергу, зможуть призвести до підсилення парникового ефекту, зміни характеру стратосферної хмарності, зниженню концентрації озону в стратосфері. Значну шкоду здоров'ю людини спричинює рівень шумів авіаційних двигунів в районі авіапортів.

### Наукова робота

Вимірити ширину некротичної кромки листя каштанів, що ростуть на різній відстані від автостради. Побудувати графік залежності середньої ширини кромки від відстані дерева до автостради (вимірювання робити не менш ніж три рази). Нанести на графік похибки вимірювань.



### 19.5. Випаровування з водної поверхні

Оцінювання кількості водяної пари, що випаровується з одиниці поверхні водойми за одиницю часу, можна здійснити за допомогою виразу:

$$E = \frac{0,000119(e_1 - e_2)(v_2 - v_1)}{p \left[ \ln \left( \frac{h_2}{h_1} \right) \right]^2}, \quad (19.8)$$

де  $E$  вимірюється в  $\text{м}^3/\text{м}^2\text{с} = \text{м}/\text{с}$ ;  $e_1$  та  $e_2$  – пружність водяної пари за даної температури на висоті  $h_2$  та  $h_1$  відповідно;  $p$  – середній атмосферний тиск в Па.

#### Приклад

Оцінити кількість водяної пари, що випаровується з одиниці поверхні водойми за одиницю часу, за такими умовами: температура повітря  $25^\circ\text{C}$ ; відносна вологість  $r = 98\%$ ; середній атмосферний тиск  $p = 101,3 \cdot 10^3$  Па; швидкість вітру на висоті  $h_2 = 2\text{м}$  становить  $3 \text{ м}/\text{с}$ ;  $e_1 = (e_s) = 3167$  Па.

#### Розв'язання

Пружність водяної пари  $e_1$  визначається так:

$$e_1 = r \cdot e_s = r \cdot e_1 = 0,98 \cdot 3167 = 3104 \text{ Па}.$$

Враховуючи, що  $v_1 = 0$  на рівні моря, використаємо рівняння (19.8):

$$\begin{aligned} E &= \frac{0,000119(e_1 - e_2)(v_2 - v_1)}{p \left[ \ln \left( \frac{h_2}{h_1} \right) \right]^2} = \\ &= \frac{0,000119(3167 - 3104)(3 - 0)}{101,3 \cdot 10^3 \left[ \ln \left( \frac{2}{0,03} \right) \right]^2} = \frac{0,0225}{1786681} = 1,2588 \cdot 10^{-8} \text{ м}/\text{с} = \\ &= 1,2588 \cdot 10^{-8} \text{ м}/\text{с} \cdot 1000 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ мм}/\text{добу} = 1,2 \text{ мм}/\text{добу}. \end{aligned}$$

### 19.6. Дисперсійне перенесення маси

В динаміці потоків процес поширення маси речовини від області високої концентрації до області меншої концентрації називається *дисперсійним перенесенням маси*. Прикладом цього процесу є поширення клубу дима, що виходить з труби (рис. 19.6).

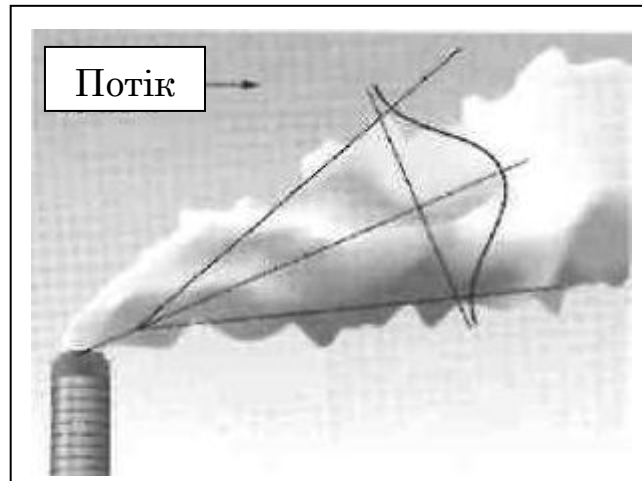


Рис. 19.6. Дисперсія диму, що виходить з труби

Дисперсійний потік маси  $J_{S,x}$  (так саме як дифузійний потік) описується рівнянням Фіка:

$$J_{S,x} = -E_x \frac{dc}{dx}, \quad (19.9)$$

де  $E_x$  – коефіцієнт дисперсії;  $\frac{dc}{dx}$  – концентраційний градієнт. Одиниця вимірювання коефіцієнта дисперсії –  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Дисперсія відрізняється від дифузії тим, що вона викликається турбулентним потоком, тоді як дифузія – випадковим молекулярним рухом (наприклад, Броунівським рухом). Дисперсія є більш суттєвим процесом порівняно з дифузією.

### 19.7. Моделювання поширення забруднень в атмосфері

Розглянемо клуб забруднювача, який поширюється під впливом вітру у просторі в площині  $x, z$  (рис. 19.7).

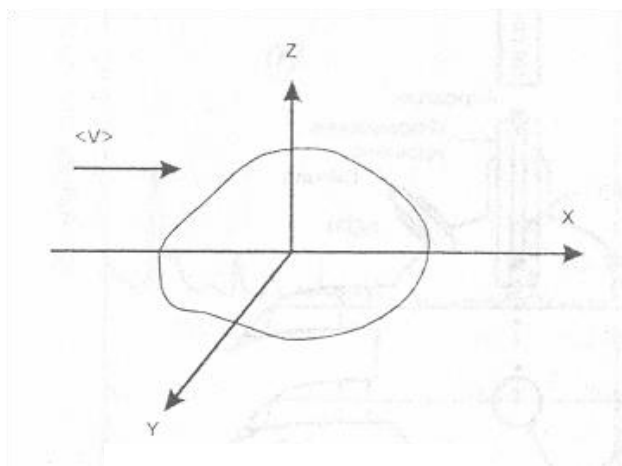


Рис. 19.7. Поширення клубу забруднювача під впливом вітру

Концентрація забруднювача  $C(x, y, z)$  змінюється згідно з нормальним (Гаусовим) розподілом і залежить від середньої швидкості вітру  $\langle V \rangle$  та швидкості викиду забруднювача  $Q$ :

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\langle V \rangle} G_y G_z, \quad (19.10)$$

де

$$G_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right], \quad (19.11)$$

$$G_z = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right]. \quad (19.12)$$

Тут  $\sigma_y$  і  $\sigma_z$  - стандартні відхилення дисперсії у напрямках  $y$  та  $z$ ;  $Q$  вимірюється в кг/с.

Звідси

$$\begin{aligned} C(x, y, z) &= \frac{Q}{\langle V \rangle} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \right\} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} = \\ &= \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right]. \end{aligned} \quad (19.13)$$

Якщо центр клубу забруднювача знаходиться на висоті  $H$  від земної поверхні, то концентрація забруднювача в будь-якій точці на висоті  $z$  визначається за виразом:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]. \quad (19.14)$$

Схему поширення забруднювача наведено на рис.19.8.

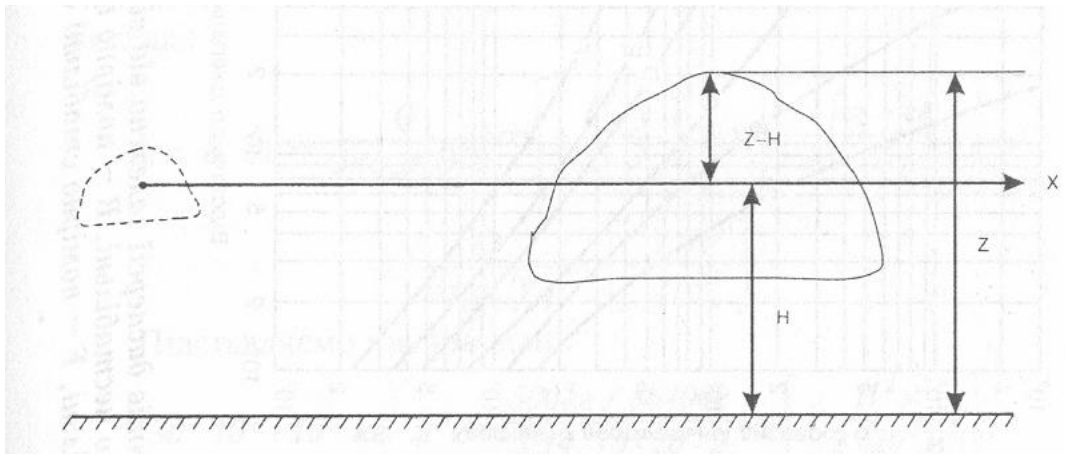


Рис. 19.8. Схема поширення клубу забруднювача

Величини коефіцієнтів дисперсії  $\sigma_y$  і  $\sigma_z$  в залежності від відстані до джерела забруднення та атмосферних умов наведено в номограмах (рис.19.9); категорії атмосферної стабільності оцінюють за табл.19.3.

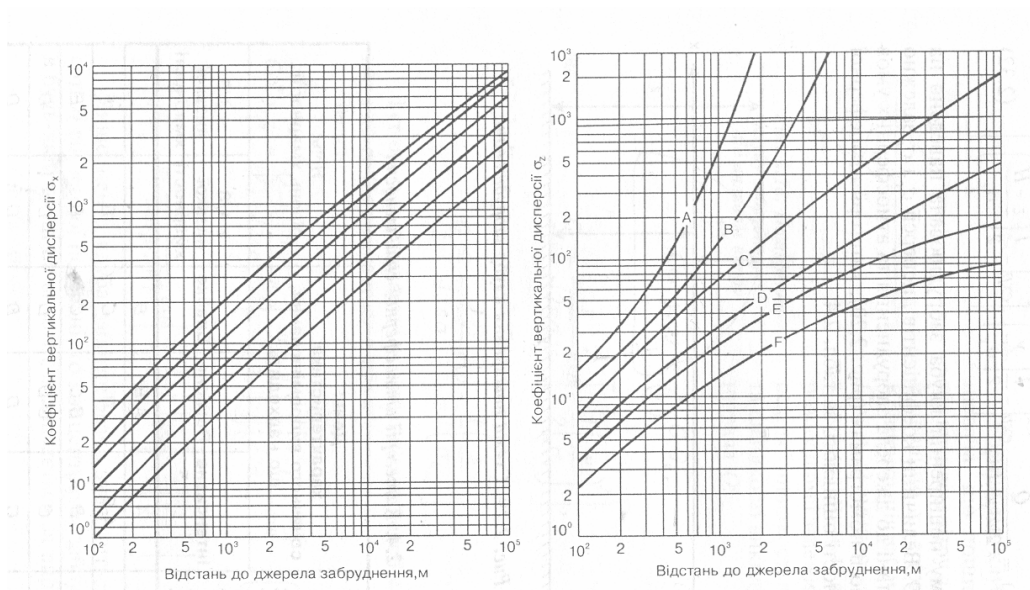


Рис. 19.8. Номограми для визначення коефіцієнтів дисперсії залежно від відстані до джерела забруднення та атмосферних умов: *A* – надзвичайно нестабільні; *B* – помірно нестабільні; *C* – трохи нестабільні; *D* – нейтральні; *E* – трохи стабільні; *F* – помірно стабільні атмосферні умови

### 19.3. Категорії атмосферної стабільності

Швидкість приповерхневого ( 10 м ) вітру, м/с	День: характеристика сонячного випромінювання, що надходить			Ніч: рівень хмарності	
	Інтенсивне	Помірне	Слабке	$\geq 4/8$ низької хмарності	$\leq 3/8$ ни- зької хмарності
$< 2$	<i>A</i>	<i>A-B</i>	<i>B</i>		
<i>2-3</i>	<i>A-B</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>3-5</i>	<i>B</i>	<i>B-C</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>5-6</i>	<i>C</i>	<i>C-D</i>	<i>D</i>	<i>D</i>	<i>D</i>
$> 6$	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>D</i>	<i>D</i>	<i>D</i>

#### Приклад

Хмара газу  $H_2S$  рухається зі швидкістю  $\langle V \rangle = 2$  м/с. Потужність джерела забруднення становить 500 кг/день. Визначити висоту хмари на відстані  $x = 2000$  м від джерела, при якій концентрація газу не перевищує  $30$  мкг/м<sup>3</sup>. Атмосферна стабільність відповідає категорії *F*.

#### Розв'язання

Припускаючи, що максимальну концентрацію газ має на рівні земної поверхні ( $z = 0$ ) і те, що хмара поширюється у напрямку  $x$  ( тобто  $y = 0$  ), рівняння ( 19.13 ) можна записати так:

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{H^2}{\sigma_z^2}\right].$$

Підставляємо числові дані:

$$30 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3 = \frac{500 \text{ кг} / 86400 \text{ с}}{3,14 \cdot 70 \cdot 20 \cdot 2} \exp\left[-\frac{H^2 \text{ м}^2}{2 \cdot 20^2 \text{ м}^2}\right].$$

Звідси

$$\exp\left[-\frac{H^2}{800}\right] = 0,046.$$

$$H = 49,63 \text{ м}.$$

### 19.6. Перенесення повітря та пари під час ремедіації

*Екстрагування пари з ґрунту.* Цей метод передбачає підвищення швидкості віддалення забруднювачів за рахунок інжекції повітря або пари у забруднений ґрунт з метою перенесення маси летких та напів-легких забруднювачів за допомогою відкачування (рис. 19.9).

*Розпилення повітря.* Якщо забруднення знаходиться у ґрунтових водах, то забруднювачі переносяться завдяки повітряним пухирцям, які завжди прагнуть рухатися догори, де їх уловлюють. Забруднена ґрунтова вода відкачується біореактором або іншим засобом, де вона очищується фільтрацією, активованим вуглецем або окисленням. У воду додають поживні речовини або кисень для прискорення біодеградації забруднювачів, але якщо їх концентрація незначна.

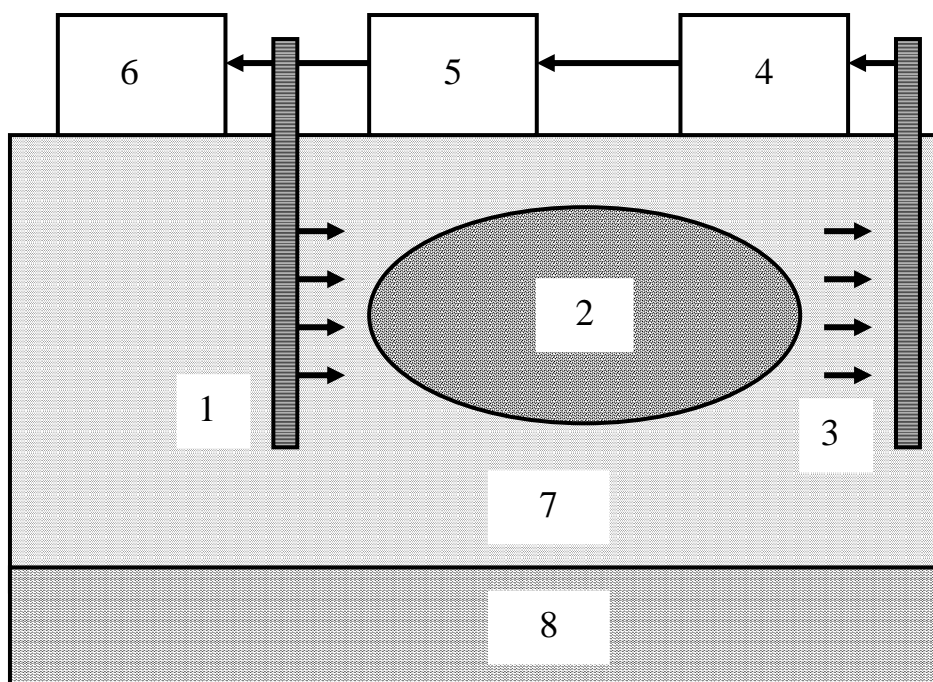


Рис. 19.9. Екстрагування пари з ґрунту: 1 – нагріте повітря або пара; 2 – забруднена зона; 3 – колодязь відкачування; 4 – сепаратор; 5 – насос; 6 – активований вуглець; 7 – ґрунт; 8 – ґрунтові води

### **Репродуктивний тест**

1. Що є рушійною силою транспірації?

### **Конструктивні тести**

1. Від чого залежить транспірація?
2. Які зрвнішні умови впливають на транспірацію?
3. Від чого залежить опір дифузійному потоку?
4. Знайти в літературі основні методи вимірювання транспірації.
5. В чому полягає різниця між дисперсією та дифузією?

### **Репродуктивні тести**

1. Надати інформацію щодо зростання автомобільного транспорту у світі та в Україні.
2. Автомобіль як джерело забруднення навколишнього середовища.
3. Основні забруднювачі, що висилаються автомобільним транспортом, та їх вплив на здоров'я людини.
4. Шляхи забруднення навколишнього середовища автомобільним транспортом.
5. Методи спостереження за забрудненням навколишнього середовища автомобільним транспортом.
6. Засоби запобігання забруднення навколишнього середовища автомобільним транспортом.

### **Конструктивні тести**

1. Які двигуни можна вважати альтернативними двигуну внутрішнього згоряння?
2. Які типи палива є менш небезпечними для навколишнього середовища?
3. Як би Ви модифікували автомобільний двигун, щоб зменшити рівень викидних газів?

## 20. ЧАСТИНКИ У НАВКОЛИШНЬОМУ СЕРЕДОВИЩІ



### 20.1. Фізика частинок

*Число Рейнольдса.* 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:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\eta}, \quad (20.1)$$

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  $Re < 1$ .

*Седиментація частинок.* Розглянемо випадки, які залежать від співвідношення між радіусом частинки  $r$ , довжиною вільного пробігу  $\lambda$  молекул газу та числом Рейнольдса  $Re$ .

1.  $r > \lambda$ , 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 ( $F_0 = m_0g = V\rho_0g$ ) сила, а також сила внутрішнього тертя (в'язкості), що визначається за *законом Стокса* ( $F_\eta = 6\pi\eta r\nu$ ), де  $\eta$  – коефіцієнт внутрішнього тертя (динамічна в'язкість).

Швидкість седиментації визначиться так:

$$\begin{aligned} v_{сед} &= Vg(\rho - \rho_0)/6\pi\eta r = \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \rho_0)/6\pi\eta r = \\ &= \frac{2}{9} g(\rho - \rho_0) r^2/\eta. \end{aligned} \quad (20.2)$$



2.  $r > \lambda$ , але  $Re = 2rv/v > 1$ . У даній ситуації домінує опір форми. Якщо розмістити певне тіло у повітряному потоці, то перенесення імпульсу відбудеться не лише завдяки силам тертя, що направлені паралельно поверхні шарів, та градієнту швидкості, що виникає при цьому, але через те, що у напрямку потоку виникає сила, яка називається *опором форми*. Ця сила, що обумовлена різними значеннями тиску з передньої та задньої сторони тіла при обтіканні 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

$$F_{on} = 0,5 c_m \rho_0 v^2 \cdot S, \quad (20.3)$$

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:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho - \rho_0) = 0,5 c_{on} \rho_0 v^2 \cdot \pi r^2. \quad (20.4)$$

Для біоаерозолів  $\rho > \rho_0$ , тому останнє рівняння можна переписати так:

$$v^2 = 8rg\rho/3\rho_0 c_{on}. \quad (20.5)$$

Звідки швидкість седиментації частинки становить:

$$v_{sed} = 2g\rho r^2/9\rho_0 v. \quad (20.6)$$

### 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 (20.3):

$$F_{on} = 0,5 c_{on} \rho v^2 \cdot S = 0,5 \cdot 4 \cdot 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot (10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})^2 \cdot \pi \cdot (20 \cdot 10^{-6} \text{ м})^2 / 4 = 0,75 \cdot 10^{-7} \text{ Н}.$$

## 20.2. Аерозолі та біоаерозолі

*Частинки* – це окремі порції твердої, рідкої або газоподібної речовини, розміри яких перевищують 1 нм. Особливе місце серед час-

тинок 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.

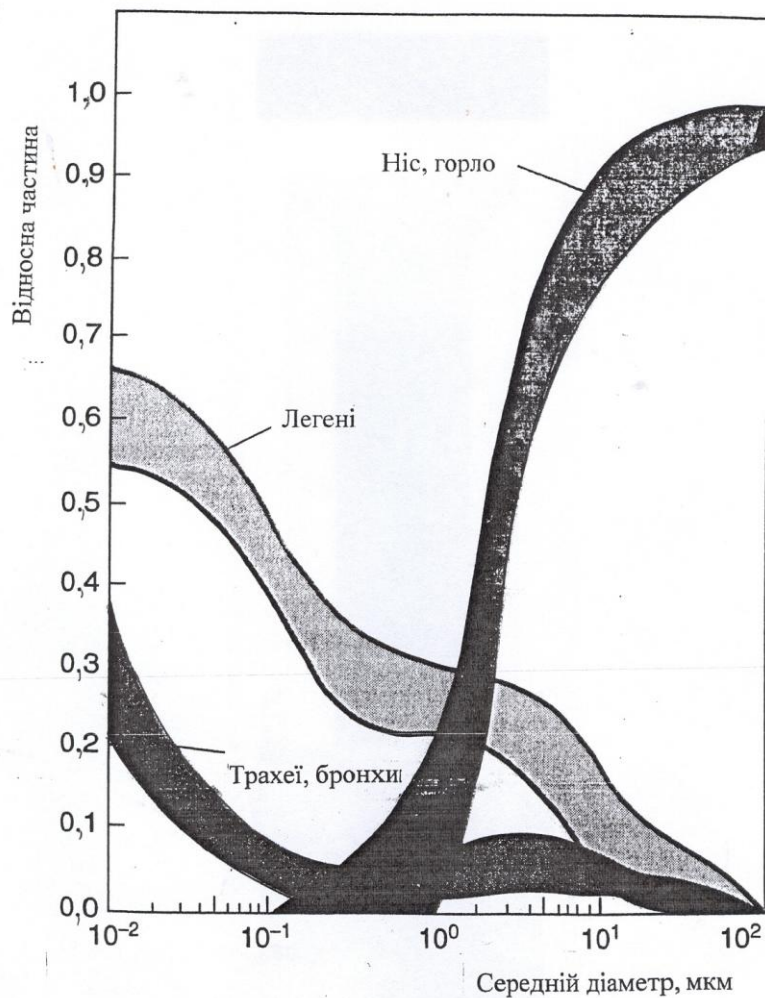
Типовими представниками біоаерозолів є бактерії *Bacillus* sp., *Legionella pneumophila*, *Micropolyspora faeni*, *Mycobacterium tuberculosis*, *Pseudomonas* spp., *Staphylococcus* spp., *Streptococcus* spp.; гриби (в першу чергу, плісень та дріжджі) *Histoplasma capsulatum*, *Alternaria* spp., *Penicillium* 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*, *Periplaneta 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*. 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. 20.1, на якому представлена залежність долі атмосферних частинок різних розмірів, що осідають у респіраторному тракті людини.



**Рис.20.1. 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. 20.2.

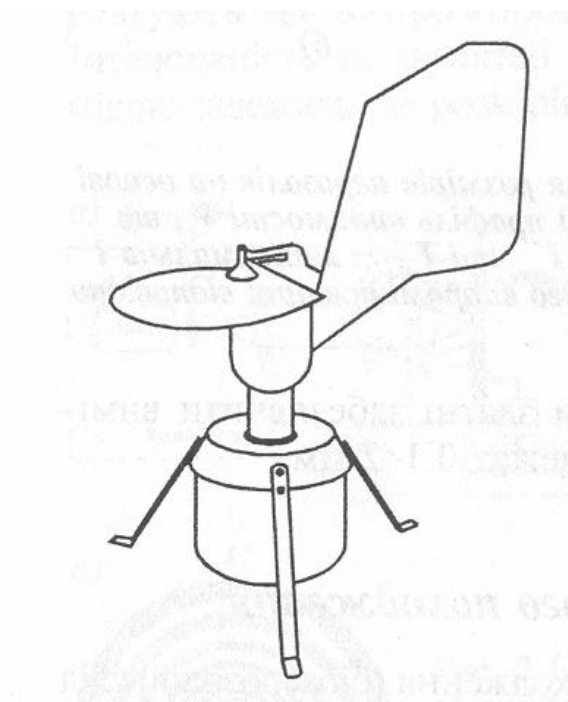


Рис. 20.2. Зовнішній вигляд приладу для збору біоаерозолів

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 установлюється на високому місці (наприклад, на даху будинку). Раз за добу стрічку знімають та аналізують на предмет кількісного та якісного вмісту біоаерозолів.

*Реєстрація лазерного розсіювання* на аерозолях дає можливість оцінити розміри та розподіл за розмірами аерозолів.

Процес розсіювання лазерного випромінювання залежить від розмірів аерозолів, відносного показника заломлення і довжини хвилі випромінювання. Аерозолям, розміри яких перевищують довжину хвилі лазерного випромінювання, притаманно розсіювання  $M_i$ , яке

супроводжується виникненням інтерференції світла та суттєвої зміни діаграми кутового розподілу розсіяного світла. Принцип реєстрації лазерного розсіювання на аерозолях полягає у пропусканні лазерного променя через потік аерозолів з подальшою реєстрацією інтенсивності розсіяного світла, яка залежить від розміру аерозолів, за допомогою фотоелектронного помножувача (рис. 20.3).

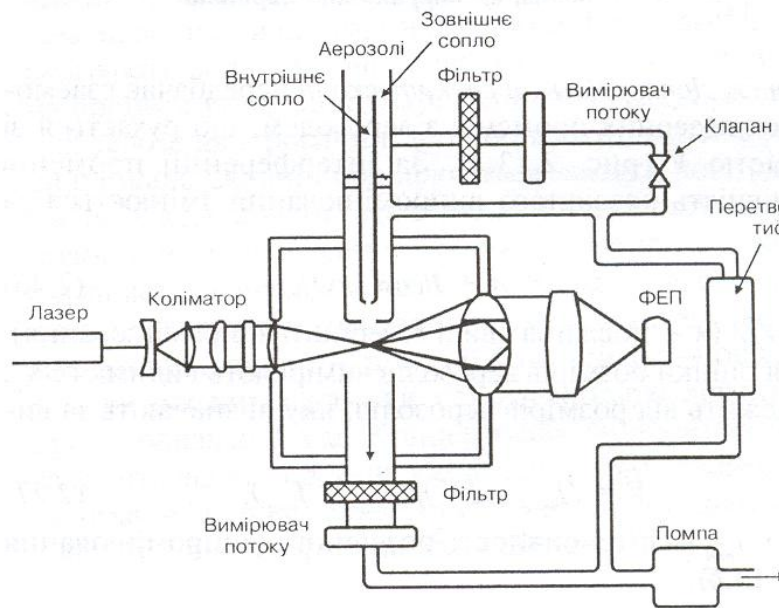


Рис. 20.3. Реєстрація лазерного розсіювання на аерозолях

*Метод лазерної дифрактометрії* полягає в аналізі дифракційної картини, яку отримують внаслідок пропускання лазерного променя через аерозолі. Реєстрацію дифрагованого на аерозолях випромінювання здійснюють за допомогою системи фотодіодів, розташованих концентрично. Інтенсивність та характер дифракційної картини суттєво залежить від розмірів аерозолів.

*Методи мікроскопії* передбачають візуальне спостереження біоаерозолів за допомогою світлової мікроскопії, скануючої та аналітичної електронної мікроскопії, флуоресцентної світлової та скануючої мікроскопії. Перевагою методів є висока роздільна здатність, недоліком – довготривалість та трудомісткість процесу вимірювань.

*Методи флуоресцентної спектроскопії* використовують збудження та реєстрацію первинної (за рахунок природних флуорофорів) або вторинну (за рахунок внесених флуорофорів) флуоресценцію біоаерозолів. Деякі мікроорганізми здатні демонструвати хемілюмінес-

ценцію або біолюмінесценцію. Перевагою методу є висока чутливість, недоліком – не всі біоаерозолі мають флуорофори (речовини, здатні флуоресціювати).

### **20.3. Наночастинки та ремедіація навколишнього середовища**

Протягом останніх років у науковій та популярній літературі, а також в Інтернеті можна знайти відомості щодо *нанотехнології* – міждисциплінарної галузі фундаментальної та прикладної науки і техніки, яка має справу з сукупністю теоретичного обґрунтування, практичних методів дослідження, аналізу та синтезу, а також методів виробництва та застосування продуктів із заданою атомною структурою шляхом маніпулювання окремими атомами та молекулами. Префікс “нано” походить від грецького слова *нанос* (карлик), що означає  $10^{-9}$  чого-небудь.

Річарду Фейнману, американському фізику-теоретику, належить перше згадування щодо методів, які пізніше назвуть нанотехнологією (1959). Він припустив, що можливо окремо, механічно переміщувати атоми за допомогою маніпулятора відповідних розмірів.

Японський вчений Норіо Танігуті вперше використав у 1974 році термін “нанотехнологія”, яким назвав виробництво виробів розмірами порядку нанометрів.

Об’єктами нанотехнології є *наночастинки* – дрібні тіла, що поводять себе як окремі одиниці з точки зору їх властивостей і транспортування, та розміри яких становлять 1 – 100 нм, а також *наноматеріали*, розроблені на основі наночастинок з унікальними характеристиками, обумовлених мікроскопічними розмірами їх складових.

*Ремедіація навколишнього середовища* – це процес виведення забруднювачів з навколишнього середовища, зокрема з ґрунту, підземних та поверхневих вод, та атмосфери з метою захисту здоров’я людини та довкілля.

Особливою рисою наночастинок є суттєво більше порівняно з макрочастинками відношення площі частинок  $S$  до їх об’єму  $V$ . Так, якщо для частинок  $S/V$  становить близько  $10^3$ , то для наночастинок  $S/V$  досягає порядку  $10^9$ . Це характеризує високу реактивну здатність наночастинок та їх більш високий контакт з забруднювачами.

Типовими представниками наночастинок, що застосовуються у ремедіаційних технологіях, варто відзначити наночастинки заліза нульової валентності (у тому числі емульсифіковані частинки), їх комбінації з благородними металами Pd, Ag, Cu, Co, Ni.

Елементарне залізо діє як електронний донор, тоді як забруднювачі виконують функції акцепторів електронів. Процес відновлення забруднювачів супроводжується їх перетворенням у менш токсичну і навіть у безпечну форми. Застосування наночастинок дає можливість очистити ґрунт, ґрунтові води та седименти від важких металів (ртуть, свинець, кадмій) та органічних сполук (бензол, хлоровані розчинники, креозот, толуол)

Так, наприклад, застосування 1,7 кг наночастинок заліза нульової валентності до зони забруднення ґрунтових вод трихлоретиленом об'ємом 14 м<sup>3</sup> дало можливість зменшити концентрацію забруднювача на 96 % протягом 4 тижнів. Технологію закачування наночастинок заліза разом з водою у ґрунтові води наведено на рис. 20.4.

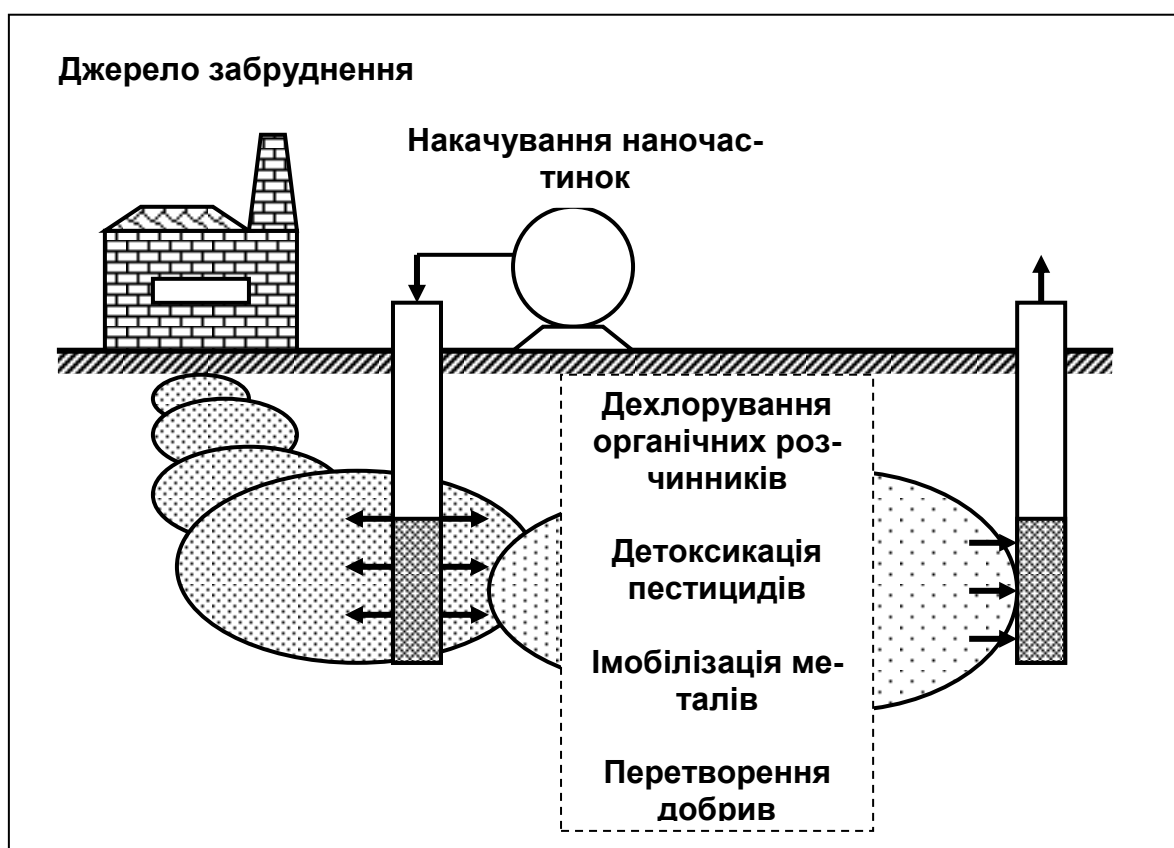


Рис.20.4. Застосування наночастинок під час ремедіації ґрунту

золото (бактерії *Bacillus subtilis* 168 та *Shewanella algae*, гриби *Verticillium* та *Fusarium*, актиноміцети *Rhodococcus*), срібло (бактерії *Pseudomonas stutzeri* AG259), магнітних наночастинок Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (магнетобактерії *Magnetospirillum magnetotacticum*), кристалів CdS (дріжджі *Schizosaccharomyces pombe*).

Наноматеріали знаходять все більше застосування як ефективні фільтри для очищення питної води.

Втім, наночастинки слід розглядати також як забруднювачі навколишнього середовища, які через свої малі розміри характеризуються високою проникністю у людський організм

#### 20.4. Смог

Одним із поширених видів забруднень атмосфери є *фотохімічний смог* – специфічний туман вологістю близько 70 %, який являє собою багатокомпонентну суміш газів та аерозолів. До складу смогу входять озон, оксиди азоту та сірки, органічні сполуки. Всі вони називаються *фотооксидантами*, оскільки беруть участь у фотохімічних реакціях розкладання забруднювачів сонячним випромінюванням. Смогу сприяє висока концентрація забруднювачів, інтенсивність сонячного випромінювання та слабкий повітряний обмін. Один із основних компонентів смогу – двоокис азоту – присутній в автомобільних вихлопах. Яскравим прикладом можливої ситуації, яка призводить до смогу, є розташування Лос-Анджелеса – міста, яке оточено горами, що заважають циркуляції повітря; інтенсивне використання автотранспорту створює ідеальні умови для виникнення смогу (приблизно 270 днів на рік).

*Вплив смогу на здоров'я людини та довкілля.* Смог впливає на здоров'я людини, оскільки є небезпечним для дихальної та кровоносної систем, викликає ядуху, подразнення слизових тканин. В 1952 р. смог, який тривав 4 дні, став причиною смерті 4000 мешканців Лондона. Максимальна концентрація  $SO_2$  тоді становила  $1,34 \text{ млн}^{-1}$  ( $3510 \text{ мкг/м}^3$ ), що на порядок перевищує норми, передбачені стандартами якості повітря. Смог негативно впливає на рослини та пошкоджує сільськогосподарські угіддя.

#### 20.5. Тютюновий дим

Звичку курити вперше запозичила в американських індіанців команда Христофора Колумба після відкриття ними Нового Світу у 1492 році. Місцеві аборигени вдихали дим спалених листків рослини *Nicotiana tabacum*. Після цього звичка курити почала тріумфально просуватися у країнах Європи та Азії.

Тютюн містить близько 4700 хімічних сполук, серед яких нікотин, дьоготь, поліциклічні ароматичні вуглеводи, вінілхлориди, феноли, кадмій.

*Вплив тютюнового диму на здоров'я людини.* Нікотин становить 0,6–3,0 % сухої ваги тютюну. Особливістю цього компонента є його



здатність за 15 с проникати у мозок курця та залишатися там у досить високій концентрації до двох годин. За низьких концентрацій нікотин характеризується стимулюючим ефектом та викликає стан ейфорії. Крім того, нікотин викликає швидке звикання до куріння; цю згубну звичку важко подолати. Механізми звички до тютюну принципово такі ж самі, як й механізми звички до наркотиків, таких як героїн та кокаїн.

Дьоготь є одним з руйнівних компонентів тютюнового диму, який осідає в легенях з часом та викликає їх руйнування завдяки різноманітним біохімічним та механічним процесам. Дьоготь містить більшість мутагенних та канцерогенних сполук тютюнового диму.

Під час куріння температура в центрі горіння становить 400–700 °С. Нікотин, який має температуру кипіння 246 °С, легко випаровується та змішується з киснем повітря. Продукти сублімації разом з повітрям надходять у легені. Викурювання однієї сигарети супроводжується 12–18 затягуваннями, в наслідок чого в легенях накопичується близько десятків або сот тисяч мільярдів частинок диму.

Компоненти тютюнового диму накопичуються в легенях з часом та руйнують їх через різні біохімічні та механічні процеси. Систематичне куріння призводить до нудоти, втрати апетиту, роздратування очей, носу та горла, захворювань респіраторного тракту, порушень серцевої діяльності, зміни кров'яного тиску, різноманітних форм рака, астми та алергії, імпотенції. Крім того, можливі мутагенні наслідки.

В Україні близько 41 % дорослого населення курять; 100000 українців помирає щорічно від захворювань, викликаних курінням.

Пропорції серед українських курців зростають від 54,8 % у 2001 р. до 66,8 % у 2005 р. Загальна кількість курців досягає майже 10 мільйонів осіб. Не випадково цю ситуацію оцінюють як тютюнову епідемію.

Саме жахливе, що кількість курців серед представників молоді та жінок України зростає. Дані опитування, яке проводить Держкомстат, свідчать про те, що рівень тютюнокуріння серед осіб 12 років і старше виріс з 22,9% в 2002 році до 25,4% в 2006 році; ризик почати курити серед молоді залежить від віку індивідуума, реклами тютюнових виробів, впливу пасивного куріння та впливу оточення. Серед українських жінок охоплення курінням збільшується від 11,5 % у 2001 р. до 20,0 % у 2005 р. Жінки з освітою, особливо молоді та ті, що мешкають у великих містах, є найбільш активними споживачками тютюну

## Практичні завдання

### 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  $20^{\circ}\text{C}$ .

### Розв'язання

Використовуючи дані табл. 3 та 4 (додаток), підставляємо числові дані у рівняння ( 20.1 ):

$$Re = (1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с})(998,2 \text{ кг/м}^3)(6 \cdot 10^{-5} \text{ м})/(1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}) = 7,17 \cdot 10^{-3}.$$

### Приклад

Визначити швидкість седиментації частинки мулу густиною  $2650 \text{ кг/м}^3$  та діаметром  $0,03 \text{ мм}$ , яка осідає у воді при  $20^{\circ}\text{C}$ . В'язкість води становить при цій температурі становить  $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

### Розв'язання

Підставляємо числові дані у рівняння ( 20.2 ):

$$v_{\text{сед}} = \frac{2}{9} g(\rho - \rho_0) r^2 / \eta =$$
$$= \frac{2}{9} (9,8 \text{ м/с}^2)(2650 - 998,2)(15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2)^2 / (1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}) = 8,1 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$$

### Контрольні завдання

1. Визначити швидкість седиментації частинки глини густиною  $2650 \text{ кг/м}^3$  та діаметром  $2 \text{ мкм}$ , яка осідає у воді при  $20^{\circ}\text{C}$ . В'язкість води становить при цій температурі становить  $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

*Відповідь:*  $3,6 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ .

2. Визначити час падіння пилинки у кімнаті заввишки  $3 \text{ м}$ , якщо в'язкість повітря становить  $175 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , діаметр пилинки  $5 \text{ мкм}$ , а густина пилинки  $2500 \text{ кг/м}^3$ .

*Відповідь:*  $t = 1,7 \text{ год} = 25,7 \text{ хв} = 1542 \text{ с}$ .

3. Визначити швидкість седиментації сферичної частинки густиною  $2650 \text{ кг/м}^3$  та діаметром  $0,001 \text{ мм}$ , яка осідає у воді при  $20^{\circ}\text{C}$ . В'язкість води становить при цій температурі становить  $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Чи встигне частинка досягнути дна танка за  $2 \text{ години}$ , якщо глибина танка  $3,5 \text{ м}$ ?

*Відповідь:*  $v = 9,0 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$ ;  $t = 1083 \text{ год}$ .

## Репродуктивні тести

1. Знайдіть у бібліотеці або через систему Інтернет відомості про механізми виникнення смогу. З яких основних компонентів складається смог?

2. Чим відрізняється дим від аерозолі?

3. Чим відрізняються суспензія, колоїд та розчин?

### **Акордно-вибірковий тест**

Знайти вірні відповіді на запитання

*“ Які частинки можна віднести до біоаерозолів? ”*

*1. віруси; 2.туман; 3. пісок; 4. бактерії; 5. тютюновий дим; 6. частинки комах; 7.пилوک; 8. спори.*

### **Конструктивні тести**

1. Назвати рослини України, пилок яких викликає алергію або астму.
2. Знайти у літературі або в Інтернеті особливі властивості наночастинок, зумовлених їх малими розмірами.

## 21. ПЕРЕНЕСЕННЯ ІМПУЛЬСУ



### 21.1. Перенесення імпульсу (в'язкість)

Якщо шари газу чи рідини переміщуються паралельно один одному з різними за модулями швидкостями, між ними виникають сили тертя, внаслідок чого відбувається перенесення імпульсу сили. Цей процес описується законом Ньютона:

$$J_p = \frac{dp}{Sdt} = -\eta \frac{dv}{dx}. \quad (21.1)$$

або у формі лінійного закону термодинаміки необоротних процесів:

$$J_p = L_p \cdot F_p, \quad (21.2)$$

де  $J_p = \frac{dp}{Sdt}$  – густина потоку імпульсу;  $L_p = -\eta$ ;  $F_p = \frac{dv}{dx}$ ;  $p$  – імпульс;  $\eta$  – коефіцієнт внутрішнього тертя (в'язкість);  $S$  – площа, через яку переноситься імпульс;  $\frac{dv}{dx}$  – градієнт швидкості.

Одиниці вимірювання густини потоку імпульсу –  $H/m^2$ ; коефіцієнта внутрішнього тертя –  $H \cdot c/m^2$ ; градієнта швидкості –  $1/c$ .

Типові значення в'язкості деяких речовин наведені у табл.21.1.

#### 21.1. Коефіцієнт в'язкості повітря та води

Речовина	Коефіцієнт в'язкості, Па·с	Температура, °C
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

Розглянемо рух повітряного потоку вздовж гладкої поверхні. Якщо режим потоку *ламіна́рний* (шари повітря, що рухаються, не перемішуються), відбувається перенесення імпульсу між індивідуальними молекулами. Дійсно, коли повітряний потік рухається над твердою поверхнею, його швидкість збільшується при віддаленні  $z$  від поверхні, тобто виникає градієнт швидкості  $\frac{\partial v}{\partial z}$  (рис. 21.1).

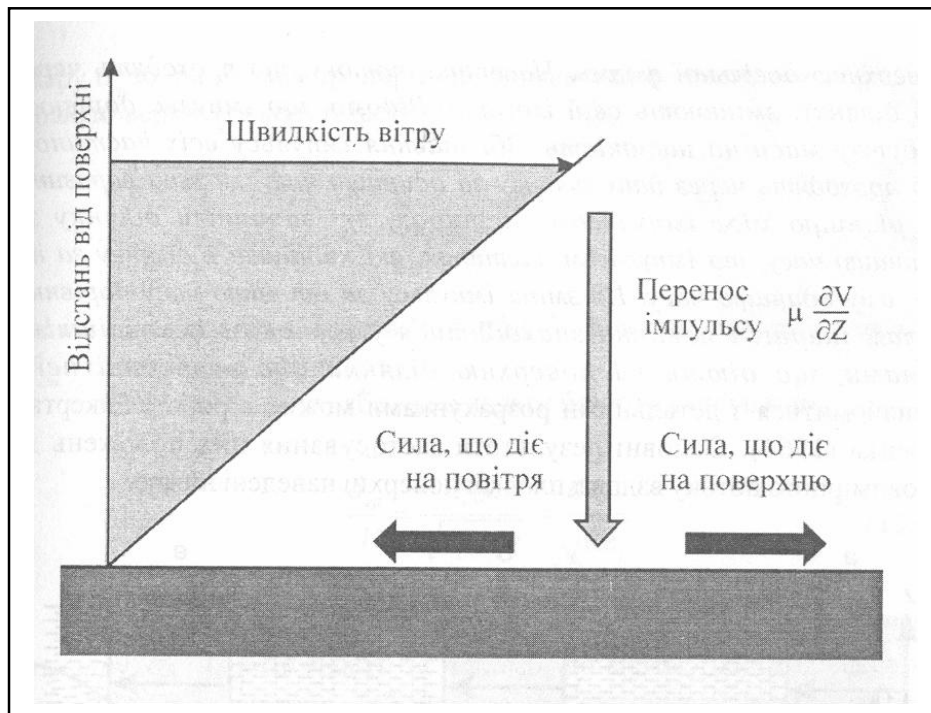


Рис. 21.1. **Схема перенесення імпульсу потоком повітря, що рухається, до стаціонарної поверхні**

Цей градієнт, який можна вважати у першому наближенні лінійним, виникає за рахунок сил тертя з поверхнею. Між шарами повітря, які переміщуються паралельно один одному з різними за модулем швидкостями, також виникають сили тертя. З боку шару, що рухається швидше, на шар, що рухається більш повільно, діє прискорююча сила. І, навпаки, шари, що рухаються повільно, гальмують шари, що рухаються швидко. Сили тертя, що виникають при цьому, направлені паралельно поверхні шарів. Завдяки градієнту швидкості відбувається перенесення імпульсу  $mv$ . Швидкість перенесення імпульсу  $\tau$  визначається за виразом:

$$\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (21.3)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря.

## 21.2. Моделювання зміни швидкості вітру поблизу земної поверхні

Теорію для визначення профілю середньої швидкості вітру у турбулентному граничному шарі було розроблено Прандтлем (Prandtl, 1920). Відповідно до цієї теорії флуктуації швидкості у горизонтальному напрямку пов'язані з флуктуаціями швидкості у вертикальному напрямку.

Рівняння, яке описує зміну швидкості вітру з висотою, має вигляд:

$$v(z) = \frac{v^*}{0,4} \ln \frac{z}{z_m}, \quad (21.4)$$

де  $v^*$  – швидкість тертя (стала величина для поверхневого шару атмосфери (50–100 м));  $z_m$  – параметр шорсткості;  $z$  – висота;  $0,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  – стала Кармана.

**Приклад.** Розглянути залежність швидкості вітру від висоти над земною поверхнею, якщо швидкість тертя  $v^* = 0,35 \text{ м/с}$ , а параметр шорсткості  $z_m = 0,005 \text{ м}$ .

**Розв'язання.** Будуємо графік  $\ln z = f[v(z)]$  для інтервалу висот  $z$  від  $0,005 \text{ м}$  до  $6 \text{ м}$ .

$z, \text{ м}$	$\ln z$	$\ln(z/z_m)$	$v(z) = 0,875 \ln(z/z_m), \text{ м/с}$
6	1,79	7,09	6,20
4	1,39	6,68	5,85
3	1,10	6,40	5,60
2	0,69	5,99	5,24
1	0	5,30	4,64
0,5	–0,69	4,60	4,03
0,1	–2,3	2,99	2,62
0,05	–2,99	2,30	2,01
0,01	–4,61	0,69	0,61
0,005	–5,30	0	0

Величину  $\nu^*$  можна знайти з графіка  $\ln(z/z_m) = f[\nu(z)]$  як нахил залежності  $\ln(z/z_m)$  від  $\nu(z)$  (рис. 21.2):

$$\Delta y / \Delta x = \ln(z/z_m) / \nu(z) = 7,09 / 6,20 = 1,14 = 0,4 / \nu^*.$$

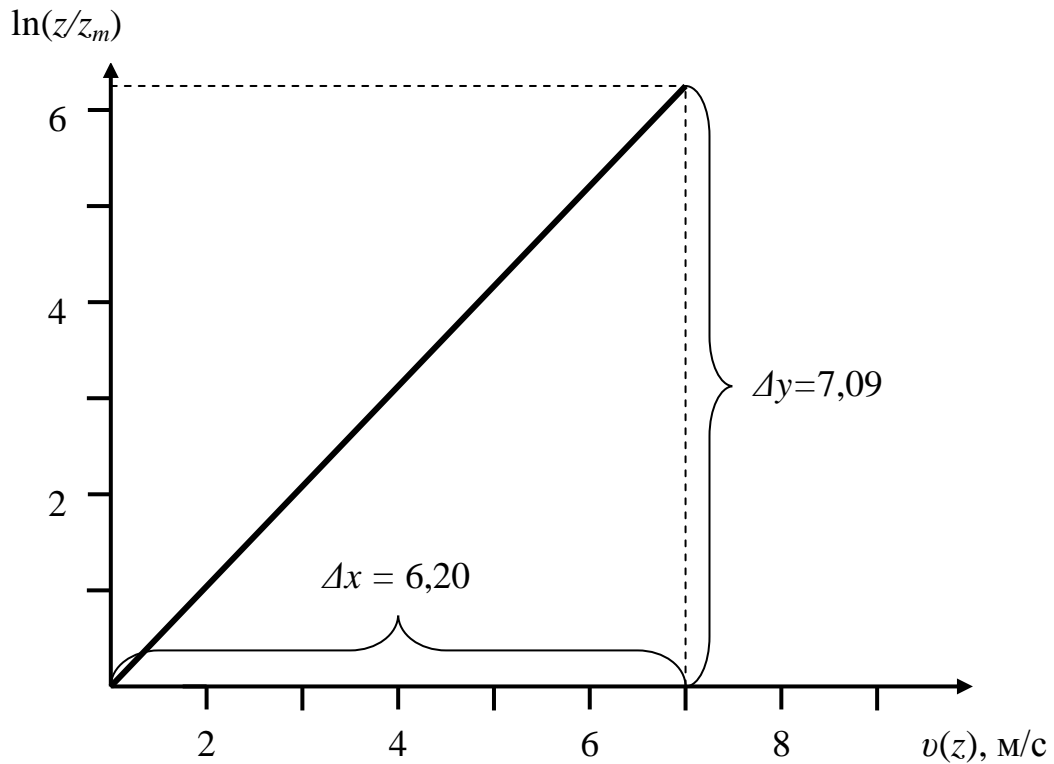


Рис. 21.2. Розподіл швидкості вітру поблизу земної поверхні: графік залежності  $\ln(z/z_m) = f[\nu(z)]$

Звідки  $\nu^* = 0,4 / 1,14 = 0,35 \text{ м/с}$ .

Величину  $z_m$  можна визначити з графіка  $\ln z = f[\nu(z)]$ : перетин прямої залежності з віссю ординат дає (рис. 21.3):

$$\ln z_m = -5,3.$$

Звідки  $z_m = e^{-5,3} = 0,005$ .

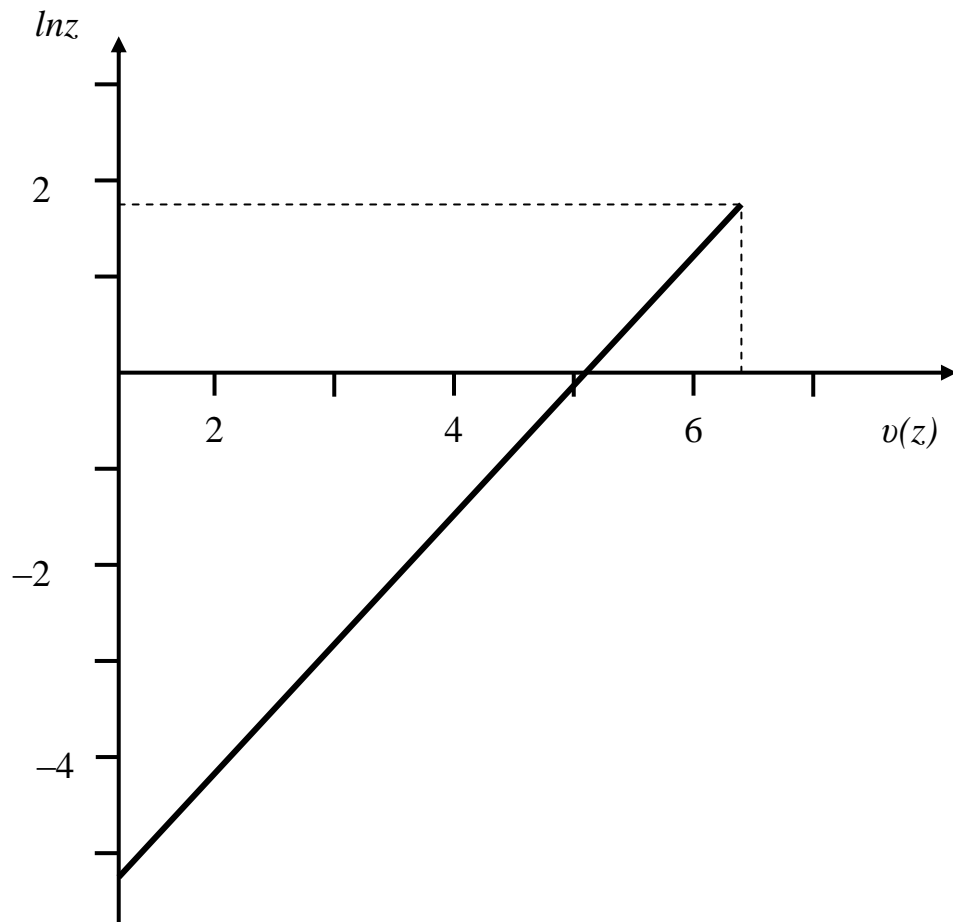


Рис. 21.3. Розподіл швидкості вітру поблизу земної поверхні: графік залежності  $\ln z = f[v(z)]$

#### Приклад

Швидкість вітру на висоті 3 м над землею дорівнює 2 м/с, а параметр шорсткості поверхні становить 0,01 м. Знайти значення потоків ламінарного та турбулентного імпульсів на висоті 0,2 м, та турбулентного потоку імпульсу на висоті 2 м, якщо густина повітря становить  $1,2 \text{ кг/м}^3$ , кінематична в'язкість  $1,51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , коефіцієнт вихрової коваріації  $1,5 \text{ м}^2/\text{с}$ .

#### Розв'язання.

Підставляємо числові дані в рівняння ( 1.4 ):

$$v(z) = \frac{v^*}{0,4} \ln \frac{z}{z_m} = \frac{v^*}{0,4} \ln \frac{2}{0,01} = 3 \text{ м/с},$$

звідки  $v^* = 0,226 \text{ м/с}$ .



Будуємо графік залежності  $z$  від  $u(z)$  (рис. 21.4):

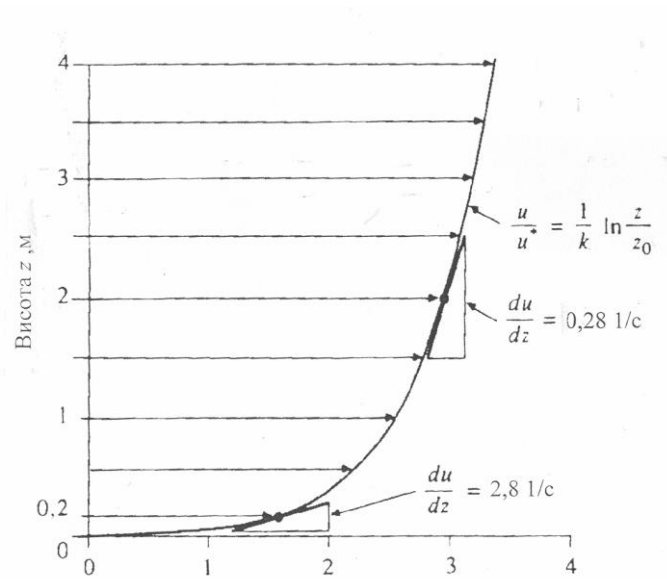


Рис. 21.4. Графік залежності  $z$  від  $u(z)$

Визначаємо градієнт швидкості на висоті 0,2 м:

$$\frac{dv}{dz} = \frac{v^*}{0,4z} = \frac{0,226}{0,4 \cdot 0,2} = 2,83 \text{ c}^{-1}.$$

Ламінарний потік імпульсу на висоті 0,2 м визначається так:

$$\tau = \rho v \frac{dv}{dz} = 1,20 \text{ кг/м}^3 \cdot 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с} \cdot 2,83 \text{ c}^{-1} = 5,1 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2.$$

Турбулентний потік імпульсу на висоті 0,2 м визначається за виразом:

$$\tau_{\text{турб}} = \rho K \frac{dv}{dz} = 1,2 \text{ кг/м}^3 \cdot 1,5 \text{ м}^2/\text{с} \cdot 2,83 \text{ c}^{-1} = 5,1 \text{ Н/м}^2.$$

Визначимо градієнт швидкості та турбулентний потік імпульсу на висоті 2 м:

$$\frac{dv}{dz} = \frac{v^*}{0,4z} = \frac{0,226}{0,4 \cdot 2} = 0,28 \text{ c}^{-1}.$$

$$\tau_{\text{турб}} = \rho K \frac{dv}{dz} = 1,2 \text{ кг/м}^3 \cdot 1,5 \text{ м}^2/\text{с} \cdot 0,28 \text{ c}^{-1} = 0,51 \text{ Н/м}^2.$$

Отже, турбулентний потік імпульсу є домінуючим механізмом перенесення на висоті 0,2 м і зменшується з висотою.

### 21.3. Моделювання зміни швидкості вітру у рослинному покриві

Розглянемо рух повітряних потоків у середині рослинного покриву. Припустимо, що швидкість вітру на поверхні ґрунту дорівнює нулю, збільшується з висотою до постійного значення. Рівняння, яке описує зміну швидкості вітру з висотою, має вигляд:

$$v(z) = \frac{v^*}{0,4} \ln \frac{z-d}{z_m}, \quad (21.5)$$

де  $d$  – зміщення нульової поверхні.

Рівняння (21.2) вірно за умову, що  $z \geq z_m - d$ . Параметр  $v^*$  має розмірність швидкості.

#### Приклад

Чому дорівнює швидкість тертя, якщо швидкість вітру на висоті 2 м над картопляним полем висотою 60 см становить  $4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , а зміщення нульової поверхні дорівнює 1,2 м.

#### Розв'язання

Значення параметра шорсткості для деяких природних поверхонь наведено у таблиці:

Тип поверхні	$z_m, \text{ м}$	Тип поверхні	$z_m, \text{ м}$
Водна поверхня	$2 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-3}$	Лід	$10^{-5}$
Рівна пустеля	$3 \cdot 10^{-4}$	Засніжена поверхня	$2 \cdot 10^{-3}$
Голий ґрунт	$5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$	Хвойний ліс	1,1
Оброблений ґрунт	$2 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-3}$	Люцерна	$3 \cdot 10^{-2}$
Коротка трава висотою 1 см	$10^{-3}$	Картопляне поле висотою 60 см	$4 \cdot 10^{-2}$
Густа трава висотою 10 см	$2,3 \cdot 10^{-2}$	Бавовна висотою 1,3 м	$1,3 \cdot 10^{-1}$
Густа трава висотою 50 см	$9 \cdot 10^{-2}$	Цитрусовий сад	$3 \cdot 10^{-1} - 4 \cdot 10^{-1}$
Пшениця висотою 1 м	$10^{-1} - 1,6 \cdot 10^{-1}$	Села, невеликі міста	$4 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-1}$
Лука висотою 50 см	$5 \cdot 10^{-2} - 7 \cdot 10^{-2}$	Місто	1,75–3,2

З цієї таблиці знаходимо величину параметра шорсткості  $z_m = 0,04 \text{ м}$  для картопляного поля. Підставляємо числові дані у рівняння (21.5):

$$v(z) = \frac{v^*}{0,4} \ln \frac{2,6-1,2}{0,04} = \frac{v^*}{0,4} \ln 35 = v^* \cdot 8,9 = 4 \text{ м/с}.$$

Звідки:

$$v^* = \frac{4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{8,9} = 0,45 \text{ м/с}.$$

### Приклад

Побудувати графіки залежності  $\ln[(z-d)/z_m] = f[v(z)]$ ,  $\ln(z-d) = f[v(z)]$  та  $z = f[v(z)]$  для таких параметрів: параметр шорсткості  $z_m = 0,2$  м; зміщення нульової поверхні  $d = 1,4$  м; швидкість тертя  $v^* = 0,9$  м/с. Інтервал зміни висоти  $z$  від 1,6 м до 6 м. Знайти графічно величини зміщення нульової поверхні  $d$ , параметр шорсткості  $z_0$  та швидкість тертя  $v^*$ .

### Розв'язання

Підставляємо у рівняння ( 21.5 ) числові дані, починаючи з  $z = 6$  м:

$$v(z) = \frac{v^*}{0,4} \ln \frac{z-d}{z_m} = \frac{0,9 \text{ м/с}}{0,4 \text{ м/с}} \ln \frac{6-1,4}{0,2} = 2,25 \ln 23 = 2,25 \cdot 3,135 = 7,05 \text{ м/с.}$$

Визначаємо величини:  $z-d = 6-1,4 = 4,6$  м;  $\ln(z-d) = \ln 4,6 = 1,53$ ;  
 $\ln[(z-d)/z_m] = \ln(4,6/0,2) = 3,1$ .

Аналогічні розрахунки проводимо для  $z = 4$  м; 3 м; 2 м; 1,75 м; 1,6 м; результати зводимо у таблицю:

$z$ , м	$v(z)$	$z-d$ , м	$\ln(z-d)$	$\ln[(z-d)/z_m]$
6	$2,25 \cdot 3,135 = 7,05$	$6-1,4 = 4,6$	$\ln 4,6 = 1,53$	$\ln(4,6/0,2) = 3,1$
4	5,76	2,6	0,96	2,56
3	4,69	1,6	0,47	2,08
2	2,47	0,6	-0,51	1,1
1,75	1,26	0,35	-1,05	0,56
1,6	$x = 0$	0,2	-1,61	0

Будуємо залежність  $\ln[(z-d)/z_m] = f[v(z)]$ , з нахилу якої знайти швидкість тертя  $v^*$  (рис. 21.5):  $v^* = \frac{0,4v(z)}{\ln \frac{z-d}{z_m}} = \frac{0,4}{\text{tg} \frac{\Delta y}{\Delta x}}$ .

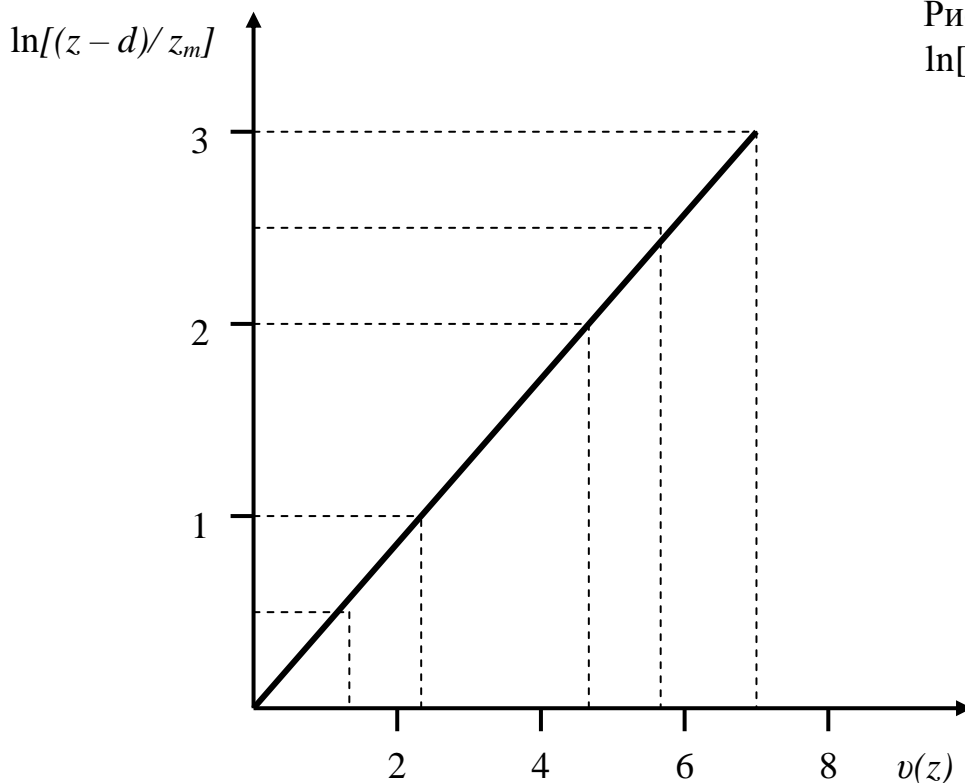


Рис. 21.5. Залежність  $\ln[(z-d)/z_m] = f[v(z)]$

Знаходимо значення  $\ln(z-d)$ , що відповідає  $u(z) = 0$ .

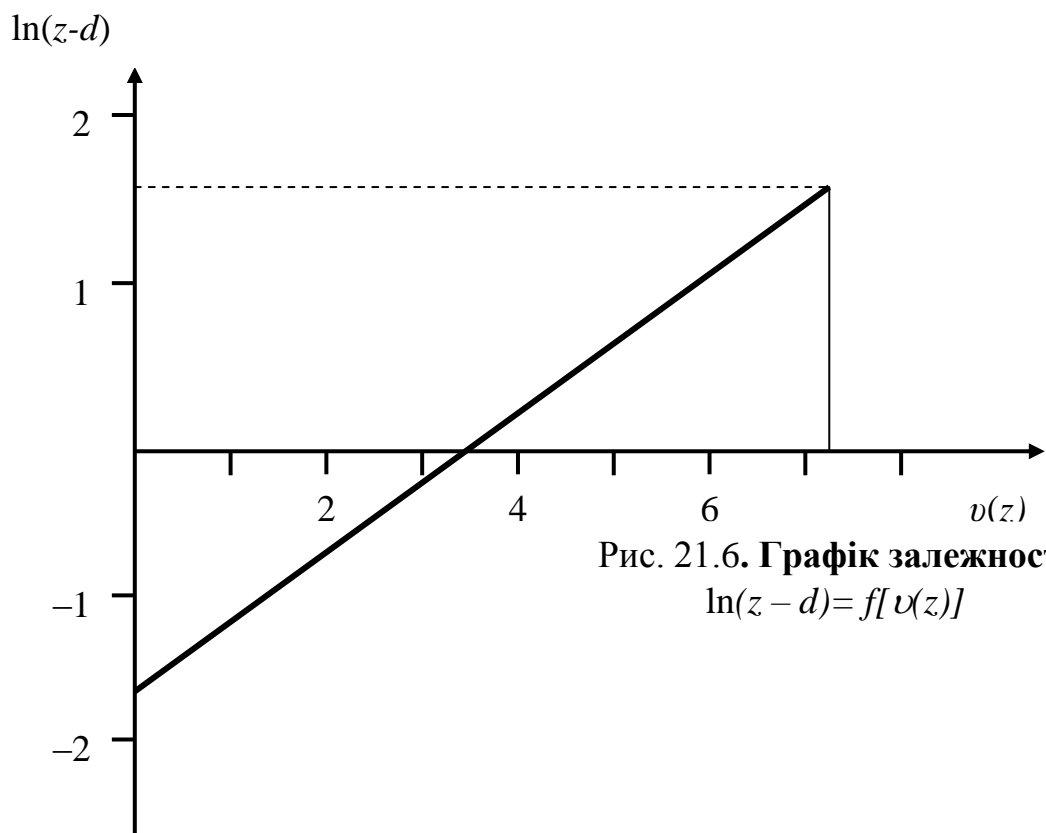


Рис. 21.6. Графік залежності  $\ln(z-d)=f[u(z)]$

Профіль швидкості вітру над рослинним покривом  $z=f[u(z)]$  наведено на рис. 21.7.

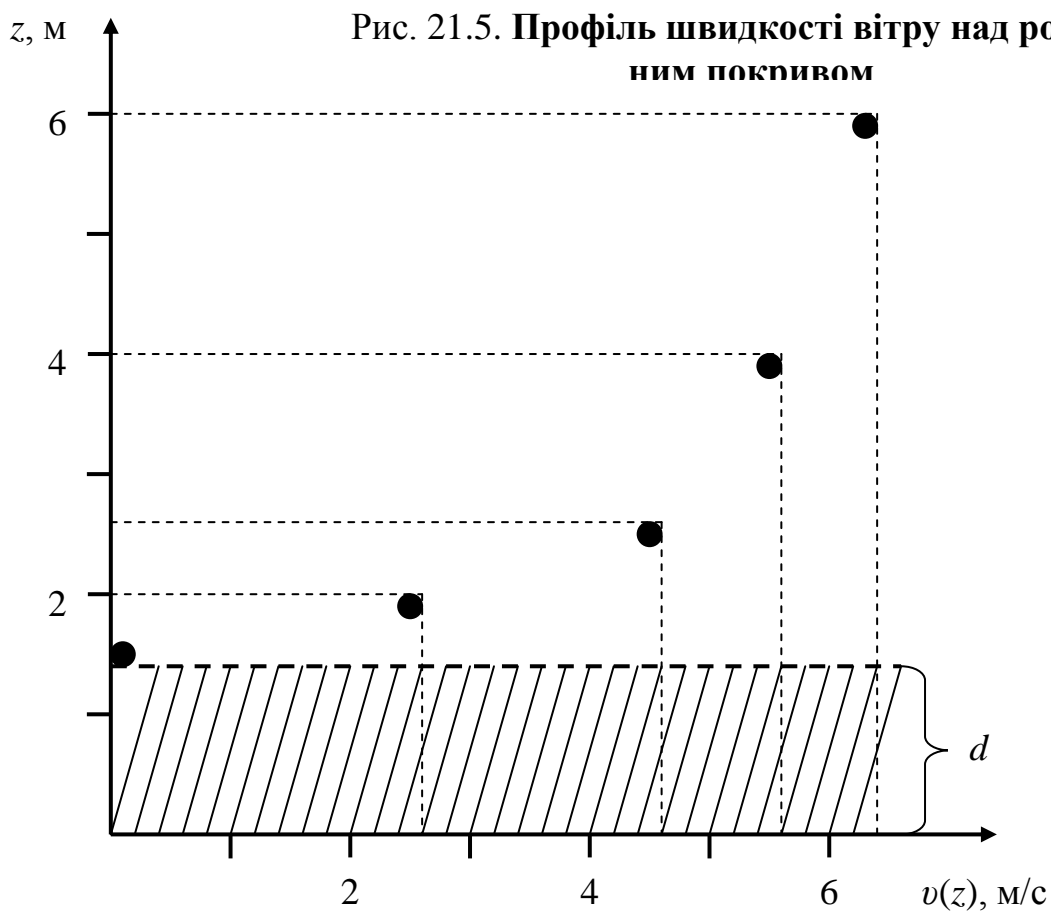


Рис. 21.5. Профіль швидкості вітру над рослинним покривом

Таким чином, можна прийти до таких висновків.

1. Дослідження швидкості вітру поблизу земної поверхні дає можливість знайти величину  $v^*$  з графіка  $\ln(z/z_m) = f[v(z)]$  як нахил кривої  $\Delta y/\Delta x = \ln(z/z_m)/v(z)$ .

2. Дослідження швидкості вітру поблизу земної поверхні дає можливість визначити з графіка  $\ln z = f[v(z)]$  величину  $z_m$ : перетин прямої залежності з віссю ординат дає  $\ln z_m$ .

3. Якщо земна поверхня покрита рослинним покривом висотою  $h$ , можна припустити, що нульовий рівень підійметься на висоту  $d < h$ .

4. Величина параметра  $v^*$  пропорційна швидкості вітру на висоті  $z$ ; крім того, вона залежить від тертя повітряного потоку о поверхню; величину  $v^*$  можна знайти з графіка  $\ln[(z-d)/z_m] = f[v(z)]$ , як  $v^* = \frac{0,4v(z)}{\ln \frac{z-d}{z_m}} = \frac{0,4}{\lg \frac{\Delta y}{\Delta x}}$ .

5. Параметр шорсткості  $z_m$  має розмірність довжини, але його не слід інтерпретувати як фізичну величину, що вимірюється. Цей параметр визначається емпірично шляхом визначення швидкості вітру на різних висотах та екстраполяції прямої залежності  $\ln(z-d) = f[v(z)]$  в область  $v(z) = 0$ . Перетин цієї прямої з віссю ординат дає значення  $\ln z_m$ , звідки можна знайти  $z_m$ .

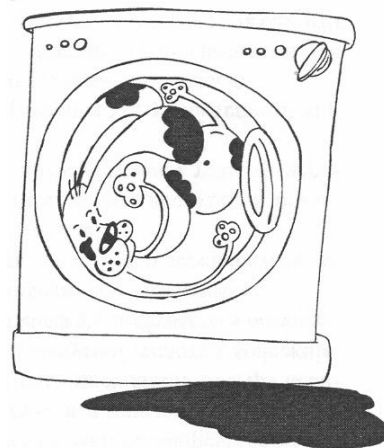
#### Контрольні завдання

Побудувати графіки залежності  $z-d = f[v(z)]$ ,  $\ln(z-d) = f[v(z)]$  та  $\ln(z/z_m) = f[v(z)]$  для поверхні з такими параметрами:

№	Тип поверхні	$d$ , м	$z_m$	$v^*$
1	Рослинний покрив висотою 50 см	0,15 м	$9 \cdot 10^{-2}$ м	0,1 м
2	Пустеля	0,03 м	$3 \cdot 10^{-4}$ м	0,8 м.
3	Трава	0,01 м	$10^{-3}$ м	0,5 м.
4	Лід	0,02 м	$10^{-5}$ м	0,9 м
5	Ліс	1,5 м	1,1	0,1 м

Визначити з графіку величину параметра шорсткості  $z_m$  та швидкість тертя  $v^*$ .

## 22. МЕТОД ВИХРОВОЇ КОВАРІАЦІЇ



### 22.1. Турбулентність

*Турбулентність* – це явище, що спостерігається в течії рідин або газів, та яке полягає в утворенні в цих течіях чисельних вихрів різних розмірів, внаслідок чого такі характеристики як швидкість, температура, тиск, густина зазнають хаотичних флуктуацій та відповідних нерегулярних змін у просторі та часі. Цим турбулентні течії відрізняються від ламінарних.

Завдяки великій інтенсивності турбулентного перемішування відбувається підвищена здатність течії до перенесення кількості руху, теплоти, маси (частинок).

Перехід від ламінарної течії до турбулентної визначається *числом Рейнольдса*: ламінарна течія характеризується переважанням сил в'язкості та низькими значеннями числа Рейнольдса; турбулентна течія відбувається при великих значеннях числа Рейнольдса.

Турбулентність регулярно відбувається у відносно тонкому шарі атмосфери, який називається *граничним шаром*. Розміри турбулентного шару коливаються від 100 м уночі та до 4000 м удень.

Турбулентність супроводжується появою *флуктуацій* або *вихрів* – потоків повітря, які можуть мати напрямок, протилежний основному потоку, особливо під час кругового руху. Отже, повітряний потік може бути представлений як горизонтальний потік численних кругових вихрів, які поширюються у тривимірному просторі і мають, таким чином, вертикальну компоненту (рис. 22.1).

Ці вихри беруть участь у перенесенні теплоти, води, імпульсу тощо в атмосфері.

Якщо порція повітря, що відповідає одному рівню, даній температурі та імпульсу, переходить на другий рівень, цей перехід супроводжується також перенесенням теплоти та імпульсу на новий рівень. Це явище аналогічно дифузійному процесу в газах.

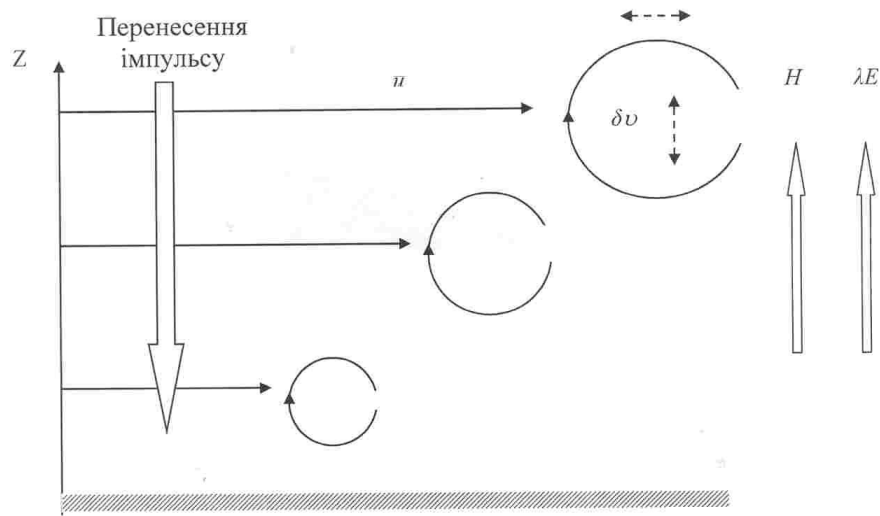


Рис.22.1. Схема горизонтального потоку численних кругових вихрів, які поширюються у тривимірному просторі і мають вертикальну компоненту

Процес перенесення теплоти, маси та імпульсу з одного рівня на інший характеризується потоком відповідної величини, який можна оцінити як добуток флуктуацій температури, горизонтальної компоненти вітру або маси на вертикальну компоненту вітру.

Незважаючи на хаотичний характер повітряного потоку такого типу, його параметри можна оцінити за допомогою *методу вихрової коваріації*.

## 22.2. Латентна теплота

Кількість енергії у формі тепла, що звільнюється або поглинається речовиною під час переходу з одного фазового стану до іншого, називається *латентною теплотою*. Походить від латинського *latere* – ховати.

Можливі фазові переходи: твердий стан  $\rightarrow$  рідина  $\rightarrow$  газ. Наприклад, перехід від рідкого стану до газоподібного називають *випаровуванням*. Процес переходу між фазовими станами може бути *ендотермічним*, коли система поглинає енергію (наприклад, під час переходу від твердого стану до рідини та газу) або *екзотермічним*, коли система звільнює енергію (перехід у зворотному напрямку).

Наприклад, молекули води під час випаровування з водоюми транспортують енергію в атмосферу, оскільки цей процес вимагає теплової енергії, щоб подолати сили притягання між молекулами води. Ця теплота називається *латентною теплотою випаровування*.

Людина не здатна відчувати латентну теплоту, оскільки ця теплота не супроводжується зміною температури.

Якщо водяна пара конденсується у воду, латентна теплота, що була поглинута під час випаровування, звільнюється як відчутна теплота.

Латентна теплота визначається за виразом:

$$Q = mL, \quad (22.1)$$

де  $Q$  – кількість енергії, потрібної для зміни фази речовини (Дж);  $m$  – маса речовини (кг);  $L$  – питома латентна теплота конкретної речовини (Дж/кг).

Латентна теплота не вимагає зміни температури – наприклад, вода залишається при  $100^{\circ}\text{C}$  під час кипіння.

У глобальних масштабах транспортування латентної теплоти відбувається тоді, коли холодне повітря рухається до екватора.

*Потік латентної теплоти* – це потік теплоти від земної поверхні до атмосфери, який супроводжується випаровуванням води з поверхні з подальшою конденсацією водяної пари в тропосфері. Цей процес дуже важливий з точки зору забезпечення енергетичного бюджету Землі.

### 22.3. Відчутна теплота

Теплота, що викликає зміну температури об'єкта, називається *відчутною теплотою*. Перенесення цієї теплоти здійснюється завдяки процесам теплопровідності або конвекції. Коли об'єкт нагрівається, його температура підвищується, і навпаки. Величина відчутної теплоти визначається за виразом:

$$Q = mc(T - T_0), \quad (22.2)$$

де  $m$  – маса тіла;  $c$  – питома теплоємність;  $(T - T_0)$  – різниця температури тіла та опорної температури.

*Потік відчутної теплоти* – це процес перенесення теплової енергії з земної поверхні до атмосфери завдяки теплопровідності або конвекції (після чого цей потік може рухатися горизонтально завдяки циркуляції атмосфери). Але оскільки теплопровідність повітря невисока, основним процесом перенесення відчутної теплоти є конвекція.



Коли земна поверхня тепліша за атмосферу, відбувається *позитивний потік відчутної теплоти*; якщо холодніша – *негативний*.

Виражається цей потік як кількість теплоти, що переноситься через одиницю площі за одиницю часу ( $\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ).

Отже, для реалізації потоку відчутної теплоти необхідний температурний градієнт. Людина *відчуває* потік *відчутної* теплоти через зміну температури повітря.

У глобальних масштабах транспортування відчутної теплоти відбувається у формі теплого повітря, що рухається до полюсів.

Відчутна теплота не викликає зміни фізичного стану речовини, але завжди супроводжується зміною температури. Отже, її можна оцінити за допомогою термометра.

#### 22.4. Метод вихрової коваріації

*Коваріація* – це статистичне вимірювання кореляції між флуктуаціями двох різних величин. Коваріація визначає ступінь, з яким обидві величини змінюються разом.

Метод вихрової коваріації використовують для оцінювання атмосферних потоків  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , аерозолів, імпульсу, теплоти, що переносяться в атмосферному граничному шарі у вертикальному напрямку.

Розглянемо швидкість вітру з горизонтальною  $u$  та вертикальною  $v$  компонентами:

$$u = \bar{u} + \delta u; \quad v = \bar{v} + \delta v, \quad (22.3)$$

де  $\bar{u}$  та  $\bar{v}$  – середні значення компонентів швидкості вітру, а  $\delta u$  та  $\delta v$  – флуктуації цих компонентів.

Коваріація між двома змінними величинами  $\delta u$  та  $\delta v$  визначається так:

$$\text{Cov}_{uv} = \frac{\sum \delta u \delta v}{n}, \quad (22.4)$$

де  $n$  – кількість змінних.

Підставляючи (22.3) у (22.4), одержимо:

$$\text{Cov}_{uv} = \frac{\sum (u - \bar{u})(v - \bar{v})}{n}. \quad (22.5)$$

*Потік вертикального імпульсу.* Миттєвий вертикальний потік імпульсу визначається так:

$$F(t) = \rho u(t)v(t). \quad (22.6)$$

Усереднений потік дорівнює:

$$F = \rho (\overline{uv}), \quad (22.7)$$

де  $\rho$  – густина повітря.

Врахуємо середні значення компонентів швидкості вітру та їх флуктуації:

$$\begin{aligned} F &= \rho (\overline{u + \delta u})(\overline{v + \delta v}) = \\ &= \rho (\overline{uv} + \overline{u\delta v} + \overline{\delta u v} + \overline{\delta u \delta v}). \end{aligned} \quad (22.8)$$

Оскільки  $\overline{v} = 0$  та  $\overline{\delta u} = \overline{\delta v} = 0$ , останнє рівняння матиме вигляд:

$$F = \rho (\overline{\delta u \delta v}). \quad (22.9)$$

Тут припускаємо, що густина повітря не змінюється.

*Потік відчутної теплоти.* Прямий потік теплоти з поверхні в атмосферу завдяки теплопровідності або конвекції називається *поток відчутної теплоти*. Цей потік виникає завдяки градієнту температури між землею та атмосферою. Сенсibilізована теплота викликає зміну температури речовини, але не її фізичного стану.

Цей потік залежить від густини повітря, питомої теплоємності повітря за сталого тиску та коваріації флуктуацій миттєвої вертикальної швидкості повітря та температури:

$$H = \rho_a C_p \overline{\delta v \delta T_a} \quad (22.10)$$

де  $\overline{\delta v}$  та  $\overline{\delta T_a}$  – флуктуації миттєвої вертикальної швидкості повітря та температури.

*Потік прихованої теплоти.* Потік енергії від земної поверхні до атмосфери, що переноситься водяною парою, називається *поток прихованої теплоти*. Прихована теплота викликає зміну фізичного стану (вода перетворюється у пару), але не змінює температуру речовини.

Потік прихованої теплоти  $\lambda E$  визначається як коваріація між флуктуаціями миттєвої вертикальної швидкості вітру та густиною водяної пари:

$$\lambda E = L_v \overline{\delta v \delta \rho_v} \quad (22.11)$$

де  $L_v$  – прихована теплота випаровування;  $\rho_w$  – густина водяної пари;  $\overline{\delta v}$  – флуктуації миттєвої вертикальної швидкості;  $\overline{\delta \rho}$  – флуктуації густини водяної пари.

*Потік двоокису вуглецю.* Цей потік може бути представлений як коваріація між флуктуаціями  $\overline{\delta v}$  миттєвої вертикальної швидкості та густини двоокису вуглецю  $\overline{\delta \rho_c}$ :

$$F_C = \overline{\delta v \delta \rho_c} \quad (22.12)$$

Усереднення здійснюються протягом 15 або 30 хв (10 Гц).

Отже, у граничному шарі відбувається процеси перенесення потоків:

1. *Турбулентного імпульсу:*

$$\tau = \rho K \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (22.13)$$

де  $\rho$  – густина рідини;  $K$  – коефіцієнт вихрової дифузії;  $\frac{\partial v}{\partial z}$  – градієнт швидкості.

2. *Латентної теплоти:*

$$E = \rho_a K \frac{\partial q}{\partial z}, \quad (22.14)$$

де  $\rho_a$  – густина повітря;  $\frac{\partial q}{\partial z}$  – градієнт вологості.

3. *Відчутної теплоти:*

$$H = \rho_a c_p K \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (22.15)$$

де  $c_p$  – питома теплоємність повітря за сталим тиском;  $\frac{\partial T}{\partial z}$  – градієнт температури.

Перенесення атмосферою теплоти або маси залежить від розмірів вертикальних флуктуацій, які збільшуються з відстанню від земної поверхні.

Якщо рослинний покрив більш теплий, ніж атмосфера, турбулентні потоки викликають вертикальні потоки латентної (випаровування) та відчутної (градієнт температури) теплоти.

*Вимірювання вихрової коваріації.* Зазвичай комплекс приладів для оцінювання вихрової коваріації передбачає вимірювання густини водяної пари, температури повітря, швидкості вітру і містить три сенсори: інфрачервоний газоаналізатор (або гігрометр) для оцінювання  $\text{H}_2\text{O}$  та  $\text{CO}_2$ , тривимірний ультразвуковий анемометр для оцінювання температури повітря та швидкості вітру у вертикальному та двох горизонтальних напрямках (рис. 22.2 – 22.3).

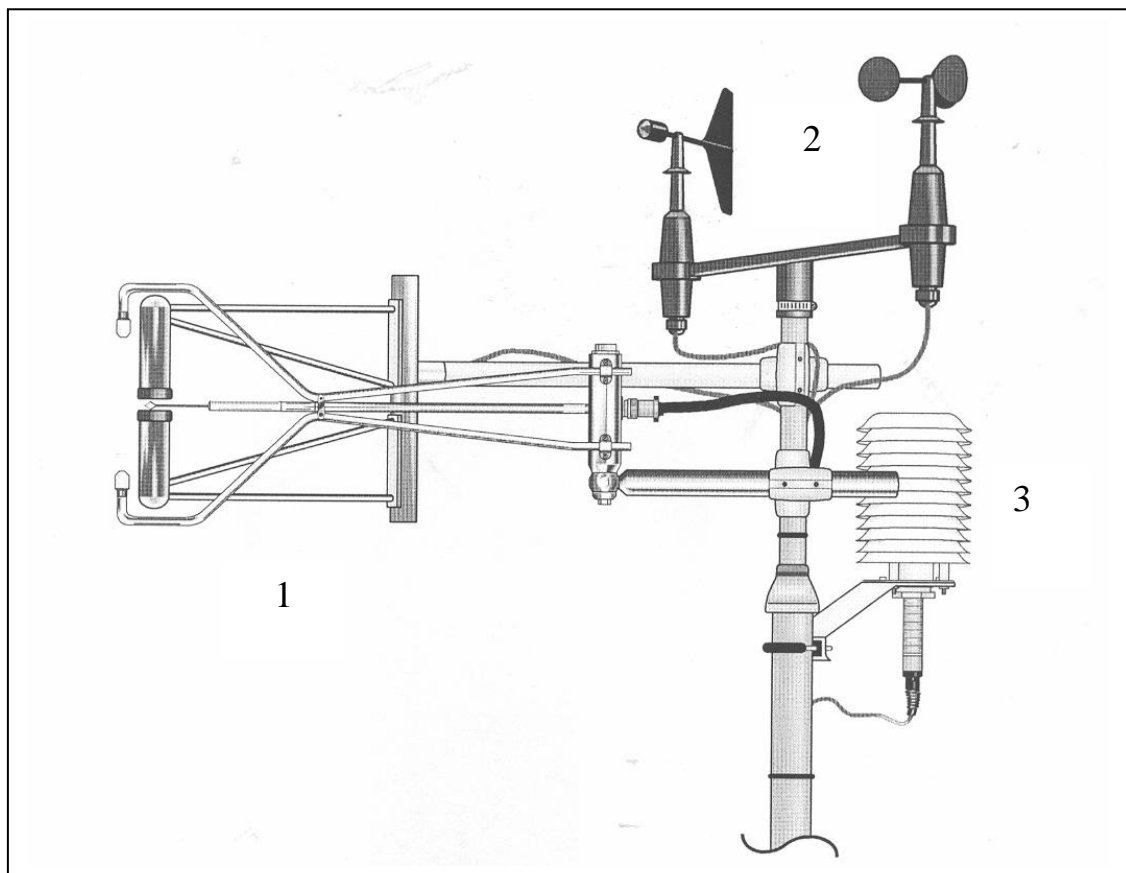


Рис. 22.2. Комплекс приладів для вимірювання вихрової коваріації: 1 – ультразвуковий анемометр; 2 – пропелерний та чашечкой анемометри; 3 – гігрометр

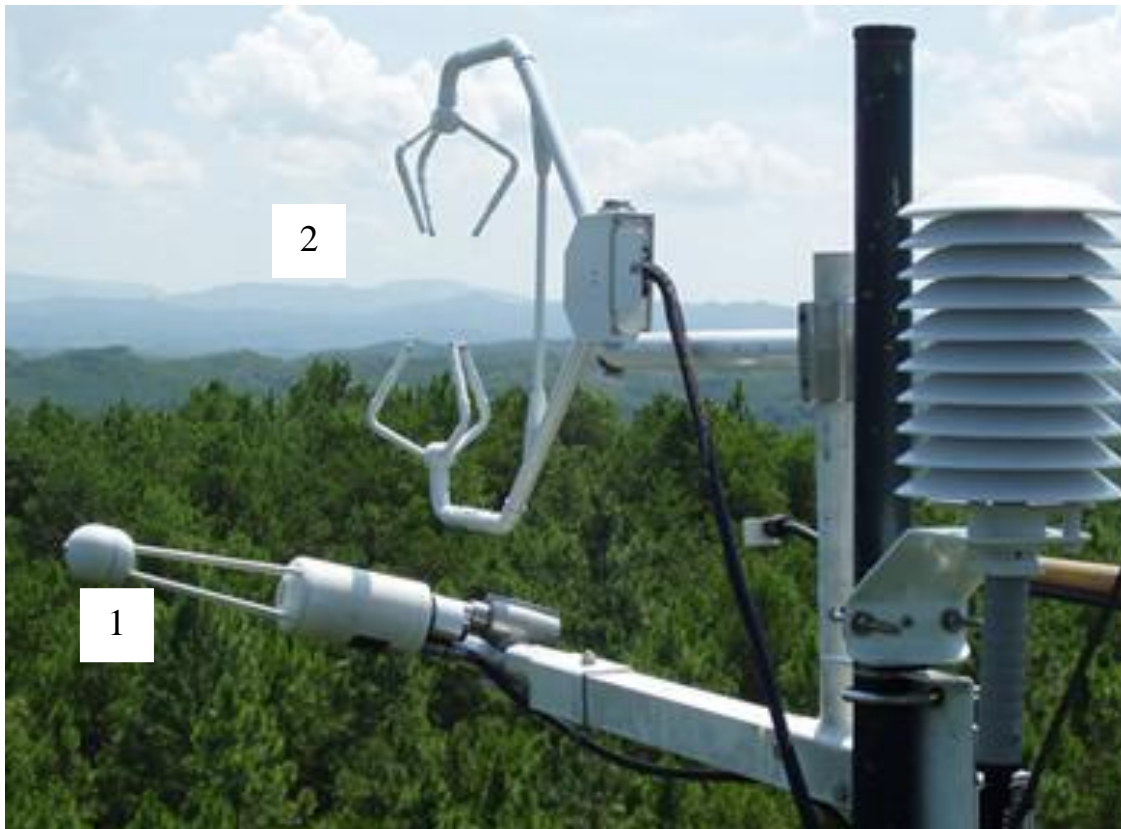


Рис. 22.3. Комплекс приладів для вимірювання вихрової коваріації: 1 – інфрачервоний газоаналізатор; 2 – ультразвуковий анемометр; 3 – гігrometer

Всі ці прилади розміщені на різних висотах за допомогою метеорологічної башти (рис. 22.3).



Рис. 22.3. Метеорологічна башта (станція Кахоку, Японія)

Дані, що одержані від цих приладів, обробляються на комп'ютері.

## Практичне заняття

### Приклад

Обчислити коваріацію між горизонтальною та вертикальною компонентами швидкості вітру відповідно експериментальним даним. Побудувати графік флуктуацій горизонтальної  $u$  та вертикальної  $v$  компонент вітру.

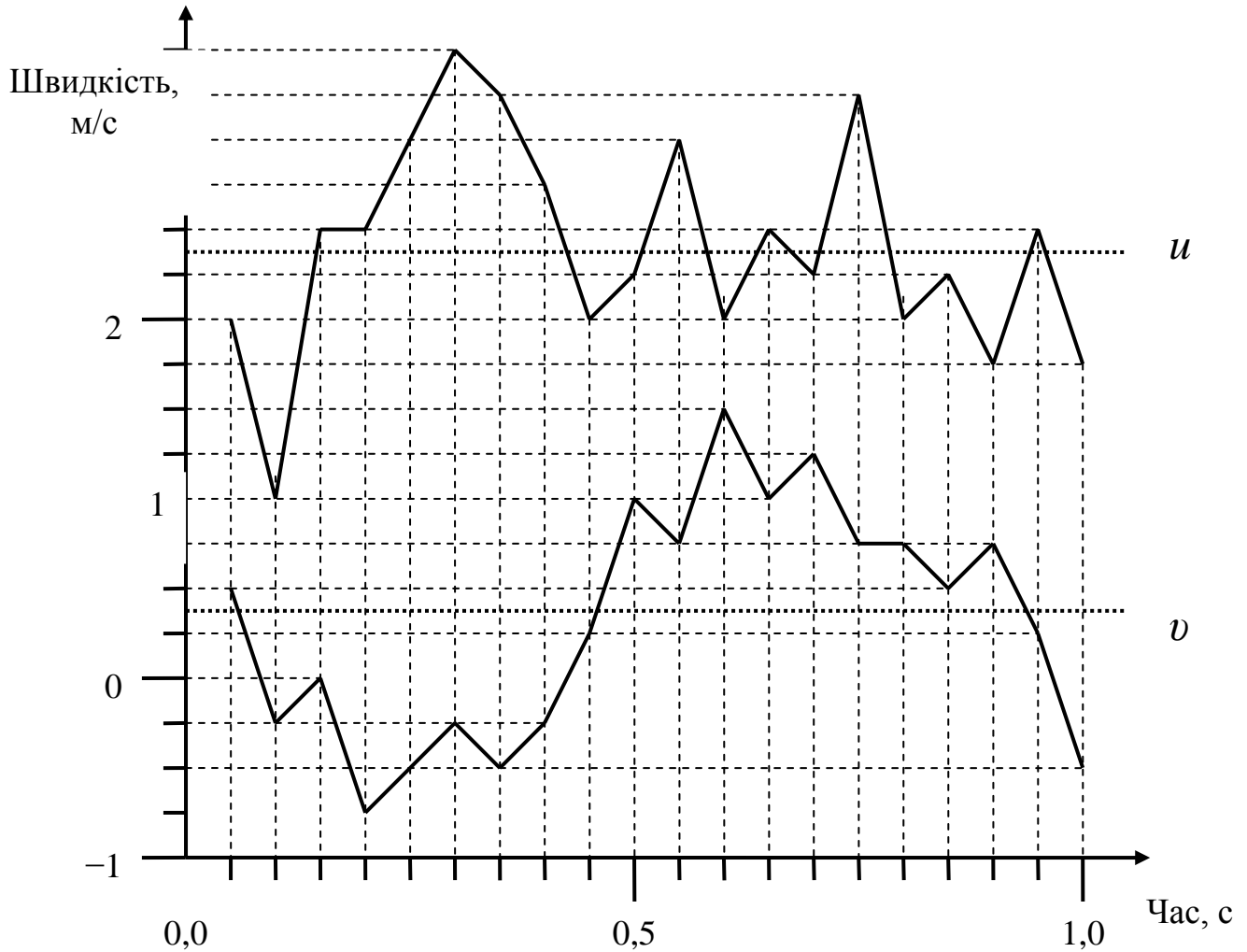
### Розв'язання

Результати обчислень наведено у табл. 22.1.

22.1. Результати обчислення коваріації між горизонтальною  $u$  та вертикальною  $v$  компонентами швидкості вітру.

$N$	$x$	$y$	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	2	0,5	-0,4	0,19	-0,076
2	1	-0,25	-1,4	-2,6	3,64
3	2,5	0	0,1	-3,1	-0,31
4	2,5	-0,75	0,1	-3,85	-0,385
5	3	-0,5	0,6	-3,6	2,16
6	3,5	-0,25	1,1	-3,35	3,685
7	3,25	-0,5	0,85	-3,6	-3,06
8	2,75	-0,25	0,35	-3,35	-1,17
9	2	0,25	-0,4	-2,85	1,14
10	2,25	1	-0,15	-2,1	0,315
11	3	0,75	0,6	-2,35	-1,41
12	2	1,5	-0,4	-1,6	0,64
13	2,5	1	0,1	-2,1	-0,21
14	2,25	1,25	-0,15	-1,85	0,28
15	3,25	0,75	0,5	-2,35	-2,0
16	2	0,75	-0,	-2,35	0,94
17	2,25	0,5	-0,15	0,19	0,029
18	1,75	0,75	0,65	-2,35	-1,53
19	2,5	0,25	0,1	-2,85	-0,0285
20	1,75	-0,5	-0,65	-3,6	2,34
$M$	2,4	0,31			$\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y}) = 2,6494$
$\sigma^2$	$\sigma_x^2 = 0,35$	$\sigma_y^2 = 0,41$			$\text{cov } xy =$ $\frac{1}{N} \sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})$ $= 2,6494/20 = 0,1324$
$\Sigma$	$\sigma_x = 0,59$	$\sigma_y = 0,64$	$\sigma_x \sigma_y = 0,3776$		$r_{xy} = \text{cov } xy / \sigma_x \sigma_y =$ $= 0,1324 / 0,3776 =$ $= 0,35$

Графічно флуктуації горизонтальної  $u$  та вертикальної  $v$  компонент вітру зображено на рис. 22.4.



Між коефіцієнтами коваріації та кореляції є схожості та відмінності. Коефіцієнт коваріації вважається позитивним, якщо із збільшенням  $x$  збільшується  $y$ , та негативним, якщо із збільшенням  $x$  зменшується  $y$ .

Позитивні значення коефіцієнта кореляції свідчать про пряму кореляцію, а негативні – про зворотну кореляцію.

Коефіцієнт коваріації не обмежений границями, тоді як коефіцієнт кореляції змінюється від  $+1$ , проходить через ноль, до  $-1$ .

Зазвичай діапазон значень коефіцієнта коваріації  $0,00$ – $0,30$  свідчить про слабку кореляцію;  $0,30$ – $0,70$  відповідає помірній кореляції, а  $0,70$ – $1,00$  характеризує сильну кореляцію. Результати наших обчислень ( $r_{xy} = \text{cov}xy / \sigma_x \sigma_y = 0,35$ ) свідчать про наявність помірної кореляції між горизонтальною та вертикальною компонентами швидкості вітру.

### Контрольні завдання

Визначити коефіцієнти коваріації та кореляції; порівняти результати обчислень для двох варіантів. Побудувати графік флуктуацій горизонтальної  $u$  та вертикальної  $v$  компонент вітру.

**Варіант 1**

$N$	$u$	$v$
1	2,0	0,5
2	1,0	-0,5
3	2,5	0
4	2,5	0,5
5	3,0	1,5
6	3,5	2,5
7	3,5	1,5
8	2,5	1,0
9	2,0	0,5
10	2,5	-1,0

**Варіант 2**

$N$	$u$	$v$
1	6,0	-0,5
2	7,0	-0,2
3	2,0	-10,0
4	1,5	-7,5
5	3,0	-2,5
6	3,2	-0,5
7	3,5	-5,0
8	2,7	-0,5
9	2,0	0,5
10	2,5	10,0

### Контрольні запитання

1. Чим відрізняються коефіцієнти коваріації та кореляції?
2. Про що свідчить позитивне та негативне значення коефіцієнта коваріації?
3. Чим викликається потік відчутної теплоти? прихованої теплоти?
4. З якою метою використовують метеорологічні башти?



## 23. ПЕРЕНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРИКИ



### 23.1. Електрохімічний потенціал

Розглянемо деяку ємність, розділену на два відсіки мембраною, яка проникна тільки для іонів калію. Якщо концентрація розчинів  $KCl$  в обох відсіках однакова, то кількість іонів  $K^+$ , що переходять з відсіку  $I$  у відсік  $II$  і навпаки, буде однаковою. Через це різниця потенціалів, що встановлюється на мембрані, дорівнює нулю.

Якщо концентрація розчину  $KCl$  у відсіку  $I$  перевищує концентрацію у відсіку  $II$ , буде мати місце дифузія іонів, внаслідок якої кількість позитивних зарядів у відсіку  $II$  збільшиться. Таким чином, на мембрані встановиться різниця потенціалів.

Отже, різниця концентрацій іонів  $K^+$  між відсіками являє собою *хімічний градієнт* (або хімічну різницю потенціалів), який призводить до дифузійного потоку іонів крізь мембрану з відсіку  $I$  у відсік  $II$ .

У той же час, накопичення позитивних електричних зарядів у відсіку  $II$  сприяє утворенню *електричного градієнта* (або електричної різниці потенціалів), який примушує іони  $K^+$  рухатися в протилежному напрямку – з відсіку  $II$  у відсік  $I$ .

У цілому наявність концентраційного (хімічного) та електричного градієнтів зумовлює стан *електрохімічної рівноваги* іонів  $K^+$ . Різниця потенціалів, що виникає на мембрані за такого стану, називається *електрохімічним (рівноважним) потенціалом*.

### 23.2. Потенціал спокою та потенціал дії

Внутрішнє і зовнішнє середовища клітини характеризуються нерівномірним розподілом певних іонів. Так, основним іоном у зовнішньому середовищі клітини є натрій – його концентрація в зовнішньому середовищі клітини в 5–15 разів перевищує концентрацію у внутрішньому середовищі. Усередині клітини переважають іони калію, концентрація яких в 20–40 разів більша, ніж у зовнішньоклітинному середовищі. Крім того, клітинна мембрана характеризується селективною іонною проникністю, зумовленою наявністю іонних каналів. У

стані спокою мембрана характеризується великою проникністю для іонів калію і незначною – для іонів натрію. Врешті-решт, на клітинній мембрані утворюється так званий *потенціал спокою*. Величина його коливається для різних клітин від –60 до –90 мВ. Про клітину у стані спокою кажуть, що вона *поляризована*.

Під час дії на мембрану зовнішнього стимулу (наприклад, механічної, хімічної або електричної природи) електричний баланс порушується, що супроводжується входженням іонів натрію всередину клітини і виникненням швидкої зміни мембранного потенціалу. У той же час іони калію залишають клітину, хоча й не так швидко, як іони натрію. На мембрані встановлюється позитивний *потенціал дії* (близько 20–30 мВ). Цей потенціал виникає не на всій мембрані, а лише в тій ділянці, до якої був прикладений зовнішній стимул. Процес збудження мембрани, що супроводжується появою потенціалу дії, називається *деполяризацією*. Мембрана повертається до первинного стану рівноваги, який характеризується блокуванням проходження іонів натрію всередину клітини. Цей процес транспорту іонів натрію назовні, що викликає поляризацію клітини, називається *реполяризацією*.

Основними властивостями потенціалу дії є: 1) типова величина амплітуди становить близько 130 мВ і не залежить від амплітуди зовнішнього стимулу; потенціал дії триває декілька мілісекунд (рис.23.1); 2) полярність потенціалу дії протилежна полярності потенціалу спокою; 3) під час деполяризації і на початку фази реполяризації відповідна ділянка мембрани тимчасово стає незбуджуваною, несприйнятливою (*рефрактерною*); 4) потенціал дії поширюється по клітинній мембрані від місця збудження начебто біжуча хвиля зі швидкістю 50–150 м/с (для хребетних).

Для клітинної мембрани, яка розділяє зовнішнє і внутрішнє середовища, процес появи потенціалу дії описується *рівнянням Нернста*:

$$\Delta\varphi = \varphi_e - \varphi_i = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_i}{C_e}, \quad (23.1)$$

де  $\Delta\varphi = \varphi_e - \varphi_i$  – різниця потенціалів між зовнішнім та внутрішнім середовищами;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – абсолютна температура;  $Z$  – валентність іонів;  $F$  – стала Фарадея;  $C_e$  – концентрація зовнішнього середовища;  $C_i$  – концентрація внутрішнього середовища.

При температурі  $T = 20^\circ\text{C}$  фактор  $RT/F$  дорівнює 25,3 мВ.

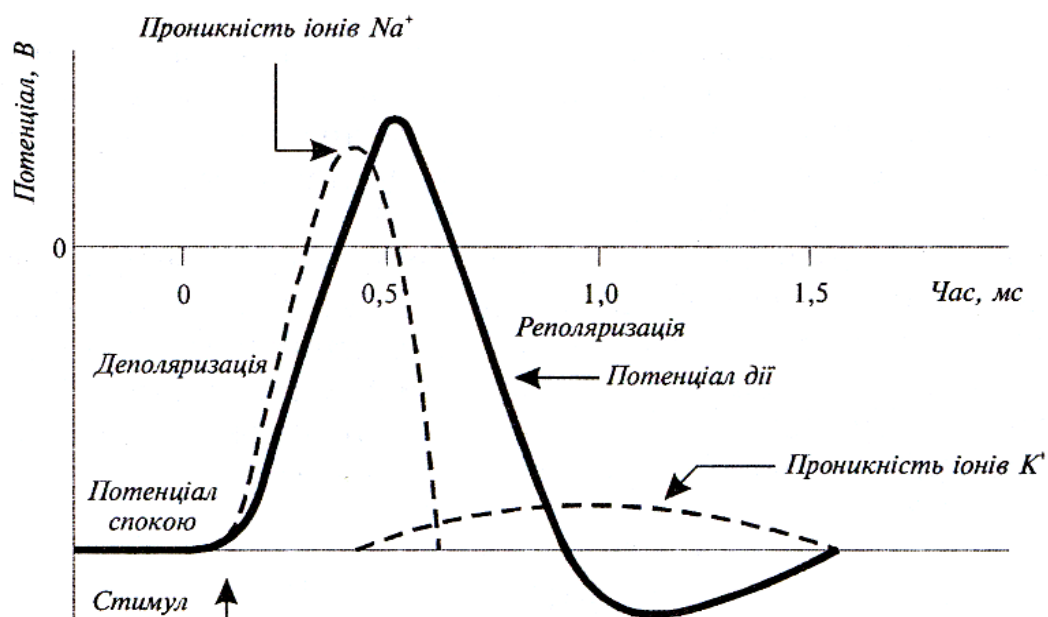


Рис. 23.1. Утворення потенціалу дії (пояснення в тексті)

Типові значення мембранного потенціалу клітин водоростей наведено у табл. 23.1.

### 23.1. Мембранний потенціал клітин водоростей

Об'єкт	Потенціал між вакуолею та зовнішнім розчином $E_{во}$	Потенціал між цитоплазмою та зовнішнім розчином $E_{цо}$	Потенціал між вакуолею та цитоплазмою $E_{вц}$
Прісноводні водорості:			
<i>Nitella translucens</i>	-122	-140	+18
<i>Nitella flexilis</i>	-155	-170	+15
<i>Chara corallina</i>	-152	-170	+18
<i>Hydrodictyon africanum</i>	-90	-116	+26
Морські водорості:			
<i>Halicystis ovalis</i>	-80	-80	$\pm 0$
<i>Valonia ventricosa</i>	+17	-71	+88
<i>Chaetomorpha darwinii</i>	+10	-70	+80
<i>Griffithsia</i>	-55	-80	+25
<i>Acetabularia</i>	-174	-174	$\pm 0$
<i>Mediterranea</i>			

Звичайно різниця потенціалів між внутрішнім середовищем рослинної клітини та зовнішнім розчином, що омиває клітину, знаходяться в межах від  $-50$  до  $-250$  мВ (наприклад, різниця потенціалів для клітин кореневої системи *Pea sativum* та *Avena sativa* дорівнює  $-110$  мВ та  $-84$  мВ відповідно).

Внутрішньо- та зовнішньоклітинні концентрації іонів для клітин деяких біологічних об'єктів наведено у табл. 23.12.

23.12. Внутрішньо- та зовнішньоклітинні концентрації іонів

Концентрація (ммоль/л)	Гігантський ак- сон кальмара	Кравецький м'яз жаби
Внутрішньоклітинне середовище $C_i$		
$\text{Na}^+$	78	13
$\text{K}^+$	392	138
$\text{Ca}^{2+}$	0,4	30
$\text{Mg}^{2+}$	11	16
$\text{Cl}^-$	104	2
Зовнішньоклітинне середовище $C_o$		
$\text{Na}^+$	462	108
$\text{K}^+$	22	2,5
$\text{Ca}^{2+}$	11	2
$\text{Mg}^{2+}$	56	1
$\text{Cl}^-$	286	-

### 23.3. Збудливість рослинних клітин

Загальною рисою рослин є *збудливість* – здатність рослинних клітин, тканин та органів змінювати свій стан та реагувати на зовнішні подразники. Рослина утворює електрохімічні сигнали – потенціали дії, які спроможні поширюватися (подібно нервовим імпульсам) по рослинному організму. Ці потенціали є носіями інформації у внутрішньо- та зовнішньоклітинному просторі щодо змін у навколишньому середовищі рослини.

Реакції рослинних тканин та органів на зовнішні подразнення можуть бути локальними або поширюватися на великі відстані вздовж усієї рослини завдяки плазмодесмам – найдрібнішим цитоплазматичним тяжам, які проходять крізь отвори у клітинних оболонках і

з'єднують протопласти сусідніх клітин. Координація внутрішніх процесів рослини та їх балансу з навколишнім середовищем здійснюється внаслідок збудливості рослинних клітин.

Збудження, що викликається зовнішніми фізичними та хімічними подразниками, переноситься по рослині. Швидкість поширення цього збудження залежить від багатьох факторів – таких як світловий та водний режими, температура, обробка агрохімічними препаратами (гербіцидами, солями, стимуляторами росту тощо), механічні пошкодження, електромагнітні та гравітаційні поля, травмування з боку комах та тварин.

Генерація та поширення потенціалів дії та електричних імпульсів здійснюється від кореневої системи до верхівки і навпаки як відгук на зовнішні фактори. До рослин, в яких зареєстровано потенціали дії, належать бобові, помідори, огірки, картопля, гречка. Амплітуда потенціалів дії, які вимірювалися у рослин, становить 5–80 мВ та істотно залежить від типу зовнішнього стимулу. Швидкість поширення електричних сигналів знаходиться в діапазоні 0,05–20 см/с. Можливим шляхом, по якому здійснюється поширення потенціалів дії, може бути система ситоподібних трубок флоєми, які являють собою нерозривний ланцюг плазматичних мембран. Специфічність електричного сигналу, який використовується рослиною для передачі інформації, досягається завдяки змінам у часі та просторі таких параметрів як амплітуда імпульсу, його тривалість, поляризація, швидкість поширення.

Розглянемо реакцію рослини на зовнішні подразнення.

*Вплив освітлення.* Електричні сигнали генеруються в клітинах зелених рослин. Під час вмикання або вимикання світла сигнали генеруються лише у фотосинтетичних клітинах. Але, Люттге та Хигинботам (1984) встановили, що при роботі з тканинами, що складаються із зелених та незелених клітин, існує електричний зв'язок між цими клітинами: якщо збуджувати зелену клітину, електричний потенціал можна зареєструвати в незеленій клітині.

*Вплив температури.* Реакцію рослини (помідора) на температурний стимул, прикладений до верхнього листка, наведено на рис. 23.2. Потенціал дії реєстрували на різних ділянках рослини – від верхівки до коріння. Було обрано такі режими експерименту: *A* – стимул – полум'я, прикладене до верхівки; індикаторний електрод прикладений до черешка, якщо опорний електрод занурений у ґрунт; *B* – стимул – нагрітий метал, прикладений до верхівки, каломельний індикаторний електрод, прикладений до черешка; *C* – використання двох індикаторних електродів, розміщених на черешку на відстані 28 мм; *D* – індикаторний електрод, прикладений до стеблини, опорний електрод за-

нурений у ґрунт; *E* – порівняння сигналів, що реєструються на черешку та стеблині; *F* – порівняння сигналів на коріннях, які занурені у воду або розчин (2 мМ) аспіріну; стимул прикладений до верхівки, реєстрація сигналів на черешку.

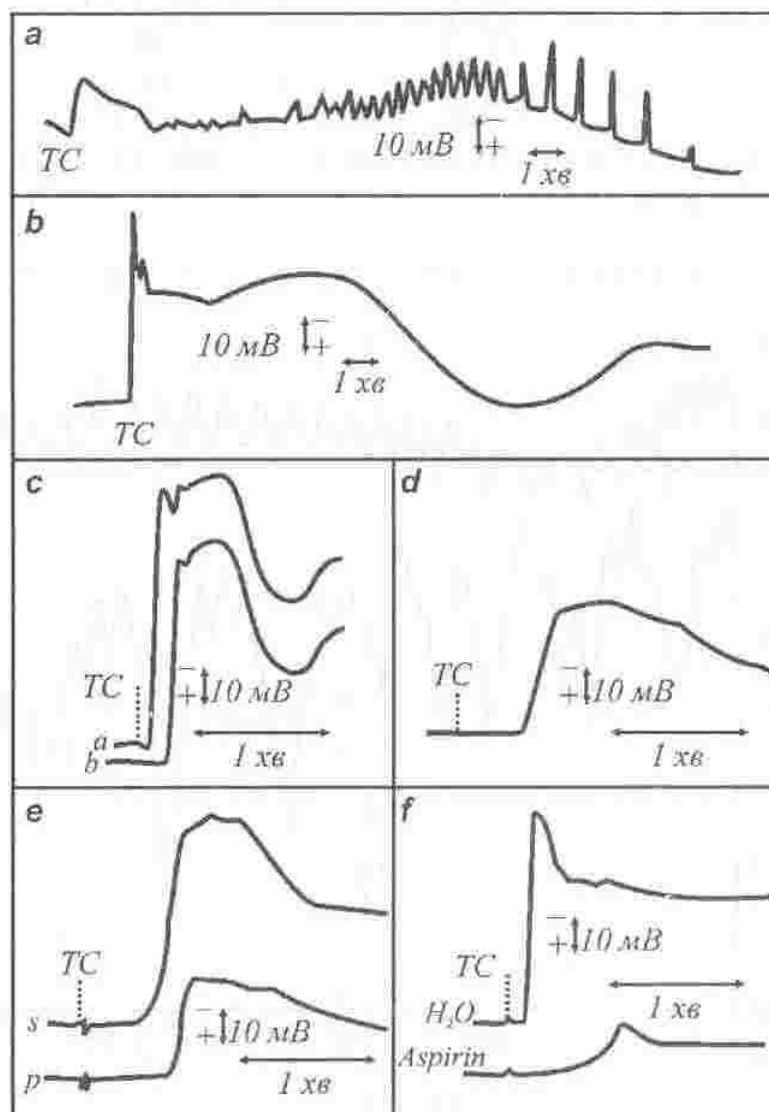
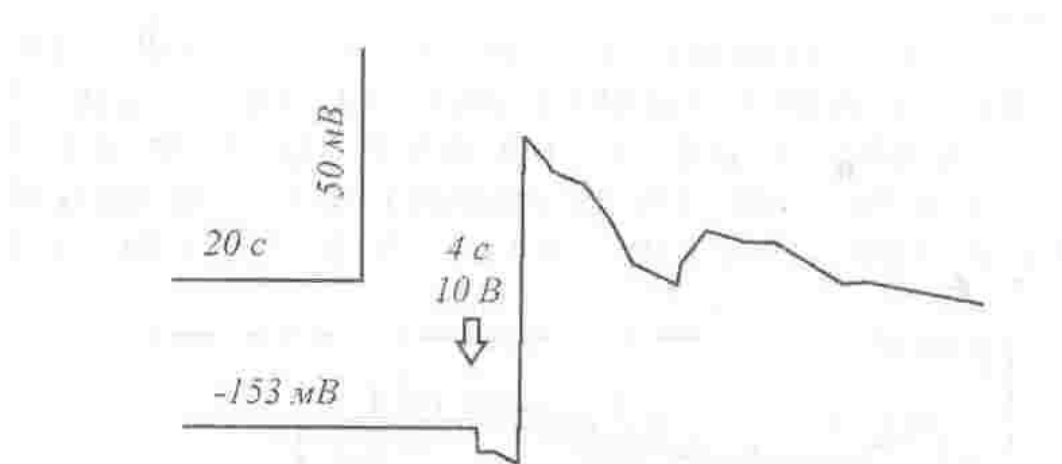


Рис. 23.2. Реєстрація потенціалу дії у відповідь на температурний стимул на різних ділянках рослини (пояснення в тексті)

*Електричний шок.* Результати вимірювання електричних потенціалів, індукованих прикладеним електричним полем амплітудою 10 В наведено на рис. 23.3. Швидкість поширення сигналу вздовж ситоподібних трубок у напрямку до основи рослини становить 3–5 см/с.



**Рис. 21.3. Реєстрація електричних потенціалів, індукованих електричним полем амплітудою 10 В**

*Вплив хімічних стимулів.* Обробка листя картоплі водним розчином пентахлорофенолу з подальшим вимірюванням електричних потенціалів на відстані 9 см на стеблині рослини свідчить про монотонне зменшення протягом однієї години амплітуди потенціалу від 30 мВ до  $0 \pm 3$  мВ. Швидкість поширення сигналу при цьому дорівнювала 0,05 см/с.

*Зміна водного режиму.* Якщо рослина росте у достатньо вологому ґрунті, подальше додавання води не змінює параметри потенціалу спокою. Але якщо рослина росте у сухому ґрунті, додавання води або водне обприскування різко збільшують амплітуду потенціалу до  $7 \pm 2$  мВ (рис. 23.4).

*Вплив комах.* Результати зміни параметрів електричних потенціалів, що вимірювалися на стеблині, внаслідок розміщення на листках колорадських жуків наведено на рис. 23.5. Сигнал поширюється від верхівки до бульби.

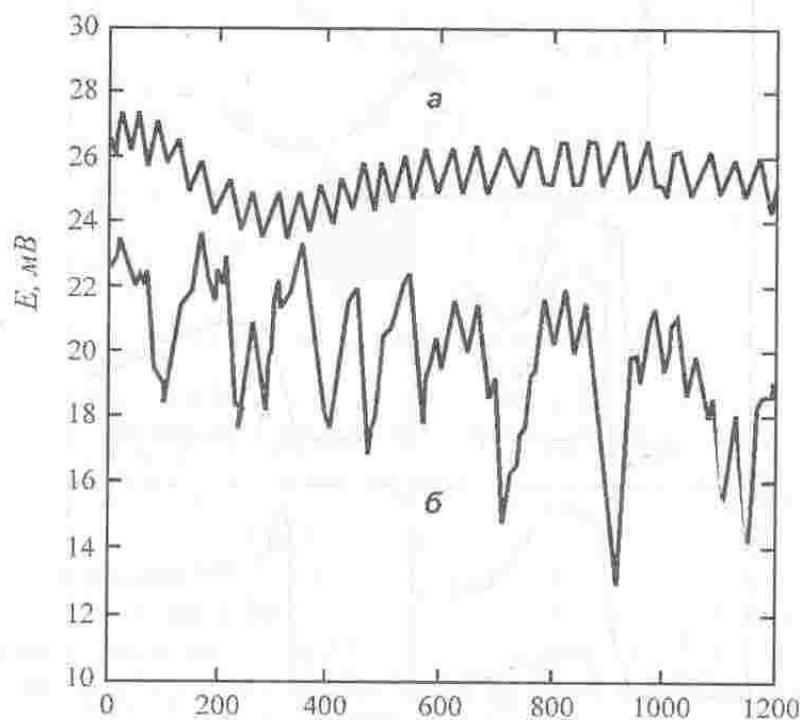


Рис. 23.4. Різниця потенціалів між електродами, зануреними у стеблину картоплі внаслідок обприскування: *а*- 0,3 мл дистильованої води вологого ґрунту; *б* – 50 мл дистильованої води сухого ґрунту

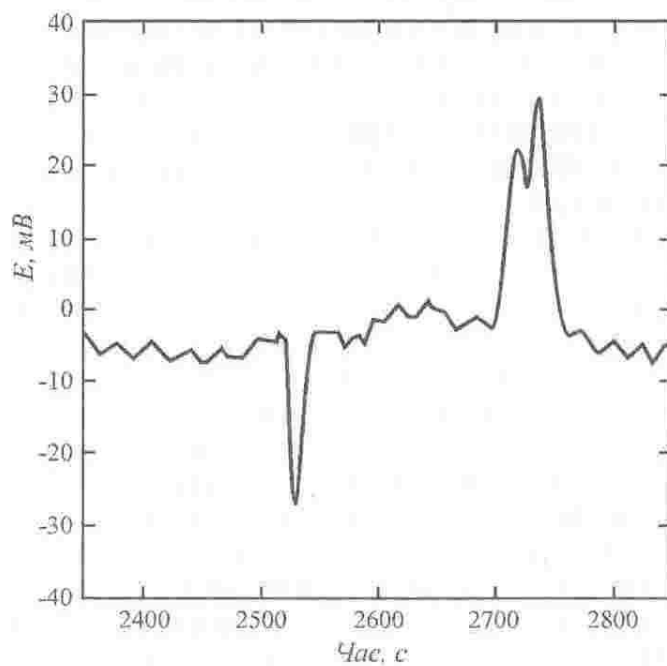


Рис. 23.5. Поява дзеркального відображення різниці потенціалів між електродами у відповідь на розміщення на листках картоплі колорадських жуків



Таким чином, рослина здійснює обмін інформацією за допомогою електричних сигналів у відповідь на зміну різноманітних параметрів навколишнього середовища.

#### 23.4. Електрокінетичні методи ремедіації

Грунт містить надзвичайно велику кількість металів та радіонуклідів, які знаходяться у розчинах завдяки різноманітним процесам сорбції або іон-обмінним реакціям. Розчинені забруднювачі мігрують у підземних водах, поступають у рослини чи водні організми. Найбільш поширеними неорганічними забруднювачами у ґрунті та підземних водах є свинець, хром, цинк, арсен, кадмій. На відміну від органічних забруднювачів та короткоіснуючих радіонуклідів, метали вважаються консервативними забруднювачами, які не розпадаються у ґрунті. Хоча є метали, такі як арсен та кадмій, які завдяки процесам перетворення та сорбції можуть змінювати свої рухливості та відносну токсичність.

Забруднення ґрунту призводить до руйнування екосистем, зменшення продуктивності сільського господарства, порушення харчових ланцюгів, захворюванням людей та тварин.

В основі *електрокінетичних методів* лежить збільшення рухливості забруднювачів за рахунок прикладання електричних полів: у забруднену зону занурюються металеві електроди, до яких прикладена напруга 50-150 В (рис. 23.6). Відрізняють такі електрокінетичні методи як: *електроосмос* – це рух води (вологи) у ґрунті під впливом прикладеного електричного поля; *електрофорез* – це рух твердих частинок або краплин, завислих в електроліті, під впливом прикладеного електричного поля; *електроміграція* – це перенесення іонів або інших комплексів до електроду протилежного заряду.

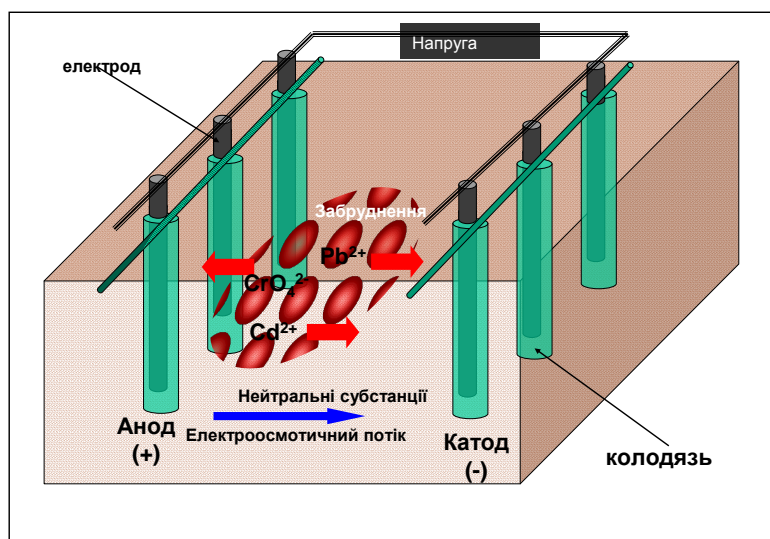


Рис. 23.6. Принцип електрокінетичного методу ремедіації

Електрокінетичні методи застосовуються для очищення ґрунту від важких металів, радіонуклідів, нітратів та сульфатів, залишків нафтопродуктів.

Ці методи успішно використовуються для очищення ґрунтів з високим рівнем вологості, глини; вони характеризуються невисокою собівартістю.

## Практичні завдання

### Приклад

У рослинних клітинах встановилася рівновага потоків із зовнішнім розчином, який містить по  $10^{-3}$  моля іонів  $K^+$ ,  $Na^+$  та  $Cl^-$ . Внутрішня їх концентрація становить  $89 \cdot 10^{-3}$ ,  $10 \cdot 10^{-3}$  та  $24 \cdot 10^{-3}$  моля відповідно. Визначити потенціал Нернста для кожного іона.

### Розв'язання

Рівноважний потенціал визначимо за допомогою рівняння Нернста (вираз (23.1)). Підставляємо в це рівняння числові дані, враховуючи, що  $RT/F = 25,3$  мВ:

$$\Delta\varphi_K = \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_i}{C_e} = 25,3 \text{ мВ} \cdot \ln \frac{1}{89} = -114 \text{ мВ};$$

$$\Delta\varphi_{Na} = 25,3 \text{ мВ} \cdot \ln \frac{1}{10} = -58 \text{ мВ};$$

$$\Delta\varphi_{Cl} = -25,3 \text{ мВ} \cdot \ln \frac{1}{24} = +80 \text{ мВ}.$$

### Приклад

Використовуючи дані табл. 23.12, визначити рівноважний натрієвий потенціал, що виникає в гігантському аксоні кальмара.

### Розв'язання

Рівноважний потенціал визначимо за допомогою рівняння Нернста (23.1). Підставляємо в це рівняння числові дані, враховуючи, що  $RT/F = 25,3$  мВ (див. додаток):

$$\Delta\varphi = 23,3 \text{ мВ} \cdot \ln \frac{462}{78} = 45 \text{ мВ}.$$

### Контрольне завдання

Визначити потенціал рівноваги, що встановився на мембрані клітини кравецького м'яза жаби для іонів калію. Використовувати дані табл. 23.12.

Відповідь:  $-101,48$  мВ.

## 24. ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛОТИ



### 24.1. Перенесення теплоти через теплопровідність

*Перенесення теплоти* – це обмін енергією між термодинамічною системою та навколишнім середовищем завдяки теплопровідності, конвекції, тепловому випромінюванню або випаровуванню. Внаслідок перенесення теплоти здійснюється теплова рівновага між тілом та його оточенням.

*Теплопровідність* – перенесення теплоти від більш нагрітих тіл до менш нагрітих, що сприяє вирівнюванню температури. Цей процес описується законом Фур'є:

$$\frac{dQ}{Sdt} = -k \frac{dT}{dS}, \quad (24.1)$$

де  $Q$  – кількість теплоти, що переноситься завдяки теплопровідності за час  $dt$ ;  $k$  – коефіцієнт теплопровідності;  $S$  – площа, через яку переноситься тепло;  $\frac{dT}{dS}$  – градієнт температури.

Під час теплопровідності компоненти лінійного закону термодинаміки необоротних процесів мають вигляд:  $J_q = \frac{dQ}{Sdt}$  – густина потоку теплоти;  $L_q = -k$ ;  $F_q = \frac{dT}{dS}$ . Звідси можна одержати вираз:

$$J_q = L_q \cdot F_q. \quad (24.2)$$

Одиниці вимірювання густини потоку теплоти –  $\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot \text{с} = \text{Вт}/\text{м}^2$ ; коефіцієнта теплопровідності –  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ ; градієнта температури –  $\text{град}/\text{м}$ .

Типові значення коефіцієнта теплопровідності деяких речовин наведено в табл. 24.1.

### Приклад

Визначити кількість теплоти, що віддається за одиницю часу свинєю, яка лежить на бетонній підлозі товщиною 8 см при температурі 0 °С. Площа тіла свині – 3000 см<sup>2</sup>; теплопровідність бетону –2,43 Вт/м·К, температура тіла 38 °С.

### Розв'язання

Підставляємо числові значення в формулу ( 24.1 ):

$$\begin{aligned} dQ &= -2,43 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \cdot 3000 \cdot 10^{-4} \text{м}^2 (0-38) \text{ К} / 8 \cdot 10^{-2} \text{ м} = \\ &= -2,43 \cdot 3 \cdot 10^{-1} \cdot (-38) / 8 \cdot 10^{-2} = 346,27 \text{ Дж/с}. \end{aligned}$$

#### 24.1. Значення коефіцієнта теплопровідності деяких речовин

Речовина	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К	Температура, °С
Повітря (сухе)	0,0237	–10
«	0,0243	0
«	0,0250	10
«	0,0257	20
«	0,0264	30
«	0,0270	40
«	0,0277	50
Вода	0,565	0
«	0,599	20
«	0,627	40
Бетон	2,43	20
Деревина	0,126	20
Пластик	0,04	20
Цегла	0,63	20
Грунт	1,5	20

### Контрольне завдання

Цегляна стінка тваринницької ферми має розміри 4м×10м×0,15м. Визначити кількість теплоти, що пройде протягом 12 год через стінку, якщо зовнішня температура дорівнює 5 °С, внутрішня температура 20 °С. Коефіцієнт теплопровідності цегли 0,8 Вт/м·К.

Відповідь: 138,24·10<sup>6</sup> Дж.

#### 24.2. Стаціонарна теплопровідність крізь шар речовини

В одномірному просторі рівняння теплопровідності описується виразом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (24.3)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\rho$  – густина;  $C_p$  – питома теплоємність.

У стаціонарному стані рівняння теплопровідності набуває вигляду:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0. \quad (24.4)$$

Рішення цього диференційного рівняння другого порядку слід шукати таким:

$$T = C_1 + C_2. \quad (24.5)$$

Граничні умови можна записати у вигляді:

$$T(x=0) = T_1, \quad (24.6)$$

$$T(x=L) = T_2. \quad (24.7)$$

Якщо підставити два останні вирази у рівняння (24.5), можна одержати такі вирази:

$$T_1 = C_2, \quad (24.8)$$

$$T_2 = C_1 L + C_2. \quad (24.9)$$

Звідси:

$$T = \frac{T_2 - T_1}{L} x + T_1. \quad (24.10)$$

Останнє рівняння свідчить на користь лінійної залежності температури від товщини шару речовини в інтервалі температур від  $T_1$  до  $T_2$ .

Потік теплоти завдяки теплопровідності у цьому випадку матиме вигляд:

$$J_{S,x} = -k \frac{dT}{dx} = -kS(T_2 - T_1)/(L - 0) = kS(T_1 - T_2)/L. \quad (24.11)$$

### 24.3. Перенесення теплоти через конвекцію

*Конвекція* – процес теплообміну, що супроводжується перемішуванням нагрітих і холодних шарів рідини або газів. Є різні види конвекції залежно від причин, що її породжують.

*Вільна конвекція* виникає в полі сили тяжіння через неоднорідності густини, які спричиняються різницею температур. Нагріта речовина під впливом архімедової сили переміщується відносно менш нагрітої речовини у напрямку, протилежному напрямку до сили тяжіння.

*Вимушена конвекція* викликається зовнішнім механічним впливом на середовище, наприклад за рахунок вітру. Збільшення швидкості вітру викликає збільшення кількості теплоти, розсіяної внаслідок вимушеної конвекції. Поблизу поверхні листка утворюється граничний шар повітря, в якому відбувається перехід від нерухомого повітря до повітряного потоку.

Тепловий потік  $J_Q$ , що проходить через одиницю площі подвійного граничного шару (наприклад, який утворюється навколо плоского листка) за одиницю часу та переноситься конвекційним потоком, залежить від коефіцієнта теплопровідності  $k_n$  повітря (див. табл. 24.1) та градієнта температури  $\frac{\partial T}{\partial x}$ :

$$J_Q = -2 k_n \frac{\partial T}{\partial x} = 2 k_n \frac{(T_l - T_n)}{\delta_{zp}}, \quad (24.12)$$

де тепловий потік  $J_Q$  вимірюється у  $В/м^2$ . Тепловий потік вважається додатним, якщо теплота переноситься з листка у повітря, і від'ємним – у протилежному разі.

Ефективна товщина граничного шару  $\delta_{zp}$  залежить від швидкості вітру  $v$  та розмірів листка  $L$ :

$$\delta_{zp}(\text{мм}) = 4,0 \sqrt{\frac{L(\text{м})}{v(\text{м/с})}}. \quad (24.13)$$

Вираз (24.12) можна записати так:

$$J_Q = k_Q(T_l - T_n), \quad (24.14)$$

де  $k_Q = k_n / \delta$  – коефіцієнт конвекції, який вимірюється в  $Вт \cdot м^{-2} \cdot К^{-1}$ .

Тепловий потік  $J_Q$  для об'єктів циліндричної форми радіусом  $r$ , обумовлений теплопровідністю, визначається за виразом:

$$J_Q = \frac{k_n(T_u - T_n)}{r \ln\left(\frac{r + \delta_{ep}}{r}\right)}, \quad (24.15)$$

де  $T_u$  – температура поверхні циліндричного об’єкта;  $T_n$  – температура навколишнього повітря. Для об’єктів циліндричної форми товщина граничного шару визначається за виразом:

$$\delta_{ep}(\text{мм}) = 5,8 \sqrt{\frac{D(\text{м})}{\nu(\text{м}^2/\text{с})}}, \quad (24.16)$$

де  $D$  – діаметр циліндра.

#### Приклад

Визначити тепловий потік  $J_Q$ , зумовлений теплопровідністю, для плоского листка довжиною 10 см, якщо температура листка  $t_n = 25^\circ\text{C}$ , температура навколишнього повітря  $t_n = 20^\circ\text{C}$ , а товщина граничного шару дорівнює 1,4 мм.

#### Розв’язання

Підставимо числові дані у рівняння (24.12):

$$J_Q = 2k_n \frac{(T_u - T_n)}{\delta_{ep}} = \frac{2 \cdot 0,0259 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot ^\circ\text{C} (25^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}{1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 185 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

#### Контрольне завдання

Розрахувати густину потоку теплоти, якою обмінюється завдяки конвекції з навколишнім середовищем тварина, що можна апроксимувати циліндром, діаметр якого 0,20 м, якщо температура тіла –  $40^\circ\text{C}$ , швидкість руху повітря дорівнює 5 м/с.

### 24.4. Перенесення теплоти через випромінювання

Кожне тіло випромінює за будь-якої температури, крім абсолютного нуля, енергію у вигляді електромагнітних хвиль. Це електромагнітне випромінювання, що виникає за рахунок внутрішньої енергії тіла, називається *тепловим випромінюванням*.

Розглянемо теплообмін тварини з навколишнім середовищем. Протягом дня на тварину діє пряме ( $800 \text{ Вт/м}^2$ ) та розсіяне сонячне випромінювання ( $100\text{--}250 \text{ Вт/м}^2$ ), а також довгохвильове випромінювання земної поверхні ( $320\text{--}370 \text{ Вт/м}^2$ ). Випромінювання, що досягає тіла тварини, поглинається, відбивається або пропускається твариною.

Якщо випромінювання повністю поглинається, таке тіло називають *абсолютно чорним*; якщо поглинається лише частина зовніш-

нього випромінювання, таке тіло називають *сірим*. Реальні тіла є джерелами сірого випромінювання, однакового за складом з випромінюванням абсолютно чорного тіла, але з меншою енергетичною яскравістю. Тварини характеризуються поглинальною і випромінювальною здатністю.

Кількість поглинутої твариною енергії визначається за законом Стефана-Больцмана:

$$Q_a = Sa\sigma T_s^4, \quad (24.17)$$

де  $S$  – площа поверхні тіла тварини;  $a$  – поглинальна здатність тварини;  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана ( $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ );  $T_s$  – температура поверхні тіла тварини.

Кількість енергії, що випромінюється твариною, визначається за виразом:

$$Q_e = S\varepsilon\sigma T_e^4, \quad (24.18)$$

де  $\varepsilon$  – випромінювальна здатність тіла тварини;  $T_e$  – температура сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні.

Таким чином, випромінювальний баланс тварини визначається за виразом:

$$R_n = Q_a - Q_e = Sa\sigma T_s^4 - S\varepsilon\sigma T_e^4. \quad (24.19)$$

Поглинональна здатність тварини залежить від кольору шкіряного покриву – тварини білої масті поглинають меншу кількість сонячного випромінювання, ніж тварини з чорним забарвленням.

Відбивання сонячного випромінювання від тварини відбувається в видимій та інфрачервоній областях спектра; рівень відбивання залежить від кута падіння сонячного випромінювання і забарвлення тварини. Максимум відбивання поверхні тварини припадає на 1–2 мкм.

Крім того, оптичне випромінювання, що проходить крізь шкіру тварини, зазнає розсіювання на структурних елементах тканини. Характер розподілу розсіяного випромінювання залежить від довжини хвилі оптичного випромінювання, що падає на поверхню тіла тварини, розмірів та форми біологічних структур, що беруть участь у розсіюванні.

## 24.5. Перенесення теплоти через пароутворення

Втрати теплоти через пароутворення  $\lambda E$  визначаються процесами дихання та потовиділення (тут  $\lambda = 2,43 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$  – прихована теплота



пароутворення;  $E$  – втрати вологи при диханні або потовиділенні). У процесі випаровування молекули рідини з найбільшою швидкістю і кінетичною енергією залишають поверхню тіла тварини, в результаті чого температура поверхні знижується. Цей процес відбувається тоді, коли температура повітря вища, ніж температура тіла. Типові значення втрат енергії через випаровування змінюються від 7,0 до 20,9 Вт/м<sup>2</sup>.

Процес потовиділення вдвоє збільшує втрати теплоти (людина спроможна виділити близько 1,5 кг вологи за годину, що еквівалентно 600 Вт/м<sup>2</sup>). Вівці та собаки здатні компенсувати неспроможність потіти важким диханням, тоді як велика рогата худоба втрачає велику кількість теплоти саме через потовиділення. Швидкість випаровування залежить від поверхні тіла тварини. Процес виділення поту потовими залозами тварин відбувається рефлекторно.

### Репродуктивні тести

1. Що таке перенесення теплоти?
2. Пояснити, що таке вільна та вимушена конвекція.

### Альтернативні тести

1. Чи вірно ствердження, що тварини білої масті поглинають більшу кількість сонячного випромінювання, ніж тварини з чорним забарвленням? Так Ні

2. Тепловий потік вважається додатним, якщо теплота переноситься з листка у повітря, і від'ємним – у протилежному разі.

Так Ні

### Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари “перенесення теплоти-визначення”

*а. Теплопровідність та*

*1. Втрати теплоти через дихання потовиділення*

*б. Конвекція*

*2. Кількість енергії, що випромінюється твариною*

*в. Теплове випромінювання*

*3. процес теплообміну, що супроводжується перемішуванням нагрітих і холодних шарів рідини або газів*

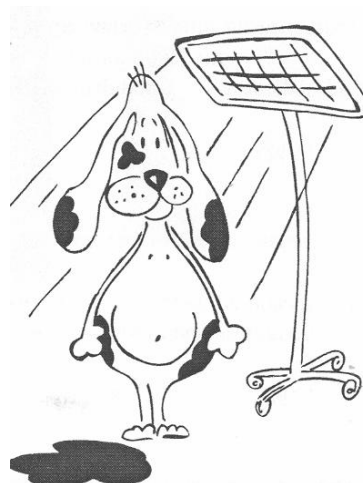
*г. Перенесення теплоти  
через пароутворення*

*4. перенесення теплоти від більш  
нагрітих тіл до менш нагрітих, що  
сприяє вирівнюванню температу-  
ри*

### **Конструктивний тест**

Від чого залежить рівень відбивання сонячного випромінювання твариною?

# IV. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ФІЗИЧНИХ ТА БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ З НАВКОЛИШНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ



## 25. КВАНТОВІ ВЛАСТИВОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

### 25.1. Закони теплового випромінювання

Кожне тіло випромінює за будь-якої температури, крім абсолютного нуля, енергію у вигляді електромагнітних хвиль. Це електромагнітне випромінювання, що виникає за рахунок внутрішньої енергії тіла, називається *тепловим випромінюванням*.

Експериментально одержаний спектральний розподіл енергії абсолютно чорного тіла при різних температурах наведено на рис. 25.1, звідки видно, що повна енергія, яка випромінюється, представлена площею під кривою і швидко збільшується з підвищенням температури.

Частота  $\nu_{\max}$ , на якій знаходиться максимум випромінювальної здатності, також збільшується з підвищенням температури.

Цей короткохвильовий зсув максимуму розподілу у разі збільшення температури сформулював як закон у 1893 р. В. Він.

Закон зміщення Віна – довжина максимуму енергії в спектрі рівноважного випромінювання, обернено пропорційна абсолютній температурі  $T$  тіла, що випромінює:

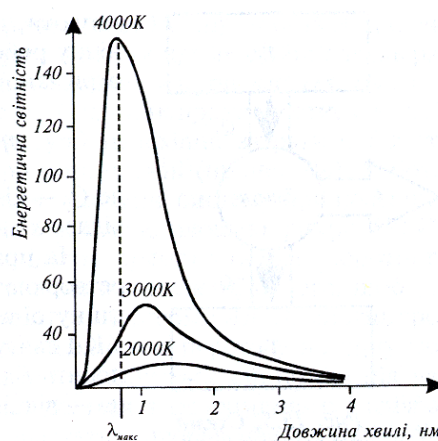


Рис. 25.1. Залежність енергетичної світності абсолютно чорного тіла

$$\lambda_{max} = b/T, \quad (25.1)$$

де  $b = 2,897756 \cdot 10^{-3}$  м/К.

#### Приклад

Температура поверхні листка становить 280 К. На яку довжину хвилі припадає максимум випромінювання поверхні листка?

#### Розв'язання

Використовуючи закон Віна, одержуємо:

$$\lambda_{max} = 2,8978 \cdot 10^{-3} / T = 2,8978 \cdot 10^{-3} / 280 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 10 \text{ мкм.}$$

У 1900 р. М. Планк запропонував теоретичне обґрунтування спектральних закономірностей випромінювання абсолютно чорного тіла, яке було сформульоване як закон випромінювання Планка (формула Планка):

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}, \quad (25.2)$$

де  $h$  – стала Планка ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);  $\lambda$  – довжина хвилі;  $c$  – швидкість світла;  $T$  – абсолютна температура;  $k$  – стала Больцмана;  $e$  – основа натурального логарифма.

Як наслідок закону випромінювання Планка впливає закон випромінювання Стефана–Больцмана – повна випромінювальна здатність  $R$  абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню температури:

$$R = \sigma T^4, \quad (25.3)$$

де  $R$  вимірюється в  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $\sigma$  – стала Стефана–Больцмана ( $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ ).

Цей закон застосовується для оцінювання випромінювання та випромінювального балансу компонентів навколишнього середовища.

## 25.2. Короткохвильове сонячне випромінювання

Температура поверхні Сонця становить близько 6000 К. Довжина хвилі сонячного випромінювання визначається за законом зміщення Віна (25.1):

$$\lambda_{\max}(\text{Сонце}) = (2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м/К}) / 6000 \text{ К} = 4,83 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 483 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 483 \text{ нм.}$$

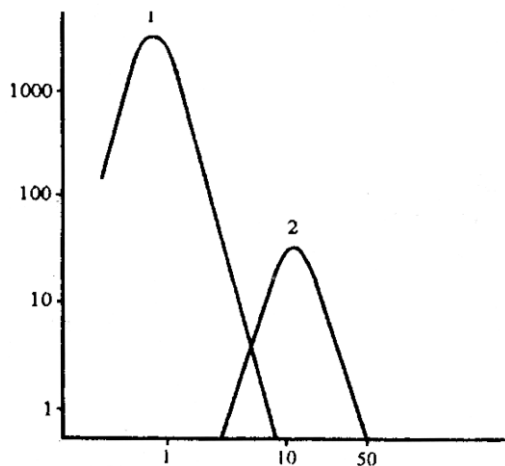
Отже, максимум сонячного випромінювання припадає на видиму область спектра. Під час проходження сонячного випромінювання через атмосферу, частина його поглинається молекулами або частинками атмосфери або розсіюється ними.

### 25.3. Довгохвильове випромінювання земної поверхні

Земна поверхня діє як абсолютно чорне тіло з температурою 288 К. Довжина хвилі випромінювання земної поверхні визначається за законом зміщення Віна ( 25.1 ):

$$\lambda_{\max}(\text{Земля}) = (2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м/К}) / 288 \text{ К} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 10 \text{ мкм.}$$

Максимум випромінювання земної поверхні припадає на інфрачервону область спектра.



Таким чином, спектральна область сонячного випромінювання становить 200–5000 нм з максимумом близько 500 нм; спектральна область випромінювання земної поверхні становить 4–50 мкм з максимумом 10 мкм (рис. 25.2).

Рис. 25.2. Спектри випромінювання: 1 – Сонця;  
2 – земної поверхні

### 25.4. Озоновий шар

Основна маса озону атмосфери (близько 90 %) міститься в стратосфері на висоті 10–50 км з максимумом на висоті 20–25 км. Решта озону знаходиться в тропосфері. Слід зазначити, що незважаючи на

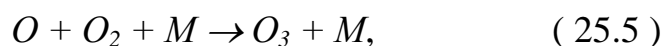
незначну концентрацію озону (одна молекула озону припадає на мільйон молекул повітря), він здатний поглинати ультрафіолетове сонячне випромінювання: майже все випромінювання УФ-С області (200–300 нм), та частину випромінювання УФ-В області (280–320 нм). Саме УФ-В область призводить до еритеми, небезпечних генетичних порушень в організмі людини, раку шкіри. Короткохвильове (<270 нм) ультрафіолетове випромінювання спроможне розщепити молекулу кисню  $O_2$  на синглетний кисень  $O$ , який взаємодіє з  $O_2$  і утворює озон  $O_3$ . В цілому, озоновий шар являє собою ефективний фільтр для сонячного ультрафіолетового випромінювання в ділянці 280–320 нм, в якій поглинають біологічно важливі молекули білків і нуклеїнових кислот.

У стратосфері під впливом сонячного випромінювання відбуваються такі процеси.

1. Взаємодія короткохвильового ( $\lambda < 240$  нм) випромінювання з молекулою озону, яка призводить до появи атомарного кисню:



2. Взаємодія атомарного кисню з молекулярним:



де  $M$  – якась інша молекула (звичайно, азот або кисень).

3. Взаємодія довгохвильового ( $\lambda = 300$ – $315$  нм) випромінювання з озоном, що викликає зворотне перетворення останнього:



Озонова дірка утворюється в шарі стратосферного озону, який дуже чутливий до впливу різних сполук, які містять хлор, навіть при незначних концентраціях останнього. Відносно механізму утворення озонової дірки немає єдиної думки. Існують дві версії щодо причин виникнення цього явища. Одні вчені вважають, що озоновий шар руйнується внаслідок послаблення потоку ультрафіолетового випромінювання, необхідного для утворення озону, в кінці року; тут певну роль відіграють швидкі переміщення великих повітряних мас над Антарктидою. Інші стверджують, що озоновий шар руйнується через потрапляння в атмосферу хлорфторвуглеців (фреонів), які використовують як хладоагенти та розпилювачі в холодильних установках, вогнегасниках, аерозольних виробках. Характерним є досить тривалий (від 70 до 500 років) проміжок часу існування цих сполук; поширюючись у пові-

тряному просторі, вони руйнуються під впливом сонячного випромінювання, виділяють атоми хлору чи броду, що взаємодіють із молекулами озону, руйнуючи останні.

У 1985 р. було прийнято Віденську конвенцію із захисту озонового шару, а в 1987 р. у Монреалі підписано міжнародний протокол щодо речовин, які руйнують озоновий шар. У 1988 р. Україна приєдналася до віденської конвенції, підписала доповнення та поправки до монреальського договору.

Спостереження за загальним вмістом озону (ЗВО) в Україні почалися в 1973—1974 роках на станціях Бориспіль, Карадаг, Одеса, Львів. Тоді ці станції входили до загальноозонової мережі моніторингу озону. Вони були розташовані так, що, з урахуванням станцій Воронеж і Цимлянськ, охоплювали практично всю територію України. Після розпаду Союзу схід України виявився практично не охопленим національними засобами спостереження. У 1990 році було відкрито озонотричні станції в Києві (УКРНДГМІ) і Богуславі, на яких вимірювали вміст озону, сонячну та ультрафіолетову радіацію. Тоді почали вивчати ультрафіолетовий клімат у всіх регіонах країни, робити моніторинг опромінення території України, щоб запобігти негативним наслідкам від озонових аномалій. Для більш повної інформації тепер використовують дані, отримані з супутникового приладу TOMS.

Глобальні вимірювання рівня озону за допомогою супутників протягом 1979-1993 рр. свідчать про суттєве збільшення ультрафіолетового опромінювання в високих і середніх широтах обох півкуль. Зменшення озонового шару продовжувалося до 1998 р., після чого спостерігається його поступове відновлення.

### **25.5. Вимірювання озону**

*Одиниці Добсона* використовуються для вимірювання „товщини” озонового шару. Якщо уявити, що всі молекули озону, які присутні в стратосфері, можна зібрати на поверхні (при нормальних тиску та температурі), то товщина цього шару становитиме 3 мм. Ця кількість озону відповідає 300 DU (одинацям Добсона).

*Озоновий зонд* являє собою прилад, що встановлюється на повітряній кулі з газом, яка підіймається на висоту до 35 км. Він містить озоновий сенсор, джерело живлення, газову помпу та радіопередавач. Під час польоту кулі повітря з озоном пропускається за допомогою помпи через розчин, окислення якого озоном призводить до появи електричного струму, що реєструється. Величина цього струму пропорційна потоку озону і, таким чином, його концентрації.

*Спектрофотометр Добсона.* Цей прилад використовують для оцінювання озонового шару на основі диференціальної спектрофото-

метрії. Як джерело світла використовують ультрафіолетове випромінювання Сонця або Місяця. Метод диференціальної спектрофотометрії передбачає порівняння рівня поглинання на двох довжинах хвиль – 305 нм (поглинання озону) та 325 нм (опорна довжина хвилі). Аналіз поглинання ультрафіолетового випромінювання на аналітичних довжинах хвиль дає можливість оцінити концентрацію озону в атмосфері та його просторовий розподіл. Принцип дії спектрофотометра Добсона пояснюється на рис. 25.3. Клиноподібний фільтр поступово змінює інтенсивність опорного променя, доки обидва оптичних сигнали не зрівноважаться. Барабан, який пересовує клин, обладнаний шкалою в одиницях концентрації озону.

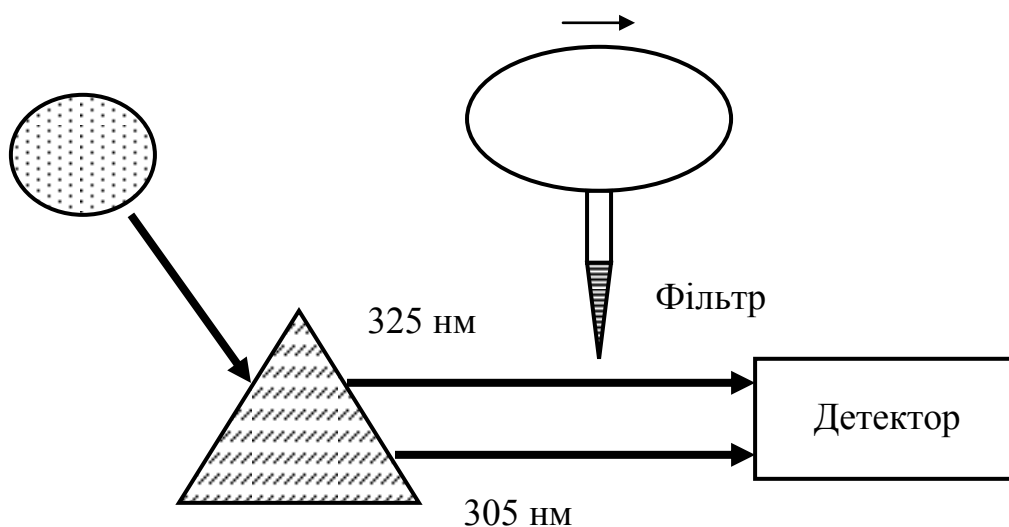


Рис. 25.3. Принцип дії спектрофотометра Добсона

*Лідари.* Дистанційне зондування озону можна здійснювати шляхом вимірювання поглинання лазерного випромінювання на довжинах хвиль 308 нм та 351 нм озоновим шаром. Порівняння поглинання на цих довжинах хвиль дає можливість оцінити профіль озону в діапазоні висот від 10 до 50 км.

*Супутники.* За допомогою запуску космічних платформ відповідно до експерименту за моніторингом глобального озону (Global Ozone Monitoring Experiment) було здійснено спостереження за осно-



вними компонентами атмосфери, в тому числі й за озоном. Зрозуміти принцип та масштаб цих спостережень читач зможе за допомогою сайта

[http://www.esa.int/esaLP/SEMTTEG23IE\\_LPmetop\\_0.html](http://www.esa.int/esaLP/SEMTTEG23IE_LPmetop_0.html).

## 25.6. Парниковий ефект

На межі XIX-XX ст. шведський вчений С. Ареніус передбачив можливість нагромадження в атмосфері вуглекислого газу, що може призвести до підвищення температури нижніх шарів атмосфери. Дані свідчать, що в результаті господарської діяльності людини в атмосфері збільшується вміст вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), закису азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ), метану ( $\text{CH}_4$ ), галогенопохідних вуглеводнів і тропосферного озону ( $\text{O}_3$ ).

Оцінки вчених дають приблизну цифру швидкості зростання  $\text{CO}_2$  в атмосфері – 3 Гт/рік. Отже, в кінці XXI ст. вміст  $\text{CO}_2$  в атмосфері подвоїться порівняно із серединою XIX ст.

Основними молекулами атмосфери, які беруть участь у парниковому ефекті, є водяна пара, двоокис вуглецю, озон, оксид вуглецю, метан і оксиди азоту. Асиметричні молекули, такі як  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ , мають електричний дипольний момент і здатні поглинати оптичне випромінювання.

*Електричним диполем* називається система, що складається з двох однакових за абсолютною величиною різнойменних точкових зарядів  $(+q, -q)$ , які знаходяться на деякій відстані  $l$  один від одного. *Плечем диполя* є вектор  $\vec{l}$ , направлений уздовж осі диполя від негативного заряду до позитивного, і за модулем рівний відстані між ними. Основною характеристикою електричного диполя є його *дипольний момент* – вектор  $\vec{p}$ , який чисельно дорівнює добутку заряду диполя на плече:  $\vec{p} = q\vec{l}$ .

Симетричні молекули, такі як азот і кисень, внаслідок своєї симетричної структури позбавлені електричного дипольного моменту і не беруть участі у процесі поглинання.

У той же час, молекули, лінійні за своєю структурою ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) беруть участь у *валентних* (при яких змінюються довжини зв'язків) та *деформаційних* (що полягають у зміні кута між двома зв'язками) коливаннях (рис. 25.4). Очевидно, що завдяки таким коливанням у цих молекулах відбувається просторове зміщення різноіменних електричних зарядів та індукується електричний дипольний момент.

Отже, молекули типових атмосферних газів характеризуються такими значеннями електричного дипольного моменту (у дебаях):

азот ( 0 ), кисень ( 0 ), двоокис вуглецю ( 0 ), метан ( 0 ), озон ( 0,53 ), оксид вуглецю ( 0,112 ), оксиди азоту ( 0,17 ), водяна пара ( 1,85 ).

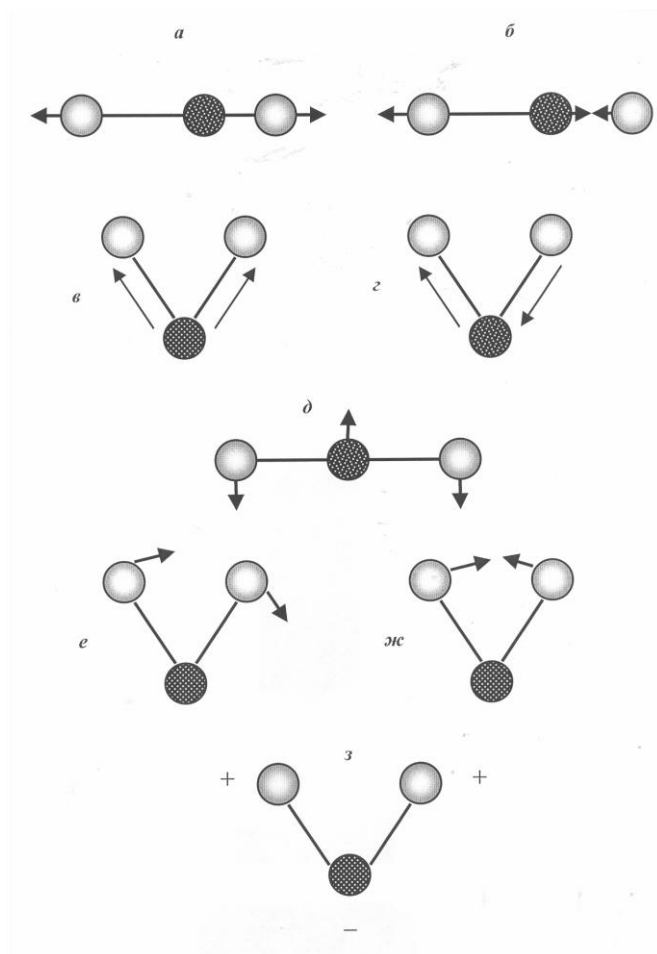
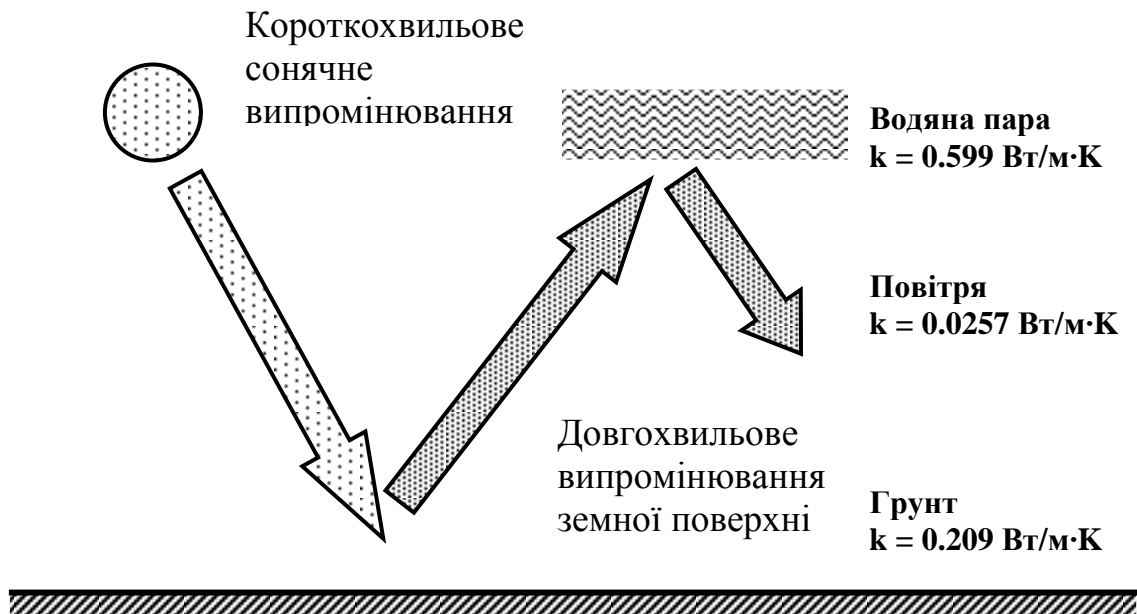


Рис. 25.4. Основні типи валентних та деформаційних коливань: *a* – симетричне валентне; *б* – антисиметричне валентне; *в* – симетричне валентне; *г* – антисиметричне валентне; *д* – деформаційне; *е* – деформаційне крутильне; *ж* – деформаційне різальне; *з* – деформаційне

Теплове довгохвильове випромінювання Землі поглинається атмосферними газами ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ), що викликає нагрівання приповерхневого шару атмосфери.

Дійсно, земна поверхня, яка випромінює довгохвильове випромінювання, характеризується відносно високим коефіцієнтом теплопровідності ( $k = 0,209$  Вт/м·К); те ж саме можна сказати про водяну па-

ру в атмосфері ( $k = 0,599 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ). Але повітряний шар між землею та водяною парою атмосфери має незначний коефіцієнт теплопровідності ( $k = 0,0257 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ). Ось чому водяна пара та вище-згадані атмосферні гази відіграють роль віконного скла у парнику, через що це явище назвали *парниковим ефектом* (рис.25.5).



**Рис. 25.5. Пояснення парникового ефекту з термодинамічних поглядів**

Внаслідок цього ефекту порушується тепловий баланс; цілком імовірно є підвищення глобальної температури поверхні Землі за рахунок зміни концентрації парникових газів, що може призвести до зміни клімату. Згідно із рекомендаціями Міжнародної конференції „Роль двоокису вуглецю та інших газів, які викликають парниковий ефект, у змінах клімату і пов’язаних із ними діях” (Австрія, 1985), підвищення середніх температур негативно впливає на врожаї пшениці і кукурудзи в зернових областях середніх широт Північної Америки й Західної Європи. Так, при сучасній технології сільського господарства і сучасному складі зернових культур потепління на  $2 \text{ К}$  при незмінній кількості опадів повинне призвести до зниження врожаю у середньому на  $10 \pm 7 \%$ . Крім того, підвищення температури може викликати розтавання полярного льоду і збільшення рівня Світового океану. А це, в свою чергу, сприятиме затопленню територій, збільшенню три-

валості сезонного відтавання ґрунтів, погіршенню лісних масивів, що розташовані в області вічної мерзлоти.

### 25.7. Вимірювання впливу парникового ефекту

Розглянемо декілька методичних прийомів щодо кількісного оцінювання парникового ефекту.

*Вимірювання температури морської поверхні* як з борту океанських суден, так і супутників за допомогою інфрачервоних і надвисокочастотних радіометрів дозволяє оцінити електромагнітне випромінювання, що висилається та відбивається морською поверхнею, а також висилається та поглинається атмосферою (у разі використання супутників). Моделювання цих процесів призводить до точних оцінок глобальних змін температури навколишнього середовища.

*Оцінка глобального нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (НДВІ).* Перевагою цього індексу є близька до лінійної залежність його величини від кількості рослинної продукції, яка залежить від температури.

*Визначення концентрації атмосферних газів* дає можливість оцінити випромінювальний баланс Землі, температуру земної поверхні, температурний профіль атмосфери та фізичні властивості хмар. Перспективним методом кількісної оцінки атмосферних газів є спектроскопія Фур'є перетворення, в основі якої лежить можливість будь-якому частотному спектру зіставити специфічну інтерферограму – так званий *спектр Фур'є*. Методи спектроскопії Фур'є перетворення характеризуються високим розділенням, точністю і відтворюваністю.

*Вимірювання температури приповерхневого шару* базується на оцінці інфрачервоного випромінювання, що висилається системою „земна поверхня-атмосфера” на 19 спектральних ділянках в області від 3,7 до 15 мкм, а також надвисокочастотного випромінювання на 4 ділянках поблизу 50 МГц спектра випромінювання кисню. Комбінація двох спектральних областей дає можливість обмежити вплив хмарності та більш точно оцінити температуру приповерхневого шару атмосфери.

### 25.8. Енергетичний баланс земної поверхні

*Сумарне випромінювання  $R_{\text{сум}}$  земної поверхні* описується рівнянням:

$$R_{\text{сум}} = (1 - a) E_{g\downarrow} - \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_A^4), \quad (25.7)$$

де  $E_{g\downarrow}$  – короткохвильове сонячне випромінювання, що падає на земну поверхню ( $\text{Вт/м}^2$ );  $a$  – альbedo або доля сонячного випромінювання, що відбивається від земної поверхні (отже,  $-aE_{g\downarrow}$  – це короткохвильове сонячне випромінювання, що відбивається від земної поверхні); величина  $-\varepsilon\sigma T_S^4$  є довгохвильовим випромінюванням земної поверхні, тоді як  $\varepsilon\sigma T_A^4$  є довгохвильовим атмосферним випромінюванням, що падає на земну поверхню (рис. 25.6). У формулі ( 25.7 ) знаки „мінус” характеризують втрати випромінювання,

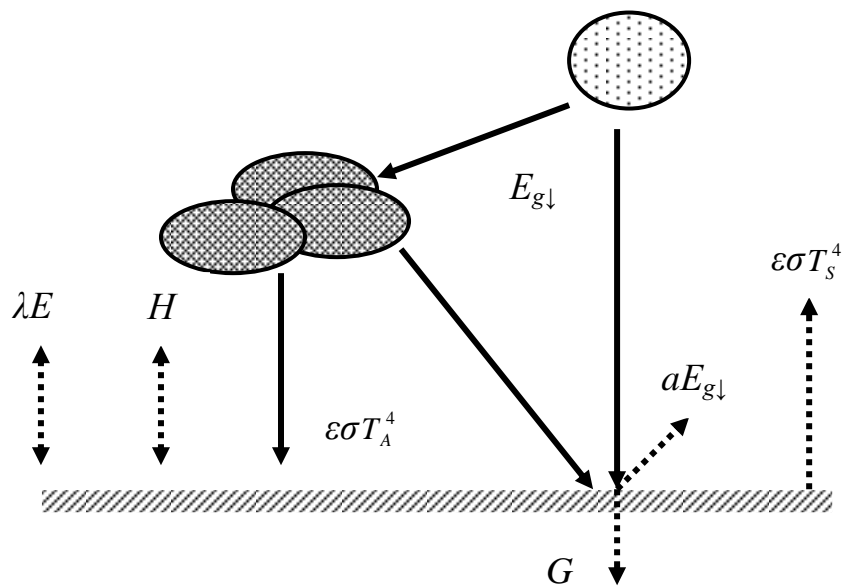


Рис. 25.6. Енергетичний баланс земної поверхні

Сумарне випромінювання, що одержано земною поверхнею, втрачається на певні процеси, а саме.

1. *Потік теплоти  $G$  через земну поверхню* характеризується передачею теплової енергії углиб земної поверхні завдяки конвекції. Умовою реалізації цього процесу є наявність температурного градієнту між поверхневими та глибинними шарами ґрунту. Тепловий потік вважається додатним, якщо температура поверхні перевищує температуру ґрунту на глибині; в цьому випадку тепловий потік направлений униз. Якщо цей потік незначний у регіонах помірного та тропічного клімату, то в арктичних зонах він становить 10–20 % від сумарного випромінювання.

2. *Прихована теплота  $\lambda E$*  – це кількість енергії у вигляді теплоти, яку треба надати речовині для переходу в інший фазовий стан.

Прихована теплота передається в атмосферу завдяки випаровуванню або транспірації.

Наприклад, процес переходу води у пару або випаровування характеризується теплою  $\lambda E$ , де  $\lambda = 2.43 \cdot 10^6$  Дж/кг є прихованою теплою пароутворення, а  $E$  – швидкістю випаровування (або транспірації), що вимірюється в  $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$ .

Зазвичай прихована теплота передається в атмосферу через конвекцію і становить близько 16 % від загальних втрат енергії земною поверхнею.

3. *Відчутна теплота  $H$*  – це теплова енергія, що переноситься тілом, яке має температуру вищу, ніж температура його оточення, завдяки теплопровідності або/та конвекції. Для здійснення цього процесу необхідний температурний градієнт між поверхнею та навколишнім повітрям. Оскільки повітря має невеликий коефіцієнт теплопровідності, більш реальною у перенесенні теплової енергії є участь конвекції. Якщо температура земної поверхні перевищує температуру повітря, потік відчутної теплоти вважається додатним. Втім, перенесення теплоти з земної поверхні охолоджує останню. Типові значення відчутної теплоти становлять близько 5 % від загальних втрат енергії земною поверхнею.

Отже, сумарне випромінювання, що одержано земною поверхнею, описується рівнянням:

$$R_{\text{сум}} = G + \lambda E + H. \quad (25.8)$$

Загальне рівняння енергетичного балансу земної поверхні матиме вигляд:

$$(1 - a) E_{g\downarrow} - \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_A^4) = G + \lambda E + H. \quad (25.9)$$

Енергетичний баланс земної поверхні залежить від часу доби. Так, отримання енергії завдяки сумарному випромінюванню та втрати її через потік прихованої теплоти (випаровування у повітря) та потік відчутної теплоти (конвекції) максимальні вдень. Вночі втрати теплоти пов'язані з сумарним випромінюванням, тоді як потоки прихованої теплоти (процеси конденсації) та відчутної теплоти (зворотна конвекція) забезпечують накопичення теплоти.

### 25.9. Енергетичний баланс листка та рослин

Розглянемо можливі шляхи постачання енергії на поверхню листка (рис. 25.7). На верхню поверхню листка надходить пряме та дифузне (розсіяне хмарами та частинками атмосфери) сонячне випромінювання ( $E_{C\downarrow}$ ) видимої області спектра, а також довгохвильове випромінювання атмосфери ( $\sigma T_A^4$ ). На нижню поверхню листка надходить випромінювання, відбите від земної поверхні, стовбура, гілок, інших листків тощо ( $a_3 E_{C\downarrow}$ ), та довгохвильове випромінювання земної поверхні ( $\varepsilon \sigma T_3^4$ ). Відбите випромінювання може становити 10-30 % від загального випромінювання, що досягає поверхні листка.

Втрати енергії верхньою поверхнею листка визначаються процесами відбивання ( $a_L E_{C\downarrow}$ ) сонячного випромінювання видимої області спектра; відбивання випромінювання, що надходить із земної поверхні ( $r E_{C\downarrow}$ ); поглинання інфрачервоного випромінювання листком  $a_{IЧ} \sigma (T_A^4 + \varepsilon_3 T_3^4)$ ; теплового (інфрачервоного) випромінювання листка  $2\varepsilon_L \sigma T_L^4$  (фактор 2 пов'язаний з наявністю двох сторін листка). Тут:  $a_L$  – поглинання листком глобального сонячного випромінювання;  $r$  – відбивання сонячного випромінювання земною поверхнею;  $a_{IЧ}$  – частка енергії падаючого інфрачервоного випромінювання, поглинутого листком;  $\varepsilon_3$  – випромінювальна здатність ґрунту;  $\varepsilon_{IЧ}$  – випромінювальна здатність листка;  $T_A$  – температура повітря;  $T_3$  – температура земної поверхні;  $T_L$  – температура листка.

Якщо врахувати реальні значення параметрів, що характеризують випромінювальний баланс листка, а саме:  $a_3 = 0,15$ ,  $a_L = \tau_L = 0,2$ ,  $\varepsilon_3 = 0,95$ ,  $\varepsilon_L = 0,97$ , то рівняння випромінювального балансу листка можна подати у вигляді:

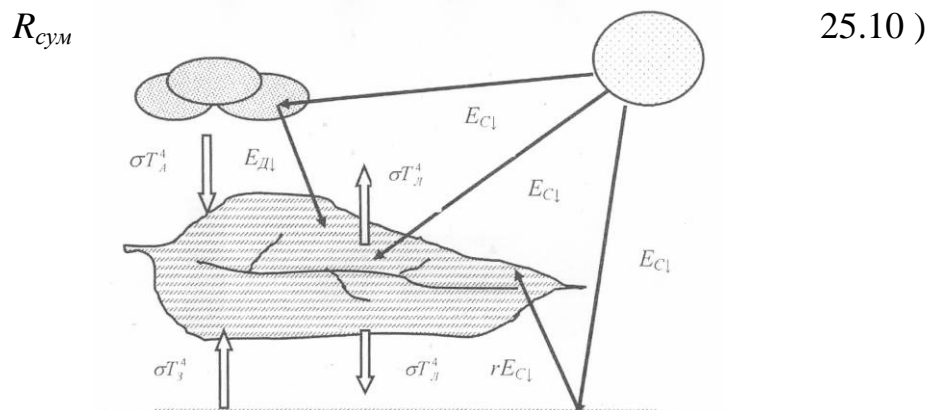


Рис. 25.7. Енергетичний баланс листка

Енергія, що описується рівнянням ( 25.10 ), витрачається на такі процеси, що відбуваються у листку або рослині в цілому:

$$R_{\text{сум}} = G + \lambda E + H, \quad (25.11)$$

де  $G$  – потік теплоти через земну поверхню;  $\lambda E$  – прихована теплота;  $H$  – відчутна теплота (рис. 25.8).

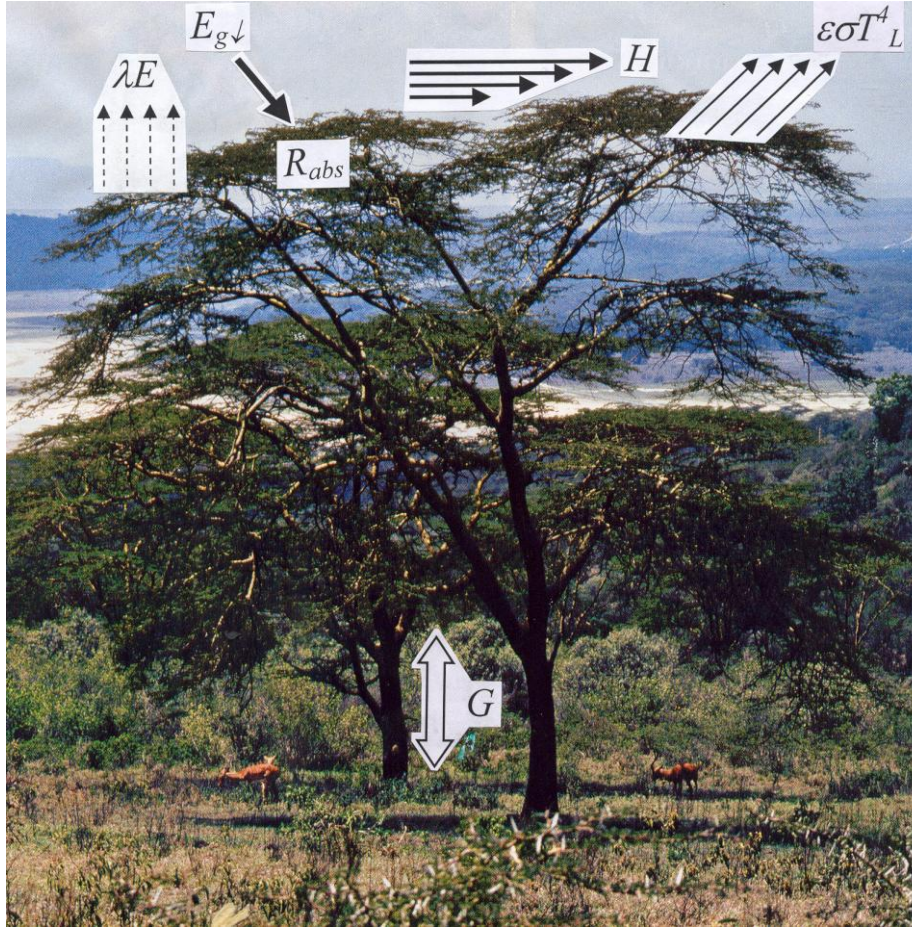


Рис. 25.8. Основні процеси, що описують обмін енергією рослини з навколишнім середовищем (пояснення в тексті)

Загальне рівняння енергетичного балансу листка або рослини матиме вигляд:

$$a_L (1 + r) E_{C\downarrow} + a_{L\gamma} \sigma (T_A^4 + \varepsilon_3 T_3^4) - 2 \varepsilon_{L\gamma} \sigma T_L^4 = G + \lambda E + H. \quad (25.12)$$



### 25.10. Енергетичний баланс тварини

Рівняння загального енергетичного балансу тварини описується рівнянням:

$$R_{\text{сум}} + M = \varepsilon \sigma T_s^4 - H - G - \lambda E, \quad (25.13)$$

де  $R_{\text{сум}}$  – сумарна кількість випромінювання, поглинутого поверхнею тварини;  $M$  – швидкість продукції теплоти твариною за рахунок метаболічних процесів з одиниці площі тварини;  $\varepsilon \sigma T_s^4$  – втрати енергії завдяки тепловому випромінюванню;  $H$  – відчутна теплота;  $\lambda E$  – прихована теплота (випаровування);  $G$  – потік теплоти через земну поверхню (рис. 25.9).

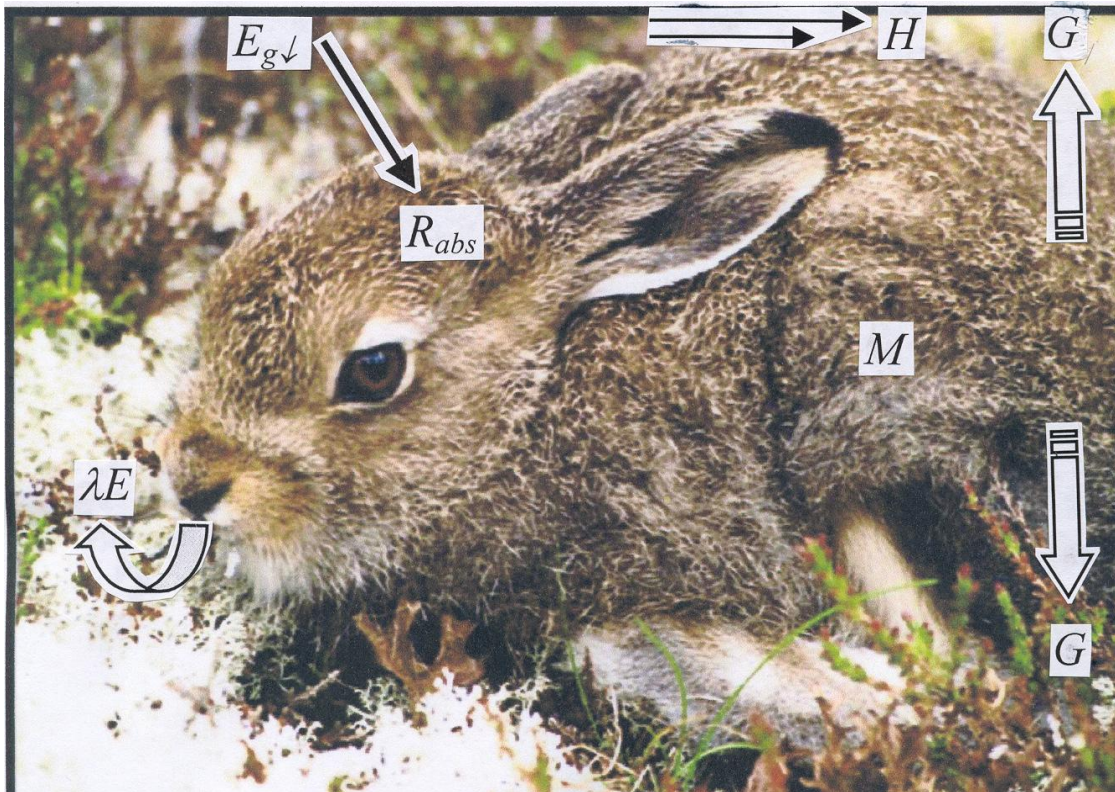


Рис. 25.9. Основні процеси, що описують обмін енергією тварини з навколишнім середовищем (пояснення в тексті)

Принциповою відміною енергетичного балансу тварини є *метаболізм* – сукупність хімічних процесів, що відбуваються в організмі тварини, завдяки яким підтримується життєдіяльність та структура

живого організму, його ріст, репродукція та реакція на навколишнє середовище.

Швидкість продукції теплоти  $M$  за рахунок метаболічних процесів можна оцінити з одиниці поверхні  $S$  або маси  $m$  тіла тварини за допомогою виразів:

$$S = 0,1m^{2/3} \quad (25.14)$$

та

$$M_b = Cm^{3/4}, \quad (25.15)$$

де  $C$  – стала ( $C = 3\text{--}5\%$  для ендотормів та близько  $5\%$  для пойкилотермів при температурі  $20^\circ\text{C}$ ). Тут  $M_b$  вимірюється в  $\text{Вт}$ ;  $m$  – в  $\text{кг}$ .

Типові значення  $M_b$  для ендотермів варіюють від  $30$  до  $50 \text{ Вт/м}^2$ .

### 25.11. Енергетичний баланс водойм

Енергетичний баланс водних резервуарів можна представити таким рівнянням:

$$R_{\text{сум}} = H_n + H_{\text{тк}} + H + \lambda E + H_{\text{зв}}, \quad (25.16)$$

де  $R_{\text{сум}} = (1 - a) E_{g\downarrow} - \varepsilon\sigma(T_B^4 - T_A^4)$  – сумарне випромінювання водної поверхні;  $E_{g\downarrow}$  – короткохвильове сонячне випромінювання, що падає на водну поверхню ( $\text{Вт/м}^2$ );  $a$  – альбеда або доля сонячного випромінювання, що відбивається від водної поверхні;  $\varepsilon\sigma T_B^4$  – довгохвильове випромінювання водної поверхні;  $\varepsilon\sigma T_A^4$  – довгохвильове атмосферне випромінювання, що падає на водну поверхню;  $H_n$  – теплова енергія, що накопичується водою;  $H_{\text{тк}}$  – сумарна енергія, що переноситься потоком води через теплопровідність або конвекцію;  $H$  – відчутна теплота;  $\lambda E$  – прихована теплота (випаровування);  $H_{\text{зв}}$  – тепловий потік у ґрунтові води (рис. 25.10).

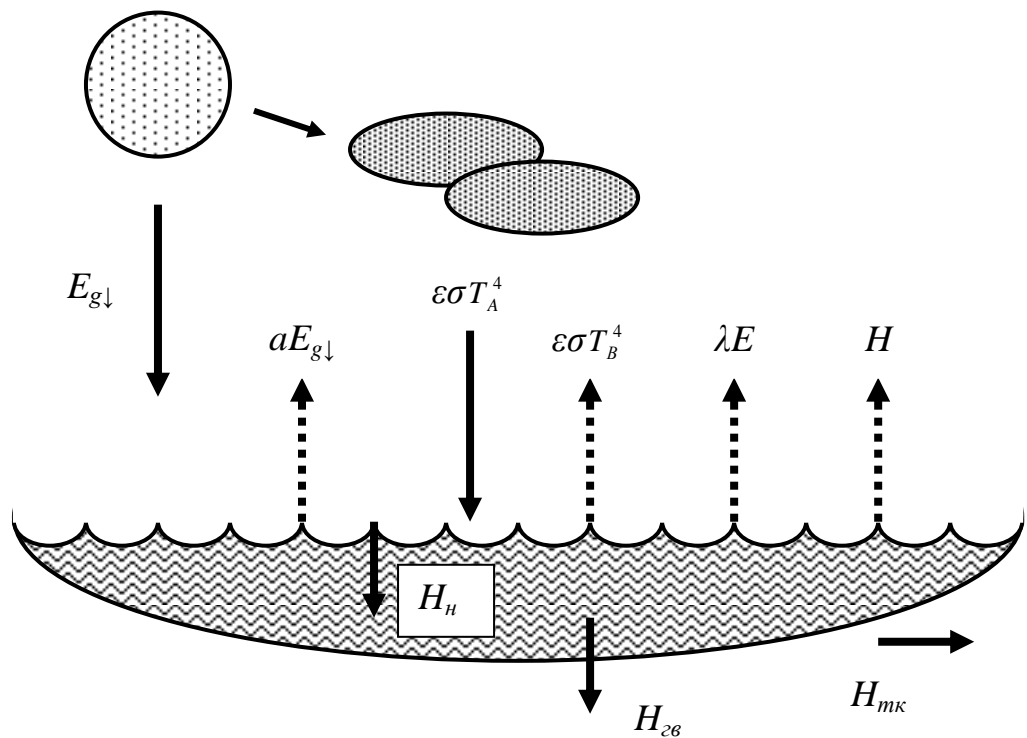


Рис. 25.10. Енергетичний баланс водойм

## Практичні завдання

### Енергетичний баланс

#### Приклад

Визначити сумарне випромінювання  $R_{\text{сум}}$  земної поверхні за такими умовами: інтенсивність короткохвильового сонячного випромінювання, що падає на земну поверхню,  $E_{g\downarrow} = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ; альbedo  $a = 0,2$ ; випромінювальна здатність  $\varepsilon = 0,95$ ;  $\varepsilon_3$  – випромінювальна здатність ґрунту  $\varepsilon_3 = 1,0$ ; температура поверхні  $T_s = 300 \text{ К}$ ; інтенсивність довгохвильового атмосферного випромінювання  $\varepsilon\sigma T_A^4 = 250 \text{ Вт/м}^2$ .

#### Розв'язання

Підставляємо дані у рівняння ( 25.7 ):

$$R_{\text{сум}} = (1 - a) E_{g\downarrow} - \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_A^4) = \\ = (1 - 0,2) \cdot 1000 \text{ Вт/м}^2 - 0,95 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4 \cdot (300 \text{ К})^4 + 250 \text{ Вт/м}^2 = 610 \text{ Вт/м}^2.$$

### Контрольне завдання

Визначити сумарне випромінювання  $R_{\text{сум}}$  листка за такими умовами: інтенсивність короткохвильового сонячного випромінювання, що падає на земну поверхню,  $E_{g\downarrow} = 840 \text{ Вт/м}^2$ ; поглинання листком сонячного випромінювання  $a_L = 0,6$ ; відбивання сонячного випромінювання земною поверхнею  $r = 0,2$ ; температура листка  $T_L = 293 \text{ К}$ ; температура повітря  $T_A = 253 \text{ К}$ ; частка енергії падаючого інфрачервоного випромінювання, поглинутого листком  $a_{L\text{ч}} = 0,96$ ; випромінювальна здатність листка  $\varepsilon_{L\text{ч}} = 0,96$ .

Відповідь:  $370 \text{ Вт/м}^2$ .

### Контрольне завдання

Визначити інтенсивність  $R_{\text{сум}}$  випромінювання, поглинутого листком розмірами  $A = B = 0,05 \text{ м}$ , якщо температура листка  $T_L = 27,1^\circ\text{C}$ , температура повітря  $T_n = 20^\circ\text{C}$ , швидкість вітру  $v = 0,1 \text{ м/с}$ , відносна вологість  $r = 0,8$ , внутрішній опір листка  $r_L = 500 \text{ с/м}$ , стала  $k_2 = 200 \text{ с}^{1/2}\cdot\text{м}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 0,96$ , а енергетичний баланс листка визначається за виразом:

$$R_{\text{сум}} = \varepsilon \sigma (T_L^4 + 273)^4 - k_L \left( \frac{v}{A} \right)^{0,5} (T_L - T_A) + \lambda(T_L) \frac{d_{sL} - r d_{sep}}{R_L + k_2 \left( \frac{A^{0,3} B^{0,2}}{v^{0,5}} \right)}. \quad (25.17)$$

Відповідь:  $600 \text{ Вт/м}^2$ .

### Відчутна теплота $H$

Температурний профіль над однорідною поверхнею в стаціонарних умовах описується рівнянням:

$$T(z) = T_0 - \frac{H}{0,4 \rho c U^*} \ln \frac{z-d}{z_H}, \quad (25.18)$$

де  $T(z)$  – середня температура повітря на висоті  $z$ ;  $T_0$  – аеродинамічна температура земної поверхні;  $H$  – відчутна теплота (тепловий потік від поверхні до повітря);  $\rho c$  – об’ємна теплоємність повітря ( $1200 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot(^{\circ}\text{C})^{-1}$  при  $20^\circ\text{C}$  на рівні моря;  $d$  – зміщення нульової поверхні;  $U^*$  – швидкість тертя;  $z_H$  – параметр шорсткості для переносу теплоти.

Для плоскої гладенької поверхні  $d = 0$ . Однорідний рослинний покрив характеризується такими співвідношеннями:

$$z_H \cong 0,02h; \quad d \cong 0,6h, \quad (25.19)$$

де  $h$  – висота рослинного покриву.

### Приклад

Результати вимірювання температури над рослинним покривом висотою  $10 \text{ см}$  в ясний день наведено в таблиці:

Висота $z$ , м	0,2	0,4	0,8	1,6
Температура, $^{\circ}\text{C}$	26	24	23	21

Визначити аеродинамічну температуру  $T_0$  земної поверхні, якщо швидкість тертя  $U^* = 0,2$  м/с.

### Розв'язання

Використовуючи співвідношення ( 25.19 ), визначимо величини – параметра шорсткості та зміщення нульової поверхні:  $z_H = 0,002$  м;  $d = 0,06$  м.

Обчислюємо величини  $(z - d)/z_H$  та  $\ln(z - d)/z_H$ ; результати заносимо в таблицю:

Висота $z$ , м	0,2	0,4	0,8	1,6
Температура, $^{\circ}\text{C}$	26	24	23	21
$(z - d)/z_H$	70	170	370	770
$\ln(z - d)/z_H$	4,25	5,14	5,91	6,65

динамі  
Отже, '

аеро-  
цис ).

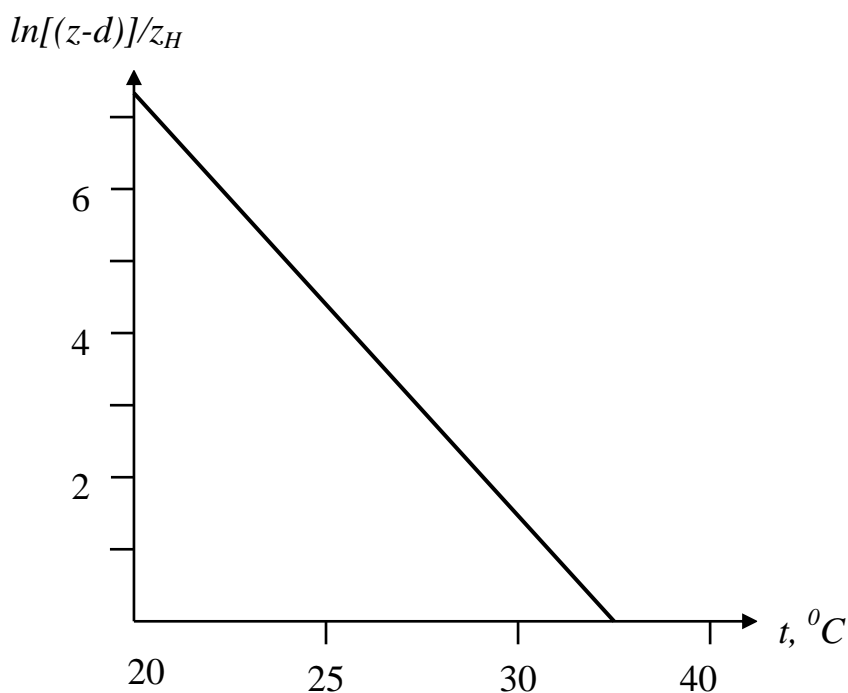


Рис. 25.11. Графік залежності  $\ln(z - d)/z_H$  від температури

Підставляємо  $T_0 = 35$   $^{\circ}\text{C}$  в рівняння ( 25.18 ) і знаходимо значення відчутної теплоти:

$$H = (T_0 - T)^{\circ}\text{C} \cdot [0,4 \cdot \rho \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot (^{\circ}\text{C})^{-1} \cdot U^* (\text{м/с})] / \ln(z - d)/z_H =$$

$$= (35 - 26) ^\circ\text{C} \cdot [0,4 \cdot \rho \cdot 1200 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot (^\circ\text{C})^{-1} \cdot 0,2 \text{ м/с}] / 4,25 = \\ = 203 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с} = 203 \text{ Вт/м}^2.$$

Таким чином, багато процесів, що відбуваються у живому організмі або навколишньому середовищі, можна описати одним «магічним рівнянням», яке характеризує різноманітні потоки (дифузійний, об'ємний, транспіраційний, дисперсійний, тепловий, рух рідини крізь пористе середовище тощо), пропорційні рушійним силам. Це рівняння витікає з лінійного закону термодинаміки необоротних процесів.

## ДОДАТОК

### Психрометричні таблиці

#### 1. Пружність водяної пари, мм рт. ст.

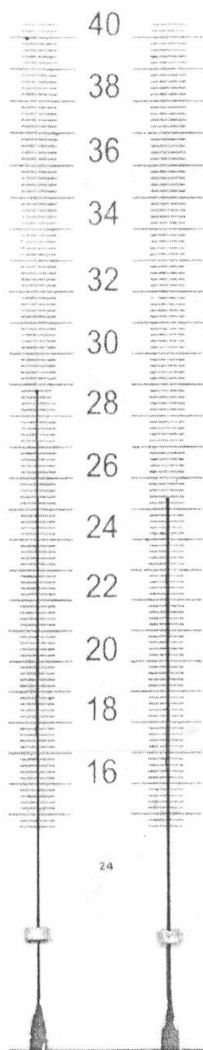
Температура повітря, °С	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	4,58	4,61	4,65	4,68	4,71	4,75	4,79	4,82	4,85	4,89
1	4,92	4,96	5,00	5,03	5,07	5,10	5,15	5,18	5,21	5,25
2	5,29	5,33	5,37	5,41	5,45	5,48	5,52	5,57	5,60	5,64
3	5,69	5,72	5,76	5,84	5,89	5,93	5,93	5,97	6,02	6,05
4	6,10	6,14	6,18	6,23	6,27	6,32	6,36	6,41	6,45	6,50
5	6,54	6,59	6,63	6,68	6,73	6,77	6,82	6,87	6,92	6,96
6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7,41	7,46
7	7,52	7,54	7,61	7,67	7,72	7,77	7,83	7,88	7,94	7,99
8	8,04	8,10	8,15	8,21	8,27	8,33	8,38	8,44	8,49	8,55
9	8,61	8,67	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08	9,15
10	9,21	9,27	9,33	9,40	9,46	9,53	9,59	9,65	9,71	9,78
11	9,85	9,91	9,98	10,0	10,1	10,1	10,2	10,3	10,3	10,4
12	10,5	10,5	10,6	10,7	10,8	10,8	10,9	11,0	11,0	11,1
13	11,2	11,3	11,3	11,4	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8	11,91
14	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7
15	12,7	12,8	12,9	13,0	13,1	13,2	13,2	13,3	13,4	13,5
16	13,6	13,7	13,8	13,8	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4
17	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,2	15,3
18	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16,0	16,1	16,2	16,3
19	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	17,0	17,1	17,2	17,3	17,4
20	17,5	17,6	17,7	17,8	17,9	18,0	18,1	18,3	18,4	18,5
21	18,6	18,7	18,8	18,9	19,1	19,2	19,3	19,4	19,5	19,71
22	19,8	19,9	20,0	20,2	20,3	20,4	20,5	20,6	20,8	20,9
23	21,0	21,1	21,3	21,4	21,5	21,7	21,8	21,9	22,1	22,2
24	22,3	22,5	22,6	22,7	22,9	23,0	23,2	23,3	23,4	23,6
25	23,7	23,9	24,0	24,1	24,3	24,4	24,6	24,7	24,9	25,0
26	25,2	25,3	25,5	25,6	25,8	25,9	26,1	26,2	26,4	26,5
27	26,7	26,9	27,0	27,2	27,3	27,5	27,7	27,8	28,1	28,1
28	28,3	28,5	28,6	28,8	29,0	29,1	29,3	29,5	29,7	29,8
29	30,0	30,2	30,4	30,5	30,7	30,9	31,1	31,2	31,4	31,6
30	31,8	32,0	32,2	32,3	32,5	32,7	32,9	33,1	33,3	33,5
31	33,7	33,8	34,0	34,2	34,4	34,6	34,8	35,0	35,2	35,4
32	35,6	35,8	36,0	36,2	36,4	36,6	36,8	37,1	37,3	37,5
33	37,7	37,9	38,1	38,3	38,5	38,8	39,0	39,2	39,4	39,6
34	39,9	40,1	40,3	40,5	40,8	41,0	41,2	41,4	41,7	41,9
35	42,1	42,4	42,6	42,8	43,1	43,3	43,6	43,8	44,0	44,3
36	44,5	44,8	45,0	45,3	45,5	45,8	46,0	46,3	46,5	46,8
37	47,0	47,3	47,6	47,8	48,1	48,3	48,6	48,9	49,1	49,4
38	49,7	49,9	50,2	50,5	50,8	51,0	51,3	51,6	51,0	52,1
39	52,4	52,6	53,0	53,3	53,6	53,8	54,1	54,4	54,7	55,0

## 2. Пружність водяної пари, Па

Температура повітря, °С	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	611	615	620	624	629	633	638	642	647	652
1	656	661	666	671	676	680	686	690	695	700
2	705	710	716	721	726	731	736	742	747	752
3	758	763	768	779	785	790	790	796	802	807
4	813	819	824	830	836	842	848	854	860	866
5	872	878	884	891	897	903	909	916	922	928
6	935	941	948	954	961	968	974	981	988	995
7	1002	1008	1015	1022	1029	1036	1044	1051	1058	1065
8	1072	1080	1087	1095	1102	1110	1117	1125	1132	1140
9	1148	1156	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1220
10	1228	1236	1244	1253	1261	1270	1278	1287	1295	1304
11	1313	1321	1330	1339	1348	1357	1366	1375	1384	1393
12	1403	1412	1421	1431	1440	1450	1459	1469	1478	1488
13	1498	1508	1518	1528	1538	1548	1558	1568	1578	1588
14	1599	1609	1620	1630	1641	1651	1662	1673	1684	1695
15	1704	1715	1726	1737	1749	1760	1771	1783	1794	1806
16	1817	1829	1840	1852	1864	1876	1888	1900	1912	1924
17	1937	1949	1961	1974	1986	2000	2011	2024	2036	2050
18	2063	2076	2089	2102	2115	2129	2142	2155	2169	2183
19	2196	2210	2224	2238	2252	2266	2280	2294	2308	2323
20	2337	2352	2366	2381	2396	2410	2425	2440	2455	2471
21	2486	2501	2517	2532	2548	2563	2579	2595	2611	2627
22	2643	2659	2675	2692	2708	2724	2741	2758	2775	2791
23	2808	2825	2843	2860	2877	2894	2912	2930	2947	2965
24	2983	3001	3019	3037	3055	3074	3092	3110	3129	3148
25	3167	3186	3205	3224	3243	3262	3282	3301	3321	3341
26	3361	3381	3401	3421	3441	3461	3482	3502	3523	3544
27	3565	3586	3607	3628	3649	3671	3692	3714	3735	3757
28	3779	3801	3824	3846	3868	3891	3913	3936	3959	3982
29	4005	4028	4052	4075	4099	4122	4146	4170	419	4218
30	4243	4267	4292	4316	4341	4366	4391	4416	4441	4467
31	4492	4518	4544	4570	4596	4622	4648	4675	4701	4728
32	4755	4782	4809	4836	4863	4891	4918	4946	4974	5002
33	5030	5059	5087	5116	5144	5173	5202	5231	5261	5290
34	5320	5349	5379	5409	5439	5470	5500	5531	5561	5592
35	5623	5654	5686	5717	5749	5781	5813	5845	5877	5909
36	5942	5975	6007	6040	6074	6107	6140	6174	6208	6242
37	6276	6310	6345	6379	6414	6449	6484	6519	6555	6590
38	6626	6662	6698	6734	6771	6807	6844	6881	6918	6955
39	6993	7031	7068	7106	7145	7183	7221	7260	7299	7338



### 3. Панель психрометра Августа



ГІГРОМЕТР ПСИХРОМЕТРИЧНИЙ ВИТ-2

Різниця показів термометрів, °C											
$t_{\text{сух}}, ^\circ\text{C}$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Відносна вологість, %											
20	90	85	81	76	71	67	63	58	54		
21	90	85	81	77	72	68	64	59	55	51	47
22	91	85	82	77	73	69	64	61	56	52	46
23	91	86	82	78	74	70	65	62	58	54	50
24	91	87	83	78	74	70	66	62	59	55	51
25	91	87	83	79	75	71	67	63	60	56	52
26	92	88	84	80	76	72	69	65	61	58	54
27	92	88	84	80	77	73	69	66	62	59	55
28	92	88	84	81	77	73	70	66	63	60	56
29	92	88	85	81	78	74	71	67	64	61	57
30	92	89	85	82	78	75	71	68	65	61	58
31	93	89	85	82	78	75	72	69	65	62	59
32	93	89	86	82	79	76	72	69	66	63	60
33	93	89	86	83	79	76	73	70	67	64	61
34		90	86	83	80	76	73	70	67	64	61
35		90	86	83	80	77	74	71	68	65	62
36		90	87	83	80	77	74	71	68	66	63
37		90	87	84	81	78	75	72	69	66	63
38		90	87	84	81	78	75	72	70	67	64
39		90	87	84	81	78	76	73	70	67	64
40		91	88	85	82	79	76	73	70	68	65

Різниця показів термометрів, °C											
$t_{\text{сух}}, ^\circ\text{C}$	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5
Відносна вологість, %											
20											
21											
22	44	41									
23	46	42	39								
24	48	44	40								
25	49	45	42	38							
26	51	49	44	41	39	35	32	29	26	23	20
27	52	50	46	43	41	36	30	30	28	25	22
28	53	51	47	44	42	38	35	32	29	27	24
29	54	52	48	45	43	39	36	34	31	28	25
30	55	53	49	46	44	41	38	35	32	30	27
31	56	54	50	47	46	42	39	36	34	31	29
32	57	55	51	48	47	43	40	38	35	33	30
33	58	56	52	49	48	44	41	39	36	34	32
34	59	57	53	50	49	45	43	40	38	35	33
35	59	57	54	51	49	46	44	41	39	36	34
36	60	58	55	52	50	47	45	42	40	38	35
37	61	59	56	53	51	48	46	43	41	39	36
38	61	59	56	54	52	49	48	44	42	40	37
39	62	60	57	55	53	50	48	45	43	41	39
40	63	61	58	55	53	51	48	46	44	42	39

#### 4. Густина повітря і води

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

#### 5. Коефіцієнт в'язкості повітря і води

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

### Енергетичні величини

Потік випромінювання  $\Phi_e$  – потужність, що висилається, переноситься або отримується у вигляді випромінювання:

$$\Phi_e = \frac{dQ}{dt}, \quad (\text{Д1})$$

де  $Q$  – енергія випромінювання.

Одиниця потоку випромінювання – ват [Вт].

Сила випромінювання  $I_e$  – відношення потоку випромінювання, що виходить від джерела або елемента джерела в даному напрямку, усередині елементарного тілесного кута, який містить даний напрямок, до цього елементарного тілесного кута:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{dt}. \quad (\text{Д2})$$

Одиниця сили випромінювання – ват на стерadian [Вт/ср].

*Енергетична яскравість*  $L_e$  – в точці поверхні і в заданому напрямку відношення сили випромінювання елемента поверхні до площі ортогональної проекції цього елемента на площину, перпендикулярну до цього напрямку:

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos \alpha}, \quad (Д3)$$

де  $dS$  – площа елемента поверхні, що випромінює;  $\alpha$  – кут, який визначає напрямок випромінювання.

Одиниця енергетичної яскравості – *ват на стерадіан-квадратний метр* [ $Вт/ср \cdot м^2$ ].

*Енергетична освітленість*  $E_e$  в точці поверхні – відношення потоку випромінювання, що падає на елемент поверхні, до площі цього елемента:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (Д4)$$

Одиниця енергетичної освітленості – *ват на квадратний метр* [ $Вт/м^2$ ].

*Енергетична світність*  $M_e$  в точці поверхні – відношення потоку випромінювання, що виходить від елемента поверхні, до площі цього елемента:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (Д5)$$

Одиниця енергетичної світності – *ват на квадратний метр* [ $Вт/м^2$ ].

### Світлові величини

*Світловий потік*  $\Phi_c$  – при нерівномірному розподілі випромінювання у просторі світловий потік в тілесному куті  $\omega$  визначається як:

$$\Phi_c = \int I_c \cdot d\omega, \quad (Д6)$$

а при рівномірному висиланні світла в тілесному куті світловий потік визначається так:

$$\Phi_c = I_c \cdot \omega, \quad (Д7)$$

де  $I_c$  – сила світла.

Одиниця світлового потоку – *люмен* [ $лм$ ].

*Сила світла*  $I_c$  визначається так:

$$I_c = \frac{d\Phi_c}{d\omega}. \quad (Д8)$$

Одиниця сили світла – *кандела*  $[кд] = [лм/ср]$ .

*Яскравість*  $L_c$  в точці поверхні і в даному напрямку – відношення інтенсивності світла елемента поверхні до площі ортогональної проєкції цього елемента на площину, перпендикулярну до даного напрямку:

$$L_c = \frac{dI_c}{dS \cdot \cos \alpha}, \quad (Д9)$$

де  $dS$  – площа елемента поверхні, що випромінює;  $\alpha$  – кут, який визначає напрямок випромінювання.

Одиниця яскравості – *кандела на квадратний метр*  $[кд/м^2]$ .

*Освітленість*  $E_c$  в точці поверхні – відношення світлового потоку, що падає на елемент поверхні, до площі цього елемента:

$$E_c = \frac{d\Phi_c}{dS}. \quad (Д10)$$

Одиниця освітленості – *люкс*  $[лк] = [лм/м^2]$ .

*Світність*  $M_c$  в точці поверхні – відношення світлового потоку, що виходить з елемента поверхні, до площі цього елемента:

$$M_c = \frac{d\Phi_c}{dS}. \quad (Д11)$$

Одиниця світності – *люмен на квадратний метр*  $[лм/м^2]$ .

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Посудін Ю.І. *Спектроскопічний моніторинг агросфери*. Київ, Урожай, 1998. –127 с.

Посудін Ю.І. *Фізика і біофізика навколишнього середовища*. Київ, Світ, 2000. –300 с.

Посудін Ю.І. *Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища*. Київ, Світ, 2003. –286 с.

Посудін Ю.І. *Фізика з основами біофізики*. Київ, Світ, 2003. –400 с.

Посудін Ю.І. *Біофізика рослин*. Нова книга, Вінниця, 2004. –252 с.

Посудін Ю.І. *Методи неруйнівної оцінки якості та безпеки сільськогосподарських і харчових продуктів*. Київ: Арістей, 2005. –407 с.

Посудін Ю.І. *Практикум з методів вимірювання параметрів навколишнього середовища*. Київ, ЗАТ „НІЧЛАВА”, 2007. –226 с.

Посудін Ю.І. *Фізика*. БНАУ, 2008. –464 с.

Посудін Ю.І. *Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища* (Навчальний посібник). К.: Видавничий центр НУБіП України. 2009. –234 с.

Akoev G.N., Alekseev N.P., Krylov B.V. (1988) *Mechanoreceptors. Their Functional Organization*. Springer Verlag. Berlin/ Heidelberg/ New York/ London /Paris /Tokyo, –197 p.

*Ambio. A Journal of the Human Environment. Special Issue. 1995. Vol. XXIV, N 3, May.*

*Atmospheric Microbial Aerosols. Theory and Application* (1994). B.Lighthart and A.J. Mohr, eds. Charman Hall, –397 p.

Barth, F. G. (1982) Spiders and vibratory signals: sensory reception and behavioral significance. In: *Spider Communication Mechanisms and Ecological Significance*, (Ed. by Witt, P. N. & Rovner, J. S.), pp. 66–122. Princeton, New Jersey: Princeton Univ. Press.

Benedict R.P. (1984) *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements*, John Wiley & Sons, New York.

*Bioacoustics*, B. Lewis, ed. London-N.Y.-Paris-San Diego-San Francisco-San Paulo-Sydney-Tokyo-Toronto, Academic Press, 1983.

*Bioaerosols Handbook* (1995) C.S.Cox and C.M.Wathes, eds. Lewis Publishers, Boca Raton-London-Tokyo. –623 p.

Blake M.P., Mitchell W.S.(1972) *Vibration and Acoustical Measurement Handbook*, Spartan Books, New York-Washington. –649 p.

Boeker E., Rienk van Grondelle (2001) *Environmental Science: Physical Principles and Applications*. Wiley & Sons, Australia.

Brownell, P. & Farley, R. D. (1979) Detection of vibrations in sand by tarsal sense organs of the nocturnal scorpion, *Paruroctonus mesaensis*// *J.Comp.Physiol. A* 131: 23-30.

Brownell, P. & Farley, R. D. (1979) Orientation to vibrations in sand by the nocturnal scorpion *Paruroctonus mesaensis*: mechanism of target localization// *J. Comp. Physiol. A* 131: 31–38.

Brownell, P. H. (1977) Compressional and surface waves in sand: used by desert scorpions to locate prey// *Science* 197:479–482.

Campbell G.S., Norman J.M. (1998) *Environmental Biophysics*. 2nd ed. Springer: New York. – 286 p.

Chapin III F.S., Matson P.A., Mooney H.A. (2002) *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer-Verlag.

Chizhevsky A.L. (1976) *The Terrestrial Echo of Solar Storms*. Moscow. –366 p.

*Comparative Hearing: Mammals*. (1994) R. Fay & A.N. Popper, eds. Springer Handbook of Auditory Research Series. Springer-Verlag, NY.

Craig H, Gordon L. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In: *Symposium on marine geochemistry*. Graduate school of Oceanography, Univ. Rhode Island, Occ Publ. No3: 277.

Datta A.K. (2002) *Biological and Bioenvironmental Heat and Mass Transfer*. Marcel Dekker AG. New York, Basel.

Dooling, R.J. (1980). Behavior and psychophysics of hearing in birds. In A. Popper and R. Fay (Eds.), *Comparative Studies of Hearing in Vertebrates*. (pp. 261–288). New York: Springer-Verlag.

Dusenbury D.B. (1992) *Sensory Ecology. How Organisms Acquire and Respond to Information*. W.H. Freeman and Company, N.Y.–558 p.

Eagleson P.S. (2002) *Ecohydrology. Darwinian expression of vegetation form and function* Cambridge Univ. Press.

Ehleringer J.R., Cerling T.E. (2002) *Stable Isotopes*. Vol. 2, The Earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change, pp 544-550, Ed.H.A. Mooney and J.G. Canadell. In: *Encyclopedia of Global Environmental Change*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.

Evans, H. D. (1998). *The Physiology of Fishes*, Second Edition. CRC Press, New York.

Farquhar T.T., O`Leary M.N., Berry J.A. (1982). On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves// *Australian Journal of Plant Physiology*, 9: 121–137.

Fay R.R.. (1988). *Hearing in Vertebrates: a Psychophysics Databook*. Hill-Fay Associates, Winnetka IL.

Folk G.E., Riedesel M.L., Thrift D.L. (1998) *Principles of Integrative Environmental Physiology*. Austin & Winfield, Publishers. –992 p.

Gates D. M. (1980) *Biophysical Ecology*. Dover Publications, Inc. Mineola, New York. – 611 p.

Gilbert, C., G. Robertson, Y. Le Maho, Y. Naito, and A. Ancel (2006). Huddling behavior in Emperor Penguins: dynamics of huddling. *Physiology & Behavior* 88: 479–488.

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.

Grob R.L., Barry E.F. (2004) *Modern Practice of Gas Chromatography*, Wiley-Interscience, Wiley, John & Sons, Incorporated.

Guyot G. (1998) *Physics of the Environment and Climate*. John Wiley & Sons, Inc. Chichester-New York-Weinheim-Brisbane-Singapore-Toronto.–632 p.

Haagen-Smit A.J. (1952) Chemistry and Physilogy of Los Angeles Smog// *Industrial Engineering Chemistry*, 44: 1342–1346.

Häder, D.-P. and Lebert, M. (2001). Graviperception and gravitaxis in algae// *Adv. Space Res.* 27: 861–870

Hallet R.F. *Physics for the Biological Sciences. A Topical Approach to Biophysical Concepts*. Chapman and Hall, 1982.–255 c.

Hemmersbach, R. and Hader, D.-P. (1999) Graviresponses of certain ciliates and flagellates// *FASEB J.* 13 (Suppl.), S69 – S75.

Hemmersbach, R., Volkmann, D. and Hader, D.-P. (1999). Graviorientation in protists and plants// *J. Plant Physiol.* 154: 1–15.

Henry J.G., Heike G.W. (1996) *Environmental Science and Engineering*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey. –778 p.

High Arctic Glacier Foreland// *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, V.35, No 3, P. 377-383.

Hoefs J. *Stable Isotope Geochemistry*. 2004. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 239 p.

Hopkins W.G. (1999) *Introduction to Plant Physiology*. John Wiley & Sons, Inc. N.Y.-Chichester-Weinheim-Brisbane-Singapore-Toronto.– 512 p.

*Instrumentation for Environmental Physiology* (1985) Cambridge Univ. Press: Cambridge.–242 p.

Jones H.G. (2000) *Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University Press. –428 p.

Kondepudi D., Prigogine I. *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*. John Wiley & Sons, Inc.: New York, 1998.–486 p.

- Kryter K.D. (1994) *The Handbook of Hearing and the Effects of Noise*. Academic Press, San Diego-New York-Boston. –673 p.
- Ksenzhek O.S., Volkov A.G. (1998) *Plant Energetics*. Academic Press: San Diego.– 416 p.
- Kumagai T., Aoki S., Shimizu T., Otsuki K. (2007) Sap flow estimates of stand transpiration at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed//*Tree Physiology*, 27: 161–168.
- Kume A., Bekku Y.S., Hanba Y.T., Kanda H. (2003) Carbon Isotope Discrimination in Diverging Growth Forms of *Saxifraga oppositifolia* in Different Successional Stages in a High Arctic Glacier Foreland//*Arctic and Alpine Research:Abstracts*, V. 35, No. 2, P. 377–383.
- Levis B.(1983)*Bioacoustics. A comparative approach*. Acad. Press.– 493 p.
- Mar Trigo Perez M., Cabalero M.M., Sanchez J.G., Criado M.R., Fernandez S.D., Artero B.C.(2007) *El pollen en la atmosfera de Velez-Malaga*,Malaga.
- Marler, P. (2004). Science and birdsong: The good old days. In: *Nature's Music: The Science of Birdsong*, P. Marler & H. Slabbekoorn (eds.). Elsevier Academic Press, San Diego, CA , pp. 1–38.
- Marshall B., Woodward F.I. *Instrumentation for Environmental Physiology*. 1985, Cambridge University Press.-242 p.
- Montheith J.L., Unsworth M. (1990) *Principles of Environmental Physics*. 2nd ed. Edward Arnold: London.–291 p.
- Mook W. G. (2006) Introduction to Isotope Hydrology. Stable and Radioactive Isotopes of Hydrogen, Oxygen and Carbon. Taylor & Francis. London/Lieden/New York/Philadelphia/Singapore. –226 p.
- Mook W.G. (2006) *Introduction to Isotope Hydrology: Stable and Radioactive Isotopes of Hydrogen, Carbon and Oxygen*.London: Taylor & Francis. 226 p.
- Nobel P.S. (2005) *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. Elsevier Acad. Press. Burlington. – 567 p.
- Organic Indoor Air Pollutant: Occurrence-Measurement-Evaluation* (1999) Ed. T. Salthammer. Wiley-VCH, N.Y.
- Pal Arya. (2001) *Introduction to Micrometeorology*. Elsevier Science & Technology. 420 p.
- Patra K.C. (2000) *Hydrology and Water Resources Engineering* Alpha Science International Ltd. 561 p.
- Payne K. Elephant Talk// *National Geographic*: USA. August 1989 issue. pp. 264–277.
- Payne, K.B., et al. (1986). Infrasonic calls from the Asian elephant (*Elephas maximus*)//*Behavioral Ecology and Sociobiology*., 18, 297–301



Poole, J.H., Payne, K., Langbauer, W.R. Jr., Moss, C.J., (1988). The social contexts of some very low frequency calls of African elephants// *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 22:385–392.

Posudin Yu. (2004) *Physics with Fundamentals of Biophysics*. Agrarna Nauka.–195 p.

Posudin Yu., Murakami A., Kamiya M., Kawai H. (2004) Effect of light of different intensity on chlorophyll fluorescence of *Ulva pertusa* Kjellman (*Chlorophyta*)//*Int. J. on Algae*, V.6(3). –P.235-250.

Posudin Yu.I.(1998) *Lasers in Agriculture*. Science Publishers, Inc. Enfield, New Hampshire.–188 p.

Posudin Yuriy (2007) *Practical Spectroscopy in Agriculture and Food Science*. Science Publishers, Enfield.–196 p.

Rose A.H. (1967) *Thermobiology*. Academic Press, London, N.Y.–653 p.

Sakuratani T. (1981) A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *J. Agric. Meteorol.* 37: 9–17.

Sato Y., Kumagai T., Kume A., Otsuki K., Ogawa S. (2004) Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers – the effects of rainfall conditions and leaf shapes//*Hydrological Processes*, 18: 3007–3018.

Scott H. Don. (2000) *Soil Physics: Agricultural and Environmental Applications*. Iowa State Univ.Press., Ames, –421 p.

Shimizu T. (2007) Practical applicability of high frequency correction theories to CO<sub>2</sub> flux measured by a closed-path system//*Boundary-Layer Meteorol*, 122: 417-438.

Spieksma, F. T. (1991) Aerobiology in the Nineties: Aerobiology and pollinosis// *International Aerobiology Newsletter*, 34, 1–5.

Stebbins W. C. (1983) *The Acoustic Sense of Animals*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts and London, England. –168 p.

Strangeways I. (2006) *Precipitation: Theory, Measurement and Distribution*. Cambridge University Press.

Sturz, W., Kempter, R., van Hemmen, J.L. Theory of arachnid prey localization//*Physical Review Letters*. 2000. Vol 84: 5668–5671.

Sybesma C. *Biophysics, an introduction*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1989. –478 p.

Taiz L., Zeiger E. (1998) *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Inc. Publ.: Sunderland, Massachusetts. –792 p.

Tavolga, W.N. (1977) Sound Production in Fishes// *Benchmark Papers in Animal Behavior*, V.9. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Pages 10–29.

Tavolga, W.N. (1980) Hearing and sound production in fishes in relation to fisheries management. Fish behavior and its use in the capture

and culture of fishes. International Center for Living Aquatic Resources Management. Manila, Philippines.

Tembrock, G. (1963). *Acoustic Behavior of Mammals*. (Busnel, R.G., ed). Elsevier Publications Co; Amsterdam., pp. 751–785.

Tempest W. (1976) *Infrasound and Low Frequency Vibration*, Academic Press, London, N.Y., San Francisco. –364 p.

Thielcke G.A. (1976) *Bird Sounds*, University of Michigan Press, Ann Arbor.

Udias A. (1999) *Principles of Seismology*. Cambridge Univ.Press, Cambridge.–475 p.

Ven Te Chow, Maidment D.R., Mays L.W. *Applied Hydrology*, (1988), McGraw-Hill Book Company, New York.

Viessman W., Lewis G.L. (2003) *Introduction to Hydrology*, Harper Collins College Publishers, 5th Edition.

Warfield D. (1973) The study of hearing in animals. In: W Gay, ed., *Methods of Animal Experimentation*, IV. Academic Press, London, pp 43–143.

Willmer P., Stone G., Johnston I. (2000) *Environmental Physiology of Animals*. Blackwell Science Ltd. –644 p.

Yost W.A., Nielsen D.W. (1985) *Fundamentals of Hearing. An Introduction*. 2nd ed. Fort Worth: Hartcourt College Publishers. –256 p.

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- Аерозолі та біоаерозолі, 249  
Акусторецепція у комах, 173  
Акусторецепція у птиці, 171  
Акусторецепція у риби, 172  
Акусторецепція у ссавців, 168  
Акусторецепція, 168  
Альbedo, 130  
Альбедометр, 136  
Аналізатор, 155  
Анемометр чашечкового типу, 29  
Анемометр доплерівський, 31  
Анемометр пропелерного типу, 30  
Анемометр ультразвуковий, 31  
Анемометр, 29  
Баланс енергетичний водойм, 312  
Баланс енергетичний земної поверхні, 307  
Баланс енергетичний листка та рослин, 309  
Баланс енергетичний тварини, 311  
Баланс енергетичний, 297  
Балансометр, 136  
Барограф, 17  
Барометр, 16  
Барометр-анероїд, 16  
Біофізика, 3  
Бура жирова тканина, 110  
Веретено м'язове, 159  
Вестибулорецепція, 155, 157  
Вимірювання вихрової коваріації, 274  
Вимірювання вібрацій, 43  
Вимірювання газообміну, 234  
Вимірювання озону, 301  
Вимірювання опадів, 144  
Вимірювання парникового ефекту, 306  
Вимірювання потоків соку, 219  
Вимірювання рівнів шуму, 75  
Вимірювання туману, 148  
Випаровування з водної поверхні, 240  
Випромінювання довгохвильове, 299  
Випромінювання короткохвильове, 299  
Випромінювання природні, 119  
Випромінювання фотосинтетично активне, 137  
Вібрації, 40  
Вібрація загальна, 42  
Вібрація локальна, 42  
Вітер, 22  
Вологість абсолютна повітря, 82  
Вологість відносна повітря, 82  
Вологість ґрунту, 92  
Вологість, 82  
Вплив тиску на живі організми, 9  
Вуха внутрішні, 169  
Вуха зовнішні, 168  
Вуха середні, 169  
Газообмін, 233  
Гігрометр волосяний, 87  
Гігрометр емнісний, 91  
Гігрометр конденсаційний, 91  
Гігрометр сорбційний, 90  
Гіперпірексія, 83  
Гіпертермія, 83  
Гіпоксія, 10  
Гіполімніон, 104  
Гравіорецепція рослин, 166  
Гравітаксис водоростей, 35  
Гравітація, 34  
Гравітропізм рослин, 37  
Гравіорецепція, 165

Густина потоку  
 фотосинтетичних фотонів, 138  
 Дефіцит вологості, 82  
 Дим тютюновий, 255  
 Дисперсія, 240  
 Дистанційне зондування опадів, 147  
 Дифузія крізь шар речовини, 210  
 Дифузія через клітини, 209  
 Дифузія, 207  
 Дозі кислотні, 148  
 Дощомір сифонний, 146  
 Дощомір, 144  
 Другий закон термодинаміки, 192  
 Екстрагування пари з ґрунту, 245  
 Електропровідність, 150  
 Емболія газова, 11  
 Енергія внутрішня, 190  
 Ентропія, 194, 195  
 Епілімніон, 104  
 Ефект парниковий, 303  
 Забруднення шумове, 74  
 Закон випромінювання Планка, 298  
 Закон Гагена-Пуазейля, 217  
 Закон Генрі, 11, 14  
 Закон зміщення Віна, 298  
 Закон Рауля, 13  
 Закон Стокса, 247  
 Закон Фур'є, 289  
 Закони Фіка, 207  
 Засоби транспортні, 235  
 Застосування ізотопів, 234  
 Заходи протівібраційні, 42  
 Збудливість рослинних клітин, 282  
 Землетруси, 46  
 Зміна ентропії, 188  
 Зміна ентропії, 198  
 Зоровий аналізатор птахів, 182  
 Зоровий аналізатор риб, 181  
 Зоровий аналізатор ссавців, 183  
 Зсув крові, 12  
 Зсув пороговий індукований шумом, 74  
 Ізоляція звукова, 77  
 Ізотопи стабільні, 142, 143  
 Ізотопи в опадах, 142  
 Інтенсивність опадів, 140  
 Інтенсивність сонячного випромінювання, 119  
 Інтерорецепція, 155, 157  
 Інтерцепція, 141  
 Кількість опадів, 140  
 Класифікація радіометрів, 131  
 Колектор пасивний струнний, 148  
 Коливання, 46  
 Ксилема, 215  
 Лінійний закон термодинаміки, 203  
 Мезосфера, 101  
 Металімніон, 104  
 Метод вихрової коваріації, 268, 271  
 Метод діелектричний, 95  
 Метод нейтронний, 93  
 Метод теплової дисипації, 220  
 Метод часової рефлектометрії, 96  
 Методи вимірювання аерозолів, 251  
 Методи електрокінетичні ремедіації, 287  
 Механізми зору ссавців, 185  
 Механорецептори шкіри, 155  
 Механорецептори, 155  
 Механорецепція у комах, 162  
 Механорецепція у риб, 161

Механорецепція, 155  
 Моделювання зміни швидкості вітру, 261, 264  
 Моделювання поширення забруднень, 241  
 Навколишнє природне середовище, 3  
 Наночастинки та ремедіація, 253  
 Негентропія, 199  
 Опади, 140  
 Опадомір ваговий, 146  
 Осмос, 211  
 Оцінювання землетрусів, 49  
 Оцінювання цунамі, 52  
 Параметри вітру, 23  
 Параметри вологості, 82  
 Параметри сонячного випромінювання, 119  
 Параметри термодинамічні, 189  
 Перенесення води під час ремедіації, 220  
 Перенесення електрики, 279  
 Перенесення забруднювачів рослиною, 222  
 Перенесення імпульсу, 259  
 Перенесення маси, 205, 228  
 Перенесення теплоти через випромінювання, 293  
 Перенесення теплоти через конвекцію, 292  
 Перенесення теплоти через пароутворення, 295  
 Перенесення теплоти, 289  
 Періодичність сонячного випромінювання, 122  
 Перший закон термодинаміки, 190, 191  
 Піранометр, 134  
 Піргеліометр, 133  
 Піргеометр, 136  
 Пірометрія оптична, 115  
 Пневмоторакс, 11  
 Поглинання гама-випромінювання, 94  
 Поліпное, 106  
 Потенціал дії, 279  
 Потенціал електрохімічний, 279  
 Потенціал спокою, 279  
 Потік термодинамічний, 200  
 Потік об'ємний, 217  
 Пропріорецептори, 159  
 Процес необоротний, 190  
 Процес оборотний, 190  
 Пружність (парціальний тиск) водяної пари, 82  
 Пружність насиченої пари, 82  
 Психрометр Августа, 86  
 Психрометр Асмана, 84  
 Радіотермометр, 116  
 Реакції фотобіологічні, 123  
 Рефлекс пірнальний ссавців, 12  
 Рецептор, 155  
 Рецептори вісцеральні, 160  
 Рецептори тиску, 29  
 Рівень еквівалентний звуку, 71  
 Рівень інтенсивності звуку, 71  
 Рівняння Вант-Гоффа, 212  
 Рівняння Дарсі, 205  
 Рівняння Нернста, 280  
 Розпилення повітря, 245  
 Розподіл шуму за частотою, 73  
 Сейсмограма, 52  
 Сейсмограф, 50  
 Сенсор Граньє, 220  
 Сенсор п'єзоелектричний тиску, 18  
 Сенсор цифровий барометричний тиску, 18  
 Сила термодинамічна, 200  
 Система коренева, 214  
 Система сенсорна, 155

Система термодинамічна, 188  
 Склад спектральний сонячного випромінювання, 121  
 Спектрофотометр Добсона, 302  
 Стала сонячна, 119  
 Стан стаціонарний, 197  
 Стимул, 155  
 Стратосфера, 101  
 Сухожилльний орган Гольджі, 159, 160  
 Температура атмосфери, 100  
 Температура водойм, 104  
 Температура ґрунту, 101  
 Температура, 99  
 Тенденції зміни ентропії, 196  
 Теорія біжучої хвилі, 171  
 Теплопровідність деяких речовин, 107  
 Теплопровідність крізь шар речовини, 290  
 Теплопровідність, 289  
 Теплота відчутна, 270  
 Теплота латентна, 269  
 Термістор, 113  
 Термоанемометр, 30  
 Термобатарея, 114  
 Термодинаміка нерівноважна, 197  
 Термодинаміка рівноважна, 195  
 Термометр біметалевий, 114  
 Термометр кварцовий п'єзоелектричний, 116  
 Термометр рідинний, 111  
 Термометр, 99  
 Термометри термоелектричн, 114  
 Терморезистор платиновий, 113  
 Терморезистор, 113  
 Терморцепція, 176  
 Типи механорецепторів, 155  
 Тиск атмосферний, 7  
 Тиск води, 8  
 Тиск, 6  
 Точка роси, 82  
 Транспірація, 228  
 Транспортування активне, 212  
 Транспортування пасивне, 209  
 Тривалість опадів, 140  
 Тропосфера, 101  
 Трубка Бурдона, 17  
 Турбулентність, 268  
 Удар тепловий, 83, 106  
 Ультрафіолетове випромінювання, 128  
 Фіторемерація, 222  
 Флора, 218  
 Формула барометрична, 8  
 Формула психрометрична, 85  
 Фотодеградація продуктів, 127  
 Фоторецепція у комах, 180  
 Фоторецепція, 180  
 Фоторух, 126  
 Фотосенсибілізація, 126  
 Фотосинтез, 124  
 Фракціонування ізотопів, 142, 235  
 Хвилі сейсмічні, 46  
 Хвороба вібраційна, 41  
 Хвороба кесонова, 11  
 Хроматографія іон-обмінна, 150  
 Цикл Карно, 194  
 Цунамі, 47  
 Час реверберації, 78  
 Частишки, 247  
 Черпаки нахилені, 144  
 Чутливість тактильна, 155  
 Шар озоновий, 300  
 Швидкість продукції ентропії, 199  
 Шкала Бофорта, 24  
 Шкала Кельвіна, 100  
 Шкала Меркаллі, 50

Шкала Ріхтера, 49  
Шкала Сафіра-Сімсона, 26  
Шкала Фаренгейта, 99  
Шкала Фудзі, 27  
Шкала Цельсія, 100

Шум сумарний, 72  
Шум, 71  
Явища перенесення, 202  
рН-метрія, 149

## **ЗМІСТ**

<b>ПЕРЕДМОВА</b>	<b>3</b>
<b>I. ФІЗИЧНЕ ОТОЧЕННЯ ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ</b>	
<b>1. ТИСК</b>	<b>6</b>
1.1. Атмосферний тиск	6
1.2. Тиск води	8
1.3. Вплив тиску на живі організми	9
1.4. Розчинність газів у рідинах	13
1.5. Вимірювання тиску	16
<b>2. ВІТЕР</b>	<b>22</b>
2.1. Причини виникнення вітру	22
2.2. Параметри вітру	23
2.3. Стресові ситуації, пов'язані з вітром	25
2.4. Вплив вітру на живі організми	28
2.5. Вимірювання параметрів вітру	29
<b>3. ГРАВІТАЦІЯ</b>	<b>34</b>
3.1. Визначення гравітації	34
3.2. Вплив гравітації на живі організми	35
3.3. Вимірювання гравітропізму	38
<b>4. ВІБРАЦІЇ</b>	<b>40</b>
4.1. Параметри вібрацій	40
4.2. Вплив вібрацій на організм людини	41
4.3. Вібрації та тварини	42
4.4. Вимірювання вібрацій	43
<b>5. КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ</b>	<b>46</b>
5.1. Основні визначення	46
5.2. Землетруси	46
5.3. Цунамі	47
5.4. Вплив природних коливань на тварин	48
5.5. Вимірювання природних коливань	49



<b>6. АКУСТИЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА</b>	56
6.1. Хвилі в пружному середовищі	56
6.2. Характеристики звукових коливань	56
6.3. Утворення звуків тваринами	59
6.4. Фізичні процеси, що супроводжують поширення звуку у наколишньому середовищі	60
6.5. Акустична комунікація тварин	62
<b>7. ШУМ</b>	71
7.1. Основні визначення	71
7.2. Розподіл шуму за інтенсивністю	71
7.3. Сумарний шум	72
7.4. Розподіл шуму за частотою	73
7.5. Вплив шуму на живі організми	74
7.6. Вимірювання рівнів шуму	75
7.7. Звукова ізоляція	77
<b>8. ВОЛОГІСТЬ</b>	82
8.1. Параметри вологості	82
8.2. Вплив вологості на живі організми	83
8.3. Вимірювання вологості	84
8.4. Вологість ґрунту	92
8.5. Вимірювання вологості ґрунту	93
<b>9. ТЕМПЕРАТУРА</b>	99
9.1. Температурні шкали	99
9.2. Температура атмосфери	100
9.3. Температура ґрунту	101
9.4. Температура водойм	104
9.5. Вплив температури на живі організми	105
9.6. Вимірювання температури	111
<b>10. ПРИРОДНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ</b>	119
10.1. Параметри сонячного випромінювання	119
10.2. Вплив сонячного випромінювання на живі організми	123
10.3. Вплив випромінювання ультрафіолетової області спектра на	

живі організми	128
10.4. Атмосферне випромінювання	129
10.5. Випромінювання земної поверхні	130
10.6. Альbedo	130
10.7. Вимірювання природних випромінювань	132
<b>11. ОПАДИ</b>	140
11.1. Параметри опадів	140
11.2. Взаємодія опадів з навколишнім середовищем	141
11.3. Ізотопи в опадах	142
11.4. Фракціонування ізотопів	142
11.5. Стабільні ізотопи у процесі опадів	143
11.6. Вимірювання опадів	144
11.7. Кислотні дощі	148
11.8. Вимірювання забруднень в опадах	149
<b>II. РЕЦЕПЦІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ СЕРЕДОВИЩА</b>	155
<b>12. МЕХАНОРЕЦЕПЦІЯ</b>	155
12.1. Визначення механорецепторів	155
12.2. Механорецептори шкіри	155
12.3. Вестибулорецепція	157
12.4. Інтерорецепція	159
12.5. Механорецепція у риб	161
12.6. Механорецепція у комах	162
<b>13. ГРАВІРЕЦЕПЦІЯ</b>	165
13.1. Комахи та гравітація	165
13.2. Гравірецепція рослин	166
<b>14. АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ</b>	168
14.1. Акусторецепція у ссавців	168
14.2. Акусторецепція у птиці	171
14.3. Акусторецепція у риб	172
14.4. Акусторецепція у комах	173
<b>15. ТЕРМОРЕЦЕПЦІЯ</b>	176

15.1. Механізми терморцепції	176
15.2. Теплова чутливість тварин	178
<b>16. ФОТОРЕЦЕПЦІЯ</b>	<b>180</b>
16.1. Фоторецепція у комах	180
16.2. Зоровий аналізатор риб	181
16.3. Зоровий аналізатор птахів	182
16.4. Зоровий аналізатор ссавців	183
16.5. Механізми зору ссавців	185
<b>ІІІ. ФІЗИКА ЯВИЩ ПЕРЕНЕСЕННЯ</b>	<b>188</b>
<b>17. ЗМІНА ЕНТРОПІЇ</b>	<b>188</b>
17.1. Параметри термодинамічної системи	188
17.2. Перший закон термодинаміки	190
17.3. Другий закон термодинаміки	192
17.4. Ентропія	194
17.5. Рівноважна термодинаміка	195
17.6. Нерівноважна термодинаміка	197
17.7. Термодинамічні сили та термодинамічні потоки	199
17.8. Явища перенесення	202
<b>18. ПЕРЕНЕСЕННЯ МАСИ: ВОДА ТА РОЗЧИНЕНІ РЕЧОВИНИ</b>	<b>205</b>
18.1. Перенесення маси в ґрунті	205
18.2. Перенесення маси (дифузія)	207
18.3. Дифузія через клітини	209
18.4. Осмос	211
18.5. Активне транспортування	212
18.6. Коренева система	214
18.7. Ксилема	215
18.8. Об'ємний потік	217
18.9. Флоема	218
18.10. Вимірювання потоків соку	219
18.12. Перенесення води під час ремедіації	220
18.13. Перенесення забруднювачів рослиною	222

<b>19. ПЕРЕНЕСЕННЯ МАСИ: ВОДНА ПАРА ТА ГАЗИ</b>	228
19.1 Транспірація	228
19.2. Газообмін	233
19.3. Вимірювання газообміну	234
19.4. Забруднення навколишнього середовища транспортними засобами	237
19.5. Випаровування з водної поверхні	240
19.6. Дисперсійне перенесення маси	240
19.7. Моделювання поширення забруднень в атмосфері	241
19.6. Перенесення повітря та пари під час ремедіації	245
 <b>20. ЧАСТИНКИ У НАВКОЛИШНЬОМУ СЕРЕДОВИЩІ</b>	247
20.1. Фізика частинок	247
20.2. Аерозолі та біоаерозолі	249
20.3. Наночастинки та ремедіація навколишнього Середовища	253
20.4. Смог	255
0.5. Тютюновий дим	255
<b>21. ПЕРЕНЕСЕННЯ ІМПУЛЬСУ</b>	259
21.1. Перенесення імпульсу (в'язкість)	259
21.2. Моделювання зміни швидкості вітру поблизу земної поверхні	261
21.3. Моделювання зміни швидкості вітру у рослинному покриві	264
 <b>22. МЕТОД ВИХРОВОЇ КОВАРІАЦІЇ</b>	268
22.1. Турбулентність	268
22.2. Латентна теплота	269
22.3. Відчутна теплота	270
22.4. Метод вихрової коваріації	271
 <b>23 ПЕРЕНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРИКИ</b>	279
23.1. Електрохімічний потенціал	279
23.2. Потенціал спокою та потенціал дії	279
23.3. Збудливість рослинних клітин	282
23.4. Електрокінетичні методи ремедіації	287

<b>24. ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛОТИ</b>	289
24.1. Перенесення теплоти через теплопровідність	289
24.2. Стаціонарна теплопровідність крізь шар речовини	290
24.2. Перенесення теплоти через конвекцію	292
24.3. Перенесення теплоти через випромінювання	293
24.4. Перенесення теплоти через пароутворення	295
 <b>IV. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ФІЗИЧНИХ ТА БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ З НАВКОЛИШНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ</b>	 297
<b>25. КВАНТОВІ ВЛАСТИВОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ</b>	297
25.1. Закони теплового випромінювання	297
25.2. Короткохвильове сонячне випромінювання	299
25.3. Довгохвильове випромінювання земної поверхні	299
25.4. Озоновий шар	300
25.5. Вимірювання озону	301
25.6. Парниковий ефект	303
25.7. Вимірювання впливу парникового ефекту	306
25.8. Енергетичний баланс земної поверхні	307
25.9. Енергетичний баланс листка та рослини	309
25.10. Енергетичний баланс тварини	311
25.11. Енергетичний баланс водойм	312
Додаток	317
Список літератури	323
Предметний покажчик	329
Зміст	334





Навчальне видання

**Посудін Юрій Іванович**

**«Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища»**

Редактор І.В. Сикотюк





Юрій Посудін – доктор біологічних наук, професор Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Закінчив 1969 року радіофізичний факультет Державного університету ім. Шевченка. Захистив дисертації на здобуття вченого ступеня: у 1977 р. – кандидата фізико-математичних наук (Інститут радіотехніки і електроніки АН СРСР, Москва), у 1992 р. – доктора біологічних наук (Агрофізичний Інститут, Санкт-Петербург).

Сферою наукових інтересів є дослідження фоторуху водоростей та флуоресцентний аналіз рослин.

Педагогічна діяльність проф. Ю. Посудіна пов'язана з викладанням дисциплін „Фізика з основами біофізики”, „Біофізика” та спецкурсів „Біофізика навколишнього середовища”, „Біофізика і фізичні методи аналізу”, „Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища”, „Моніторинг довкілля з основами метрології”. У 1996 р. читав лекції в Університеті Джорджія, США, у 2010 р. – в Університетах Хоккайдо (Японія) та Юваскула (Фінляндія).