

502(045.8)
П 639

Ю.І. ПОСУДІН

**МЕТОДИ
ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**



Ю.І. ПОСУДІН

**МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ
ПАРАМЕТРІВ
НАВКОЛИШНЬОГО
СЕРЕДОВИЩА**

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

УДК 502Ж53.08

ISBN 966-7683-31-1

*Моїм онукам,
Лізоньці та Миколці,
присвячується*

Посудін Ю.І. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища: Підручник. — Київ: Світ, 2003. — 288 с, іл.

Наведено відомості про сучасні методи та прилади, що застосовуються для контролю навколишнього середовища. Розглянуто основні характеристики компонентів біосфери, абіотичні й біотичні фактори середовища, зокрема ті, що викликають стреси в живих організмах. Викладено принципи дії приладів для вимірювання параметрів навколишнього середовища, методологія оцінки цих параметрів і моделювання процесів та явищ, що відбуваються у довкіллі. Особливу увагу приділено використанню засобів дистанційного зондування біосфери та впровадженню систем автоматизованого вимірювання параметрів навколишнього середовища.

Звернено увагу на поточний контроль знань студентів за допомогою завдань та задач практичного характеру, запитань, тестів.

Для студентів природничих спеціальностей вищих навчальних закладів III—IV рівнів акредитації.

Рецензенти:

В. М. Кавецький,

доктор сільськогосподарських наук, професор

(м. Київ, Інститут агроєкології і біотехнології УААН України);

А. П. Відьмаченко,

доктор фізико-математичних наук

(м. Київ, Головна астрономічна обсерваторія НАН України)

*Затверджено Міністерством освіти і науки України
(лист №14/18.2-284 від 6.02.2002р.)*

Фото на обкладинці *Р.Петрива*

ISBN 966-7683-31-1

© Ю.І. Посудін, 2003

ПЕРЕДМОВА

Прогрес у дослідженнях навколишнього середовища пов'язаний з рівнем розвитку сучасних методів та засобів вимірювань його параметрів. В історії наукових досягнень є багато свідчень того, як передові ідеї та теорії довго чекали свого часу для практичного втілення через відсутність необхідного інструментального забезпечення. Водночас дослідники, що використовували сучасне обладнання, досягали важливих результатів. На даному етапі існує багато сучасних методів дослідження довкілля. Це методи оптичної та лазерної спектроскопії, ядерного магнітного резонансу, електрохімії, хроматографії, мас-спектрометрії. Окреме місце посідають методи дистанційного зондування біосфери — фотографування, відбивальна та флуоресцентна спектроскопія, термічна та надвисокочастотна дистанційна діагностика. Саме тому це видання підручника, в якому детально розглядаються питання методології вимірювань параметрів навколишнього середовища та застосування відповідного інструментального забезпечення, є своєчасним.

Основна мета підручника — ознайомити студентів природничих спеціальностей з сучасними методами контролю довкілля, принципами дії приладів для вимірювання його параметрів.

Конкретними завданнями підручника є:

- 1) короткий опис основних характеристик біосфери та її основних компонентів — атмосфери, гідросфери й літосфери;
- 2) оцінка абіотичних і біотичних факторів середовища, зокрема тих, що викликають стреси в живих організмах;
- 3) ознайомлення з основними методами та принципом дії приладів для вимірювання параметрів навколишнього середовища, в тому числі з засобами дистанційного зондування компонентів біосфери;
- 4) контроль знань студентів за допомогою завдань та задач практичного характеру, запитань, тестів.

Структура підручника передбачає знайомство з необхідним теоретичним матеріалом; далі подано приклади розв'язання практичних проблем та контрольні завдання для самостійної роботи. Для поточного контролю знань студентів пропонуються тести: *альтернативні* (потребують відповіді «так» чи «ні»); *вибіркові* (студентові необхідно знайти одну правильну відповідь серед декількох запропонованих); *акордно-вибіркові* (треба знайти кілька правильних відповідей з низки запропонованих); *парно-вибіркові* (необхідно утворити з двох запропонованих рядів відповідей правильні пари); *репродуктивні* (відповіді на них можна знайти у відповідному розділі підручника); *конструктивні* (прямих відповідей на них немає в підручнику; студент повинен дати відповідь самостійно). Інформативний матеріал подано у додатку.

Автор висловлює щире подяку В.П. Замостяну і В.М. Боголюбову за підтримку видання цього підручника.

ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ

ОБ'ЄКТИ ВИМІРЮВАННЯ

Основні компоненти біосфери

Біосфера — оболонка Землі, що включає нижню частину атмосфери, гідросферу й верхні шари літосфери, склад, структура й енергетика яких значною мірою зумовлені попередньою та сучасною життєдіяльністю живих організмів.

Біосферу ділять на три середовища: *атмосферу* — шар повітря, що складає периферійну оболонку планети і оточує два інших середовища; *гідросферу* — водну оболонку Землі (Світовий океан, моря, ріки, озера та підземні води); *літосферу* — середовище, обмежене верхніми шарами земної поверхні, тобто твердою поверхню материків.

Атмосфера є одним з найважливіших для життя компонентів біосфери. Вона пропускає та змінює сонячну енергію, що керує нашим кліматом, діє як захисний екран від метеоритних атак і шкідливого ультрафіолетового випромінювання, забезпечує польоти птахів і комах, поширення насіння та спор. Атмосфера — суміш газів, суспендованих твердих та рідких частинок. Спрощено атмосферу можна уявити як сухе повітря разом з водяною парою. Вона складається з кількох верств, а саме: тропосфери, стратосфери, мезосфери та термосфери. Атмосфера регулює клімат на планеті, запобігаючи перегріванню та охолодженню й підтримуючи середню температуру поверхні близько 14°C. Важливою компонентою атмосфери є водяна пара. Її концентрація коливається від $2 \cdot 10^{15}\%$ в полярних широтах до 3% на екваторі. Загальна маса атмосфери становить $5,15 \cdot 10^{18}$ кг.

Гідросфера характеризується певним складом та розподілом водяних мас. Вода — одна з найпоширеніших речовин у природі, що входить до складу живих організмів, зумовлюючи перебіг у них різноманітних реакцій. Бере

участь у кругообігу в природі, забезпечуючи життєдіяльність людини, тварин, рослин, мікроорганізмів.

Літосфера має товщину 50+200 км. Її верхня частина, що містить живу речовину, входить до складу біосфери. Важливим компонентом літосфери є *грунт* — верхній шар земної кори, що утворюється і розвивається в результаті взаємодії клімату рослинності, тварин, мікроорганізмів, гірських порід. Важливою властивістю ґрунту є його родючість. Більшість живих організмів та їх відходи сприяють процесам, що відбуваються в ґрунті. Так, активність мікроорганізмів перетворює відходи в основні компоненти ґрунту. Без цієї активності неможливий кругообіг вуглецю або азоту, важливих для життя на землі. Ґрунт є тонкий шар земної поверхні. Його товщина, фізичні та хімічні властивості різні в кожній місцевості. Загалом ґрунт характеризують п'ять основних компонентів: неорганічні мінеральні частини, органічні залишки, вода, гази, біологічні системи.

Крім того, біосфера характеризується фауною та флорою. В біосфері мешкає близько 10000 видів рослин, 3000 видів ссавців, 25000 видів птахів, ще більше видів риб, близько мільйона видів комах. У спрощеному вигляді живі організми можна поділити на мікроорганізми, рослини й тварини. Сукупність живих організмів утворює *біоценоз*, а специфічне фізико-хімічне оточення цих організмів називається *біотопом*. Сукупність біотопу і біоценозу складає *екосистему*.

Навколишнє середовище

Навколишнє природне середовище — це сукупність природних і змінених діяльністю людини абіотичних та біотичних факторів, що безпосередньо або опосередковано впливають на людину. Термін «environment» («навколишнє середовище») походить від французьких *environ* або *environner*, що означають *навколо*, *кружлом*, *оточувати*; ці слова, в свою чергу, виникли з старофранцузьких *viver* та *viron*, які разом з префіксом *en* утворюють словосполучення *круг*, *оточення*, *довкілля*. Таким чином, термін «навколишнє середовище» передає сукупність всіх зовнішніх факторів, що впливають на живий організм.

Фактори та параметри навколишнього середовища

Фактор — причина або рушійна сила будь-якого процесу, що відбувається у навколишньому середовищі.

Абіотичні фактори — компоненти та явища неживої, неорганічної природи, що впливають на живі організми, їх можна поділити на:

а) *фізичні (кліматичні)*: тиск; рух повітря, вітер; вологість; атмосферні опади; температура; сонячне випромінювання; іонізаційні випромінювання;

б) *атмосферні*: структура та склад атмосфери, фізичні й хімічні властивості атмосфери, здатні впливати на живі організми;

в) *гідрографічні (фактори водного середовища)*: фізичні та хімічні властивості води як середовища мешкання живих організмів;

г) *едафічні (ґрунтові)*: структура та склад ґрунтів, сукупність їхніх фізичних і хімічних властивостей, що справляють екологічний вплив на живі організми.

Біотичні фактори — сукупність впливів життєдіяльності одних організмів на життєдіяльність інших, а також на неживе середовище.

Параметр — величина, що характеризує будь-яку властивість процесу або явища, що відбуваються у довкіллі.

Забруднення — несприятлива зміна навколишнього середовища як цілковитий або частковий результат людської діяльності, що безпосередньо або опосередковано впливає на розподіл енергії та рівні радіації, фізико-хімічні властивості навколишнього середовища та умови існування живих істот. Ці зміни можуть впливати на людину безпосередньо або через сільськогосподарські ресурси, воду чи інші біологічні продукти та речовини. Під час різкої зміни забруднення можуть викликати неспецифічну реакцію живого організму — стреси. Звичайно абіотичні та біотичні фактори зазнають певних коливань. Коли ці коливання перевищують норму, мають місце *стресові ситуації*.

На стан довкілля істотно впливають природні та техногенні порушення екологічної рівноваги, збільшення чисельності населення, процеси урбанізації та індустріалі-

зації, розвиток енергетики, експлуатація військової та космічної техніки.

Система спостережень, оцінки та контролю за станом природного середовища, що оточує людину, з метою розробки заходів щодо його охорони, раціонального використання природних ресурсів і запобігання критичним ситуаціям, шкідливим або небезпечним для здоров'я людей, існування живих організмів та їхніх суспільств, природних об'єктів і комплексів, а також прогнозування масштабів неминучих змін називається *моніторингом*.

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ

Загальні характеристики вимірювального обладнання

Вимірювання параметра навколишнього середовища — це послідовність експериментальних та обчислювальних операцій, що здійснюються з метою знаходження значення параметра, що характеризує певний об'єкт або явище. Вимірювання передбачає кількісну оцінку параметра в стандартних одиницях, тобто порівняння параметра з рекомендованим стандартом для визначення їхньої рівності або ступеня різниці. Вимірювання включає: об'єкт (явище), властивості або стан якого характеризує величина, що вимірюється; одиницю цієї величини; технічні засоби, проградуїзовані в обраних одиницях; метод вимірювання; спостерігача (систему реєстрації), що сприймає результат вимірювання; отримане значення величини, що вимірювалася, та оцінку його відхилення від дійсного значення, тобто похибку вимірювання.

Вимірювання бувають *прямими*, якщо сигнал, що надходить на вимірювальний прилад від сенсора, містить безпосередньо інформацію про параметр, який вимірюється (наприклад, вимірювання температури, вологості, тиску, швидкості вітру тощо), та *посередніми*, під час яких значення параметра знаходять за допомогою обчислень на основі відомих формул або залежностей між цим параметром та параметрами, що вимірювалися безпосередньо (наприклад, вимірювання швидкості седиментації

частинок, втрат теплоти з поверхні листка тощо). Вимірювання параметрів навколишнього середовища можуть здійснюватися безпосередньо біля об'єкта дослідження або дистанційно.

Вимірювальний прилад — засіб вимірювань, що дає можливість безпосередньо відраховувати значення величини, що вимірюється. Залежно від того, яким шляхом вимірювальні прилади дають інформацію, вони діляться на аналогові та цифрові.

Аналогові прилади

Інформація, яку отримує аналоговий вимірювальний прилад, постійно змінюється і відповідно (аналогічно) реєструється. Величина параметра, що змінюється, читається на шкалі приладу. Аналоговий прилад містить: *сенсор* — функціональний елемент, що забезпечує зв'язок між приладом та параметром, що вимірюється; *перетворювач сигналу*, який трансформує отриманий сенсором сигнал таким чином, щоб його можна було спостерігати, читати, реєструвати; *аналоговий індикатор*, що перетворює сигнал від перетворювача у форму, зручну для реєстрації оператором. Типовий приклад аналогового вимірювального приладу — термометр. Сенсором тут є головка термометра, перетворювачем сигналу — капілярна трубка зі ртуттю, аналоговим індикатором — градуїрована шкала.

Цифрові прилади

У цифрових приладах інформація подається у вигляді дискретних сигналів, хоча величина параметра змінюється безперервно. Ділянка змін величини параметра, що вимірюється, ділиться на певну кількість рівних інтервалів, позначених цифрами. Кожен інтервал відповідає найменшій зміні параметра, яку здатний зареєструвати прилад. Цифровий прилад містить такі основні елементи: *сенсор* (функції його ті ж самі, що й в аналоговому приладі), *аналогово-цифровий перетворювач*, який перетворює отриманий сигнал у цифрову форму, і *цифровий дисплей*, за допомогою якого читається отримана інформація.

Основні характеристики вимірювального приладу

Точність характеризує різницю між значенням величини, що вимірюється, та дійсним значенням. Точність вимірювального приладу лімітує вимірювання величини параметра; узагальненою характеристикою засобів вимірювань є класи точності, що є показниками установлених для них стандартами меж похибок. Наприклад, клас точності 0,1 відповідає похибці 0,1%.

Чутливість приладу може бути визначена як відношення величини зміни сигналу від сенсора до величини зміни параметра, що вимірюється. Прилад з невисокою чутливістю може втратити певну корисну інформацію, тоді як прилад з високою чутливістю може отримати зайву інформацію, що призведе до ускладнення її інтерпретування.

Роздільна здатність — найменша зміна величини параметра, що вимірюється, — наприклад, найменша поділка або цифра шкали приладу.

Лінійність відгуку відповідає рівномірній шкалі приладу; ця характеристика не є обов'язковою, але полегшує процес вимірювання.

Дрейф нуля характеризує нестабільність установки нуля за відсутності сигналу; залежить від кліматичних та інших умов.

Час відгуку характеризує швидкість, з якою прилад реагує на зміну вхідного сигналу; відповідає проміжку часу між зміною параметра та моментом вимірювання цієї зміни.

Вірогідність — здатність приладу надавати вірну інформацію протягом визначеного періоду часу.

Методи вимірювань

У підручнику розглянуто методи вимірювання тиску, параметрів вітру, шуму, вібрацій, вологості, температури, електричних та магнітних полів, сонячного та іонізаційного випромінювань, методи контролю стану й забруднення атмосфери, літосфери та гідросфери, зокрема методи дистанційного зондування компонентів біосфери, а також біологічні методи (біоіндикація та біотестування) контролю навколишнього середовища.

I. АБІОТИЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА

1. ТИСК

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

$$p = \sum_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS} \quad (1.1.1)$$

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

$$p = \frac{F}{S}, \quad (1.1.2)$$

де F — сума прикладених перпендикулярно до поверхні сил, S — площа цієї частини. Одиниця вимірювання тиску в системі СІ — *паскаль* (Па); $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$.

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

Атмосфера — це суміш газів, твердих та рідких частинок. У спрощеному вигляді, атмосферу можна уявити як сухе повітря разом з водяною парою. Атмосферне повітря в діапазоні температур і тисків, що існують в природі, можна розглядати як ідеальний газ, що описується рівнянням Клапейрона-Менделєєва:

$$p_A V_A = (m_A / M_A) RT_A \quad (1.1.3)$$

де R — універсальна газова стала ($R = 8,314551 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$), M_A — молярна маса газу (для сухого повітря $M_A = 0,029 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$, для водяної пари $M_A = 0,018 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$). Числове значення газової сталої визначимо з формули (1.1.3), припускаючи, що моль газу знаходиться при *нормальних умовах*, що визначаються тиском $p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ (нормальна атмосфера) і температурою $T_0 = 273,15 \text{ К}$, при яких молярний об'єм газу $V_0 = 22,414 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$.

З рівняння (1.1.3) отримуємо вираз для густини повітря:

$$\rho_A = \frac{m_A}{V_A} = \frac{M_A p_A}{RT_A} = \frac{p_A}{BT_A} \quad (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}), \quad (1.1.4)$$

де $B = R/M$ — питома газова стала (для сухого повітря $B = 287 \text{ Дж} \cdot \text{кг} \cdot \text{К}^{-1} = 287 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$).

З останнього рівняння можна отримати вираз:

$$p_A = \left(\frac{\rho_A}{M_A} \right) kT. \quad (1.1.5)$$

Середній атмосферний тиск на рівні моря становить $1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$. У цілому атмосферний тиск залежить від висоти, простору й часу. Горизонтальний розподіл атмосферного тиску визначається рухом поверхневих мас повітря. Густина і температура атмосферного повітря також залежать від висоти (табл. 1.1.1).

Розглянемо газ, що знаходиться в однорідному полі тяжіння при постійній температурі. Виділимо на висоті h стовп газу висотою dh і площею основи, яка дорівнює одиниці. Різниця тисків p і $p + dh$ на нижню та верхню основи дорівнює вазі газу, що міститься в об'ємі циліндра висотою dh , тобто гідростатичному тиску $\rho g dh$, де ρ — густина газу на висоті h (dh мале настільки, що густину газу в цьому інтервалі можна вважати постійною).

Звідси

$$dp = -\rho g dh. \quad (1.1.6)$$

Тиск повітря на висоті z дорівнює:

$$p = \rho g h + p_0. \quad (1.1.7)$$

Комбінуючи рівняння (1.1.6) і (1.1.7), отримуємо:

$$\left(\frac{dp_A}{dz} \right) = \left(\frac{gM_A}{kT_A} \right). \quad (1.1.8)$$

/././ Залежність густини й температури атмосферного повітря від висоти

Висота ζ , км	Густина ρ , кг м^{-3}	Температура, $^{\circ}\text{C}$
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

На поверхні Землі $z = 0$ та $p = p_0$; застосуємо інтегрування рівняння (1.1.8) за висотою від 0 до z :

$$\int_{p=p_0}^{p(z)} \frac{dp_A}{p_A} = \frac{gM_A}{k} \int_{z=0}^z \frac{dz}{T_A(z)}. \quad (1.1.9)$$

Звідси отримуємо рівняння залежності атмосферного тиску від висоти — *барометричну формулу*:

$$p_A(z) = p_A(0) \exp[-(gM_A/RT_A)z]. \quad (1.1.10)$$

Приклад

Визначити густину сухого повітря при стандартному тиску і температурі 0°C .

Розв'язок

Підставляємо в формулу (1.1.4) числові значення величин p , B і T :

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{p}{BT} = \frac{1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}}{287 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 273,15 \text{ К}} = \\ &= \frac{101325 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}}{78394 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}} = 1,2925 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}. \end{aligned}$$

Контрольне завдання

В Антарктиді зафіксований мінімум температури повітря — 88,3 °С. Чому дорівнює густина сухого повітря, якщо тиск становив 740 гПа?

Відповідь: близько 1,4 кг · м⁻³.

Приклад

Визначити атмосферний тиск на висоті 10 км.

Розв'язок

Використовуючи барометричну формулу (1.1.10), отримуємо:

$$\begin{aligned} p_A(z) &= p_A(0) e^{-(gM_A/RT_A)z} = \\ &= 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot e^{-\frac{0,029 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 10^4 \text{ м}}{8,31451 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot 223,25 \text{ К}}} = \\ &= 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot e^{-1,531} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,2163 = \\ &= 0,219 \cdot 10^5 \text{ Па}. \end{aligned}$$

Аудиторні завдання

1. Визначити атмосферний тиск на висоті:

- вершини Евересту (8848,82 м);
- траси реактивного лайнера (10650 м);
- вершини Ельбрусу (5633 м);
- нижньої межі стратосфери (20 км).

2. На якій висоті атмосферний тиск зменшується до 0,5 атм? Температура повітря — 260 К.

3. На якій висоті розташована метеорологічна станція, якщо атмосферний тиск становить 920 гПа? Температура повітря 15 °С.

Залежність тиску від глибини

Розглянемо рідину в посудині (рис. 1.1.1). Зауважимо, що всі точки на одній глибині зазнають однакового тиску. Виділимо циліндр площею S і товщиною dy . Сила, що діє на циліндр знизу, $F_1 = pS$, сила, що діє зверху, $F_2 = (p+dp)S$.

Вага циліндра становить:

$$dp = rgdV = rgSdy, \quad (1.1.11)$$

де ρ — густина рідини.

У стані рівноваги результуюча сила дорівнює нулю:

$$SF_y = pS - (p + dp)S - rgSdy, \quad (1.1.12)$$

Звідки

$$-dpS - \rho gSdy = 0 \quad (1.1.13)$$

або

$$\frac{dp}{dy} = -rg, \quad (1.1.14)$$

де знак «мінус» свідчить про те, що зменшення глибини призводить до зменшення тиску.

Якщо p_1 та p_2 є тиски на рівнях y_1 та y_2 відповідно, можна записати:

$$p_2 - p_1 = -\rho g(y_2 - y_1). \quad (1.1.15)$$

При відкритій посудині $p_2 - p_1$, визначаючи $y_2 - y_1 = h$, отримаємо вираз:

$$p = p_A + \rho gh, \quad (1.1.16)$$

де p_A — атмосферний тиск; ρ — густина рідини; h — глибина.

Цей вираз можна переписати так:

$$p = p_A + \frac{\rho ghS}{S} p_A + \frac{mg}{S} = p_A + \frac{P}{S}. \quad (1.1.17)$$

Таким чином, абсолютний тиск p на глибині h від поверхні рідини перевищує тиск p_A на величину ρgh , яка відповідає тиску, що утворює вага стовпчика рідини висотою h і площею S .

Приклад

Визначити тиск на глибині 1000 м океану, якщо густина води $1,0 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а атмосферний тиск $1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Розв'язок

Використовуємо рівняння (1.1.16):

$$\begin{aligned} p &= p_A + \rho gh = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} + \\ &+ (1,0 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}) (9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}) (10^3 \text{ м}) = 9,9 \cdot 10^5 \text{ Па}. \end{aligned}$$

Контрольне завдання

Визначити тиск на дні озера глибиною 30 м.

Відповідь: $3,953 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Аудиторні завдання

Визначити тиск на глибині:

- Мар'янської западини (10912 м);
- якої досягає північний морський слон (1500 м);
- занурювання військового підводного човна (900 м);
- мешкання глибоководних риб (8370 м).

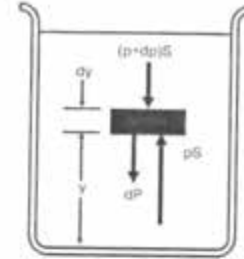


Рис. 1.1.1. Зміна тиску з глибиною в рідині

Вимірювання тиску

Прилад для вимірювання тиску називають *манометром*. Манометри бувають *сифонного* (рис. 1.1.2) або *чашечкового* (рис. 1.1.3) типу. Манометр сифонного типу — це U-подібна скляна трубка, заповнена водою або ртуттю. Один з кінців манометра запаяний і позбавлений повітря; відкритий кінець сполучений з атмосферним повітрям. Різниця рівнів рідини у двох колінах трубки проградуйована в одиницях тиску. Манометр чашечкового типу містить вертикальну скляну трубку, запаяну зверху і заповнену рідиною. Нижній кінець трубки занурений у резервуар, що частково заповнений рідиною. Тиск, що утворюється стовпчиком рідини у трубці, врівноважується атмосфер-

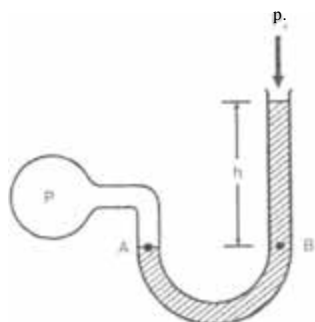


Рис. 1.1.2. Манометр сифонного типу

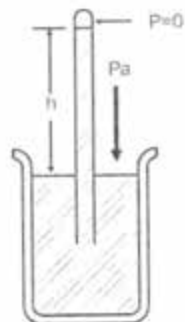


Рис. 1.1.3. Манометр чашечкового типу



Рис. 1.1.4. Ртутний манометр

ним тиском. Висока точність вимірювання манометра чашечкового типу (0,1 мм рт ст.) дає змогу використовувати його як стандартний прилад для перевірки aneroidних барометрів та висотомірів.

Ртутний барометр є класичним прикладом манометра чашечкового типу. Атмосферний тиск, що вимірюється ртутним барометром, дорівнює:

$$p = \rho_{Hg} g h(T_0), \quad (1.1.18)$$

де $h(T_0)$ — висота ртутного стовпчика за нормальної температури. Зовнішній вигляд ртутного манометра зображено на рис. 1.1.4. Барометр містить скляну трубку, заповнену ртуттю і занурену у резервуар зі ртуттю. Рівень ртуті у резервуарі контролюється за допомогою конусоподібної кістки. Точність вимірювання тиску ртутного барометра становить 0,1 гПа.

Корекція рідинних манометрів

Зміна тиску, що реєструється рідинним манометром, визначається з попереднього рівняння:

$$dp = \rho g dh, \quad (1.1.19)$$

де ρ — густина рідини, g — прискорення вільного падіння, dh — зміна висоти.

Густина рідини ρ залежить від температури (табл. 1.1.2).

Залежність густини води від температури описується рівнянням:

$$\rho_w = 999,895 + 50,692 \cdot 10^{-3} T - 7,278 \cdot 10^{-3} T^2 + 31 \cdot 10^{-6} T^3, \quad (1.1.20)$$

тоді як для густини ртуті ця залежність визначається за виразом:

$$\rho_{Pm} = 13595,089 - 2,467 T + 352 \cdot 10^{-6} T^2. \quad (1.1.21)$$

1.1.2. Залежність густини води і ртуті від температури

Температура, °C	Густина води, кг·м ⁻³	Густина ртуті, кг·м ⁻³
0	999,87	13595,089
5	999,99	13582,764
10	999,73	13570,457

Продовження таблиці

Температура, °C	Густина води, кг·м ⁻³	Густина ртуті, кг·м ⁻³
15	999,13	13558,166
20	998,23	13545,892
25	997,07	13533,635
30	995,67	13521,393
35	994,06	13509,167
40	992,24	13496,956
45	990,25	13484,760
50	988,07	13472,579
55	985,73	13460,412

Аудиторні завдання

Знайти густину води при температурі: 10°C; 30°C; 50°C та густину ртуті при температурі: 15°C; 40°C; 50°C.

Через залежність стовпчика рідини (ртуті або води) і довжини шкали манометра від температури прилад потребує корекції. Процес корекції ртутного барометра, наприклад, потребує врахування коефіцієнтів лінійного розширення шкали барометра α та об'ємного розширення ртуті β за допомогою рівняння:

$$C_T = \left(\frac{\alpha(T - T_w) - \beta(T - T_0)}{1 + \beta(T - T_0)} \right) h_r, \quad (1.1.22)$$

де T_w — температура, при якій калібрується шкала; T_0 — опорна температура; T — температура, що реєструється.

Вираз для приблизного обчислення температурного коригуючого фактора має вигляд:

$$C_T = -1,634 \cdot 10^{-4} T \cdot p_A, \quad (1.1.23)$$

Крім того, баланс між тиском, що утворює стовпчик рідини, та атмосферним тиском залежить від прискорення вільного падіння g_w , яке, в свою чергу, визначається широтою місцевості φ :

$$C_g = - (2,637 \cdot 10^{-3} \cos 2\varphi + 9,6 \cdot 10^{-8} h + 5 \cdot 10^{-5}), \quad (1.1.24)$$

де h — рівень розташування приладу над рівнем моря.

Залежність прискорення вільного падіння від широти місцевості наведено в табл. 1.1.3.

1.1.3. Залежність прискорення вільного падіння від широти місцевості

Широта місцевості φ , градуси	Прискорення вільного падіння g_w , м с ⁻²
0	9,78036
5	9,78075
10	9,78191
15	9,78381
20	9,78638
25	9,78956
30	9,79324
35	9,79732
40	9,80167
45	9,80616
50	9,81065
55	9,81501
60	9,81911
65	9,82281
70	9,82601
75	9,82860
80	9,83051
85	9,83168
90	9,83208

Коли в рідинних манометрах використовують трубки малого діаметра (< 5 мм), можуть виникнути капілярні ефекти, що супроводжуються утворенням меніска (рис. 1.1.5). Коригуючий чинник, за допомогою якого можна врахувати капілярні ефекти, визначають за виразом:

$$h_k = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g r}, \quad (1.1.25)$$

де θ — крайовий кут (кут зволоження), що утворюється між поверхнями рідини та скляної трубки, α — коефіцієнт

поверхневого натягу рідини (для води $\alpha = 0,073$ Н/м, для ртуті $\alpha = 0,47$ Н/м), r — радіус трубки манометра.

Барометр-анероїд містить анероїдну капсулу, що складається з двох тонких (0,2 мм товщиною) металевих гофрованих мембран (рис. 1.1.6). З капсули повітря відкачано (тиск 10^{-2} гПа) або капсулу заповнюють інертним газом при тиску 65 гПа. Кількість капсул у сучасних приладах може сягати 14. Мембрани знаходяться у напруженому стані завдяки гофрованій поверхні та дії пружини.

Перевагою барометра-анероїда є його компактність, механічна міцність, можливість транспортування. Ці прилади можуть застосовуватися в системах автоматичного вимірювання тиску, оскільки механічні переміщення анероїдних капсул легко перетворити на електричний сигнал.

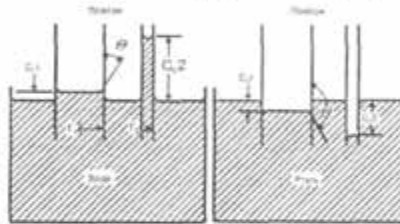


Рис. 1.1.5. Утворення меніску в воді і ртуті

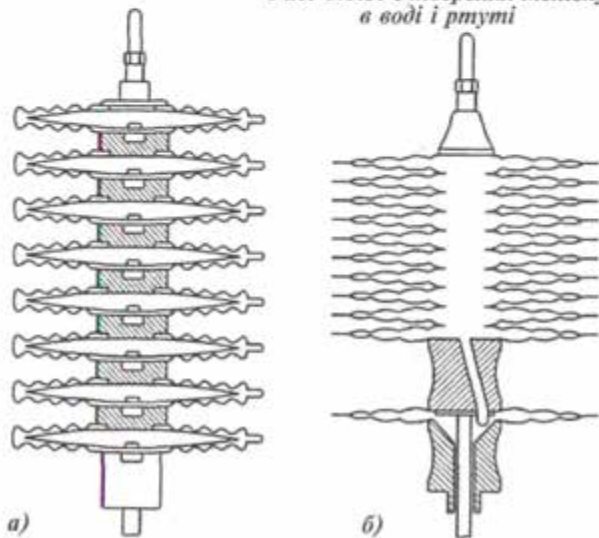


Рис. 1.1.6. Анероїдні коробки барографу: а. з внутрішньою пружиною; б. з гофрованою поверхнею

Недоліком барометра-анероїда є менша порівняно з ртутним барометром точність вимірювань.

Барограф — прилад, що використовується для безперервної реєстрації тиску повітря. Він складається із стовпчика анероїдних коробок, з'єднаного зі стрілкою самописа.

Аудиторні завдання

Визначити величину температурного коригуючого фактора для ртутного барометра за таких умов:

1. $T = 15^\circ\text{C}$; $p_A = 850$ гПа;
2. $T = 19^\circ\text{C}$; $p_A = 900$ гПа;
3. $T = 24^\circ\text{C}$; $p_A = 1000$ гПа;
4. $T = 28^\circ\text{C}$; $p_A = 950$ гПа;
5. $T = 32^\circ\text{C}$; $p_A = 1005$ гПа;
6. $T = 35^\circ\text{C}$; $p_A = 900$ гПа.

Приклад

Знайти коригуючий фактор C_g для ртутного барометра, розташованого на широті 40° на висоті 1000 м.

Розв'язок

Використовуючи рівняння (1.1.24), отримуємо:

$$C_g = -2,637 \cdot 10^{-3} \cos 80^\circ + 9,6 \cdot 10^{-8} \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^{-5} = 60,39 \cdot 10^{-5}.$$

Контрольне завдання

Знайти коригуючий фактор C_g для ртутного барометра, розташованого на широті 35° на рівні моря.

Відповідь: $2,21 \cdot 10^{-3}$.

Альтернативний тест

Від висоти залежить:	Так	Ні
1. густина атмосферного повітря	___	___
2. концентрація молекул повітря	___	___
3. маса молекул повітря	___	___
4. тиск атмосферного повітря	___	___

Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари «величина одиниця»

а. Тиск	1. $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
б. Густина	2. $\text{Дж} \cdot \text{кг} \cdot \text{К}^{-1}$
в. Універсальна газова стала	3. $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
г. Питома газова стала	4. моль^{-1}
д. Число Авогадро	5. $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$
е. Стала Больцмана	6. $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$

Домашнє завдання

Побудувати графік залежності атмосферного тиску від висоти $p(\zeta)$ для інтервалу висот $\zeta = 0-30$ км.

2. РУХ ПОВІТРЯ

Виникнення вітру

Рух повітря відносно земної поверхні називається *вітром*. Утворення повітряних потоків відбувається завдяки дії таких чинників, як:

1. *Градiснти тиску*, що забезпечують рух повітря від зони високого тиску до зони низького.

2. *Гравітаційна сила*, що прискорює рух повітря до величини $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. Дія вертикального градієнта тиску врівноважується гравітаційною силою.

3. *Сила тертя*, що визначається як:

$$F = -\mu V, \quad (1.2.1)$$

де μ — коефіцієнт внутрішнього тертя, який залежить від характеру підстилаючої поверхні; V — швидкість вітру. Сила тертя пропорційна швидкості вітру і має протилежний останньому напрямком.

4. *Сила Коріоліса*, що відхиляє напрямок руху повітря (вправо в Північній півкулі, вліво — в Південній). Визначається ця сила за виразом:

$$F_k = 2\rho V\omega \sin\varphi, \quad (1.2.2)$$

де ρ — густина повітря; V — швидкість руху повітря; ω — кутова швидкість обертання Землі ($7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$); φ — широта місцевості.

Розглянемо причини виникнення сили Коріоліса. В системі відліку, що обертається, матеріальна точка, яка рухається непаралельно осі цього обертання, відхиляється за напрямком, перпендикулярним до її швидкості. На Землі цей ефект, зумовлений її добовим обертанням, спричинює те, що вільно падаючі тіла відхиляються на схід, а тіла, що рухаються вздовж земної поверхні, відхиляються в Північній півкулі вправо від напрямку руху, в Південній — вліво. На екваторі $\sin\varphi = 0$ і $F_k = 0$; на полюсах $\sin\varphi = 1$, отже, сила Коріоліса максимальна. Звичайно під терміном «вітер» ми розуміємо горизонтальний рух повітря. Баланс сил, що характеризує цей рух, має вигляд (рис. 1.2.1):

$$2\rho V\omega \sin\varphi = \frac{dp}{dn}, \quad (1.2.3)$$

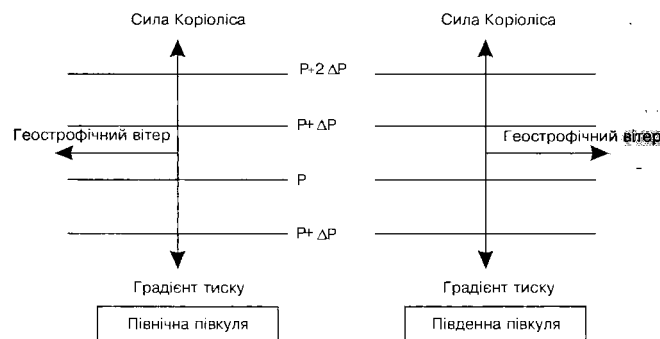


Рис. 1.2.1. Схематичне зображення сил, що спричиняють геострофічний вітер в північній та південній півкулях

де $\frac{dp}{dn}$ — градієнт тиску, тобто зміна тиску відносно ізобари на відстані n .

Останнє рівняння визначає появу геострофічного вітру — ідеалізованої ситуації, яка близька до реальної на висоті 600–1000 м над земною поверхнею.

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

$$F_c = \frac{mV^2}{r}, \quad (1.2.4)$$

де r — радіус криволінійної траєкторії. За великих швидкостей і малих радіусів кривизни F_c може значно перевищувати градієнтну силу (тропічні циклони, смерчі).

Параметри вітру

Основні параметри вітру — швидкість, напрямок і поривчастість.

Швидкість вітру вимірюється в $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$, хоча можуть застосовуватися такі одиниці як вузол або $\text{км} \cdot \text{г}^{-1}$ (табл. 1.2.1).

1.2.1. Зв'язок між одиницями швидкості вітру

$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	вузол	$\text{км} \cdot \text{г}^{-1}$
1,000	1,943	3,600
0,515	1,000	1,853
0,278	0,540	1,000

Швидкість вітру оцінюється за допомогою шкали Бофорта (табл. 1.2.2)

1.2.2. Шкала Бофорта

Бал	Характеристика	м·с ⁻¹	вузол	км·г ⁻¹
0	Безвітря	0,0÷0,2	< 1	< 1
1	Легкий вітерець	0,3÷1,5	1÷3	1÷5
2	Легкий бриз	1,6÷3,3	4÷6	6÷11
3	М'який бриз	3,4÷5,4	7÷10	12÷19
4	Помірний бриз	5,5÷7,9	11÷16	20÷28
5	Свіжий бриз	8,0÷10,7	17÷21	29÷38
6	Сильний бриз	10,8÷13,8	22÷27	39÷49
7	Близький до штормового вітер	13,9÷17,1	28÷33	50÷61
8	Штормовий вітер	17,2÷20,7	34÷40	62÷74
9	Сильний штормовий вітер	20,8÷24,4	41÷47	75÷88
10	Шторм	24,5÷28,4	48÷55	89÷102
11	Надзвичайно сильний шторм	28,5÷32,6	56÷63	103÷117
12	Ураган	> 32,7	> 64	> 118

В Антарктиці швидкість вітру сягає 65 м·с⁻¹, у тропіках — 110 м·с⁻¹. Швидкість вітру V залежить від висоти h над рівнем моря: $V = 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ($h = 20 \text{ м}$); $V = 20 \div 25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ($h = 300 \text{ м}$); $V = 60 \div 80 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ($h = 10 \div 17 \text{ км}$).

Напрямок вітру визначають щодо сторін світу і позначають або в румбах (всього 16): північний, північно-східний, східний тощо, або в поділках: одна поділка містить 5° або 10° залежно від необхідної точності вимірювань.

Поривчастість вітру — це стрибкоподібні підсилення і послаблення швидкості ΔV вітру; $\Delta V = \pm 3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при $V = 5 \div 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; $\Delta V = \pm 5 \div 7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при $V = 11 \div 15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Розглянемо повітряні потоки, що викликають стресові ситуації.

Смерч — сильний вітер у вигляді горловини з вертикальною віссю, що має велику швидкість обертання. В Америці його називають *торнадо*. Причиною смерчу є великі градієнти тиску, нестійкість нижнього шару атмосфери (до 2 км), що виникає при зіткненні сухих хо-

лодних повітряних мас з теплими й вологими. Діаметр смерчу сягає 100 м над водною поверхнею, від кількох десятків метрів до кількох сот метрів — над землею поверхнею. Висота смерчу становить від одного до кількох сот кілометрів. Характерна особливість — спіралеподібний рух повітря навколо вертикальної осі. Швидкість руху становить 50-100 м·с⁻¹, а інколи 250 м·с⁻¹ причому є вертикальна компонента швидкості величиною 70+90 м·с⁻¹. Тривалість смерчу — від кількох хвилин до кількох годин. Для оцінки смерчів використовують *шкалу Фудзі* (табл. 1.2.3)

1.2.3. Шкала Фудзі

Категорія	Швидкість, км·г ⁻¹	Наслідки
F ₀ (легкий)	64÷115	Руйнування телевізійних антен, труб, дерев, вікон
F ₁ (помірний)	116÷179	Перевертання автомобілів, виривання дерев з корінням
F ₂ (значний)	180÷251	Знесення дахів, перевертання рухомих будинків
F ₃ (суворий)	252÷330	Руйнування металевих будівель, зсування зовнішніх стін, повал лісів та вилягання угідь
F ₄ (спустошливий)	331÷416	Падіння стін, перенесення металевих та бетонних конструкцій на велику відстань
F ₅ (неймовірний)	417÷509	Перенесення будинків на велику відстань, руйнування шкіл, мотелів
F ₆ (який важко уявити)	510÷606	Автомобілі піднімає в повітря

Урагани — тропічні циклони, швидкість яких досягає 80 м·с⁻¹. Термін «ураган» стосується екстремальних вітрів, що виникають у північній Атлантиці; аналогічні явища у Тихому океані називають *тайфунами*. Тривалість ураганів від 1 до 30 днів. Оцінюють урагани за шкалою Сафіра-Сімсона (табл. 1.2.4).

1.2.4. Шкала Сафіра-Сімсот оцінки ураганів

Категорія	Швидкість, кмг ⁻¹	Наслідки
1 (мінімальний)	119+153	Руйнування 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 відстані 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, потреба в евакуації населення в зоні 8–16 км

Суховій — вітер, що виникає при високій температурі (більше 25°C) і вкрай низькій відносній вологості (менше 30%). Спостерігаються суховії в степових та лісостепових зонах. Швидкість руху повітря сягає 5+20 м · с⁻¹.

Пилі бурі виникають на оголених земельних ділянках, розпиленому й висушеному ґрунті, на розораних схилах. Основними чинниками, що сприяють пилі бурі, є сильний вітер (понад 10 м · с⁻¹) і відносна вологість, що не перевищує 50%. В Україні в степовій зоні спостерігають 4+5 днів на рік з пиловими бурями, а в деяких областях — 10+15 днів на рік.

Бора — сильний, холодний і поривчастий вітер, що виникає в області невисоких гірських хребтів і пересувається у бік теплого моря. Утворюється в холодну пору року, коли над холодним континентом виникає зона підвищеного тиску, а над теплим морем — зона низького. Над хребтом переріз повітряного потоку зменшується, а швидкість збільшується. Швидкість вітру під час бори досягає 40+60 м · с⁻¹, температура повітря може знижуватися до — 20 °С. Тривалість бори — 1+3 дні.

Вимірювання параметрів вітру

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

Анемометр чашечкового типу складається з трьох-чотирьох напівсферичних чашок, що обертаються навколо осі, перпендикулярної напрямку вітру (рис.1.2.2). Якщо C_1 та C_2 є коефіцієнтами зчеплення з повітрям увігнутої та опуклої поверхонь чашок відповідно, то сили, що діють на діаметрально протилежні чашки (рис. 1.2.3), визначаються за виразом:

$$F_y = 1/2 \cdot C_1 \rho S (V - V_t)^2, \quad (1.2.5)$$

$$F_o = 1/2 \cdot C_2 \rho S (V + V_t)^2, \quad (1.2.6)$$

де V — швидкість вітру, V_t — тангенціальна швидкість чашки, що обертається, ρ — густина повітря, S — площа поперечного перерізу чашки.

Обертальна швидкість системи, що знаходиться у рівновазі з повітряним потоком, передбачає рівність сил F_y та F_o , звідки:

$$C_1 (V - V_t)^2 = C_2 (V + V_t)^2. \quad (1.2.7)$$

Розв'язок останнього рівняння щодо V_t приводить до виразу:

$$V_t = V \left(\frac{1 - \sqrt{C_1 C_2}}{C_1 - C_2} \right). \quad (1.2.8)$$

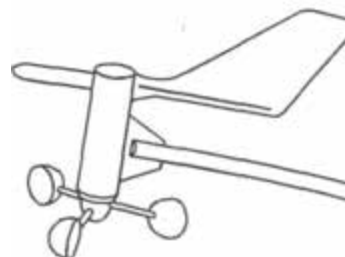


Рис. 1.2.2. Анемометр чашечкового типу

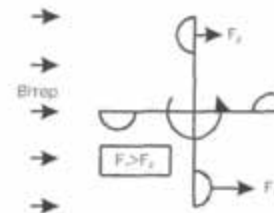


Рис. 1.2.3. Сили, що діють на чашки анемометра

Для перетворення механічних обертань у сигнал, що інформує про швидкість вітру, використовують електричні генератори, оптоелектричні або емнісні перетворювачі. Перевагою чашечкових анемометрів є лінійна залежність швидкості від швидкості вітру K за умови, що коефіцієнти зчеплення сталі (для анемометрів чашечкового типу ця умова виконується). Порогова чутливість чашечкового анемометра становить $90+2,24 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Анемометри цього типу прості й чутливі.

Анемометр пропелерного типу має три-чотирилопате-вий пропелер, вісь якого показує напрямок вітру (рис. 1.2.4). Залежність швидкості обертання лопаті V_l від швидкості вітру має вигляд:

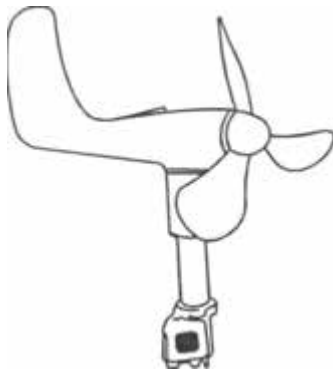


Рис. 1.2.4. Анемометр пропелерного типу

де θ — кут нахилу лопаті пропелера відносно осі обертання, κ — коефіцієнт, що залежить від конструкції пропелера ($\kappa = 1$). Якщо вибрати кут нахилу лопаті $\theta = 45^\circ$, то $\text{tg}\theta = 1$ і тангенціальна швидкість руху лопаті приблизно дорівнює швидкості руху вітру. Гранична чутливість пропелерного анемометра становить $1,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; використовують ці прилади для вимірювання швидкості вітру до $90 \text{ М} \cdot \text{с}^{-1}$. Перевагою анемометра пропелерного типу порівняно з чашечковим є його мала вага (пропелер може бути виготовлений з пластмаси), у три рази більша швидкість обертання і здатність вимірювань слабких повітряних потоків.

Трубка Піто має вигляд циліндра з двома отворами, один з яких спрямований у напрямку руху повітря і призначений для вимірювання загального тиску (статичного ρ і динамічного $\rho V^2/2$), а інший — збоку, що дає змогу вимірювати тільки статичний тиск p . Різниця тисків, що вимірюються диференціальним манометром (рис. 1.2.5), дорівнює:

$$\Delta p = \rho V^2 / 2, \quad (1.2.10)$$

де ρ — густина повітря, V — швидкість вітру.

Анемометри цього типу використовують для вимірювань швидкостей вітру у межах $2+3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Звичайно ці анемометри застосовують переважно в метеорології, а не для вимірювання параметрів навколишнього середовища.

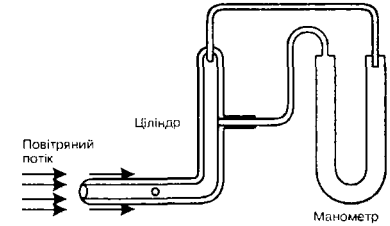


Рис. 1.2.5. Трубка Піто

Термоанемометр ґрунтується на реєстрації впливу повітряного потоку на температуру нагрітого провідника або тіла. Принцип дії приладів цього типу описується законом Кінга: тепловий потік, яким обмінюється циліндр, нагрітий до температури, що перевищує температуру навколишнього повітря, з повітряним потоком, що рухається зі швидкістю V , дорівнює:

$$Q = (\alpha + bV^2) AT, \quad (1.2.11)$$

де AT — різниця температур циліндра та повітря, α і b — константи, що залежать від розмірів циліндра, η — коефіцієнт, близький до одиниці.

Розглянемо провідник з опором R_p , що перебуває при температурі T_1 навколишнього повітря. Внаслідок нагрівання провідника до температури T_2 опір провідника становить R_2 ; згідно з законом Джоуля-Ленца кількість теплоти, що виділяється провідником за одиницю часу, дорівнює:

$$Q = R_2 P, \quad (1.2.12)$$

де I — електричний струм.

Поеднуючи вирази (1.2.11) та (1.2.12), отримуємо:

$$R_2 P = (\alpha + bV^2)(T_2 - T_1). \quad (1.2.13)$$

На практиці частіше використовують рівняння, що враховує зміну опорів, а не температур. Дійсно, використовуючи співвідношення:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1)^2 + \dots], \quad (1.2.14)$$

де α і β — температурні коефіцієнти опору, і нехтуючи членами другого порядку, отримуємо:

$$R_2 P = (\alpha' + \beta' V^2)(R_2 - R_1), \quad (1.2.15)$$

де α' і β' — нові константи.

Анемометри цього типу чутливі до зміни як швидкості вітру, так і температури. Типові схеми термоанемометрів наведено на рис. 1.2.6.

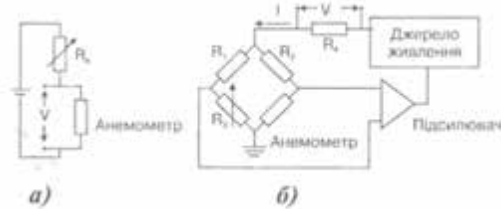


Рис. 1.2.6. Типові схеми термоанемометрів: а. анемометр сталої інтенсивності; б. анемометр сталої температури

Ультразвуковий анемометр використовує той факт, що звук (ультразвук) поширюється швидше 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. Передавач посилає безперервні або імпульсні ультразвукові хвилі. Залежно від напрямків поширення вітру з ультразвуковою хвилею час проходження хвилею відстані d між передавачем та приймачем визначається так:

$$t_1 = d/(V_{зв} + V_i); \quad t_2 = d/(V_{зв} - V_i), \quad (1.2.16)$$

де $V_{зв}$ — швидкість поширення ультразвукової хвилі, V_i — швидкість поширення проекції вектора вітру на вісь i .

Різниця в часі проходження відстані d між передавачем та приймачем двома ультразвуковими хвилями становить:

$$\Delta t = 2dV_i/(V_{зв}^2 - V_i^2) \approx 2dV_i/V_{зв}^2 \quad (1.2.17)$$

Величина швидкостей вітру, які вимірюють ультразвукові анемометри, сягає $30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Недоліком ультразвукових анемометрів є залежність швидкості поширення ультразвуку від температури, вологості, атмосферного тиску, що потребує відповідного калібрування приладів. Крім того, електронне обладнання підвищує вартість приладів цього типу.

Допплерівський анемометр діє на основі ефекту Доплера: при опромінюванні об'єкта, що рухається зі швидкістю V , ультразвуковою хвилею певної довжини λ відбувається розсіювання хвилі, причому частота (довжина) розсіяної ультразвукової хвилі залежить від швидкості руху об'єкта. Допплерівський зсув $\Delta\Omega$ частоти ультразвукової

хвилі, розсіяної під кутом θ об'єктом, що рухається зі швидкістю V , описується виразом:

$$\Delta\Omega = \frac{4\pi V}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi, \quad (1.2.18)$$

де φ — кут між напрямком швидкості V і напрямком поширення ультразвукової хвилі. Допплерівські анемометри здатні вимірювати швидкість вітру на висотах до 1 км; точність вимірювання становить 5%.

Для визначення напрямку вітру використовують флюгери, що мають вигляд металевієї пластини прямокутної форми, яка обертається навколо вертикальної осі. Передача інформації про напрямок вітру в сучасних приладах здійснюється за допомогою потенціометра (рис. 1.2.7), зміна положення реохорда в якому спричиняє відповідну зміну електричного струму, що проходить через статор приймальної системи, викликаючи обертання ротора цієї системи та стрілки індикатора. Точність визначення напрямку вітру потенціометричною системою становить $\pm 3^\circ$. Збільшити точність можна, використавши сельсіннову систему (рис. 1.2.8). Обертання ротора сельсін-давача зумовлює появу електрорушійної сили, пропорційної синусу кута обертання, що приводить до появи електричного струму в статорі сельсін-приймача, відповідного магнітного поля, яке змушує обертатися ротор приймача, сполученого з індикатором.

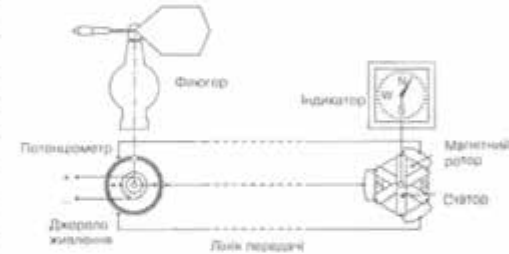


Рис. 1.2.7. Передача інформації щодо напрямку вітру за допомогою потенціометра

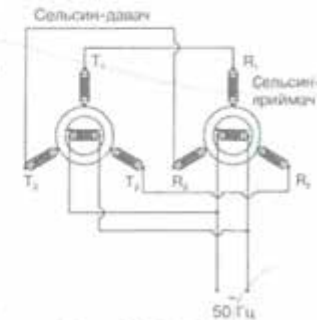


Рис. 1.2.8. Передача інформації щодо напрямку вітру за допомогою сельсіннової системи

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.

За нормами міжнародної метеорологічної організації, прилади, призначені для вимірювання напрямку вітру, повинні визначати напрямок вітру в інтервалі швидкостей $0,5 \div 50 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ з роздільною здатністю $\pm 2 \div \pm 5^\circ$.

Модельовання зміни швидкості вітру

Розглянемо рух повітряних потоків у рослинному покриві. Припустимо, що швидкість вітру на поверхні ґрунту дорівнює нулю, збільшуючись з висотою до постійного значення. Рівняння, що описує зміну швидкості вітру з висотою, має вигляд:

$$V(z) = \frac{V^*}{0,4} \ln \frac{z-d}{z_m}, \quad (1.2.19)$$

де V^* — швидкість тертя (стала величина для поверхневого шару атмосфери $50 \div 100 \text{ м}$), d — зміщення нульової поверхні, z_m — параметр шорсткості; z — висота; $0,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ — стала Кармана.

Рівняння (1.2.19) правильне за умови, що $z \geq z_m - d$. Параметр V^* має розмірність швидкості. Величина цього параметра пропорційна швидкості вітру на висоті z , крім того, вона залежить від тертя повітряного потоку об поверхню. Параметр шорсткості z_m має розмірність довжини, але його не слід інтерпретувати як фізичну величину, що вимірюється. Цей параметр знаходять емпірично шляхом визначення швидкості вітру на різних висотах і екстраполяції прямої залежності $\ln(z-d) = f[V(z)]$ в область $V(z) = 0$. Перетин цієї прямої з віссю ординат дає значення $\ln z_m$. В табл. 1.2.5 наведено значення параметра шорсткості для різних природних поверхонь. Для однорідних сільськогосподарських угідь параметр шорсткості z_m і зміщення нульової поверхні d можна визначити за допомогою висоти h рослинного покриву. Для поля середньої густоти рослин можна використовувати співвідношення:

$$z_m = 0,1 h; \quad d = 0,65 h. \quad (1.2.20)$$

1.2.5. Значення параметра шорсткості для деяких природних поверхонь

Тип поверхні	z_m , м	Тип поверхні	z_m , м
Водна поверхня	$2 \cdot 10^{-3} \div 6 \cdot 10^{-3}$	Лід	10^{-5}
Рівна пустеля	$3 \cdot 10^{-4}$	Засніжена поверхня	$2 \cdot 10^{-3}$
Голий ґрунт	$5 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-2}$	Хвойний ліс	1,1
Оброблений ґрунт	$2 \cdot 10^{-2} \div 6 \cdot 10^{-3}$	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	$3 \cdot 10^{-1} \div 4 \cdot 10^{-1}$
Пшениця висотою 1 м	$10^{-1} \div 1,6 \cdot 10^{-1}$	Села, невеликі міста	$4 \cdot 10^{-1} \div 5 \cdot 10^{-1}$
Луки висотою 50 см	$5 \cdot 10^{-2} \div 7 \cdot 10^{-2}$	Місто	1,75 ÷ 3,2

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'язок

З табл. 1.2.3 знаходимо величину параметра шорсткості $z_m = 0,04 \text{ м}$. Підставляємо числові дані у рівняння (1.2.19):

$$V(z) = \frac{V^*}{0,4} \ln \frac{2,6 - 1,2}{0,04} = \frac{V^*}{0,4} \ln 35 = V^* \cdot 8,9 = 4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Звідси

$$V^* = 0,45 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Контрольне завдання

Побудувати графіки залежності $z - d = f[V(z)]$ та $\ln(z-d) = f[V(z)]$ для рослинного покриву з такими параметрами: $d = 1,4 \text{ м}$, $z_m = 0,2 \text{ м}$, $V^* = 0,9 \text{ м}$.

Визначити графічно величину параметра шорсткості z_m . Діапазон зміни висоти 1,6 ÷ 6 м.

Аудиторні завдання

1. Назвати причини, що призводять до утворення вітру.
2. Перевести одиницю вимірювання швидкості вітру «вузол» у «м · с⁻¹» та «км · с⁻¹».

Альтернативний тест

Чи правильне твердження, що сила Коріоліса максимальна на полюсах? Так Ні

Акордно-вибірковий тест

Знайти правильні відповіді на запитання «Які причини викликають геострофічний вітер»

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

Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари «запитання-відповідь». Межа вимірювання швидкості вітру анемометром становить:

- а. Трубка Піто
 - б. Ультразвуковий анемометр
 - в. Анемометр пропелерного типу
1. 30 м · с⁻¹
 2. 2÷3 м · с⁻¹
 3. 90 м · с⁻¹

Репродуктивний тест

1. В чому полягає перевага: анемометра чашечкового типу?
2. анемометра пропелерного типу?

Конструктивний тест

Анемометр якого типу доцільно використовувати в умовах бори?

Домашнє завдання

1. Визначити швидкість геострофічного вітру на рівні 700 гПа та широті місцевості 45°, якщо горизонтальний градієнт тиску становить 10⁻³ Па · м⁻¹.

Відповідь: 10,7 м · с⁻¹.

2. Побудувати графіки залежності $\xi \sim d = f[V(z)]$ та $\ln(z - d) = J[V(z)]$ для поверхні з такими параметрами:

№	Тип поверхні	d, м	z _m	V'
1	Рослинний покрив висотою 50 см	0,15	9·10 ⁻²	0,1
2	Пустеля	0,03	3·10 ⁻⁴	0,8
3	Трава	0,01	10 ⁻²	0,5
4	Лід	0,02	10 ⁻⁵	0,9
5	Ліс	1,5	1,1	0,1
6	Картопляне поле висотою 60 см	0,5	4·10 ⁻²	0,05

Визначити з графіка величину параметра шорсткості z_m-

3. ВІБРАЦІЇ

Оцінка вібрацій

Вібрації (від лат. *vibratio* «коливання») — механічні коливання матеріальних систем, що відбуваються з великою (більше одного коливання за секунду) частотою та невеликою амплітудою. Транспортні засоби, промислові агрегати, будівельні механізми й машини є джерелами вимушених механічних коливань, що утворюються в ґрунті. Основна частина коливальної енергії переноситься поверхневими хвилями, які поширюються в приповерхневому шарі ґрунту (10+15 м). Землетруси є також джерелами коливань земної поверхні та підземних поштовхів, що викликаються природними чинниками.

Динамічний вплив джерел вібрації оцінюють швидкістю вібрації, яка вимірюється в мм · с⁻¹. Нормою вібраційних впливів є рівень 0,12 мм · с⁻¹. Інтенсивність вібраційного поля залежить від відстані до джерела (рис. 1.3.1).

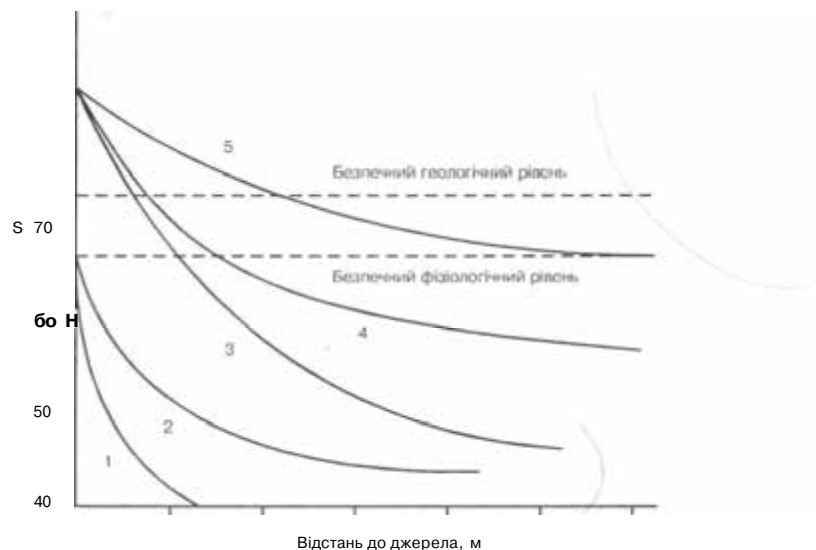


Рис. 1.3.1. Залежність інтенсивності вібраційного поля від відстані: 1 — вентиляційна шахта; 2 — автомобільний транспорт; 3 — залізничний транспорт; 4 — трамвай; 5 — механічний копёр

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

$$L_y = 20 \lg (V/VJ), \quad (1.3.1)$$

де K — значення коливальної швидкості, U_e — опорна коливальна швидкість.

Типові значення вібраційних швидкостей для різних джерел вібрації наведено в табл. 1.3.1.

1.3.1. 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

Перетворювачі вібрацій

На рис. 1.3.2 наведено блок-схему системи, призначеної для вимірювання вібрацій, що перетворюються в електричний сигнал, який фіксується системою реєстрації та аналізується. Залежно від параметрів, що вимірюються (зміщення, швидкість, прискорення, фаза, частота), розрізняють такі прилади як *віброметри, велометри, акселерометри, фазометри, частотоміри*. Пристрій, що перетворює вібраційні параметри у відповідний електричний сигнал, називається *перетворювачем*. Розглянемо принцип дії основних типів перетворювачів.



Рис. 1.3.2. Блок-схема системи, призначеної для вимірювання вібрацій

Перетворювачі опору — в основі принципу дії цих приладів лежить перетворення механічного руху в зміну електричного опору за допомогою реостата або напівпровідника, що викликає відповідні зміни напруги чи струму в системі реєстрації. Схему такого перетворювача наведено на рис. 1.3.3. Конструкція складається з провідника (мідь або нікель), розмішеного у цементі між паперовими шарами. Механічна напруга, якої набуває перетворювач, пов'язана з опором співвідношенням:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta R}{kR}, \quad (1.3.2)$$

де k — фактор, що враховує тип провідника.

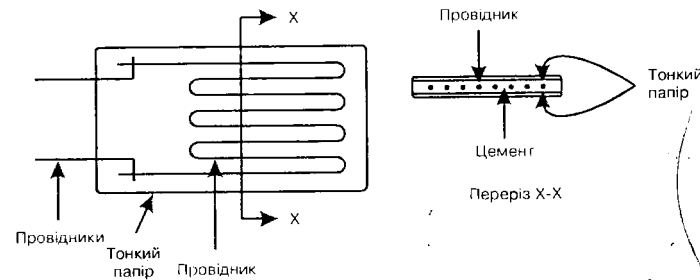


Рис. 1.3.3. Перетворювач опору

Зміна AR опору провідника оцінюється за допомогою електричного моста (рис. 1.3.4), плечі якого складають опори R_1, R_2, R_3 і R_4 (один з них опір провідника в перетворювачі), а діагоналями моста є джерело струму і вимірювальний прилад. Електрорушійна сила, що вимірюється приладом, визначається за виразом:

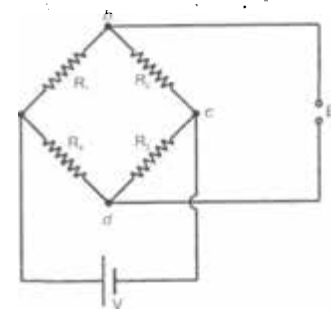


Рис. 1.3.4. Електричний міст для вимірювання опору

$$E = \left[\frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right] U. \quad (1.3.3)$$

Рівняння рівноваги моста має вигляд:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (1.3.4)$$

Коли опір R_1 набуває зміни ΔR_1 , електрорушійна сила E змінюється на величину:

$$\Delta E \approx U r_0 \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right], \quad (1.3.5)$$

де

$$r_0 = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} = \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2}. \quad (1.3.6)$$

Якщо опір перетворювача розміщено між точками a і b моста ($R_1 = R_x$), то рівняння (1.3.5) можна переписати з урахуванням того, що $\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$, таким чином:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta E}{U r_0} \quad (1.3.7)$$

або

$$\Delta E = k U r_0 \varepsilon. \quad (1.3.8)$$

Оскільки сигнал ΔE , що реєструється, пропорційний механічній нарузі ε , прилад можна прокалібрувати в одиницях механічної нарузи.

П'єзоелектричні перетворювачі ґрунтуються на явищі п'єзоелектричного ефекту — здатності деяких матеріалів (кварц, турмалін, сульфат натрію) утворювати електричні заряди під час деформації або механічної нарузи. Величина заряду q , що виникає на поверхні кристалу, визначається за виразом:

$$q = kF = kpS. \quad (1.3.9)$$

де F — сила, що прикладається до кристалу, p — тиск, S — площа поверхні кристалу, k — п'єзоелектрична стала.

Напруга, яка вимірюється на поверхнях кристалу завдяки п'єзоэффекту, визначається так:

$$U = vdp, \quad (1.3.10)$$

де v — чутливість кристалу, d — товщина кристалу.

Типовий п'єзоелектричний перетворювач, що використовується як акселерометр, зображено на рис. 1.3.5. Під час вібрування основи на поверхнях кристалу виникає напруга, пропорційна прискоренню. Перевагою такого пере-

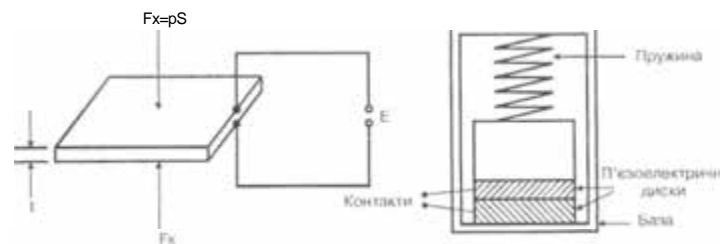


Рис. 1.3.5. П'єзоелектричний перетворювач

творювача є компактність, висока чутливість, здатність давати показники в широкому частотному діапазоні.

Приклад

Кристал кварцу має товщину 0,25 см. Визначити напругу, що виникає на поверхнях кристалу внаслідок дії тиску $345 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$, якщо чутливість кристалу становить $0,055 \text{ В} \cdot \text{м} \cdot \text{Н}^{-1}$.

Розв'язок

Використовуючи рівняння (1.3.10), отримуємо:

$$U = vdp = 0,055 \text{ В} \cdot \text{м} \cdot \text{Н}^{-1} \cdot 0,0025 \text{ м} \cdot 345 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2} = 0,047 \text{ В}.$$

Контрольне завдання

Визначити п'єзоелектричну сталу кварцу, якщо під тиском $345 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ кристал площею 1 см^2 створює заряд $7,7625 \cdot 10^{-14} \text{ Кл}$.

Відповідь: $2,25 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} \cdot \text{Н}^{-1}$.

Електродинамічні перетворювачі. Принцип дії перетворювача цього типу полягає у виникненні напруги на кінцях провідника у формі котушки під час його руху в магнітному полі. Величина цієї напруги визначається за виразом:

$$U = BlV, \quad (1.3.11)$$

де B — магнітна індукція, l — довжина провідника, V — швидкість його руху. Схему електродинамічного перетворювача наведено на рис. 1.3.6.

Диференційний перетворювач. Конструкція цього типу перетворювача передбачає наявність первинної котушки в центрі і двох вторинних котушок по боках. Всі три котушки мають спільне магнітне осердя, механічно пов'язане з

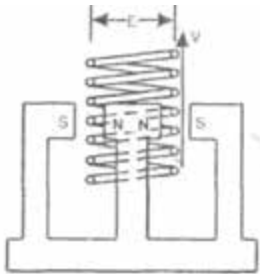


Рис. 1.3.6. Електродинамічний перетворювач

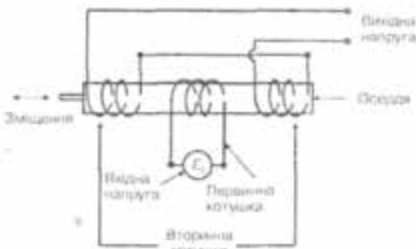


Рис. 1.3.7. Диференційний перетворювач

об'єктом, що вібрує. Первинна котушка приєднана до джерела струму (рис. 1.3.7). Під час руху осердя завдяки явищу електромагнітної індукції на вторинних котушках виникають напруги, які дорівнюють одна одній, але змінюються в протифазі, коли осердя знаходиться посередині. За зміщення осердя на клеммах вторинних котушок виникає різниця напруга, величина якої залежить від зміщення осердя, а полярність — від напрямку його руху.

Фотоелектричний перетворювач складається з електричного моста, одне плече якого — фоторезистор, який розміщують на тілі, що коливається, і освітлюють через діафрагму (рис. 1.3.8). Під час коливань відбуваються зміщення фоторезистора, рівень освітлення змінюється, що впливає на величину опору цього плеча і дисбаланс моста.

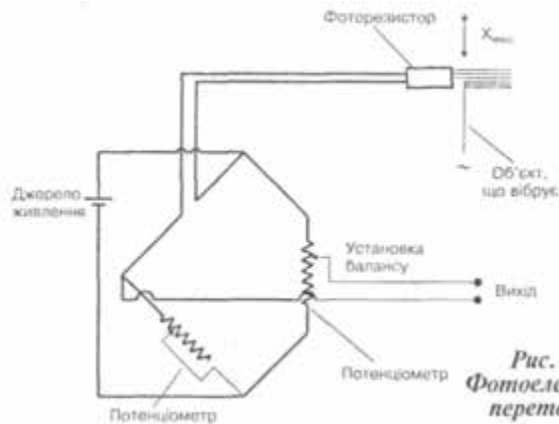


Рис. 1.3.8. Фотоелектричний перетворювач

Лазерний віброметр. На об'єкт, вібрації якого оцінюють, спрямовують випромінювання CO₂-лазера (10,6 мкм). Відбите випромінювання накладається на падаюче випромінювання і утворює биття, характер якого залежить від руху об'єкта. Для збільшення чутливості приладу промінь лазера модулюють за частотою. Перевагою приладу є висока чутливість, що сягає 50 нм, а також здатність дистанційного вимірювання вібрацій.

Характеристики землетрусів

Землетруси характеризуються графічним розподілом місць виникнення поштовхів (гіпоцентрів), інтенсивністю, тривалістю, механізмами виникнення та руйнуваннями, які вони спричиняють. Залежно від глибини A виникнення гіпоцентрів (яка може простягатися до 700 км) землетруси ділять на поверхневі ($A < 30$ км), проміжні ($A = 30+300$ км) і глибокі ($A > 300$ км). Розміщена над гіпоцентром ділянка земної поверхні, в межах якої інтенсивність поштовхів досягає найбільшої величини, називається епіцентром.

Оцінка землетрусів

Є два підходи до оцінки інтенсивності землетрусів. Перший пов'язаний з вимірюванням енергії, що вивільнюється під час геофізичного процесу. Для цього використовують шкалу Ріхтера. Інтенсивність землетрусів змінюється в широких межах — від тих, що викликають легкі тремтіння земної кори, які реєструються лише чутливими приладами, до тих, що спричиняють руйнування будинків. Енергія вимірюється сейсмографом — приладом, шкала якого побудована у логарифмічному масштабі. Згідно з шкалою Ріхтера, амплітуда M землетрусу оцінюється за виразом:

$$M = \lg A - \lg A_0 \quad (1.3.12)$$

де A — максимальна амплітуда коливання, що вимірюється сейсмографом, A_0 — функція, яка відповідає амплітуді землетрусу певної інтенсивності, що зареєстрована на певній відстані від гіпоцентру. Шкалу Ріхтера наведено в табл. 1.3.2.

1.3.2. Шкала Ріхтера оцінки інтенсивності землетрусів

Бал	Енергія, Дж
1+2	4,47·Ю ⁵
3	7,94·Ю ⁷
4	2,51·Ю ⁹
5	7,94·Ю ¹⁰
6	2,51·Ю ¹²
7	7,94·Ю ¹³
8	2,51·Ю ¹⁵

Так, інтенсивність 2 бали звичайно відповідає мікроземлетрусам; вони не відчуються людиною, а лише апаратурою. Землетруси інтенсивністю 4,5 бала й більше реєструються сейсмографами у всьому світі. Великі землетруси мають інтенсивність 8 балів і більше. Але шкала Ріхтера не враховує пошкоджень й руйнувань, спричинених землетрусом. Крім того, логарифмічний масштаб, покладений в основу шкали Ріхтера, призводить до певних непорозумінь за спроби інтерпретувати землетруси населенням: так, землетрус інтенсивністю 6 балів може бути оцінений як вдвоє більший, ніж землетрус інтенсивністю 3 бали.

Інший підхід враховує не параметри саме землетрусу, а його вплив на людей. У даному випадку використовується модифікована шкала Меркаллі (табл. 1.3.3).

Прилади для оцінки землетрусів

Схему типового приладу для оцінки землетрусів (*сейсмографа*) наведено на рис. 1.3.9. Основу приладу складає котушка, приєднана до тіла маятника, що рухається у магнітному полі. Цей рух супроводжується виникненням у котушці електричного струму, що вимірюється.

Модифікація сейсмографа передбачає застосування допоміжної котушки, всередині якої розміщено дзеркальце гальванометра (рис. 1.3.10), на яке подається світловий промінь. За виникнення електричного струму дзеркальце обертається, що викликає зміну кута відбивання світлового

1.3.3. Модифікована шкала Меркаллі оцінки наслідків землетрусів

Бал	Кількість людей, що сприймають землетрус, ознаки	Пошкодження	Руйнування	Бал	Кількість людей, що сприймають землетрус	Пошкодження конструкцій	Руйнування
I	Ніхто, крім кількох при особливих обставинах			VII		Слабких	
II	Кілька, особливо на верхніх поверхах			VIII		Звичайних	
III	Небагато, в кімнатах помітні вібрації			IX		Міцних	
IV	Багато в кімнатах, кілька зовні вдень, вікна, посуда тремтять			X		Багатьох	Деяких
V	Більшість, уночі просипаються	Скля, штукатурки		XI		Більшості	Багатьох
VI	Всі, багато переликаних	Меблі, труби		XII		Всіх	Більшості

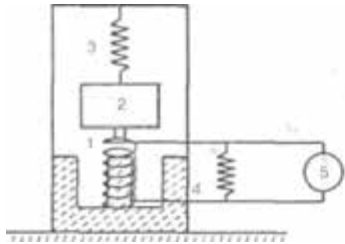


Рис. 1.3.9. Схема типового сейсмографа: 1 — котушка, 2 — тіло, 3 — пружина, 4 — магніт, 5 — система реєстрації

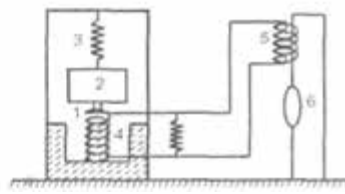


Рис. 1.3.10. Схема модифікованого сейсмографа: 1 — котушка, 2 — тіло, 3 — пружина, 4 — магніт, 5 — додаткова котушка, 6 — дзеркальце

променя. Таким чином, коливання рухомої частини сейсмографа фіксуються системою реєстрації приладу у вигляді *сейсмограм*, яка демонструє значне підсилення амплітуди коливань під час землетрусу (рис. 1.3.11).

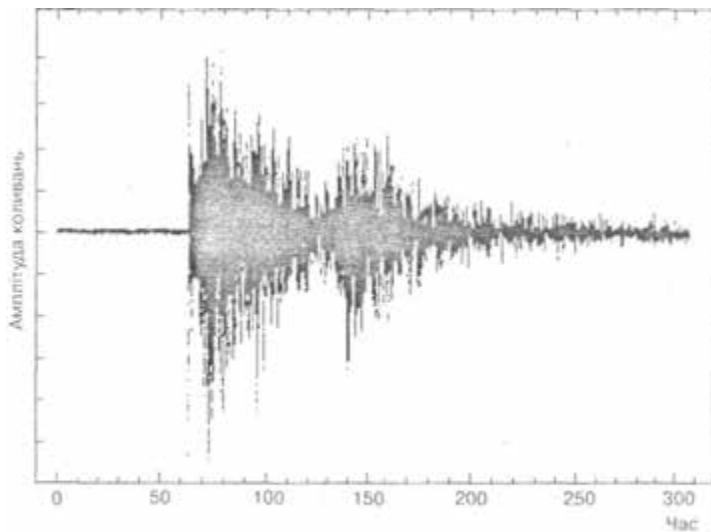


Рис. 1.3.11. Підсилення амплітуди коливань, що реєструє сейсмограф, під час землетрусу

Аудиторні завдання

1. Визначити відстань до потягу, якщо вібраційна швидкість становить 50 дБ.
2. Визначити рівень коливної швидкості, якщо коливальна швидкість дорівнює $12 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$.

Репродуктивний тест

Як підвищити чутливість лазерного вібрметра?

Альтернативний тест

Чи правильне твердження, що: «П'єзоелектричні перетворювачі ґрунтуються на явищі п'єзоелектричного ефекту — здатності деяких матеріалів утворювати електричні заряди під час деформації або механічної напруги»? Так Ні

Вибірковий тест

Якому балу шкали Меркаллі відповідає пошкодження більшості конструкцій?

Відповідь: I; II; III; IV; V; VI; VII; VIII; IX; X; XI; XII.

Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари «прилад — параметр, який він вимірює»:

- | | |
|------------------|-----------------|
| а. вібрметр; | 1. фаза; |
| б. акселерометр; | 2. частота; |
| в. фазометр; | 3. швидкість; |
| г. велометр; | 4. зміщення; |
| д. частотомір; | 5. прискорення. |

Конструктивний тест

Відомо, що логарифмічний масштаб, покладений в основу шкали Ріхтера, призводить до певних непорозумінь за спроби інтерпретувати землетруси населенням. Чи не можна використати звичайний масштаб для оцінки землетрусів?

Домашнє завдання

Знайдіть у літературі перелік найбільш руйнівних землетрусів XX століття. Чи можна запобігти впливові землетрусів? Які альтернативні заходи можна запропонувати, щоб запобігти впливу природних чинників?

4. ШУМИ

Визначення шуму

Є кілька визначень терміну *шум*. Перше визначення: шум — це звукові коливання, інтенсивність і частота яких змінюються несподівано та аперіодично. Згідно з другим визначенням, шум є звук, що накладається на інший звук і взаємодіє з ним, тобто він небажаний для нашого слуху. За третім визначенням — це будь-який звук, що заважає людині. Наприклад, звуки музики корисні для музиканта і є шумом (згідно з другим визначенням) для людей, що розмовляють, або шумом у третьому визначенні для людини, котра хоче заснути.

Характеристики шуму

Величина миттєвої амплітуди шуму описується нормальним (гаусовим) розподілом (рис. 1.4.1). Якщо середня потужність (сума інтенсивностей всіх гармонік, що складають шум) є сталою величиною 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 з світловими коливаннями); коли ж домінують низькочастотні звукові коливання, шум назива-

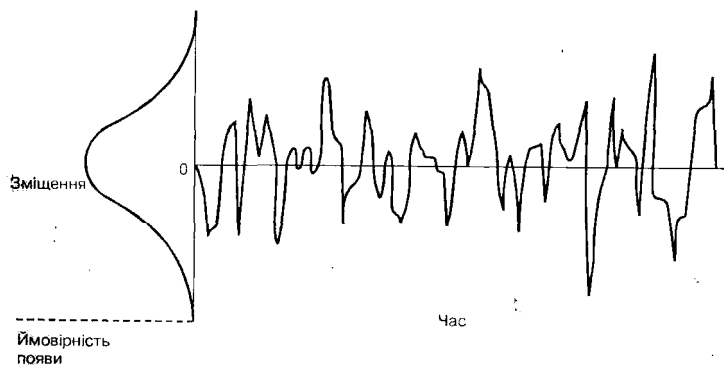


Рис. 1.4.1. Гаусовий розподіл миттєвої амплітуди шуму

ють *рожевим*. Важливим параметром шуму є *рівень інтенсивності звуку* L , що оцінюється як:

$$L = 10 \lg \left(\frac{I}{I_0} \right), \quad (1.4.1)$$

де I — інтенсивність звукової хвилі, I_0 — мінімальна інтенсивність (для повітря становить 10^{-12} Вт · м⁻²). Тут L вимірюється в децибелах (дБ).

Рівень інтенсивності звуку можна записати так:

$$L = 20 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right), \quad (1.4.2)$$

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

Еквівалентний рівень звуку визначається за виразом:

$$L_{\text{екв}} = 10 \lg \left[(1/T) \int_0^T 10^{L/10} dt \right], \quad (1.4.3)$$

де L — миттєвий рівень інтенсивності звуку, T — час усереднення (звичайно 1, 8 або 24 години).

Шум буває побутовим, виробничим, промисловим, транспортним, авіаційним. Типові значення рівнів інтенсивності шуму наведено в табл. 1.4.1, а джерел шуму — в табл. 1.4.2. Рекомендовані норми шуму в приміщеннях і на територіях становлять: 30+35 дБ на територіях заповідників; 34+37 дБ в спальних приміщеннях (будинки, лікарні, квартири); 56+66 дБ в приміщеннях магазинів, заводів тощо.

1.4.1. Типові значення рівнів інтенсивності звуку

Джерело звуку	Рівень інтенсивності звуку, дБ
Пошкодження барабанної перетинки	160
Поріг болісних відчуттів	130
Відбійний молоток	100
Автомобільний сигнал на відстані 6 км	90
Голосна розмова	80
Міська вулиця	75
Спокійна бесіда	55
Шум у кімнаті	40
Шум, при якому можна спати	35
Відкрита місцевість	10

1.4.2. Основні джерела шуму

Джерела	Еквівалентний рівень шуму, дБ
<i>Промислові</i>	
Газотурбінні енергетичні установки	100÷110
Компресорні станції	100
Металургійні заводи	90÷100
Будівельні підприємства	90÷95
Машинобудівні заводи	80
Друкарні	72÷76
<i>Транспортні</i>	
Автотранспорт (на відстані 7,5 м)	77÷83
Легкові, вантажні автомобілі та автобуси	77÷83
Залізничний транспорт (на відстані 20 м)	90÷101
Авіаційний транспорт (під трасою)	98÷105

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

$$L_{\text{сум}} = 10 \lg \sum_{i=1}^N 10^{L_i / 10}, \quad (1.4.4)$$

де L_i — рівень інтенсивності звуку кожного джерела, N — кількість джерел.

Шумове забруднення навколишнього середовища стало великою загрозою для здоров'я людини. Протягом дня мешканці великих міст змушені терпіти шумові перевантаження на рівні 65-70 дБ і більше. Є прямий зв'язок між інтоксикацією шумом і серцевими хворобами. В районах великих аеропортів, де рівень шумів досягає 100 дБ, збільшився продаж снотворних ліків, а діти цих районів гірше засвоюють навчальний матеріал. Шум у 90 дБ викликає різноманітні фізіологічні порушення. Верхня межа 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 усіх елементів слухового аналізатора від дії

шуму високої інтенсивності є волоскові клітини внутрішнього вуха. Причому, якщо волоскові клітини зазнають серйозного пошкодження, вони вже не здатні відновлювати своїх функцій і бути заміщеними іншими клітинами. Наслідком цього буває часткова або повна втрата слуху.

Для кількісної оцінки впливу шуму на слух використовують параметр, що характеризує зміну слухової чутливості — *індукований шумом пороговий зсув (ІШПЗ)*, що 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). Як правило, проміжку часу в 4 хв достатньо, щоб визначити характер ІШПЗ у людини. На рис. 1.4.2 зображено процес встановлення слухової чутливості, зменшеної під впливом шуму. Через 2 хв крива демонструє зростання в процесі встановлення; лише через 4 хв ця крива прямує до стаціонарного рівня слухової чутливості (5 дБ).

Слух має здатність відновлюватися після припинення дії шуму на рівнях інтенсивності, що не перевищують 30 дБ, вже через 16-24 хв. Слід зазначити, що для помірних рівнів шумового впливу процес відновлення слуху характеризується лінійною залежністю від часу у логарифмічному масштабі. Вплив більших рівнів інтенсивності викликає незворотні

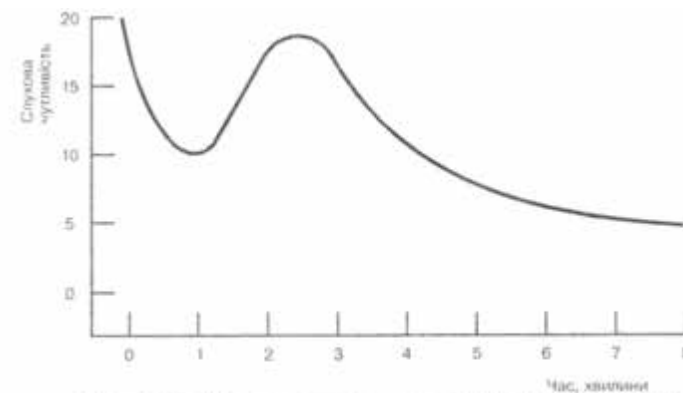


Рис. 1.4.2. Процес встановлення слухової чутливості, зменшеної під впливом шуму

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 межах 10^3 - 10^4 Гц. Кількість волоскових клітин, що залишилися, може досягати при цьому лише 40 відсотків чутливості від норми.

Звичайно вплив шуму на людину залежить як від рівня інтенсивності звуку, так і тривалості дії джерела шуму (табл. 1.4.3).

1.4.3. Граничні значення рівнів шуму, безпечних для людини, залежно від тривалості дії джерела шуму

Безпечний рівень інтенсивності звуку, дБ	Час дії джерела шуму протягом доби, години
90	8
92	6
95	4
97	3
100	2
102	1,5
105	1
110	0,5
115	0,25

Вимірювання рівнів шуму

Для оцінки 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, що оцінюються шумоміром, становить 30;-140 дБ. Розглянемо основні конструкції мікрофонів, призначених для вимірювання шумів.

Конденсаторний мікрофон складається з двох пластин, одна з яких займає фіксоване положення, а друга є діафрагмою (рис. 1.4.3). Під впливом звукової хвилі діафрагма вигинається, відстань між пластинами і ємність конденсатора відповідно змінюються, що викликає зміну електричного сигналу в системі реєстрації.

П'єзоелектричний мікрофон також містить діафрагму, але вона з'єднана з п'єзокристалом, що під впливом звукової хвилі перетворює механічні коливання діафрагми на електричний сигнал.

Електретний мікрофон ґрунтується на використанні електрета — діелектрика, що довго зберігає поляризований стан після зняття зовнішньої дії, яка викликає поляризацію. Таким електретом у даній конструкції мікрофона є полімерна плівка, з'єднана з металізованим електродом, що утворює з фіксованим електродом конденсатор (рис. 1.4.4). Під впли-

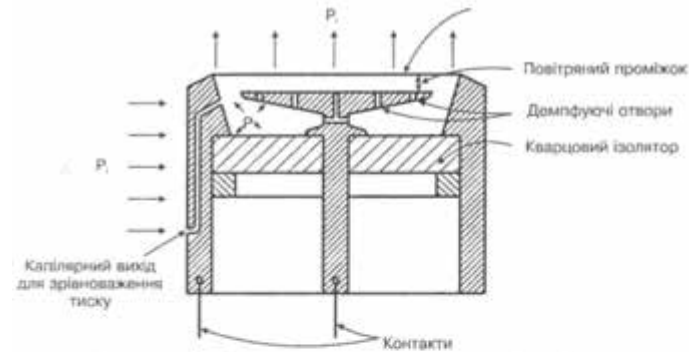


Рис. 1.4.3. Схема конденсаторного мікрофона

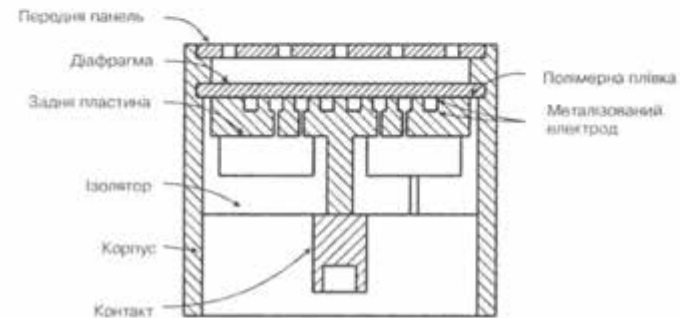


Рис. 1.4.4. Схема електретного мікрофона

вом звукової хвилі величина заряду на обкладинках конденсатора завдяки електретному ефекту змінюється, що зумовлює відповідну зміну електричного сигналу.

Аналізатори частоти шуму, що працюють у режимі реального часу або використовуючи швидке Фур'є перетворення, дають змогу оцінити шумовий сигнал на кожній частоті одночасно. Результати аналізу виводяться на дисплей і демонструють залежність рівня інтенсивності звуку від частоти.

Приклад

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

Розв'язок

Відповідно до формули (1.4.3) можна записати:

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

Приклад

Окремі шуми п'яти машин становили: 85, 88, 80, 70 та 95 дБ. Визначити сумарний шум у місці розташування цих машин.

Розв'язок

Використовуючи рівняння (1.4.14), отримуємо:

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

Аудиторні завдання

1. Дати всі визначення шуму.
2. Оцінити інтенсивність звуку, що викликає болісні відчуття.
3. Визначити, скільком децибелам відповідає шкала рівнів інтенсивностей звуку ($I_{\text{min}} = 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; $I_{\text{max}} = 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$).

Репродуктивний тест

Назвати параметри шуму.

Альтернативний тест

Чи правильне твердження, що:

«Слух має здатність відновлюватися після припинення дії шуму на рівнях інтенсивності, що не перевищує 30 дБ, вже через 16÷24 хв». Так Ні

Вибірковий тест

Які норми шуму рекомендовано в заповідниках:

- | | |
|--------------|--------------|
| 1. 10*15 дБ; | 3. 56-60 дБ; |
| 2. 30+35 дБ; | 4. 80-95 дБ |

Конструктивний тест

Який розподіл називають нормальним (гаусовим)?

5. ВОЛОГІСТЬ

Вологість повітря

Вода може існувати в атмосфері в трьох фазах — рідкій, газоподібній і твердій. Газоподібна фаза води називається паром. Пара, яка знаходиться в термодинамічній рівновазі з рідиною (тобто стані, коли число молекул, що переходить із рідини в пару, дорівнює числу молекул, що повертаються в рідину за одиницю часу), називається *насиченою*.

Під *вологістю* повітря розуміють наявність у ньому водяної пари. Повітря, що містить водяну пару, називають вологим, а те, що не містить — сухим. Розглянемо основні параметри вологості.

Абсолютна вологість повітря a — кількість водяної пари у грамах, що знаходиться в 1 м³ повітря (г · м⁻³).

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

Максимальна пружність водяної пари E — граничне значення тиску, що відповідає рівновазі між паром і водою, тобто насиченому стану пари.

Відносна вологість повітря r — відношення пружності водяної пари e до максимальної пружності E при даній температурі:

$$r = \frac{e}{E} \cdot 100\%. \quad (1.5.1)$$

Дефіцит вологості d — різниця між максимальною насиченістю E і фактичною пружністю e при даній температурі:

$$d = E - e. \quad (1.5.2)$$

Точка роси T_d — температура, при якій повітря, якщо його охолодити при сталому тиску, стає насиченою водяною парою.

Розглянемо об'єм V вологого повітря, температура якого T , а тиск — p_A . В цьому об'ємі міститься маса m_a сухого повітря і маса m_v вологого повітря. Загальна маса m_A повітря становить:

$$m_A = m_a + m_v. \quad (1.5.3)$$

Масова частка вологи дорівнює відношенню маси водяної пари до маси вологого повітря у тому самому об'ємі:

$$q = m_v / (m_a + m_v). \quad (1.5.4)$$

Масове відношення вологи — це відношення маси m_v вологого повітря до маси m_a сухого повітря:

$$x = m_v / m_a. \quad (1.5.5)$$

Між останніми двома параметрами є зв'язок:

$$q = \frac{x}{1+x}; \quad x = \frac{q}{1-q} = \frac{0,622e}{p_A - e}. \quad (1.5.6)$$

Запишемо рівняння стану ідеального газу для водяної пари й сухого повітря:

$$m_a = M_a \frac{eV_A}{RT}; \quad m_v = M_v \frac{p_A V_A}{RT}. \quad (1.5.7)$$

Комбінуємо рівняння (1.5.5) і (1.5.7):

$$R = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{e}{p_A - e}. \quad (1.5.8)$$

Враховуючи, що:

$$e = \frac{M_v}{M_a} = 0,622, \quad (1.5.9)$$

отримуємо вираз:

$$r = \varepsilon \frac{e}{p_A - e} = \varepsilon \frac{e}{p_A}. \quad (1.5.10)$$

В останньому рівнянні ми врахували, що пружність водяної пари e не перевищує 50 гПа, тоді як атмосферний тиск $p_A > 1000$ гПа.

Абсолютна вологість зв'язана з пружністю водяної пари і тиском співвідношеннями:

$$a = \frac{1,06e}{1 + \alpha t}, \quad (1.5.11)$$

де e — пружність водяної пари в мм рт. ст.; $\alpha = 0,004$ (1/°C) — коефіцієнт об'ємного розширення газів, або

$$a = \frac{0,81e}{1 + \alpha t}, \quad (1.5.12)$$

де e — пружність водяної пари в мілібарах або гектопаскалях.

Зв'язок тиску насиченої пари з температурою має вигляд:

$$\lg E = 9,4 - \frac{2345}{T}, \quad (1.5.13)$$

де E — в мілібарах, T — в кельвінах. Залежність тиску насиченої пари від температури наведено на рис. 1.5.1.

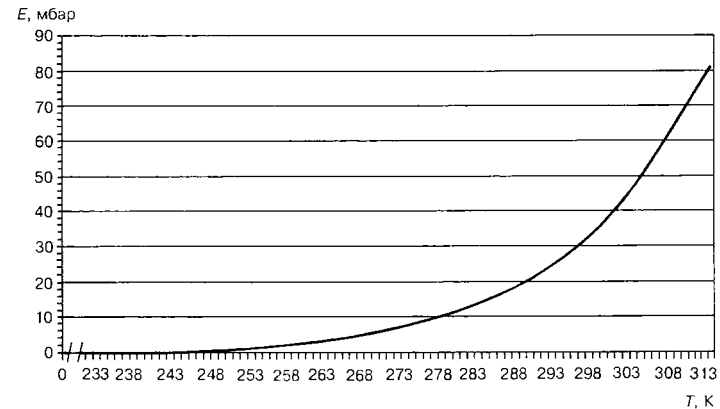


Рис. 1.5.1. Залежність тиску насиченої пари від температури

Методи вимірювання вологості повітря

Аспіраційний психрометр. Прилад містить два термометри — сухий і зволожений; ціна поділки термометрів становить 0,2 °C. Термометри розташовані у металевих трубках, з'єднаних далі в одну (рис. 1.5.2). Резервуар одного з термометрів обмотаний батистом, що зволожується. При

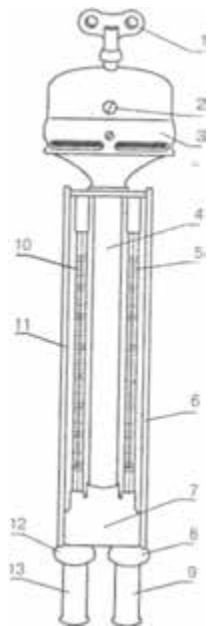


Рис. 1.5.2. Зовнішній вигляд аспіраційного психрометра:

1 — заводний ключ; 2 — віконце; 3 — головка аспірації; 4 — трубка; 5 — сухий термометр; 6 — змочений термометр; 7 — трійник; 8, 12 — ізоляційні втулки; 9, 13 — захисні трубки; 10 — сухий термометр; 11 — корпус.

вимірюванні вологості психрометр встановлюють горизонтально і обдувають повітрям обидва термометри за допомогою вентилятора. З поверхні резервуару зволоженого термометра випаровується вода, що залежить від вологості навколишнього повітря. За допомогою аспіраційного психрометра можна оцінити парціальний тиск e за психрометричною формулою:

$$e = E_s - A(t_c - t_{3M})p_A \quad (1.5.14)$$

де E_s — максимальна пружність водяної пари, що відповідає температурі зволоженого термометра; $A = 6,62 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ — психрометричний коефіцієнт (для швидкості вітру $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$); t_c — температура сухого термометра; t_{3M} — температура зволоженого термометра; p_A — атмосферний тиск (в мм рт. ст. або паскалях). Максимальну пружність водяної пари E_s , що відповідає температурі зволоженого термометра, та максимальну насиченість водяної пари E , яка відповідає температурі сухого термометра, визначають у мм рт.ст. або паскалях за табл. 1 та 2 (див. додаток).

Недоліком аспіраційного психрометра є те, що вентилятор захоплює повітря тільки на відстані кількох сантиметрів, що не дає змоги точно визначити вологість на певних ділянках. Крім того, величина психрометричного коефіцієнта 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 $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Залежність величини A від швидкості вентиляції наведено в табл. 1.5.1.

1.5.1. Залежність величини психрометричного коефіцієнта A від швидкості вентиляції

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

Залежність абсолютної похибки вимірювань вологості аспіраційним психрометром з ціною поділки $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ від температури (табл. 1.5.2) свідчить, що похибками можна знехтувати при температурах, що перевищують $10 \text{ }^\circ\text{C}$, тоді як зниження температури викликає істотне збільшення похибок.

1.5.2. 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

Волосяний гігрометр. Дія приладу ґрунтується на здатності знежиреної волосини змінювати свою довжину зі зміною вологості (рис. 1.5.3). Водяна пара здатна конденсуватися в капілярних порах людської волосини. Збільшен-

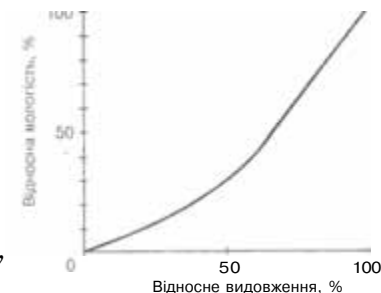


Рис. 1.5.3. Здатність знежиреної волосини змінювати свою довжину при зміні вологості

ня вологості призводить до зменшення угнутої меніски води в порах, завдяки чому волосина видовжується. Видовження волосини відбувається пропорційно логарифму відносної вологості. Схеми типових конструкцій волосяних гігрометрів наведено на рис. 1.5.4.

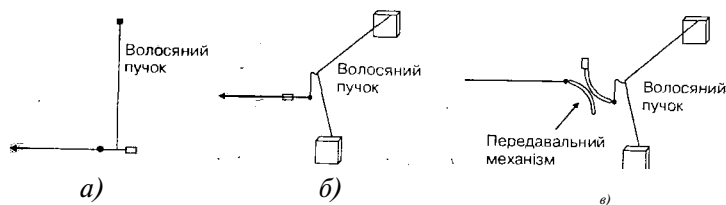


Рис. 1.5.4. Схеми типових конструкцій волосяних гігрометрів

Пучок таких волосин використовують в *гігрографі* — приладі для безперервного запису відносної вологості повітря (рис. 1.5.5). Інші матеріали, що 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 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина похибки вимірювань знаходиться в інтервалі $1\pm 3\%$; кишкова мембрана демонструє найбільшу чутливість до зміни вологості. Волосяні гігрометри мають просту конструкцію та невисоку ціну. Недоліком волосяних гігрометрів є збільшення часо-



Рис. 1.5.5. Схема гігрографа

ового проміжку до реакції залежно від температури. З табл. 1.5.3 видно, що зниження температури призводить до значного збільшення відгуку.

Ще одним недоліком гігрометрів є явище гістерезису — якщо гігрометр зберігають протягом

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

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

кількох днів у сухому приміщенні, результати вимірювання вологості можуть значно (до 15 %) відрізнятись від тих, що отримані за допомогою гігрометра, який тримали в вологому приміщенні. Через це гігрометри такого типу потребують постійного калібрування.

Ємнісний гігрометр. Основу приладу становить гігроскопічна полімерна плівка, з обох боків якої розташовані пористі металеві електроди (рис. 1.5.6,а), що утворюють конденсатор ємністю близько 500 пФ. За поглинання плівкою молекул води об'єм плівки збільшується, відстань між електродами також збільшується, що приводить до зміни ємності конденсатора. Зовнішній вигляд ємнісного гігрометра зображено на рис. 1.5.6,б'. Ємнісний гігрометр застосовується для вимірювання відносної вологості. Перевагою приладу є його компактність (розміри приладу становлять 6 мм^2), слабка залежність результатів вимірювань від зовнішньої температури, лінійність шкали в інтервалі 0–80% відносної вологості, швидкодія, малі значення гістерезису. Недоліком приладу є вплив зовнішніх забруднень на результати вимірювань. Гігрометри цього типу ви-

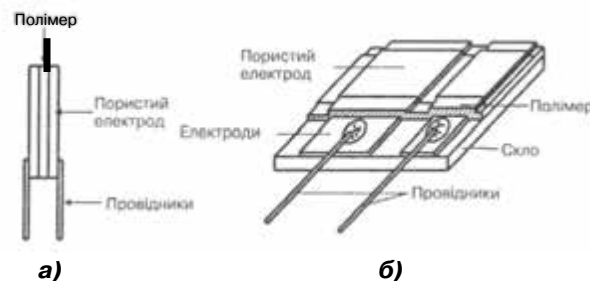
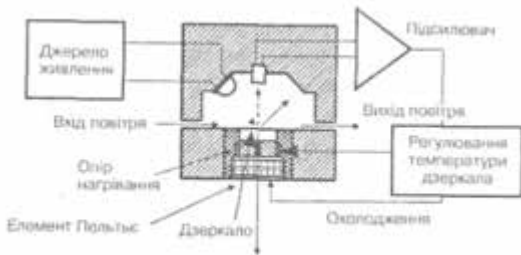


Рис. 1.5.6. Ємнісний гігрометр: а) гігроскопічна полімерна плівка з металевими електродами; б) конструкція гігрометра

користують в засобах автоматизованого контролю вологості повітря.

Конденсаційний гігрометр. Один з методів оцінки абсолютної вологості ґрунтується на вимірюванні точки роси. Якщо пласку гладеньку поверхню охолоджувати, можна спостерігати конденсацію вологи на ній. Температура поверхні в цей момент дуже близька до тієї, при якій повітря стає насиченою водяною парою, тобто до точки роси. Залишається тільки точно виміряти цю температуру. На рис. 1.5.7 видно, що конденсаційний гігрометр складається з маленького дзеркала,



$R_{\text{дз}} \ll R_{\text{пел}} \ll R_{\text{окл}} \ll R_{\text{окр}} \ll R_{\text{окл}} \ll R_{\text{окр}}$

рис. 1.5.7. Конденсаційний гігрометр

на яке нанесено тонкий антикорозійний шар золота. Дзеркало охолоджується напівпровідниковим елементом, що працює на

основі ефекту

Пельтьє, і опромінюється фотодіодом. Коли поверхня дзеркала вкривається росою, вона починає розсіювати оптичне випромінювання; вертикальна компонента розсіяного випромінювання реєструється фотодетектором, електричний сигнал з виходу якого підсилюється й подається на систему підігрівання дзеркала. Нагріте дзеркало знову може бути охоложене, і процес вимірювань триває. Визначення температури дзеркала за допомогою термодетектора дає змогу оцінити абсолютну вологість повітря. Перевагою приладу є його висока чутливість, можливість вимірювання абсолютної вологості в широкому інтервалі температур (-8(Б-+100°C) з точністю близько РС. Недоліком приладу є спотворення результатів вимірювання при низьких температурах, необхідність контролювання якості поверхні дзеркала, складність конструкції, висока ціна.

Сорбційний гігрометр. В основу дії приладу покладено залежність електропровідності вологосорбуючої плівки від вологості середовища. Для цього використовується сіль ПСІ.

Вимірювання вологості за допомогою номограми

Взаємозв'язок між параметрами вологості подано графічно за допомогою номограми (рис. 1.5.8). Розглянемо приклад визначення цих параметрів.

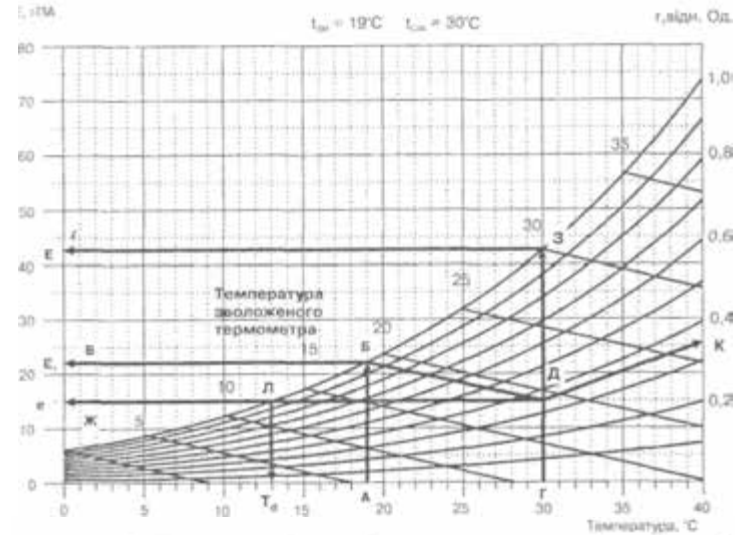


Рис. 1.5.8. Номограма для вимірювання параметрів вологості

Приклад

Визначити насиченість e водяної пари, максимальну насиченість E , що відповідає температурі сухого термометра, та максимальну насиченість E_r , що відповідає температурі зволоженого термометра, відносну вологість r і дефіцит вологості d , якщо температура сухого термометра 30 °С, а температура зволоженого термометра 19 °С.

Розв'язок

1. На горизонтальній осі номограми з точки, що відповідає температурі зволоженого термометра 19 °С (точка А), проводимо вертикальну лінію АБ до перетину з кривою $r = 1,0$ (точка Б).

2. З точки Б проводимо горизонтальну лінію БВ до перетину з лівою вертикальною віссю номограми (точка В). На цій осі визначаємо максимальну пружність E_r , що відповідає температурі зволоженого термометра: $E_r = 22,5$ гПа.

3. З точки *Б* проводимо похилу лінію *БД* 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 номограми (точка *Ж*), що дає значення пружності ϵ водяної пари при даній температурі: $\epsilon = 15$ гПа.

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

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

7. З точки *Д* проводимо лінію *ДК*, паралельну найближчій кривій номограми, до перетину з правою вертикальною віссю номограми (точка *А*), що дає значення відносної вологості при даній температурі: $r = 0,35$.

8. На лівій вертикальній осі визначаємо різницю між значеннями *E* та *E* і (відстань *ІБ*), що відповідає дефіциту вологості: $d = 42,5 - 22,5 = 20$ гПа.

9. Знаходимо точку *Л* перетину прямої *ДЖ* з кривою $r = 1,0$ і визначаємо на горизонтальній осі номограми точку роси: $T_d = 12$ °С.

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. Для реалізації оцінки вологості ґрунту варто уявити зразок ґрунту як резервуар (рис. 1.5.9), в якому всі тверді частинки в кубі з ребром *D* і площею *S* стиснуті в шар товщиною *c*; ґрунтовий розчин і ґрунтове повітря, також розділені для порівняння, займають відповідно шари *b* і *a*.

Вологість щодо сухої маси — це відношення маси води до сухої маси:

$$q_m = \frac{m_b}{m_c} = \frac{\rho_b b S}{\rho_c c S} = \frac{\rho_b b}{\rho_c c}, \quad (1.5.15)$$

де ρ_b і ρ_c — густина води і сухого ґрунту.

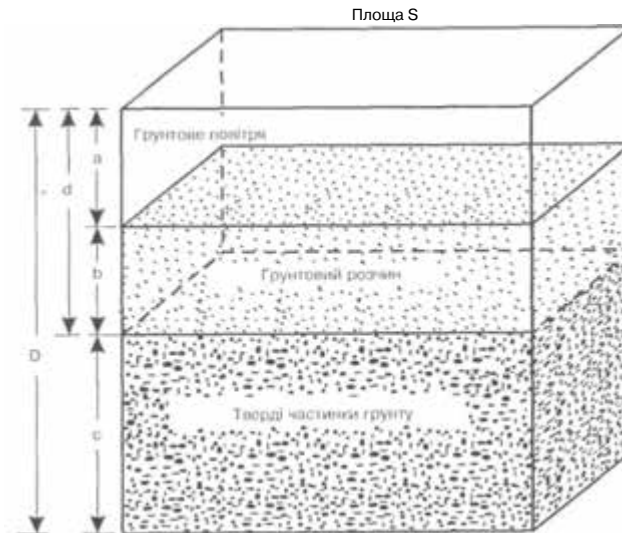


Рис. 1.5.9. Зразок ґрунту як резервуар

Вологість у процентах сухої маси визначається за виразом:

$$P_m = q_m \cdot 100\%. \quad (1.5.16)$$

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

$$\theta_v = \frac{V_{\%o}}{V_{\%p}} = \frac{bS}{SD} = \frac{b}{D}. \quad (1.5.17)$$

Об'ємна вологість у процентах визначається за виразом:

$$P_v = \theta_v \cdot 100\% = 100\% \frac{b}{D}. \quad (1.5.18)$$

Товщина шару води D_e розраховується так:

$$D_e = \frac{\rho_c c S}{SD} = \frac{\rho_c c}{D}. \quad (1.5.19)$$

Густина ґрунту — відношення маси сухого ґрунту до загального об'єму ґрунту:

$$\rho_{sp} = \frac{\rho_c c S}{SD} = \frac{\rho_c c}{D}. \quad (1.5.20)$$

Пористість ґрунту E — відношення сумарного об'єму пор до загального об'єму ґрунту:

$$E = \frac{dS}{SD} = \frac{d}{D}. \quad (1.5.21)$$

Вологість насичення q_{ms} — відношення маси води при насиченні до маси сухого ґрунту:

$$q_{ms} = \frac{\rho_b dS}{\rho_c cS} = \frac{\rho_b d}{\rho_c c}. \quad (1.5.22)$$

Приклад

Ґрунтовий зразок у формі куба об'ємом 10^3 см^3 має загальну вологу масу $m_{c+s} = 1460 \text{ г}$, у якій маса води становить $m_w = 260 \text{ г}$. Густина води $\rho_w = 1,00 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, густина ґрунту $\rho_g = 2,65 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Знайти вологість щодо маси, вологість у процентах сухої маси, об'ємну вологість та пористість ґрунту.

Розв'язок

Вологість щодо сухої маси — це відношення маси води до сухої маси:

$$q_m = \frac{m_w}{m_s} = m_w / (m_{c+s} - m_w) = 260 / (1460 - 260) = 0,217.$$

Визначимо вологість у процентах сухої маси:

$$P_m = q_m \cdot 100\% = 0,217 \cdot 100 = 21,7 \%$$

Обчислимо об'ємну вологість як відношення об'єму води до загального об'єму ґрунту:

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_g} = \frac{m_w}{\rho_w \cdot V_g} = \frac{260 \text{ г}}{1,00 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3} \cdot 1000 \text{ см}^3} = \frac{260}{1000} = 0,260.$$

Об'ємна вологість у процентах визначається як:

$$P_v = \theta_v \cdot 100\% = 0,260 \cdot 100 = 26,0 \%$$

Знайдемо товщину шару води:

$$b = \frac{V_w}{S} = \frac{m_w}{\rho_w \cdot S} = \frac{260 \text{ г}}{1,00 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3} \cdot 100 \text{ см}^2} = 2,60 \text{ см}$$

та товщину шару сухого ґрунту:

$$c = \frac{V_g}{S} = \frac{m_s}{\rho_g \cdot S} = \frac{m_{c+s} - m_w}{\rho_g \cdot S} = \frac{(1460 - 260) \text{ г}}{2,65 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3} \cdot 100 \text{ см}^2} = 4,53 \text{ см}.$$

Тоді товщина повітряного шару дорівнює:

$$a = d - (b + c) = 10 - (2,60 + 4,53) = 2,87 \text{ см}.$$

Пористість ґрунту E визначимо як відношення сумарного об'єму пор до загального об'єму ґрунту:

$$E = (a + b)S/dS = (2,87 + 2,60) \text{ см} \cdot 100 \text{ см}^2 / 10 \text{ см}^3 = 0,547$$

Вимірювання вологості ґрунту

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

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, $2+5 \text{ мКі}$ або суміш ^{241}Am та берилію, 100 мКі) і детектор повільних нейтронів, занурюють у ґрунт (рис. 1.5.10). Швидкі ($4,5+5,0 \text{ MeV}$ або $1+12 \text{ MeV}$) поширю-

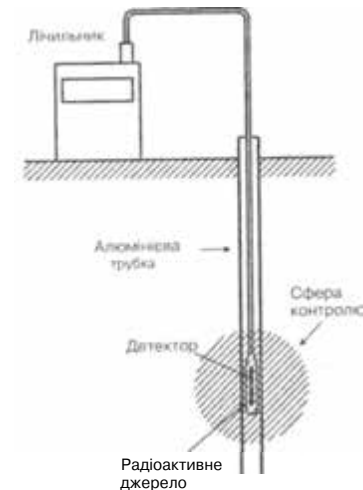


Рис. 1.5.10. Нейтронний метод визначення вологості ґрунту

ються радіально в ґрунті. Внаслідок пружних зіткнень з ядрами речовини ґрунту вони втрачають свою кінетичну енергію; рівень послаблення швидких нейтронів пропорційний кількості атомів водню, істотним джерелом яких є ґрунтова вода. Повільні нейтрони (0,025 еВ) оточують зонд, деякі з них потрапляють на детектор. Сигнал з виходу детектора через кабель подається на систему реєстрації. Переваги методу — можливість оцінки води в великих ґрунтових об'ємах, можливість оцінки об'ємної вологості ґрунту, швидкість, здатність вимірювати вологість ґрунту протягом тривалого періоду часу. Недоліками є необхідність роботи з радіоактивними джерелами, потреба у калібруванні приладу, висока вартість обладнання, неточність вимірювань поблизу ґрунтової поверхні.

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

$$e_v = \ln(N/N_0/m), \quad (1.5.23)$$

де N_0 — швидкість обчислення гамма-випромінювання, що утворюється джерелом, N — швидкість обчислення гама-випромінювання, що проходить через фунт, m — коефіцієнт послаблення гама-випромінювання водою, d — товщина зразка.

Метод реєстрації поглинання гама-випромінювання має ті самі переваги та недоліки, що й нейфонний метод. Додатковою перевагою є можливість вимірювань на незначних горизонтальних та вертикальних відстанях; до додаткових недоліків можна віднести вплив неоднорідності ґрунтової густини та вмісту води на роздільну здатність методу, необхідність збігання двох отворів — від джерела та детектора, висока ціна та трудомісткість процесу вимірювань.

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

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega), \quad (1.5.24)$$

де $\varepsilon'(\omega)$ — реальна частина $\varepsilon(\omega)$, $\varepsilon''(\omega)$ — уявна частина $\varepsilon(\omega)$, i — корінь квадратний з -1 , ω — 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, що утворюються внаслідок поляризації 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 кількох підходів:

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

2) вимірювання ємності конденсатора, який утворюється вологим ґрунтом між двома обкладинками (рис. 1.5.11). 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 давати абсолютні величини вмісту води у ґрунті, вони можуть постачати інформацію з будь-якої глибини ґрунту з високою точністю.

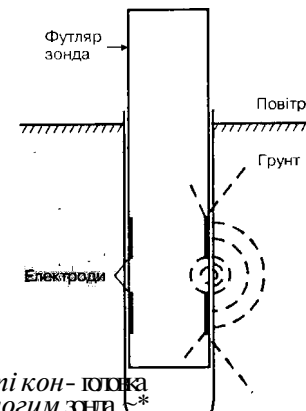


Рис. 1.5.11. Вимірювання ємності конденсатора, що утворюється вологим ґрунтом між двома обкладинками

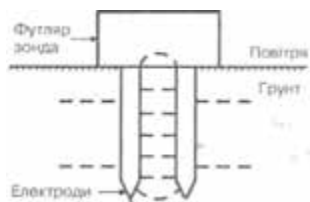


Рис. 1.5.12. Метод часової рефлектометри

Метод часової рефлектометри передбачає генерацію високочастотного електромагнітного імпульсу та його поширення у ґрунт за допомогою двоелектродної або коаксильної лінії (рис. 1.5.12). Вимірюється час між моментом посилання імпульсу та його реєстрації приймачем після

відбивання від ґрунту. Швидкість поширення імпульсу в такій системі визначається за виразом:

$$V = c \cdot E^{-1}, \quad (1.5.25)$$

де c — швидкість світла у вакуумі, ϵ — діелектрична проникність речовини.

Для чистої води ($\epsilon = 80$) швидкість поширення імпульсу становить $3,3 \cdot 10^7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, тоді як у вологому ґрунті ($\epsilon = 16$) ця швидкість дорівнює $7,5 \cdot 10^7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Перевагою методу часової рефлектометри є швидкість; метод дає змогу вимірювання об'ємної вологості ґрунту і не потребує калібрування. До недоліку слід віднести вплив солоності води на результати вимірювань.

Приклад

Використовуючи психрометричне рівняння та дані табл. 2 (див. додаток), знайти пружність водяної пари e , максимальну пружність водяної пари E при температурі зволоженого термометра, максимальну пружність водяної пари E_s при температурі сухого термометра, відносну вологість повітря g та дефіцит вологості d , якщо температура сухого термометра $t_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, а зволоженого $t_{zm} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Атмосферний тиск становить 760 мм рт. ст.

Розв'язок

З табл. 2 (див. додаток) знаходимо, що температурі зволоженого термометра $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ відповідає максимальна пружність водяної пари $E_s = 2340 \text{ Па}$. Підставляємо значення E_s у психрометричне рівняння (1.5.14) і знаходимо пружність водяної пари e :

$$e = 2340 - 6,62 \cdot \text{Ю}''(25 - 20) \cdot 1,01325 \cdot \text{Ш} = 2005 \text{ Па}.$$

З табл. 2 знаходимо максимальну пружність водяної пари при температурі сухого термометра:

$$E = 3170 \text{ Па}.$$

Використовуючи формулу (1.5.1), знаходимо відносну вологість:

$$G = 2005/3170 = 0,63 = 63 \text{ } \%$$

Аудиторні завдання

Використовуючи психрометричне рівняння та дані табл. 2 (див. додаток), знайти насиченість водяної пари e , максимальну пружність водяної пари E при температурі зволоженого термометра, максимальну пружність водяної пари E_s при температурі сухого термометра, відносну вологість повітря g та дефіцит вологості d для заданих значень температури сухого та зволоженого термометрів. Атмосферний тиск становить 10^5 Па .

Варіант	Температура сухого термометра t_c , $^\circ\text{C}$	Температура зволоженого термометра t_{zm} , $^\circ\text{C}$
1	25	20
2	27	22
3	23	22
4	30	24
5	24	18
6	23	19

Репродуктивний тест

Використовуючи дані попереднього завдання, обчислити абсолютну вологість повітря у мм рт. ст. та мілібарах.

Альтернативний тест

Чи правильне твердження, що:

1. гравіметричний метод ґрунтується на визначенні маси води і маси сухого ґрунту: Так Ні
2. нейтронний метод полягає в оцінці залежності рівня поглинання гамма-випромінювання від вмісту ґрунтової води: Так Ні

Акордно-вибірковий тест

Знайти правильні відповіді на запитання: «Якими перевагами характеризуються волосяні гігрометри?»

1. невисока ціна;
2. можливість вимірювань в інтервалі температур -80 – $100 \text{ }^\circ\text{C}$;

3. малі значення гістерезису;
4. проста конструкція;
5. слабка залежність результатів вимірювань від температури.

Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари «параметр вологості ґрунту — формула»

- | | |
|-------------------------------------|---|
| а. Об'ємна вологість | 1. $P_m = \theta_m \cdot 100\%$ |
| б. Вологість щодо сухої маси | 2. $\theta_v = \frac{V_{\%e}}{V_{,p}} = \frac{bS}{SD} = \frac{b}{D}$ |
| в. Об'ємна вологість у процентах | 3. $P_v = \theta_v \cdot 100\% = 100\% \frac{b}{D}$ |
| г. Вологість у процентах сухої маси | 4. $\theta_m = \frac{m_b}{m_c} = \frac{\rho_b b S}{\rho_c c S} = \frac{\rho_b b}{\rho_c c}$ |

Конструктивний тест

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

Домашнє завдання

Температура повітря дорівнює 30 °С, а відносна вологість 65 %. Визначити пружність водяної пари та масове відношення вологи, якщо атмосферний тиск становить 975 гПа.

6. ТЕМПЕРАТУРА

Основні визначення

Температура — фізична величина, що характеризує стан термодинамічної рівноваги макроскопічної системи. Кількісне вимірювання температури можливе завдяки впровадженню температурних шкал. Одна з них, *міжнародна стоградусна температурна шкала (Цельсія)* використовує як 0 °С температуру плавлення льоду і як 100°С температуру кипіння води при нормальному тиску. Інша — *термодинамічна температурна шкала (Кельвіна)* — використовує потрібні точки речовин — точки на діаграмі ста-

ну, що відповідають рівноважному існуванню трьох фаз речовини. Так, потрібна точка води дорівнює 273,15К, а температура кипіння води 373,15К. Між двома шкалами існує зв'язок:

$$/ \text{ } ^\circ\text{C} = T - 273,15. \quad (1.6.1)$$

На сьогоднішній день прийнято *міжнародну температурну шкалу (МТШ)*, яка ґрунтується на використанні певної кількості станів рівноваги, що відтворюються, або фіксованих точок (табл. 1.6.1).

1.6.1. Фіксовані точки МТШ та вторинні опорні точки

Стан рівноваги	Температура, К	Температура, °С
<i>Фіксовані ТОЧКИ МТШ</i>		
Потрійна точка аргону	83,798	-189,352
Потрійна точка води	273,16	+0,01
Кипіння води при нормальному тиску	373,15	100
Плавлення олова при нормальному тиску	505,078	+231,958
<i>Вторинні опорні точки</i>		
Температура сублімації двоокису вуглецю при нормальному тиску	194,674	-78,476
Плавлення ртуті при нормальному тиску	234,288	-38,862
Плавлення льоду при нормальному тиску	273,15	0,0
Потрійна точка дефенілового ефіру	300,02	26,87

Вимірювання температури

Розглянемо прилади для вимірювання температури, в основі яких лежить теплове розширення газів (газовий термометр), рідин (рідинний термометр) або твердих тіл (біметалевий термометр).

Газовий термометр, дія якого ґрунтується на залежності тиску (при сталому об'ємі) від температури згідно з

законом ідеального газу ($pV=RT$). Залежність тиску від температури лінійна:

$$dp/dT = \beta p_0 \quad (1.6.2)$$

де β — коефіцієнт об'ємного розширення газу, p_0 — початковий тиск.

Газовий термометр (рис. 1.6.1) використовується як первинний термометричний прилад для визначення фіксованих точок МТШ. Інтервал температур, що вимірюється газовим термометром, становить 2+300 К. Гранична точність залежно від температури, що вимірюється, може сягати $3 \cdot 10^{-3}$ – $2 \cdot 10^{-2}$ К. Газові термометри досить складні в експлуатації через необхідність враховувати неідеальність газу, зміну об'єму з температурою, наявність у газі домішок, взаємодію газу зі стінками балона, залежність показань приладу від початкового та атмосферного тисків. Прилади такого типу використовуються рідко.

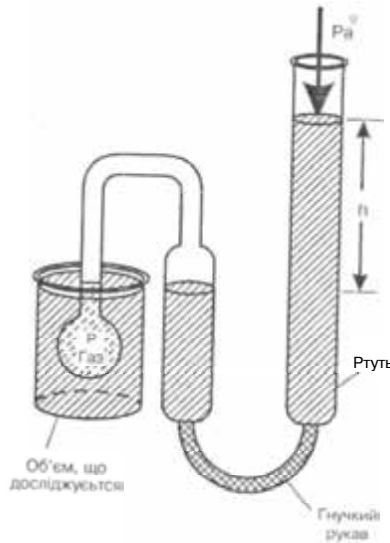


Рис. 1.6.1. Газовий термометр

Рідинний термометр — прилад для вимірювання температури, заснований на тепловому розширенні рідини. Явище теплового розширення рідини описується рівнянням:

$$\Delta V = \beta V \Delta T, \quad (1.6.3)$$

де β — коефіцієнт об'ємного розширення рідини; ΔV — зміна об'єму; ΔT — зміна температури.

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

Рідинний термометр складається з тонкостінного скляного резервуара, сполученого з скляним капіляром; для

вимірювання температури термометр обладнаний шкалою. Частина простору в капілярі, не зайнята рідиною, заповнена сухим інертним газом, що запобігає розриву рідини. В капілярі може бути також внутрішнє розширення (скорочувальна камера), що дає можливість скоротити довжину капіляра; ще одне розширення капіляра (розширювальна камера) у кінці захищає термометр від перегрівання. Зовнішній вигляд рідинного термометра зображено на рис. 1.6.2. Процес вимірювання температури полягає в зануренні термометра у рідину; це занурення може бути частковим, повним або абсолютним (рис. 1.6.3). Більшість термометрів використовуються у режимі повного занурення, коли одна частина термометра знаходиться в рідині, а інша — в повітрі.

Робочою рідиною в термометрах такого типу є ртуть, спирт або толуен. Ртуть використовують найчастіше, оскільки вона існує у чистій формі, не погіршується з часом

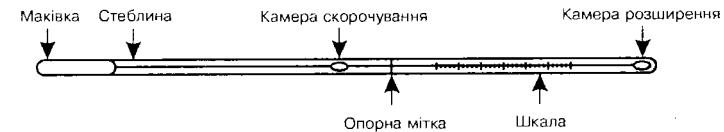


Рис. 1.6.2. Рідинний термометр

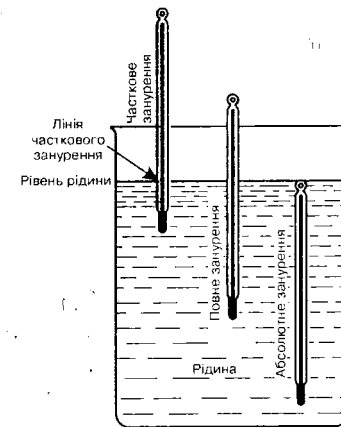


Рис. 1.6.3. Часткове, повне або абсолютне занурення термометра у рідину

і не взаємодіє зі склом. Діапазон температур, в межах якого можливе застосування ртуті, становить $-38,8^{\circ}\text{C}$ до $+356,9^{\circ}\text{C}$. При вимірюванні низьких температур перевагу мають спирт ($-117,3^{\circ}\text{C}$ до $+78,5^{\circ}\text{C}$) або толуен ($-95,1^{\circ}\text{C}$ до $+110,5^{\circ}\text{C}$). Проте останні речовини не такі стійкі, як ртуть, і можуть повільно розкладатися на сонці.

Приклад

Ртутний термометр, конструкцію якого наведено на рис. 1.6.4, має капіляр діаметром 0,004 см та колбу діаметром 0,25 см. Знайти зміну висоти стовпчика ртуті в капілярі, якщо температура змінилася на 30°C . Тепловим розширенням скла можна знехтувати.

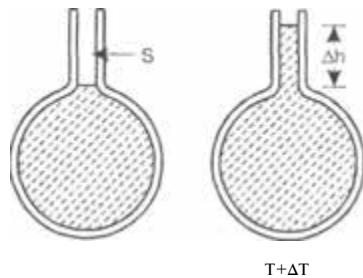


Рис. 1.6.4. Ртутний термометр

Розв'язок

Об'єм колби знаходимо з виразу:

$$V = 8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3.$$

Зміна об'єму зі зміною температури описується рівнянням:

$$\Delta V = \beta V \Delta T = 1,82 \cdot 10^{-4} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 436,8 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3.$$

Об'єм капіляра дорівнює:

$$V_{\text{кап}} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h.$$

Звідси знаходимо зміну висоти стовпчика ртуті:

$$h = \frac{V_{\text{кап}} \cdot 4}{\pi D^2} = \frac{\Delta V \cdot 4}{\pi D^2} = \frac{436,8 \cdot 10^{-7} \cdot 4}{3,14 \cdot 0,004^2} = 3,4 \text{ см}.$$

Біметалевий термометр ґрунтується на тепловому розширенні твердих тіл, зокрема на деформації біметалевої пластини (наприклад, інвар і сталь) під впливом температури (рис. 1.6.5). Оскільки метали мають різні значення коефіцієнтів об'ємного розширення, пластинка при зміні температури деформується. Переміщення вільного кінця ΔX під час зміни температури Δt описується формулою:

$$\Delta X = K \Delta t, \quad (1.6.4)$$

де K — коефіцієнт пропорційності, що залежить від розмірів пластини та коефіцієнтів об'ємного розширення металів.

Як бачимо, залежність переміщення кінця біметалевої пластини від температури лінійна, а шкала приладу — рівномірна. Схему типового біметалевого термографа наведено на рис. 1.6.6.

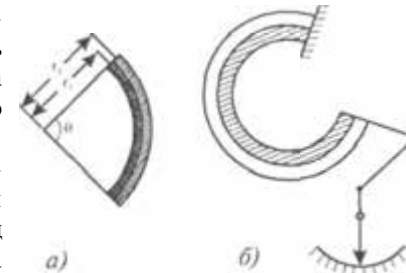


Рис. 1.6.5. Біметалевий термометр: а. біметалева пластинка; б. деформаційний термометр

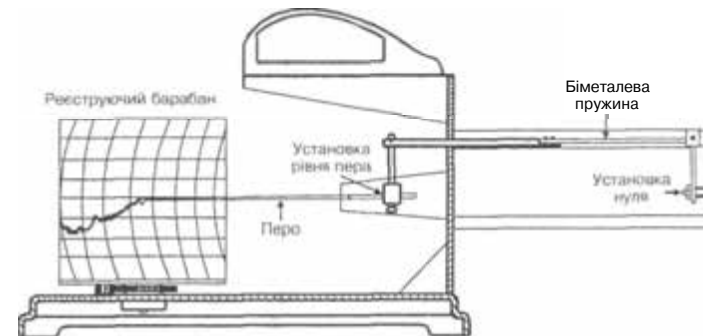


Рис. 1.6.6. Біметалевий термограф

Приклад

Біметалева пластинка, що утворює основу деформаційного термометра, має довжину l_0 . За збільшення температури ця пластинка деформується, перетворюючись у дугу. Знайти залежність кута θ вигину пластинки від зміни ΔT температури, різниці $\Delta r = r_2 - r_1$ радіусів кривизни та коефіцієнтів термічного розширення металів $\alpha_2 - \alpha_1$.

Розв'язок

Радіус кривизни r пластинки довжиною l пов'язаний з кутом θ вигину співвідношенням:

$$r = \frac{360}{2\pi} \cdot \frac{l}{\theta},$$

звідки

$$r_1 = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{l_1}{\theta}; r_2 = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{l_2}{\theta}.$$

Різницю Δr знаходимо як:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \frac{180}{\pi\theta} (l_2 - l_1).$$

Використовуючи залежність

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T),$$

знаходимо

$$\Delta r = \frac{180}{\pi\theta} (l_0 + l_0\alpha_2\Delta T - l_0 - l_0\alpha_1\Delta T) = \frac{180}{\pi\theta} l_0\Delta T (\alpha_2 - \alpha_1).$$

$$\text{Відповідь: } \theta = \frac{180l_0\Delta T(\alpha_2 - \alpha_1)}{\pi\Delta r}.$$

Термометри опору — прилади, принцип дії яких ґрунтується 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:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (1.6.5)$$

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

Для терморезисторів використовують платину, нікель, мідь. Платина характеризується стабільністю параметрів в умовах корозії, дії хімічних сполук. Вона не окислюється, піддається механічній обробці, має високу температуру плавлення й відзначається високим рівнем чистоти. Всі ці фактори впливають на стабільність залежності опору платинового провідника від температури. 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. Основні параметри цих металів подано в табл. 1.6.2.

1.6.2. Основні параметри металів, що використовуються як терморезистори

Параметр	Платина	Мідь	Нікель
Коефіцієнт теплового розширення β , ($^\circ\text{C}$) ⁻¹	0,00385± 0,003927	0,0042	0,0067
Питомий опір, Ом·м	9,81·10 ⁻⁶	1,529·10 ⁻⁶	5,91·10 ⁻⁶
Лінійність залежності опору від температури	Відмінна	Відмінна	Слабка
Діапазон температур	-260± +800 °C	-100± +150 °C	-100± +500 °C

Конструкція терморезистора (рис. 1.6.7) складається з чистого платинового провідника діаметром 0,1 мм і довжиною близько 2 м, який намотаний у вигляді спіралі навколо слюдяного каркасу, що розміщується у скляній трубці. Тиск усередині трубки дорівнює 0,5 атм. Загальна довжина терморезистора становить 1 м. Зміна температури впливає на величину опору $R_{\text{сенс}}$; змінюючи опір реостата R_p , досягають нульового значення на шкалі гальванометра і визначають величину опору сенсора за виразом:

$$R_{\text{сенс}} = (R_A/R_B)R_p \quad (1.6.6)$$



Рис. 1.6.7. Конструкція терморезистора

Приклад

Провідник терморезистора має опір 50 Ом при температурі 0 °C і 71,5 Ом при температурі 231,97 °C. Знайти R_0 і α провідника.

Розв'язок

Використовуємо рівняння (1.6.5), в яке підставляємо числові дані, що відповідають температурі 0 °C:

$$50 = R_0(1 + \alpha(0 - 0)) = R_0$$

Звідси $R_0 = 50 \text{ Ом}$.

Підставляємо числові дані, що відповідають температурі $231,97 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$71,5 = R_0(1 + \alpha(231,97 - 0)) = 50(1 + \alpha \cdot 231,97).$$

Звідси

$$\alpha = (71,5 - 50) / (231,97 \cdot 50) = 1,85 \cdot 10^{-3} \text{ (} 0 \text{ }^\circ\text{C)}^{-1}.$$

Контрольне завдання

При якій температурі провідник за умовами попереднього завдання матиме опір 89 Ом ?

Відповідь: $421 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для напівпровідників опір спадає з підвищенням температури за формулою:

$$R = ae^{b/T}, \quad (1.6.7)$$

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

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

Термоелектричні термометри використовують термоелектричні явища, що виявляються у взаємозв'язку теплових та електричних процесів у твердих тілах. Одним з таких термоелектричних явищ є ефект Зеебека — виникнення електрорушійної сили (ЕРС) в електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різномірних провідників, контакти яких мають різну температуру (рис. 1.6.8).

Для однорідних провідників A і B , що складають термопару, електрорушійна сила визначається за виразом:

$$E_3 = \int_{t_1}^{t_2} \alpha_A dt + \int_{t_2}^{t_1} \alpha_B dt = \int_{t_1}^{t_2} (\alpha_A - \alpha_B) dt, \quad (1.6.8)$$

де α_A і α_B — коефіцієнти Зеебека для провідників A і B відповідно.

На практиці не використовують абсолютні значення коефіцієнтів Зеебека; замість цього визначають ці коефіцієнти щодо певного опорного матеріалу (наприклад, платини):

$$\alpha_{A, Pt} = \alpha_A - \alpha_{Pt} \quad (1.6.9)$$

та

$$\alpha_{Pt, B} = \alpha_{Pt} - \alpha_B. \quad (1.6.10)$$

Звідси

$$\begin{aligned} \alpha_{A, B} &= \alpha_{A, Pt} + \alpha_{Pt, B} = \\ &= \alpha_A - \alpha_B, \end{aligned} \quad (1.6.11)$$

де $\alpha_{A, B}$ — відносний — коефіцієнт Зеебека термопар A, B .

Електрорушійна сила в цьому разі визначається так:

$$dE = \alpha_{A, B} dt. \quad (1.6.12)$$

Звідси

$$\alpha_{A, B} = \frac{dE_3}{dt}. \quad (1.6.13)$$

Залежність електрорушійної сили Зеебека від температури визначається за виразом:

$$E_3 = \alpha t + \frac{1}{2} \beta t^2, \quad (1.6.14)$$

Звідки

$$\alpha_{A, B} = \alpha + \beta t. \quad (1.6.15)$$

Значення коефіцієнтів α і β для типових металів знаходять з табл. 1.6.3.

Недоліком термопар є невеликі значення електрорушійної сили, що виникає в електричному ланцюзі. Подолати цей недолік можна за послідовного з'єднання кількох термопар, що утворюють у цьому разі термобатарею.

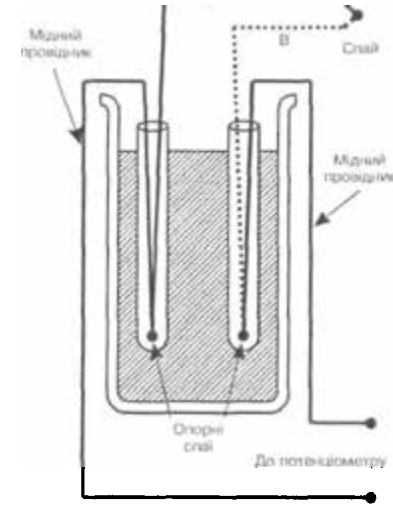


Рис. 1.6.8. Термоелектронний термометр

1.6.3. Значення коефіцієнтів α і β для типових металів

Метал	α , мкВ·(°С) ⁻¹	β , мкВ·(°С) ⁻¹
Залізо	+16,7	-0,0297
Мідь	+2,7	+0,0079
Константан	-34,6	-0,0558

Приклад

Визначити електрорушійну силу Зеебека для термопар «залізо—мідь», користуючись табл. 1.6.3, якщо температура термопар 200 °С, а опорна температура 0 °С.

Розв'язок

Визначимо відносний коефіцієнт Зеебека за виразом:

$$\alpha_{Fe,Cu} = \alpha_{Fe} - \alpha_{Cu} = 16,7 - 2,7 = 14 \text{ мкВ} \cdot (\text{°С})^{-1};$$

$$\beta_{Fe,Cu} = \beta_{Fe} - \beta_{Cu} = -0,0297 - 0,0079 = -0,0376 \text{ мкВ} \cdot (\text{°С})^{-1}.$$

Підставимо числові дані в формулу (1.6.14):

$$E_z = \alpha t + \frac{1}{2} \beta t^2 = 14 \cdot 200 + \frac{1}{2} (-0,0376) \cdot 200^2 = 2048 \text{ мкВ}.$$

Контрольне завдання

Визначити електрорушійну силу Зеебека за умовами попереднього завдання для термопар «залізо—константан».

Відповідь: 10,782 мкВ.

Оптична пірометрія ґрунтується на використанні залежності випромінювальної здатності розжареного тіла від температури. Спектральну залежність випромінювальної здатності абсолютно чорного ($\epsilon = 1$), сірого ($\epsilon = 0,9$) та інших тіл наведено на рис. 1.6.9. 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. Принцип дії оптичного пірометра зображено на рис. 1.6.10, а конструкцію — на рис. 1.6.11.

Процедура вимірювання температури передбачає порівняння яскравості тіла, що досліджується, та каліброва-

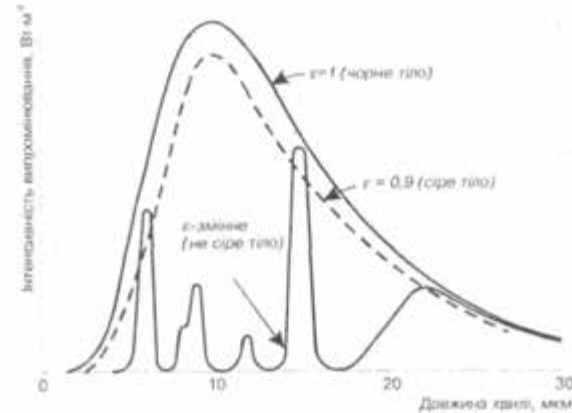


Рис. 1.6.9. Спектральна залежність випромінювальної здатності абсолютно чорного ($\epsilon = 1$), сірого ($\epsilon = 0,9$) та інших тіл

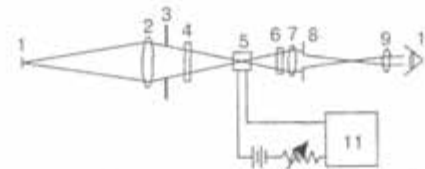


Рис. 1.6.10. Принцип дії оптичного пірометра: 1 — джерело світла, 2 — лінза, 3 — діафрагма, 4 — фільтр, 5 — калібрована лампа, 6 — фільтр, 7 — об'єктив мікроскопа, 8 — діафрагма мікроскопа, 9 — окуляр мікроскопа, 10 — око, 11 — вимірювальний прилад

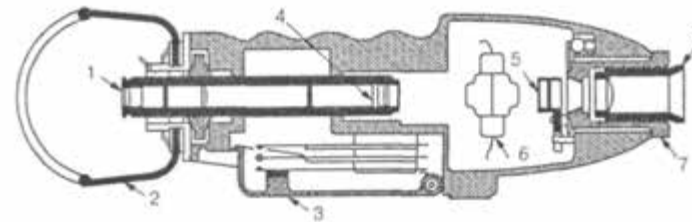


Рис. 1.6.11. Конструкція оптичного пірометра: 1 — окуляр, 2 — кожух, 3 — фільтр, 4 — перемикач, 5 — екран, 6 — лампа, 7 — механізм зсуву екрану, 8 — об'єктив

ної лампи. Вимірювання проводять на довжині хвилі 655 нм. За допомогою регулювання струму, що проходить через нитку розжарювання лампи, зрівноважують яскравості тіла та лампи. У результаті цього зображення нитки зникає на фоні яскравості тіла (рис. 1.6.12). Ручка потенціометра, що регулює величину струму, прокалібрована в одиницях температури.



Низький рівень. Нульовий рівень. Високий рівень

Рис. 1.6.12. Зображення нитки залежно від яскравості тіла

Оскільки для не абсолютно чорних тіл температура, що реєструється

оптичним пірометром, завжди менша, ніж справжня температура, необхідно вводити поправки. Відповідно до даних табл. 1.6.4, наприклад, випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла має бути в 2,3 раза більшою, ніж вольфраму і в 3,3 раза більшою, ніж платини при однаковій температурі. Тобто, якщо температура абсолютно чорного тіла становить 2000 °С, то їй відповідають 2323 °С для платини і 2238 °С для вольфраму (табл. 1.6.5).

1.6.4. Випромінювальна здатність деяких матеріалів ($\lambda = 650$ нм)

Матеріал	Випромінювальна здатність ($\lambda = 650$ нм)
Кобальт	0,36
Мідь	0,10
Золото	0,14
Залізо	0,35
Марганець	0,59
Молибден	0,37
Нікель	0,36
Платина	0,30
Срібло	0,07
Тантал	0,49
Титан	0,63
Вольфрам	0,43
Ванадій	0,35
Сталь	0,35
Константан	0,35

1.6.5. Корекція температури яскравості для отримання реальної температури ($\lambda = 650$ нм)

T, °C	2200	2100	2000	1900	1800	1700	1600	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800	700
T, K	2473	2373	2273	2173	2073	1973	1873	1773	1673	1573	1473	1373	1273	1173	1073	973
ϵ_1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
	2200	2100	2000	1900	1800	1700	1600	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800	700
	864	782	710	640	575	514	457	404	355	310	269	231	196	164	136	110
	546	499	453	411	371	333	297	264	233	205	178	153	131	110	91	75
	387	354	323	293	265	239	214	191	169	148	129	112	95	80	67	55
	284	260	238	216	196	177	158	141	125	110	96	83	71	60	50	41
	209	192	175	160	145	131	117	105	93	82	72	62	53	45	38	31
	151	138	127	116	105	95	85	76	68	60	52	45	39	33	27	23
	103	95	87	79	72	65	59	53	47	41	36	31	27	23	19	16
	64	58	54	49	45	40	36	32	29	25	22	19	17	14	12	10
	27	25	23	21	19	17	15	13	12	12	12	9	8	7	6	5

Співвідношення між справжньою температурою T і температурою яскравості T_s має вигляд:

$$\frac{I}{T} - \frac{I}{T_s} = \frac{\lambda}{c_2} \ln \epsilon, \quad (1.6.16)$$

де $c_2 = 1,43883 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Це рівняння може бути розв'язано за допомогою табл. 1.6.5 або графіка (рис. 1.6.13).

Приклад

Температура тіла, що вимірюється оптичним пірометром, дорівнює 1600 К. Ефективна довжина хвилі — 655 нм, а випромінювальна здатність 0,6. Визначити справжню температуру тіла за допомогою: а. рівняння (1.6.16); б. таблиці 1.6.5; в. графіка (рис. 1.6.13).

Розв'язок

а) Перепишемо рівняння (1.6.15) у вигляді:

$$T = \frac{T_s}{1 - \frac{T_s \lambda}{c_2} \ln \frac{I}{\epsilon}}$$

Підставляємо числові дані у попереднє рівняння:

$$T = \frac{1600 \text{ К}}{1 - \frac{1600 \text{ К} \cdot 655 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{0,014388 \text{ м} \cdot \text{К}} \ln \frac{1}{0,6}} = 1661,8 \text{ К}.$$

б) Переведемо температуру тіла у градуси Цельсія:

$$T_s = 1600 \text{ К} - 273 = 1327 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ця температура знаходиться, згідно з даними табл. 1.6.5, між значеннями 1300 $^\circ\text{C}$ і 1400 $^\circ\text{C}$, причому на першій чверті цього інтервалу. Для $\epsilon = 0,6$ поправка температури ΔT знаходиться також на першій чверті інтервалу між 60 $^\circ\text{C}$ та 68 $^\circ\text{C}$, тобто

$$\Delta T = 60 + (1/4)8 = 62 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким чином, справжня температура тіла становить:

$$T = T_s + \Delta T = 1600 + 62 = 1662 \text{ }^\circ\text{C}.$$

в) Використовуючи графік (рис. 1.6.13), знайдемо перетин кривої, що відповідає $\epsilon = 0,6$, з вертикальною лінією, що відповідає температурі 1600 К. У точці перетину на лівій осі графіка знайдемо значення поправки температури $\Delta T \approx 62 \text{ }^\circ\text{C}$.

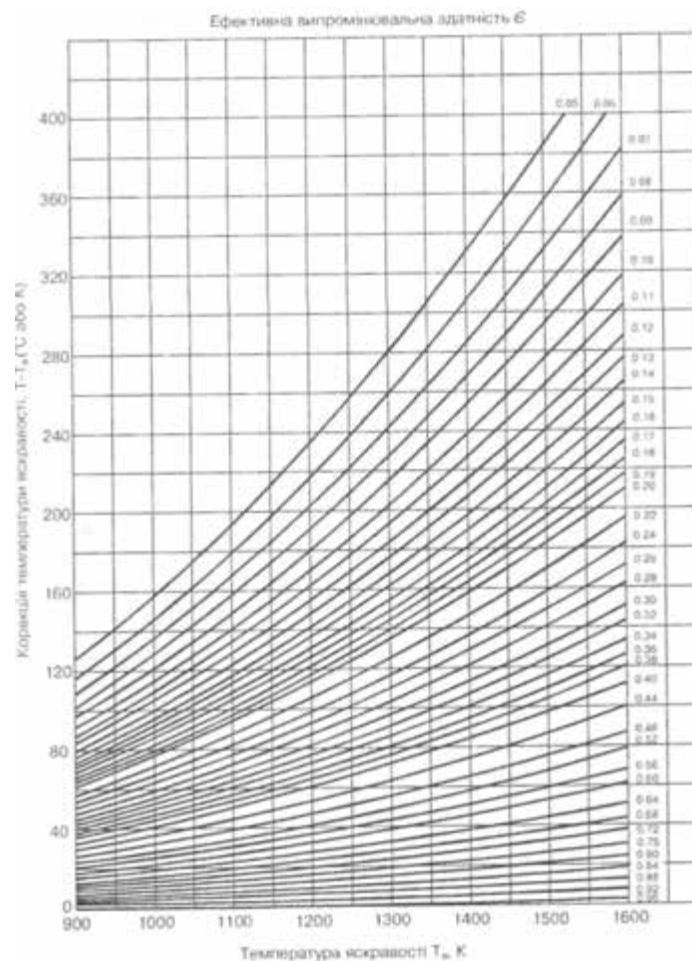


Рис. 1.6.13. Корекція температури яскравості для оптичного пірометра

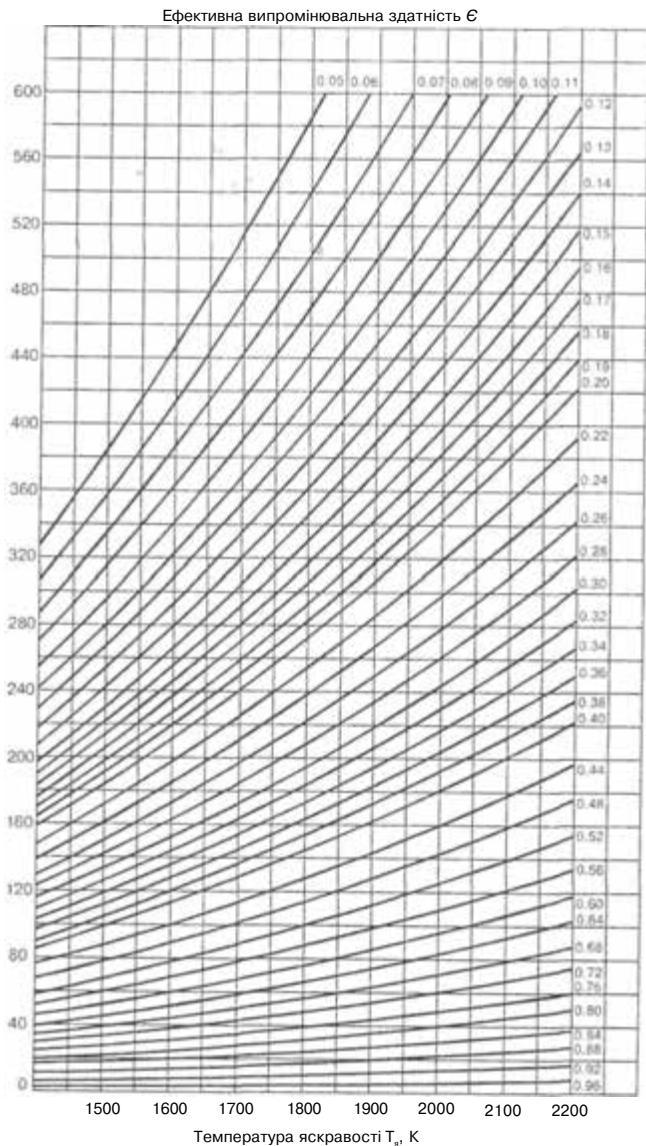


Рис. 1.6.13 (продовження). Корекція температури яскравості для оптичного пірометра

Контрольне завдання

Поверхня рідкого нікелю, що спостерігається в оптичному пірометрі, характеризується ефективною довжиною хвилі 655 нм і температурою 1427 °С. Визначити справжню температуру нікелю за допомогою: а) рівняння (1.6.16); б) таблиці 1.6.5; в) графіка (рис. 1.6.13). Зробити висновки щодо відносної точності всіх підходів.

Відповідь: а) 1570 °С; б) 1569 °С; в) 1568,7 °С.

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

$$L \ll H \epsilon_f \quad (1.6.17)$$

де ϵ — випромінювальна здатність поверхні ($0 < \epsilon < 1$), σ — стала Стефана-Больцмана ($5,67 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$), T^4 — температура поверхні.

Отже, вимірювання енергетичної яскравості природної поверхні дає змогу оцінити її температуру. На практиці вимірюють енергетичну яскравість у смузі довжин хвиль, звичайно в інтервалі 8-й3 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. Радіометри складаються з оптичної системи (лінзи, дзеркала, фільтри), що фокусує потік випромінювання певної довжини хвилі на детектор — термістор або термобатарей. Цей потік підвищує температуру детектора, електричний сигнал з виходу якого проградуєований в одиницях температури. Для обмеження сигналу, що відповідає власній температурі детектора, використовують інший компенсаційний детектор і систему диференційного підсилення та порівняння сигналів з виходу двох детекторів (рис. 1.6.14,а). Підвищити чутливість вимірювальної системи можна за рахунок модулювання оптичного випромінювання (рис. 1.6.14,б). Застосування інфрачервоної відеокамери, здатної реєструвати спектральний розподіл температури (рис. 1.6.15), дає можливість утворювати теплові зображення об'єкта, що досліджується.

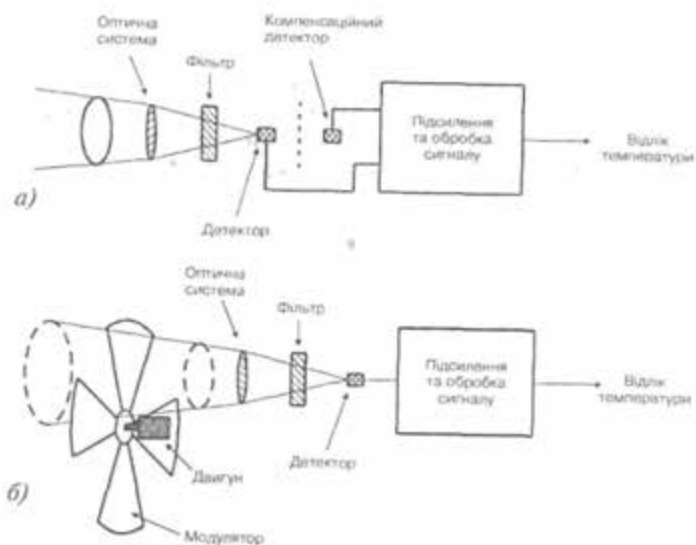


Рис. 1.6.14. а) Статичний радіотермометр;
б) радіометр з модульованим оптичним випромінюванням

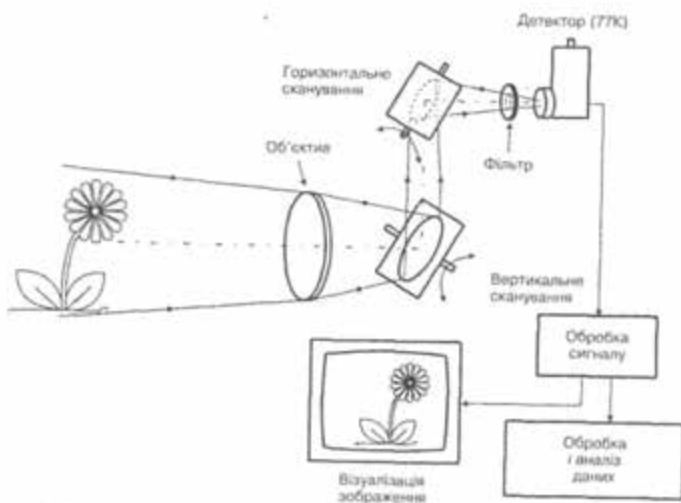


Рис. 1.6.15. Інфрачервона відеокамера для реєстрації спектрального розподілу температури

Кварцовий п'єзоелектричний термометр — це цифровий прилад, в основі дії якого лежить вимірювання резонансної частоти п'єзокристалу. Кожний кристал має свою власну резонансну частоту, що залежить від температури. Прилади такого типу характеризуються високою чутливістю та роздільною здатністю (10^{-4}°C). Діапазон температур, що вимірюються, становить $-40+230^{\circ}\text{C}$. До недоліків можна віднести складність електронної системи та високу вартість приладів.

Вимірювання температури повітря

Для вимірювання температури повітря необхідно забезпечити стан рівноваги між детектором і повітрям. Якщо T_T — температура сенсора, а T_n — температура повітря, то умова рівноваги визначиться за допомогою такого рівняння:

$$C_x(T_T - T_n) = (1 - a)E_{c_i} + \varepsilon(E_{\text{дз}} - \sigma T_T^4), \quad (1.6.18)$$

де C_x — коефіцієнт, що враховує теплообмін сенсора з навколишнім середовищем за конвекції, a — альbedo (частка відбитого сонячного випромінювання), ε — випромінювальна здатність земної поверхні, E_{c_i} — енергетична освітленість сенсора сонячним випромінюванням, $E_{\text{дз}}$ — енергетична освітленість сенсора довгохвильовим випромінюванням довкілля.

Різниця між температурою, що показує термометр, та температурою повітря (тобто похибка вимірювання) визначається так:

$$T_T - T_n = (1/C_x)[(1 - a)E_{c_i} + \varepsilon(E_{\text{дз}} - \sigma T_T^4)]. \quad (1.6.19)$$

Зменшити цю різницю можна за мінімізації правої частини останнього рівняння, що здійснюється практично за допомогою екрану, який не заважає циркуляції повітря поблизу сенсора, але запобігає проникненню прямого та розсіяного випромінювання до сенсора. Крім того, можна збільшити величину коефіцієнта C_x за вимушеної конвекції, тобто вентиляції.

Вимірювання температури ґрунту

Для вимірювання температури ґрунту термометри розміщують на глибині 0,1, 0,2, 0,5 та 1,0 м. На глибині 0,1 м використовують горизонтально розташований термометр, головка якого знаходиться в боксі з кришкою (рис. 1.6.16). На більших глибинах застосовують прямокутні термометри або звичайні термометри, розміщені в футлярі (рис. 1.6.17).

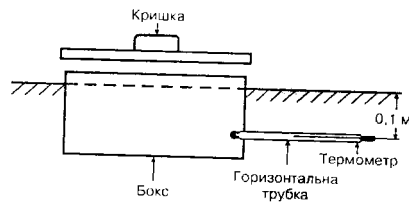


Рис. 1.6.16. Розміщення горизонтально розташованого термометра в ґрунті

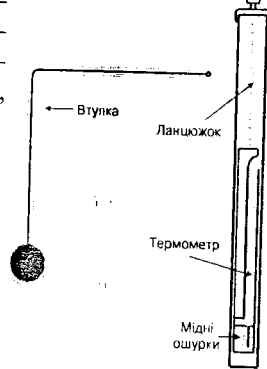


Рис. 1.6.17. Застосування прямокутного термометра або термометра в футлярі в ґрунті

Моделювання вертикальних змін температури повітря

Температурний профіль над однорідною поверхнею в стаціонарних умовах описується рівнянням:

$$T(z) = T_0 - \frac{H}{0,4\rho c U^*} \ln \frac{z-d}{z_H}, \quad (1.6.20)$$

де $T(z)$ — середня температура повітря на висоті z , T_0 — аеродинамічна температура земної поверхні, H — тепловий потік від поверхні до повітря, ρc — об'ємна теплоємність повітря ($1200 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot (\text{°C})^{-1}$ при 20 °C на рівні моря, d — зміщення нульової поверхні; U^* — швидкість тертя, z_H — параметр шорсткості для переносення теплоти.

Для пласкої гладенької поверхні $d = 0$. Однорідний рослинний покрив характеризується такими співвідношеннями:

$$z_H \cong 0,02h; \quad d \cong 0,6h, \quad (1.6.21)$$

де h — висота рослинного покриву.

Приклад

Результати вимірювання температури над рослинним покривом висотою 10 см у ясний день наведено в таблиці:

Висота ζ , м	0,2	0,4	0,8	1,6
Температура, °C	26	24	23	21

Визначити аеродинамічну температуру T_0 земної поверхні.

Розв'язок

Використовуючи співвідношення (1.6.21), визначимо величини — параметра шорсткості та зміщення нульової поверхні: $z_H = 0,002 \text{ м}$; $d = 0,06 \text{ м}$.

Обчислюємо величини $(\zeta - d)/z_H$ та $\ln(\zeta - d)/z_H$; результати заносимо в таблицю:

Висота ζ , м	0,2	0,4	0,8	1,6
Температура, °C	26	24	23	21
$(\zeta - d)/z_H$	70	170	370	770
$\ln(\zeta - d)/z_H$	4,25	5,14	5,91	6,65

Будуємо графік $\ln(\zeta - d)/z_H = f[T(z)]$ (рис. 1.6.18), звідки знаходимо аеродинамічну температуру T_0 земної поверхні (перетинання прямої з віссю абсцис). Отже, $T_0 = 35 \text{ °C}$.

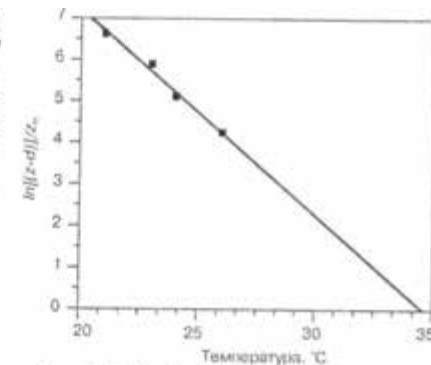


Рис. 1.6.18. Графік $\ln(\zeta-d)/z_H = f[T(z)]$ (пояснення в тексті)

Контрольне завдання

Середня температура повітря на висоті 2 м над земною поверхнею дорівнює 3 °C , а на висоті 1 м — 1 °C . Чи піддається рослинний покрив замерзанню, якщо його висота 50 см? Розв'язати завдання алгебраїчно та графічно.

Домашнє завдання

У таблиці наведено залежність середньої температури повітря над рослинним покривом від висоти:

Висота ζ , м	Середня температура повітря, °C
6,4	31,08
3,2	31,72
1,6	32,37
0,8	33,05
0,4	33,80
0,2	34,91
0,1	36,91

Використовуючи дані таблиці, виконати такі завдання:

1. Побудувати графік залежності $\ln(z - d)/z_w = f(\langle T \rangle)$, припускаючи $h = 0,15$ м.
2. Знайти за допомогою графіка аеродинамічну температуру повітря T_d .
3. Визначити тепловий потік H від поверхні до повітря, якщо $\Gamma^* = 0,2$ м·с⁻¹.

Модельовання часової зміни температури повітря

Часовий профіль температури повітря (рис. 1.6.19) характеризується мінімумом (перед світанком) і максимумом,

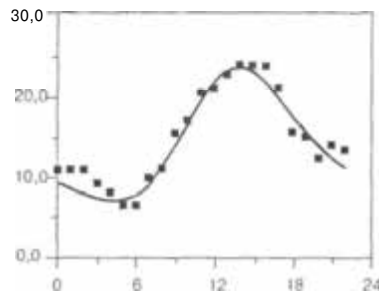


Рис. 1.6.19. Часовий профіль температури повітря

що встановлюється десь через дві години після перебування Сонця у зеніті. Звичайно температуру повітря вимірюють на рівні 1,5 м над землею поверхнею. Усереднення результатів багатьох вимірювань температури дає змогу отри-

мати математичне рівняння, що описує часову зміну температури повітря:

$$F(t) = 0,44 - 0,46\sin(\omega t + 0,9) + 0,11\sin(2\omega t + 0,9), \quad (1.6.22)$$

де $\omega t = \pi/12$, t — час, год ($t = 12$ у південь).

Температура повітря визначається за виразами:

$$T(t) = T_{\max,i} F(t) + T_{\min,i} [1 - F(t)], \quad \text{якщо } 0 < t < 5; \quad (1.6.23)$$

$$T(t) = T_{\max,i} F(t) + T_{\min,i} [1 - F(t)], \quad \text{якщо } 5 < t < 14; \quad (1.6.24)$$

$$T(t) = T_{\max,i} F(t) + T_{\min,i+1} [1 - F(t)], \quad \text{якщо } 14 < t < 24. \quad (1.6.25)$$

$T_{\max,i}$ і $T_{\min,i}$ відповідають максимальній та мінімальній температурі; індекс i вимірювання температури в i -тий день, індекси $i-1$ та $i+1$ — вимірювання попереднього та наступного дня.

Приклад

Визначити температуру повітря о 10 год ранку, якщо максимальна температура становить 23 °C, а мінімальна — 5 °C.

Розв'язок

Підставляємо в рівняння (1.6.22) числові значення ($t = 10$ г і кути в радіанах):

$$F(t) = 0,44 - 0,46\sin\left(\frac{3,14}{12} \cdot 10 + 0,9\right) + 0,11\sin\left(\frac{2 \cdot 3,14}{12} \cdot 10 + 0,9\right) = 0,44 - 0,46\sin(3,517) + 0,11\sin(6,133).$$

Переводимо кути в градуси і обчислимо тригонометричні функції:

$$F(t) = 0,44 - 0,46(-0,368) + 0,11(-0,147) = 0,44 + 0,169 - 0,016 = 0,593.$$

Оскільки час ($t = 10$ г) перебуває в інтервалі $5 < t < 14$, використовуємо рівняння (1.6.23):

$$T(t) = 23 \cdot 0,593 + 5(1 - 0,593) = 15,7 \text{ °C}.$$

Модельовання зміни температури ґрунту з глибиною і часом

На рис. 1.6.20 зображено 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 певного ча-

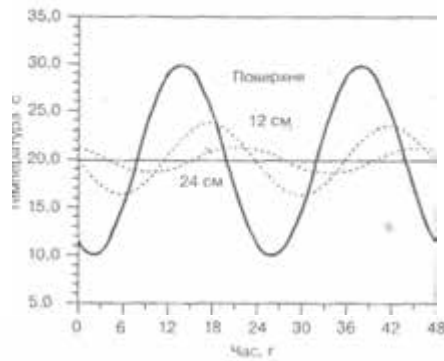


Рис. 1.6.20. Типові криві залежності температури ґрунту від часу і глибини

бачас, 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:

$$T(z,t) = \langle T \rangle + A(0) \exp(-z/D) \sin[\omega(t-\delta) - z/D], \quad (1.6.26)$$

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

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

$$T(z,t) = \langle T \rangle \pm A(0) \exp(-z/D), \quad (1.6.27)$$

де знак «+» відповідає максимальній, а знак «-» — мінімальній температурі.

Щорічна зміна температури ґрунту з глибиною схожа за характером на добову зміну, за винятком іншої частоти ($\omega = 2\pi/365$) за умови, що D становить близько 2 м.

Приклад

На якій глибині температура вологого ґрунту не відрізняється на $\pm 0,5$ °C від середньої щодобової температури зем-

ного зсуву: якщо максимальна температура земної поверхні досягається близько 14 г, то з глибиною цей максимум «запізнюється» на 4 г для $z = 12$ см і 7 г для $z = 24$ см.

Розглянемо рівняння, що описує зміну температури в ґрунті, якщо відома температура поверхні. Ця модель перед-

ної поверхні, якщо амплітуда зміни температури на поверхні становить ± 15 °C?

Розв'язок

Перепишемо рівняння (1.6.27) 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 та мінімальна температури на поверхні становлять $T_{\max} = 35$ °C і $T_{\min} = 15$ °C, а коефіцієнт згасання $D = 0,1$ м.

Визначення глибини згасання

Рівняння (1.6.26) і (1.6.27) придатні для опису зміни температури ґрунту з глибиною. З урахуванням того, що під час вимірювання температура ґрунту не змінюється за синусоїдним законом, можна оцінити глибину згасання D . Розв'яжемо рівняння (1.6.27) щодо $T(z,t) - \langle T \rangle$ для двох різних глибин z_1 і z_2 :

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

Припускаючи, що амплітуда зміни температури на відповідних глибинах становить

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

можна отримати вирази:

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

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

$$D = \frac{z_1 - z_2}{\ln A_1 - \ln A_2}.$$

Контрольне завдання

Використовуючи рис. 1.6.20, визначити глибину згасання D .

Аудиторні завдання

Перелічити переваги та недоліки газового термометра.

Репродуктивний тест

Термометр якого типу слід обрати для вимірювання температури $-250\text{ }^\circ\text{C}$?

Альтернативний тест

Чи правильне твердження, що:

1. Перевагою нікелевих терморезисторів є практично негайна реакція на температуру. Так Ні
2. Радіотермометри використовуються для вимірювання температури природних поверхонь. Так Ні

Акордно-вибірковий тест

Знайти правильні відповіді на запитання.

«Який термометр використовується як первинний термометричний прилад для визначення фіксованих точок МТШ?»

- 1) кварцовий п'єзоелектричний термометр;
- 2) терморезистор;
- 3) біметалевий термометр;
- 4) газовий термометр;
- 5) рідинний термометр;
- 6) термістор;
- 7) радіотермометр;
- 8) оптичний пірометр.

Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари «рідина в термометрі — діапазон температур, в межах якого можливе її застосування»

- | | |
|-----------|--|
| а. Ртуть | 1. $-95,1 + 110,5\text{ }^\circ\text{C}$ |
| б. Толуен | 2. $-117,3 + 78,5\text{ }^\circ\text{C}$ |
| в. Спирт | 3. $-38,8 + 356,9\text{ }^\circ\text{C}$ |

Конструктивний тест

Температурний коефіцієнт опору a можна визначити так:

$$I \Delta R$$

де Λ — опір при температурі T . Припускаючи, що α є сталою величиною, 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 ($e^x = 1 + x$; $x \ll 1$), довести, що:

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

Домашнє завдання

Побудувати графік залежності коливань температури ґрунту від глибини (до 30 см), якщо максимальна та мінімальна температури на поверхні становлять $T_{max} = 35\text{ }^\circ\text{C}$ і $T_{min} = 15\text{ }^\circ\text{C}$, а глибина згасання $D = 0,1$ м.

7. ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

Електричне поле та його характеристики

Електричне поле — часткова форма виявлення (нарівні з магнітним полем) електромагнітного поля, яка визначає дію на електричний заряд (з боку поля) сили, що не залежить від швидкості руху заряду. Основною кількісною характеристикою електричного поля є *напруженість електричного поля* E , яка в даній точці простору визначається відношенням сили F , що діє на заряд, розміщений у цій точці, до величини заряду q : $E = F/q$. У системі СІ напруженість електричного поля вимірюється в $\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$.

Електричні поля природного походження

До складу атмосфери входять іони кисню, азоту та інших газів, а також вільні електрони. В нижній тропосфері кількість іонів обох знаків невисока — близько $500 \cdot 700 \text{ пар} \cdot \text{см}^{-3}$. Іони виникають в основному за радіоактивного випромінювання урану й радію, що знаходяться в земній корі. Але ці іони обліплені нейтральними

молекулами води і рухливість їх мала. Вільні електрони існують недовго, бо приєднуються до інших частинок.

На великих висотах кількість іонів збільшується завдяки впливу космічного випромінювання, ультрафіолетового та корпускулярного випромінювання Сонця. Так, на висоті 20-25 км (стратосфера) спостерігається перший максимум іонізації, а саме — близько 10^4 пар-см³. Далі концентрація іонів зменшується, але на висоті 30 км (мезосфера) їх кількість становить теж 10^4 пар-см³. Причому кількість негативних іонів мала; в основному переважають позитивні іони та електрони. Приблизно з цієї висоти починається *іоносфера* — природне утворення розрідженої слабо іонізованої плазми, що перебуває у магнітному полі Землі і піддається впливу іонізуючого випромінювання Сонця. Іоносфера складається з кількох шарів, розташованих на різних висотах: верхній шар *F* відповідає основному максимуму іонізації; вночі він знаходиться на висоті 300-400 км, а вдень роздвоюється на шари *F₁* (160-200 км) і *F₂* (220-320 км). На висотах 90-150 км розміщений шар *E*, а нижче 90 км — шар *D*. Іонний склад іоносфери відповідає трьом стадіям існування іонів — їх утворенню, перетворенню та знищенню. Іонний склад змінюється з висотою: (H_2O), H^+ , O_2^+ , NO^+ та $ЯСО^+$ — на висотах, менших ніж 70-80 км, NO^+ та O^+ (85-200 км), O^+ (> 200 км), H^+ (> 600-1000 км). Завдяки градієнту густини повітря рівень іонізації і, відповідно, питомої електропровідності повітря неоднорідний: біля поверхні Землі $\sigma = 2 \cdot 10^{-14}$ См-м⁻¹ і $30 \cdot 10^{-14}$ См-м⁻¹ на висоті 10 км. Тобто повітря можна розглядати як ізолятор біля поверхні та провідник — в області мезосфери й вище.

Крім того, в тропосфері можуть відбуватися явища, що викликають поділ електричних зарядів унаслідок зміни метеорологічних умов — хмар, опадів, туманів тощо. В атмосфері виникає позитивний об'ємний заряд, а на поверхні Землі — негативний. Отже, електричне поле Землі спрямоване приблизно вертикально; напруженість його становить від $130 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ над поверхнею до кількох вольт на метр на висоті 10 км.

Блискавки. Найявністю грозових хмар впливає на розподіл електричних зарядів. Згідно з сучасним уявленням, структура грозової хмари — тризарядна: в центрі хмари розташо-

вана основна зона негативного заряду, над нею — позитивного заряду, а під нею — інша, менша, але теж позитивно заряджена зона (рис. 1.7.1). Найбільш характерною особливістю зони негативного заряду хмари є те, що вона являє собою плоский (товщиною 1 км) шар на висоті 6 км, де температура повітря становить — 15°C (так звана *температура реверсу*).

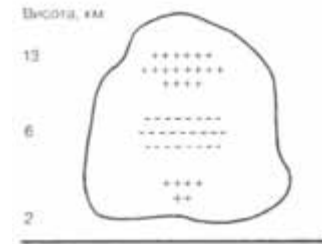


Рис. 1.7.1. Тризарядна структура грозової хмари

На цій висоті вода існує в трьох фазах — у вигляді рідини, льоду і пари. Верхня позитивно заряджена зона може мати товщину кілька кілометрів і досягати тропопаузи (13 км). Нижня зона настільки мала, що її впливом на формування електричного поля біля поверхні Землі можна знехтувати. В атмосфері за типових температурних режимів існують кристалики льоду та важкі частинки снігової крупки. Лабораторні дослідження показали, що при температурах більших ніж температура реверсу (висоти <6 км) частинки крупки, що падають, взаємодіють з кристаликами льоду і набувають позитивного заряду, а при температурах менших від температури реверсу (висоти >6 км) вони заряджаються негативно (рис. 1.7.2). Вважається, що саме частинки крупки беруть участь у формуванні нижньої зони в тризарядній хмарі. Перед грозою напруженість електричного поля може сягати $50000 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, а під час грози — $100000 \text{--} 300000 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$.

Істотну роль в електризації грозових хмар відіграє конвекція — рух кристаликів льоду та снігової крупки вгору; причому, кристалики підіймаються швидше, що еквівалентно падінню крупки. Висхідний потік переносить переохолоджені краплини води вище граничної зони, забезпечуючи збільшення крупки. Як тільки хмара накопичить достатньо електричного заряду, при якому електричне поле здатне подолати діелектричну «міцність» атмосфери, виникає блискавка — іскровий розряд, що утворюється за відсутності електродів у масі заряджених та добре ізольованих одна від одної частинок. Блискавки переважно утворюються всередині основного негативного заряду.

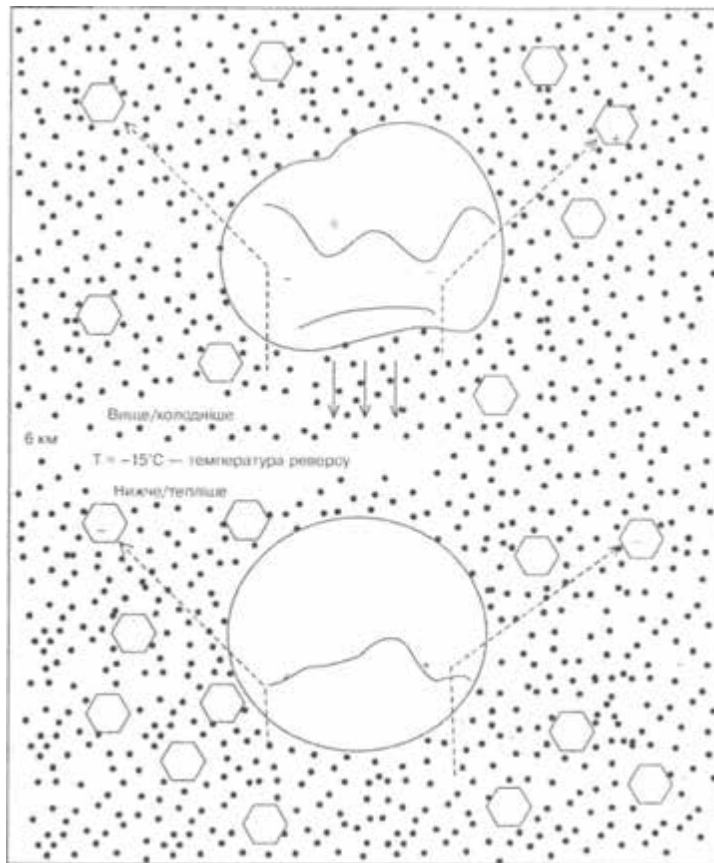


Рис. 1.7.2. Процеси перенесення заряду під час взаємодії частинок снігової крупки з кристаликами льоду

У випадку розряду між хмарою та землею поверхнею блискавка складається з двох розрядів: один (*лідер*) прямує до земної поверхні, а інший (*стрімер*) поширюється вгору.

Позначимо електричне поле, що утворюється між іоносферою та землею поверхнею E , а поле між хмарою і поверхнею — E_i (рис. 1.7.3). Зазначимо, що поле $E_i > E$ (оскільки відстань між зарядами менша). Там, де є башти тощо, виникає *коронний розряд* — самостійний високовольтний розряд в газі

при тиску, більшому за 1 атм поблизу електродів. Цей коронний розряд у повітрі і є блискавкою. Цікаво навести параметри блискавки: середня тривалість — 10^{-3} с, електричний струм — до 100000 А, температура в розряді — 27600°C , довжина блискавки — $3 \cdot 10^6$ км, діаметр — $1,3 \cdot 10^{-25}$ см.

Північне сяйво. У 1958 р. команда дослідників, очолювана Джеймсом ван Алленом, використовуючи дані супутника «Експлорер І», виявила наявність радіаційних поясів, що оточують земну кулю. Ці пояси утворюються зарядженими частинками (електронами й протонами), захопленими неоднорідним магнітним полем Землі. Траєкторії руху частинок мають спіралеподібну форму. Всі заряджені частинки надходять від Сонця або зірок; загальна назва їх — *космічні промені*. На полюсах ці частинки стикаються з іншими атомами, утворюючи випромінювання світла, яке називають *північним сяйвом (Aurora Borealis)* на Північному полюсі, *Aurora Australis* — на Південному).

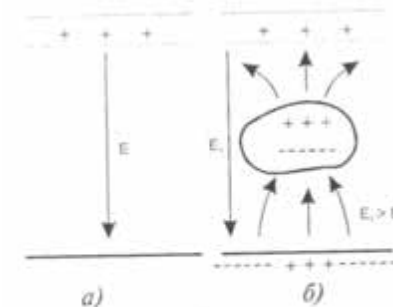


Рис. 1.7.3. а) Електричне поле, яке створюється об'ємним зарядом іонів; б) вплив грозових хмар на розподіл електричних зарядів

Приклад

Яка кількість електрики приноситься блискавкою на земну поверхню, якщо її тривалість становить 10^{-3} с, а струм в її каналі дорівнює 10^5 А?

Розв'язок

Величина струму пов'язана з зарядом співвідношенням:

$$I = \frac{q}{t}, \quad \text{звідки} \quad q = It = 10^5 \cdot 10^{-3} = 10 \text{ Кл.}$$

Контрольне завдання

Яка кількість електрики приноситься блискавкою на земну поверхню за рік, якщо кожену секунду на земній кулі виникає 100 блискавок, кожна з яких приносить 20 Кл?

Відповідь: $6,3 \cdot 10^{10}$ Кл.

Вимірювання електричних полів

Методи вимірювання електричних полів в атмосфері можна поділити на три класи:

1. Оцінка *напруженості* поля за різницею потенціалів між електродами, що перебувають у полі.
2. Вимірювання *величини заряду*, що індукується полем на поверхні провідника:

$$E = 4\pi\sigma, \quad (1.7.1)$$

де σ — поверхнева густина заряду.

3. Аналіз впливу поля на *рух електронів або іонів*.

Розглянемо основні методи вимірювань електричних полів природного походження.

Ракетний сенсор застосовується для вимірювання зовнішнього електричного поля. Ракета довжиною 1,5 м і діаметром 70 мм (рис. 1.7.4) обертається навколо поздовжньої осі; корпус ракети, таким чином, являє собою ротор. Електричне поле замикається крізь вікна на корпусі ракети на тонких електродах, що виконують функції статорів. Сигнали з кожної пари протилежно розташованих електродів надають інформацію щодо напруженості електричного поля.

Циліндричний сенсор, що установлюється на літаку в носовій та боковій частинах фюзеляжу, складається з двох напівциліндрів, розділених тefлоновим ізолятором. Під час польоту сенсор обертається, і електричне поле викликає появу змінних зарядів на обох циліндрах; ці заряди сприяють появі електричного струму, який через ємність підсилюється, обробляється та аналізується. Система здатна вимірювати електричні поля в діапазоні $10 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \div 500 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$.

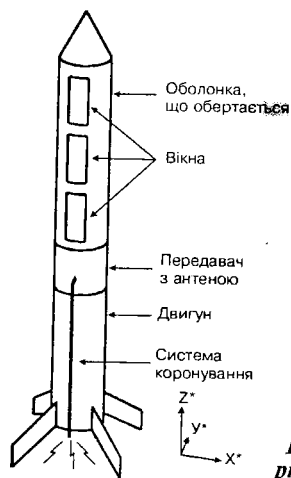


Рис. 1.7.4. Ракетний сенсор для вимірювання зовнішнього електричного поля

Алті-електрограф складається з сенсора, розміщеного на балоні, що заповнюється газом. Сенсор — це дві алюмінієві сфери, що виконують ще й функції передавальної антени (рис. 1.7.5). Усередині сфер є радіопередавач, аналогово-цифровий перетворювач, мікропроцесор, система живлення. За допомогою двигуна сфери обертаються навколо горизонтальної осі з частотою 2,5 Гц. Електричне поле викликає появу зарядів протилежної полярності на поверхні сфер. Крім того, система двох сфер обертається навколо вертикальної осі завдяки дії вентилятора. Таке подвійне обертання дає можливість вимірювати всі компоненти електричного поля. Загалом сигнал передавача модулюється за амплітудою, яка залежить від електричного поля, що вимірюється.

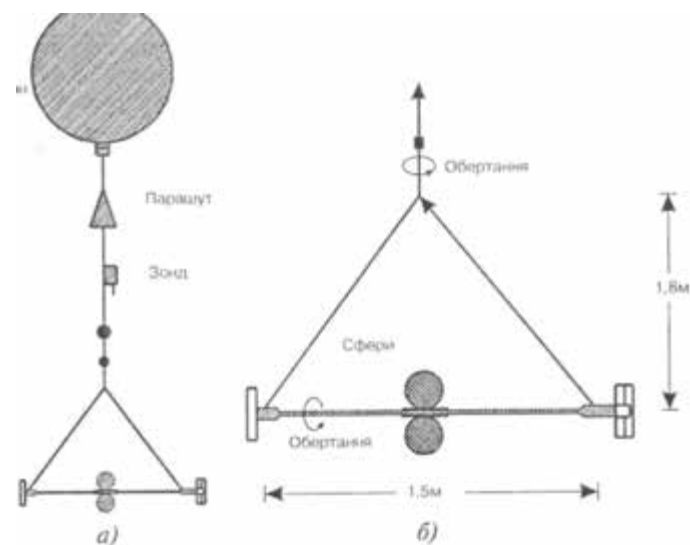


Рис. 1.7.5. Алті-електрограф: а) розміщення приладу на балоні, заповненому газом; б) будова приладу

Магнітне поле та його характеристики

Магнітне поле — силове поле, яке діє на електричний заряд, що рухається, та на тіла, що мають магнітні властивості. Характеризується магнітне поле вектором магнітної індукції \vec{B} і напруженістю магнітного поля \vec{H} , які пов'язані співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}, \quad (1.7.2)$$

де μ — магнітна проникність речовини, що характеризує зміну магнітної індукції середовища під впливом магнітного поля; μ_0 — магнітна стала ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн \cdot м⁻¹).

Зв'язок одиниць магнітної індукції та напруженості магнітного поля в системі СІ з одиницями інших систем такий:

$$1 \text{ Тл} = 1 \text{ кг} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{с}^{-2} = 10^4 \text{ Гс (гаус)} = 10^9 \gamma;$$

$$1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}; 1 \gamma = 10^{-9} \text{ Тл}.$$

$$1 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Е (ерстед)};$$

$$1 \text{ Е} = (1/4\pi) \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1} = 79,5775 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}.$$

Магнітна індукція, що створюється нескінченно довгим провідником зі струмом I , дорівнює:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi a}. \quad (1.7.3)$$

Магнітна індукція, що утворюється всередині кільцеподібного провідника радіусом r , дорівнює:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2r}. \quad (1.7.4)$$

Магнітне поле Землі

Природне силове поле, виникнення якого зумовлене джерелами, що містяться в Землі і навколосферному просторі, називається *магнітним полем Землі*. Магнітне поле діє на електричні заряди, що рухаються, і тіла, які мають магнітний момент. Магнітне поле Землі має постійну ($\approx 99\%$) і змінну ($\approx 1\%$) складові. За формою воно нагадує поле диполя, центр якого зміщений відносно центру Землі, вісь нахилена до осі обертання Землі на $11,5^\circ$ (рис. 1.7.6). Середня величина магнітної індукції поблизу земної поверхні становить $\approx 5 \cdot 10^{-5}$ Тл, а напруженість магнітного поля спадає від магнітних полюсів ($55,7 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$) до магнітного екватора ($33,4 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$).

Магнітне поле Землі утворює *магнітосферу* — область навколосферного простору, фізичні властивості, розміри й форма якої визначаються магнітним полем Землі та його взаємодією з потоками заряджених частинок від Сонця. Магнітосфера простягається на 70+80 тис км у напрямку до Сонця і на багато мільйонів кілометрів у протилежному напрямку.

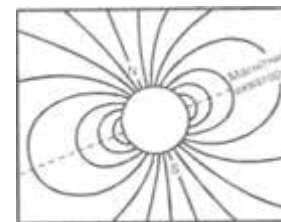


Рис. 1.7.6. Магнітне поле Землі

Електричні, магнітні та електромагнітні поля антропогенного походження

Електропередачі надвисокої напруги призводять до певних екологічних проблем. Сучасна енергетика базується на лініях електропередачі (ЛЕП) з напругою 220, 500, 750 і 1150 кВ. Створення двох останніх ліній електропередач (ЛЕП-750 і ЛЕП-1150) потребує формування санітарно-захисних зон — коридорів шириною 100+150 м, що обмежує господарську діяльність людини та зумовлює певні екологічні проблеми. Підготовка трас для ЛЕП, вирубування просік, установлення опор, монтаж проводів та подальша експлуатація ЛЕП зумовлюють відповідну реакцію з боку екосистем. Вирубування лісу призводить до значної перебудови всього комплексу кліматичних факторів: на просіках збільшується швидкість вітру, змінюється температура та вологість повітря; влітку збільшується кількість посушливих днів, що небезпечно для сходів; різко зростає випаровування вологи з поверхні ґрунту й трав'яного покриву, що викликає пересихання приповерхневих шарів ґрунту; взимку на просіках надмірно накопичується волога, що сприяє вегетації рослин навесні; збільшується приплив сонячного випромінювання в зоні просік. Розморожування та відтавання ґрунту на просіках відбувається на 7+30 днів раніше, ніж у лісі. Це призводить до зменшення водопроникності ґрунту, збільшення поверхневих стоків і виникнення ерозійних процесів. Внаслідок цього відбуваються значні пере-

будови фізико-хімічної та біологічної структури фунтового покриву. Будівництво й експлуатація ЛЕП зумовлюють незворотні зміни у видовому складі, фітомасі, просторовій і часовій структурі рослинності на просіках, особливо в зонах тундри, лісотундри і північної тайги. Відновлення рослинного покриву вкрай повільне, що сприяє ерозійним процесам. Утворення просік супроводжується також значними змінами тваринного компонента екосистем: спостерігається зникнення тварин, що мешкають у кронах дерев; змінюється видовий склад, численність і різноманіття птахів; збільшується концентрація гризунів.

Без сумніву, впливають ЛЕП і на людський організм. Розростання міст до мегаполісів наближує ЛЕП до новобудов. Допустимі норми електричного поля не повинні перевищувати $1 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$; для цього необхідно віддаляти опори ЛЕП на $30+40 \text{ м}$ від жилих кварталів. Нагадаємо, що типові значення напруженості електричного поля становлять для: повітряних ЛЕП — $5,5 \cdot 2,5 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$; електричних розподільних станцій — $2,5 \cdot 6 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$. Лінії електропередачі є джерелами не тільки електричних, але й магнітних полів. В 90-х роках вчені Швеції, Данії, США провели масштабні дослідження, які довели, що вплив магнітних полів ЛЕП на здоров'я мешканців може проявитися в коридорах завширшки $400 \cdot 800 \text{ м}$ вздовж ліній електропередач. В 1996 р. величина індукції магнітного поля в $0,2 \text{ мкТл}$ була рекомендована як гранично допустимий рівень магнітного поля промислової частоти. Перевищення цієї норми призводить до раку крові та мозку. Наприклад, діти віком до 15 років у 2,7 рази частіше захворюють на лейкемію, якщо перебувають у магнітному полі, магнітна індукція якого перевищує $0,2 \text{ мкТл}$, і в 3,8 рази частіше, якщо магнітна індукція становить більше $0,3 \text{ мкТл}$.

Електротранспорт, промислові та побутові прилади є також джерелами електричних полів; оскільки всі вони використовують електричний струм, навколо якого утворюються магнітні поля, доцільно обговорювати вплив саме електромагнітних полів. Електротранспорт (електропоїзди, в тому числі підземні, тролейбуси, трамваї), радіолокаційні станції, системи радіозв'язку й телебачення, промислові установки термообробки матеріалів та отримання плазми, медична апаратура, побутові прилади, со-

товий зв'язок, персональні комп'ютери є джерелами електромагнітних полів, що оточують людину. Промислові установки високої напруги істотно впливають на людину, викликаючи неприємні відчуття, а іноді порушення здоров'я. Згідно з накопиченими даними, вплив електромагнітних полів на людину призводить до негативних змін стану здоров'я, викликаючи зміни в функціонуванні серцево-судинної, ендокринної, гематологічної, імунної систем, а також збільшує вірогідність розвитку онкопатологій. Вплив електромагнітних полів промислової частоти залежить від напруженості, частоти, тривалості перебування людини в полі, періодичності дії. В табл. 1.7.1 наведено максимально дозволених для населення рівні електромагнітних випромінювань, у табл. 1.7.2 — стандарти електромагнітних випромінювань для виробничих умов.

1.7.1. Дозволені рівні електромагнітних випромінювань для населення

Частота	Рівень, $\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$
50 Гц	$5 \cdot 10^2$
30+300 кГц	20
0,3+3 МГц	10
3+30 МГц	4
30+300 МГц	2

1.7.2. Дозволені рівні електромагнітних випромінювань для виробничих умов

Частота	Рівень, $\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$
50 Гц	$5 \cdot 10^2$
60 кГц+3 МГц	50
3+30 МГц	20
30+50 МГц	10
50+300 МГц	5

Методи вимірювання магнітних полів

Магнітостатичний магнітометр містить постійний магніт, підвішений на пружній нитці, на якій прикріплено дзеркало. При зміні зовнішнього магнітного поля магніт обертається; кут обертання магніту та дзеркала реєструється за допомогою оптичного методу (рис. 1.7.7). Магнітометр передбачає запис опорного сигналу від нерухомого дзеркала. Перевагою приладу є його надійність, простота конструкції та невисока ціна. До недоліків можна віднести порівняно невисоку чутливість (0,1 γ), вплив на вимірювання сейсмічних коливань, температури, вологості; крім того, пружні властивості нитки втрачаються з часом.

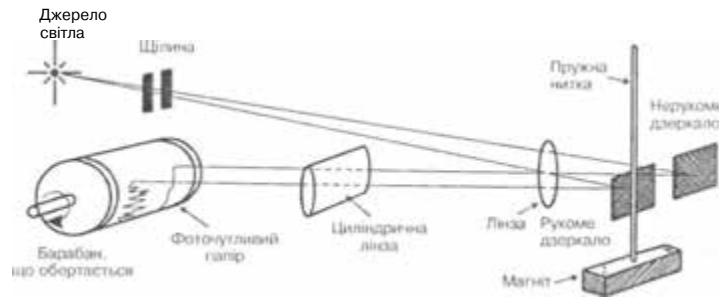


Рис. 1.7.7. Магнітостатичний магнітометр

Астатичний магнітометр складається з двох протилежно спрямованих магнітів, підвішених на пружній нитці, на якій прикріплено дзеркало. Звичайно магнітометр цього типу застосовують для оцінки магнітних властивостей геологічних зразків; розташування такого зразка під нижнім магнітом (рис. 1.7.8) зумовлює його обертання, оскільки він знаходиться ближче до зразка, ніж верхній магніт.

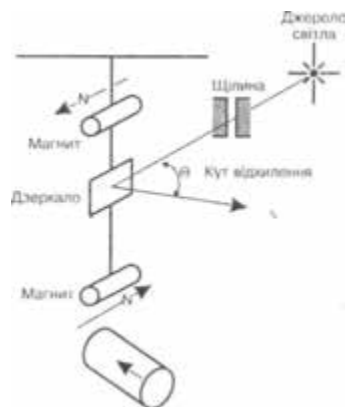


Рис. 1.7.8. Астатичний магнітометр

Система двох протилежно спрямованих магнітів дає змогу запобігти впливу магнітного поля Землі. Чутливість оцінки магнітних полів зразків — $1 \gamma \cdot \text{см}^{-3}$. Недоліком є залежність вимірювань від фізичних коливань.

Індукційний магнітометр ґрунтується на вимірюванні електрорушійної сили у витках котушки під час зміни діючого на нього магнітного потоку (рис. 1.7.9). Якщо N — кількість витків котушки, то електрорушійна сила дорівнює:

$$E = N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.7.5)$$

де Φ — магнітний потік.

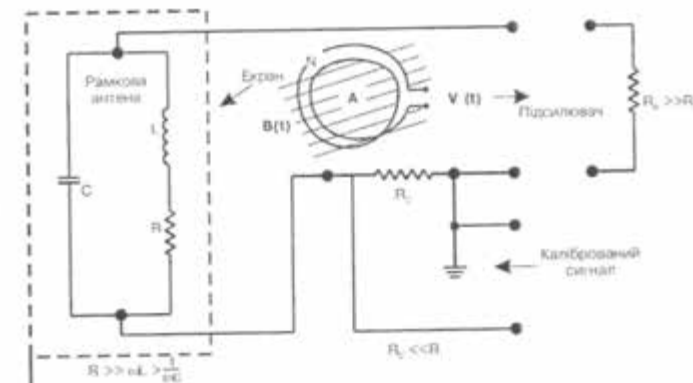


Рис. 1.7.9. Індукційний магнітометр

Якщо котушку розмістити у змінному магнітному полі частотою f та амплітудою B_p , то напруга, яку можна подати з клем котушки на підсилювач, визначиться за виразом:

$$U = 2\pi f N S B_p \quad (1.7.6)$$

де S — площа перерізу котушки.

Чутливість індукційного магнітометра визначається параметрами котушки: наприклад, магнітометр з котушкою діаметром 2 м та кількістю витків 16000 здатний реагувати на природні магнітні поля частотою 140 Гц і магнітною індукцією 10^{-12} Тл та утворювати сигнал напругою 0,3 мкВ; з котушкою діаметром 2,5 см, усередині якої міститься

осердя, та кількістю витків 20000 відгук приладу на ті самі магнітні поля становить 0,1 мВ.

Модифікація приладу, призначена для оцінки магнітних властивостей геологічних зразків, передбачає обертання з високою ($5 \cdot 500 \text{ с}^{-1}$) частотою зразка між двома котушками

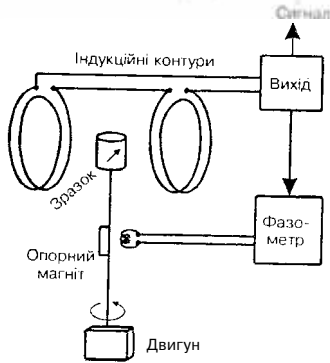


Рис. 1.7.10. Модифікація індукційного магнітометра

момент кількості руху \vec{p} і магнітний момент $\vec{\mu}$. Зовнішнє магнітне поле намагається орієнтувати ядра так, щоб власні магнітні моменти повернулися вздовж цього поля. Оскільки механічний момент заважає цьому, відбувається прецесія ядер з ларморівською частотою $\omega = 2\pi f = \gamma B$, де γ — гіромагнітне відношення, що дорівнює відношенню магнітного моменту $\vec{\mu}$ елементарних частинок та їх компонентів — атомів, молекул, електронів, протонів до їх моменту кількості руху \vec{p} (механічного моменту); для протона $\gamma_p = 2,675 \cdot 10^8 \text{ Тл}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Вимірювання частоти прецесії дає можливість оцінити магнітне поле. Схему типового протонного магнітометра наведено на рис. 1.7.11. Недоліком приладу є невисока чутливість (0,1 γ), залежність величини сигналу від напруженості магнітного поля, періодичний режим роботи.

Магнітометр з оптичним накачуванням містить кювету з парою речовини (рубідію, цезію, натрію, калію) і джерело інтенсивного світла (рис. 1.7.12). Розглянемо як приклад атоми рубідію, що характеризуються певною енергетичною структурою, зокрема основним рівнем $^2S_{1/2}$ та збудженим рівнем $^2P_{1/2}$. Ці рівні, за правилами відбору,

(рис. 1.7.10). Збільшення частоти, згідно з виразом (1.7.6), призводить до підвищення напруги, що надходить до системи реєстрації. Чутливість магнітометра такого типу становить $10^{-4} \gamma$. Недоліком приладу є шуми, що виникають за швидкого обертання, та виникнення електростатичних зарядів.

Протонно-прецесійний магнітометр.

Протони (атомні ядра) мають масу, електричний заряд, механічний

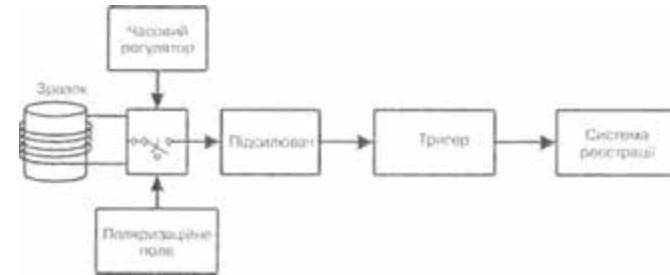


Рис. 1.7.11. Протонно-прецесійний магнітометр

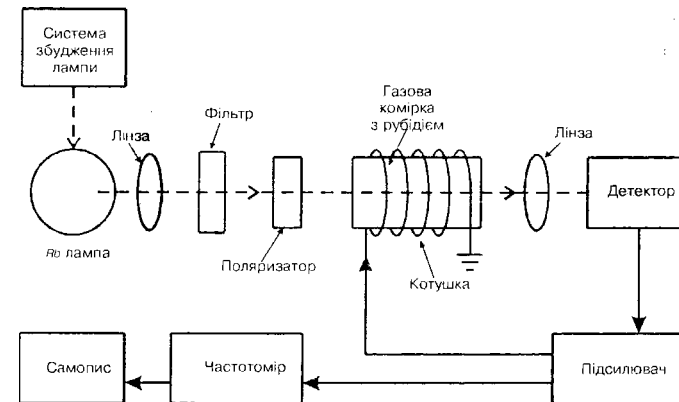


Рис. 1.7.12. Магнітометр з оптичною накачкою

розщеплюються на підрівні, ступінь розщеплення залежить від прикладеного магнітного поля. Якщо подіяти на рубідій інтенсивним світлом, тобто здійснити оптичне накачування, то кількість атомів на обох рівнях вирівнюється — такий стан називається насиченням. Кількість актів поглинання та актів випромінювання стає однаковою і пара рубідію припиняє поглинати світло. Кювета з речовиною внаслідок цього стає прозорою. Якщо після цього подіяти на систему радіохвилями, частота ν яких задовольняє співвідношення:

$$\nu = (E_2 - E_1)/h, \quad (1.7.7)$$

(де E_1 — енергія основного рівня, E_2 — енергія збудженого рівня, h — стала Планка), то атоми рубідію внаслідок по-

глинання радіохвиль будуть переходити з нижнього рівня на збуджений, населеність атомів на останньому рівні збільшиться, поглинання збільшиться, прозорість кювети з речовиною зменшується. За плавної зміни частоти ν радіохвиль крива залежності прозорості речовини від частоти різко зростає. При цьому дана крива відповідає формі спектральної лінії рубідію. Вплив зовнішніх магнітних полів зумовлює зміщення вершини спектральної лінії, вимірювання якого дає змогу оцінити слабкі магнітні поля з великою (10^{*2} у) точністю.

Магнітометр з оптичною орієнтацією атомів. В основу методу покладено ефект Зеємана — розщеплення спектральної лінії атома в інтенсивному магнітному полі на три лінії, відстань між якими залежить від інтенсивності магнітного поля. Вимірювання ступеня розщеплення



Рис. 1.7.13. Магнітометр з оптичною орієнтацією атомів

спектральних ліній дає змогу оцінити магнітне поле. Схему магнітометра, що працює на основі ефекту Зеємана, наведено на рис. 1.7.13. Два фотодетектори настроєні таким чином, що розщепленим лініям відповідає більший вихідний сигнал. Чутливість магнітометра становить $10^4 \gamma$; використовуються магнітометри такого типу для вимірювань інтенсивних магнітних полів Сонця.

Надпровідний магнітометр ґрунтується на ефекті Джозефсона — протіканні надпровідного струму через тонкий шар діелектрика, що розділяє два надпровідники. Часто використовують ще один термін для такого магнітометра — «сквід» (від англ. *Superconducting Quantum Interference Device*). Чутливим елементом магнітометра є електричний контур з надпровідника з контактами Джо-

зефсона — тонкими плівками або точковими контактами (рис. 1.7.14). Під час пропускання через такий контакт достатньо слабого струму зниження напруги на контакті відсутнє, оскільки струм є надпровідним (*стаціонарний ефект*). При збільшенні струму через контакт і досягненні критичного значення I_k на контакті знижується напруга (*нестационарний ефект*) і контакт випромінює електромагнітні хвилі. Випромінювати хвилі може тільки змінний струм — саме такий струм тече крізь контакт.

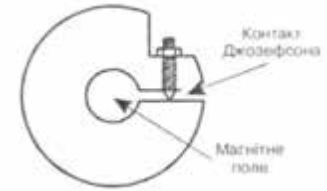


Рис. 1.7.14. Надпровідний магнітометр

Величина струму, що проходить через контакт, та фаза визначаються за виразами:

$$I = I_0 \sin \phi = I_0 \sin(\omega t + \phi); \quad (1.7.8)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi e U}{h}. \quad (1.7.9)$$

Частота випромінювання визначається за виразом:

$$f = 2eU/h, \quad (1.7.10)$$

де e — заряд електрона, h — стала Планка.

Причина випромінювання полягає в тому, що електрони під час переходу через контакт отримують додаткову енергію щодо основного стану надпровідника. Перехід в основний стан, таким чином, супроводжується випромінюванням фотона з частотою f , яка визначається за виразом (1.7.10). Важливим є те, що критичний струм I_k залежить від потоку зовнішнього магнітного поля. Це дає змогу використовувати такий пристрій для надзвичайно точного вимірювання слабких магнітних полів. Чутливість надпровідного магнітометра — $10^{-5} \gamma$.

Приклад

Розряд блискавки характеризується електричним струмом 10^4 А. Чому дорівнює магнітна індукція, що утворюється на відстані 100 м від блискавки?

Розв'язок

Підставляємо в формулу (1.7.3) числові дані:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^4}{2\pi \cdot 100} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$$

Контрольне завдання

Вимірювання магнітного поля, утвореного смерчем (торнадо), показали, що магнітна індукція $B = 1,5 \cdot 10^5$ Тл на відстані 9 км від пункту вимірювання. Чому дорівнює електричний струм усередині смерчу?

Відповідь: 675 А.

Аудиторні завдання

Знайти напруженість магнітного поля, що створюється:

1. Лабораторним магнітом ($B = 2,5$ Тл);
2. Надпровідниковим магнітом ($B = 25000$ Ге);
3. Магнітним полем Землі ($B = 5 \cdot 10^5$ Тл);
4. Магнітним полем серця ($B = 50\gamma$);
5. Магнітною аномалією ($B = 190000$ нТл).

Знайти магнітну індукцію, якщо напруженість магнітного поля становить:

1. $H = 8 \cdot 10^4 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$ (магнітне поле сонячних протуберанців);
2. $H = 10^{12} \text{ Е}$ (магнітне поле нейтронних зірок).

Репродуктивний тест

Обчислити ларморівську частоту у протонно-прецесійно-му магнітометрі, якщо магнітна індукція дорівнює 1,41 Тл.

Альтернативний тест

Чи правильне твердження, що:

1. Блискавка складається з двох розрядів: один прямує до земної поверхні, а інший поширюється вгору. Так Ні
2. Частинки крупни, що падають, взаємодіють з кристаликами льоду й набувають негативного заряду. Так Ні

Акордно-вибірковий тест

Знайти правильні відповіді на запитання.

«Чутливість індукційного магнітометра можна збільшити за рахунок:»

- 1) Збільшення діаметра котушки;
- 2) Збільшення кількості витків котушки;
- 3) Застосування осердя усередині котушки;
- 4) Обертання з високою частотою зразка між двома котушками.

Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари «магнітометр — його чутливість»

- | | |
|------------------------------|----------------------|
| а. протонно-прецесійний; | 1. $10^{-2}\gamma$; |
| б. надпровідниковий; | 2. $10^{-4}\gamma$; |
| в. індукційний; | 3. $10^{-3}\gamma$; |
| г. з оптичним накачуванням; | 4. $10^{-5}\gamma$; |
| д. магніто статичний; | 5. $10^{-4}\gamma$; |
| е. на основі ефекту Зеемана; | 6. $10^4\gamma$; |

Конструктивний тест

Як отримати вираз (1.7.10), використовуючи рівняння (1.7.8) і (1.7.9)?

Домашнє завдання

Чому дорівнює магнітна індукція магнітного поля Землі, що вимірюється індукційним магнітометром, якщо кількість витків котушки 16000, діаметр котушки 2 м, частота змінного поля 140 Гц, а напруга на клеммах котушки 0,3 мВ?

8. ПРИРОДНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Параметри оптичного випромінювання

Згідно з уявленнями хвильової оптики, оптичне випромінювання (світло в широкому значенні слова) — електромагнітні хвилі, довжини яких містяться в діапазоні від кількох нанометрів до десятих часток міліметра. Ці хвилі поширюються у просторі у вигляді взаємозв'язаних коливань електричних і магнітних полів, вектори напруженості яких \vec{E} і \vec{H} завжди перпендикулярні один до одного і до напрямку поширення хвилі. Швидкість поширення світла у вакуумі — $3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Розрізняють ультрафіолетове ($\lambda < 400 \text{ нм}$), видиме ($\lambda = 400+700 \text{ нм}$) та інфрачервоне ($\lambda > 700 \text{ нм}$) випромінювання (табл. і.8.1).

Сукупність електромагнітних хвиль з різними довжинами хвиль або частотами, що входять до складу сонячного випромінювання, є спектром сонячного випромінювання. Водночас, згідно з квантовою теорією, світло розглядається як потік елементарних світлових частинок — квантів

1.8.1. Діапазони спектра оптичного випромінювання

Діапазон довжин хвиль, нм	Назва
<i>Ультрафіолетова область</i>	
100+280	УФ-С
280+315	УФ-В
315-380	УФ-А
<i>Видима область</i>	
380+440	фіолетове світло
440+495	синє світло
495+580	зелене світло
580+640	жовте світло
640+760	червоне світло
<i>Інфрачервона область</i>	
760+2500	близька
2500+25000	середня
25000+500000	далека

електромагнітного випромінювання або фотонів. Кожен фотон має енергію $E = h\nu = hc/\lambda$ (де ν — частота випромінювання, λ — довжина хвилі, h — стала Планка ($6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с), c — швидкість світла ($3 \cdot 10^8$ м · с⁻¹)).

Величини, за допомогою яких оцінюють оптичне випромінювання, діляться на енергетичні (які характеризують випромінювання безвідносно до його дії на приймачі випромінювання) та світлові (які характеризують випромінювання щодо умовного приймача — середнього людського ока).

Аудиторія завдання

- Визначити частоту оптичного випромінювання, якщо довжина хвилі дорівнює: $5 \cdot 10^7$ м; 700 нм; 10,6 мкм.
- Визначити довжину хвилі фотона, якщо частота його дорівнює: $6,2 \cdot 10^{14}$ Гц; 3,1 ГГц; 46 МГц.
- Визначити енергію фотона для кожного з попередніх завдань.

Енергетичні величини

Потік випромінювання Φ_e — потужність, що посиляється, переноситься або отримується у вигляді випромінювання:

$$\Phi_e = \frac{dQ}{dt}, \quad (1.8.1)$$

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:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}. \quad (1.8.2)$$

Одиниця сили випромінювання — *ват на стерadian* [Вт · ср⁻¹].

Енергетична яскравість L_e в точці поверхні i в заданому напрямку — відношення сили випромінювання елемента поверхні до площі ортогональної проекції цього елемента на площину, перпендикулярну до цього напрямку:

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos \alpha}, \quad (1.8.3)$$

де dS — площа елемента поверхні, що випромінює; α — кут, який визначає напрямок випромінювання.

Одиниця енергетичної яскравості — *ват на стерadian* — *квадратний метр* [Вт · ср⁻¹ · м⁻²].

Енергетична освітленість E_e в точці поверхні — відношення потоку випромінювання, що падає на елемент поверхні, до площі цього елемента:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (1.8.4)$$

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:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (1.8.5)$$

Одиниця енергетичної світності — *ват на квадратний метр* [Вт · м⁻²].

Світлові величини

Світловий потік Φ_e — при нерівномірному розподілі випромінювання у просторі в тілесному куті ω визначається як:

$$\Phi_e = \int I_e \cdot d\omega, \quad (1.8.6)$$

а при рівномірному посиленні світла в тілесному куті світловий потік визначається так:

$$\Phi_e = I_e \cdot \omega, \quad (1.8.7)$$

де I_e — сила світла.

Одиниця світлового потоку — люмен [лм].

Сила світла I_e визначається так:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}, \quad (1.8.8)$$

Одиниця сили світла — кандела [кд] = [лм · ср⁻¹].

Яскравість L_e в точці поверхні і в даному напрямку — відношення інтенсивності світла елемента поверхні до площі ортогональної проєкції цього елемента на площину, перпендикулярну до даного напрямку:

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos \alpha}, \quad (1.8.9)$$

де dS — площа елемента поверхні, що випромінює; α — кут, що визначає напрямок випромінювання.

Одиниця яскравості — кандела на квадратний метр [кд · м⁻²].

Освітленість E_e в точці поверхні — відношення світлового потоку, що падає на елемент поверхні, до площі цього елемента:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}, \quad (1.8.10)$$

Одиниця освітленості — люкс [лк] = [лм · м⁻²].

Світність M_e в точці поверхні — відношення світлового потоку, що виходить з елемента поверхні, до площі цього елемента:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}, \quad (1.8.11)$$

Одиниця світності — люмен на квадратний метр [лм · м⁻²].

Між одиницями енергетичних та світлових величин є певні співвідношення:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Вт} &= 0,27 \text{ лм} (\lambda = 400 \text{ нм}); & 1 \text{ Вт} &= 683,0 \text{ лм} (\lambda = 555 \text{ нм}); \\ 1 \text{ Вт} &= 25,9 \text{ лм} (\lambda = 450 \text{ нм}); & 1 \text{ Вт} &= 430,0 \text{ лм} (\lambda = 600 \text{ нм}); \\ 1 \text{ Вт} &= 220,0 \text{ лм} (\lambda = 500 \text{ нм}); & 1 \text{ Вт} &= 73,0 \text{ лм} (\lambda = 650 \text{ нм}); \\ 1 \text{ Вт} &= 679,0 \text{ лм} (\lambda = 550 \text{ нм}); & 1 \text{ Вт} &= 2,78 \text{ лм} (\lambda = 700 \text{ нм}); \\ 1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} &= 6,83 \cdot 10^6 \text{ лк} (\lambda = 555 \text{ нм}); \\ 1 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} &= 683 \text{ кд} (\lambda = 555 \text{ нм}); \\ 1 \text{ кд} &= 1 \text{ лм} \cdot \text{ср}^{-1} = 1,464 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1} (\lambda = 555 \text{ нм}). \end{aligned}$$

Приклад

Визначити силу випромінювання джерела світла потужністю 150 Вт і діаметром 5 см.

Розв'язок

Використовуючи формулу (1.8.2), отримуємо:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega} = \frac{150 \text{ Вт}}{4\pi \text{ср}} = 11,94 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

Контрольне завдання

Визначити енергетичну освітленість, що утворює джерело світла потужністю 100 Вт і діаметром 10⁻² м.

Відповідь: 3,18 · 10⁵ Вт · м⁻².

Приклад

Освітленість пов'язана з силою світла точкового джерела світла, що знаходиться на відстані d від заданої точки, співвідношенням: $E_e = I_e \cos \theta / d^2$, де θ — кут падіння світла. Визначити освітленість центральної частини автостради, що утворюється двома світильниками силою світла 2000 кд кожний. Висота h , на якій розміщені світильники — 14 м, відстань L між ними — 60 м.

Розв'язок

Відстань d від заданої точки до окремого світильника знаходимо з співвідношення: $d^2 = (L/2)^2 + h^2$. Звідси $\cos \theta = h/d = h / \sqrt{(L/2)^2 + h^2} = 14 / \sqrt{(30)^2 + 14^2} = 0,423$, а освітленість, що утворюється світильником, $E_e = I_e \cos \theta / d^2 = 2000 \text{ кд} \cdot 0,423 / 1096 \text{ м}^2 = 0,77 \text{ лк}$. Отже, освітленість центральної частини автостради, що утворюється двома світильниками, дорівнює 1,54 лк.

Контрольне завдання

Приміщення ферми освітлюється трьома світильниками. Норма освітленості — 30 лк. Визначити, чи забезпечується ця норма, якщо сила світла кожного світильника дорівнює 100 кд. Висота стелі — 3 м, відстань між світильниками — 3 м.

Відповідь: сумарна освітленість дорівнює 16,15 лк; норма не забезпечується.

Приклад

Визначити яскравість Сонця, якщо освітленість земної поверхні за нормального падіння сонячного випромінювання дорівнює 10^5 лк.

Розв'язок

Сила світла I_e пов'язана з освітленістю E_e при нормальному падінні світла співвідношенням $I_e = E_e d^2$ (де d — відстань між Сонцем та Землею). Використовуючи формулу (1.8.9), знаходимо яскравість Сонця:

$$L_e = I_e / S = E_e d^2 / \pi R_s^2,$$

де R_s — радіус Сонця.

Підставляємо числові значення E_e та астрономічних величин (див. додаток), отримуємо:

$$L_e = \frac{10^5 \text{ лк} (1,496 \cdot 10^{11} \text{ м})^2}{3,14 \cdot (6,96 \cdot 10^8 \text{ м})^2} = 1,47 \cdot 10^9 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Контрольне завдання

Визначити яскравість Місяця, якщо освітленість земної поверхні Місяцем у повні дорівнює 0,2 лк.

Відповідь: $3,1 \cdot 10^3$ кд \cdot м⁻².

Спеціалізовані оцінки випромінювання

У біології серед деяких специфічних фотохімічних процесів, таких як фотосинтез, завдяки якому 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 даної області спектра називається *фотосинтетично активним випромінюванням (ФАВ)*. Для оцінки цього випромінювання вимірюють повну кількість

фотонів, отриманих чи поглинутих у певній спектральній області, або загальну енергію випромінювання.

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

$$1 \text{ ейнштейн} = 1 E = N_A h\nu = 1 \text{ моль фотонів}, \quad (1.8.12)$$

де N_A — число Авогадро ($6,023 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹), $h\nu$ — енергія одного фотона.

Як бачимо, величина енергії, еквівалентна 1 Е, залежить від частоти (довжини хвилі). Для спектральної області, обмеженої довжинами хвиль λ_1 та λ_2 , енергія випромінювання визначається за виразом:

$$Q_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} n(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda, \quad (1.8.13)$$

де $n(\lambda)$ — кількість фотонів, сприйнятих на довжині хвилі λ .

У табл. 1.8.2 наведено співвідношення між одиницями оптичного випромінювання, що вимірюється в природних умовах.

1.8.2. Співвідношення між одиницями оптичного випромінювання

E , мкЕм ² с ⁻¹	E , Втм ²
3000	705,0
2500	587,5
2000	470,0
1500	325,5
1000	235,0
500	117,5

У літературі для оцінки співвідношення оптичного випромінювання з фотосинтетичною активністю рослин використовують *густину потоку фотосинтетичних фотонів (ГПФФ)*, що має одиницю вимірювання *моль \cdot м⁻² \cdot с⁻¹* або *моль \cdot фотони \cdot м⁻² \cdot с⁻¹*. Для сонячного випромінювання існує фактор перетворення цієї одиниці в фотометричну:

$$1 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \approx 51 \text{ лк}. \quad (1.8.14)$$

Приклад

Енергетична освітленість земної поверхні в смузі фотосинтетично активного випромінювання (ФАВ) — $500 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Визначити густину потоку фотосинтетичних фотонів (ГПФФ), припускаючи, що енергія сонячного випромінювання дорівнює $2,35 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Розв'язок

Енергія, що відповідає потоку фотонів через одиницю поверхні за одиницю часу (густина потоку фотосинтетичних фотонів), поділена на моль фотонів, дорівнює загальній енергії E фотонів, що проходять через одиницю поверхні за одиницю часу, поділеній на енергію одного фотона E_f :

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

Звідси

$$\begin{aligned} \text{ГПФФ} &= 500 (\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}) \cdot 1 \text{ моль} / 2,35 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} = \\ &= 2,1 \cdot 10^3 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \end{aligned}$$

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

Закопи теплового випромінювання

Теплове випромінювання — електромагнітне випромінювання, що утворюється речовиною за рахунок її внутрішньої енергії.

Із рис. 1.8.1 видно, що повна енергія, яка випромінюється, представлена площею під кривою і швидко збільшується зі збільшенням температури. Частота ν_{max} , на якій знаходиться максимум випромінювальної здатності, також збільшується зі збільшенням температури.

Теплове випромінювання підпорядковується таким законам:

Закон зміщення Віна: довжина хвилі λ_{max} , що відповідає максимальному значенню енергетичної світності чорного тіла, обернено пропорційна його термодинамічній температурі T :

$$\lambda_{\text{max}} = 2,8978 \cdot 10^{-3} \cdot T^{-1}; \quad (1.8.15)$$

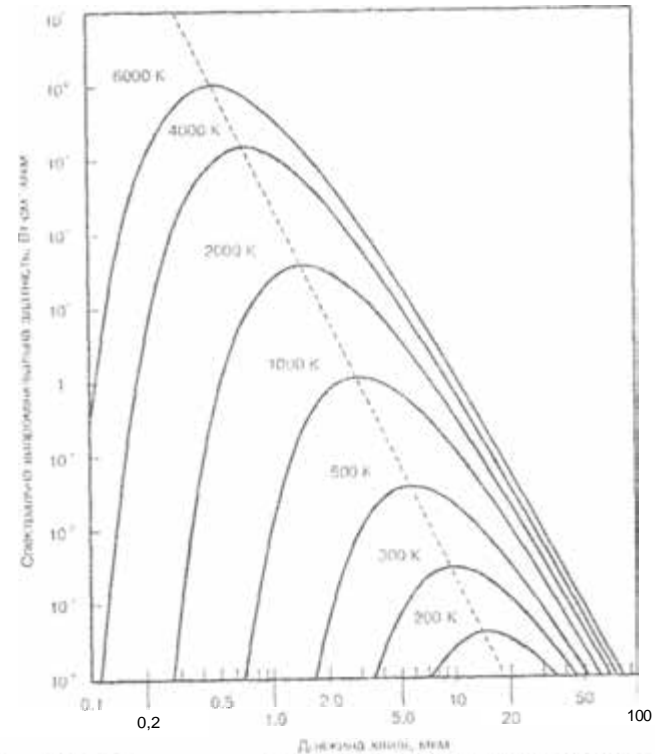


Рис. 1.8.1. Спектральне положення максимуму випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла залежно від температури

частота ν_{max} при цьому визначається як:

$$\nu_{\text{max}} = 1,03 \cdot 10^{11} \cdot T. \quad (1.8.16)$$

Закон Стефана-Больцмана: енергетична світність чорного тіла пропорційна четвертому степеню його термодинамічній температурі:

$$M_e = \sigma T^4, \quad (1.8.17)$$

де $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$.

Тіло з температурою T_1 , що знаходиться в навколишньому середовищі з температурою T_2 , характеризується енергетичною світністю:

$$M_{eT} = \sigma T_1^4 - \sigma T_2^4. \quad (1.8.18)$$

Закон випромінювання Планка дає спектральну залежність випромінювальної здатності чорного тіла, функція якої, віднесена до одиничного інтервалу частот, має вигляд:

$$W = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (1.8.19)$$

де h — стала Планка, c — швидкість світла, T — абсолютна температура, k — стала Больцмана, e — основа натурального логарифма.

Приклад

Температура поверхні тіла людини 35 °С. На яку довжину хвилі припадає максимум випромінювання шкіри людини?

Розв'язок

Використовуючи закон Віна, отримуємо:

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= 2,8978 \cdot 10^{-3} \cdot T^{-1} = 2,8978 \cdot 10^{-3} / 308,16 = \\ &= 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 9,4 \text{ мкм}. \end{aligned}$$

Параметри сонячного випромінювання

Сонце є основним зовнішнім джерелом світла й енергії для Землі та її атмосфери, завдяки якому існує життя на планеті. Сонце має вигляд розжареної кулі радіусом $6,96 \cdot 10^8$ м, маса якої становить $1,991 \cdot 10^{30}$ кг. Відстань між Сонцем і Землею — $1,496 \cdot 10^{11}$ 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. Щорічна енергія Сонця, що приймається Землею, становить $5,5 \cdot 10^{24}$ Дж; потужність — $1,5 \cdot 10^{15}$ кВт за годину. 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. Спектр сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні, складається з ультрафіолетової (200–400 нм), видимої (400–700 нм) та інфрачервоної (>700 нм) частин. На ультрафіолетову частину спектра при-

падає 5%, видиму — 35% і на інфрачервону — 60% сонячного випромінювання. Спектр сонячного випромінювання поза атмосферою та на земній поверхні зображено на рис. 1.8.2. З рисунка видно, що спектр зовнішнього сонячного випромінювання нагадує спектр випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі 6000 К з максимумом близько 0,5 мкм; після проходження крізь земну атмосферу сонячне випромінювання істотно поглинається на певних довжинах хвиль (озоном у ультрафіолетовій області спектра, водяною парою та двоокисом вуглецю — в інфрачервоній). На зміну характеру сонячного спектра впливають також процеси розсіювання світла малими за розмірами молекулами повітря (розсіювання Релея) та великими частинками пилу, диму та аерозолів (розсіювання Мі). Крім того, на характер спектра сонячного випромінювання впливають висота стояння Сонця, хмарність неба, склад атмосфери. Спектри сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні, відбивається від неї та хмар, наведено на рис. 1.8.3.

Сонячне випромінювання розподіляється таким чином: близько 17% поглинається хмарами, водяною парою, двоокисом вуглецю, що сприяє безпосередньому нагріванню

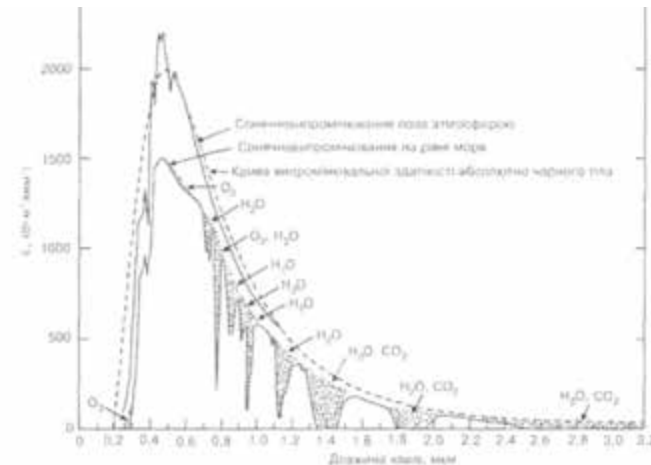


Рис. 1.8.2. Спектри сонячного випромінювання поза атмосферою та на земній поверхні

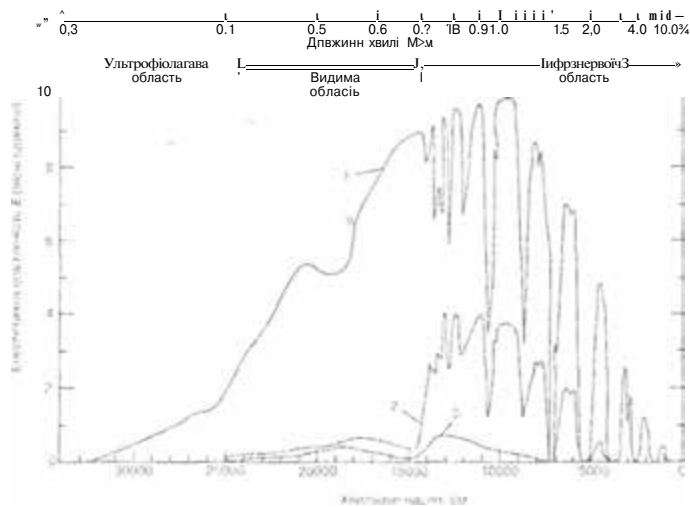


Рис. 1.8.3. Спектри сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні (1); відбивається від неї (2) та від хмар (3)

атмосфери; близько 30% відбивається від хмар, атмосферних газів та частинок; близько 53% досягає земної поверхні: дві третини у вигляді прямого сонячного світла, одна третина у вигляді розсіяного світла.

Випромінювальні властивості Сонця описуються рівнянням:

$$E_{C\downarrow} = E_C \cos\theta + E_{д\downarrow}, \quad (1.8.20)$$

де $E_{C\downarrow}$ — сумарна енергетична освітленість сонячним випромінюванням земної поверхні, $E_C \cos\theta$ — енергетична освітленість земної поверхні прямим сонячним випромінюванням, а $E_{д\downarrow}$ — дифузним сонячним випромінюванням.

Середні значення сумарної енергетичної освітленості та за рахунок дифузного сонячного випромінювання становлять: $E_{C\downarrow} = 900 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; $E_{д\downarrow} = 200 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (чисте небо); $E_{C\downarrow} = 800 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; $E_{д\downarrow} = 350 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (небо наполовину вкрито купчастими хмарами); $E_{C\downarrow} = E_{д\downarrow} = 300 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (небо повністю вкрито хмарами). Сонце характеризується постійністю своїх випромінювальних властивостей. Отже, можна казати про сонячну сталу ($1368 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) — інтенсивність

сонячного випромінювання, то досягає земної поверхні. З врахуванням загальної площі земної поверхні середня інтенсивність сонячного випромінювання дорівнює $342 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. В Україні інтенсивність сонячного випромінювання варіює від $115+145 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ на Поліссі до $185+215 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ у Криму.

Атмосферне випромінювання

На земну поверхню діє довгохвильове випромінювання атмосфери, за яке відповідає насамперед водяна пара, зокрема двоокис вуглецю та озон. Ці компоненти поглинають та випромінюють в області: вода — $5+7 \text{ мкм}$, а також на довжинах хвиль, що перевищують 17 мкм ; двоокис вуглецю — близько $4,5 \text{ мкм}$ та на довжинах хвиль, більших ніж $13,5 \text{ мкм}$; озон — близько $9,6 \text{ мкм}$. Крім того, атмосферні аерозолі беруть участь у тепловому випромінюванні. Загалом, спектр випромінювання атмосфери займає область $5+100 \text{ мкм}$; енергетична світність атмосфери визначається за виразом:

$$M_A \uparrow = \sigma T_A^4, \quad (1.8.21)$$

де σ — 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 можна розглядати в інтервалі звичайних температур як сірі тіла, що характеризуються випромінювальною здатністю ϵ . Енергетична світність сірого тіла визначається як $M = \epsilon \sigma T^4$. Для оцінки випромінювальної здатності погідного неба зручно використовувати емпіричні формули; перша з них має вигляд:

$$\epsilon_n = 1,72(e/T_n)^{1/7}, \quad (1.8.22)$$

де e — пружність водяної пари (кПа) на рівні одного-двох метрів, T_n — температура повітря (К).

Справді, атмосферне теплове випромінювання залежить від концентрації водяної пари в межах перших кількох кілометрів, особливо перших сотен метрів. Інша формула ґрунтується на використанні кореляції між пружністю водяної пари та температурою:

$$\epsilon_n = 9,2 \cdot 10^{-6} T_n^2. \quad (1.8.23)$$

Випромінювальна здатність хмарного неба оцінюється за виразом:

$$\varepsilon_x = (1 - 0,84c)\varepsilon_n + 0,84c, \quad (1.8.24)$$

де c — частка неба, вкритого хмарами.

Коли $c = 0$ (погідне небо), то $\varepsilon_x = \varepsilon_n$; коли $c = 1$ (небо, повністю вкрите хмарами), $\varepsilon_x = 0,84 + 0,16\varepsilon_n$.

Завдяки енергетичній світності атмосфери земна поверхня освітлюється; енергетична освітленість земної поверхні дорівнює енергетичній світності атмосфери ($E_{Ad} = M_A \uparrow$). Середні значення $M_A \uparrow$: 170 Вт · м⁻² (чисте небо, сухе повітря); 310 Вт · м⁻² (чисте небо, вологе повітря); 380 Вт · м⁻² (небо наполовину вкрите купчастими хмарами); 380 Вт · м⁻² (небо повністю вкрите хмарами). Слід зазначити, що атмосферне випромінювання спрямоване як до земної поверхні, так і вгору.

Приклад

Визначити енергетичну світність погідного неба, якщо температура повітря дорівнює 20 °С.

Розв'язок

Використовуючи закон Стефана-Больцмана (1.8.17), знайдемо енергетичну світність чорного тіла:

$$M_c = \sigma T^4 = 5,670 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^4 [(20 + 273,16)\text{К}]^4 = 419 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2.$$

Визначимо випромінювальну здатність погідного неба за допомогою рівняння (1.8.23):

$$\varepsilon_n = 9,2 \cdot 10^6 T_n^2 = 9,2 \cdot 10^6 (20 + 273,16)^2 = 0,79.$$

Звідси енергетична світність погідного неба дорівнює:

$$M = \varepsilon \sigma T^4 = 0,79 \cdot 419 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 = 331 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2.$$

Контрольне завдання

Визначити енергетичну світність захмареного неба, якщо температура повітря дорівнює 20 °С.

Відповідь: 406 Вт · м⁻².

Випромінювання земної поверхні

Енергетична світність земної поверхні визначається за виразом:

$$M_3 \uparrow = \varepsilon \sigma T_3^4, \quad (1.8.25)$$

де ε — випромінювальна здатність земної поверхні (табл. 1.8.3).

1.8.3. Значення альбедо та випромінювальної здатності в природних поверхнях

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

Земна поверхня діє як сіре тіло з температурою 288 К. Спектральна область випромінювання — 4–50 мкм з максимумом 10 мкм (рис. 1.8.4). 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 здатне проходити в космос. Так, для випромінювальної здатності земної поверхні $\varepsilon = 0,95$ та температури 288 К енергетична світність земної поверхні $M_3 = 371 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$.

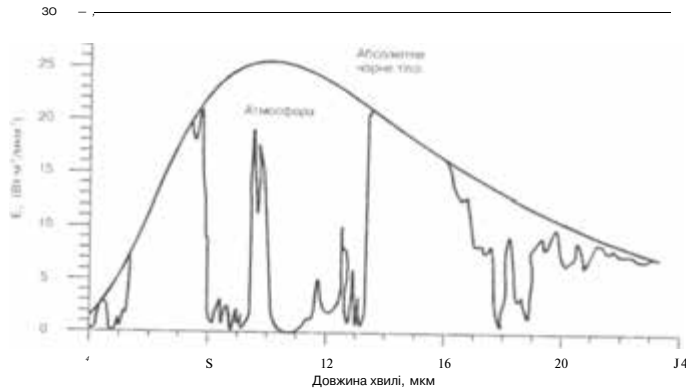


Рис. 1.8.4. Спектр випромінювання Землі

Приклад

Визначити енергетичну світність вологого ґрунту, якщо температура повітря дорівнює 20 °С.

Розв'язок

Використовуємо дані табл. 1.8.3 ($\varepsilon = 0,97$ для вологого ґрунту) та формулу (1.8.25), знаходимо енергетичну світність вологого ґрунту:

$$M_3 \uparrow = \varepsilon \sigma T_3^4 = 0,97 \cdot 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^4 \cdot [(20 + 273,16) \text{ К}]^4 = 406 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2.$$

Контрольне завдання

Визначити температуру сухого ґрунту, якщо енергетична світність дорівнює 371 Вт · м².

Відповідь: 14,84 °С.

Випромінювальний баланс земної поверхні

Сумарне випромінювання визначається обміном коротко- та довгохвильового випромінювання на рівні земної поверхні. В сумарній енергетичній освітленості земної поверхні бере участь Сонце (E_{C1}) й атмосфера (E_{A1}). З урахуванням альbedo — частки відбитого випромінювання, сумарна енергетична освітленість земної поверхні становить:

$$E_{\Sigma} = E_{C1} - a E_{C1} + E_{A1} = (1 - a) E_{C1} + E_{A1}, \quad (1.8.26)$$

де a — альbedo.

Значення альbedo a та випромінювальної здатності ε наведено в табл. 1.8.3. Приклад процесу теплового балансу протягом доби подано на рис. 1.8.5.

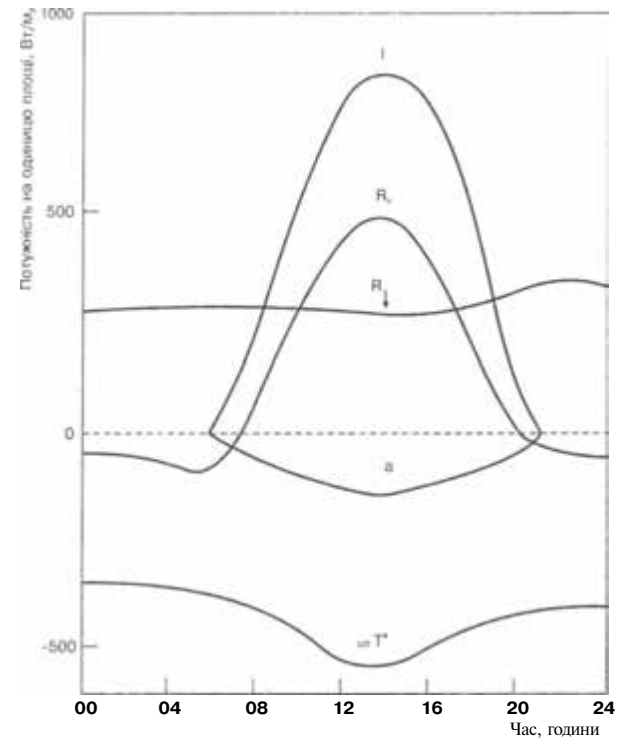


Рис. 1.8.5. Процес теплового балансу трав'яної поверхні протягом доби (R_n — сумарне випромінювання)

Визначаємо сумарну енергетичну світність земної поверхні:

$$M_{3\text{с}} = \varepsilon\sigma(T_3^4 - T_A^4), \quad (1.8.27)$$

де T_3 і T_A — температури земної поверхні та атмосфери відповідно.

Отже, рівняння випромінювального балансу земної поверхні має вигляд:

$$E_{\text{с}} = (1 - a) E_{\text{с}\downarrow} + E_{\text{А}\downarrow} - \varepsilon\sigma(T_3^4 - T_A^4). \quad (1.8.28)$$

Приклад

Визначити сумарне випромінювання земної поверхні за такими умовами: $E_{\text{с}\downarrow} = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, $a = 0,20$, $E_{\text{А}\downarrow} = 250 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, $T_3 = 300 \text{ К}$, $T_A = 271,16 \text{ К}$, $\varepsilon = 0,95$.

Розв'язок

Використовуючи рівняння випромінювального балансу земної поверхні, отримуємо:

$$\begin{aligned} ES &= (1 - a) E_{\text{с}\downarrow} + E_{\text{А}\downarrow} - \varepsilon\sigma(T_3^4 - T_A^4) = \\ &= (1 - 0,20) 1000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} + 250 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} - \\ &- 0,95 \cdot 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^4 \cdot (300^4 - 271,16^4) = \\ &= 905 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \end{aligned}$$

Методи вимірювання природних випромінювань

Класифікація радіометрів

Прилади, призначені для вимірювання природних випромінювань, називають *радіометрами*. Сенсори радіометрів можна поділити на два типи: теплові й квантові детектори.

Теплові детектори. В основі дії сенсорів цього типу лежить поглинання випромінювання та його перетворення на теплову енергію такої форми, яку можна вимірювати. До основних типів теплових детекторів відносять *калориметри*, в яких реєструються зміни температури матеріалу детектора; *термометри* та *термобатареї*, в яких реєструється електрорушійна сила (напруга) в електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників, контакти яких мають різну температуру; *болонметри*, 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.

Радіометри з тепловими детекторами класифікуються так:

піргеліометри — прилади для вимірювання прямого сонячного випромінювання за нормального падіння;

піранометри — прилади для вимірювання сонячного випромінювання, що надходять з цілої півсфери (кут зору 2π ер); *піргеометри* — прилади для вимірювання низхідного (атмосферного) або висхідного (земної поверхні) довгохвильового випромінювання в межах цілої півсфери;

піррадiометри — прилади для вимірювання сумарного випромінювання (коротко- та довгохвильового), що проходить крізь горизонтальну площину.

Квантові детектори. Ці сенсори ґрунтуються на поглинанні енергії фотона, звільненні електронів та утворенні електричного струму. Кінцевим параметром, що реєструється, може бути напруга, зміна швидкості посилення 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 за зовнішнього {*фотоелектронні помножувачі*) або внутрішнього (*фотодіоди*) фото ефекту; *фотопровідні детектори*, які 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 встановлено 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 дає змогу оцінити швидкість теплового потоку і, таким чином, поглинуту сонячну енергію. Зовнішній вигляд піргеліометра наведено на рис. 1.8.6. Піргеліометри такого типу використовують як первинні стандарти для вимірювання сонячного випромінювання, оскільки вони мають високу стабільність і відтворюваність результатів; точність вимірювань може досягати $+0,2\%$. Модифікації приладів передбачають застосування термопар або термопарей як детекторів; схему такого піргеліометра наведено на рис. 1.8.7. Точність цих приладів становить $\pm 0,4+0,5\%$, що зумовлює 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 непростою операцією, яка разом з процедурою калібрування приладу ускладнює технологію вимірювань.

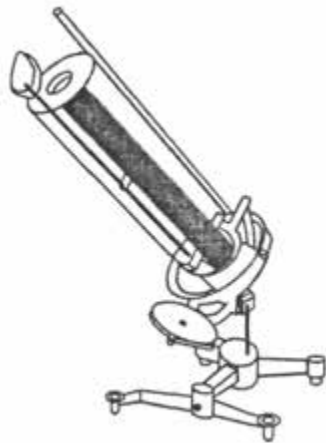


Рис. 1.8.6. Зовнішній вигляд піргеліометра



Рис. 1.8.7. Конструкція піргеліометра

Вимірювання сумарного випромінювання

Для вимірювання сонячного випромінювання, що потрапляє на горизонтальну поверхню з цілої півсфери в межах кута 2π ер, 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 поверхнями елементів детектора, розміщених в одній площині.

Принцип дії піранометра першого типу пояснюється на рис. 1.8.8. Основним елементом детектора є сукупність термопар «манганін—константан», з'єднаних у батарею Z-подібного типу (рис. 1.8.8,о). Під впливом оптичного випромінювання на кінцях термопарей виникає електрорушійна сила, що реєструється. Прилад обладнано двома скляними або кварцовими півсферами для запобігання впливу конвекції (що влітку, при температурі $75\text{ }^\circ\text{C}$, може бути істотною), а також для фільтрації випромінювання (рис. 1.8.8,о). Піранометри другого типу містять зіркоподібний детектор, чутливими елементами якого є пофарбовані у чорний та білий колір термопари (рис. 1.8.9,а). Чорні поверхні поглинають сонячне випромінювання більш інтенсивно, ніж білі. Контроль теплообміну між чорними та білими секторами детектора дає змогу оцінити сонячне випромінювання. Прилади обладнано системою температурної стабілізації, оптичної компенсації зміни показань при відхиленнях від закону косинуса, набором широкосмугових спектральних фільтрів. Зовнішній вигляд такого піранометра наведено на рис. 1.8.9,б. Залежно від чутливості піранометри поділяють

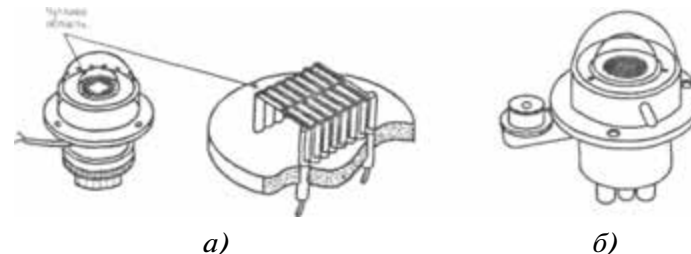


Рис. 1.8.8. а) Застосування термопар у піранометрі; б) зовнішній вигляд піранометра з термопарами

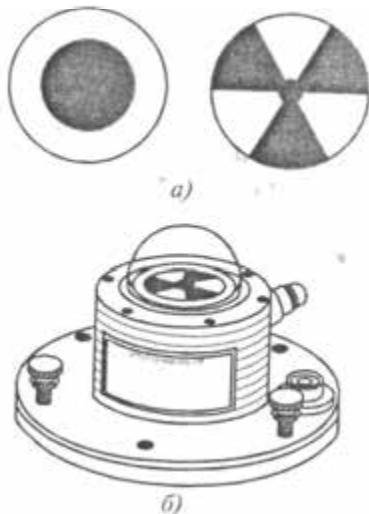


Рис. 1.8.9. а) Детектори піранометра; б) піранометр з чорно-білим детектором

кою лінійністю і дають відлік в абсолютних одиницях. До недоліків відносять невисоку чутливість і велику інерційність. Прилади потребують також частого контролю чистоти поверхні півсфер та якості осушувальної рідини між ними.

Вимірювання сумарного випромінювання можна здійснювати піранометрами, що містять квантові детектори. Класичним прикладом такого детектора є *кремнієвий фотодіод*. Принцип дії цього детектора полягає в перетворенні енергії оптичного вимірювання в електричну завдяки внутрішньому фотоефекту. Перевагами фотодіодів є невисока вартість, стабільність показників та їх слабка залежність від температури. Точність вимірювань піранометрів з квантовими детекторами — $\pm 5\%$.

Вимірювання дифузного сонячного випромінювання

Вимірювання дифузного сонячного випромінювання реалізується за допомогою рухомих дисків або циліндрів, здатних утворити тінь на детекторі піранометра. Ці захисні системи мають рухатися навколо осі, перпендикулярної земній поверхні, для врахування обертання Сонця (рис. 1.8.10).

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 — електронні потенціометри. Крім того, піранометри слід встановлювати на відкритих місцях або платформах. Перевагою термоелектричних приймачів є їх здатність давати відліки в будь-якій ділянці спектра з постійною чутливістю. Прилади характеризуються високою лінійністю і дають відлік в абсолютних одиницях. До недоліків відносять невисоку чутливість і велику інерційність. Прилади потребують також частого контролю чистоти поверхні півсфер та якості осушувальної рідини між ними.

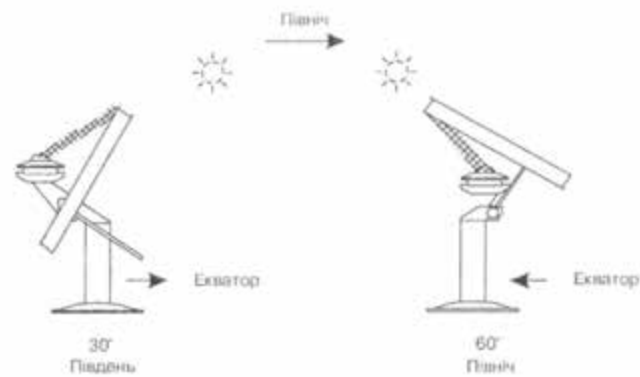


Рис. 1.8.10. Вимірювання дифузного сонячного випромінювання

Вимірювання альbedo

Альbedo є часткою сумарного випромінювання, що відбивається природною поверхнею. Для вимірювання альbedo необхідно два піранометри — один спрямований догори і вимірює сумарне випромінювання, тоді як інший спрямований до земної поверхні для вимірювання відбитого випромінювання. Конструктивно обидва піранометри можуть бути об'єднані на одній механічній оправі (рис. 1.8.11). Така система називається *альбедометром* (або *балансометром*). Детектор цього приладу містить термобатарею. Для запобігання впливу роси й вітру детектор обдувають повітряним потоком за допомогою вентилятора. Звичайно альбедометри розміщують на висоті 1+2 м над землею поверхнею.

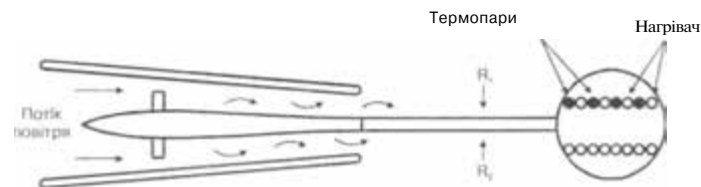


Рис. 1.8.11. Принцип дії альбедометра

Вимірювання довгохвильового випромінювання

Вимірювання довгохвильового випромінювання атмосфери та земної поверхні здійснюють за допомогою *піргеометра*. Це піранометр, в якому скляні півсфери замінено на купол, що виконує функції інфрачервоного фільтра. Спектральна область пропускання цього фільтра — 0,3+100 мкм. Звичайно використовують поліетиленову плівку або інтерференційні фільтри. Термопари приладу не фарбують. Чутливість приладу дорівнює $\pm 10\%$.

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

Фотоелектричні методи. Принцип дії цих приладів полягає в перетворенні енергії оптичного вимірювання на електричну завдяки зовнішньому (*фотоелектронні помножувачі*) або внутрішньому (*фотодіоди*) фотоефекту.

Аудиторні завдання

Визначити повну випромінювальну здатність Сонця і Землі.

Репродуктивний тест

Побудувати графік залежності енергетичної світності земної поверхні від температури, що змінюється від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Альтернативний тест

Чи правильне твердження, що:

1. точність піргеометра становить $\pm 0,4+0,5\%$. Так Ні
2. піргеліометри можуть використовуватися як первинні стандарти для вимірювання сонячного випромінювання. Так Ні

Акордно-вибірковий тест

Знайти правильні відповіді на запитання

«Якими перевагами характеризуються термоелектричні детектори?»

1. слабка залежність від температури;
2. здатність давати відліки в будь-якій ділянці спектра з постійною чутливістю;

3. висока лінійність;
4. проста конструкція;
5. швидкодія;
6. дають відлік в абсолютних одиницях.

Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари «радіометр — тип випромінювання, для вимірювання якого він призначений»

- | | |
|-----------------|---|
| а. піранометр | 1. для вимірювання низхідного (атмосферного) або висхідного (земної поверхні) довгохвильового випромінювання в межах цілої півсфери |
| б. піррадіометр | 2. для вимірювання прямого сонячного випромінювання за нормального падіння |
| в. піргеліометр | 3. для вимірювання сонячного випромінювання, що надходить з цілої півсфери (кут зору 27гер) |
| г. піргеометр | 4. для вимірювання сумарного випромінювання (коротко- та довгохвильового), що проходить крізь горизонтальну площину |

Конструктивний тест

Пояснити механізми впливу вологості повітря на випромінювальні властивості атмосфери.

Домашнє завдання

Використовуючи формулу (1.8.22), оцінити та порівняти випромінювальну здатність погідного неба для: вологого ($\epsilon = 19,8$ гПа) та сухого ($\epsilon = 5,8$ гПа) повітря, температура якого дорівнює $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Як впливає вологість на енергетичну світність неба?

9. ІОНІЗУЮЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Класифікація іонізуючих випромінювань

Іонізуюче випромінювання — це потоки частинок і електромагнітних квантів, взаємодія яких з середовищем зумовлює іонізацію його атомів і молекул. Іонізуюче випромінювання має достатньо енергії для віддалення електронів з орбіт, внаслідок чого атом набуває заряду і стає іонізованим. До іонізуючого випромінювання можна віднести потоки α -частинок, електронів, позитронів, протонів, нейтронів, рентгенівське та γ -випромінювання, космічні промені.

α -частинки — це ядра гелію ${}^4\text{He}$, що містять 2 протони і 2 нейтрони;

β -частинки — електрони й позитрони, що посилаються атомними ядрами під час бета-розпаду;

рентгенівське випромінювання — електромагнітне випромінювання, що займає спектральну область між γ - та ультрафіолетовим випромінюванням у межах довжин хвиль 10^{-10} – 10^{-7} м;

γ -випромінювання — короткохвильове електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі, меншою ніж $2 \cdot 10^{-10}$ м;

космічні промені — потік елементарних частинок високої енергії, переважно протонів, що надходять на Землю ізотропно з усіх напрямків космічного простору, а також вторинне випромінювання, що утворюється за взаємодії протонів з атомними ядрами повітря.

Значення енергії іонізуючих випромінювань наведено в табл. 1.9.1.

1.9.1. Енергія іонізуючих випромінювань

Тип випромінювання	Частота, Гц	Енергія, кДж/моль***
<i>Частинки</i>		
α -частинки		$4,1 \cdot 10^8$
β -частинки		$1,5 \cdot 10^7$
<i>Електромагнітне випромінювання</i>		
Рентгенівське випромінювання	$3 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$
γ -випромінювання	$3 \cdot 10^{20}$	$1,2 \cdot 10^8$
Космічні промені	$6 \cdot 10^{21}$	$2,4 \cdot 10^9$

У 1896 р. французький фізик А. Беккерель відкрив явище радіоактивності — здатності деяких атомних ядер самовільно (спонтанно) перетворюватися на інші ядра з випромінюванням частинок. До радіоактивних перетворень відносять α -розпад (розпад атомних ядер, що супроводжується посиленням α -частинок), всі види β -розпаду (самовільних перетворень нейтрона в протон і протона в нейтрон усередині атомного ядра) і спонтанний поділ ядер (самовільний поділ важких ядер). Радіоактивний розпад часто супроводжується γ -випромінюванням. Розрізняють природну та штучну радіоактивність, між якими немає принципової різниці. Природна радіоактивність утворюється за бомбардування молекул газу в верхніх шарах атмосфери іонізуючим космічним випромінюванням Сонця та за рахунок присутніх у земній корі радіоактивних елементів (уран, актиній, торій, неплутній). Радіоактивні матеріали небажаного характеру, що осідають по площях, обладнанні та персоналї, називають *радіоактивним забрудненням*.

Основними джерелами іонізуючих випромінювань і радіоактивного забруднення біосфери є природна радіоактивність, розробка, добування та збагачування копалин, використання радіоактивної сировини в реакторах, переробка ядерного палива в установках, випробування та експлуатація ядерної зброї, захоронення відпрацьованого палива й радіоактивних відходів, тероризм.

Закон радіоактивного розпаду

Самовільний розпад атомних ядер підпорядковується закону радіоактивного розпаду: для великої кількості ядер число актів розпаду за одиницю часу (швидкість розпаду) пропорційне вихідній кількості ядер N_0 :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (1.9.1)$$

Це рівняння виражає диференціальну форму закону радіоактивного розпаду; інтегральна форма цього закону має вигляд:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.9.2)$$

де N_0 — кількість радіоактивних ядер у момент часу $t = 0$; N — кількість ядер у момент часу t ; λ — стала розпаду (с^{-1}).

Швидкість радіоактивного розпаду називають *абсолютною активністю* a :

$$a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (1.9.3)$$

Одиницею радіоактивності є *бекерель* (Бк), що відповідає одному розпаду за секунду ($1\text{Бк} = \text{с}^{-1}$); на практиці використовують кюрі (Ки) — абсолютна активність такого препарату, в якому відбувається $3,7 \cdot 10^{10}$ розпадів за секунду ($1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{Бк}$).

Проміжок часу, за який відбувається розпад половини радіоактивних ядер елемента, називають *періодом піврозпаду* $T_{1/2}$:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad (1.9.4)$$

звідки

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (1.9.5)$$

Наприклад, період піврозпаду $T_{1/2}$ для: радіоактивного ізотопу вуглецю ^{14}C — 5730 років, радію ^{226}Ra — $1,6 \cdot 10^3$ років; йоду ^{131}I — 8,04 днів.

Приклад

Період піврозпаду ізотопу ^{226}Ra становить $1,6 \cdot 10^3$ років. Визначити активність зразка, що містить $3 \cdot 10^{16}$ ядер радію, в даний момент.

Розв'язок

Використовуючи рівняння (1.9.5), знаходимо величину періоду піврозпаду:

$$T_{1/2} = 1,6 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^6 \text{ с} = 5,0 \cdot 10^{10} \text{ с}.$$

Звідси

$$\lambda = 0,693/T_{1/2} = 0,693/5,0 \cdot 10^{10} \text{ с} = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}.$$

Активність зразка в даний момент часу ($t = 0$) обчислимо за виразом:

$$\begin{aligned} a &= \lambda N_0 = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1} \cdot 3 \cdot 10^{16} = 4,1 \cdot 10^5 \text{ Бк} = \\ &= 4,1 \cdot 10^5 / 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Ки} = 11,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ки} = 11,1 \text{ мКи}. \end{aligned}$$

Контрольне завдання

Чому дорівнює активність 1 кг ізотопу ^{226}Ra , якщо період піврозпаду — 1600 років?

Відповідь: $3,62 \cdot 10^{13}$ Бк.

Дозиметрія іонізуючих випромінювань

Вимірювання характеристик іонізуючих випромінювань під час їх взаємодії з середовищем, від яких залежать радіаційні ефекти в об'єктах живої та неживої природи, що опромінюються, становить суть *дозиметрії*.

Доза — це енергія іонізуючого випромінювання, яка поглинається речовиною, що опромінюється. Доза залежить від типу випромінювання, його інтенсивності, тривалості опромінювання та складу речовини, що опромінюється. Розрізняють такі дози:

Поглинута доза — це розрахована на одиницю маси речовини, що опромінюється, поглинута енергія випромінювання:

$$D_n = \frac{dE}{dm}, \quad (1.9.6)$$

де dE — середня поглинута енергія, dm — маса речовини.

Одиниці поглинутої дози: 1 Гр = 1 Дж/1 кг; 1 рад = 10^{-2} Гр. (Термін «рад» походить від англійської фрази «Radiation Absorbed Dose»).

Приріст поглинутої дози за одиницю часу називають *потужністю поглинутої дози*:

$$P_n = \frac{dD_n}{dt}. \quad (1.9.7)$$

Одиниця випромінювання поглинутої дози — Гр \cdot с $^{-1}$, рад \cdot с $^{-1}$.

Експозиційна доза визначається як відношення сумарного заряду всіх іонів одного знака, утворених у повітрі вторинними частинками (електронами й позитронами, що утворюються в елементарному об'ємі під час їх повного гальмування) до маси повітря в цьому об'ємі:

$$X = \frac{dQ}{dm}. \quad (1.9.8)$$

де dQ — сумарний заряд всіх іонів одного знака, dm — маса повітря.

Одиниці експозиційної дози: 1 Кл \cdot кг $^{-1}$; позасистемна одиниця — *реентген*: 1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл \cdot кг $^{-1}$ або 1 Кл \cdot кг $^{-1}$ = $3,88 \cdot 10^{-3}$ Р. Доза в 1 Р відповідає утворенню $2,08 \cdot 10^{-4}$ пар іонів в 1 см 3 повітря при 0 °С та 760 мм рт. ст.

Приріст експозиційної дози за одиницю часу називають потужністю експозиційної дози:

$$P_e = \frac{dD_e}{dt}. \quad (1.9.9)$$

Одиниця випромінювання потужності експозиційної дози — Кл · кг⁻¹ · с⁻¹.

Еквівалентна доза — це поглинута енергія випромінювання, біологічно еквівалентна одному рентгену. Під час опромінювання живих організмів, зокрема людини, можуть виникати несприятливі наслідки, що визначають рівень радіаційної безпеки. Біологічні ефекти залежать не тільки від дози, але й від типу іонізуючого випромінювання. Наприклад, при однаковій дозі α-частинки призводять до біологічних руйнувань в десятки разів менших, ніж при дії рентгенівського випромінювання. Таким чином, знання поглинутої дози недостатньо для оцінки радіаційно-індукованого ефекту. Біологічні ефекти, зумовлені будь-яким іонізаційним випромінюванням, прийнято порівнювати з біологічними ефектами, що виникають під впливом рентгенівського випромінювання з граничною енергією 250 кеВ. Це порівняння здійснюється за допомогою *коефіцієнта якості випромінювання k*, що визначається як кількість рад рентгенівського або γ-випромінювання і викликає такі самі біологічні пошкодження, як і 1 рад даного іонізуючого випромінювання. Для рентгенівського і γ-випромінювання $k = 1,0$, α-частинок — 20, β-частинок і електронів — 1,0, нейтронів — 10, важких іонів — 20.

Одиниці еквівалентної дози — *зіверт*: 1Зв = 1Дж/кг; 1Зв = 100 бер.

Добуток поглинутої дози в радах на величину k , а саме $D(рем) = D(рад) \cdot k$ отримав назву рем (від англійської фрази «Radiation Equivalent in Man»).

Поглинання іонізуючого випромінювання

Поглинання іонізуючого випромінювання зразком товщиною x визначають за виразом:

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \quad (1.9.10)$$

де I — інтенсивність випромінювання, що пройшло зразок, I_0 — інтенсивність випромінювання, що падає на зразок, μ — коефіцієнт поглинання.

Слід зазначити, що коефіцієнт поглинання $\mu = 1/d$, де d — глибина проникання, тобто така товщина, яка зменшує інтенсивність випромінювання в e разів (37%).

Зменшення інтенсивності часто характеризується напівтовщиною D , що зменшує інтенсивність випромінювання вдвоє:

$$D = \ln 2 / \mu. \quad (1.9.11)$$

Тоді закон поглинання іонізуючого випромінювання запишеться так:

$$I = I_0 \exp[-(\ln 2 / \mu)x] \quad (1.9.12)$$

або

$$I = I_0 2^{-x/D}. \quad (1.9.13)$$

Приклад

Свинцева пластина товщиною 0,9 см зменшує інтенсивність γ-випромінювання ізотопу ¹³⁷Cs на 65 %. Густина свинцю дорівнює 11,3 г · см⁻³. Визначити напівтовщину поглинача, коефіцієнт поглинання та глибину проникання випромінювання.

Розв'язок

Використовуємо рівняння (1.9.10) з урахуванням умови завдання:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) = 0,35.$$

Звідси

$$\ln 0,35 = -\mu x = -\mu \cdot 0,9 \text{ см}.$$

Обчислюємо коефіцієнт поглинання:

$$m = -\ln 0,35 / 0,9 \text{ см} = 1,0498 / 0,9 = 1,166 \text{ см}^{-1}.$$

Напівтовщину поглинача знайдемо за допомогою виразу (1.9.11):

$$D = \ln 2 / \mu = 0,693 / 1,166 \text{ см}^{-1} = 0,594 \text{ см}.$$

Знаходимо глибину проникання:

$$d = 1 / \mu = 1 / 1,166 \text{ см}^{-1} = 0,858 \text{ см}.$$

Контрольне завдання

Напівтовщина свинцевого поглинача дорівнює 6 мм. Якої товщини треба надати поглиначу, щоб зменшити інтенсивність γ-випромінювання ізотопу ¹³⁷Cs у десять разів?

Відповідь: 20 мм.

Радіоактивні забруднення

З точки зору екології найбільш небезпечними є радіоактивні елементи з періодом піврозпаду від кількох тижнів до кількох років. Це, наприклад, стронцій ^{90}Sr , що накопичується в кісткових тканинах (28 років), і цезій ^{137}Cs (32 роки). Крім того, небезпечними є ізотопи простих елементів, що входять до складу живої речовини — ^{14}C , ^{32}P , ^{45}Ca , ^{35}S . Небезпечні є радіоактивні опади, що виникають внаслідок випробування ядерної зброї. Радіоактивні домішки розсіюються в атмосфері, а далі через ґрунт і воду потрапляють у біомасу. Джерелом радіоактивного забруднення є атомна промисловість. Забруднення може відбуватися під час видобування й збагачення коналін, використання сировини в реакторах, обробки ядерного палива в установках. Нажзвичайно гострою для навколишнього середовища є проблема утилізації радіоактивних відходів.

Радіоактивні відходи

Всі ядерні реактори використовують уранове паливо. Уран виділяють з руди і очищають за допомогою хімічних процесів. Природний уран складається з 0,72% урану-235 і 99,2% урану-238. Такий уран використовують в реакторах з важкою водою. Для роботи реакторів з легкою водою потрібен уран-235, концентрація якого збільшується в 4-5 разів на збагачувальних підприємствах. Уранове паливо виготовляють у вигляді стрижнів, які занурюють у реактор, де вони залишаються близько двох років. За цей час стрижні стають вкрай радіоактивними внаслідок процесу розпаду та утворення трансуранових елементів — плутонію, америцію, кюрію. Після того, як стрижні виймають з реактора, їх охолоджують протягом одного-двох років у спеціальних басейнах і транспортують у підземне сховище.

Вимірювання іонізуючих випромінювань

Основні методи вимірювання іонізуючих випромінювань ґрунтуються на: збиранні і реєстрації електронів та іонів, що вивільнюються в процесі іонізації; обстеженні флуоресценції

речовини, що поглинає іонізуюче випромінювання; використанні та аналізі хімічних реакцій, що викликаються іонізуючим випромінюванням; вимірюванні тепла, яке утворюється за поглинання іонізуючого випромінювання. Серед параметрів іонізуючого випромінювання, що реєструються, слід виділити тип випромінювання, енергію квантів або частинок, величину потоку або швидкості зміни потоку квантів або частинок, часовий або просторовий розподіл іонізуючого випромінювання. Розглянемо основні методи вимірювання іонізуючих випромінювань.

Заповнені газом детектори. В основі роботи детекторів цього типу лежить прикладання напруги до просторово розділених електродів, розташованих у камері, заповненій слабо іонізованим газом. Позитивні іони та електрони, що утворюються в камері, збираються на електродах і спричиняють появу електричного струму або імпульсів. Кількість пар «іон—електрон» прямо пропорційна енергії випромінювання. Серед основних типів заповнених газом детекторів можна виділити іонізаційну камеру, пропорційні лічильники та лічильник Гейгера-Мюллера. Різниця між цими детекторами пояснюється на рис. 1.9.1, на якому наведено залежність іонів, що збираються на електродах, від прикладеної напруги. Ця напруга викликає конкуренцію між втратою іонних пар за рекомбінації та їх збиранням

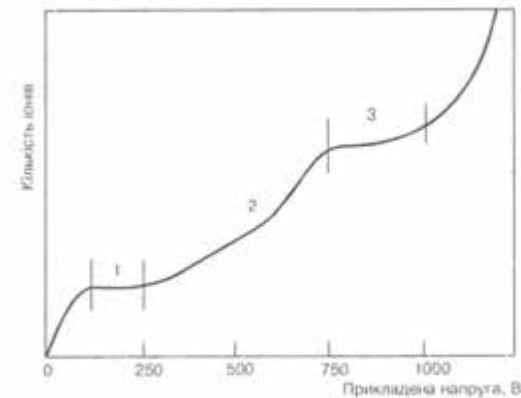


рис. 1.9.1. Области Оп заповнених газом детекторів:
1 — іонізаційна камера, 2 — пропорційний лічильник,
3 — лічильник Гейгера-Мюллера

на електродах. Збільшення напруги (область 1) приводить до збільшення швидкості руху іонів, зменшення часу, потрібного на рекомбінацію, через що заряд на електродах є пропорційним кількості іонних пар, що утворюються в міжелектродному просторі. За цим принципом працює іонізаційна камера. Подальше збільшення напруги супроводжується тим, що електрони, які утворюються за первинних іонізаційних процесів, беруть участь у додатковій іонізації. Заряд на електродах у даній ситуації прямо пропорційний прикладеній напрузі (область 2). Використання цієї залежності лежить в основі пропорційного лічильника. Подальше збільшення напруги дає змогу отримати ситуацію, коли заряд на електродах не залежить від прикладеної до них напруги (область 3). Ця ситуація реалізується в лічильниках Гейгера-Мюллера.

Іонізаційна камера — детектор, дія якого ґрунтується на здатності заряджених частинок викликати іонізацію газу. Принциповою перевагою детектора цього типу є можливість отримання безпосередньої інформації щодо експозиційної або поглинутої дози. Справді, оскільки рентген є одиницею експозиційної дози і відповідає кількості зарядів, що утворюється іонізуючим випромінюванням в 1 см³ повітря за нормальних умов, саме іонізаційна камера дає змогу оцінювати іонізуюче випромінювання в цих одиницях. Зовнішній вигляд камери наведено на рис. 1.9.2. Утворення кожної іонної пари супроводжується втратою енергії близько 34 еВ (1 еВ = 1,6 · 10¹⁹ Кл). Якщо припустити, що іонізуючі частинки проходять через камеру зі швидкістю N (с⁻¹) і кожна з них втрачає енергію E (МеВ), то величину заряду, що збирається на електродах за одиницю часу, можна визначити за виразом:

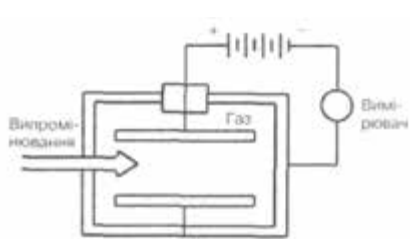


Рис. 1.9.2. Іонізаційна камера

$$Q(\text{Кл} \cdot \text{с}^{-1}) = NEe \cdot 10^6/34, \quad (1.9.14)$$

Прикладання напруги величиною кількасот вольт дає можливість збирати на електродах всі електрони й позитивні іони.

Пропорційний лічильник утворює сигнал, амплітуда якого пропорційна енергії, що виділяється в його об'ємі частинкою, що реєструється. Конструкція детектора (рис. 1.9.3) передбачає наявність центрального електрода, до якого прямують електрони, що вивільнюються завдяки іонізації. Напруженість поля E , що утворюється на відстані r від електрода, дорівнює:

$$E = U/[r \ln(d_1/d_2)], \quad (1.9.15)$$

де U — прикладена напруга (В), d_1 — діаметр лічильника, d_2 — діаметр центрального електрода.

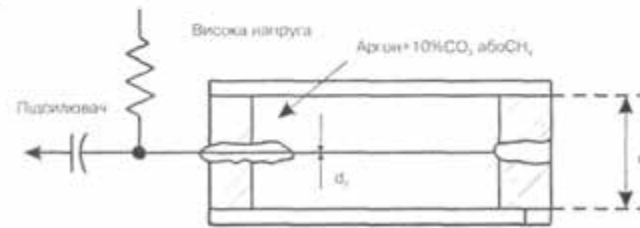


Рис. 1.9.3. Пропорційний лічильник

Видно, що поблизу електрода напруженість електричного поля настільки велика, що первинні електрони набувають енергії, достатньої для вторинної іонізації. Внаслідок цього на центральний електрод надходить лавина електронів. Відношення повної кількості зібраних на електроді електронів до їх первинної кількості називають коефіцієнтом газового підсилення; величина його може сягати 10²-10⁴.

Лічильник Гейгера-Мюллера — газорозрядний детектор, що працює при проходженні через нього заряджених частинок. Робочий об'єм лічильника наведено на рис. 1.9.4. До

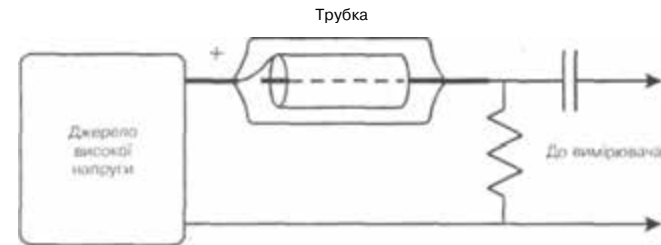


Рис. 1.9.4. Лічильник Гейгера-Мюллера

електродів прикладають напругу величиною кількисот вольт. За проходження іонізуючої частинки в газі утворюються вільні електрони, що рухаються до центрального електрода. Поблизу електрода напруженість електричного поля збільшується, електрони прискорюються настільки, що починають в свою чергу іонізувати газ. Виникає коронний розряд, що поширюється вздовж електрода. В зовнішньому ланцюзі утворюються електричні імпульси, що відповідають спалахам розряду. Кількість цих імпульсів за одиницю часу дорівнює кількості іонізуючих частинок.

Сцинтиляційний лічильник — детектор, основними елементами якого є речовина, що люмінесцює під впливом заряджених частинок, та фотоелектронний помножувач. Заряджена частинка проходить крізь речовину, викликаючи не лише іонізацію атомів і молекул, а й їх збудження. Перехід атомів і молекул із збудженого стану в основний супроводжується випромінюванням кванта видимого або ультрафіолетового діапазону. Кожний такий світловий спалах, що називають *сцинтиляцією*, реєструється фотоелектронним помножувачем, електричні імпульси з виходу якого подаються на систему реєстрації. Типовими матеріалами для сцинтиляційних лічильників є кристали $ZnS(Ag)$, $NaI(Tl)$, $CsI(Tl)$ (у дужках указано активатор, що викликає сцинтиляції в кристалі), кадмієві та кальцієві солі вольфрамової кислоти, галіди літію, а також органічні сцинтилятори — антрацен $C_{14}H_{10}$, стильбен $C_{12}H_{12}$, розчини толуену, ксілену, фенілциклогексану.

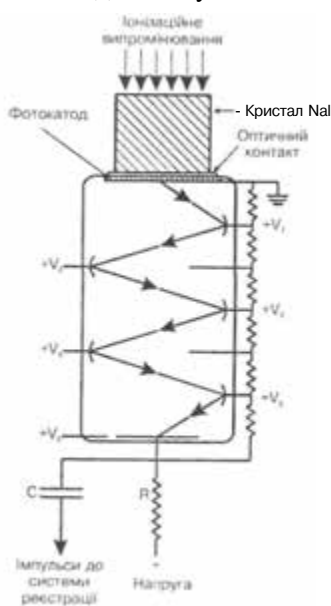


Рис. 1.9.5. Сцинтиляційний лічильник

тину робочої речовини), особливо до у-випромінювання, швидкодія та здатність визначати енергію частинки або кванта випромінювання.

Напівпровідниковий лічильник — в основі лежить іонізація атомів твердого тіла, за якої утворюються вільні електрони в зоні провідності і дірки у валентній зоні. Частинка, що проникає в кристал, генерує в ньому додаткові електронно-діркові пари. Носії заряду (електрони і дірки) під впливом прикладеного електричного поля переміщуються до електродів, завдяки чому в електричному ланцюзі утворюється електричний імпульс, який підсилюється і реєструється. Ширина забороненої зони — 2+3 eV ($1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж); отже і енергія, необхідна для утворення пари електрон—дірка, є величиною такого ж порядку (нагадаємо, що в газових іонізаційних камерах для утворення пари іонів потрібна енергія 34 eV (для повітря)). Таким чином, напівпровідникові лічильники на порядок чутливіші, ніж газові. Типовими матеріалами напівпровідникових лічильників є германій, кремній, $CdTe$, Hgl .

Термолюмінесцентні детектори використовують процес люмінесценції при нагріванні речовини, що попередньо збуджується випромінюванням. Під час нагрівання речовини електрони, що захоплюються уловлювачами, вивільнюються і переходять на рівні з меншою енергією, посиляючи квант світла. Складаються термолюмінесцентні детектори з камери, зв'язаної з системою нагрівання, фотоелектронним помножувачем, підсилювачем та термопарою для вимірювання температури.

Трекові детектори — в основі роботи лежить іонізація атомів або молекул речовини; іони, що утворюються, реєструють завдяки конденсації пересиченої пари (*камера Вільсона*), пароутворенню перегрітої рідини (*бульбашкова камера*), утворенню розрядів у газах (*іскрова камера*).

Фотографічне детектування ґрунтується на використанні плівок, в яких шар емульсії (бромисте срібло на желатиновій основі) має в десятки разів більшу товщину, ніж у звичайних фотоплішках, що підвищує ефективність взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною. Механізм цієї взаємодії полягає в поглинанні іонізуючого випромінювання речовиною за фотоелектричного процесу, завдяки якому енергія



Рис. 1.9.6. Оцінка почорніння плівки за допомогою денситометра

$$D = \lg(i/I), \quad (1.9.16)$$

де D — густина срібла на плівці, i_0 — інтенсивність випромінювання, що падає на плівку, i — інтенсивність випромінювання, що пройшло через плівку. Величина $D = 2$ відповідає затемненій плівці, через плівку з $D = 1$ можна читати текст.

Принципи у-спектроскопії

Оскільки γ -випромінювання — це електромагнітне випромінювання з дуже короткими ($< 2 \cdot 10^{-10}$ м) хвилями, на перший план виступають корпускулярні властивості. Розглянемо основні процеси, що відбуваються під час взаємодії γ -випромінювання з речовиною.

Фотоелектричне поглинання супроводжується перенесенням всієї енергії γ -випромінювання на внутрішні електронні орбіти атома, внаслідок чого електрон залишає атом, а



Рис. 1.9.7. Фотоелектричне поглинання

випромінювання передається електрону. Цей електрон іонізації утворює інші вільні електрони, що взаємодіють з позитивними іонами срібла і змінюють їх розподіл на плівці. Рівень потемніння плівки оцінюється за допомогою денситометра (рис. 1.9.6) за виразом:

кванта рентгенівського випромінювання. Цей квант називають *характеристичним*, оскільки він характеризує речовину, що поглинає γ -випромінювання. Фотоелектричний ефект відбувається при дії зовсім малих (десятки кеВ) енергій.

Комптонівський ефект полягає в пружному розсіюванні квантів рентгенівського або γ -випромінювання на вільних або зовнішніх, слабо пов'язаних з атомом електронах. У цьому разі квант передає частину своєї енергії електрону і змінює напрямок руху, тобто розсіюється (рис. 1.9.8); зменшення енергії означає збільшення довжини хвилі розсіяного випромінювання. Сумісне рішення рівнянь, що виражають закони збереження енергії та імпульсу під час комптонівського ефекту, дають рівняння для зсуву довжини хвилі {формулу Комптона):

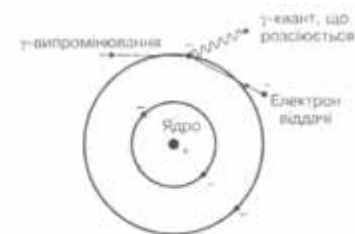


Рис. 1.9.8. Комптонівський ефект

$$\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda = \lambda_0(1 - \cos\theta), \quad (1.9.17)$$

де λ_p — довжина розсіяного випромінювання, λ — довжина падаючого випромінювання, $\lambda_0 = h/m_0c$ — комптонівська довжина хвилі електрона, m_0 — маса спокою електрона, θ — кут розсіювання.

Утворення пар — процес, що відбувається за достатньо високих рівнів енергії, при яких γ -квант поглинається атомним ядром речовини. За цього поглинання утворюється пара «електрон—позитрон» (рис. 1.9.9). Це той самий випадок, коли енергія перетворюється на масу. Для утворення пари (згідно з співвідношенням $E = mc^2$) необхідна енергія 1,022 МеВ. Позитрон живе недовго, оскільки при зустрічі з електроном він поглинається останнім, посилаючи два кванти з енергією 0,51 МеВ.

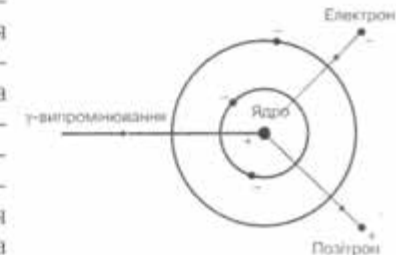


Рис. 1.9.9. Утворення пар

Акордно-вибірковий тест

Знайти правильні відповіді на запитання

«Який максимум в енергетичному спектрі відповідає фотоелектричному поглинанню?»

- 1) 0,51 MeB; 2) 1,33 MeB; 3) 0,88 MeB; 4) 1,15 MeB

Парно-вибірковий тест

Знайти відповідні пари «заповнений газом детектор — прикладання напруги до електродів детектора викликає такі ефекти»

- | | |
|------------------------------|---|
| а. лічильник Гейгера-Мюллера | 1. вторинну іонізацію та лавину електронів |
| б. іонізаційна камера | 2. утворення вільних електронів та виникнення коронного розряду |
| в. пропорційний лічильник | 3. збирання на електродах всіх електронів і позитронів |

Конструктивний тест

Пояснити принцип визначення віку археологічних знахідок за допомогою радіоактивних ізотопів.

Домашнє завдання

Зразок ізотопу $^{14}_6\text{C}$ містить у початковий момент часу 1000 ядер. Скільки ядер залишиться через 22 920 років?

II. АТМОСФЕРНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА

Атмосферні фактори середовища включають структуру і склад атмосфери, а також фізичні та хімічні властивості атмосфери, що впливають на живі організми.

Склад і структура атмосфери

Атмосфера Землі — це газова оболонка, що оточує планету. Близько 99 % сухого повітря складається з азоту та кисню; решта припадає на інші гази та водяну пару. Хімічний склад атмосфери наведено в табл. 2.1.

2.1. Склад чистого сухого повітря, присутнього в нижній атмосфері

Гази	Формула	Вміст, %	Роль у навколишньому середовищі
<i>Активні гази</i>			
Азот	N_2	78,09	Інертний, як N_2 ; важливий для життя, як N
Кисень	O_2	20,95	Важливий для життя; хімічно активний
Водень	H_2	$5 \cdot 10^{-5}$	Важливий у хімії атмосфери
<i>Інертні гази</i>			
Аргон	Ar	0,93	Інертний
Неон	Ne	$1,8 \cdot 10^{-3}$	Інертний
Гелій	He	$5,2 \cdot 10^{-4}$	Інертний
Криптон	Kr	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Інертний
Ксенон	Xe	$8,0 \cdot 10^{-6}$	Інертний
Радон	Rn	$6,0 \cdot 10^{-18}$	Радіоактивний
<i>Змінні гази</i>			
Двоокис вуглецю	CO_2	$3,6 \cdot 10^{-2}$	Важливий для життя; оптично активний
Озон	O_3	$1,0 \cdot 10^{-6}$	Токсичний; оптично і хімічно активний

Хімічний склад атмосфери майже не змінюється до висоти 100 км. По вертикалі атмосфера має шарувату будову. Перший шар, що простягається до $10\text{--}17$ км, називають *тропосферою*. Вона містить близько 80 % маси атмосфери. Важливою змінною компонентою атмосфери є водяна пара, основна маса якої зосереджена в тропосфері. Змінність вмісту водяної пари в тропосфері зумовлюється взаємодією процесів випаровування, конденсації та горизонтального перенесення. В результаті конденсації відбувається утворення хмар та випадання опадів. Над тропосферою на висоті близько 55 км розташований перехідний шар — *стратопауза*, вище якої починається *стратосфера*. Істотний вплив на атмосферні процеси чинить *озон*, що міститься в стратосфері і забезпечує поглинання сонячного ультрафіолетового випромінювання. Ще одна важлива змінна компонента атмосфери — *вуглекислий газ*, змінність вмісту якого пов'язана з життєдіяльністю рослин, промисловими забрудненнями і газообміном між океаном та атмосферою. Активними компонентами атмосфери є *аерозолі* — завислі у повітрі тверді й рідкі частинки, розміри яких перевищують 1 нм. До аерозолів можна віднести й частинки біологічного походження. Шар атмосфери, розташований на висоті 55—80 км, називають *мезосферою*. Над ним знаходиться перехідний шар мезопауза, вище якої починається *термосфера*.

Основні забруднювачі повітря

Забруднювачами повітря називають субстанції, що присутні в атмосфері й впливають на здоров'я людини, стан тваринного, рослинного світу й мікроорганізмів та спричиняють руйнування матеріалів. Всі забруднення антропогенного походження можна поділити на *глобальні* та *регіональні*. До глобальних відносять кислотні дощі, атмосферні гази, радіоактивні забруднення, важкі метали, пестициди. До локальних — забруднення у великих містах (смоги), хімічні сполуки в повітрі індустріальних зон. До основних забруднювачів цього типу можна віднести частинки, розміри яких не перевищують 10 мкм і які є небезпечними для здоров'я людини, а також хімічні сполуки, що зустрічаються в атмосфері мегаполісів.

Основні забруднювачі повітря наведено в табл. 2.2.

2.2. Класифікація основних забруднювачів повітря

Клас забруднювачів	Основні представники класу
Оксиди вуглецю	CO , CO_2
Оксиди сірки	SO_2 , SO_3
Оксиди азоту	NO , NO_2 , N_2O
Леткі хімічні сполуки (ЛХС)	CH_4 , C_4H_{10} , C_2H_4 , C_6H_6 , $C_{20}H_{12}$
Суспендована речовина частинок, тверді частинки, біологічні аерозолі	CH_2O , $CHCl_3$, CH_2Cl_2 , $C_2H_2Cl_2$, C_2HCl_3 , C_2HCl_3 , C_2H_3Cl , CCl_4 , C_2H_4O
Рідкі краплі	Грунтовий пил, сажа, азбест, солі Pb , Cd , Cr , As , Be , NO_3 , SO_4^{2-} , H_2SO_4 , HNO_3 , нафта, пестициди (ДДТ, малатіон)
Фотохімічні окисники, що утворюються внаслідок реакцій кисню, оксидів азоту та ЛХС, що виникають при сонячному освітленні	O_3 , пероксиацилнітрати, CH_2O , C_2H_4O , H_2O_2 , HO

Природними джерелами атмосферних забруднень є виверження вулканів, лісові пожежі, вітрова ерозія, життєдіяльність живих організмів, природна фонова радіоактивність. Чинники антропогенного забруднення — домашнє господарство (приготування їжі, прання, миття, чищення), комерційна активність (служби побутового сервісу, ресторани, готелі, школи, друкарні), сільське господарство (гній, пестициди, добрива, нітрати, важкі метали, поверхнево активні речовини), промисловість (високотемпературні виробничі процеси, згорання палива, діяльність паперових заводів, підприємств з обробки нафтопродуктів, металургійні процеси), транспортні засоби.

Атмосферні забруднення шкідливо впливають на клімат планети, біогеохімічні цикли, рослинні види й фітоценози, на тварин і, безумовно, на здоров'я людини.

Вимірювання атмосферних забруднень

Спектрометрія поглинання ґрунтується на вимірюванні залежності енергії оптичного випромінювання, що поглинається, від довжини хвилі. Ця техніка представлена інфра-

червоними аналізаторами, за допомогою яких ідентифікують та вимірюють гази (SO_2 , NO_x , CO , CO_2) і вуглеводні, та ультрафіолетовими аналізаторами, призначеними для ідентифікації та вимірювання SO_2 і NO_2 .

Люмінесцентні аналізатори вимірюють оптичне випромінювання, що утворюється збудженою молекулою. Залежно від типу збудження розрізняють аналізатори на основі флуоресценції, хемілюмінесценції та полум'яної люмінесценції.

Флуоресценція відбувається за збудження молекули світлом певної довжини хвилі, що супроводжується випромінюванням світла на іншій довжині хвилі. Флуоресцентні аналізатори застосовують для визначення наявності SO_2 .

Хемілюмінесценція супроводжується випромінюванням світла за хімічних реакцій, в яких беруть участь озон та оксид азоту. Використовуються хемілюмінесцентні аналізатори для визначення вмісту NO_x і NO_2 .

Полум'яна люмінесценція має місце під час взаємодії молекул з полум'ям пального. Аналізатори цього типу здатні ідентифікувати сірку та сірчані сполуки.

Електрохімічні аналізатори використовують процеси, що відбуваються на електродах і в міжелектродному просторі з подальшою реєстрацією електричних параметрів. Розглянемо основні електрохімічні методи: вольтамперометрію, кулонометрію та кондуктометрію.

Вольтамперометрію називають методи аналізу, що ґрунтуються на реєстрації та вивченні залежності струму, що проходить крізь електролітичну комірку, від зовнішньої прикладеної напруги. Аналіз вольтамперограми $I = f(U)$ дає інформацію про кількісний та якісний склад розчину, що аналізується. Якщо використовують ртутний крапаючий електрод як індикаторний, то такий метод називають полярографією. Аналізатори цього типу застосовують для ідентифікації та вимірювання газів SO_2 , NO_2 , CO , O_2 , H_2S .

Кулонометрія — метод, що ґрунтується на вимірюванні кількості електрики, витраченої на електроперетворювання (відновлення або окислення) речовини, що аналізується. За законом Фарадея кількість речовини, що бере участь

у процесі електроперетворювання, пропорційна кількості електрики, що проходить через електроліт. Таким чином, вимірювання кількості електрики дає змогу оцінити масу речовини. Кулонометричні аналізатори здатні визначати SO_2 , H_2S меркаптани.

Кондуктометрія ґрунтується на вимірюванні питомої електропровідності розчину, що аналізується. Кондуктометричні прилади використовуються для аналізу SO_2 .

Парамагнітні *аналізатори* базуються на здатності молекул речовин (парамагнетиків) орієнтувати власні магнітні моменти вздовж зовнішнього магнітного поля. Парамагнітні аналізатори використовуються для аналізу атмосферного кисню, який є парамагнетиком.

Аналізатори теплопровідності передбачають застосування розжареного провідника, опір якого залежить від потоку газів, що пропускають через нього. Гази CO_2 та SO_2 визначають за допомогою аналізаторів теплопровідності.

Приклад

У Канаді налічується $\eta = 1\,200\,000$ автомобілів. Середнє значення викидів діоксиду азоту $m_1 = 1,9$ г-км¹, а метану — $m_2 = 1$ г-км¹. Протягом дня кожен автомобіль проходить відстань $L = 48$ км.

Визначити загальний об'єм діоксиду азоту, що викидається автотранспортом протягом дня у повітря.

Розв'язок

Кількість викидів діоксиду азоту визначимо за виразом:
 $m(NO) = m_1 \cdot n \cdot L = 1,9 \text{ г-км}^1 \cdot 48 \text{ км-день}^{-1} = 91,2 \text{ г-день}^{-1}$

Об'єм діоксиду азоту дорівнює:
 $V(NO) = m(NO_2) / M = (91,2 \text{ г-день}^{-1}) / (46 \text{ г-моль}^{-1}) = 1,98 \text{ м}^3 \text{-день}^{-1}$

Контрольне завдання

Визначити загальний об'єм метану, що викидається автотранспортом протягом дня у повітря за умовами попереднього завдання.

Випромінювальний баланс атмосфери

Сонячне короткохвильове випромінювання, що надходить в атмосферу Землі, частково поглинається водяною парою, вуглекислим газом, озonom, аерозолями, а також розсіюється на молекулах та частинках атмосфери. Пряме й розсіяне сонячне випромінювання сягає земної поверхні і частково відбивається від неї. За рахунок поглинутого випромінювання земна поверхня стає джерелом власного довгохвильового випромінювання, спрямованого в атмосферу. Крім того, атмосфера посилає до земної поверхні та у світовий простір власне довгохвильове випромінювання.

Істотну роль у випромінювальному балансі атмосфери відіграють озон та молекулярний кисень, що ефективно поглинають ультрафіолетове випромінювання Сонця. Ці процеси поглинання призводять передусім до фотохімічних реакцій, наслідком яких є підвищення температури стратосфери; по-друге, до спектральної фільтрації та регулювання короткохвильового сонячного випромінювання, що сягає земної поверхні.

Озонова дірка

Основна маса озону атмосфери (близько 90 %) міститься в стратосфері на висоті 10-5-50 км з максимумом на висоті 20-5-25 км. Решта озону зосереджена 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 (200-5-300 нм) та частину випромінювання УФ-В області (280-5-320 нм). Саме УФ-В область призводить до еритеми, небезпечних генетичних порушень в організмі людини, раку шкіри. Короткохвильове (<270 нм) ультрафіолетове випромінювання здатне розщепити молекулу кисню O_2 на синглетний кисень O , що взаємодіє з O_2 і утворює озон O_3 . Загалом, озоновий шар — це 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, що зумовлює появу атомарного кисню:

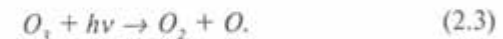


2) Взаємодія атомарного кисню з молекулярним:



де M — якась інша молекула (звичайно азот або кисень).

3) Взаємодія довгохвильового ($\lambda = 300-315$ нм) випромінювання з озonom, що викликає зворотнє перетворення останнього:



Крім того, з озonom реагують присутні в стратосфері хлор, азот, бром та водень, що призводить до руйнування озону внаслідок таких реакцій:



де X — хімічний реагент.

Озонова дірка утворюється в шарі стратосферного озону, дуже чутливого до впливу різних сполук, що містять хлор, навіть при незначних концентраціях останнього. Щодо механізму утворення озонової дірки нема єдиної думки. Є дві версії стосовно причин виникнення цього явища. Одні вчені вважають, що озоновий шар руйнується внаслідок послаблення потоку ультрафіолетового випромінювання, необхідного для утворення озону, наприкінці року; тут певну роль відіграють швидкі переміщення великих повітряних мас над Антарктидою. Інші стверджують, що озоновий шар руйнується через потрапляння в атмосферу хлорфторвуглеців (фреонів), використовуваних як холодоагенти та розпилювачі в холодильних установках, вогнегасниках, аерозольних виробках. Характерним є досить тривалий (від 70 до 500 років) проміжок часу існування цих сполук; поширюючись у повітряному просторі, вони руйнуються під впливом сонячного випромінювання, виділяють атоми хлору чи бро-

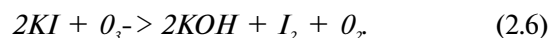
му, що взаємодіють з молекулами озону, руйнуючи останні. У 1985 р. було прийнято Віденську конвенцію із захисту озонового шару, а 1987 р. у Монреалі підписано міжнародний протокол щодо речовин, які руйнують озоновий шар. У 1988 р. Україна приєдналася до Віденської конвенції, підписала доповнення та поправки до Монреальського договору. В Україні нині працює мережа станцій спостереження за озоновим шаром. Глобальні вимірювання рівня озону за допомогою супутників протягом 1979—1993 рр. свідчать про істотне збільшення ультрафіолетового опромінювання в високих і середніх широтах обох півкуль. Зменшення озонового шару тривало до 1998 р., після чого прогнозується його поступове відновлення.

Вимірювання озону

Одиниці Добсона використовують для вимірювання «товщини» озонового шару. Якщо уявити, що всі молекули озону, присутні в стратосфері, можна зібрати на поверхні (при нормальних тиску та температурі), то товщина цього шару дорівнюватиме 3 мм. Ця кількість озону відповідає 300 DU (одиницям Добсона).

Озоновий зонд — 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 зумовлює появу електричного струму, що реєструється. Величина цього струму пропорційна потоку озону і, таким чином, його концентрації.

Принцип дії озонового сенсора полягає в реалізації реакції озону з йодидом калію KI, результатом якої є утворення вільного йоду:



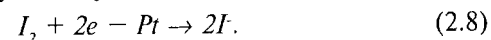
Утворення йоду порушує стан електричної рівноваги в розчині, що викликає потік електронів. Кількість озону P_m (парціальний тиск озону в нанобарах) пов'язана з величиною електричного струму / співвідношенням:

$$P_m = KITT, \quad (2.7)$$

де K — константа, T_n — температура помпи, t — час проходження 100 мл повітря через систему.

Розглянемо основні типи озонових зондів.

Озоновий зонд Брюера-Маста містить одну електрохімічну камеру з срібним анодом і платиновим електродом, зануреними у лужний розчин йодиду калію. До електродів прикладають напругу 0,42 В. Йод, що утворюється відповідно до реакції (2.6), надходить до платинового катода і перетворюється на йодид з захопленням двох електронів на кожну молекулу йодиду:



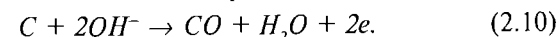
На аноді відбувається вивільнення двох електронів за іонізації атомів срібла:



Таким чином, кожна молекула озону, що потрапляє в камеру, викликає появу пари електронів у зовнішньому ланцюзі зонда.

В озоновому зонді ЕКК використовують електрохімічну концентраційну камеру (ЕКК), яка складається з двох відсіків, що виконують функції катода й анода. Обидва відсіки містять платинові електроди та розчин KI при різних концентраціях. Камери з'єднуються іонним містком для замкнення електричного ланцюга та запобігання змішуванню електролітів катода й анода. Зонд цього типу не потребує зовнішньої напруги — процеси руху електронів здійснюються завдяки електрорушійній силі, що виникає за різних концентрацій у відсіках.

Вуглецево-йодний зонд відрізняється від розглянутих вище конструкцій тим, що платинова сітка використовується як катод, а активований вуглець — як анод, на якому відбувається вивільнення електронів за такою реакцією:



Тепловий баланс атмосфери

Тепловим режимом атмосфери називають характер розподілу та зміни температури в атмосфері. Температура змінюється з висотою, сягаючи 220 К у тропосфері, 260 К —

стратосфері, 180 К — мезосфері та 2000 К у термосфері. Розподіл температури атмосфери за висотою наведено на рис. 2.1. У тропосфері температура спадає з висотою через переміщення повітря в горизонтальному напрямку. Стратосфера характеризується підвищенням температури, що пояснюється поглинанням сонячного випромінювання озоновим шаром, який міститься в тропосфері. В мезосфері температура зменшується з висотою, оскільки тут відбувається значне перемішування повітря завдяки вітру, швидкість якого сягає $150 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. У термосфері температура зростає з висотою завдяки високій кінетичній енергії молекул газів, хоча там велика розрідженість повітря.

Перенесення тепла між поверхнею Землі та атмосферою відбувається такими шляхами теплопередачі як теплова конвекція, турбулентність, молекулярна теплопровідність та тепловипромінювання. Атмосфера отримує теплову енергію за рахунок поглинутого короткохвильового випромінювання, надходження теплоти від конденсації

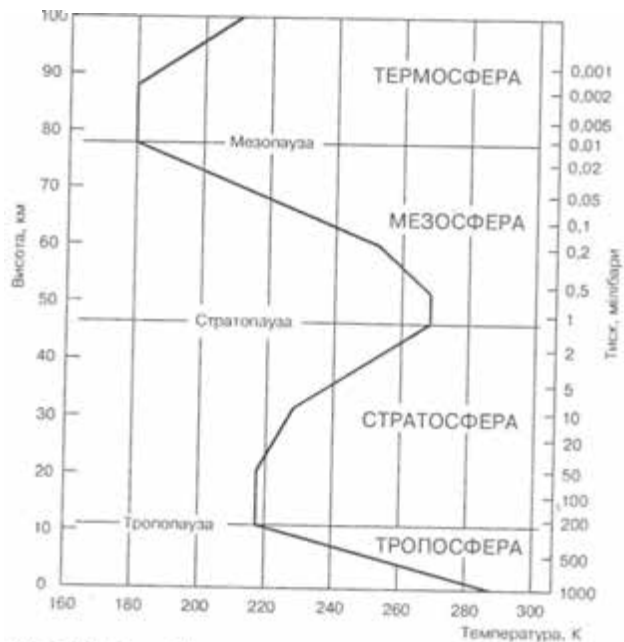


Рис. 2.1. Розподіл температури атмосфери з висотою

водяної пари та турбулентного потоку теплоти від земної поверхні. Втрати теплоти атмосферою зумовлені довгохвильовим випромінюванням.

Парниковий ефект

Сучасний досвід свідчить, що внаслідок господарської діяльності людини в атмосфері збільшується вміст вуглекислого газу (CO_2), закису азоту (N_2O), метану (CH_4), галогенопохідних вуглеводнів і тропосферного озону (O_3).

Метан потрапляє в атмосферу внаслідок діяльності мікроорганізмів у болотистих ґрунтах або в системах травлення травоядних тварин, а також при спалюванні палива, сміття, добуванні вугілля.

Закис азоту надходить як результат діяльності мікроорганізмів у ґрунті й воді, через виробництво й застосування азотних добрив у сільському господарстві.

Специфічною особливістю цих газів є те, що вони поглинають оптичне випромінювання в інфрачервоній області спектра. Справа в тому, що сонячне випромінювання є короткохвильовим, тоді як випромінювання земної кулі — довгохвильовим. Сонячне випромінювання проникає крізь атмосферу і нагріває земну поверхню. Інтенсивність сонячного випромінювання становить $1368 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (сонячна стала); якщо врахувати, що площа земної поверхні $S = \pi R^2$ (де R — радіус земної кулі), а також альbedo земної поверхні $\alpha = 0,3$, то кількість сонячної енергії, отримуваної земною поверхнею, буде дорівнювати $1368 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}(1-0,3)\pi R^2$. Водночас енергетична світність земної поверхні, що визначається за формулою (1.8.25), дає змогу оцінити кількість енергії, що посилається земною поверхнею у вигляді інфрачервоного випромінювання, як $4\pi R^2\sigma T^4$. Враховуючи баланс між сонячним випромінюванням, що сягає земної поверхні, та інфрачервоним випромінюванням її поверхні, можна визначити, що температура земної поверхні має бути 253 К. Але насправді, як очевидно, ця температура (-20°C) не відповідає реальній ситуації. Справжня температура земної поверхні близько 288 К. Причиною такої температурної різниці є парниковий ефект. Теплове дов-

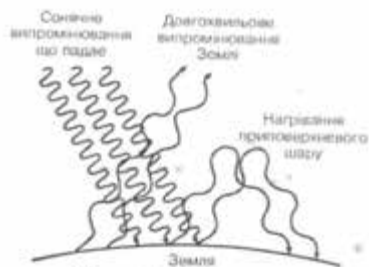


Рис. 2.2. Виникнення парникового ефекту

гохвильове випромінювання Землі поглинається атмосферними газами (CO_2 , H_2O , CH_4), що зумовлює нагрівання приповерхневого шару атмосфери, оскільки ці гази відіграють роль віконного скла у парнику (рис. 2.2). Внаслідок цього ефекту порушується тепловий баланс; цілком імові-

рим є підвищення глобальної температури поверхні Землі внаслідок зміни концентрації парникових газів, що може призвести до зміни клімату.

Вимірювання впливу парникового ефекту

Розглянемо кілька методичних прийомів кількісної оцінки можливого впливу парникового ефекту.

Вимірювання температури морської поверхні як з борту океанських суден, так і супутників за допомогою інфрачервоних і надвисокочастотних радіометрів дає змогу оцінити електромагнітне випромінювання, що посилається та відбивається морською поверхнею, а також посилається та поглинається атмосферою (у разі використання супутників). Моделювання цих процесів приводить до точних оцінок глобальних змін температури навколишнього середовища.

Оцінка глобального нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (НДВІ). Для встановлення функціональних зв'язків між вегетаційними характеристиками рослин, що перебувають у стресових умовах, і спектральними параметрами цих рослин доцільно вживати так звані спектральні вегетаційні індекси як суму, різницю або відношення спектральних параметрів, визначених на певних аналітичних довжинах хвиль. Нормалізований диференційний вегетаційний індекс визначається як:

$$НДВІ = (NIR - RED) / (NIR + RED). \quad (2.11)$$

Тут NIR відповідає ближній інфрачервоній області спектра (750-1359 нм), в якій мезофільні структури рослини

відповідають за відбивання випромінювання, а RED — червоній області видимого спектра (600+700 нм), з якою пов'язане поглинання оптичного випромінювання хлорофілом. Перевагою цього індексу є близька до лінійної залежність його величини від кількості рослинної продукції, що залежить від температури.

Визначення концентрації атмосферних газів дає змогу оцінити випромінювальний баланс Землі, температуру земної поверхні, температурний профіль атмосфери та фізичні властивості хмар. Перспективним методом кількісної оцінки атмосферних газів є спектроскопія на основі Фура'є перетворення. Розглянемо інтерферометр Майкельсона (рис. 2.3), в якому використовується джерело монохроматичного оптичного випромінювання. Одне з дзеркал інтерферометра рухається поступально. Якщо це дзеркало переміщується на відстань $\lambda/4$ (де λ — довжина хвилі оптичного випромінювання), то два промені перебувають в протифазі, коли вони сягають детектора. Під час руху дзеркала з постійною

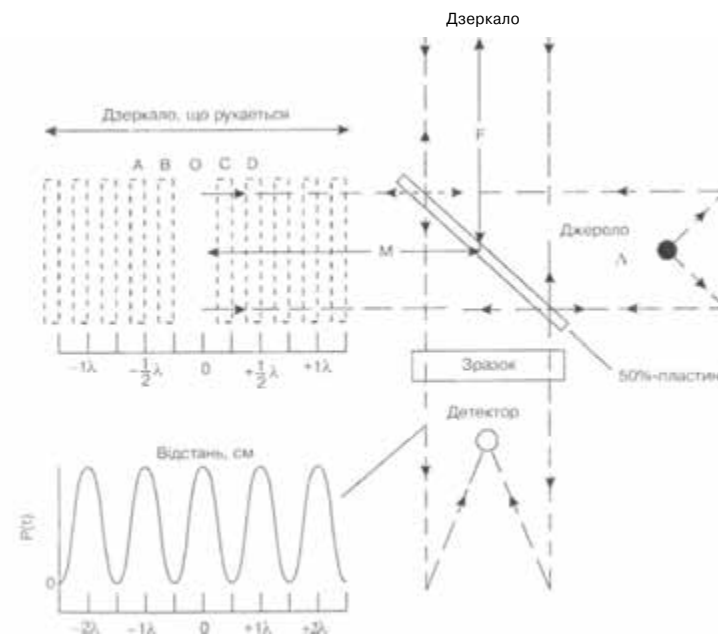


Рис. 2.3. Інтерферометр Майкельсона

швидкістю детектор реєструє модульований за синусоїдним законом світловий сигнал. Традиційна спектроскопія оперує в частотному масштабі, тобто досліджує потужність оптичного випромінювання залежно від частоти (довжини хвилі); спектроскопія Фур'є перетворення використовує часовий масштаб, якщо реєструються зміни потужності оптичного випромінювання в часі. На рис. 2.4 наведено спектр монохроматичного оптичного випромінювання в часовому і частотному масштабах, а на рис. 2.5 — результат накладання двох монохроматичних коливань також у часовому й частотному масштабах. За такого накладання виникають *биття коливань*. Якщо використовувати джерело немонохроматичного оптичного випромінювання, то завдяки Фур'є перетворенню можна будь-якому частотному спектру скласти специфічну інтерферограму — так званий *спектр*

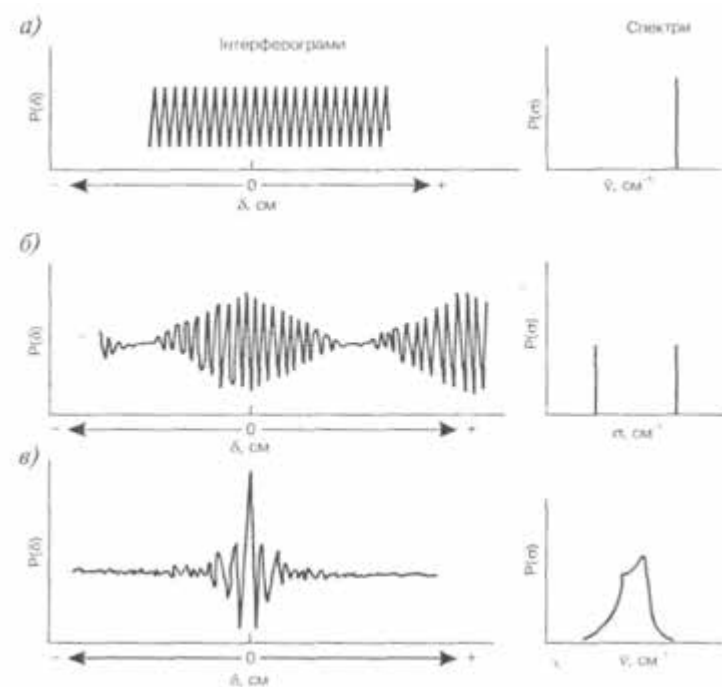


Рис. 2.4. Спектр оптичного випромінювання в часовому і частотному масштабах

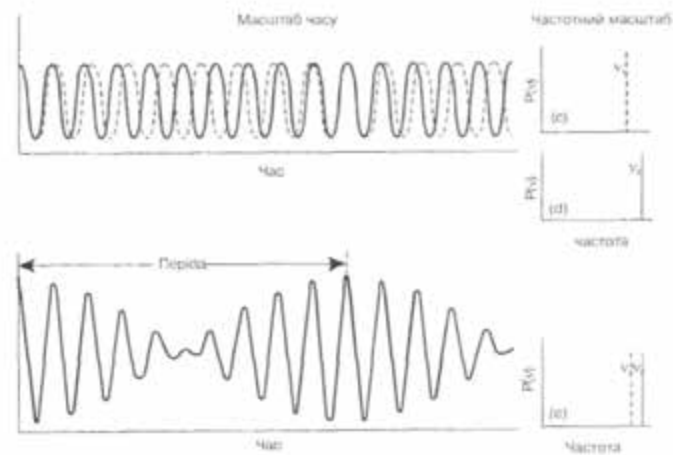


Рис. 2.5. Результат накладання двох монохроматичних коливань в часовому і частотному масштабах

Фур'є. Методи спектроскопії Фур'є перетворення характеризуються високим розділенням ($< 0,1 \text{ см}^{-1}$), точністю і відтворюваністю.

Схему приладу для вимірювання концентрацій атмосферних газів ($\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}$ та галогенопохідних вуглеводнів) на основі спектроскопії Фур'є перетворення, що встановлюється на земній поверхні, наведено на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Схеми приладу для аналізу забруднення атмосфери, що працює на основі Фур'є спектроскопії

Вимірювання температури приповерхневого шару ґрунтується на оцінці інфрачервоного випромінювання, що надсилається системою «земна поверхня-атмосфера» на 19 спектральних ділянках в межах 3,7—15 мкм, а також надвисокочастотного випромінювання на чотирьох ділянках близько 50 МГц спектра випромінювання кисню. Комбінація двох спектральних областей дає можливість обмежити вплив хмарності та точніше оцінити температуру приповерхневого шару атмосфери.

Водний баланс атмосфери

Водний баланс атмосфери — то кількість опадів, що випадають на земну поверхню та вологи, що випаровується з цієї поверхні. Вода випаровується з поверхні океанів, ґрунту, озер та річок, переноситься вгору повітряними потоками, конденсується з утворенням хмар і врешті-решт повертається на земну поверхню у вигляді опадів. Таким чином, *випаровування, конденсація й опади* є основними процесами гідрологічного циклу. Процес випаровування буде розглянуто у розділі «Едафічні фактори», тоді як процеси конденсації та опадів відбуваються саме в атмосфері.

Конденсація — це процес переходу речовини в результаті охолодження або стиснення з газоподібного стану в конденсований (рідкий або твердий). Насичена пара в атмосфері конденсується на дрібних частинках — так званих *ядрах конденсації*. Залежно від температури T атмосфери утворюються краплі води ($T < 273,2$ К) або частинки льоду ($T_a < 233$ К), розміри яких не перевищують 2 мкм. Ці краплі та частинки, що формують хмари, здатні зростати за розмірами, що приводить до опадів — дощу, снігу, граду, роси, паморозі, туману.

Перехід від туману до дощу

Перехід від туману (хмари) до дощу характеризується швидкістю руху краплин, пов'язаною з їхнім розміром. На рис. 2.7 наведено залежність швидкості руху водяних краплин від їх радіуса: краплини радіусом < 100 мкм — хма-

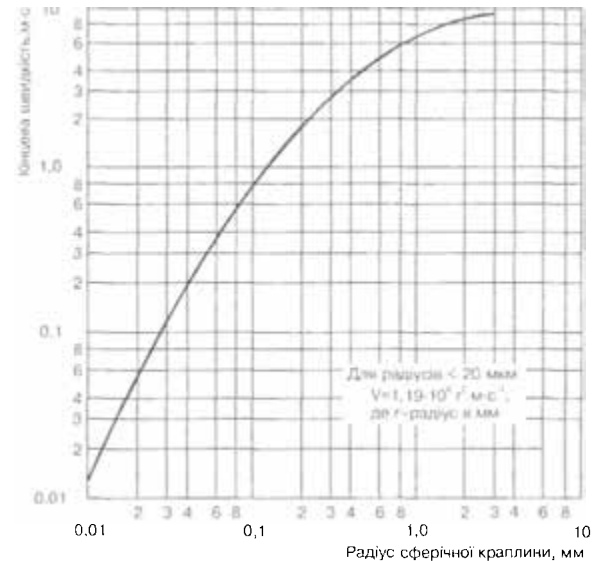


Рис. 2.7. Залежність швидкості падіння краплин дощу від діаметру (тиск 760 мм рт. ст., температура 20°C)

рові, при більших радіусах — дощові. Функція розподілу краплин хмари за розмірами має вигляд:

$$N(a) = N_0 a^\alpha \exp(-ba^\gamma), \quad (2.12)$$

де α і γ — константи, що залежать від властивостей хмар

(табл. 2.3), $b = \frac{\alpha}{(a_{max})^\gamma \cdot \gamma}$.

Контрольна робота

Побудувати нормалізований розподіл за розмірами аерозолів, що належать різним типам хмар (№ 1—6 з табл. 2.3). Нормалізований розподіл відповідає $N/N_0 = 1$ при $a = a_{max}$.

Розподіл аерозолів за розмірами описується рівнянням:

$$N(a) = N_0 a^{-\beta}, \quad (10.13)$$

де a — радіус аерозолію, $\beta \cong 3$ для радіусів, що перебувають у межах $0,1 \text{ мкм} < a < 1 \text{ мкм}$.

2.3. Властивості хмар

№	Тип хмар	\varnothing_{max} мкм	α	γ	Основний склад	h_{min} м	h_{max} м
1	Перисто-шаруваті, помірні висоти	40,0	6,0	0,5	Лід	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-дошові	20,0	5,0	0,3	->-	1600	2000

Швидкість падіння дощових краплин

Швидкість падіння дощових краплин визначається за законом Стокса:

$$V = g \frac{(\rho_{кр} - \rho_{пов}) \cdot 2R^2}{\eta}, \quad (2.14)$$

де ρ — густина краплини, $\rho_{пов}$ — густина повітря, η — в'язкість повітря, g — прискорення вільного падіння, R — радіус краплини.

Приклад

Визначити швидкість падіння дощової краплини радіусом 0,005 мм, якщо температура повітря — 20 °С.

Розв'язок

У табл. 3 (див. додаток) знаходимо значення густини води та повітря, а в табл. 4 (див. додаток) — коефіцієнта в'язкості повітря при 20 °С: $\rho_{кр} = 998,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $\rho_{пов} = 1,205 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $\eta = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Підставляємо числові значення у формулу (2.14):

$$V = 9,8 \frac{998,2 - 1,205}{18 \cdot 10^{-6}} \frac{2}{9} (5 \cdot 10^{-6})^2 =$$

$$= 3,0156 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} = 0,3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Для більших краплин швидкість падіння визначається так:

$$V(\text{см} \cdot \text{с}^{-1}) = 1344 \sqrt{r(\text{см})}. \quad (2.15)$$

Приклад

Визначити швидкість падіння краплин дощу радіусом 0,5 мм. Порівняти результати з даними рис. 2.7.

Розв'язок

Використовуємо формулу (2.15) для знаходження швидкості падіння краплин дощу:

$$V = 1344 \sqrt{0,05} = 300 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Контрольне завдання

Визначити швидкість падіння дощових краплин діаметром 7 мм.

Відповідь: 7,95 м · с⁻¹.

Параметри опадів

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 в ґрунт.

Інтенсивність опадів відповідає кількості опадів у міліметрах, що випадає за 1 хв. За інтенсивністю опади поділяються на слабкі, помірні та сильні. Якщо інтенсивність опадів перевищує 1 мм за 1 хв, такі опади відносять 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.

Вимірювання опадів

Дощомір складається з ємності, відкритої зверху, що містить два елементи — колектор і приймач (рис. 2.8). Колектор має циліндричну або конусоподібну форму; площа отвору його близько 400 см². Приймач обладнано шкалою для вимірювання зібраної води. Для запобігання випаровуванню на поверхню води наносять шар нафти товщиною 5 мм.

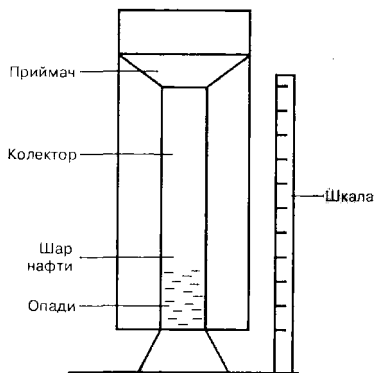


Рис. 2.8. Дощомір, призначений для вимірювання опадів

Вся конструкція може обертатися навколо горизонтальної осі (рис. 2.9). Під час дощу один з черпаків заповнюється водою та перекидається; з цього моменту починає заповнюватися інший черпак. Невеликий магніт виконує функції контакту, що замикає електричний ланцюг. Кількість опадів відповідає кількості замикань ланцюга, тоді як час між двома замиканнями дає змогу оцінити інтенсивність дощу.

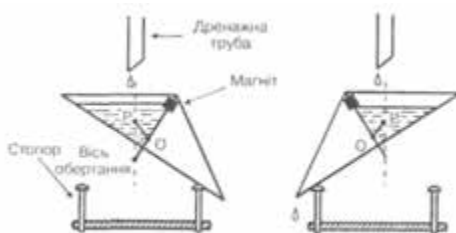


Рис. 2.9. Вимірювання опадів за допомогою нахилених черпаків

Сифонний дощомір — циліндричний резервуар, обладнаний поплавком, з'єднаний з пером самопису (рис. 2.10). За допомогою сифона резервуар звільнюється від води, коли кількість її сягає певного рівня, і перо самопису повертається в початковий стан.

Ваговий опадомір ґрунтується на постійному контролі ваги води, зібраної в контейнері за допомогою вимірювальної системи. Цей тип приладу використовують для оцінки твердих опадів.

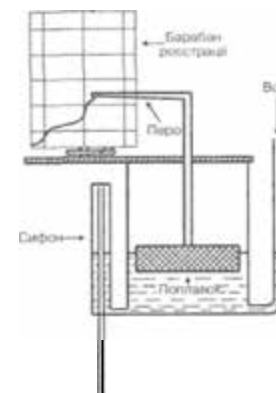
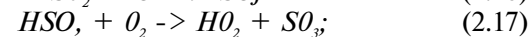
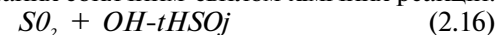


Рис. 2.10. Сифонний дощомір

Кислотні дощі

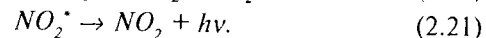
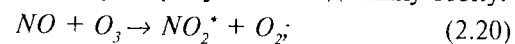
Кислотні дощі виникають унаслідок природних та індустріальних викидів оксидів сірки та азоту в атмосферу, де вони перетворюються на частинки сульфатів і нітратів, що змішуються з водяною парою й утворюють сірчану та азотну кислоти, які повертаються на земну поверхню седиментації або у вигляді опадів. Сірка потрапляє в атмосферу в результаті руйнування біосфери, вулканічної діяльності, випаровування води з поверхні океанів. Азот надходить в атмосферу за ґрунтової емісії окису азоту, грозових розрядів, горіння біомаси, спалювання природного палива, роботи двигунів внутрішнього згорання, активності транспорту. Всі ці гази поширюються у вертикальних і горизонтальних напрямках; під час цих переміщень забруднюючі речовини зазнають певних фізико-хімічних перетворень за індукованих сонячним світлом хімічних реакцій:



Результатом цих реакцій є утворення сірчаної або азотної кислот.

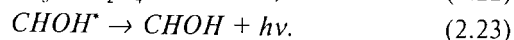
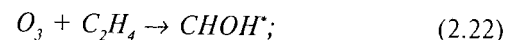
Методи детектування кислотних дощів

Хемілюмінесценція — люмінесценція, що супроводжує хімічні реакції. Так, діоксид азоту у збудженому (*) стані формується з окису азоту в присутності надлишку озону:



Озон при цьому випромінює світло на довжині хвилі 1,2 мкм. За допомогою цього методу можна визначати оксид азоту NO , діоксид азоту NO_2 та суми оксидів азоту NO_x .

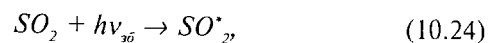
Ще один хемілюмінесцентний метод ґрунтується на хімічній реакції етилену з озоном; ця реакція супроводжується люмінесценцією на довжині хвилі 435 нм:



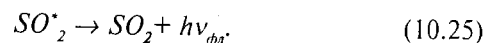
Полум'яна фотометрія полягає у випаровуванні речовини, що досліджується, у полум'ї графітової трубки або плазми, після чого через пару речовини пропускають оптичне випромінювання. Реєстрація ступеня ослаблення інтенсивності ліній речовини, які визначають, дає змогу оцінювати концентрацію його у зразку. Цей метод застосовується для вимірювання SO_2 .

Метод кулонометрії ґрунтується на вимірюванні кількості електрики, затраченої на відновлення або окислення речовини, що аналізується. Застосовується метод для аналізу газоподібних забруднень в атмосфері (SO_2 , NO_x , H_2S).

Флуоресцентний метод передбачає збудження та реєстрацію флуоресценції діоксиду сірки SO_2 . Процес збудження SO_2 описується рівнянням:



тоді як перехід збудженої молекули в основний стан супроводжується випромінюванням кванта світла в області 260÷370 нм:



Вимірювання параметрів аерозолів

Аерозолі — дисперсні (колоїдні) системи, що складаються з частинок розміром від 10^{-5} - 10^{-7} м та газового середовища, в якому вони перебувають у завислому стані.

До основних параметрів аерозолів можна віднести їх розміри, розподіл за розмірами, кількість, швидкість руху. Розглянемо основні методи вимірювання параметрів аерозолів.

Реєстрація лазерного розсіювання на аерозолях дає змогу оцінити розміри та розподіл за ними аерозолів. Процес розсіювання лазерного випромінювання залежить від розмірів аерозолів, відносного показника заломлення й довжини хвилі випромінювання. Аерозолям, розміри яких перевищують довжину хвилі лазерного випромінювання, властиве розсіювання Мі, що супроводжується виникненням інтерференції світла та істотної зміни діаграми кутового розподілу розсіяного світла. Схему лазерного вимірювача розмірів аерозолів наведено на рис. 2.11. Лазерний промінь пропускають через потік аерозолів і реєструють інтенсивність розсіяного світла, що залежить від розміру аерозолію, за допомогою фотоелектронного помножувача.

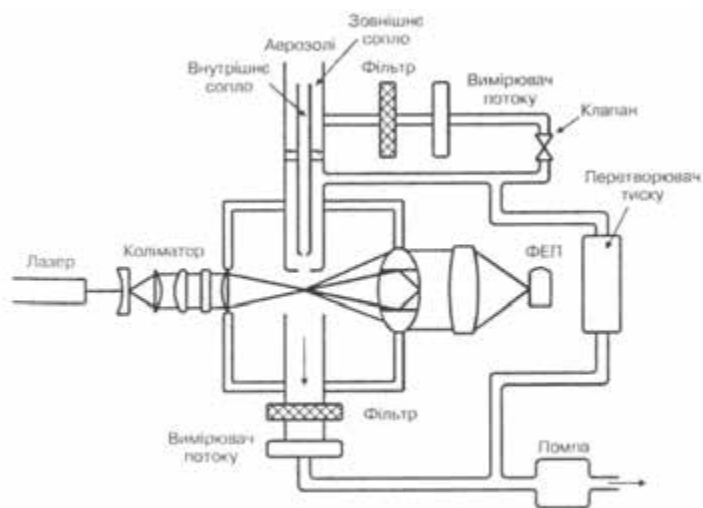


Рис. 2.11. Лазерний вимірювач розмірів аерозолів

Метод лазерної дифрактометрії полягає в аналізі дифракційної картини, що отримується за пропускання лазерного променя через аерозолі. Схему лазерного дифрактометра наведено на рис. 2.12,а. Фотодетектором є система розташованих концентрично фотодіодів (рис. 2.12,б), які реагують на випромінювання, що набуло дифракції. Інтенсивність та характер дифракційної картини великою мірою залежить від розмірів аерозолів (рис. 2.12,в).

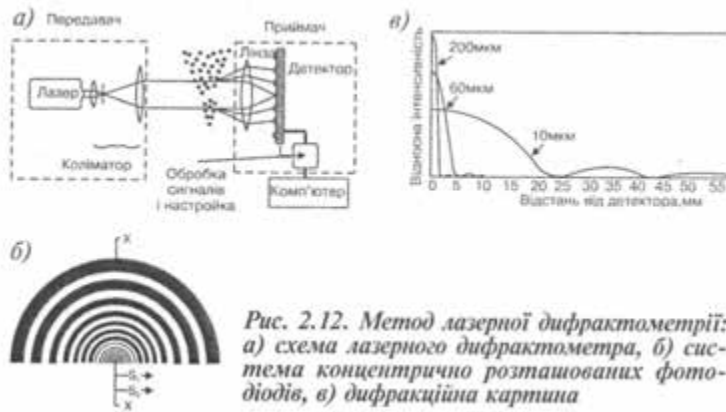


Рис. 2.12. Метод лазерної дифрактометрії: а) схема лазерного дифрактометра, б) система концентрично розташованих фотодіодів, в) дифракційна картина

Метод Доплерівської спектроскопії передбачає взаємодію двох лазерних променів з аерозолем, що рухається зі швидкістю V (рис. 2.13,а). За інтерференції променів інтенсивність розсіяного випромінювання змінюється за законом:

$$I_{\text{розс}} = A + B \cos(2\pi vt), \quad (2.26)$$

де $v = V/\lambda$ (λ — довжина хвилі лазерного випромінювання).

Для оцінки розмірів аерозолів вимірюють видимість V_i , що залежить від розмірів аерозолі, яку визначають за виразом:

$$V_i = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} + I_{\text{min}}), \quad (2.27)$$

де I_{max} і I_{min} — інтенсивності розсіяного випромінювання (рис. 2.13,б).

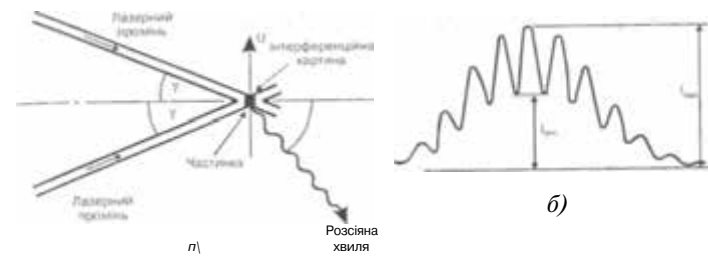


Рис. 2.13 а) Принцип вимірювання розмірів аерозолів на основі Доплерівської спектроскопії, б) профіль видимості V_i , що залежить від розмірів аерозолів: I_{max} та I_{min} — максимальна і мінімальна інтенсивність розсіяного випромінювання відповідно

Всі розглянуті вище методи здатні забезпечити вимірювання розмірів аерозолів у межах 0,1+2 мм.

Аерозолі біологічного походження

До аерозолів біологічного походження (біоаерозолів) слід віднести віруси, бактерії, пилок і частинки комах. Всі вони здатні провокувати захворювання та алергічні реакції у людей, впливати на тварин і рослини. Крім того, ці аерозолі відіграють роль центрів конденсації і, отже, впливатимуть на процеси утворення хмар. Основним джерелом біологічних аерозолів є рослини, що постачають в атмосферу спори й пилок. Останні поширюються завдяки повітряним потокам. Сюди ж відносять сільське господарство з його технологічними процесами з обробітку землі, муніципальну активність та численні водойми. Розміри аерозолів біологічного походження коливаються в межах: віруси — 0,005+0,25 мм; бактерії, спори — понад 0,5 мм; пилок — більше 5 мм; уламки рослин, частинки комах, епітелію людини й тварин — близько 1 мм. Концентрація біологічних аерозолів залежить від конкретних умов; так, у зоні стічних вод концентрація бактерій становить $10^4+10^5 \text{ см}^{-3}$; у повітрі міста — 7500 см^{-3} ; в атмосфері парку — 290 см^{-3} .

Детектування та ідентифікація біоаерозолів

Зовнішній вигляд приладу для збирання біоаерозолів наведено на рис. 2.14. Прилад обладнаний флюгером, що дає змогу орієнтувати вхідне віконце проти напрямку вітру. Біоаерозолі надходять протягом доби на стрічку, покриту



Рис. 2.14. Зовнішній вигляд приладу для збору аерозолів

клеякою речовиною. Ця стрічка обертається відносно вхідного віконця за допомогою електровигуна з тим, щоб стежити за рівнем аерозолів, що надходять протягом доби. Вся система встановлюється на високому місці (наприклад, даху будинку). Раз на добу стрічку знімають і аналізують на предмет кількісного та якісного вмісту біоаерозолів.

Розглянемо основні методи ідентифікації біоаерозолів.

Методи мікроскопії передбачають візуальне спостереження біоаерозолів за допомогою

світлової мікроскопії, скануючої та аналітичної електронної мікроскопії. Перевагою методів є висока роздільна здатність, недоліком — довготривалість та трудомісткість процесу вимірювань.

Методи флуоресцентної спектроскопії використовують збудження та реєстрацію первинної (завдяки природним флуорофорам) або вторинну (завдяки внесеним флуорофорам) флуоресценцію біоаерозолів. Деякі мікроорганізми здатні демонструвати хемі- або біоломінесценцію. Перевагою методу є висока чутливість, недоліком — не всі біоаерозолі мають флуорофори (речовини, здатні флуоресцювати).

Інфрачервона спектроскопія на основі Фур'є перетворювання є перспективним методом ідентифікації великої кількості компонентів біоаерозолів, що беруть участь у формуванні інфрачервоного спектра. Перевагою методу є висока чутливість і точність вимірювань.

Методи спектроскопії комбінаційного розсіювання також

застосовують для ідентифікації біоаерозолів. Цей тип розсіювання включає втрату або набуття кванта коливальної енергії молекулою. Йдеться про непружене світлове розсіювання, коли фотон, що падає, має енергію значно більшу, ніж енергія, яку коливальний квант втрачає через збудження молекули; залишок енергії розсіюється як фотон зі зменшеною частотою. Перевагою методу є те, що спектральні комбінаційні зсуви специфічні для кожного біоаерозоля; інтенсивність кожної лінії пропорційна концентрації кожного компонента. Недолік — потреба у потужних лазерах як джерелах випромінювання.

Хроматографічні методи базуються на розділенні, знаходженні та визначенні речовин завдяки 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, яку називають *носієм*. Під час руху рухомої фази вздовж нерухомої кожна компонента суміші осідає (сорбується) на нерухомій фазі (сорбенті) відповідно до матеріалу сорбенту, затримується і вповільнює свій рух. Через те, що різні компоненти мають різну спорідненість, відбувається просторове розділення цих компонентів — одні компоненти затримуються на початку шляху, інші просуваються далі тощо.

Відповідно до способу хроматографування розрізняють *колонкову* й *площинну* хроматографію. В першому варіанті розділення відбувається у колонці, в другому — на папері або в тонкому шарі сорбенту. Найпоширенішим носієм є папір, отже, цей метод називають *паперовою хроматографією*. Одним з перспективних є *метод високоефективної рідинної хроматографії*, що ґрунтується на прискоренні процесу хроматографування під впливом тиску. Для цього рідинна фаза вводиться насосом. *Газова хроматографія* передбачає використання інертного газу як рухомої фази та діатоміту (гідратованого селікагелю) як носія; останній розміщують у спіральних або капілярних колонках. Типова хроматограма біоаерозолів (рис. 2.15) свідчить про складність та специфічність їхнього складу. Перевагою методу є висока роздільна здатність; недоліком — складність обладнання.

Мас-спектрометричні методи передбачають розділення

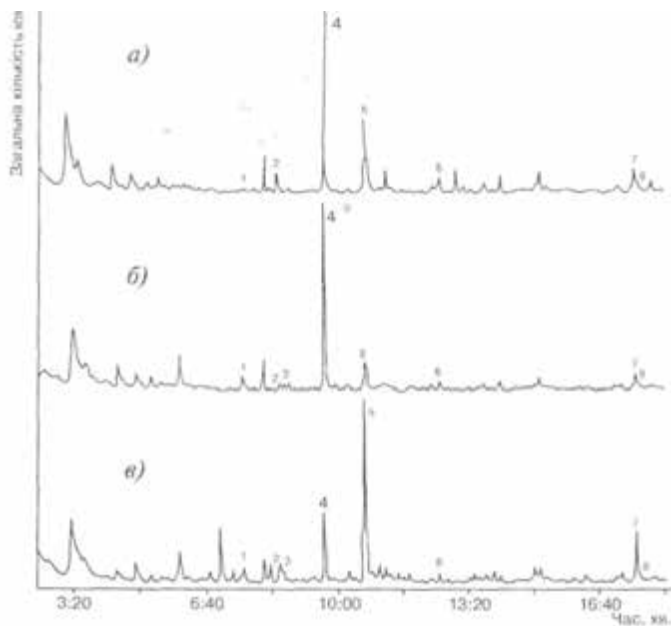


Рис. 2.15. Типова хроматограма біоаерозолів:
 а) *Legionella pneumophila* Knoxville, б) *Pseudomonas aeruginosa* (Gram negative), в) *Staphylococcus aureus* (Gram positive)

іонізованих молекул і атомів відповідно до їх мас завдяки дії магнітних і електричних полів на пучки іонів, що летять у вакуумі. Для аналізу вмісту біоаерозолів поєднують процеси піролізу (нагрівання без доступу повітря, що призводить до розкладання речовини), випаровування та іонізації, які мають місце під час взаємодії біоаерозолію з лазерним випромінюванням (рис. 2.16): один промінь Nd-YAG-лазера використовується для піролізу та випаровування, другий промінь He:Ne-лазера — для вимірювання розмірів аерозолів, а третій промінь He:Ne-лазера — для іонізації. Типовий спектр біоаерозолів наведено на рис. 2.17.

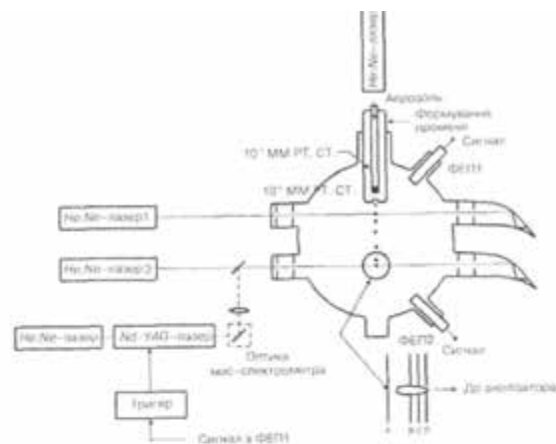


Рис. 2.16. Схема взаємодії біоаерозолів з лазерним променем в мас-спектрометрі (пояснення в тексті)

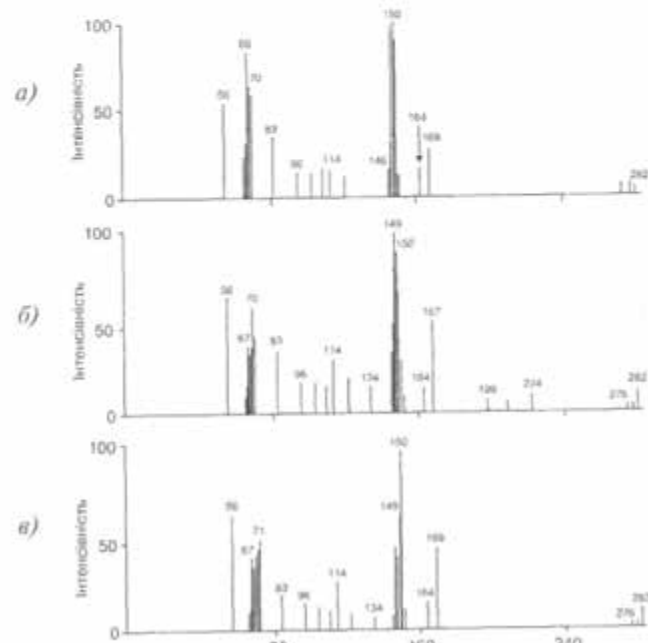


Рис. 2.17. Типовий мас-спектр біоаерозолів:
 а — *Pseudomonas putida*, б — *Bacillus cereus*, в — *Bacillus subtilis*

Моделювання поширення забруднень в атмосфері

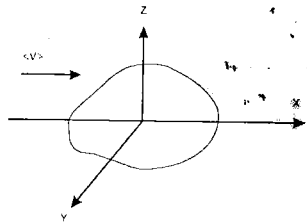


Рис. 2.18. Поширення клубу забруднювача під впливом вітру

Розглянемо клуб забруднювача, що поширюється під впливом вітру в просторі в площині x, z (рис. 2.18). 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 :

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\langle V \rangle} G_y G_z, \quad (2.28)$$

де

$$G_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right], \quad (2.29)$$

$$G_z = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right]. \quad (2.30)$$

Тут σ_y і σ_z — стандартні відхилення дисперсії у напрямках y та z ; Q вимірюється в $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$.

Звідси

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\langle V \rangle} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \right\} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} =$$

$$= \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right]. \quad (2.31)$$

Якщо центр клубу забруднювача знаходиться на висоті H від земної поверхні, то концентрація забруднювача в будь-якій точці на висоті z визначається за виразом:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]. \quad (2.32)$$

Схему поширення клубу забруднювача наведено на рис. 2.19. Величини коефіцієнтів дисперсії σ і σ залежно від відстані до джерела забруднення та атмосферних умов наведено в номограмах (рис. 2.20); категорії атмосферної стабільності оцінюють за табл. 2.4.

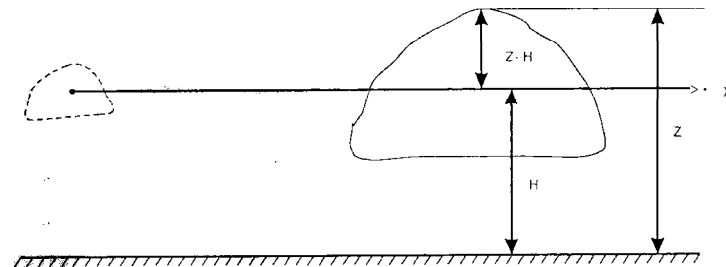


Рис. 2.19. Схема поширення клубу забруднювача

2.4. Категорії атмосферної стабільності

Швидкість приповерхневого (10 м) вітру, м·с ⁻¹	День: характеристика сонячного випромінювання, що надходить			Ніч: рівень хмарності	
	Інтенсивне	Помірне	Слабке	≥ 4/8 низької хмарності	≤ 3/8 низької хмарності
< 2	A	A-B	B		
2+3	A-B	B	C	E	F
3+5	B	B-C	C	D	E
5+6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

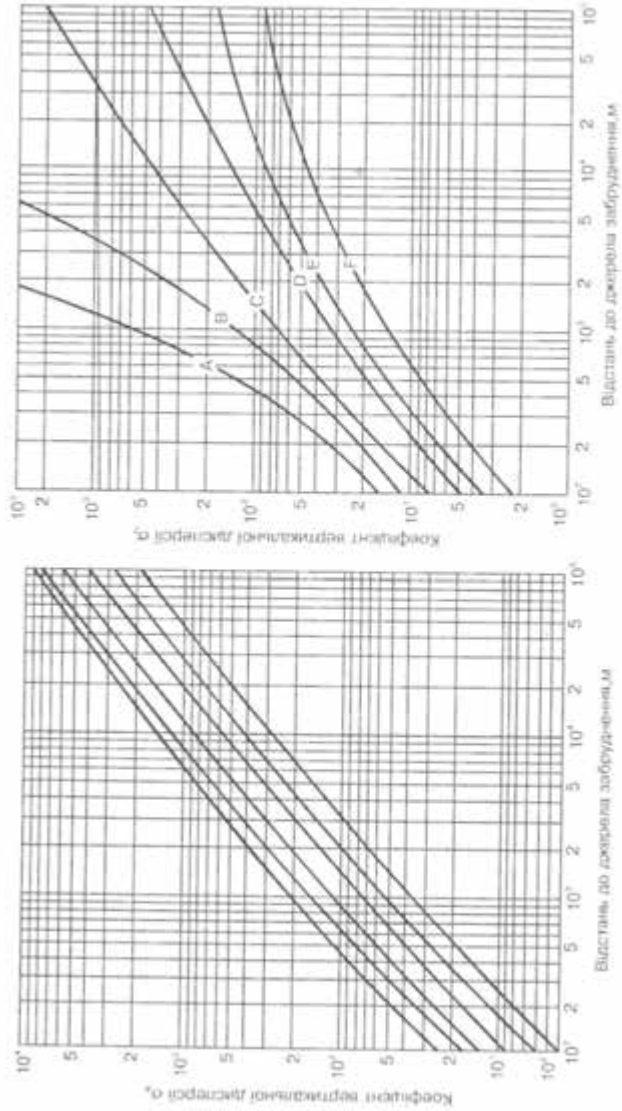


Рис. 2.20. Номограми для визначення коефіцієнтів дисперсії залежно від відстані до джерела забруднення та атмосферних умов: А — надзвичайно нестабільні, В — помірно нестабільні, С — трохи нестабільні, D — нейтральні, E — трохи стабільні, F — помірно стабільні атмосферні умови

Приклад

Хмара газу H_2S рухається зі швидкістю $\langle V \rangle = 2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Потужність джерела забруднення — 500 кг/день. Визначити висоту хмари на відстані $x = 2000 \text{ м}$ від джерела, при якій концентрація газу не перевищує $30 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$. Атмосферна стабільність відповідає категорії F.

Розв'язок

Припускаючи, що максимальну концентрацію газ має на рівні земної поверхні ($z = 0$) і те, що хмара поширюється у напрямку x (тобто $y = 0$), рівняння (2.32) можна записати у вигляді:

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] = \\ = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{H^2}{\sigma_z^2}\right].$$

Підставляємо числові дані:

$$30 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} = \frac{500 \text{ кг} / 86400 \text{ с}}{3,14 \cdot 70 \cdot 20 \cdot 2} \exp\left[-\frac{H^2 \text{ м}^2}{2 \cdot 20^2 \text{ м}^2}\right].$$

Звідси

$$\exp\left[-\frac{H^2}{800}\right] = 0,046. \quad H = 49,63 \text{ м}.$$

Моделювання піднімання клуба забруднювача в атмосфері

Уявимо джерело, що надсилає в атмосферу нагрітий до температури T_s клуб забруднювача. Якщо температура T_a навколишнього середовища менша за T_s , відбувається піднімання клуба. Рівняння, що описує процес піднімання клуба забруднювача, має вигляд:

$$\Delta H = 2,6 \left(\frac{F}{\langle V \rangle S} \right)^{1/3}, \quad (2.33)$$

де S — параметр стабільності, F — початковий потік забруднювача, що надсилається з джерела, $\langle V \rangle$ — середня швидкість вітру на висоті H .

Початковий потік забруднювача F визначається за виразом:

$$F = \frac{g(T_s - T_a)\langle U \rangle \left(\frac{D}{2}\right)^2}{T_s} \quad (2.34)$$

Тут g — прискорення вільного падіння, $\langle U \rangle$ — середня швидкість надсилання забруднювача з джерела, D — діаметр клуба.

Параметр стабільності S у рівнянні (2.33) визначається за формулою:

$$S = \frac{g}{T_a} \left[\frac{\Delta T_a}{\Delta z} + 0,01^\circ \text{C} \cdot \text{м}^{-1} \right] \quad (2.35)$$

Процес поширення клуба забруднювача в атмосфері наведено на рис. 2.21.

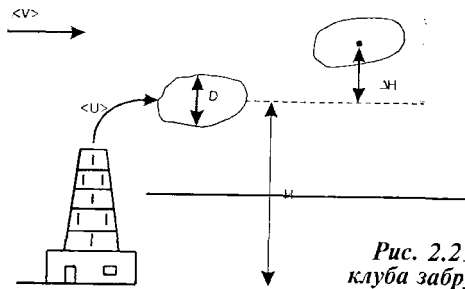


Рис. 2.21. Процес поширення клуба забруднювача в атмосфері

Приклад

Паперова фабрика викидає у повітря клуб газу діаметром $D = 2,5$ м з початковою швидкістю $\langle U \rangle = 20$ м · с⁻¹. Температура газу $T_s = 122$ °С, а температура повітря $T_a = 17$ °С. Середня швидкість вітру $\langle V \rangle = 2$ м · с⁻¹. Визначити висоту піднімання клубу газу, якщо градієнт температури $\frac{\Delta T}{\Delta z} = -6$ °С · км⁻¹.

Розв'язок

Визначимо початковий потік забруднювача:

$$F = \frac{g(T_s - T_a)\langle U \rangle \left(\frac{D}{2}\right)^2}{T_s} = \frac{9,81 \cdot (395 - 290) \cdot 20 \left(\frac{2,5}{2}\right)^2}{395} = 81,4 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-3}$$

Параметр стабільності дорівнює:

$$S = \frac{g}{T_a} \left[\frac{\Delta T_a}{\Delta z} + 0,01^\circ \text{C} \cdot \text{м}^{-1} \right] = \frac{9,81}{290} (-0,006 + 0,01) = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-2}$$

Звідси висота піднімання клубу газу визначиться так:

$$\Delta H = 2,6 \left(\frac{81,4}{2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/3} = 174,3 \text{ м}$$

Контрольне завдання

Завод викидає в атмосферу клуб газу SO_2 діаметром 1 м через трубу висотою 150 м. Температура клубу — 100 °С, температура повітря 15 °С, середня швидкість вітру $\langle V \rangle = 15$ м · с⁻¹, швидкість викидів газу $\langle U \rangle = 10$ м · с⁻¹, градієнт температури $\frac{\Delta T}{\Delta z} = -8$ °С · км⁻¹. Визначити висоту піднімання газу.

Відповідь: $H = 46$ м.

Наукова робота

Виміряти ширину некротичної облямівки листя каштанів, що ростуть на різній відстані від автостради. Побудувати графік залежності середньої ширини облямівки від відстані дерева до автостради (вимірювання провести не менше трьох разів). Нанести на графік похибки вимірювань.

Репродуктивний тест

Знайдіть у бібліотечі або через систему інтернет відомості про механізми виникнення смогу. З яких основних компонентів складається смог?

Альтернативний тест

Чи правильне твердження, що:

1. Спектроскопія Фур'є перетворення оперує в частотному масштабі, тобто досліджує потужність оптичного випромінювання залежно від частоти (довжини хвилі). Так Ні
2. Озоновий зонд Брюера-Маста не потребує зовнішньої напруги. Так Ні
3. Перехід від туману (хмари) до дощу визначається розмірами водяних крапель та швидкістю їхнього руху. Так Ні

Акордно-вибірковий тест

Знайти правильні відповіді на запитання

«Які частинки можна віднести до біоаерозолів?»

- | | |
|-------------------|--------------------|
| 1. віруси; | 5. туман; |
| 2. пісок; | 6. бактерії; |
| 3. тютюновий дим; | 7. частинки комах; |
| 4. пилок; | 8. спори. |

Парно-вибірковий тест

До якого типу забруднень (а чи б) належать забруднювачі за номерами 1—7?

- | | |
|-------------------------------------|---|
| а. Глобальні забруднення атмосфери; | 1. смоги; |
| | 2. важкі метали; |
| б. Локальні забруднення атмосфери; | 3. радіоактивні забруднення; |
| | 4. атмосферні гази; |
| | 5. хімічні сполуки в повітрі
індустріальних зон; |
| | 6. кислотні дощі; |
| | 7. пестициди. |

Конструктивний тест

1. Які двигуни можна вважати альтернативними двигунами внутрішнього згоряння?
2. Які типи палива є менш небезпечними для навколишнього середовища?
3. Як би Ви модифікували автомобільний двигун, щоб зменшити кількість викидних газів?

Домашнє завдання

Побудувати графік залежності швидкості падіння ($\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$) водяної краплі у повітрі від її діаметра (в мікрометрах) в логарифмічному масштабі. Густина повітря — $1,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, температура повітря 20°C , коефіцієнт в'язкості повітря — $1,8\cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

III. ЕДАФІЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА

Едафічні фактори середовища включають структуру та склад ґрунтів, сукупність фізичних і хімічних властивостей фунтів, що справляють екологічний вплив на живі організми.

Компоненти ґрунту

До складу ґрунту входять такі основні компоненти:

Неорганічні мінеральні частинки, що складаються з алюмінію, кремнію та інших мінералів, розміри яких коливаються від маленьких частинок глини ($0,002 \text{ мкм}$) до більших гранул піску, гальки та гравію. Кількість цих частинок та їх структура визначають водоутримуючу здатність ґрунту, доступність до нього повітря й поживних речовин.

Органічні залишки. Рештки рослин і тварин переходять через кілька стадій розкладання в стабільну субстанцію — гумус.

Вода є необхідним компонентом для активності мікроорганізмів. Кількість води в фунті залежить від опадів, структури ґрунту та населеності мікроорганізмами. Вода міститься в порах ґрунту та поглинається поверхнею частинок сухого ґрунту. Різноманітні поживні речовини розчинюються у воді і стають доступними мікроорганізмам.

Гази, основними з яких є кисень і азот, а також двоокис вуглецю, заповнюють пори ґрунту, не зайняті водою. В насиченому ґрунті невелика кількість газів може бути розчинена у воді.

Біологічні системи включають коріння рослин, дрібних тварин та мікроорганізми. 1 г ґрунту містить 2,5 млн бактерій, 500 000 грибів, 50 000 водоростей та 30 000 найпростіших.

Хімічні властивості ґрунту

Гумус. Цей хімічний компонент фунту — аморфна темнокольорова субстанція, що походить із залишків рослин (меншою мірою тварин) і є сумішшю фенольних сполук,

карбонічних кислот та складних ефірів жирних кислот. До складу гумусу входять гумінові й фульвікові кислоти, а також гуміни — нерозчинні залишки цих кислот. Гумінові кислоти — це група високомолекулярних сполук. Фульвікові кислоти відрізняються від гумінових вищим умістом кисню і меншим — вуглецю та азоту. Склад гумусу істотно залежить від місцевих умов, рівня окислів та температури.

Оксиди заліза. Численні сполуки заліза в ґрунті впливають на колір останнього. Наявність і тип оксидів заліза в ґрунті залежать від багатьох чинників — насамперед від режиму вологості, вмісту кремнієвих мінералів, інтенсивності видужування, характеру гумусу та рівня його накопичення.

Карбонати й розчинені солі. На забарвлення ґрунту значною мірою впливають світлозабарвлені та білі субстанції, до складу яких входять карбонати, кварц, каолініт і деякі розчинені солі. Крім того, до цієї групи компонентів можна віднести мінерали: польовий шпат, кальцит, кристали гіпсу та світлозабарвлені сполуки алюмінію.

Фізичні властивості ґрунту

Фізичні властивості ґрунту визначаються текстурою, структурою, об'ємною густиною, поруватістю, аерацією, кольором, вологістю та температурою (останні два параметри розглянуто в попередніх розділах «Вологість» і «Температура» відповідно).

1. МЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ

Текстура ґрунту

Текстуру ґрунту характеризують відносні пропорції піску, мулу й глини. Залежно від вмісту цих компонентів розрізняють 12 текстурних класів ґрунту (рис. 3.1). Згідно з класифікацією, запропонованою Міжнародним товариством з вивчення ґрунтів, текстурні компоненти ґрунту класифікують відповідно до розмірів частинок: глина — до 0,002 мм; мул — 0,002+0,02; дрібний пісок — 0,02+0,2; круп-

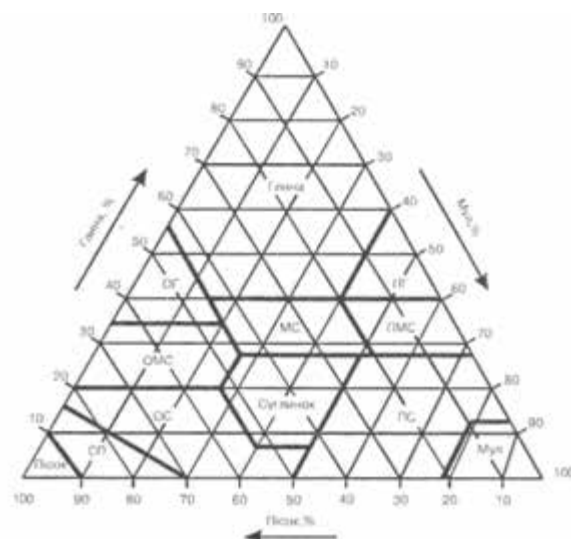


Рис. 3.1. Текстурний трикутник для класифікації ґрунтів: ОМС — опіщаний мулуватий суглинок, ОТ — опіщана глина, ОС — опіщаний суглинок, МС — мулуватий суглинок, ПС — пілуватий суглинок, ПМС — пілувато-мулуватий суглинок, ПП — пілувата глина

ний пісок — 0,2+2,0 мм; гравій — більше за 2,0 мм. Частинки, менші за 1 мкм, називають *колоїдними*. До параметрів, пов'язаних з текстурою, відносять *площу поверхні* ґрунтової частинки. Дрібні частинки ґрунту мають більшу поверхню на одиницю площі або одиницю об'єму.

Структура ґрунту

Структуру ґрунту визначають за розмірами, формою і упаковкою агрегатів та порожнин між ними. *Агрегати* — первинні ґрунтові частинки, здатні зв'язуватися одна з одною міцніше, ніж з іншими частинками. Системи ідентифікації ґрунтової структури передбачають врахування форми й упаковки (тип), розмірів (клас) та виразності (ранг) частинок ґрунту й пор.

Типи структурних одиниць (визначають за чотирма можливими формами частинок і пор між ними): *пластинчасті*, якщо агрегати формують відносно тонкі горизон-

тальні пластини, листки або лінзи; *призматичні*, коли агрегати вишиковуються у вертикально орієнтовані призми або колони; *блочні*, що характеризуються наявністю блоків розміром 1 + 10 см, звичайно з шістьма гранями та гострими кутами; *сферичні*, що утворюються сферичними гранулами або крихітками ґрунту.

Класи структурних одиниць передбачають поділ ґрунтових одиниць за розмірами: *дуже дрібні, дрібні, помірні, великі, дуже великі*.

Ранги структурних одиниць продовжують класифікацію частинок за розмірами і підкреслюють, як чітко відрізняються частинки в непорушеному ґрунті; тут слід розрізняти *сильні, помірні та слабкі* категорії.

На структуру ґрунту впливає характер упаковки ґрунтових частинок. Розглянемо як приклад пакування сферичних частинок, що можуть формувати *монодисперсні* (з мінімальною густиною й максимальною пористістю) та *полідисперсні* (з максимальною густиною й мінімальною пористістю) системи. Можливі типи упаковки частинок наведено на рис. 3.2. Залежно від типу упаковки сферичних частинок густина може змінюватися в межах 1390+1970 кг·м⁻³, а пористість — 48+26 % відповідно.

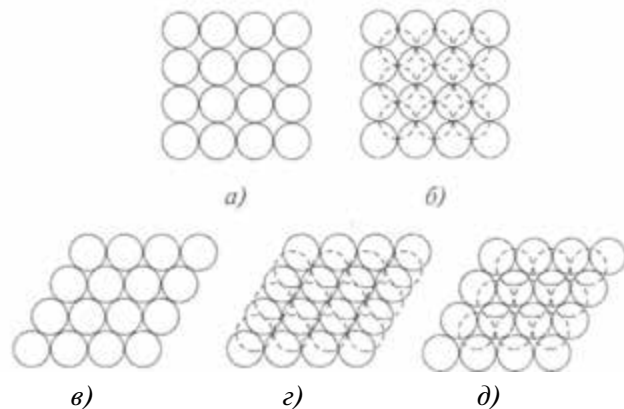


Рис. 3.2. Можливі типи упаковки частинок ґрунту: а — кубічна, б — кубічна тетрагональна, в — тетрагональна клинчаста, г — тетрадральна

Густина ґрунту

Густина твердої речовини — це відношення маси твердої речовини ґрунту M_{sp} до її об'єму V_{sp} :

$$\rho_{sp} = M_{sp} / V_{sp} \quad (3.1)$$

Для більшості ґрунтів середня об'ємна густина — 2600+2700 кг·м⁻³. На рівень цього параметру впливає відносний вміст таких компонентів як оксиди заліза (2900 кг·м⁻³), кварц (2660 кг·м⁻³), глинисті мінерали (2650 кг·м⁻³), органічна речовина (1300 кг·м⁻³), вода (1000 кг·м⁻³) й повітря (1,2 · 10⁻³ кг·м⁻³).

З урахуванням присутніх у ґрунті пор та води розрізняють ще такі параметри:

Об'ємна густина сухого ґрунту, що визначається за виразом:

$$\rho_{sp} = M_{sp} / V_{su} = M_{sp} / (V_{sp} + V_a + V_w), \quad (3.2)$$

де V_a — об'єм пор, V_w — об'єм води у ґрунті.

Оскільки близько 50 % ґрунту припадає на пори, об'ємна густина сухого ґрунту становить близько 1300+1350 кг·м⁻³.

Загальна об'ємна густина ґрунту дорівнює відношенню загальної маси вологого ґрунту до його об'єму:

$$\rho_{su} = M_{su} / V_{su} = (M_{sp} + M_w) / (V_{sp} + V_a + V_w). \quad (3.3)$$

Пористість ґрунту

Пористість ґрунту дорівнює відношенню сумарного об'єму всіх пор та проміжків між структурними агрегатами до загального об'єму ґрунту. Цей параметр характеризує той простір V_p між частинками ґрунту, який займають повітря V_a або вода V_w , і залежить від розмірів, форми та кількості окремих пор. Визначається пористість ґрунту таким чином:

$$f = V_p / V_{su} = (V_a + V_w) / (V_{sp} + V_a + V_w). \quad (3.4)$$

Відносна пористість дорівнює відношенню об'єму, що займають пори, до об'єму твердої речовини ґрунту:

$$e = V_p / V_{sp} = (V_a + V_w) / (V_{su} - V_{sp}) = (V_{su} - V_{sp}) / V_{sp}. \quad (3.5)$$

Між пористістю ґрунту та відносною пористістю є такі співвідношення:

$$e = f / (1 - f). \quad (3.6)$$

$$f = e / (1 + e). \quad (3.7)$$

Пористість пов'язана з об'ємною густиною:

$$f = (\rho_{mp} - \rho_{sp}) / \rho_{mp} = 1 - \rho_{sp} / \rho_{mp} \quad (3.8)$$

$$\rho_{sp} = (1 - f) \rho_{mp} \quad (3.9)$$

Розміри пор, які можна спостерігати візуально, підлягають певній класифікації (табл. 3.1).

3.1. Класифікація ґрунтових пор за розмірами

Назва	Розміри пор, мкм	Функції пор
Макропори	> 1000	Забезпечують швидкий дренаж води після дощу або іригації
Мезопори	10+1000	Забезпечують доступ певної кількості води для рослин або дренажу
Мікропори	< 10	Утримують міцно воду, певна кількість якої надається рослинам

За розмірами пори ділять на чотири класи: *дуже дрібні* (<0,5 мм), *дрібні* (0,5+2 мм), *середні* (2+5 мм) та *великі* (>5 мм).

Кількість пор, що припадає на одиницю площі (1 см²), класифікують таким чином: *мала* (< 1); *звичайна* (1+5) та *велика* (> 5).

Форма пор може бути сферичною, еліптичною або циліндричною.

Вертикальна безперервність пор у ґрунті є також важливим параметром пористості. Для оцінки цього параметра використовують середню вертикальну відстань у зволоженому ґрунті, на якій мінімальний діаметр пор перевищує 0,5 мм. Тут розрізняють три класи безперервності: *низька* (< 1 см), *середня* (1+5 см) та *висока* (10 см і вище).

Приклад

Визначити об'ємну густину сухого ґрунту в циліндричній банці діаметром 6 см та висотою 2,5 см, якщо маса ґрунту — 99 г.

Розв'язок

Обчислимо об'єм ґрунту:

$$V_{sp} = \frac{\pi D^2}{4} h = \frac{3,14 \cdot 6^2}{4} \cdot 2,5 = 70,65 \text{ см}^3.$$

Використовуючи формулу (3.2), знайдемо густину ґрунту:
 $\rho_{sp} = M_{sp} / V_{sp} = 99 \text{ г} / 70,65 \text{ см}^3 = 1,4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3} = 1400 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$

Контрольне завдання

Визначити об'ємну густину сухого ґрунту, що має форму куба зі стороною 10 см, маса якого 1300 г.

Відповідь: 1300 кг · м⁻³.

Приклад

Визначити площу поверхні сферичної ґрунтової частинки, маса якої — 1 г, а густина — 2,65 г · см³.

Розв'язок

Площа поверхні сфери — $S = 4\pi r^2$. Для її визначення знайдемо радіус частинки за виразом (3.2):

$$\rho_{sp} = M_{sp} / V_{sp} = M_{sp} / (4/3)\pi r^3,$$

звідки

$$r^3 = (3/4) M_{sp} / \pi \rho_{sp} = (3/4) \cdot 1 \text{ г} / 2,65 \text{ г} \cdot \text{см}^3 \cdot 3,14 = 0,0901 \text{ см}^3,$$

а

$$\rho = 0,448 \text{ см} = 4,48 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Отже, площа поверхні сферичної ґрунтової частинки дорівнює:

$$S = 4\pi r^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot (4,48 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2 = 2,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Контрольне завдання

Визначити сумарну площу поверхні ґрунтових сферичних частинок в 1 г ґрунту, якщо кількість частинок — 10⁶, а маса кожної частинки — 10⁻⁶ г.

Відповідь: 2,52 · 10⁻² м².

Приклад

Зразок вологого ґрунту масою 1 кг і об'ємом 0,64 · 10⁻⁴ м³ було висушено в печі, після чого маса сухого ґрунту дорівнювала 0,8 кг. Припускаючи, що густина твердої речовини ґрунту — 2650 кг · м⁻³, визначити об'ємну густину сухого ґрунту, пористість та відносну пористість ґрунту.

Розв'язок

Знаходимо об'ємну густину сухого ґрунту за виразом (3.2):

$$\rho_{sp} = M_{sp} / V_{заг} = 0,8 \text{ кг} / 0,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 1250 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Пористість ґрунту визначимо за допомогою рівняння (3.8):

$$f = 1 - \rho_{sp} / \rho_{mp} = 1 - 1250 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} / 2650 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} = 1 - 0,472 = 0,528.$$

Визначимо об'єм твердої речовини ґрунту:

$$V_{sp} = M_{sp} / \rho_{sp} = 0,8 \text{ кг} / 2650 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} = 3,02 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Відносну пористість ґрунту знаходимо з рівняння (3.5):

$$e = V_n / V_{sp} = (V_{заг} - V_{sp}) / V_{sp} = (0,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 - 3,02 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3) / 3,02 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 1,12.$$

Контрольне завдання

Визначити пористість ґрунту, якщо густина твердої речовини дорівнює $2600 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а об'ємна густина сухого ґрунту — $1460 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Відповідь: 0,44.

Перенесення маси

Перенесення маси (поживних речовин, нітратів, хлоридів, пестицидів) з однієї точки ґрунту до іншої відбувається за двох фізичних процесів.

Молекулярна дифузія — переміщення молекул з області з високою концентрацією в область з низькою концентрацією при відсутності рушійної сили, тобто в результаті хаотичного руху. Математично цей процес описується законом Фіка: потік речовини з області з однією концентрацією в область з іншою концентрацією пропорційний градієнту концентрацій:

$\frac{dc}{dx}$.

$$\frac{dn}{dt} = -D \cdot S \cdot \frac{dc}{dx}, \quad (3.10)$$

де n — кількість молекул; S — площа, перпендикулярна осі, вздовж якої відбувається зміна концентрації; D — коефіцієнт дифузії ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ або $\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$).

Типові значення коефіцієнта молекулярної дифузії наведено в табл. 3.2.

3.2. Коефіцієнт молекулярної дифузії ґрунтових фаз

Фаза	D , $\text{м}^2 \cdot \text{с}$
Газоподібна	$1 \cdot 10^{-5}$
Рідка	$1 \cdot 10^{-9}$
Тверда	$1 \cdot 10^{-13}$

Процес молекулярної дифузії залежить від природи ґрунтової системи, розчиненої речовини. Чим більша величина концентраційного градієнта, тим більший потік розчинених молекул.

Приклад

Пестицид розкидано по поверхні ґрунту. Через два тижні концентрація пестициду на глибині 5 см становила $c_1 = 5 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$, а на глибині 10 см — $c_2 = 15 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$. Середній вміст води в ґрунті $\theta_v = 0,25 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$, коефіцієнт молекулярної дифузії пестициду становить $D = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Визначити: концентрацію розчиненого пестициду на кожній глибині, градієнт концентрації, величину потоку розчиненого пестициду, напрямок потоку.

Розв'язок

Визначимо концентрації розчиненого пестициду на кожній глибині:

$$C_1 = c_1 \theta_v = 5 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot 0,25 \text{ см}^3 / \text{см}^3 \cdot (\text{л} / 1000 \text{ см}^3) = 0,00125 \text{ мкг} \cdot \text{см}^3 \text{ (ґрунту)};$$

$$C_{12} = c_2 \theta_v = 15 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot 0,25 \text{ см}^3 / \text{см}^3 \cdot (\text{л} / 1000 \text{ см}^3) = 0,00375 \text{ мкг} \cdot \text{см}^3 \text{ (ґрунту)}.$$

Звідси градієнт концентрації дорівнює:

$$dC/dz = (0,00375 \text{ мкг} \cdot \text{см}^3 - 0,00125 \text{ мкг} \cdot \text{см}^3) / [-10 \text{ см} - (-5 \text{ см})] = -0,0005 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-4}.$$

Потік розчиненого пестициду визначимо за рівнянням Фіка:

$$J_D = dn/dt = (4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с})(-0,0005 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-4}) = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{г}.$$

Оскільки $J_D > 0$, потік спрямований вгору.

Конвекція — перенесення розчиненої речовини, яке визначається швидкістю рідини, що рухається, та концентрацією C розчиненої речовини:

$$J_{CM} = q_z C, \quad (3.11)$$

де J_C — густина конвекційного потоку, q_z — густина потоку води ($\text{м}^3 \text{ води} / \text{м}^2 \cdot \text{с} \text{ ґрунту}$) у напрямку z .

Відношення q_z / q_v називають поровою швидкістю води.

Приклад

Після двох днів дощу середня концентрація пестициду дорівнювала $10 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$. Порова швидкість руху води униз дорівнює $0,15 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$, а вміст води — $0,40 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$. Визначити густину конвекційного потоку (в $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$) розчиненого пестициду та напрямок цього потоку.

Розв'язок

Підставляємо числові дані в рівняння (3.11):

$$J_c = q_c C = (-0,15 \text{ см}^3 / \text{см}^2 \cdot \text{г})(10 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1})(0,40 \text{ см}^3 / \text{см}^3) = = (10^8 \text{ см}^2 / \text{га})(24 \text{ г/день})(1 \text{ кг} / 10^6 \text{ мкг}) = -0,0036 \text{ кг/га} \cdot \text{день}.$$

Оскільки $J_c < 0$, потік спрямований донизу.

Методи вимірювання механічних параметрів ґрунту

Седиментація ґрунтових частинок є одним з поширених методів вивчення розподілу ґрунтових частинок за розмірами. Розглянемо частинку масою m і густиною ρ , занурену в рідке середовище з густиною ρ_0 . На цю частинку діють гравітаційна сила

$$F_{sp} = mg = V\rho g, \quad (3.12)$$

спрямована донизу, та архімедова сила

$$F_0 = m_0 g = V\rho_0 g, \quad (3.13)$$

спрямована вгору, яка чисельно дорівнює вазі $m_0 g$ рідини, виштовхнутій частинкою. Результируюча сила дорівнює:

$$F_s = F_{sp} - F_0 = V\rho g - V\rho_0 g = Vg(\rho - \rho_0). \quad (3.14)$$

Якщо $\rho > \rho_0$, результируюча сила спрямована донизу (процес седиментації). Водночас рідке середовище характеризується в'язкістю (внутрішнім тертям). У випадку частинки сферичної форми радіуса r сила опору, зумовлена в'язкістю, визначається за законом Стокса:

$$F_\eta = 6\pi\eta r V, \quad (3.15)$$

а швидкість седиментації за рівнянням:

$$V_{sed} = Vg(\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = = \frac{2}{9} g(\rho - \rho_0) r^2 / \eta. \quad (3.16)$$

Звідси можна отримати вирази для визначення діаметра d частинки, що осідає в рідині:

$$d = 2r = [18V\eta / g(\rho - \rho_0)]^{1/2}, \quad (3.17)$$

та часу t проходження частинкою відстані L :

$$t = 18L\eta / g d^2 (\rho - \rho_0). \quad (3.18)$$

Під час вимірювання швидкості седиментації ґрунтових частинок слід враховувати залежність густини та в'язкості рідини від температури. Для води цю залежність наведено в табл. 3 та 4 (див. Додаток).

Приклад

Визначити швидкість седиментації у воді частинки мулу діаметром $0,02 \text{ мм}$, якщо густина частинки — $2650 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а температура води становить $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язок

Знаходимо в табл. 3 (див. додаток), що густина води при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює $998,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а в табл. 4 (див. додаток) — що коефіцієнт в'язкості води при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Підставляємо числові значення в рівняння (3.16):

$$V = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^2 (20 \cdot 10^{-6} \text{ м})^2 (2650 - 998,2) \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} / (18) (1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}) = 3,59 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Контрольне завдання

Визначити час проходження відстані 20 см у воді при $30 \text{ }^\circ\text{C}$ частинками: піску ($d = 50 \text{ мкм}$); мулу ($d = 2 \text{ мкм}$); глини ($d = 1 \text{ мкм}$). Середня густина частинок $2650 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Відповідь: 71 с ; $12,36 \text{ г}$; $49,44 \text{ г}$.

Лазерна дифрактометрія ґрунтових частинок полягає в освітленні частинок лазерним випромінюванням, реєстрації та аналізу дифракційної картини за допомогою багатоеlementного кільцеподібного детектора (рис. 3.3). Характер дифракційної картини значною мірою залежить від розмірів частинок ґрунту.

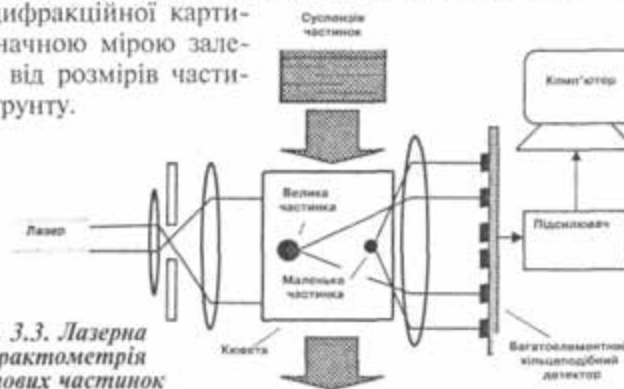


Рис. 3.3. Лазерна дифрактометрія ґрунтових частинок

2. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ

Теплоємність тіла C — величина, чисельно рівна кількості теплоти, яку необхідно дати даному тілу для нагрівання на 1 К:

$$C = Q/\Delta T, \quad (3.19)$$

де Q — кількість теплоти, передана тілу для нагрівання на ΔT градусів.

Одиниця вимірювання теплоємності — Дж · К⁻¹.

Питома теплоємність речовини c — величина, чисельно рівна кількості теплоти, яку необхідно надати даній речовині масою 1 кг для нагрівання на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}. \quad (3.20)$$

Одиниця вимірювання питомої теплоємності — Дж · кг⁻¹ · К⁻¹.

Об'ємна питома теплоємність речовини c_V — величина, чисельно рівна кількості теплоти, яку необхідно надати даній речовині об'ємом 1 м³ для нагрівання на 1 К:

$$c_V = \frac{Q}{V \cdot \Delta T}. \quad (3.21)$$

Одиниця вимірювання об'ємної питомої теплоємності — Дж · м⁻³ · К⁻¹.

Значення питомої теплоємності та об'ємної питомої теплоємності основних компонентів ґрунту наведено в табл. 3.3.

Для ґрунту, що складається з трьох фаз, об'ємна питома теплоємність визначається за виразом:

$$c_V = \phi_{mp} c_{mp} + \phi_a c_a + \phi_g c_g, \quad (3.22)$$

де ϕ_{mp} — об'ємна частка твердої речовини, c_{mp} — об'ємна питома теплоємність твердої речовини, ϕ_a — об'ємна частка ґрунтової води, c_a — об'ємна питома теплоємність ґрунтової води, ϕ_g — об'ємна частка ґрунтового повітря, c_g — об'ємна питома теплоємність ґрунтового повітря.

Об'ємна частка твердої речовини складається з двох компонентів:

$$\phi_{mp} c_{mp} = \phi_m c_m + \phi_o c_o, \quad (3.23)$$

де ϕ_m — об'ємна частка мінерального компонента, c_m — об'ємна питома теплоємність мінерального компонента, ϕ_o — об'ємна частка органічного компонента, c_o — об'ємна питома теплоємність органічного компонента.

3.3. Питомі теплоємності ґрунтових компонентів

Компонент	Питома теплоємність, Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹	Об'ємна питома теплоємність, Дж · м ⁻³ · К ⁻¹
Гумус	1,67 · 10 ³	2,34 · 10 ⁶
Вода	4,18 · 10 ³	4,18 · 10 ⁶
Лід	2,09 · 10 ³	1,92 · 10 ⁶
Повітря	1,05 · 10 ³	1,3 · 10 ³
Глина	0,92 · 10 ³	2,09 · 10 ⁶
Кварц	0,80 · 10 ³	2,09 · 10 ⁶
Слюда	0,88 · 10 ³	2,47 · 10 ⁶
Граніт	0,80 · 10 ³	2,09 · 10 ⁶
СаСО ₃	0,84 · 10 ³	2,26 · 10 ⁶
Fe ₂ O ₃	0,63 · 10 ³	3,14 · 10 ⁶
Крейда	0,88 · 10 ³	1,93 · 10 ⁶
Деревина	1,76 · 10 ³	1,59 · 10 ⁶

Звідси

$$c_V = \phi_m c_m + \phi_o c_o + \phi_a c_a + \phi_g c_g. \quad (3.24)$$

Для переважної більшості мінеральних ґрунтів внесок повітря й органічної компоненти в об'ємну частку твердої речовини незначний, завдяки чому останнє рівняння можна записати у вигляді:

$$c_V = f_m c_m + f_a c_a. \quad (3.25)$$

Враховуючи, що

$$\phi_m = 1 - f = 1 - (1 - \rho_{gp}/\rho_{mp}) = \rho_{gp}/\rho_{mp} = \phi_{mp}, \quad (3.26)$$

а також

$$c_m = c_{gp} \rho_{mp}, \quad (3.27)$$

отримуємо вираз для об'ємної частки мінерального компонента:

$$\phi_m c_m = \phi_{mp} c_m = (\rho_{gp}/\rho_{mp}) c_{gp} \rho_{mp} = \rho_{gp} c_{gp}. \quad (3.28)$$

Тут ϕ — пористість ґрунту, $c_{gp} = 837$ Дж · кг⁻¹ · К⁻¹ — питома теплоємність твердої фази, ρ_{gp} і ρ_{mp} — об'ємна густина сухого ґрунту й густина твердої речовини відповідно.

Для водної фази ґрунту об'ємна питома теплоємність визначається так:

$$\phi_a c_a = (\rho_w/\rho_w) \phi_m c_{gp} = \rho_w \phi_m c_{gp} = 4180 \phi_m \rho_w, \quad (3.29)$$

де $c_w = 4180$ Дж · кг⁻¹ · К⁻¹ — питома теплоємність води, а ϕ_m — масова частка води в ґрунті.

Рівняння (3.25) можна переписати у вигляді:

$$c_a = \rho_{sp} c_{sp} + \rho_{sp} \phi_{um} c_a = \rho_{sp} [837 + (4180 \phi_{um})]. \quad (3.30)$$

Якщо об'ємна густина сухого ґрунту стала, то залежність c_a від ϕ_{um} має лінійний характер; при сталому вмісті води ϕ_{um} у ґрунті c_a залежить лінійно від ρ_{sp} .

Приклад

Визначити об'ємну питому теплоємність ґрунту, якщо в 1 м³ висушеного в печі ґрунту міститься однакова кількість твердої речовини й пор.

Розв'язок

Використаємо рівняння (3.22), (3.26)–(3.27):

$$c_V = \phi_{sp} c_{sp} + \phi_a c_a + \phi_a c_a = \phi_{sp} c_{sp} \rho_{sp}$$

Підставляємо числові дані, нехтуючи вмістом води в ґрунті і часткою повітря:

$$\begin{aligned} c_V &= \phi_{sp} c_{sp} = \phi_{sp} c_{sp} \phi_{sp} = \\ &= 0,5 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3} \cdot 2650 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 837 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} = \\ &= 1,1 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}. \end{aligned}$$

Якщо той же ґрунт заповнити водою, об'ємна питома теплоємність ґрунту становитиме (використовуємо дані табл. 3.3):

$$\begin{aligned} c_V &= \phi_{sp} c_{sp} + \phi_a c_a = 1,1 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1} + \\ &+ (0,5 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3} \cdot 4,18 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}) = 3,2 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}. \end{aligned}$$

Якщо тільки половину повітряного простору в ґрунті заповнено водою, об'ємна питома теплоємність ґрунту стане рівною:

$$\begin{aligned} c_V &= \phi_{sp} c_{sp} + \phi_a c_a = 1,1 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1} + \\ &+ (0,25 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3} \cdot 4,18 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}) + \\ &+ (0,25 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3} \cdot 1,21 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}) = \\ &= 2,15 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}. \end{aligned}$$

Перенесення теплоти

Перенесення теплоти відбувається за різниці температур, що має місце в ґрунті або між окремими фазами ґрунту. Основними процесами, що зумовлюють перенесення

теплоти, є теплопровідність, конвекція та теплове випромінювання.

Теплопровідність — перенесення тепла від більш нагрітих тіл до менш нагрітих, що приводить до вирівнювання температури. Кількісну оцінку процесу теплопровідності через речовину можна дати за допомогою закону Фур'є: кількість перенесеного шляхом теплопровідності тепла прямо пропорційна градієнтові температури

$$\Delta Q = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\Delta X} \cdot \Delta t \quad (3.31)$$

де ΔQ — кількість теплоти, що переноситься, λ — коефіцієнт теплопровідності (Вт · м⁻¹ · К⁻¹), S — площа, $\frac{\Delta T}{\Delta X}$ — градієнт температури, Δt — проміжок часу.

Значення коефіцієнта теплопровідності ґрунтових матеріалів наведено в табл. 3.4.

Фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності полягає в тому, що він характеризує теплоізоляційні властивості речовини — чим менший коефіцієнт теплопровідності, тим більша теплоізоляція, що забезпечується речовиною. Величина коефіцієнта теплопровідності ґрунту залежить від фази

3.4. Значення коефіцієнта теплопровідності для ґрунтових матеріалів

Компонент	Коефіцієнт теплопровідності, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
Повітря	0,021
Сухий ґрунт	0,125÷0,209
Вода	0,544÷0,586
Вологий ґрунт	0,836÷1,674
ґрунтові мінерали	1,255÷12,5
Кварц	8,4÷8,8
Граніт	4,2
Органічна речовина	0,25
Глина волога	2,1
Пісок сухий	1,0
Торф	0,84

грунту, текстури, об'ємної густини, вмісту води, структури, поверхневого контакту між ґрунтовими частинками, температури. Звичайно ґрунт складається з твердих частинок піску, глини, органічних речовин. Проміжки між ними заповнені або повітрям, або водою. Частинки піску мають неправильну форму й стикаються між собою лише в окремих точках. Якщо пісок сухий, то на тепловий режим впливатиме повітря з малим коефіцієнтом теплопровідності. Передача тепла від однієї частинки піску до іншої буде повільною. Якщо пісок вологий, то коефіцієнт теплопровідності збільшується й передача тепла полегшується. Той самий ефект має місце при ущільненні ґрунту. Мала теплопровідність у торфових ґрунтів через пухкість та великий вміст органічних речовин і повітря. Замерзання ґрунту спричинює перетворення вільної води на лід з відповідним зростанням теплопровідності.

Приклад

Ґрунт має температуру 35 °С на поверхні і 25 °С на глибині 1 см. Визначити густину потоку теплоти, якщо коефіцієнт теплопровідності ґрунту дорівнює 1,1 Вт·м⁻¹·К⁻¹.

Розв'язок

Використовуємо закон Фур'є:
 $\Delta Q/S \cdot \Delta t = -\lambda(\Delta T/\Delta X) = -1,1 [(308 - 298)/0,01] = -1100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Термодифузія — перенесення компонентів речовини під впливом градієнта температури. Коефіцієнт термодифузії α ґрунту визначається як зміна температури в одиниці об'єму за рахунок теплового потоку, що протікає через цей об'єм за одиницю часу під впливом дії одиниці градієнта температури. Між термодифузійною α та теплопровідністю k є такий зв'язок:

$$\alpha = k/c_v \quad (3.32)$$

Одиниця вимірювання термодифузії — м²·с⁻¹.

Типові значення коефіцієнта термодифузії наведено в табл.3.5.

На термодифузію впливають стан ґрунтової води, об'ємна густина ґрунту, склад ґрунту, органічна речовина.

3.5. Коефіцієнт термодифузії ґрунтових компонентів

Компонент	Коефіцієнт термодифузії, м ² ·с ⁻¹
Кварц	4,18·10 ⁻⁶
Глина	1,22·10 ⁻⁶
Органічна речовина	0,10·10 ⁻⁶
Вода	0,14·10 ⁻⁶
Повітря	20,50·10 ⁻⁶

Приклад

Визначити термодифузію в ґрунтовому компоненті, якщо коефіцієнт теплопровідності $k = 1,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, а об'ємна питома теплоємність $c_v = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$.

Розв'язок

Використовуємо рівняння (3.32):

$$\beta = k/c_v = 1,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} / 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1} = 5,31 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Конвекція в ґрунті відбувається, коли потік води має температуру, що відрізняється від температури ґрунту. В цьому разі густина потоку теплоти визначається за виразом:

$$J_{CT} = c_v V (T_{sp} - T_a), \quad (3.33)$$

де c_v — об'ємна питома теплоємність ґрунту, V — швидкість руху води, T_{sp} і T_a — температура ґрунту і води відповідно.

Приклад

Коефіцієнт конвективного теплообміну $\alpha = c_v V = 5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. Визначити густину конвективного потоку між поверхнею ґрунту, температура якої 40 °С, і повітрям, температура якого 20 °С.

Розв'язок

Підставляємо числові дані в рівняння (3.33):

$$J_{CT} = c_v V (T_{sp} - T_a) = \alpha (T_{sp} - T_a) = 5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \cdot (40^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Теплове випромінювання ґрунту — електромагнітне випромінювання, що утворюється ґрунтом і виникає за рахунок його внутрішньої енергії. Густина потоку теплового випромінювання визначається за виразом:

$$J_{TB} = \varepsilon \sigma T^4, \quad (3.34)$$

де ϵ — випромінювальна здатність ґрунтової поверхні (див. табл. 1.8.3), σ — стала Стефана-Больцмана, T — абсолютна температура ґрунту.

Приклад

Визначити густину потоку теплового випромінювання сухого ґрунту, якщо припустити, що 60 % випромінювання повертається атмосферою. Температура ґрунту 27 °С.

Розв'язок

З урахуванням того, що 60 % випромінювання ґрунту повертається атмосферою, рівняння (3.34) запишемо у вигляді:

$$J_{ТВ} = 0,4\epsilon\sigma T^4$$

Використовуючи дані табл. 1.8.3, визначимо густину потоку теплового випромінювання сухого ґрунту:

$$J_{ТВ} = 0,4\epsilon\sigma T^4 = 0,4 \cdot 0,95 \cdot 5,67 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4} \cdot (273 + 27)^4 \text{ К} = 174,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$$

3. ВОДЯНІ ПОТОКИ В ҐРУНТІ

Водний потенціал

Вода в ґрунті характеризується такими параметрами як кількість води та швидкість і напрямок водяного потоку. Кількість води в системі може бути описана об'ємним θ і масовим ω вмістом:

$$\theta = V_w/V_{\text{заг}} \quad (3.35)$$

$$\omega = m_w/m_{\text{сух}} \quad (3.36)$$

де V_w — об'єм води, $V_{\text{заг}}$ — загальний об'єм, m_w — маса води, $m_{\text{сух}}$ — маса сухої частки ґрунту.

Швидкість і напрямок водяного потоку в системі описується за допомогою водного потенціалу, що визначається як відношення потенціальної енергії моля, одиниці маси чи одиниці об'єму до чистої води, потенціал якої дорівнює нулю. Одиниці вимірювання водного потенціалу — Дж · моль⁻¹, Дж · кг⁻¹ або Дж · м⁻³ = Па.

Водний потенціал складається з кількох компонентів:

$$\psi = \psi_g + \psi_m + \psi_p + \psi_o \quad (3.37)$$

де ψ_g — гравітаційний потенціал, ψ_m — матричний потенціал, ψ_p — потенціал тиску, ψ_o — осмотичний потенціал.

Гравітаційний потенціал $\psi_g = gh$ визначається потенціальною енергією води, що перебуває певному положенні h щодо земної поверхні.

Матричний потенціал ψ_m характеризує потенційну енергію зв'язку води зі структурними елементами ґрунту або колоїдами. Для оцінки матричного потенціалу можна використати емпіричну формулу:

$$\psi_m = a\omega^b, \quad (3.38)$$

де ω — вміст води, a і b — константи.

На рис. 3.3 наведено зв'язок матричного потенціалу з вмістом води для ґрунтів з різною текстурою.

Потенціал тиску ψ_p характеризує здатність води виконувати роботу й визначається за виразом:

$$\psi_p = p/\rho_w, \quad (3.39)$$

де p — тиск, ρ_w — густина води.

Осмотичний потенціал ψ_o виникає, коли розчинена речовина обмежена мембраною (як це відбувається в клітині), що характеризується напівпроникністю, завдяки якій на мембрані утворюється концентраційний градієнт.

У багатьох реальних ситуаціях діють лише один чи два компоненти водного потенціалу. Розглянемо основні тенденції зміни водного потенціалу ґрунту.

Коли ґрунт насичений водою, його водний потенціал близький до нуля. Завдяки гравітаційним процесам ґрунт висушується до рівнів водного потенціалу в межах 10^4 – 33 Дж · кг⁻¹, як верхньої межі доступної ґрунтової води (польова місткість).

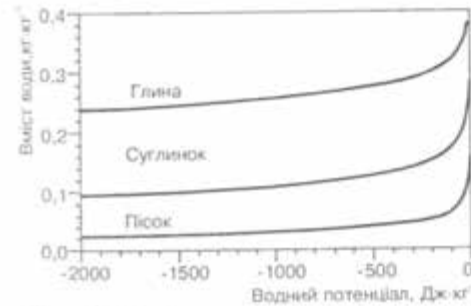


Рис. 3.4. Зв'язок матричного потенціалу з вмістом води зі структурними елементами ґрунту або колоїдами

Коли рослини споживають воду з ґрунту, водний потенціал зменшується доти, доки коренева система рослин не спроможна постачати воду з ґрунту (точка в'янення). Цей рівень відповідає водному потенціалу

ціалу $-1500 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ і є нижньою межею доступної ґрунтової води. Поблизу поверхні ґрунт висушується повітрям, що відповідає значенню водного потенціалу $-3 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Водний потенціал у пов'язаний з відносною вологістю r :

$$\psi = (RT/M_w) \ln r, \quad (3.40)$$

$$r = \exp(M_w \psi / RT), \quad (3.41)$$

де R — газова стала, T — абсолютна температура, M_w — молекулярна маса води ($0,018 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$).

Приклад

Визначити гравітаційний потенціал на поверхні ґрунту щодо водного горизонту, розміщеного на глибині 2 м.

Розв'язок

Підставляємо числові дані у формулу, що визначає гравітаційний потенціал:

$$\psi = gh = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 2 \text{ м} = 19,6 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2} = 19,6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Контрольне завдання

Визначити матричний потенціал глинистого ґрунту, що містить $0,15 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ води.

Приклад

Визначити водний потенціал ґрунту, якщо його відносна вологість $0,9998$, а температура 293 К .

Розв'язок

Використовуємо формулу (3.40):

$$\begin{aligned} \psi &= (RT/M_w) \ln r = \\ &= (8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 293 \text{ К} / 0,018 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}) \ln 0,9998 = \\ &= 135268,33 \cdot (-0,0002) = -27 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}. \end{aligned}$$

Контрольне завдання

Визначити відносну вологість ґрунту, якщо водний потенціал його відповідає точці в'янення, а температура дорівнює 293 К .

Відповідь: $0,9889$.

Гідропровідність ґрунту

Густина потоку рідини (води) через пористе середовище (ґрунт) описується законом Дарсі:

$$J_g = -K(\psi) \frac{d\psi}{dz}, \quad (3.42)$$

де $K(\psi)$ — коефіцієнт гідропровідності, $d\psi/dz$ — градієнт водного потенціалу.

Для потоку води в одному напрямку, який має місце в ґрунті, закон Дарсі перепишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} J_g &= -K(\psi_m) \frac{d\psi}{dz} = -K(\psi_m) \frac{d\psi_m}{dz} - K \frac{d\psi_g}{dz} = \\ &= -K(\psi_m) \frac{d\psi_m}{dz} - gK(\psi_m). \end{aligned} \quad (3.43)$$

Розглянемо приклади приблизних рішень рівняння (3.43).

Коли ґрунт насичений водою, гідропровідність називається насиченою. Коли пори ґрунту осушуються, гідропровідність швидко зменшується. Режиму польової місткості відповідає половина сухих пор; гідропровідність у цьому випадку зменшується у 10^3 разів порівняно з насиченим рівнем. Точці в'янення відповідає зменшення гідропровідності у 10^6 разів порівняно з насиченим рівнем.

Для оцінки коефіцієнта гідропровідності та водного потенціалу ґрунту зручно використовувати спрощені вирази:

$$K(\psi_m) = K_n (\psi_e / \psi_m)^{2+3/b}, \quad (3.44)$$

$$K(\theta) = K_n (\theta / \theta_n)^{2b+3}, \quad (3.45)$$

$$\psi_m = \psi_e (\theta / \theta_n)^{-b}, \quad (3.46)$$

де K_n — насичена гідропровідність ґрунту, ψ_e і b — параметри, що залежать від текстури ґрунту (табл. 3.6), θ — об'ємний вміст води, θ_n — вміст води, що відповідає рівню насиченості ґрунту.

Приклад

Використовуючи дані табл. 3.5, оцінити вміст води для замуленої глини, якщо водний потенціал становить $-10 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$, а вміст води, що відповідає рівню насиченості ґрунту, дорівнює $0,5 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$.

3.6. Гідравлічні властивості ґрунту залежно від текстури

Текстура	Мул	Глина	ψ_e , Дж·кг ⁻¹	V	K_n , кг·с·м ⁻³	θ_{33} , м ³ ·м ⁻³	θ_{1500} , м ³ ·м ⁻³
Пухкий пісок	0,05	0,03	0,7	1,7	0,0058	0,09	0,03
Глинистий пісок	0,12	0,07	0,9	2,1	0,0017	0,13	0,06
Супісок	0,25	0,10	1,5	3,1	0,00072	0,21	0,10
Жирна глина	0,40	0,18	1,1	4,5	0,00037	0,27	0,12
Змудлена глина	0,65	0,15	2,1	4,7	0,00019	0,33	0,13
Легкий суглинок	0,13	0,27	2,8	4,0	0,00012	0,26	0,15
Середній суглинок	0,34	0,34	2,6	5,2	0,000064	0,32	0,20
Важкий суглинок	0,58	0,33	3,3	6,6	0,000042	0,37	0,32
Легка глина	0,07	0,40	2,9	6,0	0,000033	0,34	0,24
Середня глина	0,45	0,45	3,4	7,9	0,000025	0,39	0,25
Важка глина	0,20	0,60	3,7	7,6	0,000017	0,40	0,27

Розв'язок

Розв'яжемо рівняння (3.46) щодо θ :

$$\theta = \theta_n (\psi/\psi_m)^{1/b} = 0,5 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3} (-2,1 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} / -10 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1})^{1/4,7} = 0,359 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}.$$

Контрольне завдання

Розв'язати попередню задачу для $\psi_m = -1500 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Випаровування з ґрунтової поверхні

Випаровування — це перехід речовини з рідкого або твердого агрегатного стану у газоподібний. Випаровування з ґрунтової поверхні (кг · м⁻² · с⁻¹) можна оцінити завдяки простому співвідношенню:

$$E = \alpha s E_s / L (s + A), \quad (3.47)$$

де α — коефіцієнт пропорційності, що залежить від вологості ґрунту ($\alpha = 1$ для сухого ґрунту, $\alpha = 1,26$ для вологого ґрунту), $s = de/dT$ гПа · К⁻¹ (див. рис. 3.1), E_s — сумарне випромінювання земної поверхні, L — прихована теплота пароутворювання (для води $L = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$), $A = 0,67 \text{ гПа} \cdot \text{К}^{-1}$ — психрометрична стала.

Приклад

Визначити теплоту випаровування вологої ґрунтової поверхні, якщо сумарне випромінювання земної поверхні становить $500 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, а температура поверхні дорівнює $+30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язок

З рис. 5.1 визначимо параметр s для температури 303 К: $s = de/dT = 2,16 \text{ гПа} \cdot \text{К}^{-1}$. Підставляємо числові дані в рівняння (3.47):

$$EL = 1,26 \cdot 2,16 \text{ гПа} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 500 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} / (2,16 \text{ гПа} \cdot \text{К}^{-1} - 0,67 \text{ гПа} \cdot \text{К}^{-1}) = 913 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Контрольне завдання

Використовуючи дані попереднього завдання, визначити, як впливає на випаровування ґрунтової поверхні зниження температури.

4. ОПТИЧНІ ПАРАМЕТРИ

Колір ґрунту залежить від ряду факторів, зумовлених тепловим балансом та хімічним складом ґрунту. Колір ґрунту впливає на його температуру: ґрунти світлих відтінків відбивають тепло більш інтенсивно, ніж темних. Колір ґрунту визначають вміст гумусу, оксидів заліза та різноманітних світлозабарвлених речовин — сполук кремнію й алюмінію, карбонатів кальцію тощо. Ґрунту, що містить багато гумінових кислот, властивий темний ахроматичний колір, тоді як перевищення вмісту фульвових кислот надає ґрунту більш насиченого забарвлення. Поглинання та відбивання оптичного випромінювання ґрунтами різних кольорових відтінків значно відрізняються, що використовується в техніці дистанційного зондування земної поверхні.

Забруднення ґрунту

Хімічні забруднення ґрунту

Серед основних джерел забруднення ґрунтів виділяють промислові викиди в атмосферу, стічні води, радіоактивні відходи, автотранспорт, побутові відходи. В сільськогосподарському виробництві до забруднень ґрунту призводять стоки з залишками пестицидів і добрив, нафтопродукти, важкі метали, поверхнево-активні речовини, хімічні сполуки, що потрапляють у ґрунт, мігрують і врешті-решт пофакляють в організм людини. Застосування добрив призводить до порушення біогеохімічних кругообігів; використання пестицидів супроводжується токсичним впливом на фауну й флору, негативними наслідками для окремих видів і біоценозів загалом, скороченням чисельності популяцій, зменшенням запасів їжі, зникненням видів, що конкурують, зміною різноманіття біоценозів. Особливу небезпеку для ґрунту становить військова техніка й арсенали, військові полігони, нафтоматження звичайних та ядерних боєприпасів.

Тверді відходи

Терміном «тверді відходи» позначають покидьки або сміття, що не транспортуються за допомогою води і не призначені

для подальшого використання. До муніципальних (міських) твердих відходів можна віднести харчові залишки, текстиль та негорючі речовини — скло, метал, цегла. Специфічними відходами є будівельні уламки, листя, вуличне сміття, залишені автомобілі, стара побутова техніка тощо. До твердих відходів впевнено можна приєднати попіл як наслідок експлуатації теплових елекфостанцій, бруд з очисних споруд, гній з ферм, породу з шахт. Причому, спостерігається тенденція до зростання твердих відходів з кожним роком.

Муніципальні тверді відходи характеризуються густиною, що змінюється від $150 \text{ кг} \cdot \text{м}^3$ (некомпактні відходи) до $800 \text{ кг} \cdot \text{м}^3$ (занурені у ґрунт відходи). Густину окремих компонентів твердих відходів наведено в табл. 3.7.

Кожен компонент визначається вологою і сухим залишком.

3.7. Густина компонентів твердих відходів

Компонент	Густина, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Папір, картон	80
Харчові відходи	300
Різнорманітне сміття	160
Попіл, пил, цегла	480
Побутові відходи	150
Пластмасові відходи	65
Алюмінієві відходи	100
Консервні банки	90
Скло	160

Приклад

Зразок твердих відходів масою 100 кг містить 45 кг паперу, 7% якого припадає на вологу, а 93% — на сухий залишок. Визначити масу води і сухого залишку в папері, а також об'єм паперу.

Розв'язок

Маса води й сухого залишку в папері визначаються так:

$$m_w = m_p \cdot 7\% = 45 \text{ кг} \cdot 0,07 = 3,2 \text{ кг};$$

$$m_{cs} = m_p \cdot 93\% = 45 \text{ кг} \cdot 0,93 = 41,8 \text{ кг}.$$

Об'єм паперу у зразку знаходимо, використовуючи дані табл. 3.7:

$$V_x = m_x / \rho_x = 45 \text{ кг} / 80 \text{ кг} \cdot \text{м}^3 = 0,56 \text{ м}^3.$$

Контрольне завдання

Типовий склад муніципальних твердих відходів має вигляд:

№ з/п	Компонент	Маса, кг	Волога, %	Волога, кг	Сухий залишок, %	Сухий залишок, кг	Густина, кг·м ⁻³	Об'єм, м ³
1	Папір	45	7	3,2	93	41,8	80	0,56
2	Харчові відходи	20	70	?	30	?	300	?
3	Метал	7	3	?	97	?	480	?
4	Скло	10	2	?	98	?	160	?
5	Попіл	3	8	?	92	?	480	?
6	Сміття	15	20	?	80	?	160	?
Всього	Тверді відходи	100		20,8		79,2		

Користуючись даними цієї таблиці, визначити:

- 1) масу вологи і сухих залишків у гешті компонентів;
- 2) відносний вміст вологи зразка;/
- 3) густину зразка твердих відходів.

Відповідь: 1) 14,0 кг; 0,2; 0,2; 0,2; 3,0 кг; 2) 6,0 кг; 6,8; 9,8; 2,8; 12,0 кг; 3) 20,8 %; 4) 124 кг·м⁻³.

Ерозія ґрунтів

Ерозія ґрунтів — руйнування ґрунтів і підстилаючої породи за природних та антропогенних процесів, що призводять до переміщення продуктів руйнування з одного місця в інше (від лат. *erosio* — роз'їдати, вигризати).

Ерозія, що супроводжується руйнуванням поверхні Землі, формуванням долин річок, схилів, межиріч, називається природною (геологічною). На цей тип ерозії впли-

вають такі фактори як вітер, вода, температурні коливання, біологічні процеси.

Вітрова ерозія спричинює перенесення найдрібніших частинок ґрунту, що містять найважливіші для родючості компоненти — гумус, хімічні речовини. Крім того, цей процес супроводжується оголенням коріння одних та засипанням інших рослин.

Водна ерозія викликається талими, дощовими та зливовими водами на пересіченій місцевості; цей процес супроводжується перенесенням твердих частинок, розчиненням породи водою, зміною рельєфу земної поверхні. Найбільш небезпечною формою водної ерозії є селі та зсуви. Температурні коливання зумовлюють утворення розколин у скельних породах і відшарування. Швидка зміна дня й ночі впливає тільки на поверхневий шар скелі, тоді як перехід від літа до зими — на значно глибші шари. При низьких температурах відбувається руйнування породи внаслідок розширення води в тріщинах. Через замерзання і танення частинки, що відокремилися, рухаються вниз по схилу. Біологічні процеси руйнування гірських порід зумовлюють також живі організми — лишайники та мохи. Частіше живі організми лише прискорюють дію інших. Тварини, рухаючись по ґрунту, подрібнюють частинки, що полегшує знесення їх вітром або водою.

Розвиток ерозії пов'язаний також з рельєфом місцевості, стійкістю ґрунту щодо змиву та розмиву, рівнем покриття схилів лісовою або трав'янистою рослинністю.

Прискорена (антропогенна) ерозія спричинюється одночасним впливом вирубування лісів, надінтенсивним тваринництвом і неправильним використанням ґрунтів під сільськогосподарські потреби. Оранка, сінокосіння та збирання врожаю, робота сільськогосподарських машин, меліорація земель, знищення лісів, надмірне розорювання території, безконтрольне випасання худоби сприяють прискореній ерозії. Шар ґрунту, що руйнується при нормальній ерозії протягом століть, при антропогенній знищується за дуже короткі проміжки часу (швидкість антропогенної ерозії може бути в 100 разів більшою, ніж швидкість природної).

Ерозія фунтів проявляється у вигляді змиву верхнього фунтового покриву або розмиву його вглиб. З огляду на це

розрізняють *площинну (поверхневу) ерозію*, що супроводжується поступовим видаленням з поверхні компонентів фунту, та *лінійну ерозію*, при якій відбувається розмив фунту у вертикальному напрямку. Найбільш небезпечною є площинна ерозія. Вона завдає великої шкоди народному господарству, оскільки під дією стікаючих дощових і талих вод по схилу змивається і переноситься верхня, найбільш родюча частина фунту. Лінійна ерозія проявляється в утворенні ярів та балок.

Для оцінки ерозійної небезпеки земель використовують *індекс опадів* — показник, що умовно враховує кінетичну енергію дощів за певний період максимальної інтенсивності їх випадання. Період, для якого розраховується ерозійний індекс опадів, приймається рівним 10, 20, 30 хв. Кінетична енергія дощу визначається за формулою:

$$E_k = J [24,73 + 8,94(\lg 2,36l)h], \quad (3.48)$$

де η — число періодів з постійною інтенсивністю дощу, J — інтенсивність дощу, $\text{мм} \cdot \text{хв}^{-1}$, h — шар опадів, що випадає за період з постійною інтенсивністю дощу, мм . Шляхом підбору за метеорологічними даними відповідного відрізка часу за конкретну зливу, що дає найбільший шар опадів, розраховують максимальну інтенсивність дощу за 10, 20, 30 хв, яку ділять на тривалість періоду, а також кінетичну енергію кожного дощу. Ерозійний індекс опадів розраховують за формулою:

$$R = 0,01 E_k I_{(10/20)} \quad (3.49)$$

Так, для України сумарна кінетична енергія зливових опадів за теплий період E_k змінюється від 1,1 до 1,3 $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-2}$ на півдні до 4,0 $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-2}$ у зоні Карпат; середня інтенсивність дощу / змінюється від 1 $\text{мм} \cdot \text{хв}^{-1}$ для дрібного дощу до 9+12 $\text{мм} \cdot \text{хв}^{-1}$ для дуже сильної зливи; максимальна інтенсивність дощу фивалістю 10 хв становить 0,8+3,0 $\text{мм} \cdot \text{хв}^{-1}$. Ерозійний індекс дощів, небезпечних для фунту, може коливатися від 11 до 36.

Унаслідок ерозії на значних площах руйнуються цінні сільськогосподарські угіддя, різко зменшуються гумусові ресурси, вміст азоту, фосфору й калію в ґрунті, що впливає на його родючість, замулюються ріки, канали та водні джерела, зростає розчленування території ярами, погіршується її гідрологічний режим.

Аудиторне завдання

Визначити швидкість осідання двох сферичних ґрунтових частинок $d = 0,1 \text{ мм}$ і $d = 0,001 \text{ мм}$ у водному середовищі при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Густина частинок $\rho = 2,65 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, в'язкість води $h = 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Чи встигнуть частинки досягти дна танка за 2 год, якщо рівень рідини в ньому 3,5 м?

Репродуктивний тест

Як змінюється водний потенціал, коли:

- 1) ґрунт насичений водою?
- 2) водний режим фунту відповідає точці в'янення?

Альтернативний тест

Чи правильне ствердження, що:

1. Конвективне перенесення маси в ґрунті відбувається, коли потік води має температуру, що відрізняється від температури ґрунту. Так Ні
2. Конвективне перенесення теплоти — це перенесення розчиненої речовини, що визначається швидкістю рідини, що рухається, та концентрацією розчиненої речовини. Так Ні
3. Термодифузія — перенесення компонентів речовини під впливом фадієнта температури. Так Ні

Акордно-вибірковий тест

Знайти правильні відповіді на запитання

«В яких одиницях вимірюється об'ємна питома теплоємність речовини?»

- 1) $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; 2) $\text{Дж} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{К}^{-1}$; 3) $\text{Дж} \cdot \text{кг}^1 \cdot \text{К}^{-1}$.

Парно-вибірковий тест

Підібрати пари «тип густини ґрунту — формула»

- а. Густина твердої речовини $\rho_{sp} = M/Y_{at} = M_{sp}/(Y_{sp} + U + VJ)$;
- б. Загальна об'ємна густина ґрунту $\rho_{mp} = M_{sp}/Y_{sp}$;
- в. Об'ємна густина сухого фунту $\rho_{ж} = I_u/Y_u = (M_{ip} + M_e)/(V + u + yj)$.

Конструктивний тест

Який метод ліквідації твердих відходів, що містять значну кількість органічних речовин, ви б обрали:

1. Вивезення накопичених відходів на полігон для захоронення;
 2. Утилізація відходів шляхом спалювання.
- Проаналізуйте переваги та недоліки обох методів.

Домашнє завдання

1. У скільки разів зміниться відносна вологість фунту внаслідок переходу від режиму польової місткості до точки в'янення?
2. Визначити водний потенціал глини, якщо вміст води становить $0,3 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$.

IV. ГІДРОГРАФІЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА

Гідрографічні фактори (фактори водного середовища) — фізичні та хімічні властивості води як середовища мешкання живих організмів.

Вода — найпростіша стійка хімічна сполука водню й кисню, при нормальних умовах — безбарвна рідина без запаху. Вода є найбагатшим компонентом біосфери і водночас — найважливішим, оскільки служить основним середовищем для будь-яких метаболічних процесів. З точки зору екології вода використовується для вилучення й розчинення більшості природних і антропогенних відходів. Деякі фізичні властивості води мають безпосередній зв'язок з еволюцією навколишнього середовища та функціонування в ньому живих організмів.

Властивості води

Механічні властивості

Значення густини води наведено в табл. 3 (див. додаток). Вода є єдиною сполукою, яка під час охолодження розширюється; отже, густина льоду менша, ніж густина води. Через це лід знаходиться на поверхні водойм, що дає можливість зберегти життєдіяльність водних організмів за умов охолодження.

Гідродинамічні властивості

Вода — добрий розчинник, здатний розчинювати велику кількість сполук. З точки зору охорони навколишнього середовища ця властивість води сприяє кращому постачанню поживних речовин в живі організми та виведенню відходів.

Вода відзначається високим поверхневим натягом ($72,75 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Завдяки цьому відбуваються капілярні явища в порах фунту та в стеблах рослин, що зумовлює перенесення поживних речовин з ґрунту в рослину.

Теплофізичні властивості

Вода характеризується унікальними теплофізичними властивостями, а саме:

1. Температура замерзання води становить 273,16 К (0 °С), а температура кипіння 373,16 К (100 °С).

2. Вода має надзвичайно високу теплоту випаровування ($2,26 \cdot 10^6$ Дж · кг⁻¹). Це означає, що молекули води поглинають велику кількість теплоти під час випаровування завдяки дії сонячного випромінювання та вивільнюють велику кількість теплоти за конденсації та опадів на земну поверхню. Кожен день сонце змушує близько 1230 км³ води через випаровування з поверхні морів, озер, річок і ґрунту, а також транспірацію (дихання) рослин залишати тепло. Нагрівання сонячним випромінюванням водою та водяної пари атмосфери приводить до зміни погодних і кліматичних умов.

3. Вода має надзвичайно високу теплоємність (4186 Дж · кг⁻¹ · К⁻¹), що в три-чотири рази вища за теплоємність ґрунту. Вода потребує більше тепла, ніж ґрунт, для однакового нагрівання, тому вона дуже повільно нагрівається й охолоджується; отже, великі водні масиви позбавлені впливу швидких змін температури, що підтримує помірний клімат на Землі.

4. Здатність води проводити тепло характеризується коефіцієнтом теплопровідності, який дорівнює 0,599 Вт · м⁻¹ · К⁻¹ при 20 °С і перевищує коефіцієнт теплопровідності повітря (0,0257 Вт · м⁻¹ · К⁻¹ при 20 °С). Завдяки цьому між ґрунтом (коефіцієнт теплопровідності якого дорівнює 0,125+0,209 Вт · м⁻¹ · К⁻¹ при 20 °С) та вологим повітрям атмосфери утворюється теплоізоляційний шар сухого повітря, що зумовлює виникнення парникового ефекту.

5. Специфічною властивістю води як середовища є безперервний рух частинок води й турбулентне їх перемішування. Завдяки цьому відбувається передача теплоти у глибокі шари.

Електричні властивості

Важливою характеристикою води є її висока діелектрична проникність. Ця ознака свідчить про те, що електричні сили між розчиненими в воді речовинами слабкі.

Крім того, з точки зору електричних властивостей вода як неполярна молекула — це диполь, тобто сукупність двох рівних, але протилежних за знаком зарядів, що перебувають на певній відстані й характеризуються дипольним моментом. Дія зовнішнього електричного поля пропорційна моменту диполя; звідси виникає здатність неполярних молекул води поглинати довгохвильове випромінювання земної поверхні та брати участь у парниковому ефекті.

Оптичні властивості

Вода є прозорим тілом для оптичного випромінювання видимого діапазону. Коефіцієнт поглинання дистильованої води характеризується мінімумом в межах 400+50 нм; коефіцієнт розсіювання демонструє спад від короткохвильової до довгохвильової області спектра (рис. 4.1). Саме тому оптичне випромінювання проникає на значні глибини, що зумовлює нагрівання води в шарі товщиною в кілька метрів. На оптичні характеристики води можуть впливати розчинені в ній солі та органічна речовина (*SiO₂*, *Fe₂O₃*, *Al₂O₃*), бактеріо-, фіто- і зоопланктон, змулена речовина. Оптичні характеристики води пов'язані з її каламутністю, що в свою чергу залежить від розсіювання і поглинання

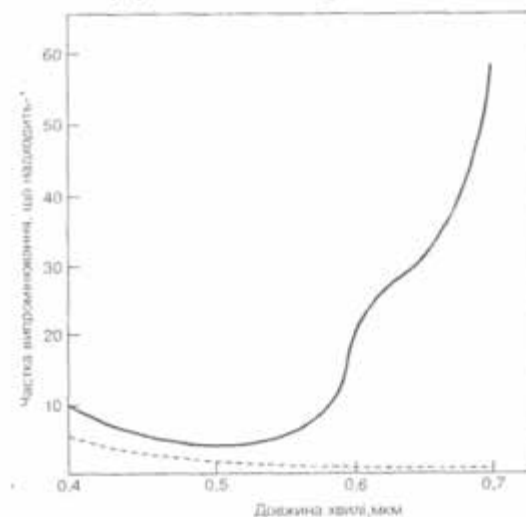


Рис. 4.1. Спектри поглинання (а) і розсіювання (б) води

оптичного випромінювання на частинках глини, бруду, кремнію, іржі, а також на водоростях і бактеріях. Вплив наявних у воді розчинених речовин, забруднень та мікроорганізмів на спектральні параметри води може бути використаний для дистанційного зондування водойм.

Забруднення водного середовища

Забруднення води — зміна фізичного або хімічного стану поверхневих чи підземних вод, що негативно впливає на живі організми.

Класифікація забруднень

До основних забруднювачів води відносять *біологічні, хімічні, механічні, радіоактивні та теплові*.

Біологічні забруднювачі включають патогенні мікроорганізми: бактерії, віруси, найпростіші, водорості.

До хімічних забруднювачів належать побутові відходи, гній, продукти розпаду рослин, індустриальні відходи, важкі метали, фосфати й нітрати, нафтопродукти, пестициди, сполуки хлору.

Механічні забруднення містять викиди нерозчинних твердих мінеральних речовин, що утворюються при розробці шахт та кар'єрів. Причиною механічного забруднення водойм є також пластикові вироби.

Радіоактивні забруднення включають природні радіоактивні матеріали, відходи внаслідок видобування, збагачення копалин, обробки та експлуатації ядерного палива.

Теплові забруднення спричинюються розсіюванням у довкіллі вихідної енергії у вигляді підігрітої води та гарячих газів внаслідок експлуатації теплових та атомних електростанцій. Підвищення температури води призводить до зміни кисневого режиму, збільшення випаровування з поверхні, змін умов існування гідрофауни, гідрофлори і бентосу водойми, викликає «цвітіння» води, зумовлює акумуляцію стійких забруднювачів. Крім того, з підвищенням температури води пов'язане зменшення вмісту розчинених у ній кисню, азоту, вуглекислого газу. Всі ці зміни гідрологічних, гідрохімічних і гідро-

біологічних показників можуть спричинити несподівані наслідки для водних організмів і загальну зміну екологічного стану водного об'єкта.

Стічні води

Водні ресурси можуть забруднюватися через каналізаційні або індустриальні викиди. Муніципальні стічні води — складна суміш води (понад 99%) із органічних та неорганічних забруднювачів, суспендованих або розчинених у воді. Основними компонентами стічних вод є мікроорганізми, тверді речовини, неорганічні компоненти, синтетичні хімічні препарати, органічні речовини.

Евтрофікація водойм

Процес підвищення рівня первинної продукції водойм внаслідок збільшення в них концентрацій біогенних речовин (азоту, фосфору) називають *евтрофікацією*. Під первинною продукцією слід розуміти насамперед продукцію зелених рослин. Можна виділити такі основні етапи евтрофікації. Спочатку в водоймі накопичуються значні кількості мінеральних солей, що приносяться водами річок, струмків та внаслідок природної ерозії. Збагачення вод поживними елементами сприяє інтенсивному росту водоростей; виникають потужні спалахи фітопланктону. Водночас можлива послідовна зміна популяцій водоростей з переважанням синьо-зелених і зелених водоростей. Збільшення біомаси фітопланктону спричинює погіршення прозорості води; фотосинтез протікає лише в приповерхневому шарі, оскільки тільки в ньому водорості забезпечуються сонячною енергією. Далі відбувається відмирання значної маси водоростей, що супроводжується значним зменшенням кисню в нижніх шарах водойми. Після повного зникнення кисню починається процес анаеробного (без участі повітря) бродіння.

Запобігти процесу евтрофікації можна завдяки застосуванню сучасних методів очистки стічних вод від фосфатів, забороні або обмеженню використання фосфатів як компонента побутових детергентів та миючих засобів, конт-

ролю за забрудненням місцевості гноєм та агрохімікатами, за потраплянням стічних вод у швидкі потоки або моря, очищенню дна водойми від седиментів, видаленню надлишкової маси водоростей з водойми, забезпеченню аерації водних резервуарів та озер.

Методи вимірювання параметрів води та стічних вод

Сучасні методи вимірювання параметрів води та стічних вод діляться на *спектроскопічні, електрохімічні, хроматографічні, радіохімічні*.

В основі методів *оптичної спектроскопії* лежить аналіз оптичного випромінювання, що взаємодіє з об'єктом дослідження за поглинання, пропускання, відбивання, розсіювання, перевипромінювання з подальшим аналізом тих змін, яких набуває оптичне випромінювання. Розрізняють такі методи: *емісійна спектроскопія* (вивчення спектрів випромінювання атомів та молекул); *атомно-абсорбційний аналіз* (випаровування речовини й пропускання через пару речовини оптичного випромінювання); *оптико-акустична спектроскопія* (перетворення залишку енергії збуджених молекул речовини в тиск, що реєструється); *інфрачервона спектроскопія* (вивчення спектрів поглинання в інфрачервоній області спектра); *флуоресцентна спектроскопія* (збудження та реєстрація випромінювання флуоресценції).

Ряд інших спектроскопічних методів ґрунтується на взаємодії електромагнітного випромінювання з магнітним полем (*спектроскопія на основі ядерно-магнітного резонансу*); створенні іонних пучків з їх подальшим розподілом за масою в електричному та магнітному полях (*мас-спектрометрія*); емісії електронів (*рентгенівська фотоелектронна спектроскопія, спектроскопія Аугера*); розсіюванні оптичного випромінювання молекулами речовини (*спектроскопія комбінаційного розсіювання*) або частинками речовини, суспендованими в рідині (*нефелометрія, турбідиметрія*); реєстрації кута повертання площини поляризації оптичного випромінювання (*поляриметрія*) та залежності цього кута від довжини хвилі оптичного випромінювання (*дисперсія оптичного обертання*).

Електрохімічні методи ґрунтуються на аналізі процесів, що відбуваються на електродах і в міжелектродному просторі з подальшою реєстрацією залежності потенціалу (*потенціометрія*), струму (*вольтамперометрія або полярографія*), заряду (*кулонометрія*) або електропровідності (*кондуктометрія*).

Хроматографічні методи передбачають розділення, знаходження й визначення речовин завдяки неоднаковості їх поведінки в системі з двох фаз, що не змішуються.

Радіохімічні методи використовують реєстрацію випромінювання під час радіоактивного розпаду.

Аудиторне завдання

Пояснити, які властивості води

- а) впливають на навколишнє середовище і як саме;
- б) є найважливішими для нашого існування;
- в) сприяють замерзанню озер зверху донизу;
- г) запобігають впливу різких змін температури;
- д) допомагають регулювати клімат.

Репродуктивний тест

Яку роль відіграє фотосинтез у процесі евтрофікації водойм?

Альтернативний тест

Чи правильне твердження, що:

1. Спектроскопія комбінаційного розсіювання ґрунтується на розсіюванні оптичного випромінювання молекулами речовини. Так Ні
2. Метод нефелометрії передбачає реєстрацію кута повертання площини поляризації оптичного випромінювання. Так Ні

Акордно-вибірковий тест

Знайти правильні відповіді на запитання:

«Чим супроводжується збільшення температури води в водоймах?»

- 1) зміною кисневого режиму;
- 2) збільшенням випаровування з поверхні;
- 3) зменшенням рівня «цвітіння» води;
- 4) акумуляцією стійких забруднювачів.

Парно-вибірковий тест	
Підібрати пари «засіб дезінфекції — характеристика засобу»	
а. Хлорування	1. Пригнічує мікрофлору, але спричиняє появу у воді органічного вуглецю;
б. Озонування	2. Недорогий, простий, надійний, але в деяких випадках — канцерогенний;
в. Ультрафіолетове випромінювання	3. Не супроводжується неприємним запахом або утворенням небезпечних сполук; не здатний забезпечити абсолютне знищення мікрофлори.

Конструктивний тест

Чому ґрунтові води не зазнають забруднення такою мірою, як поверхневі?

Домашнє завдання

1. Яким чином людська активність призводить до а) посух; б) повеней? Наведіть приклади. Як запобігти цим екстремальним ситуаціям?

2. Які засоби запобігання процесу евтрофікації водойм можна застосувати у вашій місцевості?

V. БІОТИЧНІ ФАКТОРИ ВЗАЄМОДІЇ ОРГАНІЗМІВ

Класифікація біотичних факторів

Біотичні фактори — це сукупність впливів життєдіяльності одних організмів на життєдіяльність інших, а також на неживе середовище мешкання. Взаємодію між організмами позначають за допомогою простого коду, в якому кожен з пари організмів, що взаємодіють, представлений знаками «+» (покращання росту, виживаності та інша користь для популяції), «-» (вповільнення росту й погіршення інших характеристик) або «0» (відсутність значущих взаємодій) залежно від впливу на нього іншого організму.

До основних біологічних факторів належать нейтралізм, інтерференційна конкуренція, експлуатаційна конкуренція, аменсалізм, хижацтво, паразитизм, протокооперація, коменсалізм та мутуалізм.

Нейтралізм (0 0) (від лат. *neutralis* — середній, нічийний) — відсутність прямих взаємодій між організмами різних видів в екосистемі, хоча непряма взаємодія може мати місце (напр., білки скидають шишки, насінням яких живляться дрібні гризуни).

Конкуренція (—) (від лат. *concurrentia* — змагання, суперництво) — це суперництво, під час якого партнери активно пригнічують один одного; внаслідок конкуренції один організм використовує певний ресурс (їжу, воду, простір, світло) і тим самим зменшує доступність цього ресурсу для інших організмів. Конкуренція — це негативні взаємодії між організмами, що можуть бути як прямими — *інтерференційна конкуренція* (антибіоз, взаємне пригнічення, перекриття доступу до ресурсу, сутички тощо), так і виникати через прагнення монополізувати певний ресурс чи місцеперебування — *експлуатаційна конкуренція*. В останньому випадку виживання виду залежить від зовнішніх умов; так, один вид борошнених хрущаків — *Tribolium confusium* витісняє інший — *Tribolium castaneum* за умов низької температури та вологості, тоді як другий вид

витісняє перший при високій температурі та вологості. Інтерференційна конкуренція спостерігається у разі знищення одним видом хрущаків (*Tribolium*) нестатевозрілих стадій іншого (*Oryzaephilus*). Експлуатаційна конкуренція змінюється інтерференційною при зменшенні кількості їжі. *Антибіоз* — це крайнє вираження конкурентних взаємовідносин, коли один вид повністю перешкоджає переселенню особин іншого виду, що підтримується хімічним впливом (хімічний антибіоз, або *алелопатія*). Закон *конкурентного виключення*, який полягає у тому, що два види не можуть нескінченно довго займати одну й ту ж еконішу, реалізується при розселенні близькоспоріднених видів у різних географічних районах, витісненні одного виду іншим у інші місця, переході одного з конкурентів на використання нових ресурсів, при активності споріднених видів, що живуть в одній місцевості, у різний час тощо. Окрім того, виділяють внутрішньовидову (сприяє розширенню меж існування виду) та міжвидову конкуренцію (забезпечує зайняття оптимальних місць, у яких вид має переваги, сприяє утворенню різних еконіш і, таким чином, формуванню нових популяцій, підвидів та видів). Так, при внутрішньовидовій конкуренції сірі лучні полівки за відсутності лісових полівок часто займають лісові середовища існування.

Аменсалізм (— 0) (від *a...* і лат. *mensa* • — стіл, трапеза): популяція 1 пригнічує популяцію 2, не відчуваючи при цьому негативного впливу популяції 2. Часто проявляється у формі алелопатії (синьо-зелені водорості виділяють близько десяти речовин, що пригнічують життєдіяльність зелених водоростей; чапараль виділяє алкалоїди та феноли, які унеможливають існування інших видів на певній відстані від її кущів; ґрунтові гриби виділяють бактерицидні речовини тощо).

Паразитизм (+ —) — форма взаємостосунків різних організмів (рослин, тварин, мікроорганізмів), що належать до різних видів, з яких один (паразит) використовує іншого (господаря) як середовище мешкання і джерело їжі, причому господар не отримує користі і відчуває негативний вплив; це варіант антагоністичного співжиття організмів двох видів. Причому паразит може жити за рахунок госпо-

даря, знаходячись всередині (*ендопаразитизм*) чи зовні його тіла (*екзопаразитизм*). Залежно від тривалості паразитичних контактів розрізняють тимчасовий (малярійний плазмодій, кліщі, деякі плоскі черви, паразитичні амеби та ін.) та стаціонарний (паразити рослин і тварин, нематоди, хвороботворні бактерії тощо) паразитизм. Виділяють рослин-напівпаразитів, що мають власний фотосинтетичний апарат, але водно-мінеральний розчин беруть від господаря (омела, очанка та ін.).

Хижацтво (Н—) — форма антагоністичних взаємовідносин організмів різних видів, наслідком яких є поїдання одного організму (жертви) іншим організмом (хижаком). Особини хижаків, як правило, більші за особин жертв.

Симбіоз — форма співжиття організмів різних видів, вигідна для обох (мутуалізм, протокооперація) чи для одного з них (коменсалізм). Поділяється на *облігатний* (мутуалізм, коменсалізм) та *факультативний* (протокооперація, коменсалізм).

Коменсалізм (+ 0) (від фр. *commensal* — співтрапезник) — постійне чи тимчасове співжиття особин різних видів, вигідне для одного з них і байдуже для іншого, що базується на використанні спільного простору, субстрату, їжі тощо. Приклади: риби-прилипали, що вступають у фориричні зв'язки з акулою та живляться залишками її їжі; гідроїдний поліп, що живе біля анального отвору риб та живиться їх екскрементами; види, що живуть в норах морських черв'яків та риючих креветок тощо. До коменсалізму належать *синейкія* (гр. *син* — разом та *ойкос* — місце перебування) — об'єднання організмів без передачі речовин та енергії, часто зумовлене їх проживанням у спільному місці (епіфіти та їх носії, зросле коріння, тварини-поселенці на рослинах і ці рослини та ін.) і *паройкія* — взаємодії між організмами, що мають форми захисту, та захищеними тваринами.

Кодом (+ 0) можна позначити *детритофагію* — здатність організму тварини живитися мертвими або частково розкладеними органічними речовинами; організми (гриби, бактерії), що перетворюють мертві органічні залишки в прості сполуки, називають *редуцентами*.

Протокооперація (+ +) (від гр. *прото* — перший та лат.

соорего — співробітничая) — взаємовигідне співіснування особин двох видів, яке не є обов'язковим. Так, кишковопорожнинні прикріплюються до спин крабів, маскуючи та захищаючи їх, отримуючи від цього шматочки їжі та використовуючи їх як засіб пересування.

Мутуалізм (+ +) (від лат. *mutuus* — взаємний) — форма сумісного взаємовигідного симбіозу організмів, при якій існування обох партнерів або одного з них неможливе без взаємозалежного співмешкання. Мутуалізм виникає часто між організмами з дуже відмінними потребами (напр., між автобіві рослин; мікориза (корені рослин + міцелій грибів); лишайники (водорості + гриби); жуйні парнокопитні й анаеробні бактерії у їх рубці, що забезпечують розщеплення целюлози; терміти й джгутикові, що живуть у їх кишечнику та розщеплюють целюлозу; тропічні мурахи, що розводять грибні сади на опалому листі (мурахи виділяють протеолітичні ферменти, що сприяють засвоєнню мінеральних речовин листя грибами, останні є їжею для мурах) та ін.

Основні типи біотичних взаємодій популяцій двох видів наведено в табл. 5.1.

Моделювання екологічних процесів

Кінетика екологічних процесів вивчає поведінку у часі різноманітних систем, властивих навколишньому середовищу. Будь-яку кінетичну систему можна подати як сукупність змінних (величин, які змінюються з часом) і параметрів (величин, що підтримують сталі значення протягом часу спостереження). Опис характеру поведінки біологічних систем як об'єктів, що моделюються, зручно проводити за допомогою математичних моделей, яким відповідає диференціальне рівняння першого порядку:

$$\frac{dx}{dt} = f(x). \quad (5.1)$$

Наприклад, процес росту однорідної популяції N описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{dN}{dt} = aN, \quad (5.2)$$

де a — швидкість природного зростання популяції.

5.1. Класифікація біотичних взаємодій популяцій двох видів

Тип взаємодії	Види		Загальний характер взаємодії
	1	2	
Нейтралізм	0	0	Жодна популяція не впливає одна на одну
Конкуренція, безпосередня взаємодія	-	-	Пряме взаємне пригнічення обох видів
Конкуренція, взаємодія через ресурси	-	-	Непряме пригнічення при дефіциті спільного ресурсу
Аменсалізм	-	0	Популяція 2 пригнічує популяцію 1, але сама не відчуває негативного впливу
Паразитизм	+	-	Популяція паразита 1 складається з менших за величиною особин, ніж популяція 2
Хижацтво	+	-	Особини хижаків 1 зазвичай більші, ніж особини жертви 2
Коменсалізм	+	0	Популяція 1, коменсал, отримує користь від співжиття; популяції 2 це співжиття байдуже
Протокооперація	+	+	Взаємодія сприятлива для обох видів, але не обов'язкова
Мутуалізм	+	+	Взаємодія сприятлива для обох видів і обов'язкова

Рішенням цього рівняння є функція:

$$N(t) = N(t_0) e^{a(t-t_0)}. \quad (5.3)$$

Прикладом процесу росту популяції є зростання населеності, що визначається експоненціальною функцією:

$$N = N_0 e^{rt}, \quad (5.4)$$

де N_0 — населеність у даному році, N — населеність через t років, r — швидкість зростання.

Величину r визначимо за виразом:

$$r = (r_n - r_s) + (r_i - r_e), \quad (5.5)$$

де r_n — швидкість народжуваності, r_s — швидкість смертності, r_i — швидкість іміграції, r_e — швидкість еміграції населення (в наш час r становить близько 1,7 %).

Різниця $(r_n - r_s)$ називається природним зростанням населеності, а $(r_i - r_e)$ — справжньою міграцією.

Ще один параметр, що характеризує зростання населеності — час подвоєння T кількості населення — період часу, протягом якого населеність, що розглядається, збільшується вдвоє:

$$T \text{ (роки)} = 70 / r(\%). \quad (5.6)$$

Процес загибелі мікроорганізмів опишемо рівнянням:

$$\frac{dN}{dt} = -bN, \quad (5.7)$$

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

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

$$\frac{dN}{dt} = a N^2, \quad (5.8)$$

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

Вплив вірогідної смертності описується так:

$$\frac{dN}{dt} = a N^2 - dN. \quad (5.9)$$

Приклад

Країна мала населеність 10 мільйонів у 1975 році. За останні 25 років швидкість народжуваності становила 3%, а швидкість смертності — 1,4%. Чому буде дорівнювати населеність країни в 2075 році? Визначити природне зростання населеності і час подвоєння кількості населення.

Розв'язок

Визначимо природне зростання населеності:

$$r_n - r_s = 3,0 - 1,4 = 1,6 \%$$

Кількість населення в 2075 р. дорівнюватиме:

$$N = N_0 e^{rt} = 10^6 \cdot e^{0,016 \cdot 100} = 4,953 \cdot 10^6.$$

Час подвоєння кількості населення становить:

$$T \approx 70 / r = 70 / 1,6 = 43,75 \text{ р.}$$

Контрольне завдання

У 1977 р. населення Гани становило 11,3 мільйони. Спостерігалось 542 400 народжень і 192 100 смертей протягом року. Припускаючи справжню еміграцію нульовою, визначити: 1) швидкість народжуваності, 2) швидкість смертності, 3) природне зростання населеності, 4) час подвоєння кількості населення, 5) населеність країни через 100 років.

Відповідь: $r_n = 4,8 \%$, $r_s = 1,7 \%$, $r_n - r_s = 3,1 \%$, $T = 22,58 \text{ р.}$, $N = 2,51 \cdot 10^8$.

Моделювання взаємодії організмів

Розглянемо як приклад процедуру моделювання ситуації, що виникає за міжвидової конкуренції, що призводить до зменшення чисельності обох видів. Взаємодію двох видів у випадку міжвидової конкуренції опишемо системою рівнянь:

$$\frac{dN_1}{dt} = a_1 N_1 - a_{11} N_1^2 - a_{12} N_1 N_2; \quad (5.10)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = a_2 N_2 - a_{22} N_2^2 - a_{21} N_1 N_2. \quad (5.11)$$

Відношення типу «хижак—жертва», при яких зменшення чисельності N_1 одного виду (жертви) викликає збільшення чисельності N_2 іншого виду (хижака), має вигляд:

$$\frac{dN_1}{dt} = a_1 N_1 - a_{11} N_1^2 - a_{12} N_1 N_2; \quad (5.12)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = a_2 N_2 - a_{22} N_2^2 + a_{21} N_1 N_2. \quad (5.13)$$

Симбіоз, який супроводжується збільшенням чисельності обох видів, описується такою системою рівнянь:

$$\frac{dN_1}{dt} = a_1 N_1 - a_{11} N_1^2 + a_{12} N_1 N_2; \quad (5.14)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = a_2 N_2 - a_{22} N_2^2 + a_{21} N_1 N_2. \quad (5.15)$$

Екологічна модель Вольтерра

Розглянемо класичний приклад моделі біологічної системи, яка описує антагоністичні стосунки різних видів, тобто хижацтво. Ця модель складається з двох диференціальних рівнянь і отримала назву *екологічної моделі Вольтерра*. Нехай у деякому замкненому районі мешкають жертви (зайці) та хижаки (вовки). Зайці живляться тільки рослинною їжею, якої завжди вдосталь; вовкам же потрібні тільки зайці.

У цілому зміну кількості зайців з врахуванням їх кількості (N_1) та ймовірності зустрічі з вовками ($N_1 N_2$) опишемо рівнянням:

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1 - bN_1 N_2. \quad (5.16)$$

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

$$\frac{dN_2}{dt} = -cN_2 + dN_1 N_2. \quad (5.17)$$

Отже, стосунки хижаків з жертвами описуються системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1 - bN_1 N_2; \quad (5.18)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -cN_2 + dN_1 N_2.$$

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

Система рівнянь (5.18) має два стаціонарних стани, для яких $\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = 0$, а саме: $N_1 = N_2 = 0$, $N_{1cm} = \frac{c}{b}$; $N_{2cm} = \frac{a}{d}$.

Тут доцільно ввести безрозмірні змінні:

$$u(t) = \frac{N_1}{N_{1cm}} = \frac{bN_1}{c}, \quad v(t) = \frac{N_2}{N_{2cm}} = \frac{bN_2}{a}, \quad (5.19)$$

$$t = at, \quad k = \frac{c}{a} = \frac{N_{1cm}}{N_{2cm}} > 0.$$

Звідси система рівнянь (5.18) набуває вигляду:

$$\frac{du}{d\tau} = u(1-v); \quad (5.20)$$

$$\frac{dv}{d\tau} = kv(u-1).$$

Ця система рівнянь має два стаціонарних стани:

$$u = v = 0; \quad u = v = 1. \quad (5.21)$$

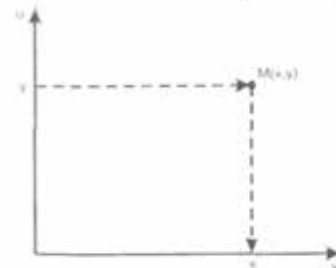


Рис. 5.1. Фазова площина

Розглянемо можливість графічної інтерпретації вищезгаданого. Нехай є система координат, на осях якої відкладено значення змінних u і v . Кожна точка M такої площини з координатами x і y відповідає певному стану системи (рис. 5.1). Така площина називається *фазовою площиною*.

Під час зміни стану системи у часі змінні u і v змінюються відповідно до системи рівнянь (5.20). Процес зміни u і v буде відповідати руху точки $M(u,v)$; сукупність можливих положень цієї точки на фазовій площині називають *фазовою траєкторією*.

Для того, щоб отримати рівняння, що зв'язує безпосередньо u і v , розділимо друге рівняння системи (5.20) на перше, виключивши час τ :

$$\frac{dv}{du} = \frac{kv(u-1)}{u(1-v)}. \quad (5.22)$$

Це рівняння може бути проінтегровано:

$$ku + v - \ln(u^k v) = H = \text{const}, \quad (5.23)$$

де стала H визначається початковими умовами.

Розв'язання цього рівняння дає сім'ю інтегральних кривих (фазових траєкторій) на площині u, v (рис. 5.2). Точки, в яких похідні змінних $\frac{du}{d\tau}$ і $\frac{dv}{d\tau}$ перетворюються в нуль, мають назву *особливих точок*. Особлива точка швидкості зміни $\frac{du}{d\tau}$ і $\frac{dv}{d\tau}$ в якій дорівнюють нулю, відповідає *стаціонарному стану*.

Отже, зростання чисельності зайців відповідає руху від точки a до точки b на фазовій площині (рис. 5.2); цей процес супроводжується збільшенням чисельності вовків, що отримали сприятливі умови годівлі; але це зростання чисельності хижаків призводить до зменшення чисельності жертв (перехід $b \rightarrow c$ на фазовій площині), що впливає на зменшення чисельності вовків (перехід $c \rightarrow a$). Таким чином, біологічна система «вовки—зайці» здійснює коливання. Будь-який випадковий зовнішній вплив переводить систему на іншу фазову площину.



Рис. 5.2. Фазовий портрет

Поведінки змінних u і v у часі подано на рис. 5.3. Очевидно, що максимум чисельності жертв завжди випереджує максимум чисельності хижаків. З цими кривими узгоджуються результати спостережень за коливаннями чисельності північноамериканського зайця та рисі в Канаді (рис. 5.4). Періоди коливань чисельності жертв та хижаків при-

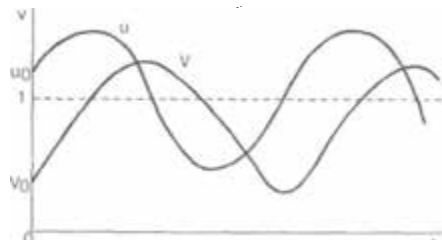


Рис. 5.3. Поведінка змінних u і v у часі

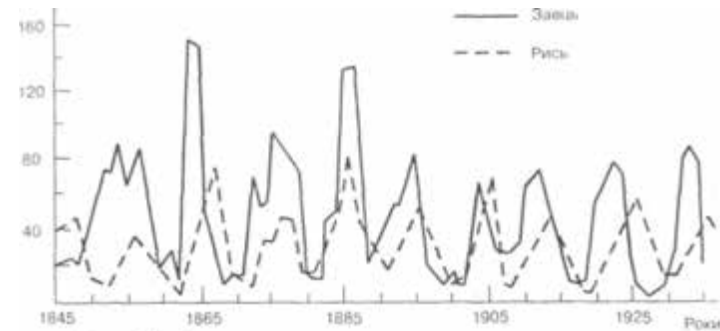


Рис. 5.4. Результати спостережень за коливаннями чисельності північноамериканського зайця та рисі в Канаді

близно однакові (9÷10 років), причому максимум чисельності зайців випереджує максимум чисельності рисей на один рік.

Аудиторні завдання

1. Використовуючи рівняння (5.2), побудувати графіки залежності:

$$N = f(t); \quad \frac{dN}{dt} = f(N).$$

2. Побудувати графіки залежності $N = f(t)$ і $\frac{dN}{dt} = f(N)$, що відповідають рівнянню (5.6). Проаналізувати характер залежності $N = f(t)$ для малих та великих значень t .

Домашні завдання

1. Знайдіть у літературі графік зростання населення земної кулі. Спробуйте надати математичної форми кривій залежності кількості населення від часу.

2. Ознайомтесь у бібліотеці з теорією Роберта Мальтуса щодо співвідношення зростання населеності та продуктів харчування. Висловіть свої думки про цю теорію.

VI. ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ

ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ КРІЗЬ АТМОСФЕРУ

Електромагнітне випромінювання під час проходження крізь атмосферу зазнає поглинання та розсіювання. Крім того, теплове випромінювання й розсіювання з інших напрямків роблять свій внесок у випромінювання, що реєструється. Отже, вплив атмосфери на електромагнітне випромінювання, що несе інформацію про об'єкт навколишнього середовища, має бути обмеженим.

Поширення γ -випромінювання. На інтенсивність γ -випромінювання, що проходить через атмосферу на систему реєстрації, впливає вологість ґрунту. Збільшення вологості зумовлює послаблення цього випромінювання.

Поширення випромінювання видимої та близької інфрачервоної областей спектра. У видимому діапазоні основним фактором ослаблення оптичного випромінювання є молекули та аерозолі атмосфери.

Основними молекулами атмосфери, здатними поглинати оптичне випромінювання, є водяна пара, двоокис вуглецю, озон, кисень, оксид вуглецю, метан і оксиди азоту. Особливо багаті на лінії поглинання асиметричні молекули, такі як H_2O , O_3 . Молекули лінійні за своєю структурою (CO_2 , N_2O , NO , CO , O_2 , N_2) мають меншу кількість ліній на спектральний інтервал, хоча спектри цих молекул можуть бути складними (як, наприклад, у молекули метану). Поглинання відбувається за переходів між коливальними та оберतालними рівнями. Крім того, молекули основних компонентів атмосфери — азоту й кисню — внаслідок своєї симетричної структури позбавлені електричного дипольного моменту і не беруть участі в процесі поглинання.

За відсутності опадів атмосфера містить дисперговані тверді та рідкі частинки (льоду, пилу, ароматичних та органічних речовин, біологічних матеріалів), що мають розміри від кількох молекул до 40 мкм. Такі колоїдні системи, в

яких газ (у даному випадку — повітря) містить дисперговані частинки, називають *аерозолями*.

Під час взаємодії оптичного випромінювання з середовищем, внутрішня структура якого неоднорідна, має місце розсіювання випромінювання. Цей процес супроводжується поширенням частини випромінювання в напрямку, що відрізняється від напрямку поширення випромінювання, яке падає. Характер розсіювання оптичного випромінювання залежить від співвідношення між розмірами частинок середовища, які розсіюються, та довжиною світлової хвилі λ . Звичайно в атмосфері середньої прозорості розсіювання на аерозолях домінує, якщо довжина оптичного випромінювання перевищує 0,5 мкм.

Розсіювання Релея виникає за зміщення зв'язаних електронів під впливом електричного поля, що падає на молекулу. Це поле сприяє утворенню диполя, який коливається і посилає електромагнітне випромінювання такої ж частоти. Розсіювання Релея характеризується тим, що інтенсивність розсіяного випромінювання змінюється залежно від четвертого ступеня довжини світлової хвилі. Саме такою залежністю можна пояснити природний блакитний колір неба, який отримується за відбивання сонячного світла від частинок пилу й водяної пари, присутніх в атмосфері. У видимій області спектра є істотна залежність інтенсивності розсіяного випромінювання від довжини хвилі; розсіювання Релея відбувається при $d < 0,05\lambda$. В області $\lambda > /$ мкм цим типом розсіювання можна знехтувати.

Розсіювання Мі відбувається на частинках великих розмірів ($d > \lambda$) і супроводжується виникненням інтерференції світла, що призводить до появи інтерференційної картини і істотної зміни діаграми кутового розподілу розсіяного світла.

Розсіювання Дебая відповідає проміжному випадку між двома попередніми типами розсіювання — Релея і Мі ($0,05\lambda < d < \lambda$).

В інфрачервоній області спектра проходження електромагнітного випромінювання обмежене вікнами прозорості атмосфери ($\lambda < 1,1$ мкм; $1,2$ мкм $< \lambda < 1,3$ мкм; $1,5$ мкм $< \lambda < 1,7$ мкм; $2,0$ мкм $< \lambda < 2,3$ мкм).

Таким чином, проходження оптичного випромінювання через атмосферу характеризується процесами його поглинан-

ня та розсіювання атмосферними молекулами й аерозолями. Під час проходження через атмосферу оптичне випромінювання зазнає ослаблення, що визначається за законом Бера:

$$\tau = \frac{I(z)}{I_0} = e^{-\gamma z}, \quad (6.1)$$

де τ — коефіцієнт пропускання, γ — коефіцієнт ослаблення, z — довжина оптичного шляху.

Величина коефіцієнта ослаблення γ залежить від процесів поглинання молекул k_{AM} , розсіювання молекул k_{SM} , поглинання аерозолів k_{AA} , та розсіювання аерозолів k_{SA} , присутніх в атмосфері:

$$\gamma = k_{AM} + k_{SM} + k_{AA} + k_{SA}, \quad (6.2)$$

де індекси «М» і «А» відповідають молекулам та аерозолям відповідно.

Поширення теплового випромінювання інфрачервоної області спектра. Пропускання атмосфери в інфрачервоній області спектра (3+20 мкм) наведено на рис. 6.1.

Поширення надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання. Використання НВЧ області дає можливість спостерігати за землею поверхнею через хмари та опади. Спектр пропускання НВЧ випромінювання в області 3+300 ГГц наведено на рис. 6.2. Спостереження у вікнах прозорості (до 40 ГГц та в інтервалі 80+100 ГГц) дають змогу оцінювати з супутників опади.

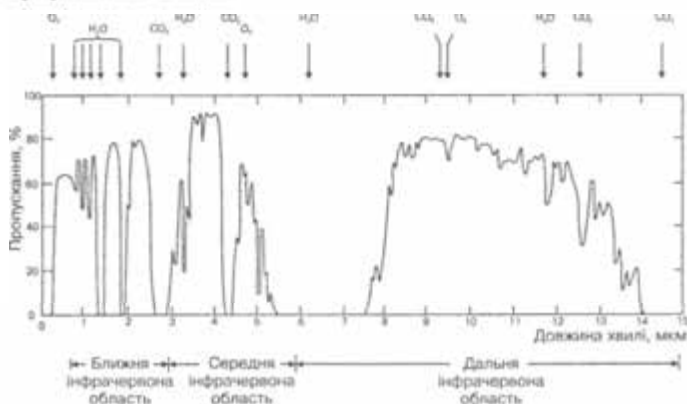


Рис. 6.1. Пропускання атмосфери в інфрачервоній області спектра

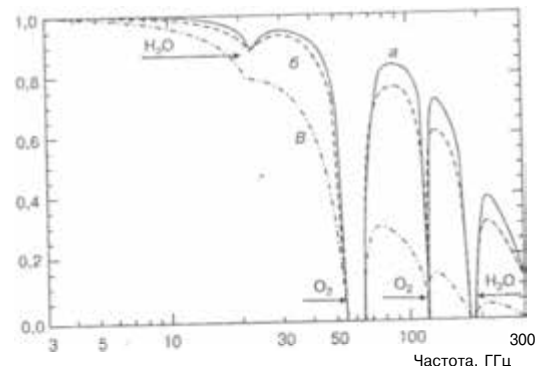


Рис. 6.2. Спектр пропускання надвисокочастотного випромінювання в області 3+300 ГГц: а — чиста стандартна атмосфера, б — хмари товщиною 0,5 км, в — шаруваті хмари товщиною 2 км

Класифікація систем дистанційного зондування

Збирання, запис і аналіз інформації щодо об'єктів навколишнього середовища на відстані називається *дистанційним зондуванням*. Методи й техніка дистанційного зондування ґрунтуються на реєстрації поглинутої, відбитої або випромінюваної енергії, що надає специфічних характеристик ознак основним компонентам біосфери. Розглянемо основні типи систем дистанційного зондування.

Реєстрація γ -випромінювання

Метод ґрунтується на вимірюванні природного короткохвильового ($\lambda < 2 \cdot 10^{-10}$ м) γ -випромінювання присутніх у земній корі або в сніговому покриві радіоактивних елементів — природних радіоізоотопів ^{40}K , ^{238}U , ^mTi . У звичайному ґрунті 90% γ -випромінювання утворюється в 20-сантиметровому поверхневому шарі.

Фотографічні системи

В основі техніки повітряної фотографії лежить створення на фотоплівці зображень земної поверхні з авіаносіїв та супутників. Звичайно використовують чорно-білі панхроматичні, чорно-білі інфрачервоні, кольорові та кольорові

інфрачервоні плівки. Фотографічні системи здатні створювати зображення об'єктів навколишнього середовища з високим рівнем розділення; застосування техніки багатоспектральної фотографії дає змогу отримати додаткову специфічну інформацію, на яку меншою мірою впливають температура й вологість навколишнього середовища. Фотографічні системи, що встановлюються на літаках, здатні забезпечити знімки з висоти близько 20 км; розміри площі, яка фотографується, можуть сягати 30x50 км².

Відеографічні системи

Застосування відеокамер дає змогу створювати та записувати зображення у видимій, близькій та середній інфрачервоній областях спектра. Перевагою відеосистем є невисока вартість, створення та накопичення послідовних зображень будь-якого процесу. До недоліків цієї техніки можна віднести невисоке просторове розділення.

Багатоспектральні сканери

Принцип дії цих систем полягає в реєстрації спектрального відбивання об'єктами навколишнього середовища на певних спектральних ділянках видимого та інфрачервоного спектра (0,3-14 мкм). Ці ділянки можуть бути або широкими (близько 0,2 мкм), або вузькими (менше 0,01 мкм). Прилади багатоспектрального сканування, що встановлюються на супутниках, дають змогу отримати інформацію з роздільною здатністю близько 10 м, скануючи при цьому територію розміром 60-185 км. Принцип дистанційного зондування за допомогою багатоспектрального сканера пояснюється на рис. 6.3. Перевагою багатоспектральних сканерів є здатність використовувати вузькі спектральні ділянки й отримувати інформацію в цифровій формі.

Теплові сенсори

Всі матеріали здатні посылати інфрачервоне випромінювання, зумовлене молекулярними коливаннями. Це теплове інфрачервоне випромінювання реєструється за допомогою техніки, схожої на багатоспектральне сканування, але в діапазоні 8-14 мкм. Характер зображення при цьому залежить від температури об'єкта та його випромінюваль-

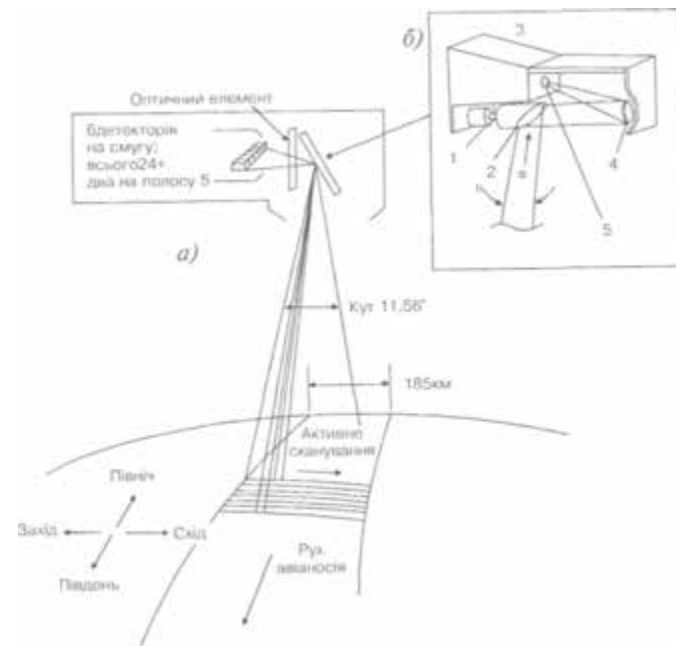


Рис. 6.3. Принцип дистанційного зондування за допомогою багато спектрального сканера

ної здатності. Теплові сенсори, які встановлюються на авіаносіях, що зондують об'єкти на невеликих висотах, забезпечують високу роздільну здатність (близько метра), тоді як на супутниках теплові сенсори розділяють простори розмірами 700-900 м. Сучасні прилади теплового зондування здатні реєструвати різницю температур близько 0,4 К. До недоліків слід віднести вплив метеорологічних умов на результати вимірювань; зондуванню фунту піддається лише шар товщиною 2+4 см.

Надвисокочастотні (НВЧ) локатори

Цей тип техніки дистанційного зондування передбачає використання електромагнітних хвиль в області 0,1-2 м (що відповідає частотам від 100 МГц до 50 000 МГц). НВЧ локаторні системи можуть бути *активними* (коли об'єкт дослідження опромінюється з подальшою реєстрацією відбитого

випромінювання) і *пасивними* (коли реєструється природне випромінювання об'єкта). Принцип дії дистанційного зондування земної поверхні за допомогою локаторів полягає у вимірюванні її діелектричних властивостей, що значною мірою залежать від вмісту вологи й температури ґрунту, нерівності земної поверхні, рівня снігового покриву, типу рослинних покривів і впливають на відбивальні та випромінювальні параметри, що вимірюються. НВЧ локація дає змогу визначити положення, рух та природу віддалених об'єктів. Серед основних типів локаторів, що застосовуються при дистанційному зондуванні, слід виділити *локатори зображення*, вимірювачі розсіяного випромінювання, висотоміри, НВЧ радіометри. Завдяки високій проникності НВЧ випромінювання через хмари та листя локатори здатні створювати зображення земної поверхні в дрібних деталях. Формування зображення за допомогою локаторів пояснюється на рис. 6.4. Об'єкти земної поверхні опромінюються локаторними імпульсами, що відбиваються, реєструються і перетворюються в зображення. Амплітуда відбитого імпульсу залежить від конкретного об'єкта спостереження. Альтернативним локатором зображення є *локатор з синтетичною апертурою (ЛСА)*. Принцип дії такого локатора показано на рис. 6.5, де наведено взаємне положення літака з локатором та об'єкта спо-

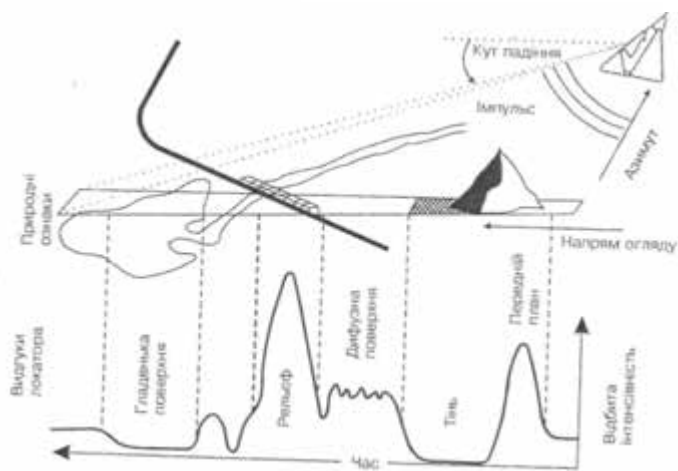


Рис. 6.4. Формування зображення за допомогою локатора

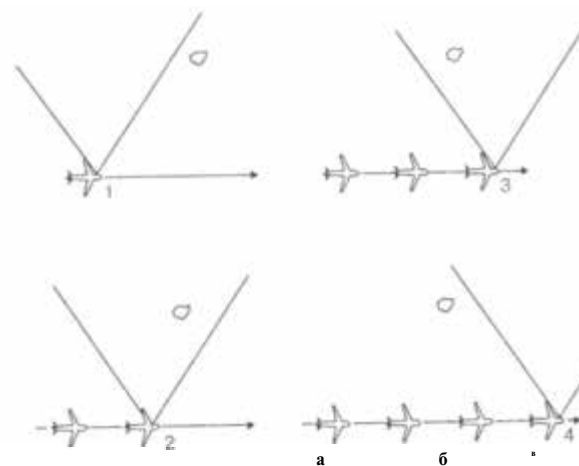


Рис. 6.5. Принцип дії локатора з синтетичною апертурою (пояснення в тексті)

стереження. В точці 1 об'єкт знаходиться поза діаграмою опромінювання локатора; в точках 2 і 3 об'єкт потрапляє в цю область; в точці 4 він знову зникає з зони спостереження локатора. Тобто об'єкт з'являється в системі реєстрації локатора лише протягом певного проміжку часу; під час цього проміжку відбитий сигнал заноситься в пам'ять бортового комп'ютера. Всі таким чином записані сигнали дають змогу реконструювати повну картину всіх об'єктів, що опромінювалися локатором з достатньо вузькою апертурою (звідси термін «синтетична апертура»). Слід зауважити, що сигнали локатора, які надсилаються у процесі руху літака, набувають зсуву до високих частот, тоді як сигнали, що посилюються назад, набувають зсуву до низьких частот завдяки доплерівському ефекту. Реєстрація та аналіз цих зсувів дає можливість точно визначити істинне просторове положення наземних об'єктів. Техніка локаторів з синтетичною апертурою достатньо складна й дорога, але її можливості зумовлюють найширше застосування. До переваг локаційних приладів можна віднести високу роздільну здатність, до недоліків — вплив рослинного покриву та нерівності ґрунту на сигнал, що реєструється.

Лазерні системи

Дистанційне зондування на основі лазерів полягає в опромінюванні об'єктів навколишнього середовища та реєстрації відбитого від об'єкта або розсіяного від нього лазерного випромінювання. Прилад для дистанційного зондування компонентів біосфери називають ЛІДАРом (від англійської фрази Light Detection And Ranging). Наведемо основні типи лідарів.

Лідар на основі реєстрації зворотного розсіювання

Рівняння лідара. Зворотне розсіювання описується таким рівнянням:

$$P_r(R) = P_0 \left(\frac{c\tau}{2} \right) k_p S_r R^{-2} \exp \left[-2 \int_0^R k_A(r) dr \right], \quad (6.3)$$

де $P_r(R)$ — миттєва потужність, яка реєструється приймачем у момент часу t , P_0 — потужність, що пропускається об'єктом у момент часу t_0 , c — швидкість світла, τ — тривалість імпульсу, k_p — коефіцієнт об'ємного розсіювання атмосфери, R — дальність, S — ефективна площа приймача, k_A — коефіцієнт об'ємної екстинкції атмосфери.

Реєстрація рівня послаблення оптичного випромінювання лідара за його взаємодії з атмосферними молекулами або аерозолями дає змогу оцінити їх концентрацію.

Джерелом випромінювання в лідарі є лазер, що генерує світлові імпульси. Якщо лазерний імпульс поширюється в атмосфері до будь-якого об'єкта, то час t проходження імпульсом відстані L до об'єкта і назад до приймача дорівнює:

$$t = 2L/c, \quad (6.4)$$

де c — швидкість світла.

Реєстрація моменту сприймання імпульсу приймачем дає змогу оцінити відстань до об'єкта.

Крім того, лазерний імпульс має певну тривалість t . Якщо припустити, що передній фронт імпульсу досягає об'єкта на відстані R , то задній фронт імпульсу в цей час буде на відстані R' . Співвідношення між R , R' , часом t_0 часом t реєстрації імпульсу мають вигляд:

$$R = c(t - t_0)/2; \quad (6.5)$$

$$R' = c(t - t_0 - t)/2. \quad (6.6)$$

Звідси розмір D об'єкта визначають за виразом:

$$D = R - R' = ct/2. \quad (6.7)$$

Коефіцієнт об'ємної екстинкції k_A атмосфери — частка падаючої енергії, на яку вона зменшується при проходженні одиниці довжини атмосфери. Одиниця вимірювання k_A — m^{-1} .

Поглинання лазерного променя молекулярним газом (забрудненням) можна оцінити так:

$$k_A = N_{\text{Л}} \cdot \sigma^A(\lambda) \cdot 10^{-6}, \quad (6.8)$$

де k_A — коефіцієнт поглинання, що вимірюється в $(\text{млн}^{-1} \cdot \text{см})^{-1}$, $N_{\text{Л}}$ — число Лошмідта ($2,69 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) — густина молекул газу в атмосфері за нормальних умов, $\sigma^A(\lambda)$ — переріз поглинання (см^2).

У реальних ситуаціях (на рівні моря при 0°C) коефіцієнт об'ємної екстинкції дорівнює:

$$k_A = 2,55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot \sigma^A(\lambda) \cdot 10^{-6} (\text{млн} \cdot \text{см})^{-1}. \quad (6.9)$$

Коефіцієнт об'ємного розсіювання k_p атмосфери визначається як частка падаючої енергії, що розсіюється в одиничному тілесному куті в оберненому напрямку на одиниці атмосферної довжини. Одиниця вимірювання k_p — $m^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Пружне розсіювання оптичного випромінювання можна представити двома основними типами — розсіюванням Релея і розсіюванням Мі:

$$k_p = k_{pp} + k_{pm}, \quad (6.10)$$

де k_{pp} — коефіцієнт розсіювання Релея, k_{pm} — коефіцієнт розсіювання Мі.

Коефіцієнт розсіювання Релея визначають за виразом:

$$k_{pp} = 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^{-4}, \quad (6.11)$$

де λ — довжина хвилі, нм.

Приклад

Розрахувати коефіцієнт розсіювання Релея під час проходження в атмосфері випромінювання рубінового лазера, довжина хвилі якого дорівнює 694,3 нм.

Розв'язок

Підставляємо числові дані в рівняння (6.11):

$$k_{pp} = 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^{-4} = 1,1 \cdot 10^{-6} / 694,3 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}.$$

Контрольне завдання

Визначити коефіцієнт розсіювання лазерного випромінювання, якщо довжина хвилі 300 нм.

Відповідь: $k_{pp} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$.

Коефіцієнт розсіювання Мі можна знайти за допомогою рівняння:

$$k_{pm} = \frac{3,91}{R} \left(\frac{550}{\lambda} \right)^q, \quad (6.12)$$

де $q = 0,585 R^{1/3}$ для видимості $R < 6$ км та $q = 1,3$ для середньої видимості, якщо k_{pm} вимірюється в км^{-1} , R — в км, λ — в нм, або $q = 0,0585 R^{1/3}$, якщо k_{pm} вимірюється в м^{-1} , R — в м, λ — в нм.

Приклад

Визначити коефіцієнт розсіювання Мі випромінювання рубінового лазера з довжиною хвилі 694,3 нм, якщо видимість становить 10 000 м.

Розв'язок

Знаходимо показник степеня q :

$$q = 0,0585 R^{1/3} = 0,0585 \cdot 10000^{0,333} = 0,0585 \cdot 21,48 = 1,256.$$

Підставляємо числові дані в рівняння (6.12):

$$k_{pm} = \frac{3,91}{R} \left(\frac{550}{\lambda} \right)^q = \frac{3,91}{10000} \left(\frac{550}{694,3} \right)^{1,256} = 3,91 \cdot 10^{-4} \cdot 0,792^{1,256} = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}.$$

Контрольне завдання

Визначити коефіцієнт розсіювання Мі випромінювання лазера з довжиною хвилі 300,1 нм, якщо видимість становить 5 км.

Відповідь: $1,43 \text{ км}^{-1}$.

Коефіцієнт об'ємного зворотного розсіювання характеризує частку випромінювання, яке після розсіювання прямує по траєкторії лазерного променя. Зворотне розсіювання також має два компоненти — Релея і Мі.

Коефіцієнт об'ємного зворотного розсіювання Релея визначають за виразом:

$$\beta_{pp} = 1,5 \frac{k_{pp}}{4\pi} \quad (\text{м}^{-1}\text{ср}^{-1}). \quad (6.13)$$

Коефіцієнт об'ємного зворотного розсіювання Мі визначають за виразом:

$$\beta_{pm} = 0,5 \frac{k_{pm}}{4\pi} \quad (\text{м}^{-1}\text{ср}^{-1}). \quad (6.14)$$

Повний коефіцієнт об'ємного зворотного розсіювання визначається як сума обох коефіцієнтів:

$$\beta = \beta_{pp} + \beta_{pm} \quad (6.15)$$

Приклад

Знайти повний коефіцієнт зворотного розсіювання випромінювання рубінового лазера (694,3 нм) на відстані 2 км.

Розв'язок

Коефіцієнт розсіювання Релея визначимо на основі рівняння (6.11):

$$k_{pp} = 1,1 \cdot 10^6 \cdot 1^{-4} = 1,1 \cdot 10^6 \cdot 694,3^{-4} = 1,1 \cdot 10^6 \cdot 4,3 \cdot 10^{-12} = 4,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}.$$

Коефіцієнт розсіювання Мі визначимо за допомогою рівняння (6.12):

$$q = 0,0585 R^{1/3} = 0,0585 \cdot 2000^{0,333} = 0,74.$$

$$k_{pm} = \frac{3,91}{R} \left(\frac{550}{\lambda} \right)^q = \frac{3,91}{2000} \left(\frac{550}{694,3} \right)^{0,74} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}.$$

Визначимо коефіцієнти зворотного розсіювання Релея й Мі:

$$\beta_{pp} = 1,5 \frac{k_{pp}}{4\pi} = 1,5 \frac{4,73 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 3,14} = 5,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}\text{ср}^{-1};$$

$$\beta_{pm} = 0,5 \frac{k_{pm}}{4\pi} = 0,5 \frac{1,7 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14} = 6,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}\text{ср}^{-1}.$$

Звідси повний коефіцієнт зворотного розсіювання дорівнює:

$$\beta = \beta_{pp} + \beta_{pm} = 5,6 \cdot 10^{-7} + 6,8 \cdot 10^{-5} = 6,86 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}\text{ср}^{-1}.$$

Приклад

Визначити потужність лазерного випромінювання, яка реєструється фотоприймачем лідара на основі рубінового лазера з такими параметрами: $\lambda = 694,3$ нм, $P_0 = 10$ Вт, $\tau = 10$ мкс, $S = 16 \text{ м}^2$, $R = 20$ км, $k_r(r) = 0,15 \text{ км}^{-1}$.

Розв'язок

Вважаючи середовище, що аналізується, однорідним, можна припустити, що:

$$\exp[-2 \int_0^R k_A(r) dr] = \exp[-2 k_A(r) R].$$

Підставляємо числові значення в останній вираз:

$$\exp[-2 k_A(r) R] = \exp(-2 \cdot 0,15 \text{ км}^{-1} \cdot 20 \text{ км}) = e^{-6} = 0,0025.$$

Розраховуємо тілесний кут:

$$\omega = \frac{S}{R^2} = \frac{16 \text{ м}^2}{20000^2} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ ср}.$$

Знаходимо параметр q :

$$q = 0,0585 R^{1/3} = 0,0585 \cdot 20000^{0,333} = 1,59.$$

Визначаємо коефіцієнт об'ємного розсіювання:

$$k_{pm} = \frac{3,91}{R} \left(\frac{550}{\lambda} \right)^q = \frac{3,91}{20} \left(\frac{550}{694,3} \right)^{1,59} = 0,135.$$

Обчислюємо коефіцієнт об'ємного зворотного розсіювання:

$$\beta_{pm} = 0,5 \frac{k_{pm}}{4\pi} = 0,5 \frac{0,135}{4 \cdot 3,14} = 0,0054 \text{ км}^{-1} \text{ ср}^{-1}.$$

Звідки

$$P_r(R) = 10 \text{ Вт} (3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 10 \cdot 10^6 \text{ с} \cdot 5,4 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot 4 \cdot 10^8 \text{ ср} \cdot 0,0025) / 2 = 1,3 \cdot 10^{10} \text{ Вт}.$$

Контрольне завдання

Визначити потужність випромінювання лазера на фарбниках, що застосовується для дистанційного зондування туману ($k_{pm} = 0,5 \text{ км}^{-1}$), якщо $\lambda = 585 \text{ нм}$, $P_0 = 0,25 \text{ Вт}$, $\tau = 1 \text{ мкс}$, $S = 1000 \text{ см}^2$, $R = 5 \text{ км}$.

Відповідь: $3 \cdot 10^{11} \text{ Вт}$.

Лідар на основі реєстрації диференційного поглинання

Метод ґрунтується на реалізації істотної залежності коефіцієнта об'ємної екстинкції від довжини світлової хвилі. В основу роботи диференційного лідара покладено принципи опромінювання об'єкта, що контролюється, світлом із різними довжинами хвиль. Випромінювання з однією (λ_0) довжиною

хвилі, що збігається з лінією поглинання об'єкта (газу чи забруднення), поглинається об'єктом, тоді як випромінювання з іншою (λ_1 довжиною хвилі, далекою від лінії поглинання, набуває пружного розсіювання (рис. 6.6). Критерієм оцінки забруднення атмосфери є відношення сигналів, що реєструються на обох довжинах хвиль. Лідар такого типу отримав в англійській літературі назву DIAL (Differential Absorption Lidar) або DAS (Differential Absorption and Scattering).

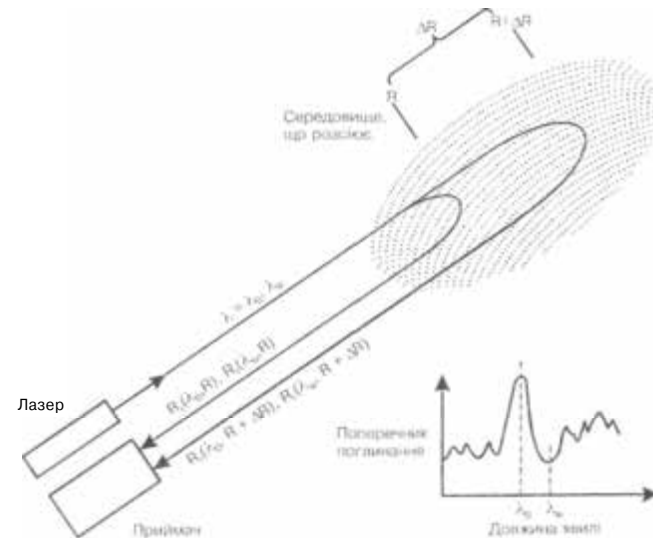


Рис. 6.6. Принцип дії лідара на основі реєстрації диференційного поглинання

Мінімальна концентрація газу чи забруднювача, що вимірюються методом реєстрації диференційного поглинання, визначається за виразом:

$$N_{min} = \frac{\Delta \ln a}{2\sigma \Delta R}, \quad (6.16)$$

де σ — переріз диференційного поглинання, а величина $\Delta \ln a$ описується рівнянням:

$$\Delta \ln a = \ln \frac{P(\lambda_0, R)}{P(\lambda_0, R + \Delta R)} - \ln \frac{P(\lambda_1, R)}{P(\lambda_1, R + \Delta R)}. \quad (6.17)$$

Для практичних обчислень залежно від того, в яких одиницях вимірюється концентрація N , використовуються такі вирази:

$$N_{\min} (\text{см}^{-3}) = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\Delta \ln a}{\sigma (\text{см}^2) \Delta R (\text{м})}; \quad (6.18)$$

$$N_{\min} (\text{г} \cdot \text{см}^{-3}) = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\Delta \ln a}{\sigma (\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}) \Delta R (\text{м})}; \quad (6.19)$$

$$N_{\min} (\text{млн}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}) = \frac{5 \Delta \ln a}{\sigma (\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}) \Delta R (\text{км})}. \quad (6.20)$$

В останньому виразі σ називають коефіцієнтом диференційного поглинання k , який можна пов'язати з σ (см²) виразом:

$$k (\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}) = N_0 (\text{см}^{-3} \cdot \text{атм}^{-1}) \sigma (\text{см}^2), \quad (6.21)$$

де $N_0 = 2,55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot \text{атм}^{-1}$ – густина молекул в атмосфері на рівні моря при температурі 0 °С, або:

$$k (\text{млн}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}) = 2,55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot \sigma (\text{см}^2) \cdot 10^{-6}. \quad (6.22)$$

Приклад

Визначити мінімальну концентрацію молекул SO_2 , якщо $\Delta \ln a = 0,02$, а $\Delta R = 100$ м. Коефіцієнт диференційного поглинання SO_2 становить $k = 26 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$.

Розв'язок

Підставляємо числові дані у вираз (6.20):

$$\begin{aligned} N_{\min} (\text{млн}^{-1} \cdot \text{атм}) &= \frac{5 \cdot 0,02}{26 (\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}) \cdot 0,1 \text{ км}} = \\ &= 0,038 \text{ млн}^{-1} \cdot \text{атм}. \end{aligned}$$

Контрольне завдання

Визначити коефіцієнт диференційного поглинання k (см⁻¹ · атм⁻¹) озоном випромінювання з довжиною хвилі 0,29 мкм, якщо $\Delta \ln a = 0,02$, $\Delta R = 0,1$ км і $N_{\min} = 0,08 \text{ млн}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$.

Відповідь: $12,5 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$.

Доплерівський лідар

Суть ефекту Доплера полягає в тому, що при опромінуванні об'єкта, який рухається з швидкістю V , світлом певної

довжини хвилі λ відбувається розсіювання світла, причому частота (довжина хвилі) розсіяного світла залежить від швидкості руху об'єкта. Доплерівський зсув Δf частоти світла залежить від кута розсіювання θ світла об'єктом, швидкості руху V об'єкта та від кута φ між напрямком швидкості й напрямком поширення світла.

Доплерівський зсув Δf частоти світла визначають за виразом:

$$\Delta f = \frac{2V}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi. \quad (6.23)$$

Приклад

Визначити швидкість руху частинок аерозолу під впливом вітру для таких параметрів доплерівського розсіювання: $\Delta f = 2,2 \cdot 10^7$ Гц, $f = 4,7 \cdot 10^{14}$ Гц, $\varphi = 0^\circ$, $\theta = 180^\circ$.

Розв'язок

Використовуючи формулу (6.23), отримуємо:

$$\begin{aligned} V &= \frac{\lambda \cdot \Delta f}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi = \frac{c \Delta f}{2f} \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi = \\ &= \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 2,2 \cdot 10^7 \text{ Гц}}{2 \cdot 4,7 \cdot 10^{14} \text{ Гц}} \sin 90^\circ \cos 0^\circ = 7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \end{aligned}$$

Контрольне завдання

Визначити величину доплерівського зсуву, що реєструється при опромінуванні краплин дощу, для таких параметрів: $\lambda = 638$ нм, $\varphi = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $V = 6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Відповідь: $9,4 \cdot 10^6$ Гц.

Лідар на основі ресстрації флуоресценції

Багато компонентів атмосфери демонструють здатність флуоресцювати. Методи флуоресцентного лазерного зондування дуже чутливі через малі тиски атмосфери, при яких відсутні зіткнення молекул, що гасять флуоресценцію.

Лідар на основі ресстрації комбінаційного розсіювання

Якщо розсіювання світла речовиною супроводжується помітною зміною частоти світла, що розсіюється, то його називають комбінаційним (або раманівським). Цей тип розсіювання оптичного випромінювання включає втрату

або одержання кванта коливальної енергії молекулою. Йдеться про непружне світлове розсіювання, коли фотон, що падає, має енергію значно більшу, ніж енергія, яку коливальний квант втрачає за збудження молекули; залишок енергії розсіюється як фотон зі зменшеною частотою. Перевагою методу є те, що спектральні комбінаційні зсуви специфічні для кожної молекули; інтенсивність кожної лінії пропорційна концентрації кожного компонента; вузькі спектральні лінії та комбінаційні зсуви обмежують вплив прямого та розсіяного випромінювання; метод характеризується просторовим і часовим розділенням. Недоліком цього методу дистанційного зондування є малий поперечник розсіювання, що потребує використання потужних лазерів та складних колімаційних систем.

Застосування дистанційного зондування

Реєстрація γ -випромінювання дає можливість за допомогою оцінки рівня його послаблення визначати вологість ґрунту, наявність або кількість снігу на поверхні. Недолік методу — обмежене просторове розділення та можливість вимірювань лише на невеликих висотах польоту авіаносія.

Фотографічні та відеографічні системи застосовують для визначення типів та структури ґрунтів, аналізу стану рослинних покривів, спостереження за дренажними системами, оцінки характеру морських поверхонь. Завдяки використанню фотографічних систем можна отримати інформацію щодо просторового розподілу седиментів, характеру ерозійних процесів, викиду забруднень та стічних вод з труб.

Багатоспектральні сканери використовують для аналізу земної поверхні, рослинних покривів, картографії, визначення вологості ґрунту, оцінок рослинної біомаси, снігових покривів, непрохідних просторів, кольору океану.

Теплові сенсори знаходять застосування при визначенні рівня теплового забруднення водойм, оцінок розмірів, температури рослинних покривів та впливу на них зовнішніх факторів, вологості ґрунту, теплових аномалій, температури та стану поверхні водойм, морських течій, льодових та снігових масивів, вулканічної активності, дренажних

структур, термічних індустріальних викидів. Широкого застосування набула техніка дистанційного зондування теплового інфрачервоного випромінювання для аналізу ландшафтних екологічних процесів — вимірювання випаровування, евапотранспірації та вологості ґрунту, вивчення характеристик теплового балансу та теплових потоків, оцінки теплообміну між лісовими масивами.

Надвисокочастотні (НВЧ) локатори дають можливість вимірювати характеристики ґрунтів (нерівність, структуру, вологість), рослинних покривів та опадів, оцінювати водні ресурси, стан морської поверхні, прогнозувати наближення цунамі, визначати типи та розміри льодових масивів, аналізувати характер упаковки снігу. Прикладами застосування радіолокаційної техніки є дистанційне спостереження за блискавкою (рис. 6.7) та дистанційний контроль за повенями (рис. 6.8).

Реєстрація пасивного НВЧ випромінювання застосовується для спостереження за температурним станом земної та морської поверхонь, визначення вологості ґрунту, оцінки розмірів та стану рослинних, льодових та снігових покривів.

Лазерні системи використовують для дистанційного зондування атмосфери, зокрема визначення висоти хмар, дослідження структури й властивостей хмар, вимірювання

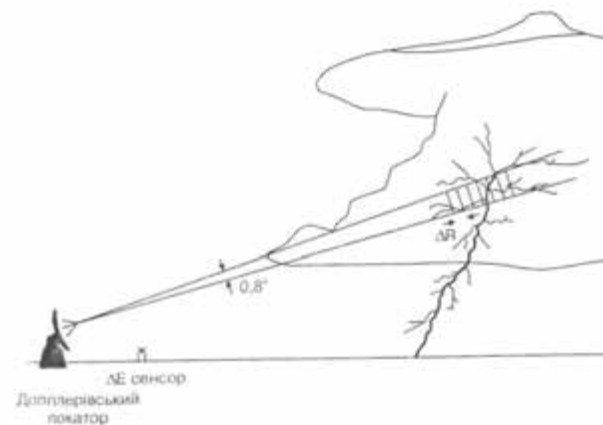


Рис. 6.7. Дистанційне спостереження за блискавкою за допомогою радіолокатора

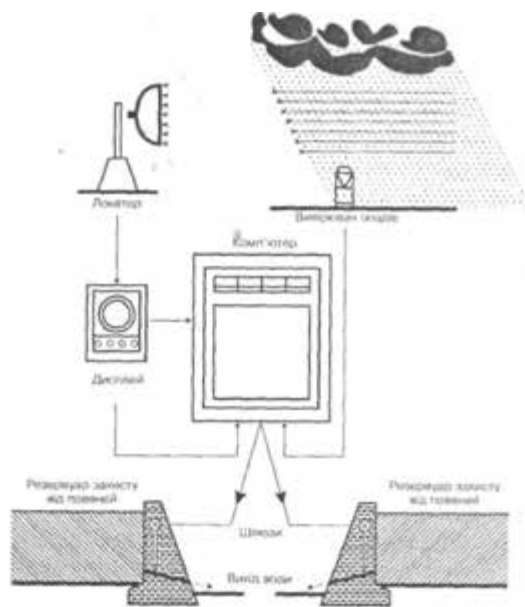


Рис. 6.8. Дистанційне спостереження за пожежами за допомогою радіолокатора

параметрів вітру, вимірювання вологості й температури повітря, оцінки опадів. Лазерні системи, встановлені на борту авіаносія чи супутника, здатні проводити топографічні вимірювання на земній поверхні, оцінювати рослинні покриви, водяні потоки, ерозійні процеси.

Використання техніки реєстрації розсіювання оптичного випромінювання видимої області спектра лежить в основі аналізу молекул та аерозолів, присутніх в атмосфері.

Лазерний диференційний лідар застосовують для дослідження розподілу забруднень над промисловими підприємствами, визначення озону.

Допплерівський лідар використовують для вимірювання параметрів вітру та опадів.

З точки зору контролю навколишнього середовища перспективними можна вважати застосування флуоресцентної дистанційної спектроскопії для оцінки в атмосфері частинок попелу з підприємств, що використовують вугілля; сполук кальцію та ртуті з плавильних і металургійних заводів,

флуоридів, що супроводжують виробництво алюмінію або фосфору; частинок сульфатів, хлоридів, ванадію, миш'яку, оксидів і сульфідів різноманітних елементів. Серед неорганічних та органічних сполук, що супроводжують діяльність хімічних та промислових підприємств і демонструють флуоресценцію, варто виділити такі: AlF_3 , Al_2O_3 , CaF_2 , $CaSO_4$, $CuSO_4$, $HgSO_4$, криоліт, кам'яновугільний газ, фосфати.

Лідар на основі комбінаційного розсіювання може бути застосований для визначення наявності та кількісної оцінки атмосферних молекул (H_2O , SO_2 , CO_2 , CO , NO , C_2H_4 та ін.). Слід також відзначити можливість досліджень об'єктів, що знаходяться у рідкому стані або містять у собі воду; за допомогою методів спектроскопії комбінаційного розсіювання вимірювати температури поверхні водойм.

В інфрачервоній області спектра домінує поглинання сонячного випромінювання різноманітними газами над розсіюванням. Так, аналіз поглинання в області 4,3 мкм (CO), 4,5 мкм (N_2) та 13-15 мкм (CO) використовують для вимірювання температурних профілів; в області 6+7 мкм — для оцінки водяної пари; за станом земної поверхні доцільно проводити спостереження в широкій області 8+12,5 мкм.

Репродуктивний тест

Який метод дистанційного зондування доцільно використати для визначення температури поверхні водойм?

Альтернативний тест

Чи правильне твердження, що:

1. Молекули основних компонентів атмосфери — азоту й кисню беруть участь у процесі поглинання оптичного випромінювання. Так Ні

2. Розсіювання Мі відбувається на частинках великих розмірів. Так Ні

3. До недоліків радіолокаційних методів можна віднести вплив рослинного покриву та нерівності ґрунту на сигнал, що реєструється. Так Ні

4. Лазерний диференційний лідар застосовують для вимірювання параметрів вітру та опадів. Так Ні

Акордно-вибірковий тест

Знайти правильні твердження.

Допплерівський лідар використовують для:

1) вимірювання параметрів вітру; 2) дослідження розподілу

забруднень над промисловими підприємствами; 3) визначення озону; 4) аналізу молекул та аерозолів; 5) вимірювання опадів.

Парно-вибірковий тест

Складіть пари «метод дистанційного зондування — його переваги»:

- | | |
|-------------------------------|--|
| а. Фотографічні системи | 1. спроможність реєструвати різницю температур близько 0,4 К; |
| б. Відеографічні системи | 2. створення зображень об'єктів навколишнього середовища з високим рівнем розділення; |
| в. Багатоспектральні сканери | 3. створення та накопичення послідовних зображень будь-якого процесу; |
| г. Теплові сенсори | 4. визначення положення, руху та природи віддалених об'єктів; |
| д. Надвисокочастотні локатори | 5. здатність використовувати вузькі спектральні ділянки й отримувати інформацію в цифровій формі |

Конструктивний тест

Знайдіть у літературі спектр поглинання хлорофілу. Який лазер доцільно використати як джерело збудження флуоресценції хлорофілу (690 нм і 740 нм) під час дистанційного зондування водної рослинності: He:Сs1-лазер (440 нм), He:Ne-лазер (632,8 нм), СО₂-лазер (10,6 мкм)

Домашнє завдання

На рис. 6.9 наведено схему проходження сонячного випромінювання через атмосферу опівдні і під час заходу сонця. Якого кольору буде спостерігатися небо з точок спостереження 1, 2 і 3? Пояснити ці явища.

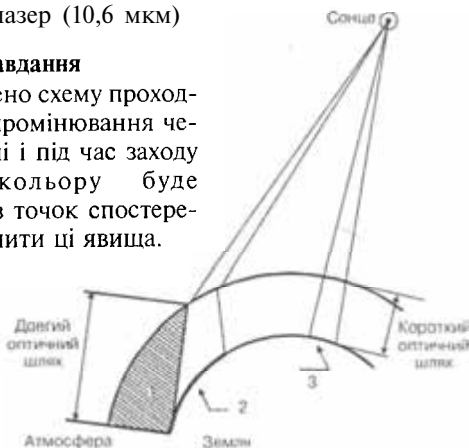


Рис. 6.9. Схема проходження сонячного випромінювання через атмосферу опівдні і під час заходу Сонця

VII. БЮШДИКАЦІЯ ТА БІОТЕСТУВАННЯ

Основні визначення

Спостереження за станом біотичної компоненти біосфери, її реакцією на антропогенні впливи, відхилення від нормального, природного стану на різних рівнях (молекулярному, клітинному, організменному, популяційному й біоценологічному) називають *біологічним моніторингом*. Біологічний моніторинг пов'язаний з двома основними напрямками — *біоіндикацією* та *біотестуванням*.

Біоіндикація

Біоіндикація — використання організмів або угруповань організмів, чий вміст певних елементів або сполук, а також морфологічна, гістологічна або клітинна структура, метаболічні та біохімічні процеси, поведінка та популяційна організація дають інформацію щодо якості навколишнього середовища або природи змін цього середовища.

Біоіндикатори — біосистеми, фізіологічні функції яких так тісно корелюють з факторами навколишнього середовища, що можуть бути використані для оцінки останніх. Багато організмів є чутливими до різних абіотичних і біотичних факторів середовища і можуть існувати лише в певних, часто дуже обмежених змінах цих факторів. Отже, спостереження за реакцією біоіндикаторів даватиме інформацію про стан навколишнього середовища. Біологічні системи, використовувані як біоіндикатори, різноманітні: мікроорганізми, нижчі рослини, лишайники, гриби, багато вищих рослин, окремі види й суспільства тварин, клітинні та субклітинні компоненти організму можуть бути ефективними біоіндикаторами, адаптованими до певних умов навколишнього середовища. З точки зору екології особливий інтерес становить можливість використання біоіндикаторів для оцінки рівня забруднення довкілля, здійснення постійного моніторингу за його якістю та змінами.

Індикаційні ознаки — це біологічні змінні, що характеризують стан окремих особин, групи організмів, популяцій та екосистем. Розглядаються й аналізуються ці ознаки на різних рівнях організації. Відгуки на нижчих рівнях організації характеризуються високою чутливістю й специфічністю, тоді як відгуки на вищих рівнях найкращі з екологічної точки зору.

Як приклади чутливих біоіндикаторів атмосферного забруднення можна навести епіфітні лишайники (наприклад, *Hypogymnia physodes*), чутливі до якості повітря — багата флора лишайників свідчить про якісне повітря, тоді як відсутність лишайників указує на забруднення повітря SO_2 . Біоіндикаційні властивості лишайників ґрунтуються на аналізі рівня поселення та абсолютної поверхні лишайників на стовбурі дерева, видового складу, частоти, з якою зустрічаються лишайники.

Відомо, що сільськогосподарські бур'яни проростають на ґрунтах певної якості. Так, *Teesdalia nudicaulis* можна зустріти лише на кислих ґрунтах, тоді як *Mercurialis annua* — на основних.

Розглянемо як приклад індикаторів евтрофікації водойм комах-кровососів. За перші роки існування водойми видовий склад комах характеризується наявністю кровососів: гедзів (*Tabanidae*), мокреців (*Ceratopogonidae*), комарів (*Culicidae*). Протягом десяти років у замкнених водоймах накопичується велика кількість органічних забруднювачів. У мулі можна знайти личинок комарів з родини *Tipulidae*, в прибережній зоні — личинок гедзів, мокреців і комарів (*Culex*, *Aedes*, *Mansonia*). Евтрофікація водойми врешті-решт призводить до зміни роду *Mansonia*, *Culiseta*, скорочується кількість видів гедзів; водночас фауна комах може бути представлена деякими видами з родини *Mucidae*, *Ceratopogonidae*, *Culicidae* (*Culex pipiens*, *Aedes caspus* та ін.).

Перевагами методів біоіндикації є те, що вони підсумовують біологічно важливі дані щодо навколишнього середовища; здатні реагувати на короточасні й залпові викиди токсикантів; реагують на швидкість змін, що відбуваються в довкіллі; вказують на місця накопичення забруднювачів та шляхи їх міграції; дають змогу розробляти оцінки шкідливого впливу токсикантів на людину й

живу природу на ранніх стадіях та нормувати допустиме навантаження на екосистеми.

До недоліків методів біоіндикації слід віднести те, що вони не дають інформації про об'єктивні, фізико-хімічні особливості стресового фактора, що діє; вони потребують, як правило, більшої повторності для отримання статистично значущих результатів.

Біотестування

Біотестування — використання організмів або угруповань організмів, чий вміст певних елементів або сполук, а також морфологічна, гістологічна або клітинна структура, метаболічні й біохімічні процеси, поведінка та популяційна організація дають інформацію щодо кількісної оцінки якості навколишнього середовища або змін цього середовища.

Тест-об'єкт — організм або угруповання організмів, за ступенем впливу на які судять про якість (наприклад, токсичність) середовища.

Тест-реакція — фізіологічний або поведінковий відгук організму на зміну якості середовища.

Типові тест-об'єкти й тест-реакції, що використовуються під час біотестування, наведено в табл. 7.1.

Перевагами методів біотестування є висока чутливість, швидкодія, надійність, економічність, можливість створення автоматизованих систем збирання та обробки інформації.

До недоліків можна віднести відсутність кількісної оцінки всіх токсичних речовин, присутніх у середовищі, та можливої взаємодії окремих компонентів токсичних сполук, що містяться в суміші.

Якщо організми використовуються в природних умовах, методи біоіндикації або біотестування називають *пасивними*, якщо в лабораторних — *активними*.

Методи біотестування

Векторний метод біотестування ґрунтується на визначенні величини g і напрямку θ вектора R , що характеризується такими проєкціями на осі Y -вимірної системи координат: X_1/X_{1c} , X_2/X_{2c} , ..., X_N/X_{Nc} (де X_1 , X_2 , ..., X_N і X_{1c} ,

7.1. Типові тест-об'єкти і тест-реакції, що використовуються під час біотестування

Тест-об'єкт	Тест-реакція
Бактерії <i>Bacillus cereus</i> <i>Beneckea harveyi</i>	Інтенсивність розмноження, біolumінесценція, активність окислювальних ферментів, проникність мембрани, механічна міцність
Гриби й актиноміцети <i>Aspergillus niger</i> <i>Streptomyces olivaceus</i>	Реакція росту
Водорості <i>Scenedesmus quadricuada</i> <i>Sc.acuminates</i> <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Euglena gracilis</i> <i>Dunaliella salina</i> <i>D. viridis</i> <i>Nitela flexilis</i> <i>Phaedactylum tricorunctum</i> <i>Ciadorphora Fracta</i>	Інтенсивність розмноження, рухлива активність, іммобілізація клітин, біоелектричні реакції, фотосинтетична активність клітин, імпеданс суспензії, проникність мембрани, активний транспорт
Найпростіші <i>Tetrahymena pyroformus</i> <i>Spirostomon ambiguum</i> <i>Euplotes sp.</i>	Інтенсивність розмноження, рухлива активність, морфологічні зміни тіла, інтенсивність дихання, активний транспорт
Безхребетні <i>Daphnia magna</i> <i>Hydra attenuata</i> <i>Hirudo medicinales</i> <i>Unio tumidus</i> <i>Eulimnogammarus verecousus</i> <i>Myzuchopecten yessoensis</i>	Вживання, інтенсивність дихання та серцебиття, поведінкова реакція
Риби <i>Perca fluviatilis</i> <i>Phoxinus phoxinus</i> <i>Cyprinus carpio</i>	Поведінкова реакція, рухлива активність, інтенсивність дихання та серцебиття, зміна пігментації шкіри

X_f, \dots, X_{Nc} — тест-реакції організмів, що перебувають під впливом токсиканта й контрольних організмів відповідно.

У двовимірній системі координат ($N=2$), величина z напрямком θ визначають як:

$$r = \sqrt{\left(\frac{X_1}{X_{1c}}\right)^2 + \left(\frac{X_2}{X_{2c}}\right)^2}, \quad (15.1)$$

$$q = \arctg \left[(X_1/X_{1c}) / (X_2/X_{2c}) \right]. \quad (15.2)$$

Приклад

Результати впливу міді на фототаксис і швидкість поступального руху водорості *Dunaliella* наведено в таблиці:

Параметр фоторуху	Концентрація, М			
	Контроль	10^{-6}	10^{-4}	10^{-3}
Фототаксис P , відн.од.	0,28	0,21	0,09	0,02
Швидкість руху V , мкм·с ⁻¹	25,1	24,4	23,1	13,0

Визначити залежність величини z і напрямку θ вектора R від концентрації міді в середовищі.

Розв'язок

Використовуючи формули (15.1) і (15.2), знаходимо величини z і напрямку θ вектора R

Параметр фоторуху	Концентрація, М			
	Контроль	10^{-6}	10^{-4}	10^{-3}
r	1,41	1,22	0,97	0,52
θ	45,0	52,3	70,8	82,3

Таким чином, збільшення концентрації міді в середовищі призводить до зменшення величини z і обертання вектора R проти годинникової стрілки.

Контрольне завдання

Побудувати графік залежності величини z і напрямку θ вектора R від концентрації поверхнево-активної речовини (ПАВ) в середовищі, якщо результати впливу на фототаксис і швидкість поступального руху водорості *Dunaliella* мають вигляд:

Параметр фоторуху	Концентрація, мг·л ⁻¹			
	Контроль	1	5	10
Фототаксис P , відн. од.	0,29	0,30	0,31	0,31
Швидкість руху V , мкм·с ⁻¹	25,4	19,8	15,2	11,0

Автоматизована система біотестування мікроорганізмів може бути використана для оцінки якості води на основі реєстрації різних параметрів руху джгутикової водорості *Euglena gracilis*, зокрема гравітаксису, рухливості й швидкості руху клітин. Ці параметри чутливі до ряду токсичних сполук, присутніх у стічних водах. Схему приладу для авто-

матизованого біотестування водоростей наведено на рис. 7.1. Вона складається з горизонтально розміщеного мікроскопа, кювети з водоростями, що рухаються у вертикальному напрямку, ССД-камери, комп'ютерної системи спостереження руху водоростей, обробки й аналізу параметрів руху. Процедура вимірювань передбачає пропускання через кювету стандартизованої клітинної суспензії, яку спочатку розбавляють контрольною водою, а потім замінюють водою з токсикантом. Система дає змогу протягом 6+10 хв. оцінити небезпечні рівні токсичності водного середовища.

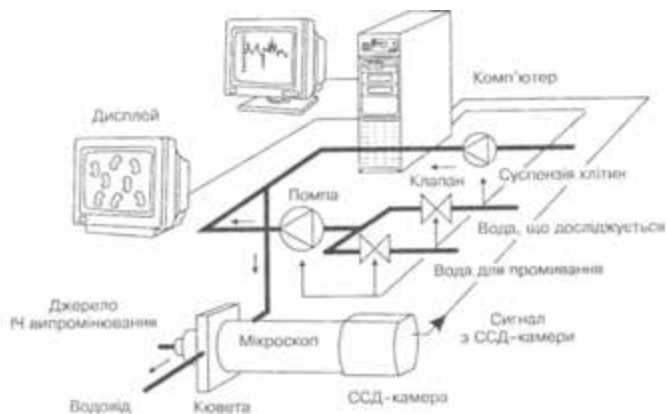


Рис. 7.1. Схема приладу для автоматизованого біотестування водоростей

Риби як тест-об'єкти. Забруднення водойм безпосередньо впливає на їхню фауну. На стан і поведінку риб впливають суспендовані у воді речовини, рН середовища, хімічні сполуки, важкі метали, пестициди, поверхнево-активні речовини. Вплив токсикантів на риб залежить від тривалості дії, типу токсиканта, показників якості води, видів риб та стадій їх життєвого циклу.

Основні методи біотестування з рибами як тест-об'єктами ґрунтуються на реєстрації таких тест-реакцій як поведінка, рухова активність, інтенсивність серцебиття та дихання, зміна рівня пігментації, порушення активності ферментів тощо. Розглянемо конкретні методи біотестування.

На рис. 7.2 наведено принцип дії біосигналізатора, в якому використовується поведінкова реакція риб. При

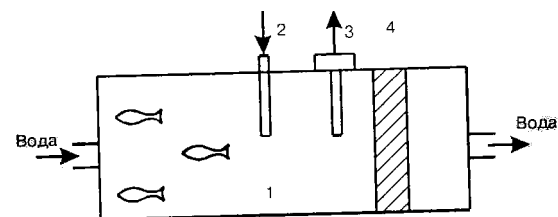


Рис. 7.2. Принцип біотестування водного середовища на основі реєстрації поведінкової реакції риб: 1 — акваріум; 2 — електроди; 3 — фотоприймач; 4 — система подачі чистої води

відсутності токсикантів риби тримаються проти течії; мимовільному виходу риб з «житлової» зони заважає електричне поле, яке створюється електродами. Після підвищення токсичності води риби залишають цю зону, що фіксується фотоприймачами. Метод застосовано для контролю вод, що містять активний хлор, аміак, мідь, залізо, спирти, альдегіди, нафтоли, поверхнево-активні речовини, аміно- та нітросполуки.

Інший метод (рис. 7.3) передбачає реєстрацію електрокардіограми (ЕКГ) та електропневмограми (ЕПГ) риб, вміщених у контейнер з проточною водою, обладнаний електродами. Визначення рівня токсичності води полягає в порівняльному аналізі середніх значень ЕКГ і ЕПГ для груп риб у розчинах з токсикантом та в контрольній воді.

Схему дистанційної системи біотестування з використанням риб як тест-об'єктів наведе-

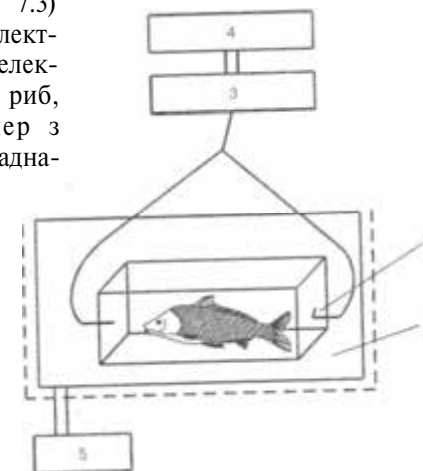


Рис. 7.3. Схема установки для біотестування стічної води згідно з кардіореспіраторними реакціями риби: 1 — контейнер; 2 — електроди; 3 — підсилювач; 4 — система реєстрації; 5 — термостат

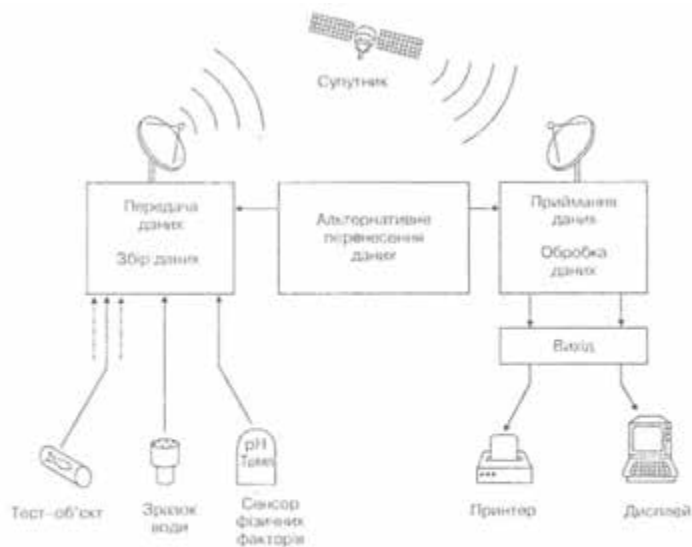


Рис. 7.4. Схема дистанційної системи біотестування з використанням риб як тест-об'єктів

но на рис. 7.4. Інформація щодо забруднення водойми, температури, рН та інших параметрів надходить на вхід бортового комп'ютера, звідки передається на центральний пункт спостереження та аналізу стану середовища.

Репродуктивний тест

До якого типу біологічних методів контролю навколишнього середовища — біоіндикації чи біотестування — можна віднести аналіз середньої висоти й діаметра хвойних дерев залежно від атмосферного забруднення?

Альтернативний тест

Чи правильне твердження, що:

1. Біотестування ґрунтується на оцінках якості навколишнього середовища або природи змін цього середовища. Так Ні
2. Зміна видового складу місцевої флори є індикаційною ознакою. Так Ні

Акордно-вибірковий тест

Знайти правильні ствердження.

Відгуки на нижчих рівнях організації характеризуються:

- 1) високою чутливістю; 2) невисокою чутливістю; 3) специфічністю.

Конструктивний тест

Знайдіть у літературі основні напрями, в яких можна бачити подальші перспективи біоіндикації та біотестування.

Домашнє завдання

Аналіз впливу зовнішніх чинників на фотосинтетичну активність рослини проводять за допомогою індексу життєздатності *Rfd*, який вимірюють шляхом реєстрації індукції флуоресценції на двох довжинах хвиль — 690 нм і 740 нм.

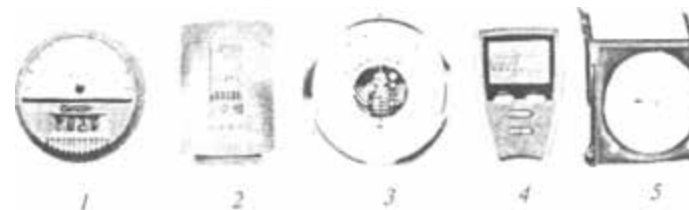
Результати вимірювання індексів життєздатності *Rfd(690)* і *Rfd(740)* листка зеленого гороху *Pisum sativum* різного забарвлення наведено в таблиці.

Колір	<i>Rfd(690)</i> , / <i>Rfd(690)</i>	<i>Rfd(740)</i> / <i>Rfd(740)</i>
Темно-зелений (контроль)	1	1
Зелений	0,70	0,80
Світло-зелений	0,54	0,65
Жовто-зелений	0,30	0,37

Визначити величину ε і напрямок θ вектора R для різних рівнів забарвлення й проаналізувати вплив забарвлення на поведінку цього вектора.

Останній тест

До якого типу приладів (аналогового чи цифрового) належать прилади 1—5?



Знайдіть на рисунках відповідні типи приладів: *a* — гігрометр; *b* — шумомір; *в* — скляний термометр; *г* — анемометр; *д* — люксеметр; *е* — термоелектричний термометр; *ж* — біметалевий термометр; *з* — віброметр; *и* — психрометр; *к* — гігро-термограф.

ДОДАТКИ

1. Пружність водяної пари в ММ рт. ст. за різних температур

t°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	4,58	4,61	4,65	4,68	4,71	4,75	4,79	4,82	4,85	4,89
1	4,92	4,96	5,00	5,03	5,07	5,10	5,15	5,18	5,21	5,25
2	5,29	5,33	5,37	5,41	5,45	5,48	5,52	5,57	5,60	5,64
3	5,69	5,72	5,76	5,84	5,89	5,93	5,93	5,97	6,02	6,05
4	6,10	6,14	6,18	6,23	6,27	6,32	6,36	6,41	6,45	6,50
5	6,54	6,59	6,63	6,68	6,73	6,77	6,82	6,87	6,92	6,96
6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7,41	7,46
7	7,52	7,54	7,61	7,67	7,72	7,77	7,83	7,88	7,94	7,99
8	8,04	8,10	8,15	8,21	8,27	8,33	8,38	8,44	8,49	8,55
9	8,61	8,67	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08	9,15
10	9,21	9,27	9,33	9,40	9,46	9,53	9,59	9,65	9,71	9,78
11	9,85	9,91	9,98	10,04	10,11	10,18	10,25	10,32	10,38	10,45
12	10,52	10,59	10,66	10,74	10,80	10,88	10,95	11,02	11,09	11,16
13	11,24	11,31	11,39	11,46	11,54	11,61	11,69	11,76	11,84	11,91
14	11,99	12,07	12,15	12,23	12,31	12,39	12,47	12,55	12,63	12,72
15	12,78	12,87	12,95	13,03	13,12	13,20	13,29	13,38	13,46	13,55
16	13,64	13,72	13,80	13,89	13,98	14,07	14,16	14,25	14,34	14,43
17	14,53	14,62	14,71	14,81	14,90	15,00	15,09	15,18	15,27	15,38
18	15,48	15,57	15,67	15,77	15,87	15,97	16,07	16,17	16,27	16,38
19	16,47	16,58	16,68	16,79	16,89	17,00	17,10	17,21	17,31	17,43
20	17,53	17,64	17,75	17,86	17,97	18,08	18,19	18,30	18,42	18,54
21	18,65	18,76	18,88	18,99	19,11	19,23	19,35	19,47	19,59	19,71
22	19,83	19,95	20,07	20,20	20,32	20,44	20,56	20,69	20,82	20,94
23	21,07	21,19	21,33	21,46	21,58	21,71	21,83	21,96	22,11	22,24
24	22,38	22,51	22,65	22,78	22,92	23,06	23,20	23,33	23,47	23,62
25	23,76	23,90	24,04	24,19	24,33	24,47	24,62	24,76	24,91	25,06
26	25,21	25,36	25,51	25,66	25,81	25,96	26,12	26,27	26,43	26,59
27	26,74	26,90	27,06	27,21	27,37	27,54	27,70	27,86	28,18	28,18
28	28,34	28,51	28,69	28,85	29,02	29,19	29,36	29,53	29,70	29,87
29	30,04	30,22	30,40	30,57	30,75	30,92	31,10	31,28	31,46	31,64
30	31,83	32,01	32,20	32,38	32,57	32,75	32,94	33,13	33,32	33,51
31	33,70	33,89	34,09	34,28	34,49	34,67	34,87	35,07	35,27	35,47
32	35,67	35,87	36,07	36,28	36,48	36,69	36,89	37,10	37,31	37,52
33	37,73	37,95	38,16	38,38	38,59	38,81	39,02	39,24	39,47	39,68
34	39,91	40,13	40,35	40,58	40,80	41,03	41,26	41,49	41,72	41,95
35	42,18	42,42	42,66	42,89	43,13	43,37	43,61	43,85	44,09	44,33
36	44,58	44,82	45,06	45,31	45,57	45,81	46,06	46,32	46,57	46,83
37	47,08	47,34	47,60	47,85	48,12	48,38	48,64	48,90	49,17	49,44
38	49,71	49,98	50,25	50,52	50,80	51,07	51,34	51,62	51,90	52,18
39	52,46	52,61	53,02	53,31	53,50	53,89	54,17	54,46	54,76	55,05

2. Насиченість водяної пари в паскалях за різних температур

t°C	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	796	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	966	974	981	988	995
7	1002	1008	1015	1022	1029	1036	1044	1051	1058	1065
8	1072	1080	1087	1095	1102	1110	1117	1125	1132	1140
9	1148	1156	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1220
10	1228	1236	1244	1253	1261	1270	1278	1287	1295	1304
11	1313	1321	1330	1339	1348	1357	1366	1375	1384	1393
12	1403	1412	1421	1431	1440	1450	1459	1469	1478	1488
13	1498	1508	1518	1528	1538	1548	1558	1568	1578	1588
14	1599	1609	1620	1630	1641	1651	1662	1673	1684	1695
15	1704	1715	1726	1737	1749	1760	1771	1783	1794	1806
16	1817	1829	1840	1852	1864	1876	1888	1900	1912	1924
17	1937	1949	1961	1974	1986	2000	2011	2024	2036	2050
18	2063	2076	2089	2102	2115	2129	2142	2155	2169	2183
19	2196	2210	2224	2238	2252	2266	2280	2294	2308	2323
20	2337	2352	2366	2381	2396	2410	2425	2440	2455	2471
21	2486	2501	2517	2532	2548	2563	2579	2595	2611	2627
22	2643	2659	2675	2692	2708	2724	2741	2758	2775	2791
23	2808	2825	2843	2860	2877	2894	2912	2930	2947	2965
24	2983	3001	3019	3037	3055	3074	3092	3110	3129	3148
25	3167	3186	3205	3224	3243	3262	3282	3301	3321	3341
26	336161	3361	3401	3421	3441	3461	3482	3502	3523	3544
27	3565	3586	3607	3628	3649	3671	3692	3714	3735	3757
28	3779	3801	3824	3846	3868	3891	3913	3936	3959	3982
29	4005	4028	4052	4075	4099	4122	4146	4170	4194	4218
30	4243	4267	4292	4316	4341	4366	4391	4416	4441	4467
31	4492	4518	4544	4570	4596	4622	4648	4675	4701	4728
32	4755	4782	4809	4836	4863	4891	4918	4946	4974	5002
33	5030	5059	5087	5116	5144	5173	5202	5231	5261	5290
34	5320	5349	5379	5409	5439	5470	5500	5531	5561	5592
35	5623	5654	5686	5717	5749	5781	5813	5845	5877	5909
36	5942	5975	6007	6040	6074	6107	6140	6174	6208	6242
37	6276	6310	6345	6379	6414	6449	6484	6519	6555	6590
38	6626	6662	6698	6734	6771	6807	6844	6881	6918	6955
39	6993	7031	7068	7106	7145	7183	7221	7260	7299	7338

3. Густина повітря й води

Речовина	Густина, кг·м ⁻³	Температура, °C
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

4. Коефіцієнт в'язкості повітря й води

Речовина	Коефіцієнт в'язкості, Па·с	Температура, °C
Повітря	18·10 ⁻⁶	20
Повітря	21·10 ⁻⁶	100
Вода	1,781·10 ⁻³	0
Вода	1,306·10 ⁻³	10
Вода	1,002·10 ⁻³	20
Вода	0,798·10 ⁻³	30
Вода	0,653·10 ⁻³	40

5. Фізичні сталі

Символ	Назва	Величина і одиниці
c	Швидкість світла у вакуумі	2,99792458 · 10 ⁸ м · с ⁻¹
N _A	Число Авогадро	6,0221367(36) · 10 ²³ (моль) ⁻¹
R=N _A k	Універсальна газова стала	8,3145510(70) Дж · моль ⁻¹ · К ⁻¹
k = R/N _A	Стала Больцмана	1,380658(12) · 10 ⁻²³ Дж · К ⁻¹
kT	Стала Больцмана · температура	0,0235 еВ при 0°C 0,0253 еВ при 20°C
RT	Універсальна газова стала · температура	2,271 · 10 ³ Дж · моль ⁻¹ при 0 °C 2,437 · 10 ³ Дж · моль ⁻¹ при 20 °C
e	Елементарний заряд	1,60217733(49) · 10 ⁻¹⁹ Кл
ε ₀	Електрична стала	8,854187817 · 10 ⁻¹² Кл ² · Н ⁻¹ · м ⁻²

Символ	Назва	Величина і одиниці
μ_0	Магнітна стала	$12,56637614 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}$
$F = N_A \cdot e$	Число Фарадея	$9,64846 \cdot 10^4 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
RT/F		25,3 мВ при 20°C
$2,303RT/F$		58,2 мВ при 20°C
h	Стала Планка	$6,626075(40) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
$\hbar = h/2\pi$	Стала Планка	$1,05457266(63) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
$k = R/N_A$	Стала Больцмана	$1,380658(12) \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
δ	Стала Стефана-Больцмана	$5,67051(19) \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$
V	Стала в законі зміщення Віна	$0,002897756 \text{ м} \cdot \text{К}$

6. Множники та префікси для творення кратних і часткових величин

Множник	Префікс	Позначення
10^{18}	екса	Е
10^{15}	пета	П
10^{12}	тера	Т
10^9	гіга	Г
10^6	мега	М
10^3	кіло	к
10^2	гекто	г
10^1	дека	д
10^{-1}	деци	д
10^{-2}	санти	с
10^{-3}	мілі	м
10^{-6}	мікро	мк
10^{-9}	нано	н
10^{-12}	піко	п
10^{-15}	фемто	ф
10^{-18}	атто	а

7. Одиниці вимірювання та розмірності фізичних величин

Механіка

Величина	Одиниця вимірювання	Розмірність	Зв'язок між одиницями в різних системах
Робота А, енергія Е	Джоуль (Дж)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$	$1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ ерг}$
Потужність, N	Ват (Вт)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$	$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}$; $1 \text{ к.с.} = 735,5 \text{ Вт}$

Величина	Одиниця вимірювання	Розмірність	Зв'язок між одиницями в різних системах
Сила, F	Ньютон (Н)	$\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	$1 \text{ Н} = 1 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1}$; $1 \text{ Н} = 10^5 \text{ дін}$
Тиск, p	Паскаль (Па)	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$; $1 \text{ Па} = 9,87 \cdot 10^{-8} \text{ атм}$; $1 \text{ Па} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$; $1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $1 \text{ мм рт. ст.} = 133 \text{ Па}$; $1 \text{ Па} = 10^{-5} \text{ бар}$; $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$; $1 \text{ мбар} = 100 \text{ Па}$; $1 \text{ тор} = 133 \text{ Па}$; $1 \text{ гПа} = 100 \text{ Па}$
Густина, ρ	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	$\text{Кг} \cdot \text{м}^{-3}$	$1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} = 10^3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$; $1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3} = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$

Молекулярна фізика і термодинаміка

Величина	Одиниця вимірювання	Розмірність	Зв'язок між одиницями в різних системах
Температура, t°	Кількість градусів Цельсія $^\circ\text{C}$		$^\circ\text{C} = \text{К} - 273,15$ $\text{К} = ^\circ\text{C} + 273,15$ $^\circ\text{C} = (^\circ\text{F} - 32) \cdot 5/9$ $^\circ\text{F} = 9/5^\circ\text{C} + 32$ $\text{К} = (^\circ\text{F} - 32) \cdot 5/9 + 273,15$ $^\circ\text{F} = (\text{К} - 273,15) \cdot 9/5 + 32$
Теплота, Q	Джоуль (Дж)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$	$1 \text{ Дж} = 0,2389 \text{ кал}$ $1 \text{ кал} = 4,186 \text{ Дж}$ $1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ ерг}$ $1 \text{ ерг} = 10^{-7} \text{ Дж}$
Ентропія, S	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$	
Теплоємність, C	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$	
Питома теплоємність, c	$\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$	
Молярна питома теплоємність, C/n	$\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$		
Коефіцієнт теплопровідності, λ	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$	
Коефіцієнт температура провідності, χ	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$		

Електрика і магнетизм

Величина	Одиниця вимірювання	Розмірність	Зв'язок між одиницями в різних системах
Електричний заряд, q	Кулон (Кл)	$\text{Кг}^{1/2} \cdot \text{м}^{3/2} \cdot \text{с}^{-1}$	1 Кл = 1 А·с
Електрична індукція, D	Кл·м	$\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2$	
Потенціал ϕ , напруга U , ЕРС \mathcal{E}	Вольт (В)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{с}^{-3}$	1 В = 1 Дж·Кл ⁻¹
Струм, I	Ампер (А)	А	1 А = 1 Кл·с ⁻¹
Густина струму, j	А·м ⁻²	А·м ⁻²	
Електроємність, C	Фарада (Ф)	$\text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}^2 \cdot \text{с}^4$	1 Ф = 1 Кл·В ⁻¹
Електричний дипольний момент, p	Кл·м	А·с·м	
Напруженість електричного поля, E	В·м ⁻¹	$\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{с}^{-3}$	1 В·м ⁻¹ = 1 Н·Кл ⁻¹
Опір, R	Ом (Ом)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}^{-2} \cdot \text{с}^{-3}$	
Питомий електричний опір, ρ	Ом·м	$\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{А}^{-2} \cdot \text{с}^{-3}$	
Магнітний потік, Φ	Вебер (Вб)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	
Магнітна індукція, B	Тесла (Тл)	$\text{кг} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	1 Тл = 1 Вб·м ⁻² 1 Тл = 10 ⁴ Гс 1 Гс = 10 ⁻⁴ Тл
Напруженість магнітного поля, H	А·м ⁻¹	А·м ⁻¹	
Індуктивність, L	Генрі (Гн)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}^{-2} \cdot \text{с}^{-2}$	

Оптика

Величина	Одиниця вимірювання	Розмірність	Зв'язок між одиницями в різних системах
Довжина світлової хвилі, λ	м	м	1 м = 10 ³ мм; 1 мм = 10 ⁻³ м; 1 м = 10 ⁹ нм; 1 нм = 10 ⁻⁹ м; 1 м = 10 ¹⁰ Å; 1 Å = 10 ⁻¹⁰ м
Хвильове число, σ	м ⁻¹	м ⁻¹	1 м ⁻¹ = 10 ⁻³ см ⁻¹ ; 1 см ⁻¹ = 10 ² м ⁻¹ 1 еВ = 1,60210·10 ⁻¹⁹ Дж
Енергія одного кванта, E	(1,240/λ) еВ		
Енергія моля квантів, E	ейнштейн	ейнштейн	1 ейнштейн = 12·10 ⁷ Дж

Енергетичні та світлові величини

Енергетична величина	Одиниця вимірювання	Світлова величина	Одиниця вимірювання
Потік випромінювання, Φ_e	Ват (Вт)	Світловий потік, Φ_v	Люмен (лм)
Сила випромінювання, I_e	Ват на стерадіан (Вт·ср ⁻¹)	Сила світла, I_v	Кандела (кд) = (лм·ср ⁻¹)
Енергетична яскравість, L_e	Ват на стерадіан – квадратний метр (Вт·ср ⁻¹ ·м ⁻²)	Яскравість, L_v	Кандела на квадратний метр (кд·м ⁻²)
Енергетична освітленість, E_e	Ват на квадратний метр (Вт·м ⁻²)	Освітленість, E_v	Люкс (лк) = (лм·м ⁻²)
Енергетична світність, M_e	Ват на квадратний метр (Вт·м ⁻²)	Світність, M_v	Люмен на квадратний метр (лм·м ⁻²)

8. Зв'язок між одиницями енергетичних та світлових величин

<p>Потік випромінювання</p> <p>1 Вт = 0,27 лм (λ = 400 нм) = 25,9 лм (λ = 450 нм) = 220,0 лм (λ = 500 нм) = 679,0 лм (λ = 550 нм) = 683,0 лм (λ = 555 нм) = 430,0 лм (λ = 600 нм) = 73,0 лм (λ = 650 нм) = 2,78 лм (λ = 700 нм)</p>	<p>Світловий потік</p> <p>1 лм = 1,464·10⁻³ Вт (λ = 555 нм) 1 лм·с = 1,464·10⁻³ Дж (λ = 555 нм)</p>
<p>Енергетична освітленість</p> <p>1 Вт·см⁻² = 1·10⁴ Вт·м⁻² = = 6,83·10⁵ лк (λ = 555 нм)</p>	<p>Яскравість</p> <p>1 лм·ср⁻¹·м⁻² = 1·10⁻⁴ лм·ср⁻¹·см⁻²</p>
<p>Сила випромінювання</p> <p>1 Вт·ср⁻¹ = 683 кд (λ = 555 нм)</p>	<p>Сила світла</p> <p>1 лм·ср⁻¹ = 1,464·10⁻³ Вт·ср⁻¹ (λ = 555 нм)</p>

9. Грецький алфавіт

Α α альфа	Ι ι йота	Ρ ρ ро
Β β бета	Κ κ капа	Σ σ сіґма
Γ γ гама	Λ λ ламбда	Τ τ тау
Δ δ дельта	Μ μ мю	Φ φ фі
Ε ε епсілон	Ν ν ню	Χ χ хи
Ζ ζ дзета	Ξ ξ ксі	Υ υ юпсілон
Η η ета	Ο ο омїкрон	Ψ ψ пси
Θ θ, ϑ тета	Π π пі	Ω ω омега

ЛІТЕРАТУРА

Посудін Ю.І Фізика і біофізика навколишнього середовища. — Київ: Світ, 2000. - 303 с.

Посудін Ю.І. Спектроскопічний моніторинг агросфери. — Київ: Урожай, 1998. - 127 с.

Іванов В. І. Курс дозиметрії. — М.: Энергоиздат, 1988. — 399 с.

Марри Дж. Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии. Лекции о моделях. Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 397 с.

Рубин А.Б., Пытьева Н.Ф., Ризниченко Г.Ю. Кинетика биологических процесам. — М.: Изд-во МГУ, 1987. — 304 с.

Рубин А.Б. Биофизика, кн.1. Теоретическая биофизика. — М.: Вншш. шк., 1987. - 319 с.

Ситник К. М., Брайон А. В., Гордецкий А. Р., Брайон А. П. Словарь-справочник по экологии. — К.: Наукова думка, 1994. — 665 с.

Хргян Ф.Х. Физика атмосфери. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 647 с.

Хэнкс Р. Дж., Аси Крофт Дж. Л. Прикладная физика почв. Влажность и температура почв. — Л.: Гидрометеиздат, 1995. — 151 с.

Benedict R.P. Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements, John Wiley & Sons. — New York, 1969.

Blake M.P., Mitchell W.S. Vibration and Acoustical Measurement Handbook, Spartan Books. — New York-Washington, 1972. — 649 p.

Boeker F., Van Grondelle R. Environmental Physics, John Wiley & Sons. — New York, 1994. - 448 p.

Campbell J.B. Introduction to Remote Sensing, The Guilford Press, New York-London, 1987. - 551 p.

Campbell W.H. Introduction to Geomagnetic Fields, Cambridge Univ. Press. - Cambridge, 1997. - 290 p.

Campbell G.S., Norman J.M. Environmental Biophysics, 2nd ed., Springer Verlag. — New York-Berlin-Heidelberg, 1998. — 286 p.

Cox C.S. and Wathes C.M., eds. Bioaerosols Handbook. Lewis Publishers. — Boca Raton-London-Tokyo, 1995. — 623 p.

Engman E.T., Gurney R.J. Remote Sensing in Hydrology, Chapman and Hall. - London-New York-Tokyo, 1991. - 225 p.

Environmental Encyclopedia, 2nd ed., Gale, Detroit-New York-Toronto-London, 1998. - 1196 p.

Fritschen L.J., Gay L.IV. Environmental Instrumentation, Springer Verlag. — New York-Heidelberg-Berlin, 1979. - 216 p.

Gruber D., Diamond J. Automated Biomonitoring: Living Sensors as Environmental Monitors, Ellis Horwood Ltd. — New York-Chichester-Brisbane-Toronto, 1988. - 208 p.

Guyot G. Physics of the Environment and Climate, John Wiley & Sons. — Chichester-New York-Weinheim, 1998. — 632 p.

Handbook A., Butterworth P.M., Corkum L.D., Guiman-Rincon J., eds. Biomonitoring and Biomarkers as indicators of Environmental Change. Plenum Press. — New York-London, 1995. - 348 p.

Henry J. G., Heike G. W. Environmental Science and Engineering, Prentice-Hall, inc., New Jersey, 1996. — 778 p.

Hillel D. Environmental Soil Physics. Academic Press. — San Diego-London-Boston, 1998. - 771 p.

Instrumentation and Measurement for Environmental Sciences/B.W.Mitchell, ed. 2nd ed., Amer.Soc.Agr.Engineers, St. Joseph, 1983.

Instrumentation for Environmental Monitoring, V.I. Radiation. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Syngapore, 1983. - 1130p.

Kryter K.D. The Handbook of Hearing and the Effects of Noise. Academic Press. — San Diego-New York-Boston, 1994. — 673 p.

Laser Monitoring of the Atmosphere/E.D.H'mk\е\, ed. Springer-Verlag, Berlin, 1976. - 380 p.

Lighthart B. and Mohr A.J., eds. Atmospheric Microbial Aerosols. Theory and Application. — Charman Hall, 1994. — 397 p.

Living in the Environment. An introduction to Environmental Science. 5th ed., Wadsworth Publishing Company, Belmont, California, 1988. — 603 p.

McCartney E.J. Absorption and Emission by Atmospheric Gases. John Wiley and Sons. — New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1983. - 320 p.

Measures R.M. Laser Remote Sensing. Fundamentals and Applications. John Wiley and Sons.— New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1984.-510 p.

McGraw-Hill Encyclopedia of Environmental Science and Engineering. 3d ed., S.P.Parker and R.A.Corbitt, eds. McGraw-Hill inc., New York, 1993. — 749 p.

Monteith J.L., Unsworth M. Environmental Physics, 2nd ed., Edward Arnold. — London-New York-Sydney-Auckland, 1990. — 291 p.

MacGorman D.R., Rust W.D. The Electric Nature of Storms, Oxford Univ. Press. - New York-Oxford, 1998. — 422 p.

Optical Remote Sensing of Air Pollution, P.Camagni and S.Sandroni, eds. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1984. — 350 p.

Posudin Yu.I. Lasers in Agriculture. Science Publishers, inc.Enfield. — New Hampshire, 1998. - 188 p.

Rees W.G. Physical Principles of Remote Sensing. — New York, Port Chester, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press, 1990. — 261 p.

Remote Sensing in Hydrology and Water Management. G.A. Schultz and E.T. Engman, eds. Springer, Berlin, 2000. — 483 p.

Remote Sensing: The Quantitative Approach, McGraw-Hill Book Company, New York, 1978. - 396 p.

Sabins F.F., Jr. Remote Sensing. Principles and interpretation. 2nd ed. W.H. Freeman and Company. — New York, 1987. — 449 p.

Scott H.Don. Soil Physics: Agricultural and Environmental Applications. Iowa State Univ.Press. — Ames, 2000. — 421 p.

Stephens G.L. Remote Sensing of the Lower Atmosphere. An introduction. Oxford Univ. press. — New York-Oxford, 1994. — 523 p.

Subramanian K.S. and Iyengar G. V., eds. Environmental Biomonitoring. Amer.Chem. Soc. — Washington, 1997. — 288 p.

Thompson R., Oldfield F. Environmental Magnetism, Allen & Unwin. — London, 1986. - 227 p.

Udias A. Principles of Seismology. Cambridge Univ.Press. — Cambridge, 1999. - 475 p.

	Зміст	
Передмова		3
Об'єкти та методи вимірювання		5
Об'єкти вимірювання.....		5
Основні компоненти біосфери.....		5
Навколишнє середовище.....		6
Фактори та параметри навколишнього середовища.....		7
Методи вимірювання.....		8
Загальні характеристики вимірювального обладнання .		8
Аналогові прилади.....		9
Цифрові прилади.....		9
Основні характеристики вимірювального приладу. . .		10
I. Абіотичні фактори середовища		11
1. Тиск		11
Атмосферний тиск.....		11
Залежність тиску від глибини.....		14
Вимірювання тиску.....		16
Корекція рідинних манометрів.....		17
2. Рух повітря		22
Виникнення вітру.....		22
Параметри вітру.....		23
Вимірювання параметрів вітру.....		27
Моделювання зміни швидкості вітру.....		32
3. Вібрації		35
Оцінка вібрацій.....		35
Перетворювачі вібрацій.....		36
Характеристики землетрусів.....		41
Оцінка землетрусів.....		41
Прилади для оцінки землетрусів.....		42
4. Шуми		46
Визначення шуму.....		46
Характеристики шуму.....		46
Вимірювання рівнів шуму.....		50
5. Вологість		53
Вологість повітря.....		53

Методи вимірювання вологості повітря.....	55
Вимірювання вологості за допомогою номограм. . . .	61
Вологість ґрунту.....	62
Вимірювання вологості ґрунту.....	65
6. Температура	70
Основні визначення.....	70
Вимірювання температури.....	71
Вимірювання температури повітря.....	89
Вимірювання температури фунту.....	90
Моделювання вертикальних змін температури повітря.....	90
Моделювання часової зміни температури повітря. . . .	92
Моделювання зміни температури ґрунту з глибиною і часом.....	93
Визначення глибини згасання.....	95
7. Електричні та магнітні поля	97
Електричне поле та його характеристики.....	97
Електричні поля природного походження.....	97
Вимірювання електричних полів.....	102
Магнітне поле та його характеристики.....	104
Магнітне поле Землі.....	104
Електричні, магнітні та електромагнітні поля антропогенного походження.....	105
Методи вимірювання магнітних полів.....	108
8. Природні випромінювання	115
Параметри оптичного випромінювання.....	115
Енергетичні величини.....	117
Світлові величини.....	118
Спеціалізовані оцінки випромінювання.....	120
Закони теплового випромінювання.....	122
Параметри сонячного випромінювання.....	124
Атмосферне випромінювання.....	127
Випромінювання земної поверхні.....	128
Випромінювальний баланс земної поверхні.....	131
Методи вимірювання природних випромінювань . . .	132
Класифікація радіометрів.....	132
Вимірювання прямого сонячного випромінювання..	133
Вимірювання сумарного випромінювання.....	135
Вимірювання дифузного сонячного випромінювання.....	136
Вимірювання альbedo.....	137
Вимірювання довгохвильового випромінювання. . . .	138

9. Іонізуючі випромінювання.....	140	Перенесення маси.....	200
Класифікація іонізуючих випромінювань.....	140	Методи вимірювання механічних параметрів ґрунту ...	202
Закон радіоактивного розпаду.....	141	2. Теплофізичні параметри.....	204
Дозиметрія іонізуючих випромінювань.....	143	Перенесення теплоти.....	206
Поглинання іонізуючого випромінювання.....	144	3. Водяні потоки в ґрунті.....	210
Радіоактивні забруднення.....	146	Водний потенціал.....	210
Радіоактивні відходи.....	146	Гідропровідність ґрунту.....	213
Вимірювання іонізуючих випромінювань.....	146	Випаровування з ґрунтової поверхні.....	215
Принципи g-спектроскопії.....	152	4. Оптичні параметри.....	216
II. Атмосферні фактори середовища.....	157	Забруднення ґрунту.....	216
Склад і структура атмосфери.....	157	Хімічні забруднення ґрунту.....	216
Основні забруднювачі повітря.....	158	Тверді відходи.....	216
Вимірювання атмосферних забруднень.....	159	Ерозія ґрунтів.....	218
Випромінювальний баланс атмосфери.....	162	IV. Гідрографічні фактори середовища.....	223
Озонова дірка.....	162	Властивості води.....	223
Вимірювання озону.....	164	Механічні властивості.....	223
Тепловий баланс атмосфери.....	165	Гідродинамічні властивості.....	223
Парниковий ефект.....	167	Теплофізичні властивості.....	224
Вимірювання впливу парникового ефекту.....	168	Електричні властивості.....	224
Водний баланс атмосфери.....	172	Оптичні властивості.....	225
Перехід від туману до дощу.....	172	Забруднення водного середовища.....	226
Швидкість падіння дощових краплин.....	174	Класифікація забруднень.....	226
Параметри опадів.....	175	Стічні води.....	227
Вимірювання опадів.....	176	Евтрофікація водойм.....	227
Кислотні дощі.....	177	Методи вимірювання параметрів води та стічних вод ..	228
Методи детектування кислотних дощів.....	178	V. Біотичні фактори взаємодії організмів.....	231
Вимірювання параметрів аерозолів.....	179	Класифікація біотичних факторів.....	231
Аерозолі біологічного походження.....	181	Моделювання екологічних процесів.....	234
Детектування та ідентифікація біоаерозолів.....	182	Моделювання взаємодії організмів.....	237
Моделювання поширення забруднень в атмосфері.....	186	Екологічна модель Вольтерра.....	238
Моделювання піднімання клуба забруднювача в атмосфері.....	189	VI. Дистанційне зондування.....	242
III. Едафічні фактори середовища.....	193	Поширення електромагнітного випромінювання крізь атмосферу.....	242
Компоненти ґрунту.....	193	Класифікація систем дистанційного зондування.....	245
Хімічні властивості ґрунту.....	193	Реєстрація γ-випромінювання.....	245
Фізичні властивості ґрунту.....	194	Фотографічні системи.....	245
1. Механічні параметри.....	194	Відеографічні системи.....	246
Текстура ґрунту.....	194	Багатоспектральні сканери.....	246
Структура ґрунту.....	195	Теплові сенсори.....	246
Густина ґрунту.....	197	Надвисокочастотні (НВЧ) локатори.....	247
Пористість ґрунту.....	197		

Лазерні системи.....	250
Лідар на основі реєстрації зворотного розсіювання	250
Лідар на основі реєстрації диференційного поглинання	254
Доплерівський лідар.....	256
Лідар на основі реєстрації флуоресценції.....	257
Лідар на основі реєстрації комбінаційного розсіювання	257
Застосування дистанційного зондування.....	258
VII. Біоіндикація та біотестування.....	263
Основні визначення.....	263
Біоіндикація.....	263
Біотестування.....	265
Методи біотестування.....	265
Додатки.....	273
Література.....	280

Навчальне видання

Посудін Юрій Іванович

**МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Підписано до друку 22.01.2003. Формат 84x108/32.
Папір офсетний. Гарнітура Тайме.
Обл.-вид. арк. 14,5. Тираж 1000 прим.
Зам. 3-349

Видавництво «Світ».
Державний реєстраційний № 5313 від 25.11.98 р.

ЗАТ «ВІПОЛ», ДК № 15
03151, Київ-151. вул. Волинська, 60



Юрій Іванович Посудін — професор, доктор біологічних наук, завідувач кафедри фізики Національного аграрного університету.

Основні наукові інтереси автора — застосування методів оптичної та лазерної спектроскопії для неруйнівного контролю якості сільськогосподарської продукції, а також дослідження

фоторуху водоростей та використання параметрів фоторуху для біотестування водного середовища.

Педагогічна діяльність Ю.І. Посудіна пов'язана з викладанням дисциплін "Фізика з основами біофізики" та "Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища". Читав лекції як Фулбрайтівський стипендіат у США. Автор 15 підручників і навчальних посібників, а також більше 100 наукових статей та авторських свідоцтв.