6.3. Утворення звуків тваринами

Ссавці. Первинним джерелом звукових коливань у високорозвинених тварин є гортань (*larynx*) і пов'язані з нею голосові зв'язки, еластичні м'язові волокна яких можуть вібрувати. Звукові хвилі утворюються за рахунок дії коливальних структур, які у тварин характеризуються певними розмірами і частотним діапазоном м'язових скорочень. Більшість м'язів тварин, незважаючи на їх різноманіття, не спроможні коливатися з частотою, що перевищує 10^3 Гц. У ссавців звуки утворюються верхньою гортанню, що являє собою хрящову трубку. Повітря, що проходить через цю трубку, примушує коливатися голосові зв'язки, розташовані у верхній частині гортані. Залежно від анатомічних особливостей голосового апарату тварини здійснюються коливання різної інтенсивності, частоти, тембру, часових інтервалів. Від цих характеристик залежать звуки, що утворюються свійськими тваринами: іржання, мукання, рохкання, мекання.

Птахи. Нижня гортань (*syrinx*) — кісткова структура, що знаходиться в основі трахеї, виконує функції вокального органу птахів. В гортані, яка перетворює кінетичну енергію повітря, що рухається, в енергію звукової хвилі, знаходяться дві голосові мембрани (*membrana tympaniformis*) — під час проходження повітря між мембранами з великою швидкістю статичний тиск згідно з рівнянням Бернуллі зменшується і мембрани сходяться; отвір зачиняється, швидкість руху повітря зменшується і статичний тиск збільшується. Процес повторюється, внаслідок чого виникають звукові сигнали, частота яких у птиць знаходиться в діапазоні від 200 Гц до 12 кГц.

Водні тварини. Китові (зубаті кити *Odontoceti*, включаючи дельфінів) утворюють звуки за допомогою пари звукових губ (*phonic lips*), розміщених у носовій системі. Дельфіни клацають та свистять. Деякі кити (*Mysticeti*) не мають такої структури; можливо, вони використовують перероблене повітря для утворення низькочастотних звуків для комунікації на великій відстані та навігації.

Крім того, кити застосовують плавці та хвіст для видобування звуків на морській поверхні.

Ластоногі тварини використовують крики, гавкання, ревіння, ричання та пирхання. Морські слони, наприклад, утворюють різноманіття гарчань та ревів. Деякі ластоногі утворюють високочастотні клацання, свистіння та імпульсні звуки, які виникають завдяки іншим системам, ніж голосова.

Риби. Механізми утворення звуків рибами різні — звуки можуть виникати за рахунок стридуляції — взаємного тертя різних частин

PAB09112.indd 49 26.11.2009 16:28:51

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

Комахи. Багато тварин мають настільки малі розміри, що процес утворення звуку завдяки тільки м'язовим волокнам виявлятиметься вкрай неефективним. Вирішити цю проблему можна лише через помноження частоти звукового сигналу, що здійснюється у стридуляційному апараті комах (*Lepidoptera, Coleoptera* та *Hymenoptera*). Незважаючи на різні анатомічні властивості стридуляційних апаратів, принципи їх дії майже однакові. Стрекотальний кантик, розміщений в одній частині апарату, рухається вздовж стрекотальної жилки, яка має періодичну структуру. Розміри елементів цієї структури становлять декілька мікрометрів. Протягом кожного м'язового скорочення кантик зачіпляє сотні елементів жилки, утворюючи при цьому звуки високої інтенсивності та частоти.

Так, звуки, що утворюються цикадою (*Tibicen linnei*) характеризуються рівнем інтенсивності 106 дб на відстані 0,5 м. Модуляція звуку досягається, коли комаха вовтузить своє черевце відносно рослини, на якій знаходиться (рис. 6.1).

Рис. 6.1. Цикада *Tibicen linnei*

PAB09112.indd 50 26.11.2009 16:28:51

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

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

Послаблення звуку супроводжується зменшенням звукового тиску зі збільшенням відстані до джерела звуку. Залежно від структури звукового випромінювача тварини, послаблення звуку при збільшенні відстані у 2 рази становить 6—12 дб.

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

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

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

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

Дифракція або ***розсіювання звуку*** пов'язані зі зміною напрямку поширення звукової хвилі під час її взаємодії з об'єктами. Якщо розміри об'єкта пропорційні до довжини хвилі, відбувається огинання

PAB09112.indd 51 26.11.2009 16:28:52

об'єкта (дифракція) або зміна траєкторії поширення хвилі (розсіювання). Такі процеси відбуваються під час поширення звуку крізь рослинні покриви.

Поширення звуків у водному середовищі. Вода має багато відмінного від повітря з точки зору поширення звуку. Низькочастотні звукові сигнали під час поширення у воді набувають меншого впливу з боку розсіювання або поглинання, завдяки чому відстань, на якій спостерігаються ці сигнали, значна. Наприклад, низькочастотні звуки, що утворюються китом *Balaenoptera physalus*, можна чути на відстані у кілька десятків миль.

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

6.5. Акустична комунікація тварин

Акустичні сигнали тварин. Акустичне спілкування тварин здійснюється завдяки особливостям голосових систем, що дає можливість тваринам утворювати звуки різної інтенсивності, частоти, спектрального складу та тривалості, і, таким чином, здійснювати акустичну комунікацію між окремими тваринами та їх групами.

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

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

Тут заклики *a* — *d* використовуються для позначення території та відлякування інших самців — цього виду. Якщо птах упійманий, він утворює звуки тревоги *e* — *f*. Звуки *g* — *k* призначені для налагодження контакту з родичем; звуки *l* — *m* використовують під час холодної погоди, щоб зібрати представників цього виду для сумісного сну; звуки *n* — *o* є сигналами годівлі пташенят, які примушують останніх відкрити рота; звуки *p* — *q* закликають пташенят до сну.

Крім того, пташині заклики використовуються для наведення птахів до годівниці, у процесі висиджування, для впізнавання пташенят (якщо птахи мешкають у колоніях), під час міграції тощо.

PAB09112.indd 52 26.11.2009 16:28:52

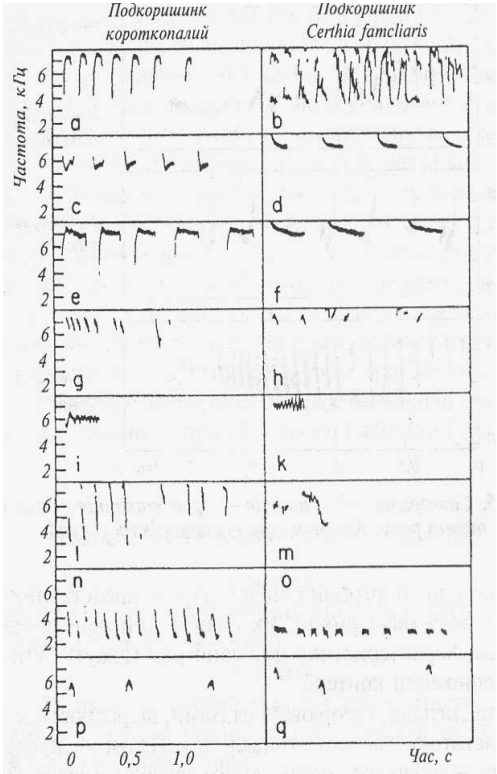


Рис. 6.2. Можливі варіації закликів двох видів птахів — підкоришника коротколапого та підкоришника *Certhia familiaris* (пояснення в тексті)

Співи птахів виконують подвійну функцію. По-перше, вони інформують про власність певної території і попереджають небажаних візитерів. По-друге, спів призначений для привертання уваги статевого партнера з метою залицяння та спаровування. У деяких видів птахів вокальний дует допомагає налагодити тісний контакт між членами пари і синхронізувати взаємну поведінку у часі. Навіть сонограми співів птахів, представників різних видів одного роду, значно відрізняються.

Акустичні сигнали, що утворюються птахами, відрізняються інтенсивністю, частотою, часовою тривалістю. Слід зазначити, що птахи — представники певного виду — впізнають один одного завдяки *амплітудній модуляції* , яка полягає в зміні інтенсивності акустичного сигналу у часі, та *частотній модуляції* — зміні частоти акустичних сигналів.

PAB09112.indd 53 26.11.2009 16:28:52

Акустичні сигнали риб поділяють на харчові, нерестові, агресивно-оборонні, групові і пов'язані з турботою про нащадків. Стридуляційні звуки нагадують скрегіт і скрип; частота їх займає значну область — від 20 Гц до 12 кГц. Гідродинамічні звуки складаються з низькочастотних сигналів (20 Гц—5 кГц), які утворюються за рахунок руху плавців і тіла риби, і високочастотних звуків, що забезпечуються рухом внутрішніх органів. Звуки, що виникають внаслідок взаємодії м'язів з плавальним міхуром займають область 40 Гц—2,5 кГц і являють собою серію імпульсів.

Акустичні сигнали комах. Бджоли у процесі спілкування утворюють звуки, зумовлені діяльністю крилових пластин та тораксу. Спектр звуків бджоли займає область 8—12 кГц, в якій можна виділити три максимуми — 75—190 Гц, 210—400 Гц і 450—550 Гц. Інтенсивність і спектральне положення цих максимумів залежить від рівня вентиляції, пори року, температури, наявності корму. Є відомості, що бджоли здатні видавати ультразвукові (20—22 кГц) коливання, в яких можливо беруть участь високочастотні гармоніки або вихрові потоки, що виникають під час польоту бджоли. Звукові сигнали, які утворюють бджоли, використовуються для повідомлення членів родини про виявлення корму. Частотна характеристика звуків, які утворюють бджоли під час своєрідного танку, містить у собі інформацію про відстань до корму. Тривалість звукового посилання, тривалість паузи між посиланнями, частота проходження посилання і кількість коливань у посиланні залежать від відстані до годівниці. Крім того, структура акустичного сигналу специфічна для бджіл — представниць різних рас. У період роїння бджоли також обмінюються звуковою інформацією, яка закладена у спектральному складі акустичних сигналів: так, звукові сигнали, що сповіщають бджіл про можливе злітання, являють собою поодинокі імпульси з максимумом при 300—660 Гц; рій, що вилетів з вулика і літає перед ним, утворює інтенсивні звуки, в спектрі яких є два максимуми — при 185—265 Гц і 430—510 Гц.

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

PAB09112.indd 54 26.11.2009 16:28:52

Таблиця 6.2

Частотний діапазон та максимальна акустична чутливість живих організмів

Живі організми	Частотний діапазон	Максимальна чутливість
Земні тварини		
Корова	23 Гц — 35 кГц	
Кінь	55 Гц — 33,5 кГц	2 кГц
Вівця	100 Гц — 30 кГц	10 кГц
Морські тварини		
Пляшконосий дельфін	250 Гц — 150 кГц	
Морська свинка	40 Гц — 150 кГц	
Зубатий кит	40 Гц — 325 кГц	
Гладенький кит	Менш, ніж 5000 Гц	
Птахи		
Канарейка	250 Гц — 8 кГц	
Сова	200 Гц — 12 кГц	2 кГц
Курки	125 Гц — 2 кГц	
Риби		
Тріска	2 — 500 Гц	20 Гц
Срібний карась	5 — 2000 Гц	400 Гц
Срібний окунь	250 — 300 Гц	1000 Гц

Ультразвукова комунікація тварин. Тварини утворюють та використовують ультразвукові коливання з метою *ехолокації* — випромінювання ультразвукових хвиль у простір та обробка відбитого сигналу для отримання інформації щодо розташування, розмірів та руху об'єктів або для навігації. Крім того, комахи використовують ультразвук для соціальної комунікації.

Кажани (*Vespertiloidei*) використовують ультразвукові сигнали для знаходження жертв, фруктів та дерев або для орієнтації у просторі. Деякі з них (*Microchiroptera*) видають короткочасні клацання, тоді як інші (*Microchiroptera*) генерують частотно-модульовані або з постійною частотою імпульси. Частотний діапазон ультразукових сигналів, що утворюються кажанами, становить 14000—100000 Гц. Частота імпульсів може варіювати від 4—10 до 150—200 імпульсів за секунду.

Собаки. Частотний діапазон сприйнятливості ультразвукових коливань собаками становить 18—22 кГц. Цю здатність використовують власники собак для подавання команд спеціальними ультразвуковими свистками.

Кішки. Верхня границя сприйнятливості ультразвукових коливань кішками дорівнює 50 кГц, що дає можливість відчувати високочастотні крики жертв та полювати на них.

PAB09112.indd 55 26.11.2009 16:28:52

Китові, такі як зубаті кити, дельфіни, ластоногі використовують ультразвукові коливання для знаходження підводних об'єктів та комунікації. Частотний діапазон дельфінів становить 0,25—150 кГц; низькочастотні (0,25—50 кГц) сигнали використовуються для спілкування, тоді як високочастотні (40—150 кГц) — для ехолокації. Кожний дельфін має свою власну гаму ультразвукових свистків, які являють собою ультразвукові імпульси тривалістю 50—128 мкс. Ці сигнали відбиваються від конфокальної за формою кістки у черепі, після чого фокусуються спеціальним органом ліпідної природи (*melon*), який виконує функції лінзи (рис. 6.3).

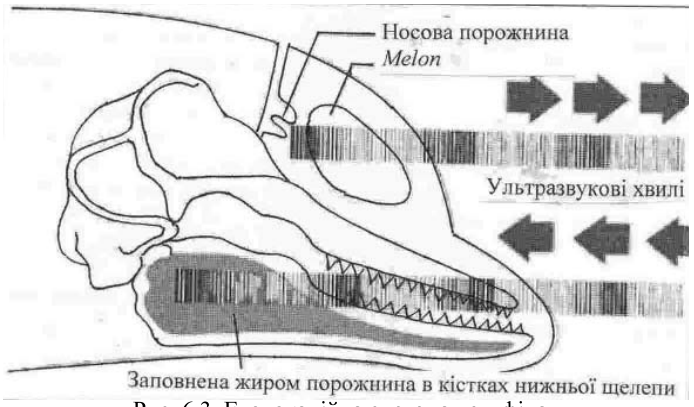


Рис. 6.3. Ехолокаційна система дельфіна

Ультразвукові коливання, що генеруються дельфіном, поширюються у водному середовищі зі швидкістю 1500 м/с, відбиваються від підводного об'єкта та потрапляють у заповнені жиром порожнини в кістках нижньої щелепи, звідки передаються до слухового апарату дельфіна. Завдяки цьому дельфін здатний визначати напрямок до жертви, її місцезнаходження, розміри, форму, швидкість руху

Риби. Деякі види риб (*Alosinae*) здатні детектувати ультразвукові сигнали частотою до 180 кГц; інші (*Clupeidae*) — до 4 кГц.

Комахи. Природа нагородила метеликів здатністю детектувати ультразвукові сигнали частотою до 80 кГц, що випромінюються кажанами, щоб запобігти атаці хижака. Крім того, метелики (*Pyralidae*: *Ephestia cautella* (Walker*), Ephestia kuehniella* Zeller, *Plodia interpunctella* (Hübner)) самі видобувають ультразвукові коливання крилами для залучання статевих партнерів. Мурашки, представники роду *Ectatomma*, застосовують ультразвукові сигнали з частотою до 75 кГц, що генерується завдяки руху окремих частин тіла, для комунікації.

Живі організми та інфразвук. Люди чутливі до інфразвуку про-

PAB09112.indd 56 26.11.2009 16:28:52

явами жаху, збудження, неспокою, засмучення, нудоти, дисбалансу та просторової дезорієнтації.

Основним наслідком дії інфразвуку на живий організм є порушення органів балансу, а саме — вестибулярного апарату. Для дослідження впливу інфразвуку на людину або тварину використовували спеціальні генератори та гучномовці, які працювали в діапазоні 1—200 Гц з рівнем інтенсивності до 146 дб. Оцінку впливу інфразвуку здійснювали шляхом реєстрації характеру і ступеня обертання очних яблук пацієнта, які оберталися у протилежних напрямках з частотою 0,7—1,5 $с^{-1}$. Цей періодичний рух під назвою *ністагм* свідчить про порушення вестибулярного апарату. Реєстрацію ністагму здійснюють через вимірювання корнеально-ретинового потенціалу; техніка вимірювання цього потенціалу називається *електроністагмографією.* Ністагматичний відгук організму залежить від інтенсивності інфразвукового стимулу і тривалості його дії на організм, а також від частоти інфразукових коливань.

Можливим механізмом впливу інфразвуку на живі організми слід вважати зміщення перілімфи — рідини, що заповнює внутрішнє вухо, за рахунок періодичних змін тиску, які передаються цій рідині через овальне віконце. У свою чергу, зміщення перілімфи призводять до деформації волоскових клітин.

Психологічний вплив інфразвуку пов'язаний з такими ефектами як нудота, сонливість, летаргія, почуття жаху або боязні. Інфразвук значної інтенсивності спроможний викликати зміни слухової чутливості, пошкодження барабанної перетинки, болісні відчуття, ускладнення мовлення і модуляції голосу, порушення респіраторної активності, зміни α-ритмів мозку.

Кити, слони, бегемоти, носороги, жирафи, алігатори, тигри використовують інфразвук для спілкування між собою на відстані та для навігації.

Так, азіатські слони (*Elephas maximus*) утворюють інфразвукові сигнали в діапазоні 14—24 Гц інтенсивністю 70—100 дб, тоді як африканські слони (*Loxodonta Africana*) утворюють інфразвукові сигнали в діапазоні 14—35 Гц інтенсивністю до 90 дб. Ці сигнали дозволяють слонам спілкуватися на відстані до кількох кілометрів, запобігати зустрічі з бракон'єрами та попереджати інших слонів про небезпечні ситуації, знаходити воду, шукати статевих партнерів, збиратися разом в умовах поганої видимості.

Інфразвук утворюється завдяки руху повітря через носовий прохід. Великі вуха слонів якнайкраще пристосовані для сприймання інфразвуку. Низькі інфразвукові частоти відповідають великим довжинам хвиль, які відбиваються лише від великих за розмірами об'єктів, що дає можливість слонам спілкуватися у лісі, чагарниках тощо.

Жираф (*Giraffe camelonardalis reticulate*) має здатність генерувати

PAB09112.indd 57 26.11.2009 16:28:53

інфразвукові коливання від 15 Гц (60 дб) до 250—275 Гц (30 дб) з домінантними частотами в області 20—40 Гц.

Кити (*Cetacea*) використовують інфразвук під час пошуків статевих партнерів та спаровування, оскільки інфразвукові коливання поширюються у водному середовищі на велику відстань (до 4800 км). Крім того, кити здатні паралізувати інфразвуком кальмарів та риб при полюванні.

Тигри (*Panthera tigris*) використовують інфразвукові сигнали частотою 18-20 Гц для спілкування у лісі та чагарниках. Інфразвукова компонента голосного реву тигрів дає можливість лякати та паралізувати жертв.

Хамелеон (*Chamaeleon*) характеризується здатністю генерувати та детектувати інфразвукові хвилі. Представники підродини *Chamaeleonidae* мешкають на деревах, де застосовують інфразвук для залицянь та територіальних домагань, тоді як представники підродини *Brookesiinae*, що мешкають на земній поверхні або в облетілому листі, використовують інфразвук для захисту від ворогів.

Вважається, що птахи, мігруючі, застосовують природні інфразвукові коливання (наприклад, від турбулентних потоків повітря у гірських районах) для навігації.

Є інформація, варта подиву, відповідно до якої тварини відчувають наближення цунамі та покидають небезпечні зони завдяки їхньої здатності реєструвати інфразвукові коливання, що супроводжують поширення океанських хвиль, та реагувати на них.

Аудиторні завдання

1. Інтенсивність звукового імпульсу, створеного кажаном в процесі ехолокації на відстані декількох сантиметрів, складає 10^{-2} Вт/м$^{-2}$. Оцінити рівень інтенсивності в децибелах.

2. Визначити відстань, яку проходять імпульси кажана, які він посилає з частотою 4 імпульси за секунду. Швидкість поширення звуку у повітрі при 20 ^{0}C становить 343 м/с.

3. Визначити відстань, яку проходять імпульси кажана, які він посилає з частотою 200 імпульсів за секунду.

Контрольні запитання

1. Як утворюють звуки ссавці? птахи? риби? комахи?

2. У чому полягає принцип аудіометрії?

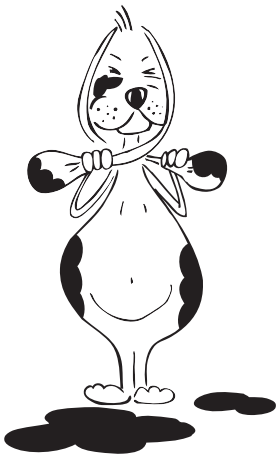
3. Назвати основні процеси, що супроводжують взаємодію звукових хвиль з навколишнім середовищем.

4. Чим відрізняються акустичні характеристики води і повітря?

5. Як здійснюється акустична сигналізація птахів? риб? комах?

PAB09112.indd 58 26.11.2009 16:28:53

7. ШУМ



7.1. Основні визначення

Є декілька визначень терміну *шум.* Перше визначення: шум являє собою звукові коливання, інтенсивність і частота яких змінюються несподівано та аперіодично. Згідно з другим визначенням, шум — це звук, який накладається на інший звук і взаємодіє з ним, тобто небажаний для нашого слуху звук. У третьому сенсі шум — це будь-який звук, який заважає людині. Наприклад, звуки музики є корисними звуками для музиканта і шумом у другому сенсі для людей, що розмовляють, або шумом у третьому сенсі для людини, яка хоче заснути.

Отже, шум являє собою звукові коливання, миттєва амплітуда яких змінюється несподіваним чином. Величина миттєвої амплітуди шуму описується нормальним (гаусовим) розподілом. Якщо середня потужність (сума інтенсивностей усіх гармонік, що складають шум) є величиною сталою в певному частотному діапазоні, такий шум називають *білим*. Шум може бути побутовим, виробничим, промисловим, транспортним, авіаційним. Шум виникає під час розваг, домашніх робіт, використання іграшок, включення тривожної сигналізації, збирання сміття, будівельних та ремонтних робіт, запуску моделей аеропланів, картингів, спортивних автомобілей.

7.2. Розподіл шуму за інтенсивністю

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

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

де p — звуковий тиск; $p_0 = 20\times10^{-6}$ Па.

Еквівалентний рівень звуку визначається за виразом:

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

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

PAB09112.indd 59 26.11.2009 16:28:53

7.1.

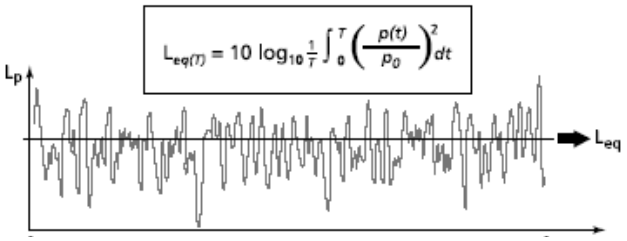


Рис. 7.1. Еквівалентний шум

Приклад

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

Розв'язання

Відповідно до формули (8.2) можна записати:

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

7.3. Сумарний шум

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

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

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

Приклад

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

Розв'язання

Використовуючи рівняння (8.3), отримуємо:

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

7.4. Розподіл шуму за частотою

Крім того, інтенсивність звуків, що оточують нас, залежить від частоти. Якщо середня потужність (сума інтенсивностей всіх гармонік, що складають шум) є величиною сталою в певному частотному діапазоні, такий шум називають *білим*. У цьому випадку шум містить усі звукові частоти. Якщо шум переважно складається з високочастотних звукових коливань,

PAB09112.indd 60 26.11.2009 16:28:53

він називається *фіолетовим* (за аналогією зі світловими коливаннями); якщо домінують низькочастотні звукові коливання, шум називають *рожевим*. Спектральна густина потужності шуму розподілена за законом $1/f^{\beta}$.

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

У коричневому шумі переважають низькочастотні компоненти.

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

Спектри шумів різних кольорів наведено на рис. 7.2.

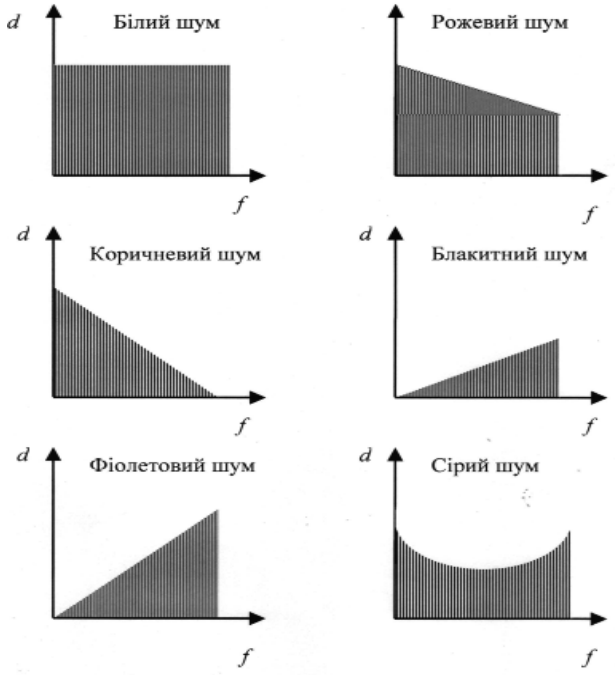


Рис. 7.2. Розподіл шуму за частотою (пояснення в тексті)

PAB09112.indd 61 26.11.2009 16:28:53

7.5. Вплив шуму на живі організми

Розрізняють такі рівні шуму:

Слабкий	30 дб	шепотіння, тиха бібліотека
Помірний	40—50 дб	помірний дощ, спокійна кімната
Інтенсивний	60—80 дб	будильник, дорожній рух, пилосос
Дуже інтенсивний	90—110 дб	газонокосарка, дриль, рок-музика, автострада, барабани
Який викликає болісні відчуття	120—150 дб	відбійний молоток, пожежна сирена, реактивний двигун

Шумове забруднення **—** це небажані для навколишнього середовища звукові коливання, які утворює людина або механізми. Шумове забруднення навколишнього середовища стало великою загрозою для здоров'я людини. Протягом дня мешканці великих міст примушені терпіти шумові перевантаження на рівні 65—70 дб і більше. Є прямий зв'язок між інтоксикацією шумом та серцевими хворобами. В зонах великих аеропортів, де рівень шумів досягає 100 дб, збільшився продаж снодійних ліків, а діти цих районів гірше засвоюють навчальний матеріал. Шум, величиною 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 найвразливішми 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 не заміщаються іншими клітинами. Наслідком може бути часткова або повна втрата слуху.

Для кількісної оцінки впливу шуму на слух використовують параметр, що характеризує зміну слухової чутливості **—** *індукований шумом пороговий зсув (ІШПЗ),* який визначається шляхом вимірювання порогу слухової чутливості до і після дії шуму. Цей зсув може бути тимчасовим або постійним залежно від параметра шуму (інтенсивності, тривалості, частотного складу).

Слух спроможний відновлюватися після припинення дії шуму на рівнях інтенсивності, що не перевищує 30 дб, вже через 16—24 год. Слід зазначити, що для помірних рівнів шумового впливу процес відновлення слуху характеризується лінійною залежністю від часу у логарифмічному масштабі. Вплив більших рівнів інтенсивності викликає безповоротні пошкодження волоскових клітин, що призводять до сталого порогового зсуву. Експерименти на тваринах, які зазнали

PAB09112.indd 62 26.11.2009 16:28:54

впливу акустичного шуму різної частоти, з наступним гістологічним аналізом кількості пошкоджених волоскових клітин у внутрішньому вусі свідчать про те, що поріг слухової чутливості зменшується в області 10^3—10^4 Гц. Кількість волоскових клітин, що залишилися, може досягати при цьому лише 40 відсотків від норми.

На здоров'я людини впливає шум невеликої інтенсивності, але тривалий; високочастотний шум; імпульсний шум.

Крім того, шум викликає порушення тиску крові, серцевої діяльності, притупляє увагу, збільшує втомлюваність, дратівливість.

Зазвичай, вплив шуму на людину залежить як від рівня інтенсивності звуку, так і від тривалості дії джерела шуму.

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

Рекомендовані норми шуму в приміщеннях і на даних територіях становлять: 30—35 дб на територіях заповідників; 34—37 дб у спальних приміщеннях (будинки, лікарні, квартири); 56—66 дб у приміщеннях магазинів, заводів тощо.

7.6. Вимірювання рівнів шуму

Для оцінки рівнів шуму використовують шумоміри та аналізатори шуму. Принцип дії шумоміра полягає у перетворенні звукового тиску на електричний сигнал мікрофоном. Цей сигнал підсилюється і калібрується. Типовий діапазон рівнів інтенсивності, які оцінюються шумоміром, становить 30—140 дб. Розглянемо основні конструкції конденсаторів, призначених для вимірювання шумів.

Конденсаторний мікрофон складається з двох пластин, одна з яких займає фіксоване положення, а друга є діафрагмою (рис. 7.3). Під впливом звукової хвилі діафрагма вигинається, відстань між пластинами та ємність конденсатора відповідно змінюються, що викликає зміну електричного сигналу в системі реєстрації.

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

Електретний мікрофон базується на використанні електрета —

PAB09112.indd 63 26.11.2009 16:28:54

діелектрика, який тривало зберігає поляризований стан після припинення зовнішньої дії, яка викликає поляризацію. Таким електретом у даній конструкції мікрофона є полімерна плівка, з'єднана з металізованим електродом, який утворює з фіксованим електродом конденсатор (рис. 7.4). Під впливом звукової хвилі величина заряду на обкладинках конденсатора за рахунок електретного ефекту змінюється, що призводить до відповідної зміни електричного сигналу.

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

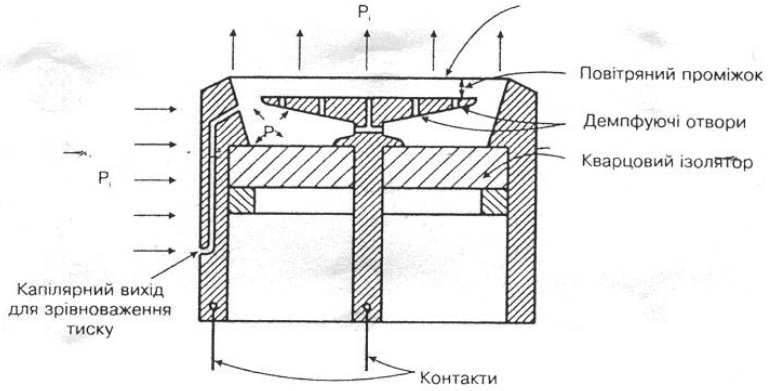


Рис. 7.3. Схема конденсаторного мікрофона

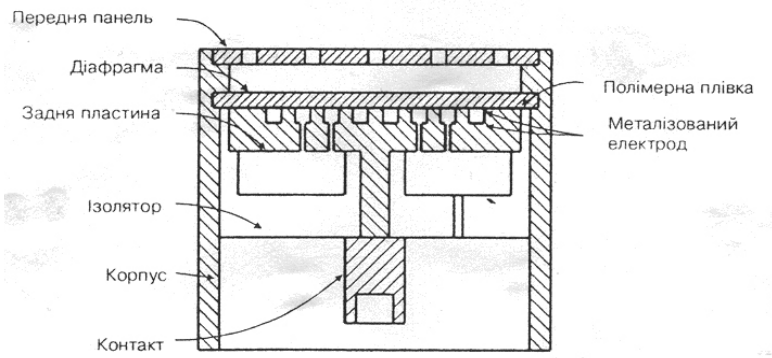


Рис. 7.4. Схема електретного мікрофона

PAB09112.indd 64 26.11.2009 16:28:54

7.7. Звукова ізоляція

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

Звукова ізоляція *R* стіни визначається за виразом:

$$R = 10\lg I_i / I_t, \tag{7.4}$$

де I_i — інтенсивність джерела небажаного звуку; I_t — інтенсивність звуку, який проходить через стіну.

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

$$I_i = p_a^{\,2} / 2\rho\upsilon, \tag{7.5}$$

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

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

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

де A — загальне поглинання звуку в кімнаті, де він сприймається (ефективна площа, через яку проходять всі звуки, помножена на коефіцієнт поглинання); S_{cm} — площа стіни.

Отже, рівень звукової ізоляції дорівнює:

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

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

Приклад

Дві кімнати відділені одна від одної стіною площею 12 м^2. Рівень тиску звуку у кімнатах, де знаходиться джерело звуку та де звук сприймається, становить L_e = 110 дб та L_0 = 63м дб. Визначити рівень звукової ізоляції стіни, якщо поглинання звуку в іншій кімнаті дорівнює A = 3 м^2.

Розв'язання

Використаємо рівняння (7.7):

PAB09112.indd 65 26.11.2009 16:28:54

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

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

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

де S_i — площа кожної поверхні, через яку проходить звук; α_i — коефіцієнт поглинання кожної поверхні.

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

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

Приклад

Під час будівництва наукової лабораторії технічні норми вимагають досягнення часу реверберації 0,8 с. Розміри лабораторії 7×9×3 м. У приміщенні є двері площею 2 м^2 та вікно площею 6 м^2, розміщені на стінці 7×3 м. Визначити реальний час реверберації.

Розв'язання

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

Таблиця 7.1

Кількість матеріалів, необхідних для обладнання лабораторії

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

Визначаємо коефіцієнти поглинання, використовуючи табл. 7.2.

PAB09112.indd 66 26.11.2009 16:28:54

Таблиця 7.2

Значення коефіцієнта поглинання для різних матеріалів залежно від частоти звуку

Матеріал	**Коефіцієнт поглинання звуку, α**				
	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц
Штукатурка	0,15	0,10	0,05	0,05	0,05
Цегла	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Бетон	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Скло	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
Двері	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Лінолеум, паркет	0,03	0,04	0,05	0,05	006
Килим на підлозі	0,03	0,06	0,15	0,30	0,04

Обчислюємо загальне поглинання A звуку в лабораторії, де він сприймається, як добуток ефективної площі S, через яку проходять усі звуки, помножену на коефіцієнт поглинання α, для частот 500, 1000 та 2000 Гц:

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

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

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

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

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

Визначаємо суму загального поглинання для частот 500, 1000 та 2000 Гц:
A (500 Гц)] = 14,56 м^2;
A (1000 Гц)] = 12,86 м^2;
A (2000 Гц)] = 14,56 м^2.
Обчислюємо час реверебераці для частот 500, 1000 та 2000 Гц:
T (500 Гц)] = 2,08 с;
T (1000 Гц)] = 2,35 с;
T (2000 Гц)] = 2,65 с.
Знаходимо усереднений за частотою час реверберації:

PAB09112.indd 67 26.11.2009 16:28:55

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

Це значення перевищує те, що задано технічними вимогами.

Аудиторні завдання

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

Чи правильне твердження, що:

«Слух спроможний 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 рекомендовані в заповідниках:

1. 10—15 дб; 3. 56—60 дб;
2. 30—35 дб; 4. 80—95 дб

PAB09112.indd 68 26.11.2009 16:28:55

8. ВОЛОГІСТЬ

8.1. Параметри вологості

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

Розглянемо основні параметри вологості повітря.

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

Пружність (парціальний тиск) водяної пари e — це тиск, під яким знаходилася б водяна пара у газовій суміші, якщо б вона одна займала об'єм, що дорівнює об'єму суміші при тій же температурі.

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

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

де E — у мілібарах (гектопаскалях); T — у кельвінах.

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

$$r = \frac{e}{E} \times 100\%. \qquad (8.2)$$

Дефіцит вологості d — різниця між пружністю насиченої пари E та пружністю водяної пари e при даній температурі:

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

PAB09112.indd 69 26.11.2009 16:28:55

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

8.2. Вплив вологості на живі організми

Вплив вологості на організм людини. Людський організм бере участь у таких процесах теплообміну як випаровування (через потовиділення), теплову конвекцію та теплове випромінювання. Перший процес суттєво залежить від вологості: при високих рівнях вологості повітря ефективність потовиділення тіла людини зменшується. Комбінація високих температур та високої вологості провокує обмеження теплообміну між кровоносними судинами людини та довкіллям через теплопровідність. Така ситуація може призвести до *гіперпіреексії* — підвищення температури тіла вище 41,1 ^{0}C. Кількість крові, що досягає внутрішніх органів тіла зменшується і це може викликати *тепловий удар* (*гіпертермію*).

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

Вплив вологості на тварин. Відносна вологість відіграє значну роль у життєдіяльності наземних тварин. Дійсно, повітря, що оточує тварину, містить менше вологи, ніж її власне тіло. Втрати води живим організмом відбуваються за рахунок кінцевих продуктів обміну речовин. Постачання в організм води забезпечується в процесі годівлі та пиття. Чим вища відносна вологість, тим менша різниця між зовнішнім та внутрішнім середовищами тварини і тим, відповідно, менша потреба у зниженні втрат води або в протидії їм. Слід зазначити, що всі тварини здатні пристосовуватися до певних рівнів відносної вологості. Це залежить від способу життя і навколишнього середовища. Про це свідчить також залежність від вологості температури тіла амфібій, рептилій, комах. Суттєво впливає вологість на поширення наземних тварин, які способом підтримання водного балансу залишаються «водними» — земноводних, наземних ракоподібних, нематод, дощових черв'яків, молюсків тощо. Зазвичай, вони мешкають там, де відносна вологість близька до 100 %.

Вплив вологості на мікроорганізми. Виживання мікроорганізмів, що живуть у повітрі приміщень, залежить від відносної вологості. Активність інфекційних бактерій та вірусів зводиться нанівець в інтервалі відносної вологості 40—70 %. Алергенні кліщі та гриби припиняють свою активність, якщо рівень відносної вологості не перевищує 50

PAB09112.indd 70 26.11.2009 16:28:55

%, тоді як максимальна активність спостерігається при 80 %. Спори плісняви та кліщі викликають такі захворювання людини як алергія та астма. Оптимальною, з точки зору здоров'я людини, слід вважати відносну вологість повітря приміщень 40—60 %.

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

Розглянемо процеси, які пов'язані з вологістю.

Випаровування — перехід речовини з рідкого стану в газоподібний (пару). За рік з поверхні Світового океану випаровується близько 450×10^3 км^3 води, а з поверхні суші — близько 70×10^3 км^3. Швидкість випаровування залежить від вологості повітря, температури поверхні, вітру.

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

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

Град — це продукт конденсації водяної пари у грозових хмарах, де висхідні потоки повітря рухаються зі швидкістю більше, 10 м/с, а температура становить –20...–30 ^{0}С. У 1993 р. у Кіровоградській області

PAB09112.indd 71 26.11.2009 16:28:55

градини мали розміри курячого яйця; град завдав шкоди — загинуло 35 тис. га сільськогосподарських посівів. У 1984 р. у Таджикистані випав град, маса градин в якому досягала 880 г.

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

8.3. Вимірювання вологості

Аспіраційний психрометр Асмана (прилад було створено у XIX сторіччі А. Р. Асманом) містить два термометри — сухий і змочений; вартість поділки термометрів становить 0,2 ^{0}C. Термометри розміщені у металевих трубках, які потім з'єднані в одну. Резервуар одного з термометрів обмотаний вогким батистом. При вимірюванні вологості психрометр встановлюють вертикально і обдувають повітрям обидва термометри за допомогою вентилятора (рис. 8.1). З поверхні резервуара змоченого термометра відбувається випаровування води, яке залежить від вологості навколишнього повітря. За допомогою аспіраційного психрометра можна визначити пружність водяної пари e за *психрометричною формулою:*

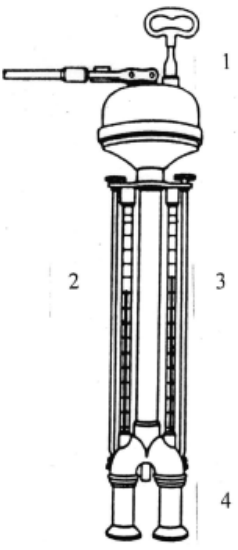


Рис. 8.1. Аспіраційний психрометр Асмана: 1 — вентилятор; 2 — змочений термометр; 3 — сухий термометр; 4 — захисні трубки

$$e = E_1 - A(t_C - t_{ЗМ})p_A, \qquad (8.4)$$

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

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

PAB09112.indd 72 26.11.2009 16:28:55

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

Рис. 8.2. Автоматизований аспіраційний психрометр Асмана

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

Отже, обидва термометри завжди показують певну психрометричну різницю температур $\Delta t = t_C - t_{3M}$, яка залежить від відносної вологості. Чим більша відносна вологість, тим менша психрометрична різниця. Якщо відносна вологість r = 100 %, то психрометрична різниця $\Delta t = 0$. На основі вимірювань температур сухого та змоченого термометрів визначають відносну вологість за допомогою таблиці, яка нанесена на панелі приладу.

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

Приклад

Визначити за допомогою номограми пружність e водяної пари, пружність E насиченої пари, що відповідає температурі сухого термометра, та пружність E_1 насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра, відносну вологість r, дефіцит вологості d і точку роси T_d, якщо температура сухого термометра 30 ^{0}C, а температура змоченого термометра 19 ^{0}C.

PAB09112.indd 73 26.11.2009 16:28:56

Розв'язання

1. На горизонтальній осі номограми (рис. 8.3) з точки, що відповідає температурі змоченого термометра 19 ^{0}C (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 пружність E_1 насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра: E_1 = 22,5 гПа.

3. З точки *Б* проводимо похилу лінію *БД* до перетину з вертикальною лінією *ГД*, що відповідає температурі сухого термометра 30 ^{0}C (точка *Д*).

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

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

6. З точки *З* проводимо горизонтальну лінію *ЗІ* до перетину з лівою вертикальною віссю номограми (точка *І*). На цій осі визначаємо пружність E насиченої пари, 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 *К*), яка показує значення відносної вологості при даній температурі: r = 0,35.

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

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

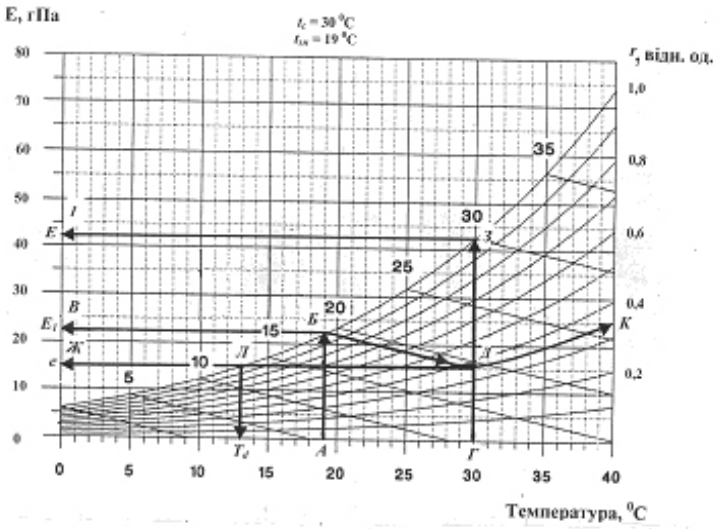


Рис. 8.3. Процедура визначення параметрів вологості за допомогою номограми

PAB09112.indd 74 26.11.2009 16:28:56

Контрольне завдання

Визначити за допомогою номограми (рис. 8.4) пружність *e* водяної пари, пружність *E* насиченої пари, що відповідає температурі сухого термометра, та пружність E_1 насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра, відносну вологість *r*, дефіцит волості *d* і точку роси T_d, якщо температура сухого термометра та температура змоченого термометра визначаються за таблицею згідно з варіантом, встановленим викладачем.

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

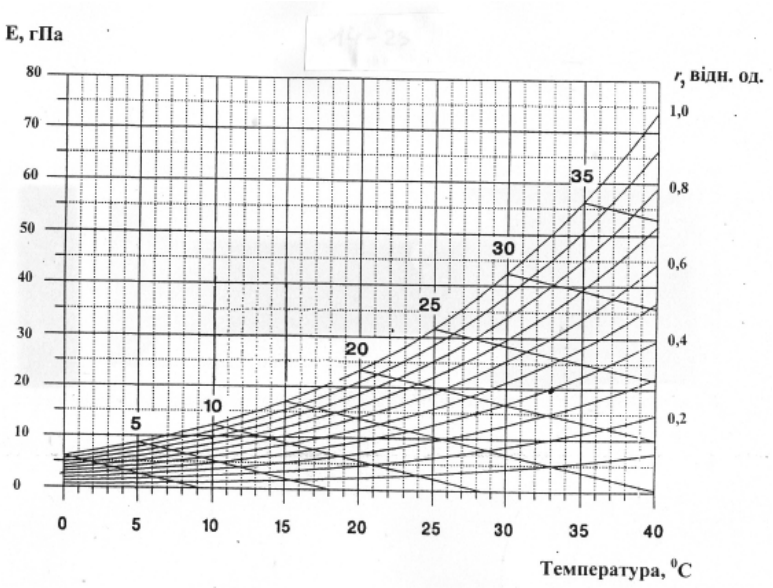


Рис. 8.4. Номограма для вимірювання параметрів вологості

Вимірювання вологості за віртуальними психрометричними таблицями. Використовуючи ці таблиці (для цього можна, наприклад, зайти в Інтернеті на сайт http://www.met.rdg.ac.uk/), можна за атмосферним тиском, температурами сухого і змоченого термометрів

PAB09112.indd 75 26.11.2009 16:28:56

визначити пружність водяної пари e, пружність насичної пари E, абсолютну вологість a, відносну вологість повітря r, масову частку вологи q та точку роси T_d.

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

Ємнісний гігрометр. Основу приладу становить гігроскопічна полімерна плівка, з обох боків якої розташовані пористі металеві електроди, які утворюють конденсатор ємністю близько 500 пФ (рис. 8.5). Внаслідок поглинання плівкою молекул води її об'єм збільшується, відстань між електродами також збільшується, що призводить до зміни ємності конденсатора. Ємністний гігрометр застосовується для вимірювання відносної вологості.

Перевагою приладу є його компактність (розміри приладу становлять 6 мм^2), мала залежність результатів вимірювань від зовнішньої температури, лінійність шкали в області 0—80 % відносної вологості, швидкодія, малі значення гістерезису.

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

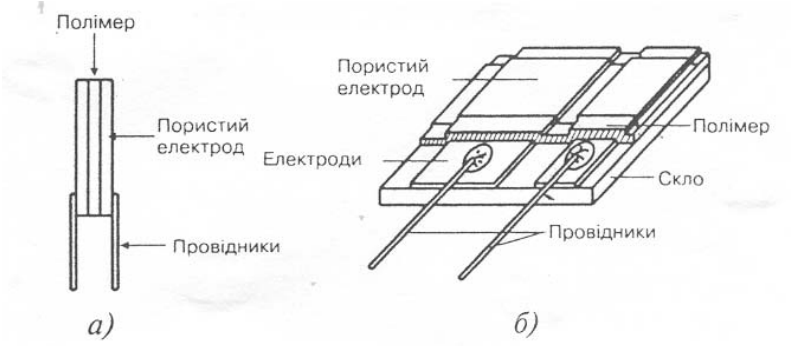


Рис. 8.5. Ємнісний гігрометр: *а* — гігроскопічна полімерна плівка з металевими електродами; *б* — конструкція гігрометра

PAB09112.indd 76 26.11.2009 16:28:56

8.4. Вологість ґрунту

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

Вологість відносно сухої маси — відношення маси води до сухої маси:

$$\theta_m = \frac{m_b}{m_c} = \frac{\rho_b bS}{\rho_c cS} = \frac{\rho_b b}{\rho_c c}, \qquad (8.5)$$

де $\rho_в$ і ρ_c — густина води і сухого ґрунту.

Вологість у процентах сухої маси визначається за виразом:

$$P_m = \theta_m \times 100\ \%. \qquad (8.6)$$

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

$$\theta_V = \frac{V_в}{V_{гр}} = \frac{bS}{SD} = \frac{b}{D}. \qquad (8.7)$$

Об'ємна вологість у процентах визначається як:

$$P_V = \theta_V \times 100\ \% = 100\ \% \ \frac{b}{D}\ . \qquad (8.8)$$

8.5. Вимірювання вологості ґрунту

Гравіметричний метод базується на визначенні маси води і маси сухого ґрунту. Зразок ґрунту нагрівають до 105 ^{0}C для отримання сталої ваги; процес триває 10—12 год. Вологість ґрунту визначають як відношення маси втраченої води до маси сухого ґрунту. Якщо потрібно оцінити об'ємну вологість, останнє відношення помножують на відношення об'ємної щільності ґрунту до густини води. Перевагою методу є можливість брати зразки безпосередньо з ґрунту за допомогою бура, простота процесу обчислень, невисока вартість обладнання. До недоліків належать складність визначення води у ґрунті з неоднорідним профілем, потреба у великій кількості зразків при дослідженнях залежності вмісту води від часу та простору, руйнівність методу та його довготривалість.

Нейтронний метод використовує оцінку послаблення потоку швидких нейтронів атомами водню, що містяться у ґрунтовій воді. Металевий зонд діаметром близько 40 мм, що містить джерело швид-

PAB09112.indd 77 26.11.2009 16:28:57

ких нейтронів (суміш радону та берилію, 2—5 мКі, або суміш ^{241}Am та берилію, 100 мКі) і детектор повільних нейтронів встромляють у ґрунт (рис. 8.6).

Швидкі нейтрони (4,5—5,0 МеВ або 1—12 МеВ) поширюються радіально в ґрунті. Внаслідок пружних зіткнень з ядрами речовини ґрунту вони втрачають свою кінетичну енергію; рівень послаблення швидких нейтронів пропорційний кількості атомів водню, суттєвим джерелом яких є ґрунтова вода. Повільні нейтрони (0,025 еВ) оточують зонд, деякі з них потрапляють на детектор.

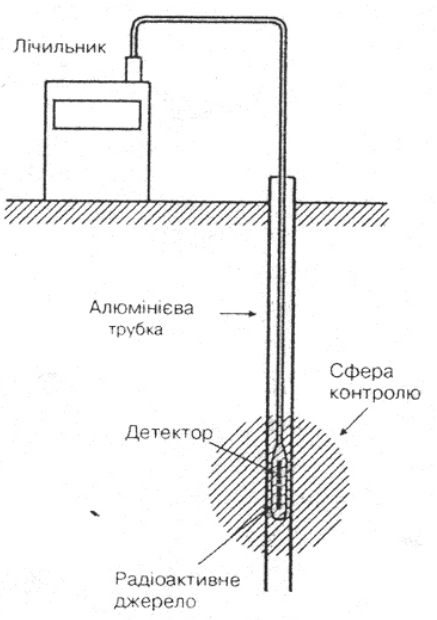


Рис. 8.6. Нейтронний метод визначення вологості ґрунту

Сигнал з виходу детектора через кабель подається на систему реєстрації.

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

Недоліками є необхідність роботи з радіоактивними джерелами, потреба в калібруванні приладу, дороговизна обладнання, неточність вимірювань буля поверхні ґрунту.

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

$$\theta_V = \ln(N_д/N_в)/\mu d, \qquad (8.9)$$

PAB09112.indd 78 26.11.2009 16:28:57

де $N_д$ — швидкість лічіння гама-випромінювання, що утворюється джерелом; $N_в$ — швидкість лічіння гама-випромінювання, що проходить через ґрунт; μ — коефіцієнт послаблення гама-випромінювання водню; d — товщина зразка.

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

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

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

де $\varepsilon_p(\omega)$ — реальна частина $\varepsilon(\omega)$; $\varepsilon_y(\omega)$ — 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, які 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 декількох підходів:

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

2) вимірювання ємності конденсатора, який утворюється вологим ґрунтом між двома обкладинками. Цей метод характеризується невисокою вартістю, швидкодією, він може бути застосований у автоматизованих системах вимірювання вологості ґрунту. Недоліком методу є необхідність калібрування;

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

PAB09112.indd 79 26.11.2009 16:28:57

Метод часової рефлектометрії передбачає генерацію високочастотного електромагнітного імпульсу та його поширення у ґрунт за допомогою двоелектродної або коаксіальної лінії (рис.8.7). Вимірюється час між моментом посилання імпульсу та його реєстрації приймачем після відбивання від ґрунту.

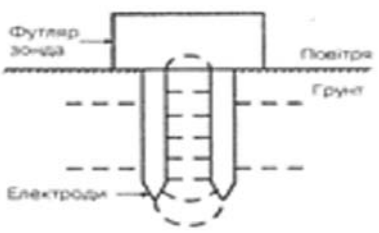


Рис. 8.7. Метод часової рефлектометрії

Швидкість поширення імпульсу в такій системі визначається за виразом:

$$\upsilon = c/\varepsilon, \qquad (8.11)$$

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

Для чистої води ($\varepsilon = 80$) швидкість поширення імпульсу становить $3{,}3\times10^7$ м/с, тоді як у вологому ґрунті ($\varepsilon = 16$) ця швидкість дорівнює $7{,}5\times10^7$ м/с.

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

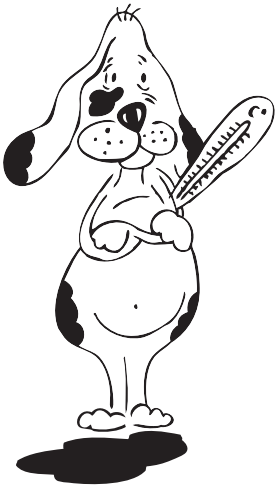
Аудиторні завдання

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

Варіант	температура сухого термометра t_c, ^{0}C	температура змоченого термометра $t_{зм}$, ^{0}C.
1	25	20
2	27	22
3	23	22
4	30	24
5	24	18
6	23	19

PAB09112.indd 80 26.11.2009 16:28:57

9. ТЕМПЕРАТУРА



9.1. Температурні шкали

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

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

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

Далі — датський астроном Оле Реомюр (Ole Roemer) у 1743 р. запропонував шкалу між температурою танення льоду (0 ^{0}R) та температурою кипіння води (80 ^{0}R).

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

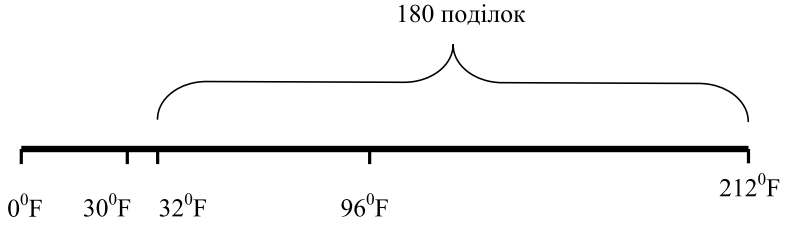


Рис. 9.1. Схема побудови шкали Фаренгейта (пояснення в тексті)

PAB09112.indd 81 26.11.2009 16:28:57

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

У 1933 р. лорд Вільям Кельвін (Lord Kelvin, William Thompson) розробив *Термодинамічну температурну шкалу (Кельвіна)*, в основу якої було покладено використання *потрійної точки* речовин — точки на діаграмі стану, що відповідає рівноцінному існуванню трьох фаз речовин. Так, потрійна точка води дорівнює 273,16 К, а температура кипіння води 373,16 К.

Одиниці температури:

$^0C = K - 273{,}15$; $^0C = 5/9(^0F - 32)$;

$K = {}^0C + 273{,}15$; $^0F = 9/5\,^0C + 32$.

9.2. Температура атмосфери

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

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

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

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

Термін *тропосфера* походить від грецького слова *tropos*, що означає «змішувати». У цьому шарі, що займає висоту близько 10 км, відбувається вертикальне перемішування повітря завдяки нагріванню земної поверхні короткохвильовим сонячним випромінюванням. Молекули двоокису вуглецю CO_2, метану CH_4, закису азоту N_2O та інші поглинають довгохвильове випромінення земної поверхні й нагріваються. У тропосфері температура зменшується з висотою через горизонтальне переміщення повітря.

PAB09112.indd 82 26.11.2009 16:28:58

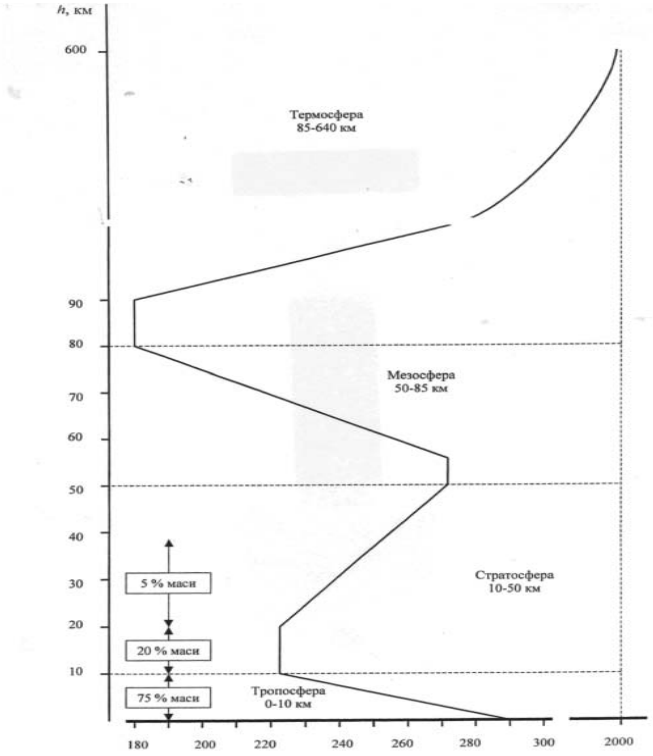


Рис. 9.2. Розподіл температури атмосфери з висотою

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

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

У *термосфері* (від грецького *thermos* — теплота), в області 85—640 км та *екзосфері* (від грецького *exo* — зовні), в області 500—1000 км

PAB09112.indd 83 26.11.2009 16:28:58

температура зростає з висотою за рахунок високої кінетичної енергії молекул газів, яка обумовлена поглинанням високоенергетичного сонячного випромінення залишками кисню. Температура частинок термосфери може досягати 2000 ^{0}C, хоча там дуже розріджене повітря. Ультрафіолетове сонячне випромінювання викликає йонізацію молекул (йоносфера). Висока енергія частинок дає можливість виходити з атмосфери.

9.3. Температура ґрунту

Температура ґрунту залежить від таких факторів як *теплообмін з повітрям (теплопровідність і конвекція); тепловипромінювання; теплопровідність у ґрунті; хімічні й фізичні процеси,* такі як *випаровування, зволоження, конденсація.*

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

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

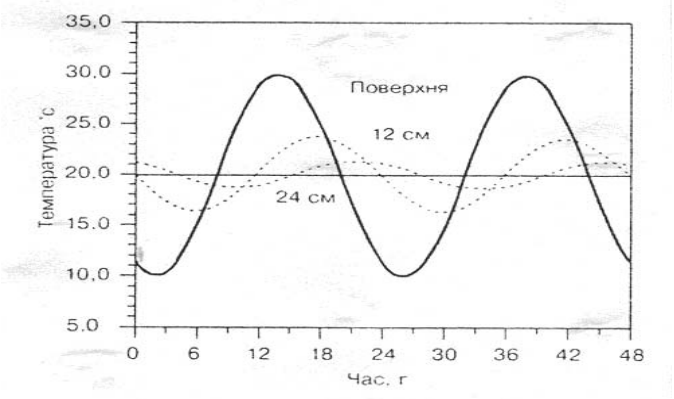


Рис. 9.3. Типові криві залежності температури ґрунту від часу і глибини

PAB09112.indd 84 26.11.2009 16:28:58

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

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

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

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:

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

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

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

Приклад

На якій глибині температура вологого ґрунту не відрізняється на ±0,5 ^{0}C від середньодобової температури земної поверхні, якщо амплітуда зміни температури на поверхні становить ±15 ^{0}C?

Розв'язання

Перепишемо рівняння (9.3) у вигляді:

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

Підставляємо числові дані:

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

Визначимо z для D = 0,1 м:

$z = 3,4D = 3,4\times0,1 = 0,41$ м.

PAB09112.indd 85 26.11.2009 16:28:59

Контрольне завдання

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

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

$$T(z_1) = \langle T \rangle \pm A(0)\exp(-z_1/D);$$
$$T(z_2) = \langle T \rangle \pm A(0)\exp(-z_2/D).$$

Припускаючи, що амплітуда зміни температури на відповідних глибинах становить:

$$A_1 = T(z_1) - \langle T \rangle;$$
$$A_2 = T(z_2) - \langle T \rangle,$$

можна отримати вирази:

$$A_1 = A(0)\exp(-z_1/D);$$
$$A_2 = A(0)\exp(-z_2/D).$$

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

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

9.4. Температура водойм

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

У річках з повільною течією та озерах влітку поверхневі води на-

PAB09112.indd 86 26.11.2009 16:28:59

гріваються швидше, ніж глибинні шари. Теплові випромінення поглинаються шаром води завтовшки 1—2 м. Цей верхній теплий шар називається *епілімніоном*, тоді як холодний нижній — *гіполімніоном.* Між ними розташований проміжний шар *металімніон*, у якому температура змінюється дуже швидко при невеликих змінах глибини. Наявність таких шарів призводить до утворення температурного градієнта.

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

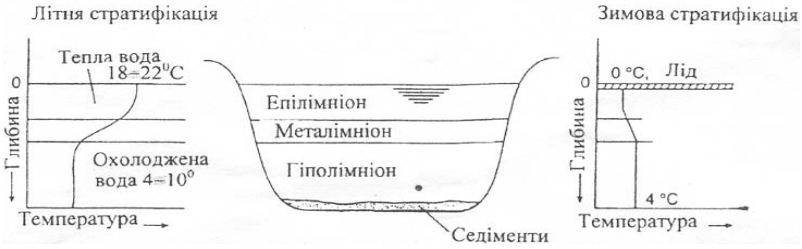


Рис.9.4.Теплова стратифікація глибин озера

9.5. Вплив температури на живі оганізми

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

Ендотермні організми здатні підтримувати температуру тіла на постійному (35—40 ^{0}C) рівні; саме через це вони віддають тепло навколишньому середовищу. Втрати тепла уповільнюються завдяки теплоізоляції, функції якої виконують волосяний покрив, підшкірний жир, оперення, а також за допомогою регуляції кровотоку під поверхнею шкіри. Слід зазначити, що незважаючи на високу теплоізоляцію, процес збереження тепла у ендотермних тварин досягається завдяки інтенсивним метаболічним витратам.

PAB09112.indd 87 26.11.2009 16:28:59

В умовах спекотного і сухого клімату ендотермні тварини мають перевагу, обумовлену невеликим значенням відношення «поверхня-маса» і високою теплоємністю.

Через те, що тканини в основному складаються з води, теплоємність цих тканин становить $c_в$ = 4186,8 Дж/(кг×^{0}С) для інтервалу температур 0—40 ^{0}С. Отже, чим більше тварина, тим більшу кількість теплоти містить її тіло при даній температурі. Важливу роль у процесі тепловіддачі відіграє регуляція кровотоку: при високих температурах кровоносні судини шкіри розширяються, тепловіддача збільшується.

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

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

У спекотну вологу погоду тваринам важко віддавати теплоту через те, що процеси випаровування неефективні. Фізична робота, яку змушені виконувати тварини, призводить до небезпечного підвищення температури тіла. Аналогічна ситуація відбувається, коли собаку закривають у машині, що знаходиться на сонці; продукти дихання насичують повітря водяною парою і подальші втрати теплоти стають неможливими. Підвищення температури до 41,5—42,5 ^{0}С призводить до серйозного порушення функціонування організму і втрати свідомості, тобто до *теплового удару*. Несприятливий вплив високих температур пов'язаний з відносною вологістю повітря — чим менша відносна вологість, тим вища вірогідність зневоднення організму. Безумовно, суттєву роль відіграє тривалість дії високих температур.

PAB09112.indd 88 26.11.2009 16:28:59

Ефективним засобом протидії низьким температурам у ендотермних організмів є волосяний покрив або підшкірний жир, які виконують функції теплоізоляторів (теплопровідність хутра та жиру, як можна впевнитися з табл. 9.1, невисока).

Таблиця 9.1

Теплопровідність деяких речовин

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

Зміна теплопровідності під час тепловіддачі здійснюється за рахунок інтенсивності периферійного кровотоку, або теплоізоляційної ефективності волосяного покриву або оперення. Регуляція шкіряного кровотоку забезпечується шунтуванням артеріальної крові (рис.9.5): у шкірі судини звужуються, тоді як потоки крові внутрішніх органів збільшуються. Те ж саме відбувається у підшкіряному жирі. Шерсть позбавлена кровопостачання, тому її теплоізоляційні властивості змі-

PAB09112.indd 89 26.11.2009 16:28:59

нюються при зміні кута нахилу волосся і товщини волосяного покриву тварини (рис. 9.6).

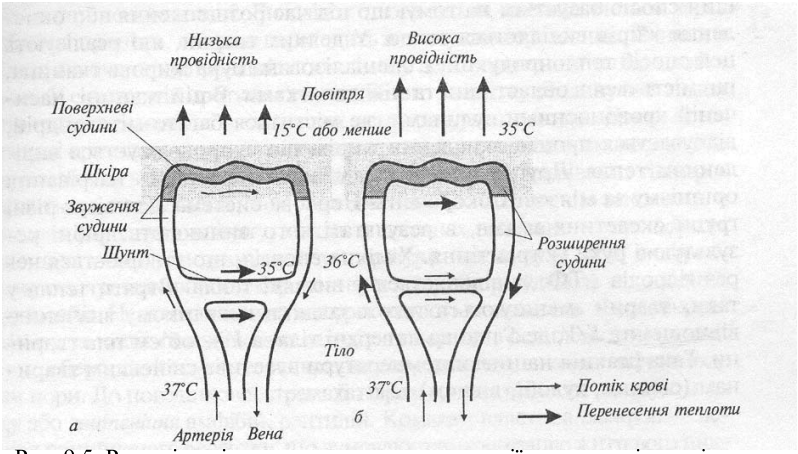


Рис. 9.5. Роль підшкіряного кровотоку в регуляції теплопровідності тканин організму

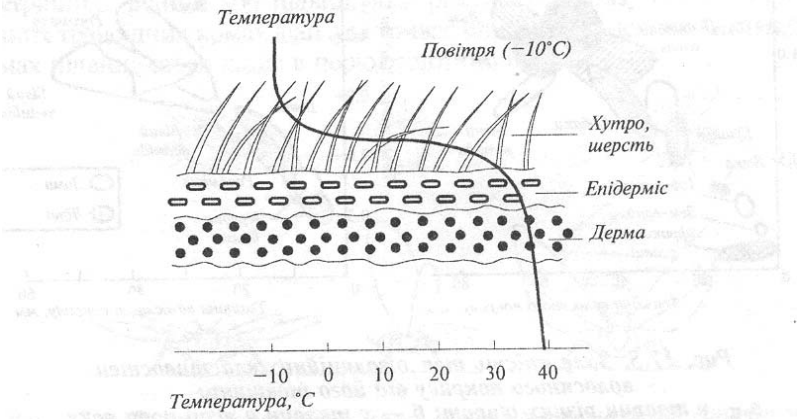


Рис. 9.6. Градієнт температури, що встановлюється на волосяному та шкіряному покривах тварини

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

PAB09112.indd 90 26.11.2009 16:28:59

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

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

Пінгвіни, які живуть в екстремальних кліматичних умовах (температура повітря мінус 50 ^{0}C, швидкість руху повітря 160 км/г) рятуються від холоду, утворюючи великі скупчення (кількістю до 6000 особин біомасою до 100 т). Така агрегація птахів дає можливість зекономити 80 % тепла порівняно зі звичайними птахами.

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

Багато тварин, амфібій, рептилій, риб, безхребетних, комах використовують для захисту від холоду як прості підземні нори довжиною від кількох сантиметрів, так і розвинені підземні мережі тунелів та камер довжиною до кількох сот метрів. Так, американський байбак викопує близько 1 м^3 ґрунту, переміщуючи 320 кг ґрунту.

Використання нір дає можливість арктичним птахам жити при температурі 10—20 ^{0}C під сніговим покривом, тоді як зовнішня температура становить –10 ^{0}C.

Ще один спосіб адаптуватися до зовнішньої температури є використання тваринами певного забарвлення. Відомо, що біле та світле забарвлення характеризується більшим відбиванням сонячного випромінення, тоді як чорне або темне призводить до його поглинання. Здатність змінювати забарвлення шкіри залежно від температури повітря демонструють хамелеони, ропухи, ящірки. Лабораторні експерименти з південноамериканською ропухою *Bokermannohyla alvarengai* довели, що під час утримання тваринки у темряві або при низькій (20 ^{0}C) температурі її шкіра темнішає, тоді як нормальне освітлення або більш висока температура (30 ^{0}C) викликають посвітління шкіри.

Чорний колір спини пінгвінів дає можливість накопичувати тепло завдяки сонячному випроміненню в умовах суворого клімату Антарктиди.

PAB09112.indd 91 26.11.2009 16:29:00

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

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

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

9.6. Вимірювання температури

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

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

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

Рідина в термометрі пінімається завдяки тому, що коефіцієнти об'ємного розширення β рідини та скла значно відрізняються: $1{,}81\times10^{-4}$ $(^0\text{C})^{-1}$ у ртуті; $10{,}6\times10^{-4}$ $(^0\text{C})^{-1}$ у спиртів; $9{,}16\times10^{-4}$ $(^0\text{C})^{-1}$ у толуена; $0{,}25\times10^{-4}$ $(^0\text{C})^{-1}$ у скла.

Рідинний термометр складається з тонкостінного скляного резервуара, з'єднаного зі скляним капіляром; для вимірювання температури термометр обладнаний шкалою (рис. 9.7).

PAB09112.indd 92 26.11.2009 16:29:00

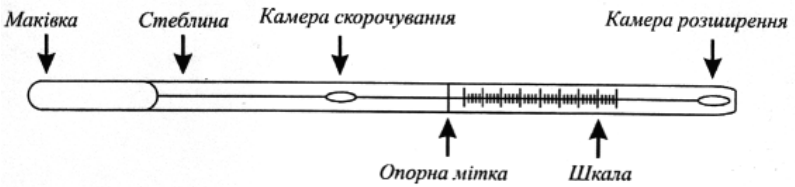


Рис. 9.7. Рідинний термометр

Як робочу рідину термометра обирають такі речовини.

Ртуть — діапазон температур, у межах яких ртуть ще рідка: від температури замерзання –38,83 ^{0}C до +356,7 ^{0}C. Саме через це ртутні термометри використовують для вимірювання високих температур. Ртуть використовують найчастіше через те, що вона існує у чистій формі, не погіршується з часом і не взаємодіє зі склом. Ртуть, на відміну від води, не розширюється під час затвердіння та не псує скляний капіляр; дуже важко помітити, коли вона замерзає. Саме через це ртутні термометри використовують для вимірювання високих температур.

Ртуть + талій — цей сплав дозволяє збільшити нижню межу вимірювання температури до –61,1 ^{0}C.

Спирт — етиловий має температуру замерзання –117,3 ^{0}C, а метиловий –138,5 ^{0}C; отже термометри зі спиртом доцільно застосовувати для вимірювання низьких температур.

Галій, який має температуру плавлення 30 ^{0}C, а температуру кипіння +2204 ^{0}C, може бути використаний у термометрах, призначених для вимірювання високих температур. Сплав галію, індію та олова (*галістан*) має температуру замерзання –20 ^{0}C; цей сплав використовують при виготовленні побутових градусників.

Толуен — має температуру плавлення –95,1 ^{0}C, а температуру кипіння 110,5 ^{0}C.

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

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

Для провідників залежність опору від температури має вигляд:

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

де R — опір провідника при температурі T; R_0 — опір при температурі

PAB09112.indd 93 26.11.2009 16:29:00

T_0; α — температурний коефіцієнт опору провідника; $\Delta T = T - T_0$ (де $T_0 = 273{,}16$ К = 0 ^{0}С).

Для терморезисторів використовують такі метали як платина, нікель, мідь. Платина характеризується стабільністю параметрів в умовах корозії, дії хімічних сполук. Платина не окислюється, піддається механічній обробці, має високу температуру плавлення і відзначається високим рівнем чистоти. Всі ці фактори впливають на стабільність залежності опору платинового провідника від температури. Платинові терморезистори характеризуються малими габаритами та компактністю (рис. 9.8).

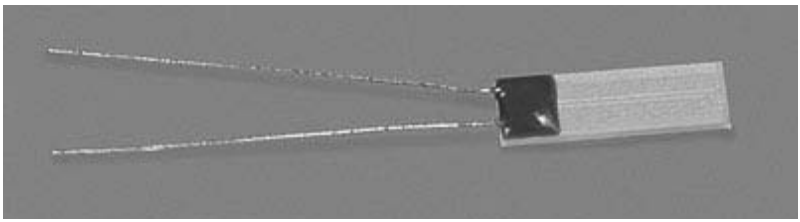


Рис. 9.8. Платиновий терморезистор

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

Для напівпровідників опір зменшується з підвищенням температури за формулою:

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

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

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

Термоелектричні термометри використовують термоелектричні явища, які проявляються у взаємозв'язку теплових та електричних процесів у твердих тілах. Одним із таких термоелектричних явищ є *ефект Зеєбека* — виникнення електрорушійної сили (е.р.с.) в елек-

PAB09112.indd 94 26.11.2009 16:29:00

тричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників, контакти яких мають різну температуру (рис. 9.9).

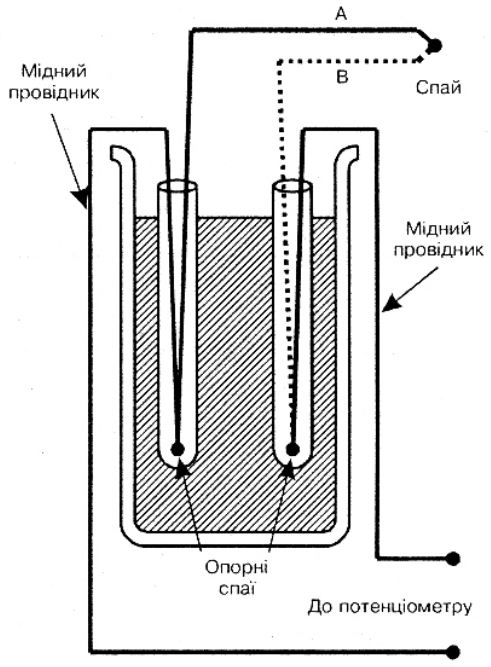


Рис. 9.9. Термоелектронний термометр

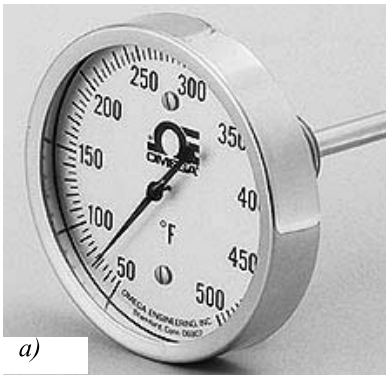
Типові термопари складаються з металів або сплавів, таких як мідь-константан, залізо-константан, платина-платина/родій. Температурні інтервали таких термоелектричних термометрів визначаються вибором певної термопари: хромель-алюмель — від –200 ^{0}C до +1200^{0}C; залізо-мідь — від –40 ^{0}C до +750 ^{0}C; мідь-константан — від –200 ^{0}C до +350 ^{0}C.

Недоліком таких термометрів є невисока точність (яка перевищує 1 ^{0}C), а також невеликі значення електрорушійної сили, що виникає в електричному ланцюзі.

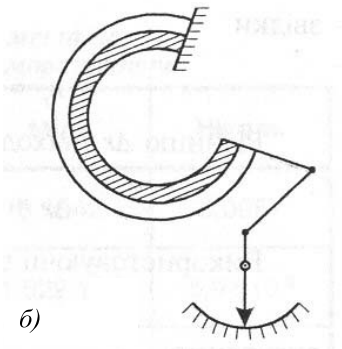
Подолати цей недолік можна за рахунок послідовного з'єднання декількох термопар, які утворюють в даному разі *термобатарею.*

Біметалевий термометр заснований на тепловому розширенні твердих тіл, зокрема на деформації біметалевої пластини (наприклад, інвар і сталь) під впливом температури (рис. 9.10).

PAB09112.indd 95 26.11.2009 16:29:01



а)



б)

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

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

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

Оптичний пірометр складається з джерела випромінювання та оптичної системи, до якої входить мікроскоп, калібрована лампа та фільтр з вузькою пропускною здатністю (рис. 9.11, *а*).

Процедура вимірювання температури передбачає порівняння яскравості тіла, що досліджується, та каліброваної лампи. Вимірювання проводять на довжині хвилі 655 нм. Шляхом регулювання струму, що проходить через нитку розжарювання лампи, врівноважують яскравість тіла і лампи. Внаслідок цього зображення нитки зникає на тлі яскравості тіла (рис. 9.11, *б*). Ручка потенціометра, яка регулює величину струму, прокалібрована в одиницях температури.

PAB09112.indd 96 26.11.2009 16:29:01

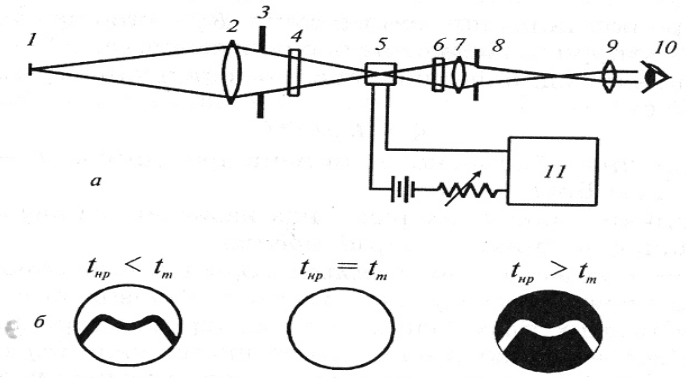


Рис. 9.11. Оптичний пірометр: *а* — принцип дії приладу; *б* — зображення нитки електролампи пірометра та піддослідного тіла, залежно від температури нитки $t_{нр}$ і тіла t_m

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

$$L_e = \varepsilon\sigma T_S^4 , \qquad (9.11)$$

де ε — випромінювальна здатність поверхні ($0 < \varepsilon < 1$); σ — стала Стефана-Больцмана ($5{,}67 \times 10^{-8}$ Вт×м$^{-2}$ ×К$^{-4}$); T_s — температура поверхні.

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

Цей потік підвищує температуру детектора, вихідний електричний сигнал з виходу якого проградуйований в одиницях температури. Застосування інфрачервоної відеокамери, яка здатна реєструвати спектральний розподіл температури, дає можливість утворювати теплові зображення піддослідного об'єкта.

PAB09112.indd 97 26.11.2009 16:29:01

Використовують пірометри для вимірювання температури більшої, ніж 600 ^{0}C.

Кварцевий п'єзоелектричий термометр являє собою цифровий прилад, в основі якого лежить вимірювання резонансної частоти п'єзокристала. Кожний кристал має свою власну резонансну частоту, яка залежить від температури. Прилади такого типу характеризуються високою чутливістю та роздільною здатністю (10^{-4} ^{0}C). Діапазон температур, що вимірюються, становить від –40 ^{0}C до +230 ^{0}C. До недоліків належать складність електронної системи та відповідна висока вартість приладів.

Репродуктивний тест

Термометр якого типу слід обрати для вимірювання температури –250 ^{0}C?

Альтернативний тест

Чи правильне ствердження, що:

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

Так. Ні.

2. Радіотермометри використовуються для вимірювання температури природних поверхонь.

Так. Ні.

Контрольні запитання

1. Що таке поліпное?
2. Що таке гіпотермія?
3. Як реагують тварини на екстремальні температурні умови?
4. Як здійснюють тварини поведінкову реакцію на температуру?

PAB09112.indd 98 26.11.2009 16:29:01