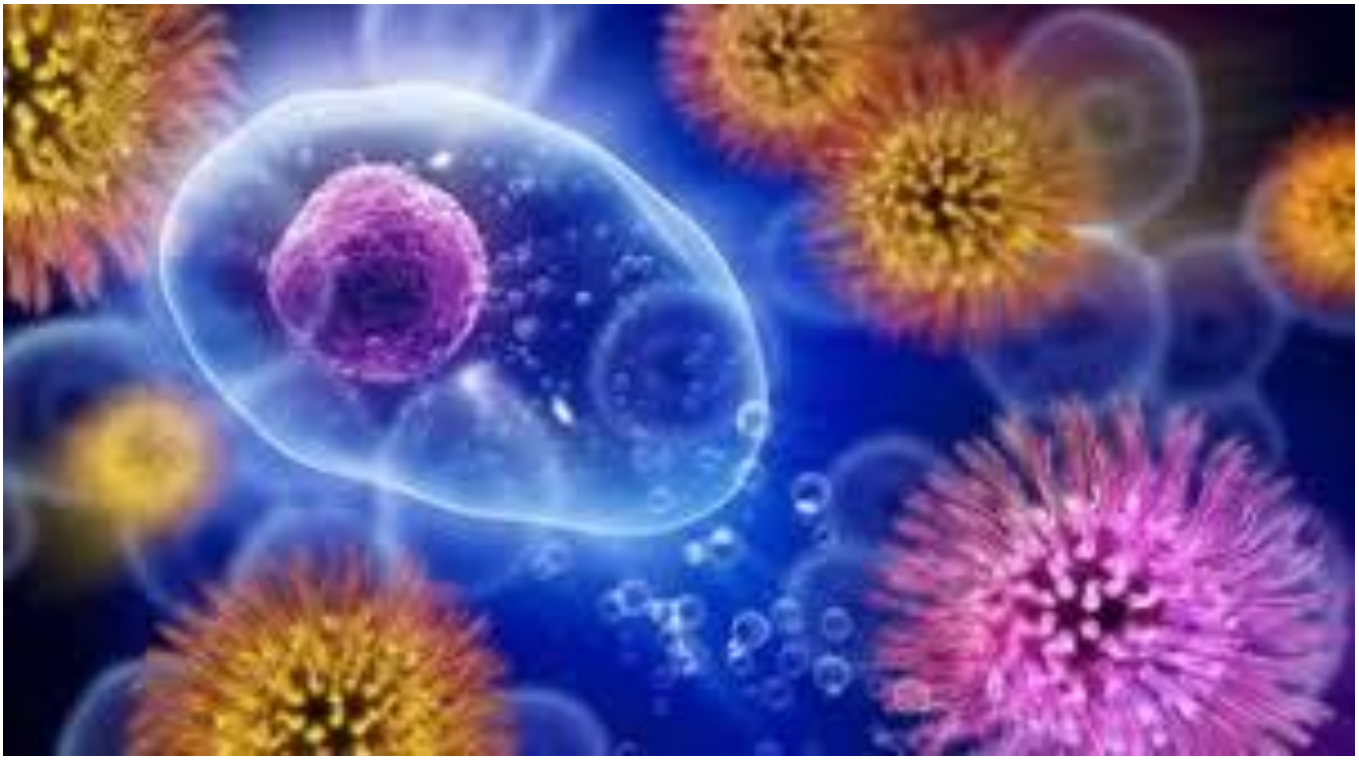
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Збаравська Леся Юріївна
Слободян Сергій Борисович
Торчук Михайло Васильович

Біофізика

Навчальний посібник
Видання друге,перероблене і доповнене



2025

УДК 577.3:63(075.8)

Рекомендовано до випуску та розповсюдження вченою радою закладу вищої освіти «Подільський державний університет»
(протокол № 4 від 28 травня 2025 року)

Рецензенти:

Войтович І.С. – доктор педагогічних наук, професор, проректор з навчально-виховної роботи Рівненського держаного гуманітарного університету

Булгаков В.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри механіки та опору матеріалів Національного університету біоресурсів і природокористування України

Супрович Т.М. – доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувач кафедри гігієни тварин та ветеринарного забезпечення кінологічної служби Національної поліції України ЗВО «ПДУ»

Біофізика: навч. посіб. / Л. Ю. Збаравська, С. Б. Слободян, М.В.Торчук. – 2-ге вид., переробл. – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2025. – 119 с.

Навчальний посібник розроблений з метою активізації принципу професійної спрямованості навчання студентів біоветеринарних спеціальностей, формування у студентів вмінь та навичок розв’язувати професійно спрямовані завдання, що допоможуть під час вивчення дисциплін професійної та практичної підготовки та для майбутньої професійної діяльності.

Видання розраховане на студентів спеціальностей «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва», «Ветеринарна медицина», «Біомедична інженерія» вищих закладів освіти.

© Збаравська Л.Ю., Слободян С.Б., Торчук М.В., 2025
©ЗВО « ПДУ», 2025

Зміст

ВСТУП……..5
БІОМЕХАНІКА…….....6
МЕХАНІЧНИЙ РУХ……...6
ОПОРНО-РУХОВИЙ АПАРАТ ТВАРИН……6
МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ РУХОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВАРИН……7
ДИНАМІКА……..8
ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВАРИН……9
ВПЛИВ ГРАВІТАЦІЇ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ……..9
ПРУЖНІ ВЛАСТИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ……12
РОБОТА І ЕНЕРГІЯ……14
МЕХАНІЧНА РОБОТА ЛЮДИНИ. ЕРГОМЕТРІЯ……...14
КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ. ЗВУК.....16
БАЛІСТОГРАФІЯ І БАЛІСТОКАРДІОГРАФІЯ……16
ВПЛИВ ПРИРОДНИХ КОЛИВАНЬ НА ТВАРИН……17
ВПЛИВ ВІБРАЦІЙ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ……..18
ЗАСТОСУВАННЯ ЗВУКОВИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ У ВЕТЕРИНАРНІЙ МЕДИЦИНІ...19
ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В СЛУХОВОМУ АНАЛІЗАТОРІ ССАВЦІВ……...21
АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ У ПТИЦІ……....24
АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ У РИБ……25
АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ У БДЖІЛ……...26
ВПЛИВ АКУСТИЧНИХ СТИМУЛІВ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ……26
УЛЬТРАЗВУК У ТВАРИННОМУ СВІТІ……27
ВПЛИВ ІНФРАЗВУКУ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ……..27
ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ У ВЕТЕРИНАРНІЙ МЕДИЦИНІ……29
ОСНОВИ ГЕМОДИНАМІКИ……31
СКЛАД КРОВІ……..30
СИСТЕМА КРОВООБІГУ ТВАРИН РУХ КРОВІ ПО СУДИНАХ……31
ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОСІДАННЯ ЕРИТРОЦИТІВ……31
СЕРЦЕ ЯК МЕХАНІЧНА СИСТЕМА РОБОТА СЕРЦЯ……32
ТИСК КРОВІ……..35
ФІЗИЧНІ ЯВИЩА І ПРОЦЕСИ, ЩО ЛЕЖАТЬ В ОСНОВІ ЗАХВОРЮВАНЬ КРОВІ ТА КРОВОНОСНИХ СУДИН……36
МОЛЕКУЛЯРНА БІОФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ……...39
ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ. ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ……...39
ПОВЕРХНЕВІ ЯВИЩА В ЛЕГЕНЯХ……40
НЮХ І СМАК У ТВАРИН……40
ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ТВАРИНИ……..46
ТЕРМОСТАТИЧНА РЕГУЛЯЦІЯ.ТЕМПЕРАТУРА ТІЛА……...50
ВПЛИВ ТЕПЛОВИХ ФАКТОРІВ НА ТВАРИН……51
ВПЛИВ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЕНДОТЕРМНИХ ТВАРИН……52
ВПЛИВ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЕНДОТЕРМНИХ ТВАРИН……53
ВПЛИВ ТЕПЛОВИХ ФАКТОРІВ НА ЕКТОТЕРМНИХ ТВАРИН……55
ПОВЕДІНКОВА РЕАКЦІЯ ТВАРИН НА ТЕМПЕРАТУРУ……55
ТЕРМОЛІКУВАННЯ ТВАРИН……56
БІОЕЛЕКТРИКА……..57
СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ МЕМБРАН……57
МЕМБРАННИЙ ТРАНСПОРТ……59
УТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ РИБАМИ……60
ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ……62

ЕЛЕКТРОРЕЦЕПЦІЯ……64
ЕЛЕКТРИЧНА АКТИВНІСТЬ ОРГАНІЗМУ 65
ВРАЖЕННЯ СТРУМОМ ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ І ЙОГО БІОФІЗИЧНИЙ МЕХАНІЗМ. 74
ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ У ТВАРИННИЦТВІ.....76
ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДІВ ЕЛЕКТРОЛІКУВАННЯ І ДІАГНОСТИКИ 78
БІОЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ 87
МАГНІТНЕ ПОЛЕ ЗЕМЛІ.....88
ДЖЕРЕЛА МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ЖИВОМУ ОРГАНІЗМІ.....88
МАГНІТНА АКТИВНІСТЬ ОРГАНІЗМУ 88
ОПТИКА.....92
ВПЛИВ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ТВАРИН.....92
ФОТОРЕЦЕПЦІЯ У ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ.....93
ЗАСТОСУВАННЯ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В МЕДИЦИНІ 102
ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ І ТЕРМОРЕГУЛЯЦІЯ У ТВАРИННОМУ СВІТІ 108
ДІЯ ВИДИМОГО СВІТЛА 109
ІНФРАЧЕРВОНЕ ОПРОМІНЕННЯ 110
УЛЬТРАФІОЛЕТОВЕ ОПРОМІНЕННЯ.....112
ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ.....114
ВИПРОМІНЮВАННЯ В МЕДИЦИНІ.....115
ЯДЕРНА ТА АТОМНА ФІЗИКА.....115
РАДІОНУКЛІДИ В МЕДИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ.....115
ТЕРАПЕВТИЧНА РАДІОЛОГІЯ.....116
МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ.....117
РАДІОАКТИВНІ ЗАБРУДНЕННЯ.....117
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА …….....117

ВСТУП

У сучасному науковому й освітньому просторі біофізика є ключовою міждисциплінарною наукою, що формує у студентів цілісне уявлення про фізичні основи життєдіяльності біологічних об’єктів, включаючи клітини, тканини, органи й цілі організми. Вивчення біофізики дає змогу зрозуміти фундаментальні механізми, що лежать в основі біологічних процесів, таких як передача сигналів у нервовій системі, дифузія речовин, м’язове скорочення, електричні властивості мембран, біоенергетика, фотобіологічні явища тощо.

У контексті підготовки фахівців для аграрного сектору, медицини, ветеринарії, біотехнологій та екології біофізика відіграє роль теоретичної та методологічної основи для розвитку практичних компетентностей. Знання з біофізики необхідні для опанування сучасних методів діагностики, моніторингу фізіологічних параметрів, обґрунтування безпечного впливу фізичних факторів на живі організми, а також для розробки та оптимізації біотехнологічних і фармакологічних процесів.

Навчальний посібник, який пропонується увазі здобувачів вищої освіти, структуровано відповідно до вимог освітньо-професійних програм і компетентнісного підходу. Матеріали посібника спрямовані на розвиток здатності:

- аналізувати фізичну природу біологічних процесів;
- застосовувати теоретичні знання в умовах практичної діяльності;
- інтерпретувати результати фізичних і біофізичних експериментів;
- формулювати й вирішувати прикладні задачі з урахуванням особливостей біологічних об’єктів.

Особливу увагу приділено формуванню навичок наукового дослідження: планування та проведення лабораторних робіт, статистичній обробці даних, роботі з вимірювальними приладами, аналізу експериментальних результатів. Наведені приклади та задачі мають професійне спрямування, що дозволяє пов’язати теоретичний матеріал із майбутньою практичною діяльністю фахівця.

Посібник призначений для студентів закладів вищої освіти, які навчаються за спеціальностями біологічного, аграрного, медичного та екологічного профілю, а також може бути корисним викладачам, науковцям і практикам, які працюють у суміжних галузях знань.

БІОМЕХАНІКА

МЕХАНІЧНИЙ РУХ

Найпростішим видом руху матерії є *механічний рух*, що є переміщенням в просторі тіл або їх частин один відносно одного.

Розрізняють три види механічного руху тіл – поступальний, обертальний і коливальний. При поступальному русі твердого тіла всі його точки описують однакові лінії і мають однакову швидкість і однакове прискорення (у даний момент часу).

Тварина бере участь у різноманітних типах рухів – поступальному (рух тіла в цілому), обертальному (рух зчленувань), коливальному (рух окремих частин тіла і внутрішніх органів), хвилеподібному (рух хребта). Зчленування демонструють такі типи рухів як згинання, розгинання, розведення, зведення (рис. 1)

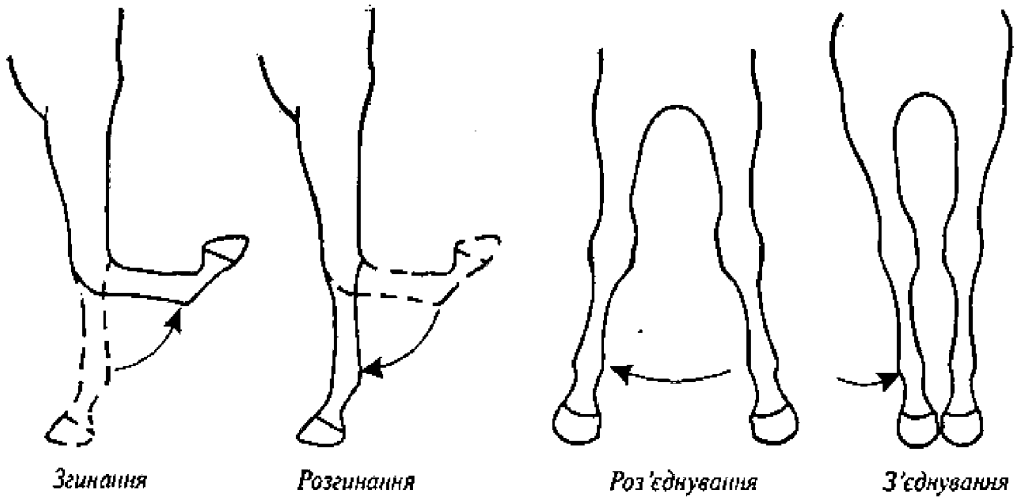


Рис. 1. Типи рухів, що демонструють зчленування

ОПОРНО-РУХОВИЙ АПАРАТ ТВАРИН

Основне призначення опорно-рухового апарату тварин - забезпечення переміщень тіла або окремих його частин у просторі та зберігання під час стояння статичної рівноваги. Основними елементами опорно-рухового апарату тварин є кістки, м'язи, суглоби, сухожилля та зв'язки. Кістки, зв'язані одна з одною у рухомі ланки, утворюють кінематичні ланцюги. Окремі ланки такого ланцюга можна розглядати як найпростіший механізм - важіль. Точкою опори, навколо якої відбувається обертання важеля, є суглоб. Рух кісток, які утворюють важіль, забезпечується м'язами. Скорочуючись, вони змінюють положення кісток, до яких прикріплені. Основою опорно-рухового апарату тварин та його несучою конструкцією є скелет. Таким чином, опорно-руховий апарат тварин складається з кісток - міцних матеріалів, що виконують пасивні функції у процесі руху тіла, та м'язів, які є активним елементом опорно-рухового апарату (рис. 2).

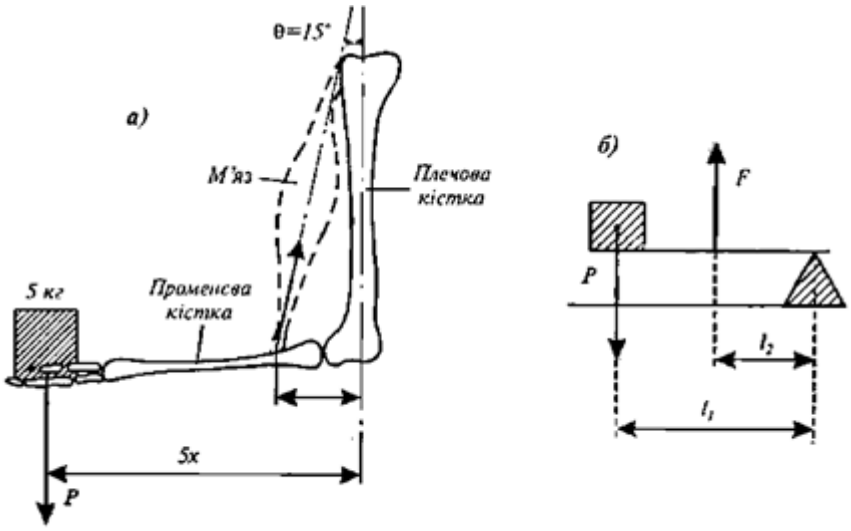


Рис. 2. а) важіль, що складається з плечової, променевої кісток і м'яза.
б) еквівалентна хема важеля: P - вантаж, F- діюча сила, l_1 і l_2 - плечі

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ РУХОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВАРИН

Кінематичні характеристики тварин

До основних кінематичних характеристик тварини належать довжина кроку, частота кроків, тривалість контакту кожної кінцівки з фунтом. Всі ці параметри вимірюються за допомогою високошвидкісної кінематографії або акселерометрії.

Прикладом результатів вимірювань кінематичних характеристик є швидкість руху і довжина кроку коня (табл. 1).

Таблиця 1.

Кінематичні характеристики коня

Тип руху	Швидкість руху, км·г$^{-1}$	Довжина кроку, м
Хода	6÷7 (верхові породи) 4÷5 (возові породи)	1,4÷1,8
Рись	11÷18	2,5÷3,5
Галоп	30÷40	1,5÷2,0

У ветеринарній медицині дедалі частіше використовують такий параметр, як кут між окремими сегментами зчленування. Вимірювання кінематичних характеристик проводять у дво- або тривимірному просторі за допомогою камер, розташованих збоку, позаду або спереду тварини. Методика вимірювань передбачає використання маркерів, що закріплюються в центрі обертання суглоба і на окремих сегментах (рис. 3).

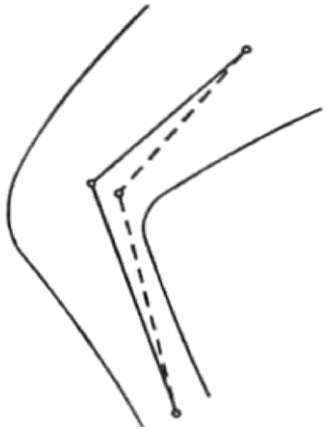


Рис. 3. Обертання суглоба

Розмір кожного маркера становить 2,5 см. Розвитком цієї техніки можна вважати застосування фотодіодів як маркерів, на які діють три світлових промені, що скануються в тривимірному просторі. Розміщення фотодіодів на передній кінцівці коня дає можливість визначити залежність кута між сегментами від часу для таких суглобів як вертлуг, плече, лікоть, кістка зап'ястя, щітка, суглоб копита.

Кінематографічна техніка дає змогу реєструвати послідовність і тривалість фаз руху, які визначаються опорою, відштовхуванням, підняттям і переносом кінцівок твариною.

ДИНАМІКА

ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВАРИН

Під час руху тварини виникають внутрішні сили, що розвиваються м'язами в тілі тварини і перетворюються в обертання сегментів суглобів і поступальний рух тварини в цілому, а також зовнішні сили, такі як реакція опору фунту. Один з методів оцінки зовнішніх сил передбачає використання силових пластин, що являють собою плоскі пластини розміром 60х90 см, з'єднані з 3-4 п'єзоелектричними перетворювачами або датчиками напруги. Ці пластини встановлюють на шляху руху тварини, яка досліджується.

Ще один метод вимірювання базується на використанні силових черевиків, обладнаних датчиками. Як приклад, можна навести результати дослідження залежності реакції опору фунту під час ходи коня (рис. 4).

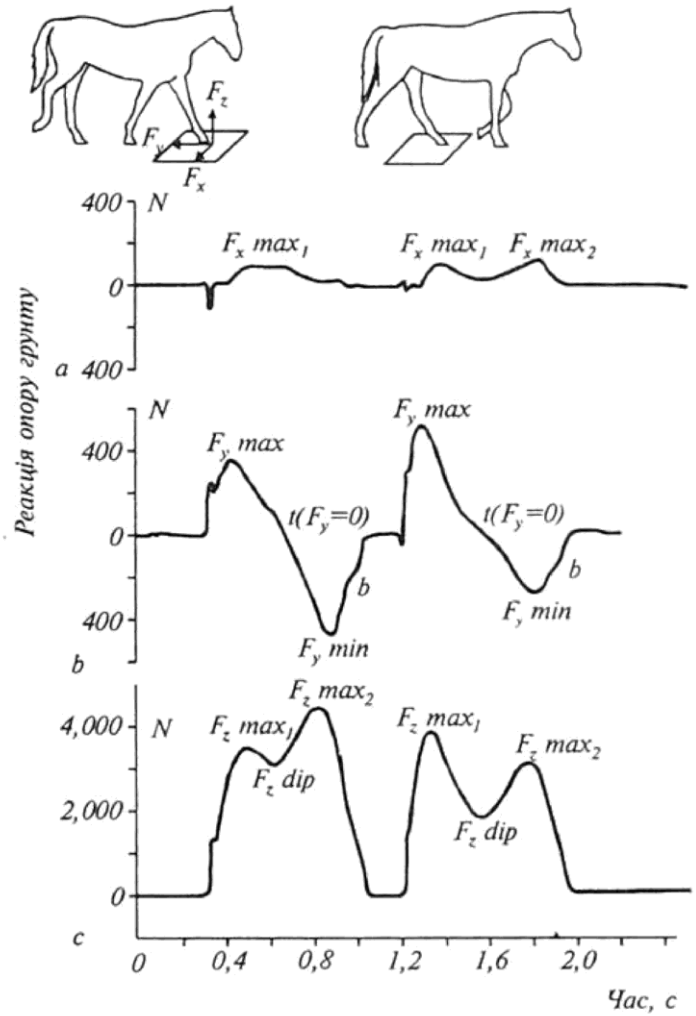


Рис. 4. Результати вимірювання реакції опору грунту під час ходи коня за допомогою силових черевиків: a, b — горизонтальні сили; c — вертикальні сили

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

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

ВПЛИВ ГРАВІТАЦІЇ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

На відміну від інших зовнішніх стимулів гравітація існує завжди і не змінюється за величиною; її не можна увімкнути чи вимкнути.

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

Гравітаційне поле Землі є важливим зовнішнім фактором для організмів, що пересуваються у водному середовищі. Таку спроможність організмів орієнтувати напрямок свого руху відносно гравітаційного поля називають гравітаксисом. Гравітаксис спостерігається у таких водоростей як Euglena gracilis, Chlamydomonas nivalis, Cryptomonas, Peridinium gatunense та P.faeroense, Amphidinium caterea, Prorocentrum micans, Dunalialla salina. Напрямок гравітаційноі орієнтаціі організмів залежить від виду та віку водорості. Так, Peridinium faeroense та молода популяція Euglena gracilis виявляють позитивний граві гаксис (рух від водної поверхні), у той час як Chlamydomonas nivalis, Peridinium gatunense, Amphidinium caterea, Prorocentrum micans та старим популяціям Euglenagracilis притаманний негативний гравітаксис (рух до водної поверхні). Рівень гравітаційної орієнтації водоростей визначається віком культури та часом доби, наявністю важких металів у середовищі, впливом сонячного, зокрема ультрафіолетового випромінення. Таким чином, гравітаксис є важливим екологічним фактором, який дозволяє водним організмам знаходити кращі умови існування.

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

Коли зовнішнім стимулом є гравітаційна сила, то реакція рослини на неї називається гравітропізмом. Рослина, покладена в горизонтальне положення, направляє паросток догори (негативний гравітропізм), а корінь — донизу (позитивний гравітропізм). Таким органам рослини як столони, ризоми, бокові гілки, що ростуть під прямим кутом до напрямку дії гравітаційної сили, притаманний діагравітропізм, а органам, напрямок росту яких знаходиться в інтервалі 0-90^0 до вертикалі, — плагіотропізм. Якщо органи не чутливі до гравітації, їх називають агравітропними. Типові гравітропні відгуки стебла та коріння рослин наведено на рис. 5.

У більшості експериментів використовується гравітаційне прискорення на рівні 1g чи менше, що досягається орієнтуванням органа (колеоптиля чи кореня) у будь-якому не вертикальному положенні. Гравітаційна сила пропорційна синусу кута нахилу органа відносно вертикалі.

Якщо потрібно звести нанівець вплив гравітаційного поля, застосовують кліностати — прилади, які забезпечують обертальний рух рослинного об'єкта, або проводять космічні досліди, в яких досягають стану невагомості.

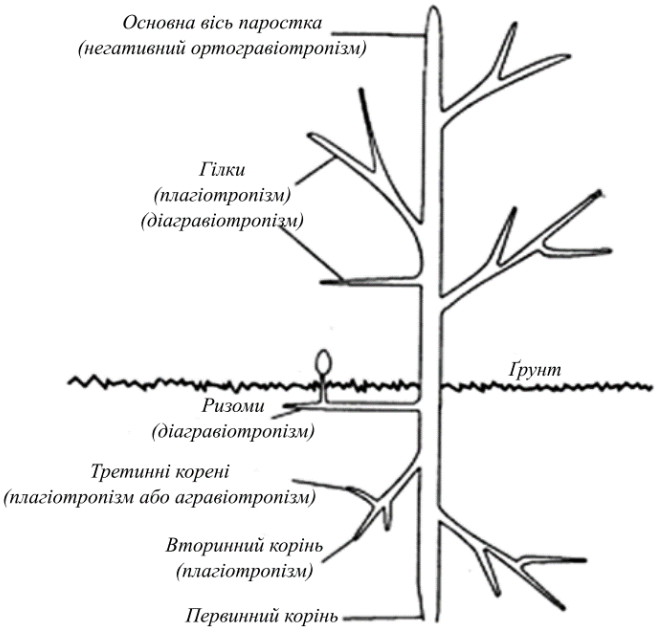


Рис. 5. Типові гравітропні відгуки
стебла та коріння рослини

Комахи та гравітація

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

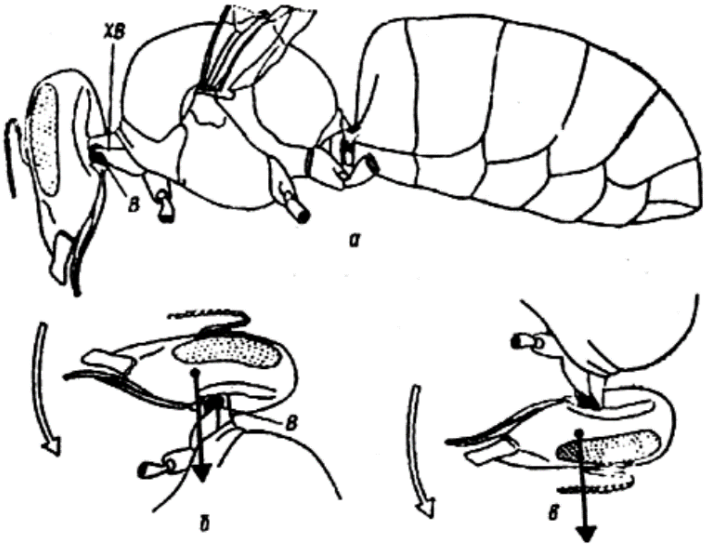


Рис. 6. Орган рівноваги бджоли

При побудові цих чарунок (саме шестикутники мають найменший периметр і при тій самій місткості порівняно з чарунками іншої форми зумовлюють найменшу кількість будівельного матеріалу) бджоли вимірюють кути за допомогою осо-

бливих органів чуттів, розміщених у місці зчленування голови та грудей (рис.6.). У звичайному стані голова опирається на два хітинових виступи грудей (ХВ) вище центра маси (рис. 6, *а*).

При вертикальному розміщенні бджоли головою догори нижня її частина тисне на груди (рис. 6, *б*), причому чутливі волоски В сприймають цей тиск; при розміщенні головою донизу ситуація змінюється (рис. 6, *в*). Таким чином, реєструючи рівень тиску голови на груди за допомогою волосків, бджола здатна контролювати положення у просторі свого тіла та стільників.

Вестибулорецепція

Оцінка положення і переміщення тіла у просторі, що ґрунтується на визначенні напрямку дії лінійного чи обертального прискорення, становить суть вестибулорецепції. Цей тип рецепції реалізується за допомогою вестибулярного апарата, розміщеного у внутрішньому вусі, що складається з переддвер'я і трьох напівкруглих каналів, розташованих у взаємноперпендикулярних площинах (рис.7). У порожнині переддвер'я розміщені рецепторні клітини з волосками, занурені в желеподібну масу, що містить кристали карбонату кальція так звані отоліти.

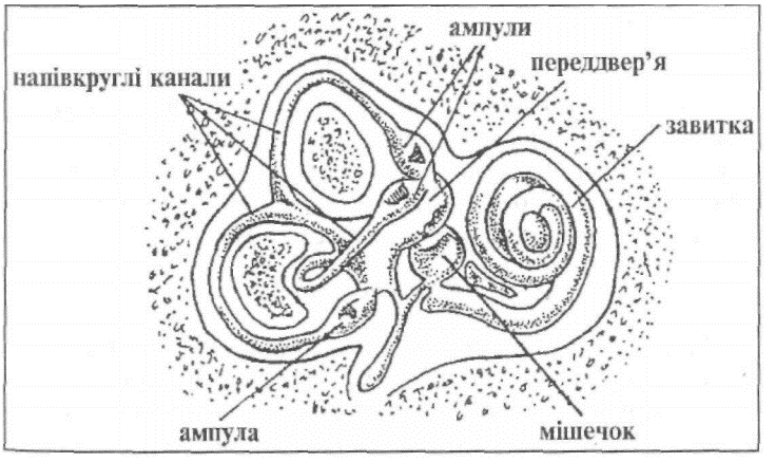


Рис. 7. Вестибулярний апарат

Якщо голова людини або тварини схиляється, напівкруглі канали набувають прискорення, а ендолімфа намагається залишитися на місці через силу інерції. При цьому отоліти зміщуються і згинають волоски, що зумовлює збудження нервових клітин, зв'язаних з рецепторними клітинами, і передачу інформації до мозку про положення голови або тіла у просторі (рис. 8). Обидва внутрішніх вуха являють собою білатеральну рецепторну систему: якщо під час обертання голови ліві напівкруглі канали набувають прискорення, то праві — сповільнення. У мозку відбувається порівняння й аналіз частоти посилання біопотенціалів, що надходять з обох систем.

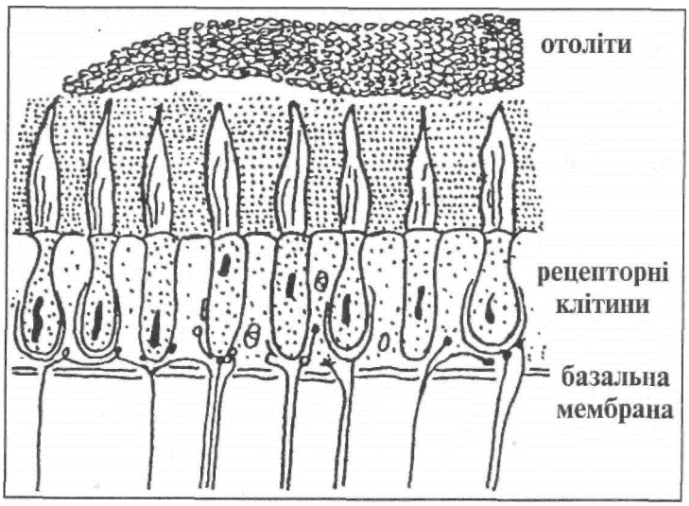


Рис. 8. Вміст порожнини переддвер'я

ПРУЖНІ ВЛАСТИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

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

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

Рєзилін — білок, що зустрічається у комах. Пружні властивості резиліну надають їм можливості здійснювати стрибки.

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

Пружні властивості деяких біологічних матеріалів (наприклад, абдукгину) характеризуються певними особливостями. Так, діаграма розтягу не має вигляду прямої лінії — криві напруження і розслаблення матеріалу не збігаються (рис. 9), Явище, яке полягає в тому, що фізична величина (вданому випадку відносне видовження ε неоднозначно залежить від фізичної величини, яка характеризує зовнішні умови (напруження σ), називається *гістерезисом*.

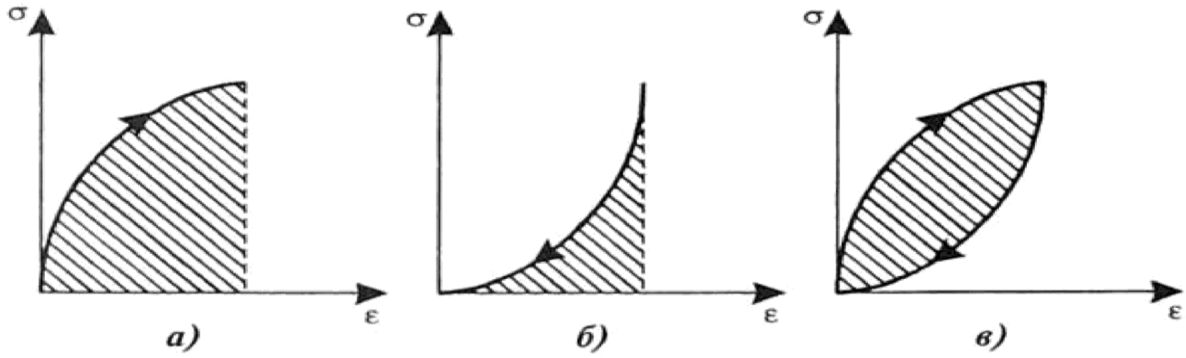


Рис. 9. Залежність напруги від деформації під час гістерезису: а — крива напруження, б — крива розслаблення, в— повна енергія (крива гістерезису)

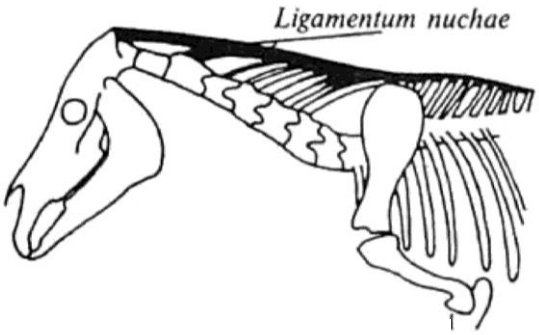


Рис. 10

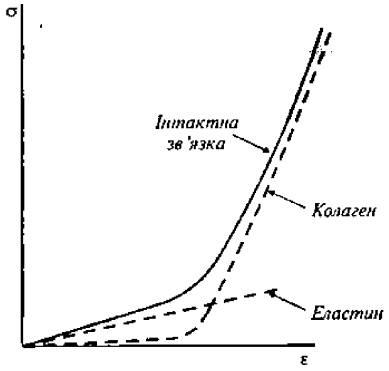


Рис. 11.

Модуль Юнга характеризує пружні властивості речовини; визначається напруженням, що викликає відносне видовження тіла, рівне одиниці. Багато біологічних матеріалів складаються з кількох пружних компонентів, що зумовлює специфічний характер діаграми розтягу. Так, наприклад, потилична зв'язка Ligamenium nuchae копитних тварин (рис. 10) містить такі пружні субстанції як еластін та колаген, модулі Юнга яких значно відрізняються (табл. 2.). Отже, еластин відповідає за початковий відгук зв'язки, тоді як колаген — за кінцевий (рис. 11).

Таблиця 2.

Значення модуля Юнга різних пружних матеріалів

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

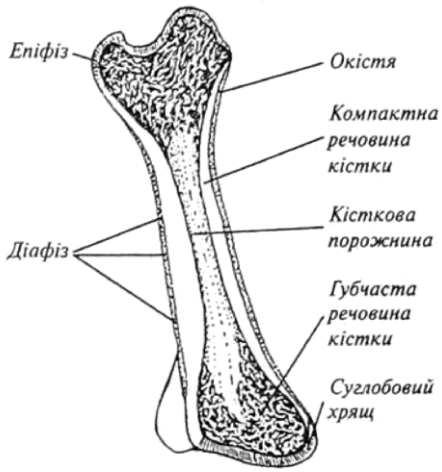


Рис. 12

Кістки є основними компонентами опорно-рухового апарату людини і тварини. Вивчення пружних властивостей кісткової тканини доцільне з точки зору завдань, що стоять перед сучасною хірургією та ортопедією, пов'язаних з розробкою та впровадженням засобів протезування. Крім забезпечення руху, кістки виконують функції підтримки та захисту м'язових тканин, являють собою місце накопичення кальцію. За своєю формою кістки діляться на довгі, короткі, плоскі та (регулярні. Маса кісток становить близько 18% загальної маси тіла. Приблизно 60% об'єму (40%

ваги) компактної кісткової тканини займає органічний матеріал колаген; решту — неорганічний матеріал гідроксилапатит $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$. Кристалики цієї речовини розташовані між волокнами колагену і міцно прикріплені до них. Саме така структура кісток зумовлює їх пружні властивості. Модуль пружності кісткової тканини займає проміжне значення між модулями пружності її компонентів і істотно залежить від їх процентного вмісту. Типова довга кістка зображена на рис. 12. Механічні характеристики кістки наведено в табл. 3.

Таблиця 3.

Механічні характеристики кістки

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

РОБОТА І ЕНЕРГІЯ

МЕХАНІЧНА РОБОТА ЛЮДИНИ. ЕРГОМЕТРІЯ

Механічна робота, яку здатна зробити людина протягом дня, залежить від багатьох чинників, тому важко вказати яку-небудь граничну величину. Це зауваження відноситься і до потужності. Так, при короткочасних зусиллях, людина може розвивати потужність близько декількох кіловат. Якщо спортсмен масою 70кг підстрибує з місця так, що його центр маси піднімається на 1 м по відношенню до нормальної стійки, а фаза відштовхування триває 0,2 с, то він розвиває потужність близько 3,5 кВт.

При ходьбі людина здійснює роботу, оскільки при цьому енергія витрачається на періодичне невелике підняття тіла, на прискорення та уповільнення кінцівок, головним чином ніг.

Людина масою 75 кг при ходьбі із швидкістю 5 км/год розвиває потужність близько 60 Вт. Із зростанням швидкості ця потужність швидко збільшується, досягаючи 200 Вт при швидкості 7 км/год. При їзді на велосипеді положення центру маси людини та прискорення ніг змінюються значно менше, чим при ходьбі, тому потужність, що витрачається при їзді на велосипеді, значно менша: 30 Вт при швидкості 9 км/год, 120 Вт при 18 км/год.

Робота обертається в нуль, якщо переміщення немає. Коли вантаж знаходиться на опорі, підставці, або підвішений на нитці, сила тяжіння не здійснює роботи. Проте кожному з нас знайома втома м'язів руки і плеча, якщо тримати нерухомо, на витягнутій руці, гирю чи гантель. Так само втомлюються м'язи спини і поперекової області, якщо сидячій людині помістити на спину вантаж. В обох випадках вантаж нерухомий і роботи немає. Втома ж свідчить про те, що м'язи здійснюють роботу. Таку роботу називають *статичною роботою м'язів.*

Статики (нерухомості) такої, як її розуміють у механіці, насправді немає. Відбуваються дуже дрібні, часто непомітні оку, скорочення та розслаблення, і при цьому здійснюється робота проти сил тяжіння. Таким чином, статична робота людини насправді є звичайною динамічною роботою. Для вимірювання роботи лю-

дини застосовують прилади, звані *ергометрами.* Відповідний розділ вимірювальної техніки називається *ергометрією.*

Коней використовують для роботи в упряжі, під сідлом, в'юком, отримання від них м'яса й молока, у різних видах кінного спорту тощо.

Робоча продуктивність коней характеризується такими показниками, як тяглове зусилля (сила тяги), кількість виконаної роботи, швидкість руху, витривалість і потужність.

Під тягловим зусиллям розуміють силу, яку прикладає кінь для долання опору рухові вантажного транспорту чи сільськогосподарського знаряддя. Зусилля, з яким кінь працює щодня впродовж тривалого часу без втоми, вважають нормальним. Кінь може розвинути і максимальне тяглове зусилля, яке дорівнює його живій масі, а іноді й перевищує її.

Величина тяглового зусилля залежить від живої маси, віку, фізіологічного стану тварин, якості дороги, конструкції возів та сільськогосподарських знарядь. Визначають його динамометром у кілограм-силах (кгс).

Обсяг виконаної роботи під час транспортування вантажів визначають у тонно-кілометрах (маса вантажу, m перемножена на шлях, км). Однак для перевезення того самого вантажу різними дорогами необхідне неоднакове тяглове зусилля. Тому для точнішого визначення обсягу роботи коня використовують формулу $A = P \cdot S$.

Залежно від відносної величини тяглового зусилля у відсотках до живої маси роботу коня розподіляють на легку (до 10 %), середню (15) і важку (близько 20 %).

До легких робіт відносять перевезення дрібних вантажів у межах господарства, транспортування їх впорядкованими дорогами, їзду перемінним алюром на невеликі відстані, роботу в легких боронах, а також інші упряжні роботи з тягловим зусиллям до 10 % живої маси коня. Шлях, пройдений конем за робочий день, має бути в межах 15 км, а час корисної роботи – до 4 год.

Роботу, яку виконує тварина з тягловим зусиллям 13 - 15 % її живої маси, відносять до середньої (легка оранка, культивація, боронування важкими боронами тощо). Тривалість корисної роботи 6 год, а загальний пройдений шлях — близько 25 км.

До важких робіт відносять перевезення великих вантажів, оранку плугами з передплужниками, сівбу сівалками, скошування трав і зернових кінними косарками та ін. Тривалість корисної роботи 9 год, а пройдений шлях – у межах 35 км.

Швидкість руху характеризує індивідуальні робочі якості коня. Вона залежить від породних особливостей, здоров'я тварини, алюру, величини вантажу, якості дороги, тривалості роботи та тяглового зусилля. Від швидкості руху залежить величина тяглового зусилля. Чим швидше кінь рухається, тим менше тяглове зусилля він розвиває. Найпродуктивнішим робочим алюром є крок, за якого кінь розвиває найвищу вантажопідйомність.

Для обліку денного виробітку коня необхідно знати середню швидкість. Визначають її діленням пройденого шляху на одиницю часу. Швидкість руху коня залежить від алюру (кроком – 4 – 7 км/год, риссю – 10 – 12, галопом – 20 – 25 км/год).

Коні найбільше втомлюються від збільшення швидкості руху, менше – від зміни тяглового зусилля і ще менше – від збільшення тривалості роботи їх. Для забезпечення максимального денного виробітку й збереження роботоздатності тварин потрібно правильно вибрати оптимальне співвідношення тяглового зусилля, швидкості руху та тривалості роботи. Перевезення важких вантажів на далекі відстані знижує швидкість руху коня.

Продуктивність коня визначається часом його корисної роботи. Упродовж 8-годинного робочого дня корисна робота має становити не менше ніж 6 год, а влітку вона може бути збільшена до 9 – 10 год.

В позасистемною одиницею потужності є кінська сила, що дорівнює 75 кгм/с (в системі СІ 1 к. с. = 735,5 Вт). Потужність коня живою масою 500 кг дорівнює одній кінській силі, а невеликих коней – 0,6 – 0,7 к. с. її можна визначити, перемноживши тяглове зусилля на швидкість руху. Потужність залежить від типу, породи, маси тварин, фізичного стану, тренованості, роботи тощо.

Коні рисистих порід більшу потужність розвивають за високої жвавості, а ваговозних — з малою швидкістю руху. Потужність тварин протягом робочого дня не постійна, що негативно впливає на тяглове зусилля й швидкість руху. З настанням утоми кінь часто зупиняється і може повністю відмовитися від роботи.

Витривалість – це здатність коня розвивати властиву йому потужність і швидко відновлювати сили після годівлі та відпочинку. Вона залежить від навантаження, тривалості роботи, конституційних особливостей, тренованості й вгодованості.

Ознаками втоми є: зниження реакції на спонукання, нечіткі рухи, тремтіння кінцівок і м’язів, пітливість, прискорені дихання й пульс, підвищена температура, відмова від корму, понурий вигляд, млявість тощо.

До основних показників втоми і витривалості належать температура і пульс. Про значну перевтому коня свідчать підвищена температура (40 °С), прискорені дихання (70 за 1 хв) і пульс (100 ударів за 1 хв). Показник витривалості треба враховувати під час розподілу коней на сільськогосподарські та інші роботи.

КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ. ЗВУК.

БАЛІСТОГРАФІЯ І БАЛІСТОКАРДІОГРАФІЯ

Балістокардіографія (греч. ball кидати + kardia серце + graph писати, зображати) – метод графічної реєстрації реактивних механічних рухів тіла людини, обумовлених скороченнями серця і переміщенням крові в крупних артеріях.

На реєстрованій кривій – балістокардіограмі (БКГ) відбиваються коливання тіла, що виникають під впливом систоли серця, гідравлічного удару крові о дугу аорти і біфуркацію (роздвоєння) легеневого стовбура, а потім об біфуркацію аорти. Амплітуда хвиль балістокардіограми у фазі систоли пропорційна енергії серцевого викиду. На балістокардіограмі відбивається також ступінь уповільнення кровотоку, залежний від величини периферичного опору кровотоку. Залежно від реєстрованого параметра коливань (зазвичай по подовжній осі тіла) розрізняють балістокардіографію зсуви, швидкості і прискорення (остання називається також акцелераційною балістокардіографією). Запропоновано два основні варіанти реєстрації балістокардіограми:

прямий метод, при якому записуються коливання тіла обстежуваного, лежачого на нерухомій підставі,

непрямий метод, заснований на записі коливань рухомої підстави, на якій лежить обстежуваний. Запис здійснюють за допомогою спеціальних приладів – балістокардіографів. До різновидів балістокардіографії можна віднести ряд методів реєстрації пов'язаних з серцевою діяльністю механічних коливань грудної клітки (локальна балістокардіографія) – динамокардіографію (реєстрацію переміщень центру тяжіння грудної клітки), сейсмографію (реєстрацію струсів грудної стінки) і низькочастотну сейсмографію, що дозволяє реєструвати коливання грудної стінки частотою від 1 до 10 Гц (кінетокардіографія).

Балістокардіографія є неспецифічним методом дослідження скоротності міокарду і гемодинаміки. По змінах амплітуди і деформації хвиль систол розрізняють чотири ступені патологічних змін балістокардіограми, які можуть відповідати вираженості порушень скоротності міокарду. Проте форма балістокардіограми залежить і від інших чинників (еластичності крупних артерій, наявність перешкод на шляху кровотоку – пороків серця, стенозів аорти і магістральних артерій, артеріовенозних шунтів, в'язкості крові, відносини маси міокарду до маси тіла і так далі). Тому виражені зрушення балістокардіограми, відповідні III–IV ступені змін, можуть бути виявлені і при достатньому серцевому викиді і нормальній скоротності міокарду, наприклад у хворих з миготливою тахіаритмією (через інтерференції хвиль, що відносяться до різних серцевих циклів).

Через неспецифічність результатів балістографія не може застосовуватися з діагностичними цілями; скоротність міокарду в сучасній клініці вивчають більш інформативними методами, зокрема ультразвуковими.

ВПЛИВ ПРИРОДНИХ КОЛИВАНЬ НА ТВАРИН

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

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

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

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

Є. Є. Новогрудський із співавторами у книзі «Інфразвук» наводить приклади таких спостережень. Так, у Туркменистані у м. Казан-джику (4 листопада 1946 р.) за кілька годин до землетрусу незвично поводили себе вівці, ревли верблюди, вили собаки, невчасно співали півні. Про ашхабадський землетрус (13 жовтня 1948р.) тут написано, що за дві години до поштовху коні у стайнях почали голос-

но іржати, відривалися від прив'язі, вибігали із стійл. Чергові конюхи вертали їх на місце. А за 15 хв до поштовху коні знову захвилювалися, та так, що не тільки вибігли із стійла, а й вибили ворота стаєнь і розбіглися по території. Катастрофічний поштовх зруйнував будівлі стаєн, але жодного коня там уже не було.

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

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

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

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

ВПЛИВ ВІБРАЦІЙ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

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

Змінні напруження у тканинах людини, що зумовлюються тривалими вібраціями, можуть призвести до «вібраційної хвороби», яка супроводжується значними змінами у центральній нервовій системі, порушеннями функцій кровоносних судин та загального кровообігу.

Високою чутливістю до вібрацій відзначаються членистоногі та павуки. Нічні пустельні скорпіони визначають місцезнаходження жертви по вібраціях піску на відстані до 0,5 м. На кожній з восьми кінцівок є рецептор вібрації, який генерує електричні розряди у відповідь на зміщення близько 0,1 нм. Сукупність відгуків здатна орієнтувати скорпіона на джерело вібрації. Причому, одна група рецепторів реагує на поверхневі хвилі піску, тоді як друга – на хвилі стискування, що поширюються через пісок. Скорпіон здатний відрізнити сигнали, що доходять до кінцівки, розташованої у напрямку до жертви, та протилежної їй з точністю до 0,2 мс, що дає можливість зорієнтуватися комасі у потрібному напрямку.

Павуки відрізняють живу жертву від мертвої завдяки коливанням павутини, які відбуваються з частотою близько 50 Гц. Коливання, які утворює жертва, поширюються вздовж радіальних ниток павутини і реєструються різними кінцівками павука. Здатність павуків відрізнити різницю у часі (близько 1 мс.) коливань, що досягають цих кінцівок, дає можливість визначити напрямок до жертви.

Рецептори таргана, розташовані на гомілках, здатні сприймати коливання з порогом 10^{-7}-10^{-10} см в діапазоні частот 1000-5000 Гц.

Мурашки-листорізи спроможні реагувати на коливання з амплітудою близько 1,3-10^{-7} см і частотою 1-23 кГц; рецептори знаходяться в суглобах передніх кінцівок.

Мешканець водойм клоп-стародуб знаходить здобич за коливаннями поверхні води амплітудою в 1 мкм і частотою 100-500 Гц; рецептори вібрації знаходяться в кінцівках.

Водомірка-самка знаходить самця по коливаннях води з частотою 20 Гц.

Реакція бджоли на вібрації субстрату, на поверхні якого вона перебуває, відбувається за рахунок органів, розміщених на гомілках передніх кінцівок. Саме ці рецептори використовуються під час спілкування бджіл у замкненому просторі вулика.

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

ЗАСТОСУВАННЯ ЗВУКОВИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ У ВЕТЕРИНАРНІЙ МЕДИЦИНІ

Джерелом звуку є тіло, що коливається. Тіло, що коливається, в навколишньому середовищі створює механічні хвилі, які можуть поширюватися тільки завдяки пружним властивостям середовища, тобто є пружними. Коли такі хвилі досягають вуха людини, вони спричиняють виникнення вимушених коливань барабанної перетинки і людина чує звук. Отже, механічні хвилі, що викликають у людини відчуття звуку, називаються *звуковими*. Оскільки при цьому звукові хвилі поширюються в повітрі, то ці хвилі поздовжні.

Між джерелом і вухом має знаходитись пружне середовище. Дослід показує, що для органу слуху людини звуковими є тільки такі хвилі, в яких коливання відбуваються з частотами від 16 до 20000 Гц. Розмахувати руками 16 і більше разів за секунду ніхто не може, хоч хвиля під час такого розмахування виникає.

Швидкість звуку залежить від температури середовища. Наприклад, у повітрі, якщо його температура 0°С, швидкість звуку 332 м/с, а якщо 15°С – 340м/с. У воді швидкість звуку приблизно у 4,25 рази більша, ніж у повітрі. У твердих тілах вона ще більша, наприклад, при 15°С у сталі – 4980 м/с.

За частотою коливань звукові хвилі класифікують так: інфразвук (0-16 Гц), чутний звук (16-20000 Гц), ультразвук (20000 Гц – 103 МГц), гіперзвук (понад 103МГц).

До інфразвуків відносять механічні коливання і хвилі з частотами нижче 20Гц Нижня межа їх невизначена. Практичний інтерес представляють інфразвуки з частотами в декілька герц і навіть в десяті і соті долі герца.

Ультразвуком прийнято називати пружні коливання і хвилі, частоти яких перевищують частоти звуку, що сприймається людським вухом. Таке визначення склалося історично, проте нижня межа ультразвука, пов'язана з суб'єктивними

відчуттями людини, не може бути чіткою, оскільки деякі люди не можуть чути звуки з частотами в 10 кГц, а є люди, що сприймають частоти в 25 кГц.

Розглянемо, з якими параметрами коливального руху доводиться мати справу при розповсюдженні ультразвука в речовині.

При розповсюдженні ультразвукової хвилі в рідині під час напівперіодів розрідження виникають розтягуючі сили, які можуть привести до розриву рідини в даному місці і утворення бульбашок, заповнених парою цієї рідини. Це явище носить назву *кавітації.*

Сприймані звуки можна розрізняти за гучністю, висотою і тембром. Фізичному поняттю інтенсивності звуку відповідає фізіологічне відчуття гучності звуку. Гучність (сила звуку) залежить від амплітуди коливання але поняття інтенсивності і гучності звуку не рівнозначні.

Висота звуку визначається частотою його коливань.

Реальний звук є накладанням гармонічних коливань з певним набором частот. Набір частот коливань, присутніх в даному звуці, називається *акустичним спектром***.** Цей набір частот додає кожному звуку певне забарвлення або так званий тембр. Тембр – це відтінок складного звуку, яким відрізняються один від одного звуки однакової сили і висоти.

Акустичний спектр може бути:

− суцільний (присутні коливання всіх частот в інтервалі від ν_1 до ν_2);

− лінійчастий (звук складається з коливань дискретних частот ν_1, ν_2, ν_3 і т.д.).

Шуми мають суцільний акустичний спектр. Коливання з лінійчастим спектром викликають відчуття звуку з більш менш певною висотою. Такий звук називається тональним. Щоб викликати відчуття звуку хвиля повинна мати певну мінімальну інтенсивність, яку називають *порогом чутності*. Поріг чутності залежить від частоти звуку і різний для різних людей. Найбільш чутливе вухо до частот від 1000 до 4000Гц. Інтенсивність звуку при цьому є величиною порядку 10^{-12} Вт/м^2.

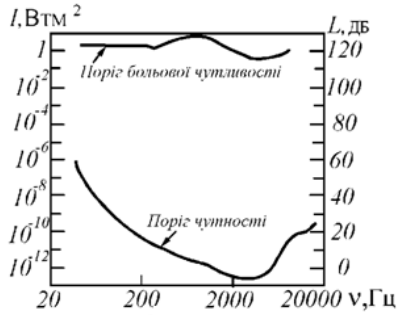


Рис. 13. Поріг больового відчуття

При інтенсивності $1 \div 10$ Вт/м^2 вухо перестає сприймати коливання як звук. Такі коливання спричиняють у ньому відчуття болю і тиску. Це значення інтенсивності називають *порогом больового відчуття*. Поріг больового відчуття також залежить від частоти (рис. 13).

Дослідження останніх років показали, що області чутності у великої рогатої худоби і у курей мало відрізняються від області чутності у людини. Проте у багатьох тварин області чутності значно зрушені управо, тобто убік вищих частот. Так, собаки сприймають звуки з частотами до 30 кГц, комарі і кажани – до 60 кГц і більш.

Голосовий апарат є далеко не у всіх представників тваринного світу, і багато хто з них користується для випускання звуку органами, що несуть інші функціональні навантаження (крила, ноги і т. п.).

Членистоногі. Вони видають звукові сигнали тертям або ударами одних органів об інших (фрикційний або ударний механізм), вібрацією мембран (крил), пропусканням повітря через отвори.

Більшість звуків, що видаються членистоногими, складаються з наступних один за одним імпульсів, що виникають при одноразовому спрацьовуванні відповідного органу, і мають складні акустичні спектри, характерні для шумів. Звуки ці, як правило, високочастотні (не менше 2 кГц) і часто знаходяться в ультразвуковому діапазоні.

Риби. Значну частину звуків риби видають при русі в результаті зриву водяних вихорів з поверхні їх тіла (атлантична риба-жаба видає звук з основним тоном 250 Гц і всього з двома обертонами в 500 і 750 Гц, так що цей звук сприймається як музичний).

Птахи. Звуки дивно різноманітні як по гучності, так і по спектральному складу, проте не всі ці звуки вони видають голосовим апаратом. Багато безголосих птахів володіють «інструментальним» голосом, у випусканні якого беруть участь дзьоб, лапи, крила.

Звуки, що видаються птахами, лежать в основному в діапазоні частот від 200Гц до 12 кГц, проте деякі птахи можуть видавати і ультразвуки до 30 і навіть до 50 кГц.

Ссавці. Основну роль в спілкуванні між ссавцях грають голосові звуки, що створюються верхньою гортанню, що знаходиться у верхній частині трахеї і є хрящовою трубкою відкриту з обох кінців. Повітря з легенів або безперешкодно проходить голосовий тракт, або приводить у вимушені коливання голосові зв'язки, що розташовані у верхній частині гортані і складаються з переплетених м'язових волокон. Потік повітря викликає їх вібрацію, утворюючи явні звуки. Роль резонатора виконують горлові мішки, ротова і носова порожнини і навіть легені.

Звуки ссавців надзвичайно різноманітні, знаходячись в діапазоні частот від декількох герц до сотень кГц (у кажанів).

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В СЛУХОВОМУ АНАЛІЗАТОРІ ССАВЦІВ

Слуховий аналізатор ссавців складається із зовнішнього, середнього і внутрішнього вух, пов'язаних з центральною слуховою нервовою системою.

Зовнішнє вухо тварини складається з *вушної раковини* (звуковловлювача) і *слухового проходу.* Вушна раковина служить рупором, що спрямовує звукові коливання в слуховий прохід. У багатьох тварин (коней, кіз тощо) вушні раковини рухливі; за скорочення м'язів тварина обертає вушні раковини відносно поздовжньої осі, нахиляє їх уперед, назад, убік з тим, щоб спрямувати раковини у бік розташування джерел звуку і забезпечити краще їх сприймання.

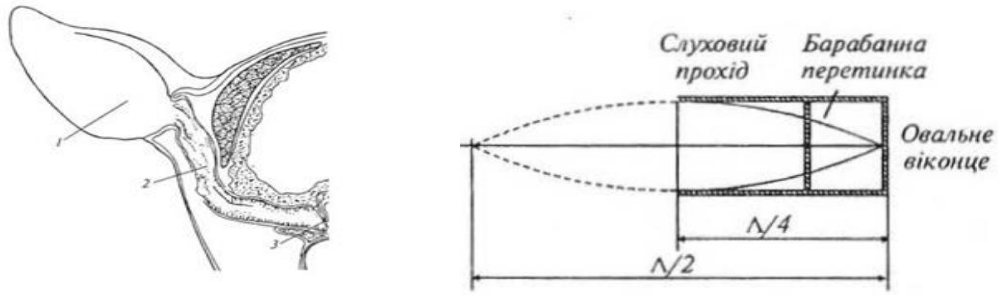


Рис. 14. Формування стоячої хвилі у просторі створеному слуховим проходом і середнім вухом: 1 - вушна раковина; 2 - слуховий прохід; 3 - барабанна перетинка

Функції зовнішнього вуха полягають в оптимізації та підсиленні найважливіших звукових частот, що має сенс з точки зору комунікації тварин між собою та їх виживання.

У просторі, створеному слуховим проходом і середнім вухом, формується стояча хвиля (рис. 14). При рівності довжини цього простору чверті довжини хвилі звуку має місце *резонанс* — відносно великий селективний (вибірний) відгук коливальної системи на періодичний вплив з частотою, близькою до частоти її власних коливань. Під час резонансу відбувається різке зростання амплітуди вимушених коливань системи. Максимальна чутливість слухового аналізатора проявляється саме до резонансних частот.

Середнє вухо тварини, відокремлене від зовнішнього *барабанною перетинкою,* складається з *барабанної порожнини, слухових кісточок (молоточка, коваделка* і *стремінця)* та *слухової труби.* Функції середнього вуха обмежуються передачею звукових коливань від зовнішнього середовища до ендолімфи, підсиленням слабких звукових сигналів і забезпеченням безпечного приймання інтенсивних сигналів. Процес підсилення реалізується за збільшення тиску, що пов'язано з відмінністю площі барабанної перетинки і *овального віконця,* яке зв'язане із стремінцем і відокремлює середнє вухо від внутрішнього; виграш у тиску становить близько 20÷25 разів. Крім того, кісточковий апарат виконує функції важеля, що забезпечує виграш у силі приблизно в 2,5 раза (рис. 15). Загальний рівень підсилення звукових коливань середнім вухом становить, таким чином, близько 50÷60 разів.

Внутрішнє вухо складається з трьох спіральних каналів— вестибулярного, середнього і барабанного, причому середній канал відмежований від вестибулярного *мембраною Рейсснера,* а від барабанного – *базилярною мембраною.*

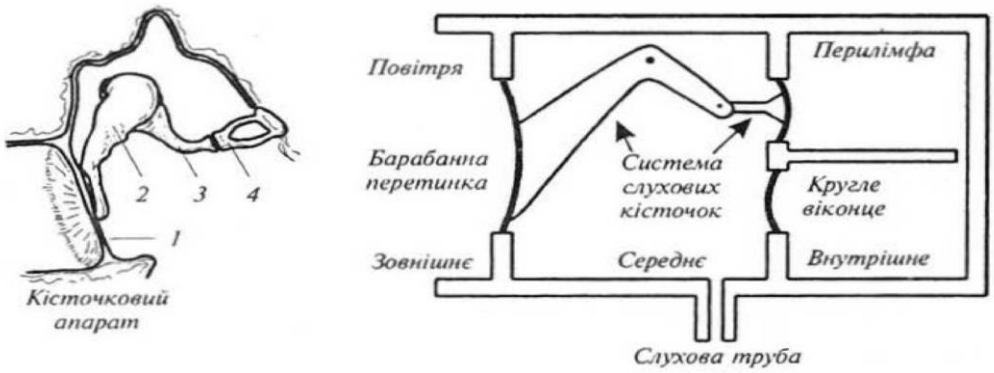


Рис. 15. Кісточковий апарат середнього вуха та модель, що пояснює функціонування середнього вуха: 1 - барабанна перетинка; 2 - молоточок; 3 - коваделко; 4 - стремінець.

На проксимальному кінці (що міститься ближче до осі тіла) барабанного каналу знаходиться ***к***ругле віконце, що виконує функції демпфера, Акусторецепторами є волоскові клітини зв'язані з базилярною мембраною; ці клітини оснащені війками (рис.16).

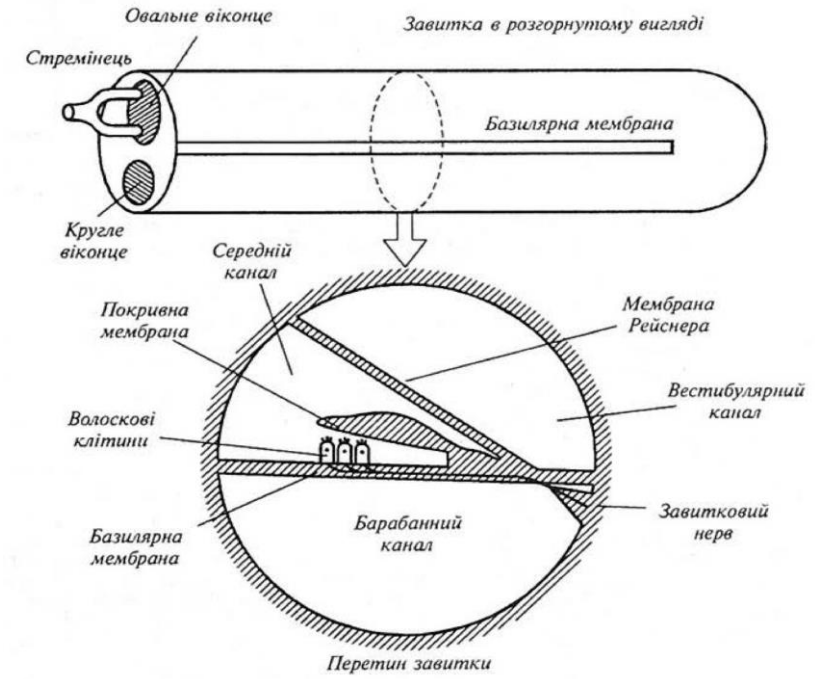


Рис. 16. Напрямок вектора, що відповідає електричній осі серця в нормі (а), зміщеного відносно анатомічної осі (б) і за патології (в)

Базилярна і покривна мембрани, волоскові клітини, з'єднані з нервовими волокнами, утворюють кортіїв орган. Функції внутрішнього вуха полягають у частотному аналізі звукових сигналів. Згідно з сучасними уявленнями, коливання, збуджені стремінцем в овальному віконці, викликають хвильові рухи базилярної мембрани у вигляді біжучої хвилі.

Розташування максимуму біжучої хвилі залежить від частоти звукового сигналу — низькі частоти стимулюють верхівкові ділянки мембрани, тоді як високі — основу мембрани (рис. 17).

Зміщення базилярної мембрани передаються волосковим клітинам, над якими розміщена покривна мембрана.

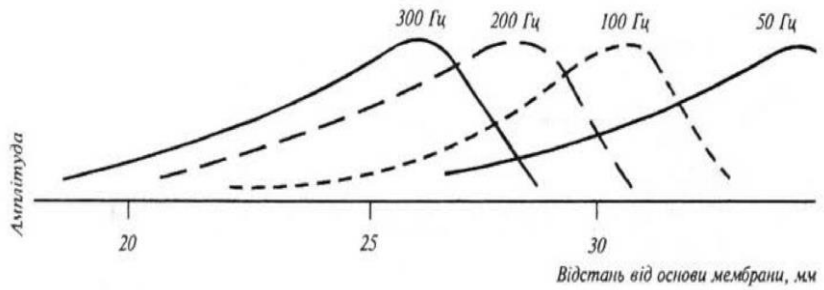


Рис.17. Залежність розміщення максимуму біжучої хвилі від частоти звукового сигналу

За деформації базилярної мембрани покривна мембрана також починає рухатися, але за різних систем закріплення обох мембран (дві точки опори у базилярній мембрані і одна — у покривній) на війки волоскових клітин діє з боку покрив¬ної мембрани сила зміщення (рис. 18); вигин війок приводить до збудження

зв'язаних з волосковими клітинами волокон слухового нерва. Автору теорії біжучої хвилі Георгу фон Бекеші було присуджено в 1961 р. Нобелівську премію.

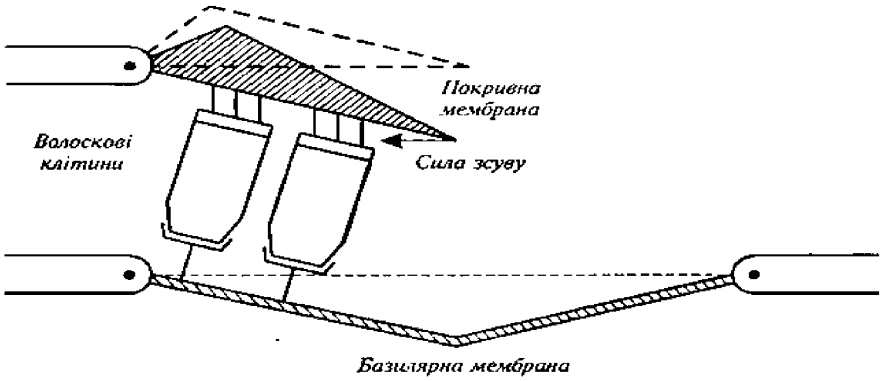


Рис.18. Виникнення сили зсуву, що діє на волоскові клітини завдяки руху покривної та базилярної мембран

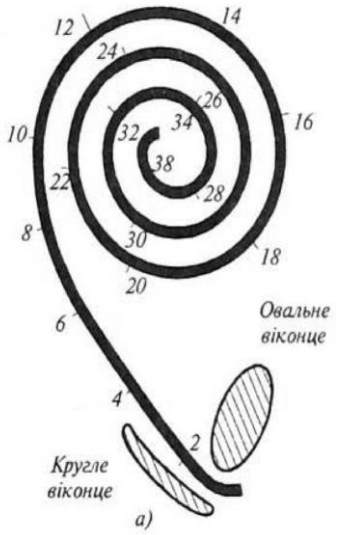


Рис. 19. Структура завитки корови; залежність положення максимуму біжучої хвилі від частоти звукового сигналу

Таким чином, звукова хвиля зумовлює коливання базилярної мембрани з амплітудою, локалізованою в певних ділянках мембрани. При цьому відбувається локалізоване збудження волоскових клітин кортієвого органу залежно від частоти звукового сигналу.

Визначення місця джерела звуку базується на здатності тварини сприймати різницю фаз та інтенсивність звукових хвиль, що досягають лівого та правого вух. Явище визначення напрямку звідки надходить звук, тваринами, називають *бінауральним ефектом.* Внутрішнє вухо різних тварин характеризується певними морфологічними особливостями. Структуру завитки корови наведено на рис. 19 – загальна довжина її становить 38 мм, причому сама завитка скручена в 3,5 оберти. Реакція завитки корови починається з 50 Гц

АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ У ПТИЦІ

Слух відіграє значну роль у повсякденному житті птахів під час їх відпочинку або насиджування. Крім того, слух виконує важливі функції у процесі комунікації на довгих відстанях, у місцях з обмеженою видимістю. Особливий інтерес становлять співучі птахи у зв'язку зі складністю їх акустичних комунікаційних систем. Птахам, що ведуть нічний спосіб життя (наприклад, совам), властива надзвичайно висока слухова чутливість; у той же час комунікаційний репертуар їх відносно примітивний.

Слуховий апарат птиці характеризується певними відмінностями від слухового аналізатора ссавців. Зовнішнє вухо має короткий широкий і складний за рельєфом слуховий канал, що веде до барабанної перетинки. У багатьох птахів зовнішня частина слухового каналу оточена спеціальним пір'ям, що утворює своєрідне заглиблення, що виконує функції ефективного звукового колектора. Особливо розвинені такі заглиблення параболічної форми у сов. Середнє вухо складається з

довгої тонкої кістки, що з'єднує барабанну перетинку з овальним віконцем. Внутрішнє вухо складається з короткої вигнутої завитки, довжина якої становить 4÷10мм. Завитка курчати має довжину близько 5 мм. Залежність положення максимуму біжучої хвилі від частоти звукового сигналу наведено на рис. 19. Реакція завитки починається з 100 Гц.

Птахи здатні відрізняти амплітудно та частотно модульовані акустичні сигнали. Так, канарка в змозі розрізняти рівні інтенсивності звуку у 1,5дБ, тоді як голуб – у 3 дБ. Дивує здатність птахів реагувати на незначні зміни частоти акустичних сигналів: частоти, з якими починають і закінчують своє акустичне спілкування птахи, становлять приблизно 10 Гц в області 500 Гц та близько 20 Гц в області 1÷2 кГц.

АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ У РИБ

Згідно із загальноприйнятими поглядами, слухову функцію несе орган рівноваги – лабирінт, зокрема його нижня частина (Lagena та Sacculus). Основним акусторецептором риб є отолітовий орган, що складається з отолітів і волоскових клітин (рис. 20). Звукові хвилі проходять через тіло риби з невеликим опором і викликають рух волоскових клітин. Оскільки отоліти мають більшу густину, ніж вода і тканини риби, реакція отолітів і волоскових клітин на звукові коливання відрізняється. Через різницю рухів отолітів і волоскових клітин відбувається деформація останніх, що надсилає в мозок інформацію щодо навколишньої звукової ситуації.

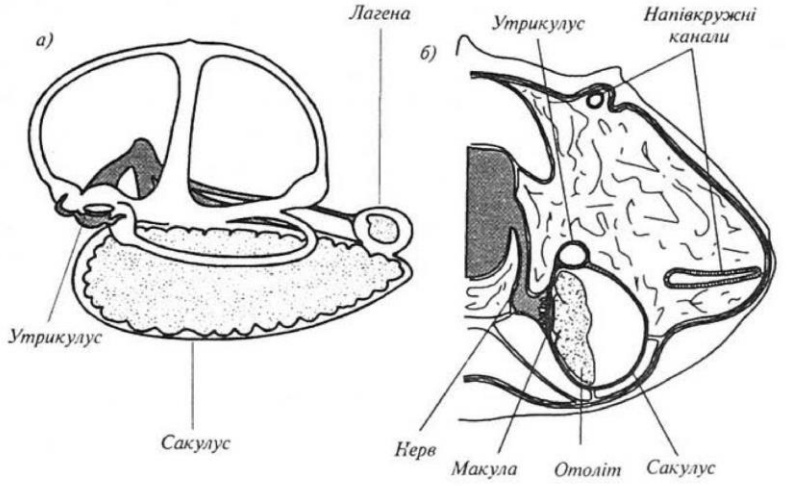


Рис. 20. Акусторецептор у риб:
а) система трьох ортогональних каналів;
б) переріз черепа на рівні переднього сакулуса

Розрізняють два типи слухових аналізаторів у риб — пов'язаних і не пов'язаних із плавальним міхуром. Так, у кісткових риб плавальний міхур відзначається багатофункціональністю — за допомогою його риба відчуває гідростатичний тиск, підтримує рівновагу, утворює звуки, дихає, Плавальний міхур здатний розширюватися і скорочуватися у відповідь на звукові хвилі і передавати звукову інформацію через модифіковані хребці (чотири пари рухливо поєднаних кісточок) внутрішньому вуху (рис. 21).

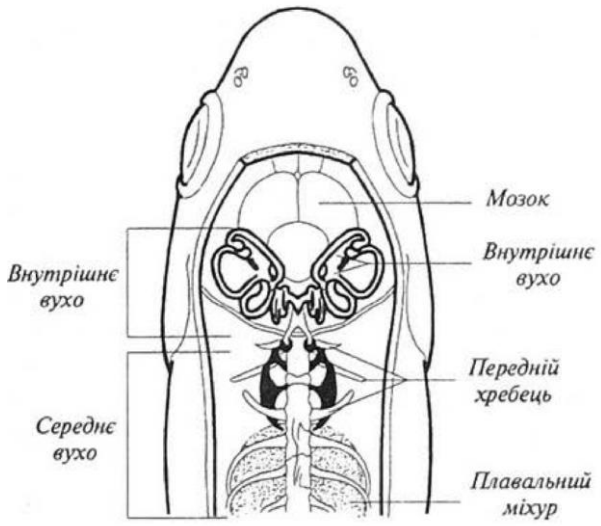


Рис. 21. Акусторецептор у кісткових риб

Така кісточкова система отримала назву *Веберова апарату*. Плавальний міхур виконує функцію своєрідного резонатора, настроєного на звукові сигнали певної частоти, що забезпечує їх підсилення. Риби, які не мають плавального міхура, використовують для перетворення звукових коливань у механічні повітряні порожнини, зв'язані з внутрішнім вухом. Важливу роль у сприйнятті звуку відіграє сейсмосенсорна система з точки зору аналізу акустичної ситуації поблизу джерела звуку і рецепції зміщення частинок води.

Спектр сприймання звукових частот, чутливість до звукових коливань, здатність розпізнавати звукові тони відрізняються у різних видів риб. У цілому можна говорити про нижню межу 16÷100 Гц та верхню 488÷8000 Гц. У цьому діапазоні здатність сприймати більш високі (4000÷8000 Гц) звукові частоти належить рибам, які мають плавальний міхур і апарат Вебера; їм же властива й вища абсолютна чутливість слуху (-70 дБ) порівняно з рибами, що позбавлені плавального міхура (0÷50 дБ).

АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ У БДЖІЛ

Бджоли здатні реагувати на коливання частинок повітря завдяки чутливим органам *sensilla scolopophora*, розташованими в антенах та у верхніх частинах гомілок кінцівок. Під впливом звуку волоскові сенсили починають згинатися; кут згину залежить від частоти та інтенсивності звуку. У відповідь на звукові сигнали акусторецептори генерують електричні імпульси; кількість цих імпульсів і тривалість інтервалів між ними визначаються структурою акустичних стимулів. Впливає на кількість імпульсів і температура. Система акусторецепторів забезпечує бджолам бінауральний слух, тобто здатність визначати напрям до джерела звуку.

ВПЛИВ АКУСТИЧНИХ СТИМУЛІВ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

Механічні ефекти зумовлюються періодичними коливаннями частинок середовища з частотою ультразвукової хвилі. Амплітуда коливань пропорційна кореню квадратному з інтенсивності ультразвукового випромінювання. Загальні коливання макромолекулярних чи мембранних структур можуть спричинити їх утому або пошкодження.

Найзначнішим механічним фактором, що індукується ультразвуковим випромінюванням, є сили зсуву та ударні хвилі. Ультразвукова хвиля, що поширюється в рідині, викликає періодичні стискування і розрідження, які можуть призвести до розриву рідини та утворення бульбашок, заповнених парою цієї рідини. Це явище називається *кавітацією.*

Ще один механічний фактор, що зумовлюється ультразвуковим випромінюванням, пов'язаний з виникненням локальних тисків. Цей ефект особливо помітний під час відбивання ультразвукової хвилі від будь-яких структур і утворення стоячої хвилі, яка призводить до порушення функціонування певних ділянок організму.

Теплові ефекти пов'язані з процесом поглинання тканиною ультразвукового випромінювання, внаслідок чого частина енергії передається тканині. Поглинута енергія перетворюється у теплоту і сприяє підвищенню температури тканини. Внаслідок кавітації в середовищі утворюються порожнини, які поглинають енергію ультразвукового випромінювання. Ця енергія частково (≈10%) перевипромінюється, тоді як більша її частина перетворюється в теплоту, ударні хвилі або гід-

родинамічні зсуви. Кавітація може бути «стабільною» під впливом помірної ультразвукової інтенсивності, або «обвалювальною», що носить вибуховий характер. Доведено, що останній тип кавітації супроводжується підвищенням температури усередині порожнини до кількох тисяч градусів. Такі високі температури спричинюють розрив ковалентних зв'язків у молекулах води та утворення вільних радикалів, які характеризуються значною реактивністю.

Таким чином, підвищення температури тканини внаслідок впливу ультразвукового випромінювання визначається деякими факторами, а саме: поглинанням тканини, її розмірами, інтенсивністю, частотою та тривалістю дії ультразвукового випромінювання.

Фізико-хімічні ефекти зумовлені зміною проникності біологічних мембран і дифузійних процесів. Під впливом ультразвукових коливань у біологічних тканинах можливі зміни концентрації водневих іонів; встановлено вплив ультразвуку на високомолекулярні сполуки: ферменти, гормони, вітаміни. Ультразвук сприяє вивільненню з органів і тканин біологічно активних речовин.

Акустичні сигнали штучного походження, що імітують крик упійманого птаха, використовують для відлякування диких птахів, які знищують значну кількість урожаю – до 70 % рису в Африці, до 25 % білих та до 50 % чорних сортів винограду в Середній Азії. Крім того, утворення акустичних сигналів у ґрунті дає можливість відлякувати кротів у певному ареалі.

УЛЬТРАЗВУК У ТВАРИННОМУ СВІТІ

Кажани здатні випромінювати ультразвукові коливання у вигляді коротких імпульсів; частота коливань варіює від 14 до 100 кГц. У процесі пошуку здобичі кажани генерують ультразвук з частотою 10-20 імпульсів/с; після виявлення жертви частота збільшується до 200 імпульсів/с. Причому, під час генерації ультразвуку вуха тваринки закриваються; після припинення сигналу вуха відкриваються і кажан здатний сприймати відбитий від об'єкта полювання сигнал та ідентифікувати його розміри, форму та текстуру. Ехолокація використовується кажанами та деякими птахами (гуахаро *Steatornis caripensis,* стрижами з роду *Aerodramus),* що мешкають у затемнених печерах, для навігації.

Дельфіни, морські свинки, кити використовують високочастотні звукові та ультразвукові коливання для біокомунікації у каламутному або непрозорому середовищі.

ВПЛИВ ІНФРАЗВУКУ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

Биття серця, коливання легень, робота кишечника, вібрації голосових зв'язок – усе це супроводжується генерацією інфразвуку. У природі джерелами інфразвуку є рослини і дерева, що коливаються, мікросейсмічні коливання земної поверхні, землетруси, урагани, вулканічні виверження, шторми, грозові розряди. В індустріалізованому суспільстві до джерел інфразвуку слід віднести автомобільні, корабельні, авіаційні та ракетні двигуни, сільськогосподарські механізми. Інфразвукові коливання з рівнем інтенсивності <120 дБ вважаються помірними, більше – інтенсивними.

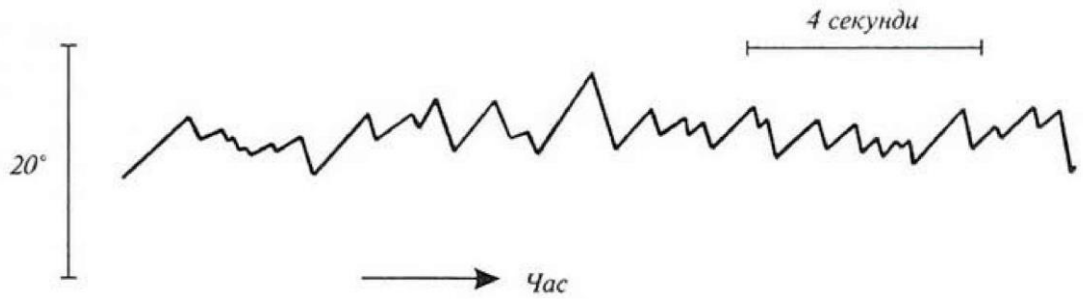


Рис. 22. Результати реєстрації ністагму через вимірювання корнеально-ретинового потенціалу

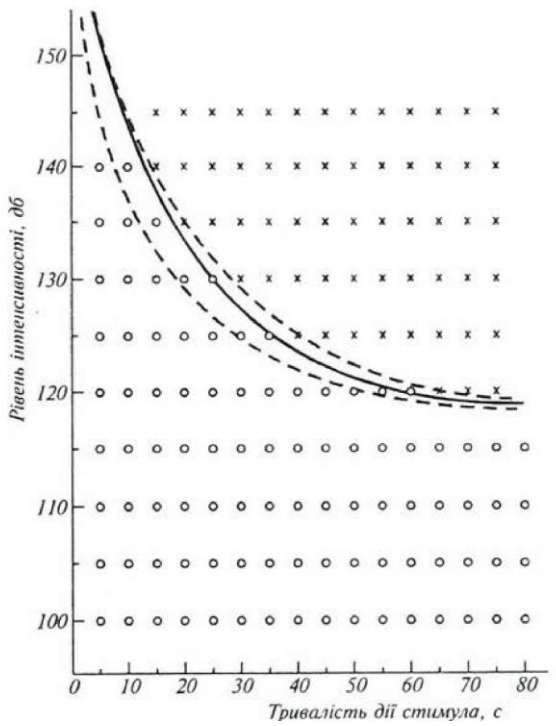


Рис. 23. Залежність ністагматичної реакції організму від інтенсивності інфразвукового стимулу і тривалості дії його на організм

Основним наслідком дії інфразвуку на живий організм є порушення органів балансу, а саме функцій вестибулярного апарату. Для дослідження впливу інфразвуку на людину або тварину використовували спеціальні генератори та гучномовці, що працювали в діапазоні 1 – 200 Гц з рівнем інтенсивності до 146 дБ. Оцінку впливу інфразвуку здійснювали шляхом реєстрації характеру і степеня мимовільного ритмічного тремтіння одночасно обох очей, яблука яких оберталися у протилежних напрямках з частотою 0,7 –1,5 $с^{-1}$ Це тремтіння під назвою *ністагм* свідчить про порушення вестибулярного апарату.

Реєстрацію ністагму здійснюють через вимірювання корнеально-ретинового потенціалу (рис. 22); техніка вимірювання цього потенціалу називається *електроністагмографією.*

Ністагматична реакція організму залежить від інтенсивності інфразвукового стимулу і тривалості дії його на організм (рис. 23), а також від частоти інфразвукових коливань (рис. 24), Можливим механізмом впливу інфразвуку на живі організми слід вважати зміщення перилімфи — рідини, що заповнює внутрішнє вухо, за періодичних змін тиску, що передаються цій рідині через овальне віконце. В свою чергу, зміщення перилімфи призводять до деформації волоскових клітин. Психологічний вплив інфразвуку пов'язаний з такими наслідками як сонливість, летаргія, почуття жаху або боязні.

Інфразвук значної інтенсивності здатний зумовлювати зміни слухової чутливості, реакцію барабанної перетинки, болісні відчуття, утруднення мовлення і модуляції голосу, порушення респіраторної активності, зміни α- ритмів мозку.

ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ У ВЕТЕРИНАРНІЙ МЕДИЦИНІ

Ультразвукова діагностика. В основі ультразвукового зондування лежить генерування ультразвукових хвиль п'єзоелектричним перетворювачем, що перебуває у контакті з тілом пацієнта, і реєстрація відбитих від різних органів ультразвукових хвиль. Дія п'єзоелектричного перетворювача ґрунтується на використанні *прямого п'єзоелектричного ефекту,* деякі кристалічні речовини здатні під час стиску або розтягу утворювати на протилежних поверхнях електричні заряди. Якщо під впливом електричного поля, прикладеного до кристалу, останній відчуває механічні деформації, йдеться про *зворотний п'єзоелектричний ефект.*

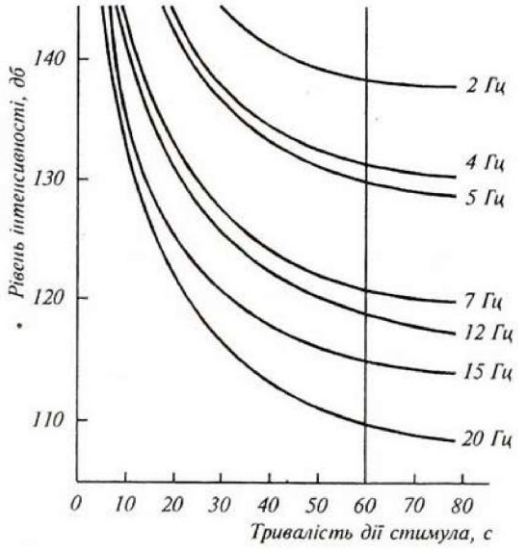


Рис. 24. Залежність пістагматиниої реакції організму від частоти інфразвукових коливань

Типовий п'єзоелектричний перетворювач являє собою диск (наприклад, з титанату барію) діаметром 1–1,5 см і завтовшки 0,1–0,2мм. Інтенсивності ультразвуку, що використовуються в терапевтичній практиці, змінюються від 80 Вт·см$^{-2}$ для частоти 1 МГц до 20 Вт·см$^{-2}$ для частоти 5 МГц. Для запобігання тепловому нагріванню і руйнуванню тканини використовують імпульсний режим роботи. Якщо при цьому кількість імпульсів F, а тривалість одного імпульсу t, то повний час і взаємодії ультразвукової хвилі з тканиною становить: $t = Ft_i$

Параметри ультразвукового генератора, що працює в імпульсному режимі, такі: частота коливань лежить в мегагерцовій області, тривалість імпульсу становить кілька мікросекунд, а частота посилань — сотні герц. Звуковий імпульс, створений генератором, проходить подвій ну відстань *d* від генератора до об'єкта зі швидкістю *υ* за проміжок часу Всі ці параметри пов'язані співвідношенням:

$$\upsilon = \frac{2d}{t}$$

Ультразвукові хвилі проникають у тіло і відбиваються від меж тканин внутрішніх органів. Тканини, що мають більші значення хвильового опору, відбивають сильніше. Відбитий сигнал реєструють тим самим або окремим перетворювачем. Принцип дії ультразвукового зондування наведено на рис. 25.

Всі діагностичні ультразвукові прилади можна поділити на два основних типи — ті, що створюють зображення об'єкта, і ті, що використовують допплерівський ефект. До першого типу можна віднести ультразвукове зондування при діагностиці серця. Хоча серце перебуває в безперервному русі, цей рух дуже повільний порівняно зі швидкістю поширення ультразвукових імпульсів та реакції системи реєстрації. Техніка дослідження діяльності серця за допомогою ультразвукового зондування називається *ехокардіографією.*

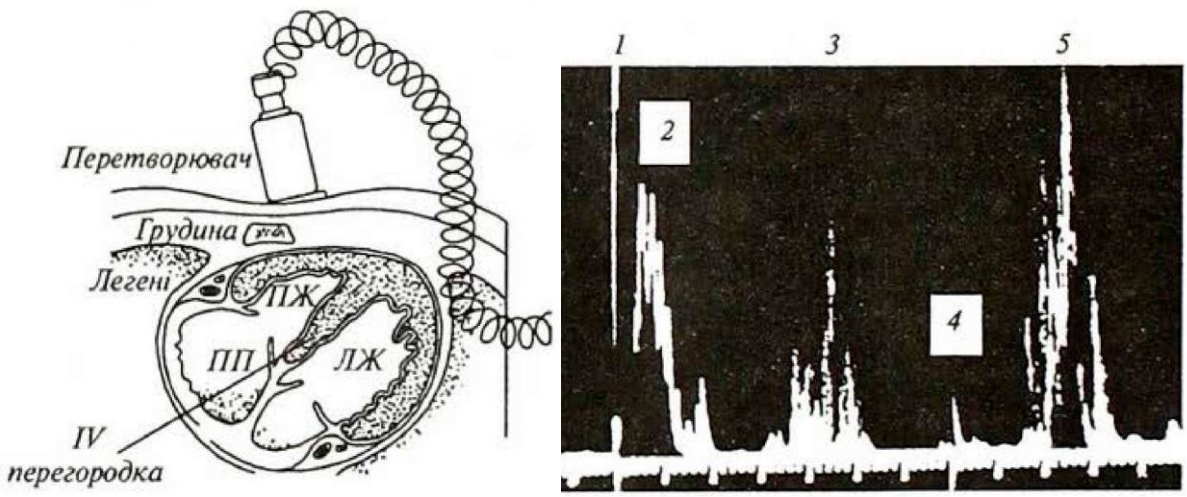


Рис. 25. Принцип ультразвукового зондування: 1 - положення перетворювача; 2 - луна від передньої стінки; 3 - луна від IV перегородки; 4 - луна від мітрального клапана; 5 - луна від задньої стінки

Якщо потрібно створити зображення будь-якої ділянки тіла пацієнта, використовують ультразвукове сканування. Для цього застосовують набір ультразвукових перетворювачів (кількість їх може досягати 100), на які послідовно подають електричні сигнали. Таким чином утворюється ультразвуковий промінь, що рухається в тому чи іншому напрямку. Таке послідовне зондування тіла на основі скануючого ультразвукового променя, який переміщується під різними кутами, дає можливість одержувати інформацію про різні зрізи досліджуваного тіла. Метод отримав назву *ультразвукова томографія.*

Доплерівська ультразвукова спектроскопія дає можливість визначати швидкість руху потоків крові в судинах, контролювати роботу серця плоду тощо.

Ультразвукова терапія. Ультразвукова терапія базується на застосуванні ультразвуку з частотою 500-3000 Гц з метою механічного, термічного та фізико-хімічного впливів на клітини і тканини, активізації обмінних, імунних та інших процесів. До перспективних застосувань ультразвукової терапії можна віднести: розпилення лікарських препаратів, вплив на біологічно активні точки, ультразвукову автогемотерапію (лікування власною кров'ю), гемоліз (руйнування) еритроцитів, руйнівний вплив на мікроорганізми.

Ультразвукова хірургія. Сфокусоване ультразвукове випромінювання використовують для руйнування пухлин, зварювання кісток, операцій над структурами мозку тощо. Механізми хірургічної дії зумовлені кавітацією і нагріванням. Можливе поєднання хірургічних інструментів з ультразвуковими вібраторами. Ультразвукова хірургія дозволяє руйнувати камінці в нирках, видаляти пухлини в мозку, розсікати тканини, зварювати кістки, лікувати катаракту. Треба відмітити можливість поєднання хірургічних та стоматологічних інструментів з ультразвуковими перетворювачами з метою послаблення зусиль різання, зменшення болісних відчуттів.

До основних напрямків застосування ультразвуку у тваринництві слід віднести обробку сперми ультразвуком з метою підвищення її активності під час кріоконсервації; стимулювання молочної залози; визначення товщини жирової та м'язової тканин; знищення мікрофлори на поверхні яєць перед інкубацією; обробку

кормів і підвищення харчової цінності кормової сировини; визначення вмісту жиру і білка в молоці; гомогенізацію молока.

Використання ультразвуку у зооінженерії

До основних напрямів практичного використання ультразвукових коливань у зооінженерії належать діагностика вагітності тварин на ранніх стадіях; оцінка міцності кісток; обробка сперми ультразвуком для підвищення її активності під час кріоконсервації; стимулювання молочної залози; визначення товщини жирової та м'язової тканин; знищення мікрофлори на поверхні яєць перед інкубацією; обробка кормів і підвищення харчової цінності кормової сировини; визначення вмісту жиру і білка в молоці; гомогенізація молока (надання йому однорідної структури).

ОСНОВИ ГЕМОДИНАМІКИ

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

СКЛАД КРОВІ

Кров постачає кожній клітині воду, кисень, поживні речовини, гормони, а також одержує залишки продуктів метаболізму та передає їх органам виділення. Крім того, кров бере участь у регуляції температури організму - вона переносить тепло, що утворюється внаслідок життєдіяльності організму, від внутрішніх структур до поверхні тіла.

Кров - це непрозора в'язка суспензія, що складається із рідкої частини - *плазми* і завислих у ній кров'яних клітин, які називаються *форменими елементами* крові. Формені елементи крові складаються з еритроцитів, лейкоцитів і тромбоцитів. *Плазма* крові – рідка частина крові, яка складається з розчинених у воді солей, вуглеводів, білків і біологічно активних сполук.

Густина цільної крові коливається в межах $(1{,}035 \div 1{,}055) \cdot 10^3$ кг/м^3; густина плазми становить $(1{,}025 \div 1{,}034) \cdot 10^3$ кг/м^3; еритроцитів $(1{,}08 \div 1{,}09) \cdot 10^3$ кг/м^3. В'язкість крові дорівнює $(4 \div 5) \cdot 10^{-3}$ Па·с, а плазми – $1{,}7 \cdot 10^{-3}$ Па·с за температури 20 °С; в'язкість крові та плазми залежить від *показника гематокриту* (об'ємного співвідношення формених елементів крові і плазми) та температури.

Основні показники крові тварин наведено в таблиці 4.

Таблиця 4.

Показники крові сільськогосподарських тварин

Показник еритроцитів	Кінь	Велика рогата худоба	Вівця	Свиня	Курка	Кріль
Кількість еритроцитів, млн·мм$^{-3}$	6-9	5-7,5	7-12	6-7,5	3-4	5-7,5
Діаметр, мкм	4,0-8,0	4,5-8,0	3,2-6,0	4,0-8,0	9,8	6,0
Середній діаметр, мкм	5,5-5,8	5,8	4,5	6,0		
Швидкість осідання еритроцитів, мм (через 1 годину)	64	0,7	0,6	8,0	4,0	1.5
Показник гематокриту Н,%	39	36	32	42	37	40

СИСТЕМА КРОВООБІГУ ТВАРИН. РУХ КРОВІ ПО СУДИНАХ

Кровоносна система тварин складається з сукупності судин різного діаметра, що утворюють замкнене коло. Типові параметри кровоносних судин наведено у табл. 5.

Таблиця 5.

Основні параметри кровоносних судин

Тип кровоносної судини	Кількість, тис.	Діаметр, мм	Площа, $м^2$	Лінійна швидкість руху крові, $м \cdot с^{-1}$
Аорта		10,5	$86 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-2}$
Кінцеві артерії	1,8	0,60	$28 \cdot 10^{-8}$	$< 10 \cdot 10^{-2}$
Артеріоли	$4 \cdot 10^{4}$	0,02	$31 \cdot 10^{-11}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$
Капіляри	$7 \cdot 10^{6}$	0,008	$50 \cdot 10^{-12}$	$< 0,1 \cdot 10^{-2}$
Венули	$8 \cdot 10^{4}$	0,03	$70 \cdot 10^{-11}$	$< 0,3 \cdot 10^{-2}$
Кінцеві жилки	1.8	1,5	$1,75 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Вени	-	12,5	$12,2 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-2}$

ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОСІДАННЯ ЕРИТРОЦИТІВ

Основну масу формених елементів крові становлять *еритроцити* – червоні кров'яні тільця. Еритроцити містять гемоглобін – складний білок, що переносить кисень від легень до тканин та вуглекислий газ від тканин до органів дихання. Завдяки гемоглобіну колір еритроцитів червоний. Еритроцити ссавців мають форму двоввігнутого диска така форма забезпечує максимальну площу поверхні за даного об'єму, що важливо з точки зору оптимального обміну киснем з довкіллям. Кількість еритроцитів у крові становить $2 \div 3 \cdot 10^{13}$ для дорослої людини та $5 \div 9 \cdot 10^{13}$ для свійської тварини; типовий діаметр диска еритроцита варіює в межах 6÷8 мкм у людини та 4÷8 мкм у тварин.

У кровоносних судинах еритроцити рухаються радіально-кільцевим способом; орієнтацію еритроцитів відносно перетину судини наведено на рис. 26. Крива розподілу швидкостей руху еритроцитів відрізняється більш плоским профілем у центрі судини і крутішим біля стінок. Під час руху у зсувному потоці еритроцити перевертаються; у цьому разі, залежно від швидкості зсуву, вони можуть зазнавати деформації, набуваючи овальної чи поздовжної форми за рахунок зіткнень між собою та зі стінками.

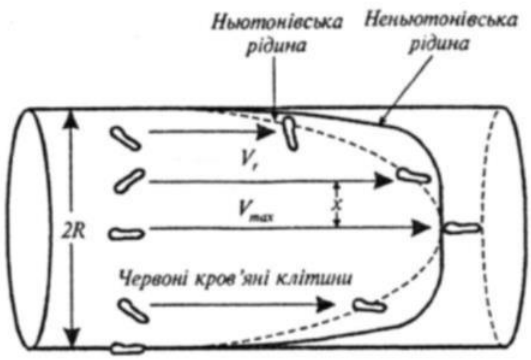


Рис. 26. Орієнтація еритроцитів відносно перерізу судини

Швидкість осідання еритроцитів (ШОЕ) у разі наближення їх до сферичної форми (табл. 6) визначається за формулою

$$v = \frac{Vg(\rho - \rho_0)}{6\eta r} = \frac{4/3\,\pi r^3(\rho - \rho_0)}{6\eta r} = \frac{2/9\,g(\rho - \rho_0)r^2}{\eta}$$

де r— радіус сфери; ρ— густина еритроцита; ρ_0 — густина плазми; η— в'язкість плазми.

Таблиця 6.

Результати приведення еритроцитів до сферичної форми

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

Типові значення ШОЕ становлять 15-20 мм/год для чоловіків, 20-30 мм/год для жінок та 2-13 мм/год для дітей.

Швидкість осідання еритроцитів v пов'язана із в'язкістю крові η залежністю

$$v \approx \frac{1}{\eta}$$

Коефіцієнт в'язкості рідини у свою чергу залежить від температури:

$$\eta = a \cdot e^{\frac{b}{T}}$$

де a і b - константи; T - абсолютна температура.

Отже, швидкість осідання еритроцитів у в'язкій рідині (крові) також залежить від температури:

$$v = a \cdot e^{bT}$$

Зміна швидкості осідання частинок під час зміни температури визначається з виразу:

$$\ln v_2 - \ln v_1 = b\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

Вимірювання ШОЕ дає можливість оцінити процеси, що спричинюють підвищення температури організму. Якщо температура тіла збільшується, в'язкість зменшується, а швидкість осідання еритроцитів збільшується. Збільшення швидкості осідання еритроцитів зумовлюється запальними процесами, гострими інфекційними хворобами, хронічними локалізованими інфекціями (абсцесами), травмами, злоякісними пухлинами, станом вагітності. Особливо процедура вимірювання ШОЕ доцільна у разі таких захворювань, як темпоральний артрит, коли значення ШОЕ досягають 100 мм/год.

СЕРЦЕ ЯК МЕХАНІЧНА СИСТЕМА. РОБОТА СЕРЦЯ

Серце здійснює роботу, щоб забезпечити необхідний тиск в кровоносній системі. Використовуємо рівняння Бернуллі для оцінки роботи серця. На рис. 26 наведено систему вимірювання тисків у лівій частині серця. Робота, що виконується серцем, витрачається на підняття рівня крові, збільшення швидкості її руху та підвищення тиску крові для подолання сил опору в еластичних судинах.

Повна робота, виконувана серцем при перенесенні 1 см^3 крові, залежить від зміни (рис. 27): висоти $m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$ тиску $\left(\frac{m}{\rho}\right) \cdot (p_2 - p_1)$ та швидкості течії крові $\frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(v_2^2 - v_1^2\right)$ тобто: $A = A_1 + A_2 + A_3$

$$A = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + \left(\frac{m}{\rho}\right) \cdot (p_2 - p_1) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(v_2^2 - v_1^2\right)$$

Припустимо, що різниця висот між шлуночком і артеріальною дугою дорівнює 0,15 м, швидкість руху крові на цій ділянці становить 0,4м·с$^{-1}$, а густина – 10^3 кг·м$^{-3}$. Початкова швидкість до систоли (скорочення м'язів серця) дорівнює нулю. Зазначимо, що артеріальний тиск у здорової людини змінюється від 80 мм рт. ст, (діастола – розширення порожнин серця та їх наповнення кров'ю) до 120 мм рт. ст. (систола – скорочення м'язів серця після розслаблення, що супроводжується нагнітанням крові в артеріальну систему). Однак мінімальний тиск, що встановлюється в артеріях, призводить до закриття аортального клапана, коли тиск дорівнює нулю. Отже, різниця тисків становить

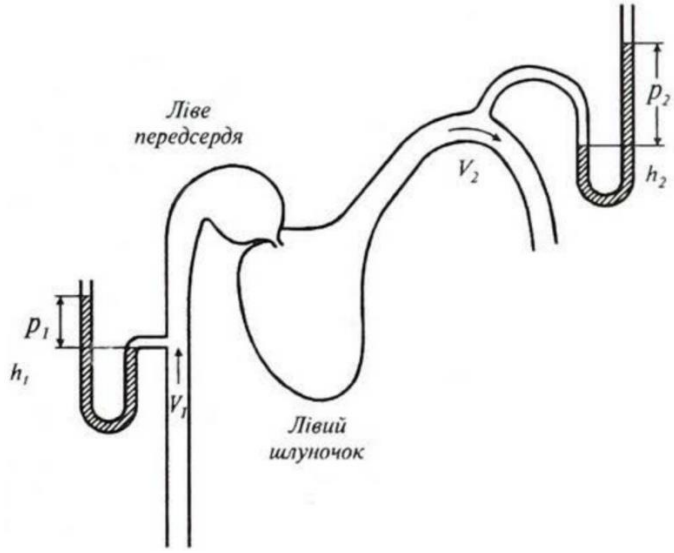


Рис. 27. Схема лівої частини серця: υ_1, p_1, h_1 – швидкість руху, тиск і висота знаходження крові, що входять у серце; υ_2, p_2, h_2 – ті самі величини для крові, що залишає серце

$$\Delta p = (120 \text{ мм.рт.ст.} - 0) = 1{,}6 \cdot 10^4 \text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$$

Таким чином повна робота, що виконується серцем для перенесення 1см^3 крові, дорівнює:

$$A = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(v_2^2 - v_1^2\right) + m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + \left(\frac{m}{\rho}\right) \cdot (p_2 - p_1)$$

$$A = \frac{1}{2} \cdot 10^{-3} кг \cdot \left(0{,}4 м \cdot с^{-1}\right)^2 + 10^{-3} \cdot 9{,}8 м \cdot с^{-2} \cdot 0{,}15 м + \left(10^{-3} кг\right)\left(1{,}6 \cdot 10^4 Н \cdot м^{-2}\right) / \left(10^3 кг \cdot м^{-3}\right) =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 0{,}16 + 1{,}5 \cdot 10^{-3} + 1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4 = 1{,}76 \cdot 10^{-2} Дж$$

Робота серця за одне скорочення, при якому переноситься 60 см^3 крові, становить $A = 1{,}76 \cdot 10^{-2} Дж \cdot 60 \approx 1 Дж$

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

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

$$A_3 = \left(1 + \frac{1}{6}\right) Дж = 1{,}17 Дж$$

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

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

З урахуванням того, що тривалість систоли близько 0,3 с, середня потужність серця за час одного скорочення становить: $N = \frac{A_з}{t} \approx 4Вт$

ТИСК КРОВІ

Робота серця зумовлює виникненню *артеріального тиску* який діє на стінки артерій і залежить від рівня стискування крові. Тиск, що виникає при скороченні серця, називається *систолічним;* тиск, що виникає при розслабленні серця, називається *діастолічним.* Артеріальний тиск вимірюється у мм. рт. ст. і позначається як відношення систолічного тиску до діастолічного.

Залежність тиску крові від часу в процесі роботи серця зображено на рис. 28.

Видно, що зміни тиску відбуваються від практично нульового рівня до 120 мм рт. ст. Різниця між систолічним і діастолічним тисками являє собою *пульсовий тиск.* Типові значення систолічного, діастолічного і пульсового тисків у кровоносній системі тварин наведено у таблиці 7.

Таблиця 7.

Типові значення тисків у кровоносній системі тварин

Тварина	p_{max},мм рт.ст.	p_{misn},мм рт. ст.	Δp, мм рт.ст.
Кінь	172	123	49
ВРХ	98 - 128	69 - 99	29
Свиня	139	99	40
Вівця	151	114	37

Значні для артеріальної системи зміни тиску крові від систоли до діастоли згладжуються до відносно постійного рівня (рис. 28) при проходженні крові через дрібні судини. Пульсова хвиля в кровоносних судинах поширюється зі швидкістю 5-10 м·с$^{-1}$, на величину пульсової хвилі впливає процес старіння організму, пов'язаний з погіршенням пружних властивостей стінок кровоносних судин.

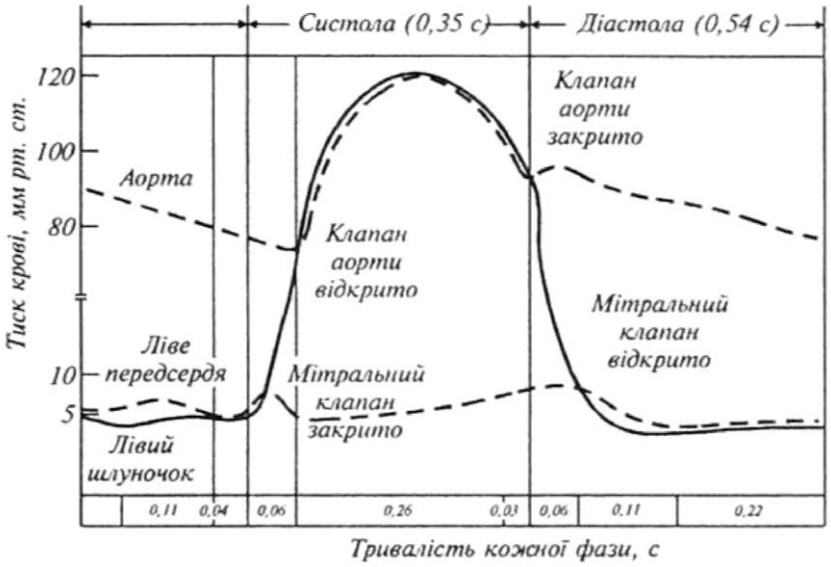


Рис. 28. Залежність тиску крові від часу в процесі роботи серця

На рис. 29. наведено профілі пульсового тиску і потоку крові в стегновій артерії собаки. Слід зазначити, що максимум потоку випереджує появу максимуму тиску, оскільки потік викликається градієнтом тиску.

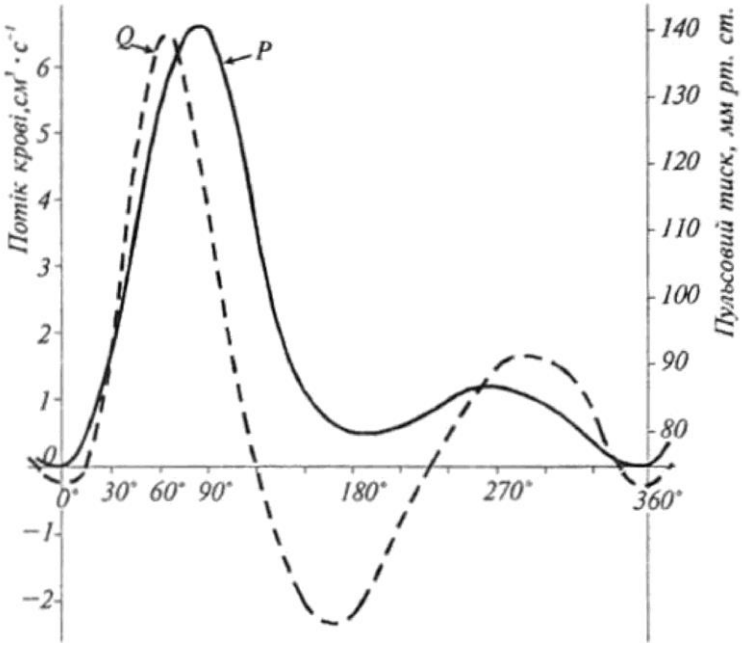


Рис. 29. Пульсовий тиск і потік крові в стегновій артерії собаки

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

Захворювання крові та ураження стінок кровоносних судин можуть бути пов'язані зі зміною концентрації еритроцитів та їх посиленою агрегацією, що призводить до підвищення в'язкості крові. Зміна кількості еритроцитів у загальному об'ємі крові сприяє захворюванню тварин. Так, збільшення кількості еритроцитів викликає *поліцитемію* - значне збільшення еритроцитів у крові, що може викликати у великої рогатої худоби збільшення гематокриту (сумарного об'єму формених елементів крові відносно всього об'єму крові) від 35% (норма) до 71% та кількості еритроцитів від 5- 7,5 до 20-24 млн/мм^3. Зменшення кількості еритроцитів або концентрації гемоглобіну в одиниці об'єму крові призводить до такого захворювання як *анемія.* У тварин анемія викликається втратами крові через кровотечі, дію паразитів, прискорення руйнування еритроцитів або вповільнення *еритропоезу* (процесу утворення еритроцитів). У випадку *серпоподібно-клітинної анемії* спостерігають істотне підвищення в'язкості крові при великих швидкостях зсуву. Зовнішній вигляд порушеної форми еритроцитів внаслідок серподібно-клітинної анемії наведено на рис. 30. Викликається це захворювання наявністю в еритроцитах патологічних гемоглобінів.

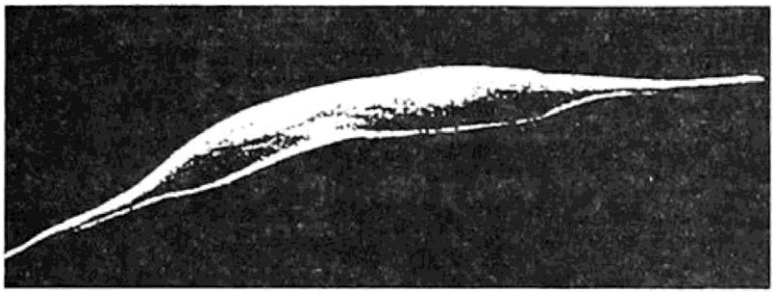


Рис. 30. Вигляд порушеної внаслідок серпоподібно-клітинної анемії форми еритроцита

Багато захворювань пов'язано з посиленням агрегації еритроцитів у вигляді так званих монетних стовпчиків або складніших конгломератів (рис. 31).

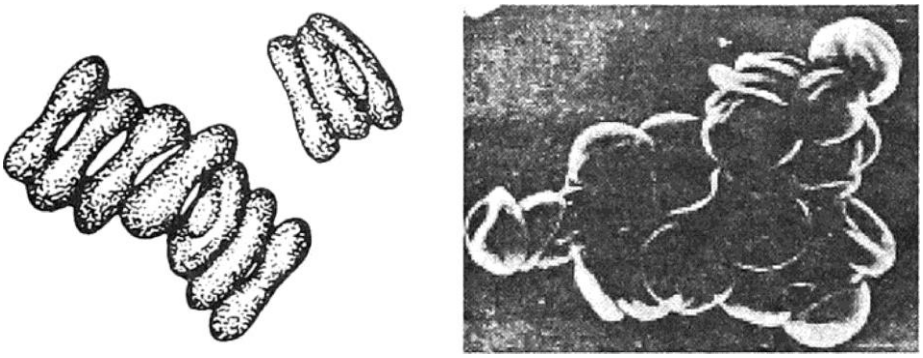


Рис. 31. Агрегація еритроцитів

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

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

Тромбоз. Утворення ущільнених мас крові або лімфи, що зсілися, в кровоносній системі призводить до зменшення перерізу судини. Це зменшення величини перерізу S судини супроводжується збільшенням швидкості υ течії крові у місцях меншого перерізу (рис. 32) згідно з рівнянням нерозривності потоку $S = \frac{const}{\upsilon}$; збільшення швидкості υ течії призводить до зменшення статичного тиску p відповідно до рівняння Бернуллі $p + \frac{\rho \cdot \upsilon^2}{2} = const$. Зменшення цього тиску нижче певного рівня призводить до закупорювання судини. Але через це кінетична енергія крові, що рухається, збільшується, і отвір судини збільшується. Виникають зміни стінок кровоносної судини, які викликають болісні відчуття.

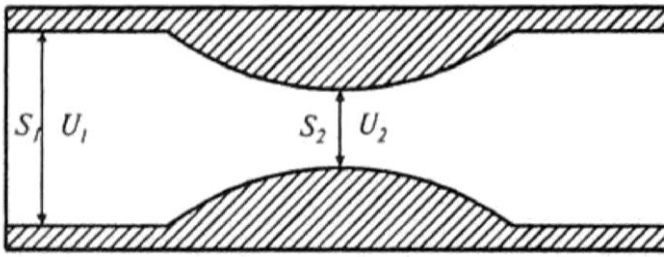


Рис. 32. Звуження кровоносної судини внаслідок тромбозу

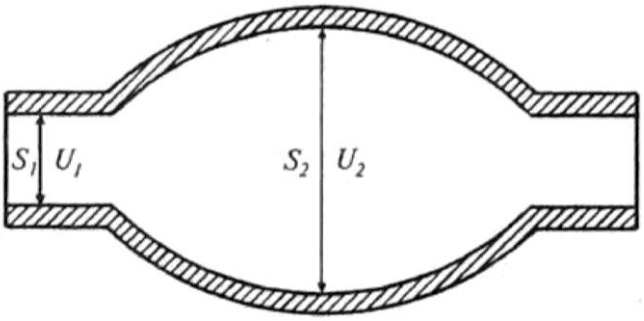


Рис. 33. Розширення перерізу кровоносної судини внаслідок аневризми

Аневризма. При розширенні перерізу S судини внаслідок патоморфологічних змін в стінках (рис. 33.) швидкість течії V зменшується (рівняння нерозривності потоку), але статичний тиск p збільшується (рівняння Бернуллі). Цей надлишковий тиск може призвести до крововиливу. Процеси, що відбуваються у

судині внаслідок аневризми, можна розглянути з позицій пружних властивостей судини.

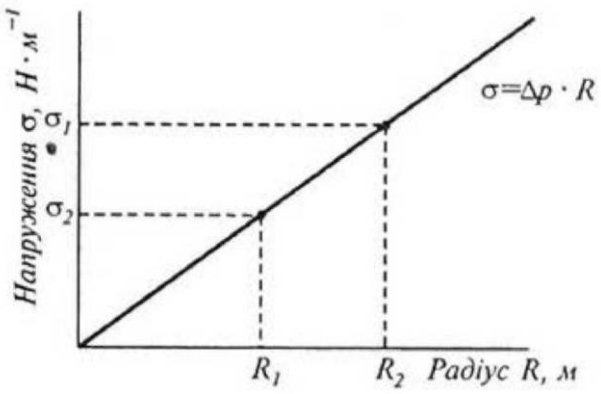


Рис. 34. Залежність напруження σ від радіуса R циліндричної форми

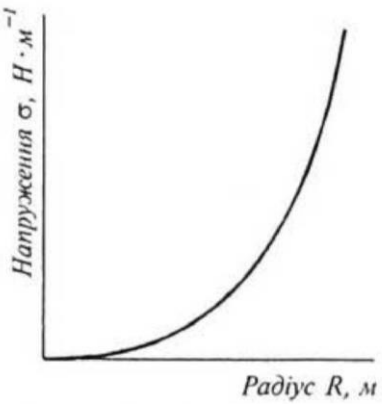


Рис. 35. Залежність напруження σ від радіуса *R* нормальної еластичної артерії

Рівняння Лапласа ($\Delta p = \pm \frac{2\alpha}{R}$) для трубки циліндричної форми потребує заміни $\alpha \to \sigma$ і $R_1 \to \infty$,тобто $\Delta p = \frac{\sigma}{R}$, де Δp є тиск, з яким рідина діє на трубку, σ - напруження в стінці на одиницю довжини, *R* - радіус трубки.

Звідси $\sigma = \Delta p \cdot R$

Графік залежності σ від *R* наведено на рис. 34. Але кровоносна судина містить в собі пружні матеріали, зокрема білки еластин і колаген. Через це залежність $\sigma(R)$ має криволінійну форму (рис. 35). Перетин графіків $\sigma(R)$ для циліндричної трубки і еластичної кровоносної судини дає значення σ_1 і R_1, що відповідають стабільній ситуації (рис. 36). З послабленням пружних властивостей крива залежності $\sigma(R)$ пересувається за годинниковою стрілкою; значення стабільного радіуса кривизни збільшується (рис. 37).

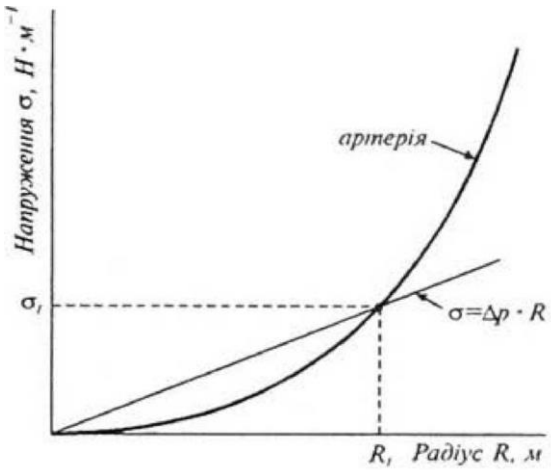


Рис. 36. Знаходження значень σ і R_1 що відповідають стабільній ситуації, на перетині графіків $\sigma(R)$ для циліндричної трубки і еластичної кровоносної судини

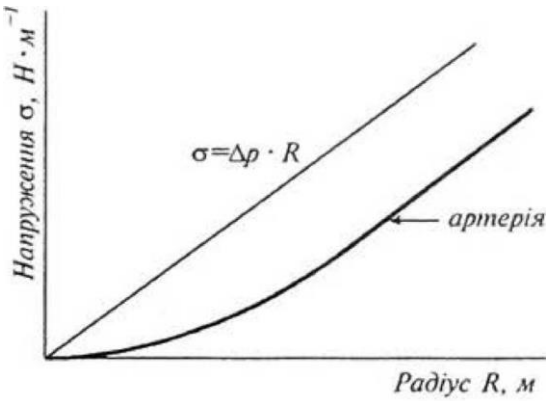


Рис. 37. Вплив зниження пружних властивостей судин на характер залежності $\sigma(R)$

Подальше зменшення пружності судини може призвести до ситуації, коли два графіки $\sigma(R)$ (трубки і судини) не перетинатимуться (рис. 38). Це відбувається, коли залежність $\sigma(R)$ набуває максимального нахилу;

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

Згадаємо закон Гука: $\sigma = \frac{F}{S} = E\frac{\Delta x}{x}$, який для еластичної судини можна подати так: $\frac{d\sigma}{t} = E\frac{dR}{R_0}$, де t — товщина стінки судини, R_0 — радіус судини у нормальному стані. Звідси

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

Якщо використати експериментально отримані дані $E_{max} = 7\cdot10^5$ Н·м$^{-2}$, R_0=0,35 см, t =0,07 см, то тиск, необхідний для аневризми, становитиме $1{,}4\cdot10^5$Н·м$^{-2}$ (більше 1 атмосфери). Цей тиск значно перевищує систолічний тиск, який утворює серце.

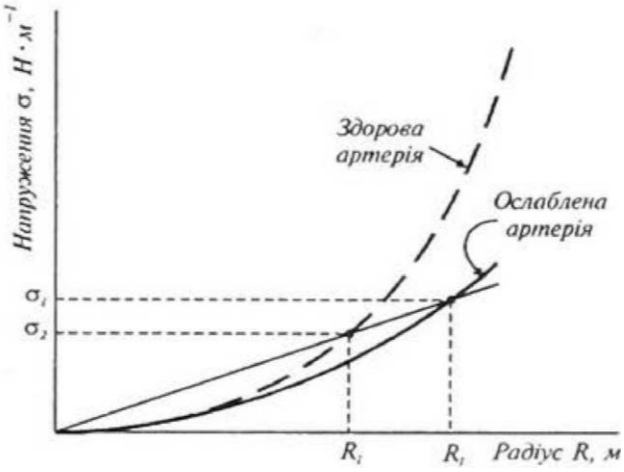


Рис. 38. Відсутність перетинання графіків $\sigma(R)$ для циліндричної трубки і еластичної кровоносної судини

Газова емболія. У кровоносній судині, в якій з певних причин (наприклад, унаслідують кесонної хвороби) утворилась бульбашка газу, за потоку форма бульбашки спотворюється — ліва й права півсфери мають різні за величиною радіуси кривизни (рис. 39). Отже, згідно з рівнянням Лапласа, додаткові тиски, зумовлені поверхневим натягом рідини на лівій та правій межах поділу, будуть відрізнятися. Ця різниця тисків може призвести до розриву або закупорювання судини.

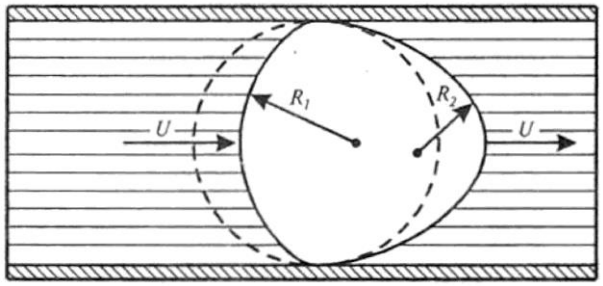


Рис. 39. Виникнення газової емболії за руху крові в судині, що зумовила деформацію бульбашки газу $R_1 \neq R_2$, різницевий тиск і розрив судини

МОЛЕКУЛЯРНА БІОФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ. ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

Вологість відіграє значну роль у життєдіяльності наземних тварин. Втрати води живим організмом відбуваються з кінцевими продуктами обміну речовин. В процесі живлення та пиття організм забезпечується водою. Чим вища відносна вологість, тим менша різниця між зовнішнім та внутрішнім водними середовищами тварини і тим, відповідно, менша потреба в зниженні втрат води або в протидії їм. Істотно впливає вологість на поширення наземних тварин, які через спосіб

підтримання водного балансу залишаються «водними» — земноводних, наземних ракоподібних, нематод, дощових черв'яків, молюсків тощо.

ПОВЕРХНЕВІ ЯВИЩА В ЛЕГЕНЯХ

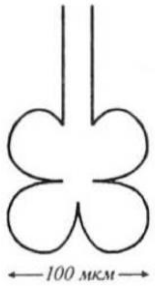


Рис. 40. Елементарна структура легень альвеола

Поверхня легень має специфічну рельєфну форму і велику площу для забезпечення кращого газообміну. Так, у легенях дорослої людини міститься близько 300 мільйонів альвеол, а загальна площа легень становить 70÷80м^2. Зображення елементарної структури легень *(альвеоли)* наведено на рис. 40. Під час нормального функціонування легень цей значний тиск компенсується поверхневим натягом, що виникає на поверхні легень. В альвеолах легень у поверхневому шарі є моношар *антиателектатичного фактора (сурфаканта)* — поверхнево-активної речовини фосфоліпідної природи, що не дає змоги альвеолам спадати при видиху. Якщо в легенях новонароджених не вистачає сурфаканта, може виникнути підвищення поверхневого натягу, що призводить до небезпечного респіраторного захворювання — *гіаліново-мембранної хвороби новонароджених.* Запобігти цьому захворюванню можна за внесення поверхнево-активних речовин, що зменшують поверхневий натяг. Однією з таких речовин є *фосфатидигхоліну* молекули якого складаються з гідрофільних полярних головок і гідрофобних ланцюгів жирних кислот. Полярні головки перебувають у контакті з водою, тоді як жирні кислоти залишаються у повітрі (рис. 41). Результатом дії такого молекулярного шару є зменшення коефіцієнта поверхневого натягу від $70 \cdot 10^{-3}$ Н·м $^{-1}$ до $30 \cdot 10^{-3}$Н·м $^{-1}$

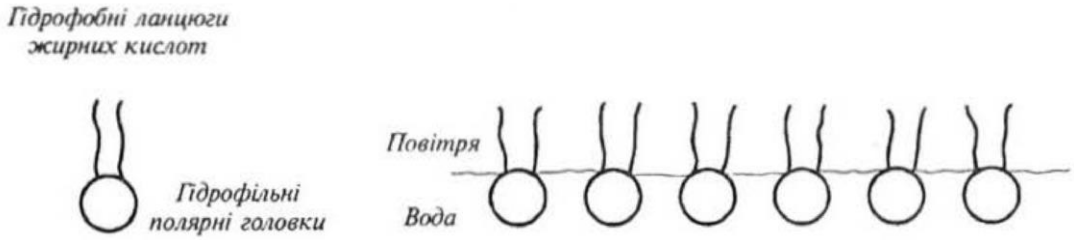


Рис. 41. Розташування гідрофільних полярних головок і гідрофобних ланцюгів жирних кислот та межі поділу «повітря-вода»

НЮХ І СМАК У ТВАРИН

Нюх та нюховий аналізатор тварин

Для багатьох тварин важливим і навіть вирішальним способом комунікації є посилання хімічних сигналів. Хімічні леткі речовини, що створюються твариною і зумовлюють специфічну реакцію в інших представників того ж самого виду, називаються *феромонами* або *одорантами.* Тварини здійснюють і реалізують такий нюховий зв'язок для проголошення права на ту чи іншу територію, прокладання сліду, пошуків корму, утворення сигналу тривоги, спілкування з потомством, привертання уваги статевих партнерів для спаровування і розмноження, орієнтації у просторі та навігації, підтримання певної соціальної ієрархії. Хімічні сигнали характеризуються незначним різноманіттям, але вони діють у значному просторо-

вому і часовому інтервалах завдяки ґрунту та рослинам, на яких відкладає тварина феромони як маркери. Параметри поширення феромонів часто залежать від швидкості вітру: так, при швидкості вітру 1 м · $с^{-1}$ область поширення феромона має довжину 215 м, ширину 4560 м і висоту 108м, тоді як при швидкості вітру 5 м · $с^{-1}$ ці параметри становлять: довжина — 1820 м, ширина — 97 м, висота — 48,5м.

Нюх — це процес сприйняття запаху твариною. Нюхові клітини безхребетних розмішені на шкіряному покриві; у членистоногих ці клітини утворюють особливі органи — сенсили; у нижчих хребетних нюхові клітини розміщені в нюхових мішках, у вищих тварин і людини вони утворюють рецепторний шар нюхової порожнини.

Рис. 42. Антена шовкопряда *Bombyx mori*

Хімічна комунікація комах здійснюється завдяки феромонам, серед яких найбільш поширеними є статеві атрактанти. Розглянемо один з таких ідентифікованих феромонів шовкопряда *Bombyx mori.* Самець шовкопряда не здатний літати, через що йому важко шукати самку. Він має на голові пару великих антен (рис. 42), які збирають *бомбі кол* — атрактант, що висилає самка. Цей атрактант є сумішшю (10:1) саме бомбіколу (складного спирту) та його альдегідної форми бомбікалу. Кожна антена метелика складається з основного стрижня і великої кількості волосинкоподібних органів, серед яких знаходяться нюхові волоски. Вартою уваги є здатність антен селективно збирати молекули бомбіколу за допомогою клітин-рецепторів, розміщених на нюхових волосках антени. Волосок разом з рецептором називається *сенсилою (sensilla trichodea).* Кількість сенсил на кожній антені досягає 17000. Завдяки цим рецепторам самка здатна привертати самців на відстані близько одного кілометра. Клітина-рецептор шовкопряда містить два волоконних закінчення, що називаються *дендритами* (рис. 43). Контакт дендритів з навколишнім середовищем відбувається через пори оболонки; діаметр кожної пори дорівнює 15 нм, а кількість пор на сенсилі становить 3200. Згідно з сучасним уявленням, рецептори фактично рахують молекули, що збуджують клітину біля основи дендриту; коли кількість імпульсів від антени перевищує 200 $с^{-1}$ самець реагує і рухається до джерела бомбіколу. Механізм хімічної рецепції шовкопряда пов'язаний з поєднанням дифузійних процесів з високоефективною фільтрацією в антенах.

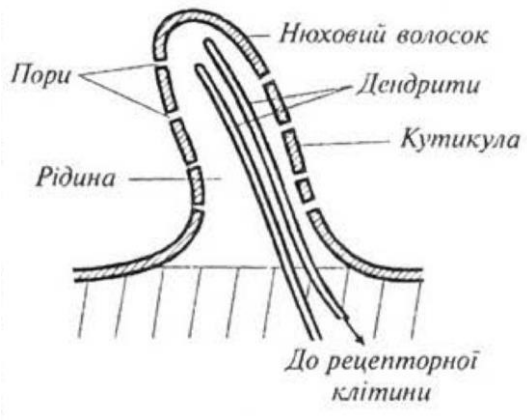


Рис. 43. Рецептор бомбікола самця шовкопряда

Вивчення процесу нюху комах є актуальною проблемою з точки зору боротьби зі шкідниками. Так, великий сосновий довгоносик *(Hylobius abietis)* завдає значних матеріальних збитків в лісо-

вому господарстві Європи, живлячись корою саджанців хвойних дерев. Слід зазначити, що хвойні дерева утворюють складні суміші кількасот летких речовин; в свою чергу, довгоносик має близько 30 типів нюхових клітин, отже, проблема полягає в з'ясуванні того, які саме запахи приваблюють комаху з тим, щоб знайти засоби боротьби з нею. Ще одного шкідника — жука-короїда *(Ipidae)* — майже повністю знищили завдяки пасткам, що містили феромони цього жука та інсектициди.

Проблема боротьби з малярійним комарем *(Anopheles)* також пов'язана з пошуками та ідентифікацією тих атрактантів, які висилаються людиною або твариною і привертають увагу комара.

Нюх у риб відіграє значну роль у пошуках корму, виявлення хижаків, статевих партнерів, досягнення місць для нересту та орієнтації. Використання нюху дуже добре доведено у лосося, який починає своє життя в прісних водах річок, де мешкає від кількох місяців до двох років залежно від виду; за цей проміжок часу він «вводить в свою пам'ять» запах рідної водойми. Далі лосось прямує вздовж течії до океану, де проводить від одного до чотирьох років, досягаючи статевої зрілості. Після цього проходить близько 1500 км океанського простору, щоб досягти річки, у верхів'ях якої він народився, для викидання кав'яру. Процес навігації лосося в океані ще не з'ясований достатньо; вважається, що він використовує цілий комплекс факторів — географічні риси місцевості, температуру, магнітні поля, небесні та хімічні орієнтири. Але міграція у річці відбувається завдяки нюху.

Нюху птахів як наукова проблема обговорюється протягом останніх десятиріч. Тривалий час вважалося, що нюх є прерогативою винятково ссавців. Недавні дослідження довели, що птахи використовують нюх у пошуках та розпізнаванні харчів, для вибору зручних для насиджування місць та під час навігації. У більш ніж 150 видів птахів було виміряно розміри нюхової цибулини (відділу головного мозку, що відповідає за нюх); доведено, що не маса цієї цибулини, а відношення її маси до загальної маси мозку (яке коливається від 3 до 37%) впливає на нюхові здатності птаха. Серед птахів з розвиненим відчуттям запахів можна відзначити голубів, деяких морських птахів, шпаків, курей.

Цікавим можна вважати метод застосування нюху у птахів, промислові кампанії з транспортування газу з метою виявлення дефектів у стінках труб накачували в останні такий одорант як кадаверин (трупна отрута); в тому місці, де труба мала отвір, збиралася велика кількість грифів.

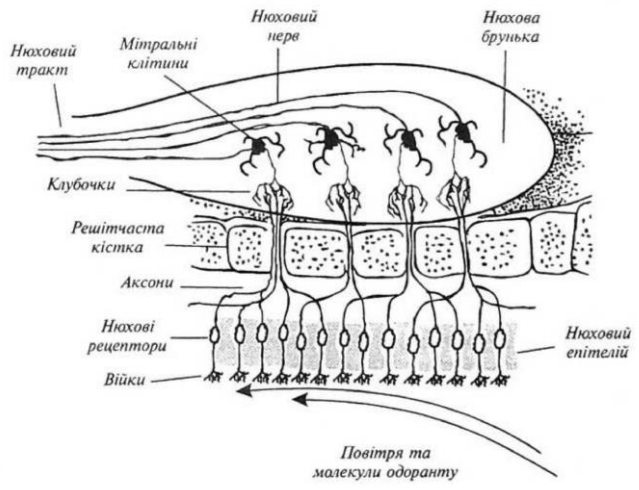


Рис. 44. Нюховий аналізатор

Нюховий аналізатор вищих тварин і людини — морфофізіологічна система, що забезпечує сприйняття різних пахучих речовин, аналіз та обробку виниклих при цьому аферентних (від периферії до центральної нервової системи) збуджень.

Складається нюховий аналізатор з нюхових рецепторних клітин (нейронів), розміщених у слизовому шарі товщиною близько 60 мкм (рис. 44). Рецепторний шар складається з нюхових ї опорних клітин. З одного боку рецепторний нейрон закінчується війками, що мають контакт з зовнішнім повітрям через слизовий шар; з другого — відростками (аксонами). Джгути з 10÷100 аксонів проходять через отвори в решітчастій кістці і утворюють клубочки, що в свою чергу з'єднуються з мітральними (двостулковими) клітинами, і через них — з мозком. Така структура нюхового рецептора підвищує його чутливість. Під час вдихання через нюхову щілину носа протікає близько 5÷10% загальної кількості повітря. Пахучі речовини у пароподібному стані входять у контакт з нюховими рецепторами, завдяки чому останні збуджуються. Для того, щоб тварина отримала відчуття запаху, достатньо збудження лише 40 рецепторних клітин, причому на кожну з них повинна діяти одна молекула пахучої речовини. Унікальною властивістю нюхових рецепторів є їх постійна замінюваність (протягом близько 60 днів). Чутливість нюху людини можна оцінити як близько 10^{-11} (йдеться про пару ефіру меркаптану), тоді як чутливість нюху собаки на три порядки вища.

Механізми нюху пов'язані з потраплянням молекул летких органічних сполук у нюховий аналізатор та зв'язуванням їх з рецепторними білками, здатними деполяризуватися (тобто утворювати потенціал дії); електричні сигнали передаються від рецепторних клітин через аксони (довгі відростки клітин нервової системи) до гіпоталамуса — відділу мозку, що являє собою скупчення нервових клітин; саме в ньому утворюється відчуття запаху, його класифікація та ідентифікація.

Деякі тварини (наприклад, коти) мають специфічний *орган Джакобсона,* призначений для детектування феромонів та низьких концентрацій хімічних сполук природного походження. Використовують тварини цей орган для спілкування між представниками свого виду. Коли кіт відкриває верхню губу для того, щоб спрямувати феромони на цей орган, здається, що він посміхається (реакція Феймана).

Методи аналізу запахів

Ольфактометрія — це метод вимірювання гостроти нюху. Ця техніка може застосовуватися з метою визначення порогу нюху, рівня нюхової адаптації та відновлення нюхової функції *(кількісна ольфактометрія),* а також для визначення здатності людини сприймати і розрізняти запахи *(якісна ольфактометрія).* Для практичної реалізації ольфактометрії використовують *дегустаторів запахів* — людей, які відзначаються підвищеною чутливістю до запахів (число таких серед звичайного населення становить близько 10%). Ці дегустатори тренуються визначати певні запахи; в кожній оцінці запаху беруть участь від 6 до 12 експертів, після чого результати оцінки усереднюються. Під час процедури визначаються пороговий рівень, інтенсивність, стійкість, гедонічний тон та характерні ознаки запаху. Пороговий рівень запаху визначається шляхом поступового збільшення концентрації пахучої речовини, доки дегустатор не зреагує на неї. Інтенсивність запаху вимірюється шляхом порівняння запаху, що оцінюється, з опорним запахом (звичайно, n-бутанола), зразки якого місять різні концентрації газу. Деякі дегустатори мають чутливість до n -бутанолу на рівні $(20 \div 80) \cdot 10^{-9}$. Для оцінки інтенсивності запаху використовують 5-бальну систему: 0 (відсутність запаху) до 5 (дуже силь-

ний запах). Стійкість запаху відповідає кореляції інтенсивності запаху з концентрацією пахучої речовини. Гедонічний тон характеризує, як людина сприймає той чи інший запах з точки зору відчуття приємних вражень. Характерні ознаки визначаються шляхом порівняння запаху,що оцінюється, з добре відомими запахами.

Автоматизовані системи типу «електронний ніс» позбавлені суб'єктивних підходів до оцінки запахів. Ці системи складаються з набору хімічних сенсорів, в основі яких лежить полімерна плівка. Коли газ, що оцінюється, проходить крізь плівку, він зумовлює згинання плівки; ці механічні згинання перетворюються в електричні сигнали, пропорційні рівню деформації плівки і, отже, концентрації газу Оскільки різні хімічні сполуки викликають різні рівні згинання плівки, відбувається реакція такого сенсора на кожну сполуку. Автоматизована система такого типу містить набір з 20÷50 сенсорів, що створюють специфічну картину відгуків усіх сенсорів, характерну для певного запаху.

До сучасних методів кількісної та якісної оцінки запахів слід також віднести комбінований метод газової хроматографії та масспектрометрії.

Метод хроматографії передбачає поділ, виявлення і визначення речовин завдяки неоднаковості їх поведінки в системі із двох фаз, що не змішуються – рухомій і нерухомій. Рухомою фазою при використанні методу газової хроматографії є газ (суміш газів), нерухомою – тверда речовина або рідина. Під час руху рухомої фази вздовж нерухомої кожна компонента суміші осідає на нерухомій фазі (сорбенті) відповідно до матеріалу сорбенту і вповільнює свій рух. Через те, що різні компоненти мають різну спорідненість, відбувається просторовий поділ цих компонентів.

Мас-спектрометричний метод базується на створенні іонних пучків у вакуумі з їх подальшим поділом за масою в електричному та магнітному полях. Застосування комбінованої техніки газової хроматографії та мас-спектрометрії дає можливість оцінити 7СМ00 летких компонентів, що містяться у повітрі тваринницьких приміщень.

Запахи у тваринництві

Неприємні запахи в тваринницьких приміщеннях створюють серйозну проблему для працівників та мешканців довкілля, які скаржаться на роздратування очей, носа, горла, головний біль, нудоту, пронос, кашель, хрипоту, порушення дихання, сонливість тощо. Активність мікроорганізмів в анаеробних умовах призводить до розкладання органічних компонентів гною, що зумовлює появу близько двохсот пахучих газів. Серед них – пара-крезол, фенол, індол,скатол та сірководень. Всі ці гази з неприємним запахом поширюються у атмосфері; швидкість поширення залежить від концентрації певного газу, температури, швидкості вітру, сонячного освітлення. Для запобігання впливу неприємних запахів застосовують хімічні методи, електромагнітні засоби руйнування мікроорганізмів, аероіонізацію або озонування повітря, біологічні фільтри, накриття гною, підбір кормової дієти для тварин, гігієнічні заходи в приміщеннях.

Смак та смаковий аналізатор тварин

Смак – це відчуття, що виникає при дії хімічних речовин на рецепторні апарати язика і порожнини рота. За пережовування їжі вивільнюються різноманітні

за величиною, формою та складністю молекули, що діють на молекули мембрани смакових рецепторів. У комах хеморецептори, що відповідають за смак і нюх, розміщені на ротових органах, а також на лапках або антенах, У риб і амфібій хеморецептори на поверхні тіла. У вищих тварин і людини функції хеморецепції звужуються до сприйняття запаху та смаку розчинених речовин.

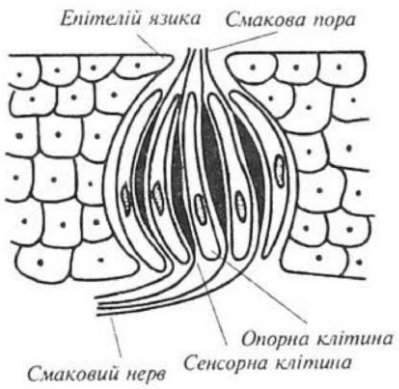


Рис. 45. Смакова брунька

Смаковий аналізатор – морфофізіологічна система, яка забезпечує сприйняття й аналіз хімічних речовин, що перебувають у порожнині рота. Основою смакового аналізатора є *смакові сосонки* – структури язика, що містять смакові рецептори. Сосочки можуть мати грибоподібну (на кінці язика), листоподібну (на бокових поверхнях язика) та жолобчасту (на межі задньої та двох передніх третин язика) форми. Кожний сосочок в свою чергу містить *смакові бруньки,* що складаються з епітеліальних смакових клітин, зв'язаних з кінцевими розгалуженнями смакових нервових клітин (рис. 45). Кількість бруньок може досягати і 10000. На поверхні сосочка язика міститься *смакова пора,* через яку смакова брунька сполучається з порожниною рота. Смакова брунька побудована зі смакових (кількість їх становить 10÷20 на одну бруньку) і опорних клітин; смакова клітина має смакові волоски, що виходять через пору в рідке середовище на поверхні язика.

Людина здатна відрізняти чотири основні типи смаку – *солодкий* (багато органічних сполук, зокрема цукри, сахарин), *солоний* (багато неорганічних сполук, зокрема хлорид натрію, йодид калію), *кислий* (кислоти, йони водню, зокрема оцет, лимонна кислота) та *гіркий* (багато алкалоїдів, від зокрема кофеїн, нікотин, хінін, стрихнін). Сільськогосподарські тварини відрізняють ці чотири типи смаку, але можуть демонструвати надання переваги певному смаковому враженню: свині – солодкому, велика рогата худоба і коні – солоному. Смакова чутливість залежить від типу смаку – людина здатна реагувати на 10^{15} молекул стрихніну на язиці або на 10^{20} молекул цукру.

Можливим механізмом смакової рецепції можна вважати сполуки смакових речовин з молекулами особливих білків рецепторних клітин, що супроводжується виникненням рецепторних потенціалів. Рецепторна клітина вивільняє хімічний медіатор (високоактивну хімічну речовину), що збуджує закінчення смакового нерва.

Методи дослідження смакового аналізатора

Є кілька методів дослідження смакового аналізатора.

1. Вивчення впливу розчинів відомої концентрації (цукор, сіль, кислота) при певній температурі на ротову порожнину та визначення мінімальної концентрації розчину, що створює відчуття смаку.

2. Локальна вибіркова дія на окремі сосочки маленьких пензликів або олівців, виготовлених із смакових речовин,

3. Електрофізіологічні методи передбачають збудження сосочків за допомогою мініатюрних електродів та спостереження зміни електросмаку залежно від частоти подразнень та кількості стимулів.

ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ТВАРИНИ

Теплообмін – це обмін тепловою енергією між організмом та оточуючим середовищем, що відбувається завдяки обміну речовин та процесів тепловіддачі, що складаються з процесів теплового випромінювання, випаровування, конвекції і теплопровідності.

Загальний тепловий баланс тварини в стаціонарному стані описується рівнянням:

$$M + R_n - \lambda E - C - G = 0$$

де M – швидкість продукції теплоти завдяки обміну речовин; R_n – сумарне постачання теплоти завдяки теплового випромінювання, λE – втрати теплоти через пароутворення, C – втрати теплоти лише за конвекції, G – втрати теплоти через теплопровідність при контакті тварини з підлогою, на якій вона стоїть або лежить. Всі ці компоненти вимірюються в Вт · $м^{-2}$.

Обмін речовин бажано оцінювати, коли тварина позбавлена корму і перебуває в стані спокою. Основний обмін речовин M_o (що вимірюється в Вт) пов'язаний з масою $M_т$ тіла тварини співвідношенням:

$$M_o = a\ M_T^n$$

де *a і n* – константи, причому *a* = 3,4 Вт·$кг^{-0,75}$ при порівнянні тварин одного виду, тоді як a = 1,8 Вт·$кг^{-0,75}$ при порівнянні тварин різних видів для мас тварин, що лежать в інтервалі 0,01÷10 кг. Типове значення середньої швидкості основного обміну речовин, що припадає на одиницю площі поверхні тіла тварини, становить близько 50 Вт · $м^{-2}$ Швидкість основного обміну речовин гомойотермних тварин (тих, що зберігають постійну температуру за допомогою волосяного покриву, підшкірного жиру, оперення тощо) змінюється від 10^{-4}÷ 10^{-2}Вт для комах та дрібних тварин до 10^2 Вт для великих тварин. Прогулянка потребує близько 30 % додаткової метаболічної енергії. Для пойкілотермних тварин (не здатних підтримувати температуру тіла на постійному рівні) ці інтервали на порядок менші. Швидкість обміну речовин у цих тварин більш повільна, на зміни температурних умов вони реагують поведінковими відгуками.

Обмін через випромінювання. Протягом дня на тварину діє пряме (800Вт·$м^{-2}$) та розсіяне сонячне випромінювання (100÷250 Вт·$м^{-2}$), а також довгохвильове випромінювання земної поверхні (320÷370 Вт·$м^{-2}$). Випромінювання, що досягає тіла тварини, поглинається, відбивається або пропускається твариною. Якщо випромінювання повністю поглинається, таке тіло називають *абсолютно чорним*; якщо поглинається лише частина зовнішнього випромінювання, таке тіло називають *сірим*. Реальні тіла є джерелами сірого випромінювання, однакового за складом з випромінюванням абсолютно чорного тіла, але з меншою енергетичною яскравістю. Тварини характеризуються поглинальною і випромінювальною здатністю.

Кількість поглинутої твариною енергії визначається за законом Стефана-Больцмана: $Q_a = Sa\sigma T_S^4$, де S – площа поверхні тіла тварини, *a* – поглинальна здат-

ність тварини, σ – стала Стефана-Больцмана, T_S – температура поверхні тіла тварини.

Кількість енергії, що випромінюється твариною, визначається за виразом: $Q_e = S\varepsilon\sigma T_e^4$, де ε – випромінювальна здатність тіла тварини, T_e – температура сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні.

Поглинальна здатність тварини залежить від кольору шкіряного покриву – тварини білої масті поглинають меншу кількість сонячного випромінювання, ніж тварини з чорним забарвленням.

Поглинальну та випромінювальну здатність сільськогосподарських тварин та людини наведено в таблиці 9.

Таблиця 9

Поглинальна та випромінювальна здатність сільськогосподарських тварин та людини

Об'єкт	Поглинальна здатність *a*	Випромінювальна здатність ε
Корова		
Біла	0,5	0,95
Бура	0,8	0,95
Чорна	0,9	0,95
Свиня		0,95
Біла	0,5	0,95
Чорна	0,9	
Вівця		
без вовни	0,6	0,95
з вовною	0,75	0,95
Людина	0,65÷0,8	0,95

Відбивання сонячного випромінювання від тварини відбувається в видимій та інфрачервоній областях спектра; рівень відбивання залежить від кута падіння сонячного випромінювання і забарвлення тварини. Так, наприклад, в видимій області спектра (400÷750 нм) криві відбивання волосяного покриву великої рогатої худоби характеризуються монотонним зростанням від 25 до 70 % для тварин світлої та від 1,6 до 4,3 % — для тварин темної масті. Максимум відбивання поверхні тварини припадає на 1÷2 мкм. Крім того, оптичне випромінювання, що проходить крізь шкіру тварини, зазнає розсіювання на структурних елементах тканини. Характер розподілу розсіяного випромінювання залежить від довжини хвилі оптичного випромінювання, що падає на поверхню тіла тварини, розмірів та форми біологічних структур, що беруть участь у розсіюванні.

Втрати теплоти через пароутворення λE визначається процесами втрати теплоти через дихання та потовиділення (тут λ =2,43 · 10^6 Дж · $кг^{-1}$ — прихована теплота пароутворення, E — втрати вологи за дихання або потовиділення). У процесі випаровування молекули рідини з найбільшою швидкістю і кінетичною енергією залишають поверхню тіла тварини, в результаті чого температура поверхні знижується. Цей процес відбувається тоді, коли температура повітря вища, ніж температура тіла. Типові значення втрат енергії через випаровування змінюються від 7,0 до 20,9 Вт · $м^{-2}$. Якщо потовиділення відсутнє, втрати теплоти через пароутворення залежать лише від процесів дихання та дифузії водяної пари крізь шкіру і ста-

новлять лише 8-10% втрат теплоти за обміну речовин при помірних (20-30 °С) температурах. Зростання температури навколишнього середовища призводить до монотонного збільшення втрат теплоти через випаровування. При високих (43÷45°С) температурах процес випаровування може перевищувати втрати теплоти за обміну речовин. Процес потовиділення вдвоє збільшує втрати теплоти (людина спроможна виділити близько 1,5 кг вологи за годину, що еквівалентно 600 Вт · м$^{-2}$. Вівці та собаки здатні компенсувати неспроможність потіти важким диханням, тоді як велика рогата худоба втрачає велику кількість теплоти саме через потовиділення. Швидкість випаровування залежить від поверхні тіла тварини. Процес виділення поту потовими залозами тварин відбувається рефлекторно. Кількість потових залоз у різних тварин становить: 25 см$^{-2}$ у свині, 250 см$^{-2}$ у вівці, 800 см$^{-2}$ у корови, 1600 см $^{-2}$ у зебу. Максимальна швидкість потовиділення протягом години змінюється від 30 г · м$^{-2}$ (вівця) до 200 г· м$^{-2}$ (корова). Одним зі способів, який використовують деякі тварини (корови і свині) для підвищення втрат теплоти, є намагання викачатися в болоті. Потік теплоти через випаровування в цьому разі у свині може досягати 800 г · м$^{-2}$ за годину.

У птахів втрати вологи через випаровування залежать від маси тіла відповідно до співвідношення: $E = 0{,}432\ M^{0{,}585}$, де Е – втрати вологи через випаровування в грамах протягом дня, М – маса птаха в грамах.

Конвекція – перенесення теплоти в рідинах, газах або сипких середовищах потоками речовини. Є різні види конвекції залежно від причин, що її породжують. *Вільна конвекція* виникає в полі сили тяжіння через неоднорідності густини, що спричинюються різницею температур. Нагріта речовина під впливом архімедової сили переміщується відносно менш нагрітої речовини у напрямку, протилежному напрямку сили тяжіння. *Вимушена конвекція* викликається зовнішнім механічним впливом на середовище (наприклад, вентилятором).

Розглянемо, як можна оцінити обмін теплотою тваринами через конвекцію. Кількість теплоти Q (Вт · м$^{-2}$), якою обмінюється тварина з навколишнім середовищем за одиницю часу з одиниці поверхні тіла (густина потоку теплоти) завдяки конвекції, можна оцінити, припускаючи, що тіло тварини являє собою циліндр діаметром D за допомогою виразу:

$$Q = \frac{K_{пов}(\mathrm{T_S} - T_a)}{\mathrm{R} \cdot \ln\left(\frac{\mathrm{R} + \delta}{R}\right)}$$

де $K_{пов}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря, R = D/2 – радіус циліндра, δ – товщина поверхневого шару, в межах якого має місце конвекція, T_s і T_a – температура відповідно поверхні тіла тварини і навколишнього середовища.

Теплопровідність доцільно розглядати як шлях передачі теплоти від внутрішніх ділянок тіла навколишньому середовищу та під час контакту тварини з підлогою. Швидкість перенесення теплоти залежить від різниці температур тіла тварини і навколишнього середовища, площі поверхні тіла та коефіцієнта теплопровідності. Типові значення коефіцієнта теплопровідності деяких елементів покриву тварини наведено в таблиці 10.

Таблиця 10.

Значення коефіцієнта теплопровідності деяких елементів покриву тварин (при температурі 20 ^{0}С)

Речовина	Коефіцієнт теплопровідності, Вт · м$^{-1}$·К$^{-1}$
Жир	0,205
Шкіра	0,502
М'язи	0,4
Хутро	
собака, вовк	0,054
білий ведмідь	0,063
лисиця, бобер	0,052
заєць	0,039
єнот	0,048
олень	0,036

В процесі передачі теплоти навколишньому середовищу відіграють певну роль ізолюючі властивості шкіряного, волосяного покриву, жирового прошарку тварини, оперення птиці. Ізолюючі властивості зовнішнього покриву тварин характеризуються значеннями коефіцієнта ізоляції, що визначається як величина, обернена потоку теплоти, що припадає на одиницю площі та одиницю різниці температур.

Вимірюється коефіцієнт теплоізоляції в Вт$^{-1}$·м^2·К. Значення цього коефіцієнту для тканинного або волосяного покривів наведено в таблиці 11.

Таблиця 11.

Ізолюючі властивості зовнішнього покриву тварин

Теплоізоляційний матеріал	Коефіцієнт теплоізоляції Вт$^{-1}$·м^2·К
Жир	38
Тканина	14
Шерсть корови	50
Вовна вівці	102
Шерсть лайки	157
Хутро рисі	170
Оперення гуски	122

Аналіз даних цієї таблиці свідчить, що більш високими теплоізоляційними властивостями характеризується шерсть та хутро тварин. Це можна пояснити участю розміщеного між волосинами повітря, що має невеликий коефіцієнт теплопровідності (0,0257 Вт$^{-1}$·м^2·К).

Передача теплоти твариною під час її контакту з підлогою залежить від матеріалу підлоги та температури оточуючого середовища (табл. 12).

Таблиця 12.

Втрати теплоти через теплопровідність тваринами залежно від матеріалу

Температура навколишнього середовища, ^{0}С	Потік теплоти, Дж·с$^{-1}$		
	Бетон	Дерево	Полістирол
20	2,20	1,16	0,35
30	1,28	0,70	0,12

Цікаво порівняти ситуації, що характеризують утримання сільськогосподарських тварин у приміщеннях: бетон має майже в 20 разів більшу теплопровідність ніж дерево, отже, тварина, яка лежить на бетонній підлозі, віддає в 20 разів більшу теплоту, ніж тоді, коли її утримують на дерев'яній підлозі. Якщо ж, наприклад, бетонну підлогу, на якій утримують порося при температурі 10 °С, вкрити 10-ти сантиметровим шаром соломи (нагадаємо, що теплопровідність повітря, що заповнює солому, в 95 разів менша, ніж бетону), то це призводить до ефекту, еквівалентному підвищенню температури до 20 °С.

Ще одна важлива теплофізична характеристика тварини — коефіцієнт температуропровідності. Низька температуропровідність приводить до повільного прогрівання або охолоджування тканин, що в свою чергу супроводжується обмеженим поширенням тепла всередині організму. Тварини, що мають велику тканинну масу, повільно нагріваються або охолоджуються. Таким чином, коефіцієнт температуропровідності характеризує теплову інерційність тварини.

ТЕРМОСТАТИЧНА РЕГУЛЯЦІЯ.ТЕМПЕРАТУРА ТІЛА

Всі живі організми діляться на ендотермів, які регулюють температуру тіла за рахунок внутрішньої теплопродукції, та ектотермів, які покладаються на зовнішні джерела тепла. Наприклад, ссавці і птахи є ендотермами, а інші тварини — ектодермами. Температура тіла у ендотермів та деяких ектотермів регулюється нейронним термостатом. В основі системи термостатичної регуляції лежить терморегуляторний центр, розмішений в гіпоталамусі. В передній частині гіпоталамуса містяться нейрони, що різко збільшують частоту імпульсів при підвищенні температури; саме ці нейрони активізують реакції, спрямовані на відведення надлишкового тепла (наприклад, розширення судин, потовиділення). Інші нейрони здатні зменшувати частоту імпульсів після того, як температура гіпоталамуса збільшується і є більше певної (опорної) величини (рис. 46).

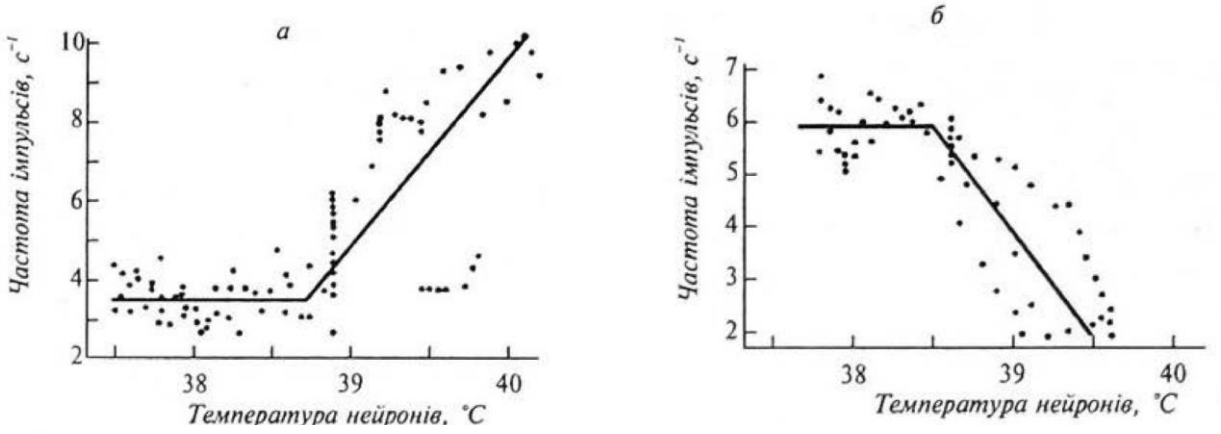


Рис. 46. Залежність електричної активності нейронів гіпоталамуса від температури: а - збільшення частоти імпульсації; б - зменшення частоти імпульсації

Крім того, є й такі нейрони, які збільшують частоту імпульсів, якщо температура гіпоталамуса стане меншою опорної температури. Ці нейрони активізують реакції, спрямовані на підвищення температури (тремтіння, обмін бурою жировою тканиною) і збереження тепла в організмі завдяки піднімання волосся (піло-моторні реакції).

Фізичну схему терморегуляції у ссавців, побудовану на принципі зворотного зв'язку, наведено на рис. 47.

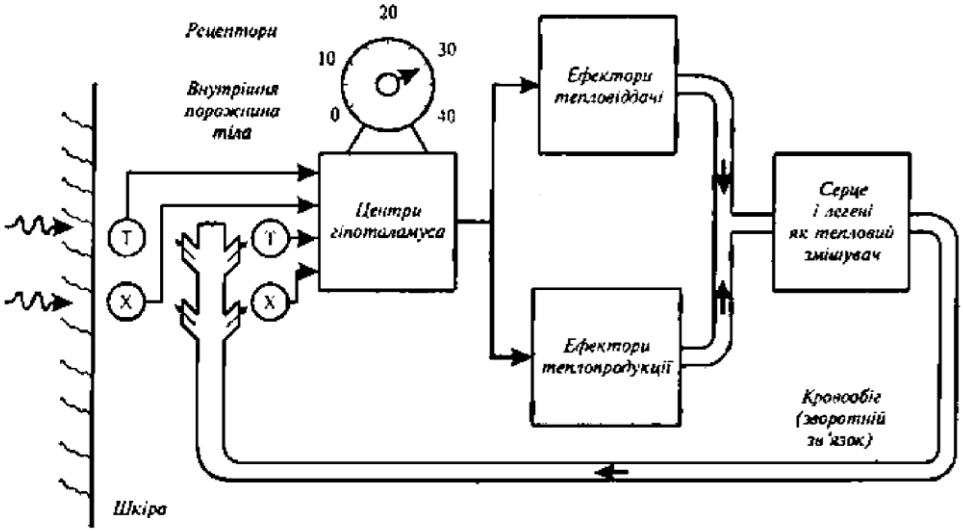


Рис. 47. Терморегуляторний центр, розміщений гіпоталамусі

Центри гіпоталамуса узагальнюють інформацію, що подається від розкиданих по організму центральних і периферійних терморецепторів, порівнюють її з опорною температурою і діють у відповідному напрямку на механізми або тепловіддачі або теплопродукції. Охолоджена чи нагріта таким чином кров розподіляється по організму, постачаючи інформацію (зворотний зв'язок) терморецепторам і гіпоталамічним центрам. Активація термоефекторів (бурої жирової тканини, м'язів, поверхні, з якої випаровується волога) припиняється, коли температура тіла досягає опорної температури.

ВПЛИВ ТЕПЛОВИХ ФАКТОРІВ НА ТВАРИН

Ендотермні організми здатні підтримувати температуру тіла на постійному ($35 \div 40^0$C) рівні; саме через це вони віддають теплоту навколишньому середовищу. Втрати тепла вповільнюються завдяки теплоізоляції, функції якої виконують волосяний покрив, підшкірний жир, оперення, а також за допомогою регуляції кровообігу під поверхнею шкіри. Слід зазначити, що незважаючи на високу теплоізоляцію, процес збереження тепла в ендотермних тварин досягається завдяки інтенсивним метаболічним затратам. До теплопродукції ендотермних тварин можна застосувати концепцію термонейтральної зони (зони температурного комфорту) - області температур навколишнього середовища, в межах якої швидкість обміну речовин і, отже, теплопродукція не змінюється, В цих межах температур тварина не відчуває ні тепла, ні холода; для різних тварин ця область різна. Залежність швидкості обміну речовин від навколишньої температури для ссавців або птахів наведено на рис. 48.

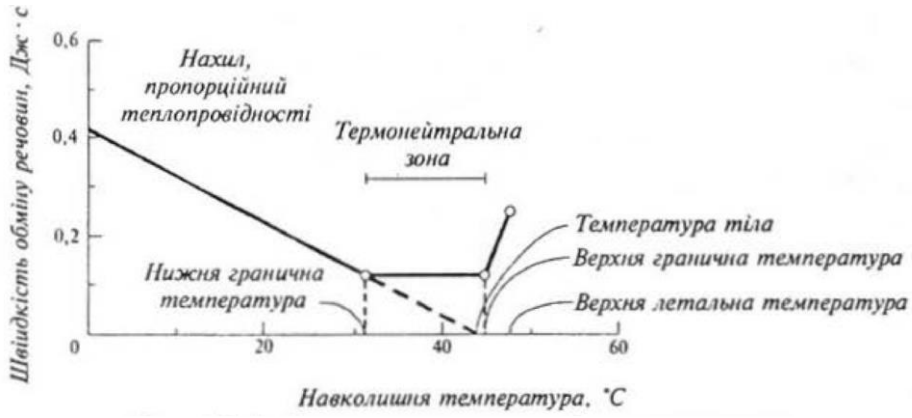


Рис. 48. Вплив навколишньої температури на швидкість обміну речовин ендотермних тварин

При температурах, менших, ніж нижня гранична, ця швидкість збільшується лінійно; в межах термонейтральної зони температура не змінюється; при температурах, що перевищують верхню граничну температуру, швидкість обміну речовин збільшується, доки температура не досягне летальних значень.

ВПЛИВ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЕНДОТЕРМНИХ ТВАРИН

В умовах спекотного і сухого клімату ендотермні тварини мають перевагу, зумовлену невеликим значенням відношення «поверхня-маса» і високою теплоємністю, Через те, що тканини більшістю складаються з води, теплоємність цих тканин становить $c_в$= 4186,8 Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$ для інтервалу температур (0÷40°С). Отже, чим більша тварина, тим більшу кількість теплоти містить її тіло при даній температурі. Важливу роль в процесі тепловіддачі відіграє регуляція кровообігу: при високих температурах кровоносні судини шкіри розширюються і тепловіддача збільшується. Такі судини знаходяться, наприклад, у вухах слонів та мешканців пустелі Сахари — лисицеподібних фенеків (Fennecus zerda).

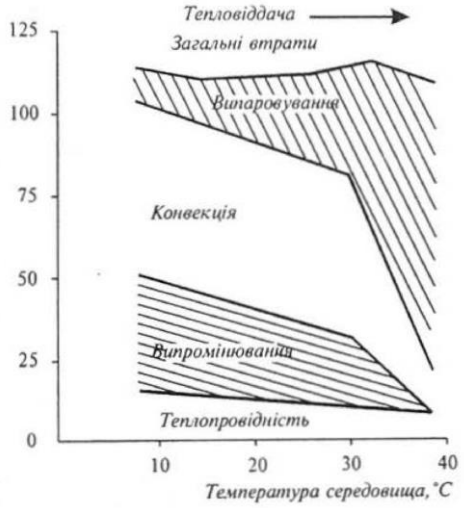


Рис. 49. Кількісні параметри втрати тепла твариною при різних температурах повітря

Якщо температура зовнішнього середовища перевищує верхню межу термонейтральної зони, тепло активно розсіюється за допомогою процесу випаровування: або потовиділення, або пришвидшення дихання — поліпне. Процес потовиділення не завжди супроводжується випаровуванням вологи. Ефективним способом збереження в організмі тепла і води є дихання через рот (а не тільки через ніс). Тварина (наприклад, собака), яка страждає від перегрівання, вдихає через ніс, а видихає через рот, забезпечуючи додаткове випаровування з поверхні язика. Із рис. 49 видно, що підвищення температури зовнішнього середовища впливає на інтенсивність процесів тепловіддачі. Так, кількість теплоти, якою обмінюється тварина завдяки випромінюванню або конвекції, прямує до нуля, якщо

температури тіла тварини і навколишнього середовища однакові. В той же час процес випаровування активізується зі зростанням температури. Високі температури викликають збільшення швидкості обміну речовин, що сприяє підвищенню продукції теплоти. Крім того, процеси і дихання і випаровування спричиняють зневоднення організму. Стан організму, зумовлений підвищеною температурою тіла, називається *гіпертермією*. Коли сільськогосподарських тварин, мешканців європейських країн, транспортують у тропічні або субтропічні зони, вони стикаються з тепловими стресами. Втрата апетиту, зниження здатності споживати, перетравлювати та використовувати корми, порушення терморегуляції та обміну речовин — все це призводить, в свою чергу, до вповільнення розвитку тварин та зменшення тваринницької продукції. Розміри тварини впливають на її здатність протистояти гіпертермії. Так, дрібні (110÷250 г) гризуни, що мешкають в пустелі, можуть перебувати при температурах, що перевищують температуру тіла $T_т$, протягом 15÷30 хвилин, після чого вони ховаються в нору. Така велика тварина як верблюд (250 кг) може знаходитися в таких умовах цілий день, доки не віддасть залишки тепла вночі. В спекотну зволожену погоду тваринам важко віддавати теплоту через те, що процеси випаровування неефективні. Фізична робота, яку змушені виконувати тварини, призводить до небезпечного підвищення температури тіла. Аналогічна ситуація складається, коли собаку закривають в машині на сонці: продукти дихання насичують повітря водяною парою і подальші втрати теплоти стають неможливими. Перевищення значень температури 41,5÷42,5 °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, істотну роль відіграє тривалість дії високих температур. Ще один спосіб уникнути впливу високих температур — літня сплячка, яку використовують дводишні риби, ропухи, пустельні змії.

ВПЛИВ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЕНДОТЕРМНИХ ТВАРИН

Ефективним способом протидії низьким температурам в ендотермних організмів є волосяний покрив або підшкірна жирова тканина, які виконують функції теплоізолятора. Зміна теплопровідності під час тепловіддачі здійснюється завдяки інтенсивності периферійного кровообігу, або теплоізоляційної ефективності волосяного покриву чи оперення. Регуляція підшкірного кровообігу забезпечується шунтуванням артеріальної крові (рис 50): в шкірі судини звужуються, тоді як потоки крові внутрішніх органів збільшуються. Те ж саме відбувається у підшкірному жирі.

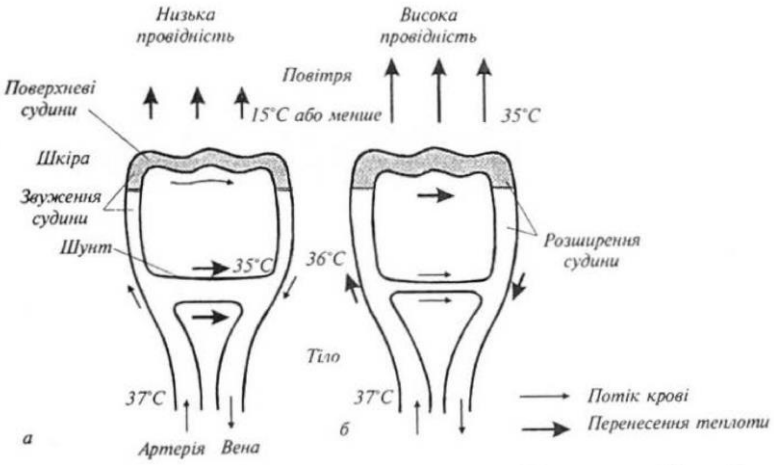


Рис. 50. Роль підшкірного кровообігу в регуляції теплопровідності поверхневих тканин організму

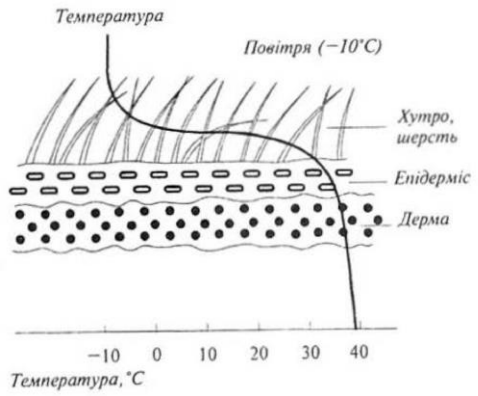
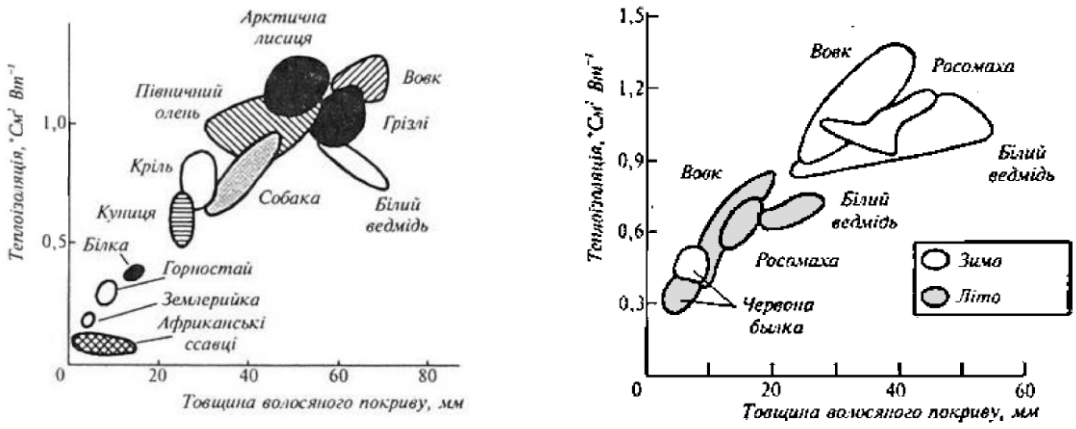


Рис. 51. Градієнт температури, що встановлюється на волосяному та шкіряному покривах тварини північних широт

Шерсть позбавлена кровопостачання, тому й теплоізоляційні і властивості змінюються при зміні кута нахилу волосся і товщини волосяного покриву тварини (рис. 51). Так, наприклад, корова чорно-рябої породи реагує на зменшення температури від +11,0 °С до -24,5 °С збільшенням кута нахилу волосу від 28° до 63° відповідно. Зволоження зовнішнього покриву призводить до зміни його теплоізоляційних властивостей. Так, наприклад, теплоізоляція гагари в повітрі становить 1,6 °С $\cdot м^2 \cdot Вт^{-1}$, тоді як в воді лише 0,8 °С $\cdot м^2 \cdot Вт^{-1}$. Крім того, теплоізоляційні властивості тварин залежать від ареалу мешкання та пори року (рис. 52).

Якщо температура зовнішнього середовища менша за нижню межу термонейтральної зони, в процес включається *термогенез.* Відрізняють два типи термогенезу — через активацію ферментативних систем обміну жирів в організмі і завдяки тремтінню. Перший спосіб базується на тому, що під час розщеплення або окислення жирів виділяється тепло, У деяких тварин, які реалізують цей спосіб теплопродукції, є спеціалізована бура жирова тканина, що міститься в області шиї та між лопатками. В цій тканині, насиченій кровоносними судинами, де міститься багато мітохондрій, відбувається процес окислення жирів, що супроводжується виділенням тепла. Другий спосіб передбачає можливість нагрівання організму за м'язових скорочень. Нервова система активізує різні групи скелетних м'язів, в результаті чого виникають дрібні результуючі рухи — тремтіння. Хімічна енергія, що утворюється через гідроліз АТФ, вивільняється у вигляді тепла. Втрати тепла у таких тварин зменшуються також завдяки невеликому значенню відношення *S/V,* де *S* площа поверхні тіла, а *V* — об'єм тіла тварини. Така реакція на низькі температури властива свійським тваринам (свиням, худобі, вівцям) та птахам.



а *б*

Рис. 52. Залежність теплоізоляційних властивостей волосяного покриву від його товщини: *а* — у тварин різних широт; *б* —у тварин в різні пори року

ВПЛИВ ТЕПЛОВИХ ФАКТОРІВ НА ЕКТОТЕРМНИХ ТВАРИН

Ектотермні організми отримують теплоту з навколишнього середовища завдяки сонячному (прямому, розсіяному і відбитому) випромінюванню, атмосферному випромінюванню; теплообмін здійснюється шляхом теплопровідності, конвекції, випаровування і випромінювання.

У ектотермних організмів теплопровідність тіла висока, оскільки вони погано ізольовані. Внаслідок цього тепло, яке виділяється через обмінні процеси, швидко переходить в оточуюче середовище. З іншого боку, висока теплопровідність дає змогу легко поглинати тепло з довкілля. У ектотермів протягом еволюційного розвитку розвинулася певна стратегія виживання в стресових температурних умовах, Деякі ектотермні організми спроможні змінювати частоту серцевих скорочень або кровообміну в поверхневих тканинах, завдяки чому нагрівання тіла проходить значно швидше, ніж охолодження. Ектотерми, що мешкають в умовах холодного клімату, мають в клітинах речовини - *антифризи,* що дають змогу витримувати температури нижче нуля; інші використовують тремтіння або скорочення м'язів, або регулюють підшкірний кровообіг. Невеликі тварини використовують можливість зміни мікроклімату за таких поведінкових заходів як перехід з освітлених зон в затінок, обертальних рухів, вертикальних переміщень, використання гнізда чи нори. До поведінкової стратегії тварин можна віднести зимову сплячку або заціпеніння амфібій, рептилій. Комахам властива діапауза - період припиненого розвитку, що зумовлює синхронізацію життєвого циклу комахи з умовами навколишнього середовища. Під час діапаузи комахи значно зменшують швидкість дихання, збільшують в'язкість внутрішньої рідини або підвищують рівень антифризу (гліцерину). У деяких травоїдних комах діапауза триває близько 10 місяців; активність комах підвищується лише в період цвітіння рослин.

ПОВЕДІНКОВА РЕАКЦІЯ ТВАРИН НА ТЕМПЕРАТУРУ

Реакція живого організму на інтенсивність температури, її зміну або температурні градієнти називається термотаксисоли. Тварини здатні вибирати оптимальну для їх існування температурну зону шляхом переміщення та накопичення в цій зоні, а також виявляти адаптивну поведінку щодо температурних градієнтів. Нематоди, які паразитують на теплокровних тваринах, переміщуються до більш високих температур. Слимаки також рухаються у бік температури, якій віддається перевага. Селективне накопичення в зонах оптимальних температур спостерігається у риб, рептилій, найпростіших та водоростей. Очевидно, термотаксис дає можливість кліщу вароа знаходити бджолу.

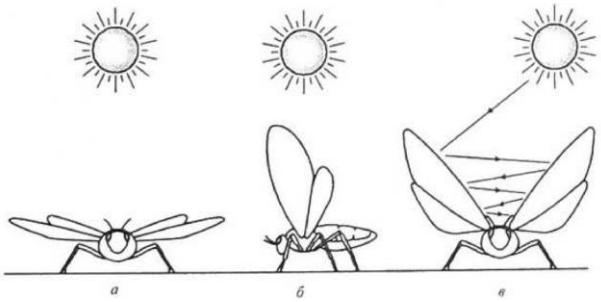


Рис. 53. Три положення, які може приймати комаха під сонячним опромінюванням: *а* — дорсальне; *б* — латеральне; *в* — при якому відбувається багаторазове відбивання сонячного випромінювання

Ще одна можливість поведінкової адаптації тварин — орієнтування тіла відносно сонячних променів, як це

робить пустельна сарана: вранці (при 17 - 20°С) вона розміщує своє тіло перпендикулярно до сонячних променів, тоді як опівдні (при 40 °С) — паралельно так, щоб поглинання світлової енергії було мінімальним (рис. 53).

Велику роль відіграє у наземних комах та рептилій рівень пігментації зовнішнього покриву — світло забарвлені істоти поглинають меншу енергію, ніж темнозабарвлені, Деякі комахи (метелики, бджоли, мурашки тощо) розігріваються за допомогою рухів, виробляючи тепло завдяки м'язовій активності.

ТЕРМОЛІКУВАННЯ ТВАРИН

Термолікування — це дозований вплив з лікувальною метою тепла, що віддається будь-якими теплоносіями або утворюється в тканинах організму при поглинанні ними енергії електромагнітних хвиль.

Застосування високих температур

Термодіагностика. Виявлення і окреслення локальних зон з підвищеною температурою є важливим завданням клінічної практики. Такі зони свідчать про активізацію обміну речовин і потоків крові, що можна пов'язувати з наявністю інфекції, закупорюванням кровоносних судин. Загальне підвищення температури надає інформацію щодо цілої низки можливих захворювань, наприклад, бактеріальної або вірусної інфекції.

Техніка реєстрації температури тіла тварини називається термографією. На рис. 54 наведено термограму корови чорно-рябої масті. Ділянки поверхні чорного кольору поглинають більше випромінювання і, таким чином, мають вищу температуру. Різниця температур темних і світлих ділянок становить близько 8°С.

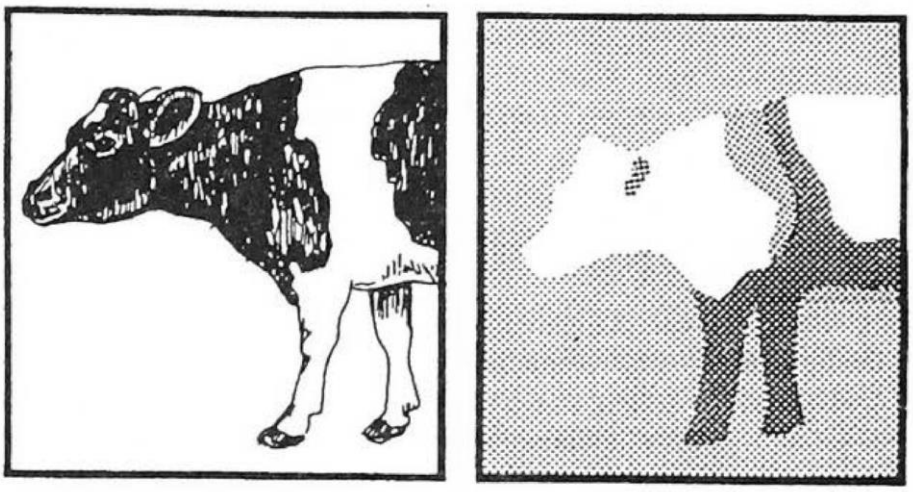


Рис. 54. Термограма корови чорно-рябої масті

Термотерапія. Застосування тепла для лікування запалювальних процесів використовується людством ще з античних часів. В сучасну епоху методи термотерапії реалізують у вигляді інфрачервоного випромінювання, високочастотної діатермії, парафінових ванн або припарок. Ці процедури стимулюють активізацію локальних потоків крові в зонах запальних процесів і тим самим прискорюють їх зведення нанівець. Сухе тепло використовують при лікуванні сильних опіків завдяки випотіванню плазми крові внаслідок її

дегідратації. Потоки теплого повітря або кисню варто застосовувати при лікуванні респіраторних захворювань,

Термохірургія. Найбільш поширеним застосуванням теплових ефектів у хірургії можна вважати проведення безкровних і стерильних операцій за допомогою CO_2 лазера, який характеризується потужним випромінюванням в інфрачервоній області спектра. Як приклад використання лазерного скальпеля можна навести операції з видалення некротизованих тканин при опіках різного ступеня свиней, зруйнування невеликих злоякісних пухлин шкіри й слизових оболонок, метастазів у печінці, дрібних пухлин сечового міхура, шийки матки, розтин тканин стопи у коней.

Використання низьких температур

Низькі температури, використовувані в клінічній практиці, отримують за допомогою твердого двоокису вуглецю (-79 °С) або рідкого азоту (-196 °С). Властивість біологічних тканин зберігатися при таких температурах протягом від однієї години до року знайшла застосування у технології кріоконсервації цих тканин з метою їх подальшого використання при трансплантації. Шкіра, кістки, рогова оболонка, серцеві клапани є об'єктами трансплантації, що зберігаються при низьких температурах.

Гіпотермія (локальна і загальна) може супроводжувати радіотерапію злоякісних пухлин; цей процес пов'язаний з блокуванням постачання кисню тканинами і зменшенням їх радіочутливості. Нормальні тканини витримують опромінювання, тоді як злоякісні тканини з більшою чутливістю приречені на ураження.

Застосування низьких температур перспективне при нейрохірургічних операціях, оскільки холод забезпечує локальну анестезію.

БІОЕЛЕКТРИКА

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ МЕМБРАН

Мембрани — це високоорганізовані клітинні структури, що відмежовують клітину від зовнішнього середовища і беруть участь у формуванні численних внутрішньоклітинних органел. Мембрани виконують важливі функції, забезпечують цілісність ют і тини та її активність. Одним з призначень мембран є їх участь в утворенні ізольованих замкнених структур — відсіків. Крім того, мембрани характеризуються вибірковою проникністю; вони служать селективними бар'єрами як для самої клітини, так і для клітинних структур. Мембрана, що оточує клітину, називається *поверхневою мембраною* (клітинною мембраною, плазматичною мембраною, плазма-лемою). Ця мембрана формує селективний бар'єр, який підтримує постійними різноманітні фізико-хімічні властивості клітини; через поверхневі мембрани здійснюється транспорт речовин і енергії між клітинами та її оточенням, а також процеси міжклітинної взаємодії. *Внутрішньоклітинні мембрани* виділяють всередині клітини окремі органели, такі як ядро клітини, апарат Гольджі, ендоплазматичний ретикулум, мітохондрії. За допомогою внутрішньоклітинних мембран здійснюються різні енергетичні перетворення, виконується робота ферментів. Порушення функцій мембран призводить до різноманітних патологій — злоякісних пухлин, тканинної гіпоксії тощо.

Будова і склад біологічних мембран

Мембрани містять в основному ліпіди, білки та вуглеводи. Згідно з сучасними уявленнями, структура мембрани описується на основі рідинно-мозаїчної моделі, за якою мембрана складається з бішару (подвійного шару) ліпідів. Мембранні ліпіди являють собою фосфоліпідні молекули, кожна з яких має полярну гідрофільну головку та неполярний гідрофобний хвіст. В ліпідний бішар занурені глобулярні білки (рис. 55).

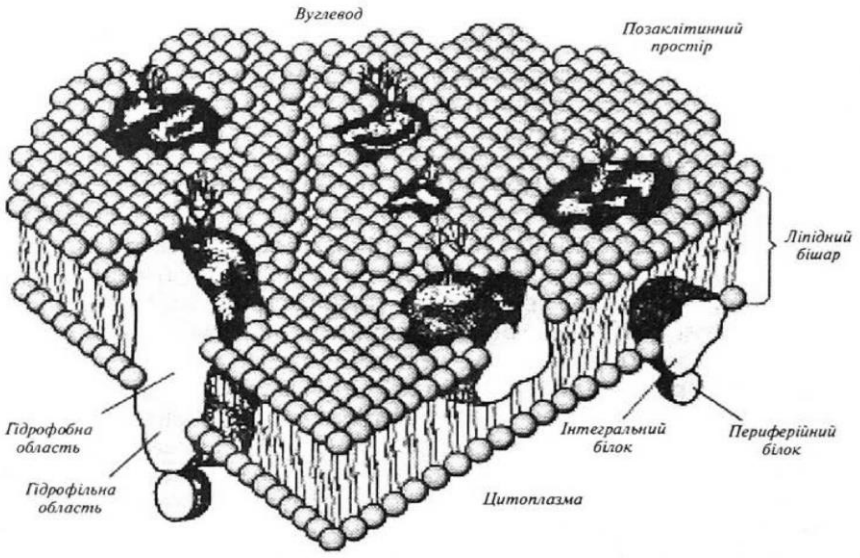


Рис. 55. Рідинно-мозаїчна модель мембрани, що складається з подвійного шару ліпідних молекул інтегральних та периферійних білків

Ці білки, що вишиковуються в бішарі і навіть перетинають його, називаються *інтегральними.* Перетинаючи бішар, інтегральні білки утворюють канал, через який можуть проходити іони. На поверхні ліпідного шару знаходяться периферійні білки. Вважається, що мембранні білки здатні пересуватися у площині мембрани. Ліпіди теж здатні до латеральної дифузії та переміщення між шарами.

На зовнішній поверхні мембрани містяться коротколанцюгові вуглеводи, які відіграють важливу роль в міжклітинних взаємодіях та модифікації поверхні клітини. Вуглеводи приєднуються до білків та ліпідів, утворюючи глікопротеїни та гліколіпіди відповідно.

Фізичні властивості мембран

Мембрани мають товщину близько 6÷10 нм; в'язкість мембранної рідини становить 0,1÷1,0 Па·с, коефіцієнт поверхневого натягу — 10^{-3}÷10^{-5}Н·м$^{-1}$. Електричні властивості біологічних мембран характеризуються такими параметрами: ємність (на одиницю площі) C/S=0,5÷1,3 мкФ·см$^{-2}$; опір (на одиницю площі) *R/S*= 10^2÷10^5 Ом·см$^{-2}$; різниця потенціалів у стані спокою $\Delta\varphi$ = 60÷90 мВ; напруженість електричного поля *E*= 10^6÷10^7 В·м$^{-1}$. До оптичних параметрів мембран можна віднести показник заломлення n=1,6.

Розглянемо основні пасивні електричні властивості клітинних мембран, зумовлені структурними особливостями. По-перше, ліпідний шар є непроникним для іонів, через що він здатний розділяти заряди і виконувати функції *ємності.*

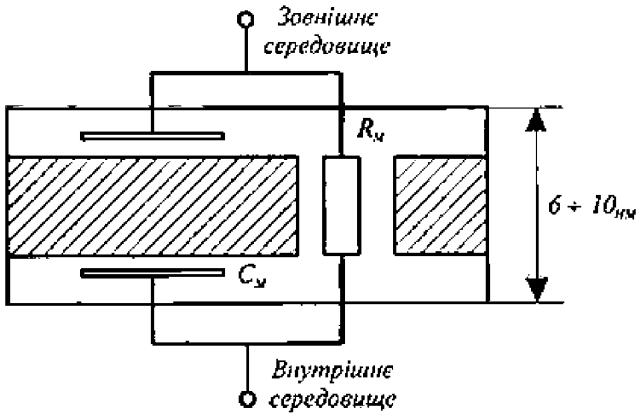


Рис. 56. Мембрана як еквівалентний електричний ланцюг

По-друге, ліпідний шар оснащений іонними каналами, через які можуть проходити неорганічні іони. Перенесення електричних зарядів через мембрану можна уявити у вигляді еквівалентного електричного ланцюга, який складається з паралельно з'єднаних конденсатора $C_м$ і опору $R_м$ (рис. 56). Функції конденсатора виконує ліпідний бішар, а опір є аналогом провідності, зумовленої іонними каналами.

МЕМБРАННИЙ ТРАНСПОРТ

Електрохімічний потенціал

Розглянемо деяку ємність, розділену на два відсіки мембраною, проникну тільки для іонів калію, Якщо концентрація розчинів *KCI* в обох відсіках однакова, то кількість іонів K^+ що переходять з відсіку I у відсік II і навпаки, буде однаковою. Через це різниця потенціалів, що встановлюється на мембрані, дорівнює нулю (рис. 57, *а*).

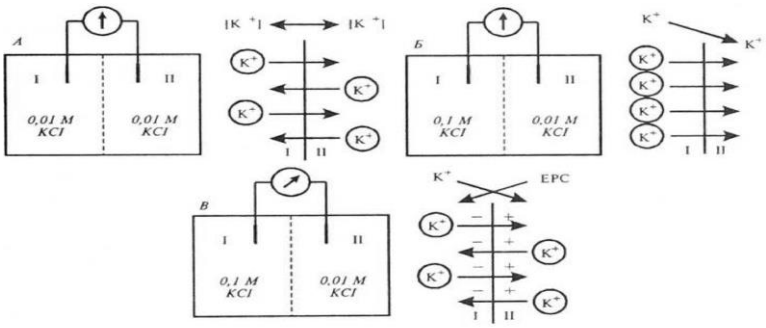


Рис. 57. Електрохімічна рівновага: *а)* в обох відсіках однакова концентрація КСІ; *б)*. збільшення концентрації КСІ у відсіку I приводить до виникнення потоку іонів K^+ у розчин II доки ЕРС не зрівноважить концентраційний градієнт; *в)* після досягнення рівноваги сумарний потік іонів K^+ через мембрану дорівнює нулю

Якщо концентрація розчину *KCI* у відсіку I перевищує концентрацію у відсіку II, буде мати місце дифузія іонів (рис. 57,*б*), за якої кількість позитивних зарядів у відсіку II збільшиться. Таким чином, на мембрані встановлюється різниця потенціалів (рис. 57,*в)*.

Рівновага Гіббса-Доннана

Більшість біологічних мембран проникні для малих іонів (наприклад, Na^+ або Cl^-), але здатні не пропускати в той же час великих іонів. У випадку, коли мембрана проникна для іонів обох знаків (така ситуація може виникнути, коли в розчин солі, іони якої пропускає мембрана, додають великі молекули, наприклад, білки, для яких мембрана непроникна), в системі встановлюється *рівновага Гіббса - Доннана:* $\Delta\varphi = \frac{RT}{F}\ln r$, де $r = \frac{C^{II}(A^-)}{C^{II}(C^+)} = \frac{C^{II}(C^+)}{\left[C^{II}(A^-) - Z_Q C_Q\right]}$

Тут $C^{II}(A^-)$ та $C^{II}(C^+)$ — концентрації малих аніонів та катіонів у відсіці II; C_Q

— концентрація великих іонів.

Види транспорту

Є такі типи транспорту (перенесення) речовин крізь мембрани:

− *пасивний транспорт,* що викликається градієнтом хімічного потенціалу (для незаряджених молекул або частинок) або градієнтом електрохімічного потенціалу (для іонів або заряджених частинок); цей вид транспорту здійснюється завдяки *дифузії* через ліпідний бішар (переміщення молекул з області високої концентрації в область низької концентрації за самодостатнього руху) або *полегшеної дифузії* (транспорту, що здійснюється за допомогою переносників або каналів) і не потребує затрат хімічної енергії;

− *активний транспорт* передбачає перенесення незаряджених молекул або частинок та іонів проти градієнта хімічного або електрохімічного потенціалу. Цей вид транспорту пов'язаний з енергетичними затратами.

Якщо пасивний транспорт приводить до вирівнювання градієнтів, то активний відновлює ці градієнти. Транспортні системи, що утворюють необхідний концентраційний градієнт, називаються *насосами* або *АТФазами.* Прикладом системи активного транспорту є Ca^{2+}*насос* (або Ca^{2+}- *АТФаза),* який являє собою фермент, локалізований в саркоплазматичному ретикулумі, що створює градієнт концентрації Ca^{2+} в м'язах і активізує м'язове скорочення. Транспорт Ca^{2+} відбувається завдяки гідролізу АТФ, під час якого виділяється достатньо енергії для перенесення двох іонів Ca^{2+}.

УТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ РИБАМИ

Близько 300 видів риб здатні генерувати власні електричні поля — слабкі, напруженістю від кількасот мілівольт до кількох вольт, для електролокації і комунікації та сильні, напруженістю до кількасот вольт, для відлякування хижаків або оглушення жертви. Сильноелектричні види риб володіють спеціалізованими електричними органами, тоді як слабкоелектричні види мають морфологічно виражені тканини. Утворюються електричні поля за допомогою так званого електричного органу, що генерує електричні розряди. Складається електричний орган з клітин електроцитів, з'єднаних послідовно або паралельно. Форма, кількість та порядок розташування електроцитів залежить від виду. Так, електричний орган ската *Torpedo* містить 500÷1000 з'єднаних паралельно стовпчиків електроцитів, по 1000 клітин в кожному стовпчику; діаметр клітин становить 5÷7 мм, а товщина — 10÷30 мкм; ще один представник скатів, *Narcine,* має близько 400 стовпчиків з 300÷500 клітин діаметром 2 мм і товщиною 7 мкм; крім основного органу є до-

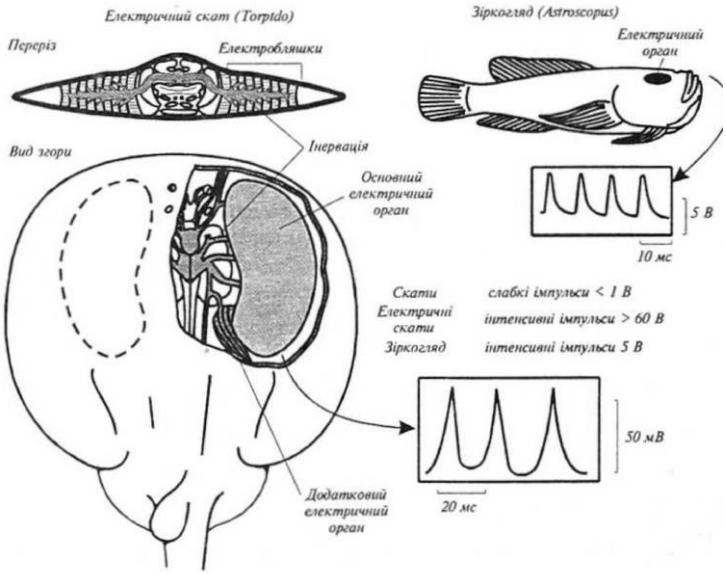


Рис. 58. Електричні органи морських риб та структура електричних розрядів

датковий, що містить 10 стовпчиків по 200 клітин кожний (рис. 58). Електричний орган слабкоелектричних риб складається з електроцитів, які простягаються вздовж латерального пучка тіла риби (рис. 59). Кількість електроцитів у електричного вугра *Electrophorus* досягає 6000. Електричні розряди риб характеризуються такими параметрами як інтенсивність (амплітуда), тривалість, хвильова форма, частота повторення. Величина цих параметрів залежить від виду та способу життя риби.

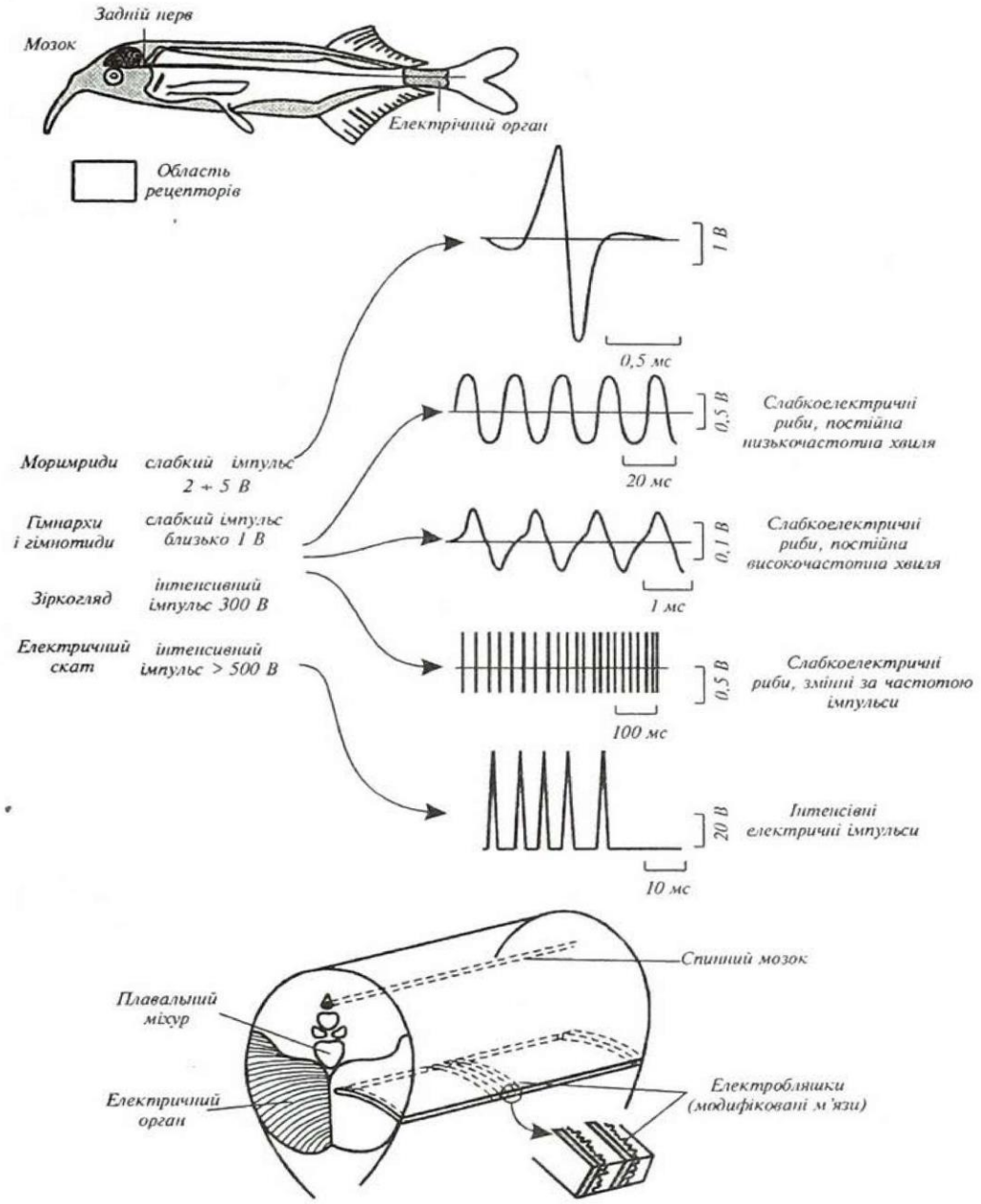


Рис. 59. Електричні органи прісноводних риб та структура електричних розрядів

Так, електричний вугор в стані пошуку генерує імпульси напругою до 50 В, тривалість яких становить близько 2 мс, тоді як в момент виявлення здобичі він створює імпульси напругою 300÷600 В тривалістю 0,6÷2 с.

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

Електрофорезом називається спрямоване переміщення електрично заряджених макромолекул, частинок дисперсної фази в дисперсному середовищі, або іонів в електропровідному розчині під впливом зовнішнього електричного поля.

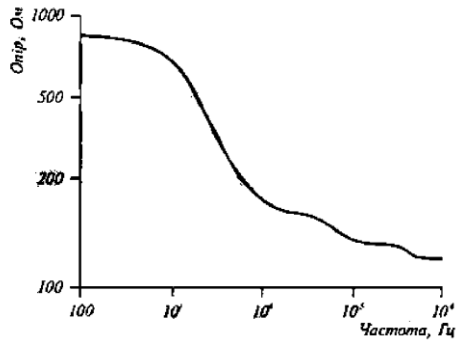


Рис. 60. Залежність електричного опору тканини від частоти

Електричні властивості тканини. Якщо прикласти електроди до черевної порожнини і вимірювати залежність електричного опору від частоти, можна помітити, що крива цієї залежності спадає зі зростанням частоти (рис. 60). З точки зору електричних властивостей всі речовини поділяються на діелектрики (електропровідність ($G<10^{-10}$ См·м$^{-1}$) та провідники ($G>10^{4}$ См·м$^{-1}$). Шар діелектрика товщиною *d* і площею *S* можна уявити як конденсатор. Біологічна тканина характеризується властивостями як діелектрика, так і провідника (рис. 61).

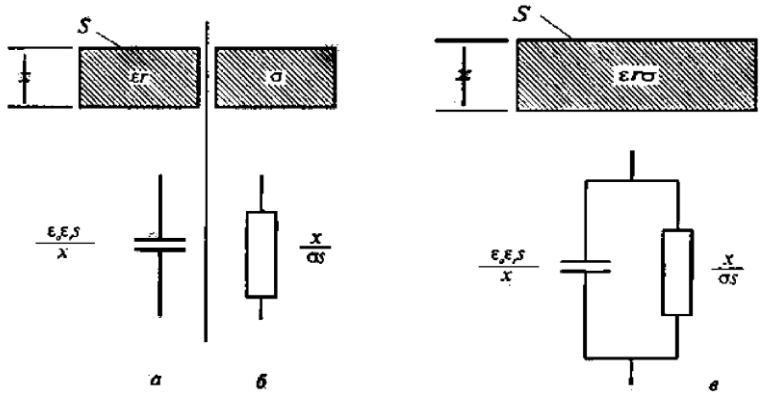


Рис. 61. (а) - шар діелектрика з ємнісними властивостями; (б) - провідника з провідними властивостями, (в) - біологічна тканина як паралельне поєднання ємності та провідника

В тканині присутні вільні електричні заряди, що надають їй властивостей провідника; крім того, є й зв'язані заряди, здатні зміщуватися під впливом прикладеного електричного поля і утворювати електричний диполь. Якщо вільні заряди впливають на провідність тканини, зв'язані заряди пов'язані з діелектричною проникністю тканини, У тканині під впливом прикладеного електричного поля Е вільні електричні заряди переміщуються: позитивні — вздовж поля, негативні — проти поля, тобто виникає електричний струм, що називається струмом провідності: $I_{пр} = \sigma E S$

де σ — питома провідність тканини, S — площа зразка тканини.

Густина струму провідності визначається за виразом: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

Крім того, в тканині (що є діелектриком) на електростатичне поле вільних зарядів накладається додаткове поле зв'язаних зарядів, здатних викликати пере-

розподіл вільних зарядів. Електростатичне поле вільних зарядів характеризується *вектором електричної індукції (електричного зміщення):* $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$

Одиниця вимірювання електричної індукції - Кл·м$^{-2}$

Зміщення зв'язаних зарядів характеризується *струмом зміщення*:

$$I_{зм} = \varepsilon\varepsilon_0 S\frac{dE}{dt} = S\frac{dD}{dt}$$

та *густиною струму зміщення*: $\vec{j} = \varepsilon\varepsilon_0\frac{d\vec{E}}{dt}$

У випадку змінного електричного поля синусоїдної форми ($E = E_0 \sin\omega t$) струм зміщення визначається так: $\vec{j} = \varepsilon\varepsilon_0 S\omega E_0 \cos\omega t$

де ω — частота змінного електричного поля.

Вплив електричних полів на живі організми. Одними з основних антропогенних джерел електричних полів є лінії електропередачі надвисокої напруги. Сучасна енергетика базується на лініях електропередачі (ЛЕП) з напругою 220, 500, 750, і 1150 кВ, Підготовка трас для ЛЕП, вирубування просік, установка опор, монтаж проводів і подальша експлуатація ЛЕП зумовлює відповідну реакцію з боку екосистем. Будівництво і експлуатація ЛЕП викликає необоротні зміни в видовому складі, фітомасі, просторовій і часовій структурі рослинності на просіках, особливо в зонах тундри, лісотундри і північної тайги. Відновлення рослинного покриву вкрай повільне, що сприяє ерозійним процесам. Утворення просік супроводжується також значними змінами тваринного компонента екосистем: зникають тварини, що мешкають в кронах дерев; змінюється видовий склад, численність і різноманіття птахів; збільшується концентрація гризунів.

Без сумніву, впливають ЛЕП й на людський організм. Розростання міст до рівнів мегаполісів супроводжується наближенням ЛЕП до новобудов. Допустимі норми електричного поля потребують віддалення опор ЛЕП на 30-40 метрів від жилих кварталів.

Крім того, джерелами електромагнітних полів є електротехнічне обладнання житлових приміщень, побутові електроприлади, теле- та радіостанції, системи супутникового та сотового радіотелефонного зв'язку, персональні комп'ютери, медичні прилади. Згідно з накопиченими даними, вплив електромагнітних полів на людину призводить до негативних змін стану здоров'я, викликаючи зсуви в функціонуванні серцево-судинної, ендокринної, гематологічної, імунної систем, а також збільшує ризик розвитку онкопатології.

Для риб характерні певні реакції на зовнішні електричні поля. Під час вмикання джерела поля риба демонструє рухливу реакцію: зі збільшенням напруженості поля вона пробує вийти із зони дії поля; при подальшому підвищенні напруженості прямує до аноду (так званий *гальванотаксис).* Змінні електричні поля викликають *осцилотаксис* — розміщення риби впоперек силових ліній поля. Реакція риб на імпульсні електричні поля залежить від амплітуди, частоти і тривалості імпульсів.

Личинки американського вугра *Anguilla rostrata* мігрують з районів нересту в Саргасовому морі до північноамериканського узбережжя Атлантичного океану на відстань близько 1000 км. Цілком можливо, що при цьому вони використовують для навігації геоелектричні поля, що створюються в океані течіями (такими

як Гольфстрім). Напруженість таких полів становить 0,5 мкВ · $см^{-1}$, а чутливість вугра — 0,002 мкВ · $см^{-1}$.

Планарії здатні визначати наявність і відрізняти географічний напрямок горизонтальних електростатичних градієнтів, що не перевищують 0,1 мкВ·$см^{-1}$.

Бджоли проявляють здатність реагувати на зовнішні електричні поля. Максимум чутливості бджолиної сім'ї, що складається з 10000 особин, на електричні поля становить 4÷5 В · $см^{-1}$. Під впливом електричних полів відбувається зміна параметрів мікроклімату всередині вулика.

ЕЛЕКТРОРЕЦЕПЦІЯ

Процес отримання живим організмом через чутливі органи біологічно значущої інформації про природні електричні поля або поля біологічного походження називається *електрорецепцією.*

Електрорецепція використовується тваринами (рибами, амфібіями та примітивними ссавцями) для пошуків здобичі, уникнення хижаків, внутрішньовидової комунікації, розмноження, просторової орієнтації і навігації, попередження щодо природних явищ — землетрусів, штормів, ураганів тощо. Інтенсивність електричних полів, на які здатні реагувати тварини, становить від $5 \cdot 10^{-9}$ В · $м^{-1}$ до понад 10^{-4} В · $м^{-1}$; частотний діапазон електричних полів змінюється від 0 до понад 15 кГц для різних видів.

Серед 4,5 тисяч видів ссавців електрорецепцію-виявлено лише у качконоса *Omithorhynchus anatinus*.. Дзьоб тварини вкритий шкірою; в протоці шкіряної слизової залози дзьоба містяться електрорецептори. Слиз захищає електрорецепторні клітини від висихання під час виходу тварини насушу, а в воді завдяки низькому опору забезпечує підведення електричного струму до рецепторних клітин. Електрочутливість качконоса — 50÷80 мкВ · $см^{-1}$.

Риби живуть у водному середовищі, яке характеризується високою електропровідністю; саме риби здатні створювати електричні поля й розпізнавати об'єкти у воді (рис. 62).

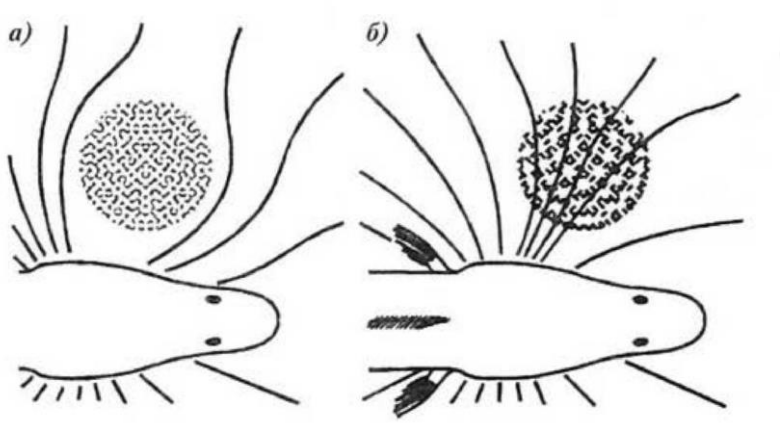


Рис. 62.Здатність риби реєструвати наявність діелектрика (а) або провідника (б) у водному середовищі за допомогою електричного поля

Можна розділити риб на таких, які мають електрорецепторні системи і сприймають електричні поля, і таких, які їх не мають. Деякі види риб мають елек-

торецептори, розміщені поблизу бокових сенсорних органів; такі електрорецептори називають *ампулами Леренціні.* Ці органи складаються з епідерміальної ампули, яка містить сенсорний епітелій і з'єднана з поверхнею тіла тонким каналом (рис. 63, а).

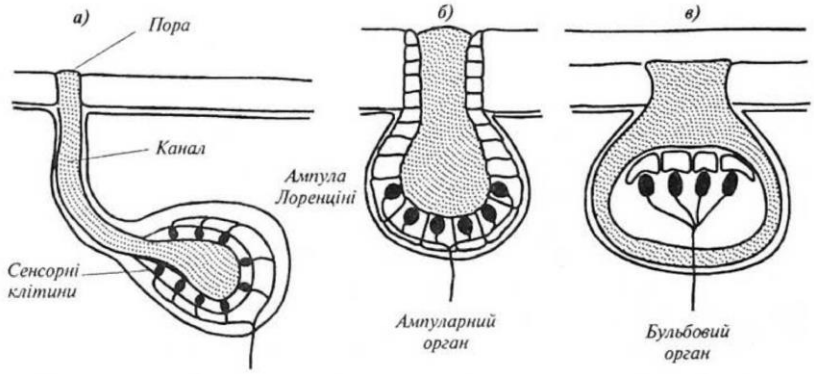


Рис. 63.Загальна структура електрорецепторних органів риб

Канал заповнений мукополісахаридною желеподібною речовиною, що має високу електропровідність. Між основою та закінченням каналу виникає різниця потенціалів. *Ампулярний орган* відрізняється від ампули Лоренціні довжиною каналу (рис. 63,б). *Бульбовий орган* не має сполучного каналу (рис. 63,в).

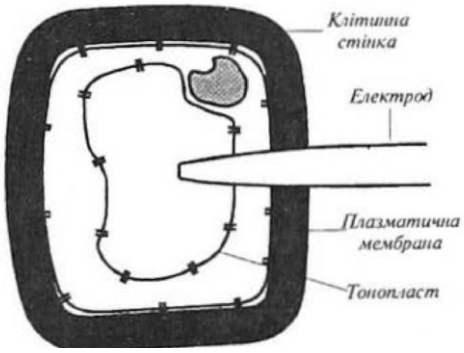
Електрорецепторні системи виявлено у сомових риб, акул і скатів. Мембрана електрорецепторної клітини спрямована до зовнішнього середовища і має менший електричний опір, ніж мембрана на базальному боці клітини. Струм, що входить в клітину ззовні, викликає деполяризацію мембрани, яка активізує кальцієві канали в цій частині клітини. Результатом цього є збільшення частоти нервових імпульсів в сенсорному волокні, зв'язаному з рецептором. Чутливість риб, які мають електрорецептори, коливається від 0,01÷0,02 мкВ · $см^{-1}$у акул і скатів до 1÷2 мкВ · $см^{-1}$у гім ноти дів та мормиридів.

Хоча електрорецепторів у комах поки ще не виявлено, можна казати про універсальність механізмів сприймання ними електричних полів. Проаналізуємо існуючі припущення. Згідно з однією з гіпотез, у процесі електростатичної індукції у тканинах комах (які мають опір $10^2 \div 10^3$ Ом) відбувається перерозподіл зарядів. Електричні струми, що виникають при цьому, достатні для сприймання нервовою системою. Інша теорія припускає нагромадження на екзоскелеті комахи під час механічних взаємодій із навколишнім середовищем електричних зарядів; завдяки електростатичній взаємодії, що виникає при цьому, можуть мати місце механічні деформації окремих структурних елементів. Так, антени бджоли притягуються до заряджених тіл, і вона змушена відводити ці органи. Кут відхилення залежить від величини заряду. Під впливом електромагнітних полів антени здійснюють коливання, амплітуда яких залежить від параметрів поля.

ЕЛЕКТРИЧНА АКТИВНІСТЬ ОРГАНІЗМУ

Техніка вимірювання мембранних струмів

Іони, що проникають крізь мембрани, несуть електричний заряд, завдяки чому в мембрані утворюються електричні струми величиною порядку 10^{-12} А. Вимірювати ці струми можна за допомогою мікроелектродів з витягнутих тонких скляних трубок. Один з перших підходів до реалізації таких вимірювань передба-



64. Введення мікроелектрода вклітину.

Рис. 65. Принцип петч-клемп-методу реєстрації мембранних струмів

чав безпосереднє занурення мікроелектрода в клітину (рис. 64). Але така техніка могла застосовуватися лише до великих клітин; крім того, мікроелектрод перетинав і плазматичну, і вакуолярну мембрани, що ускладнювало процес вимірювань внаслідок впливу струмів через обидві мембрани.

Ці проблеми були успішно розв'язані за допомогою *петч-клемп-методу,* який полягає в установленні тісного контакту відполірованого скляного мікроелектрода (мікропіпетки) діаметром 0,5÷1 мкм з мембраною, що оточує ізольований протопласт (клітину, без клітинної оболонки). Такий тісний контакт досягався завдяки легкому всмоктуванню. Назва цієї техніки походить від англійських слів «patch» — латка, пластир (невелика область в зоні контакту мікропіпетки з мембраною) та «clamp» — скріплювати. Вимірювання проводять або з прикріпленою цілою клітиною, або лише з тією її частиною, що залишається в отворі мікропіпетки (рис. 65). В останньому випадку латку розміщують у фізіологічному розчині, який оточує її зовні, та подається через піпетку.

Малі діаметри мікропіпетки дають змогу вимірювати струми через окремі іонні канали. Оскільки протопласт має сферичну форму, можна виміряти його об'єм і оцінити потік зарядів через одиницю площі мембрани. Ще одна перевага методу полягає в можливості відрізняти електричні події, що відбуваються на плазматичній і вакуолярній мембранах, і контролювати склад зовнішнього і внутрішнього середовищ.

Електрична активність серцевої клітини

Електрична активність серця може бути розглянута на основі уявлень про серце як *електричний диполь,* що знаходиться у провідному середовищі. Диполь являє собою пару різнойменних електричних зарядів, розділених певною відстанню. Дипольний електричний момент одиниці об'єму є векторною величиною. Розглянемо як приклад диполя серцеву клітину у сольовому розчині (рис. 66 *а*). Вимірювання різниці потенціалів в такій клітині буде здійснюватися між точками *A-B* та *C-D* (рис. 66,*б*).

Точка *1* на рис. 66, *в* відповідає потенціалу спокою на клітинній мембрані. Цьому стану клітини відповідає негативно заряджена внутрішня частина і позитивно заряджена зовнішня частина клітини. Різниця потенціалів між точками *A-B,* як і між точками *C-D* дорівнює нулю.

Точка 2 відповідає виникненню потенціалу дії в лівій частині клітини та його поширенню у бік правої її частини. При цьому на лівій ділянці клітини змінюються знаки зарядів на зовнішній і внутрішній частинах клітини, а на правій частині

нічого не відбувається.

В цих умовах клітина перетворюється у диполь, спрямований від позитивно зарядженої лівої до негативно зарядженої правої частини клітини. В цьому разі в точці *А* виникає позитивний потенціал відносно точки різниця потенціалів між точками *C-D* дорівнює нулю.

Точка *3* відповідає стану клітини, коли зовнішня частина заряджена негативно, а внутрішня — позитивно. Різниця потенціалів, що реєструється між точками *A-B* і *C-D* дорівнює нулю; така ситуація відповідає деполяризації клітини.

Точка 4 відповідає процесу реполяризації клітини — зміні знаків зарядів порівняно зі станом, що відповідає точці 2. В цьому разі ліва частина клітини перебуває у стані спокою, а права відповідає максимуму потенціалу дії. В точці *А* виникає негативний відносно точки *В* потенціал. Вектор диполя змінює напрямок на протилежний.

Точка 5 відповідає стану спокою клітини: різниця потенціалів між точками *A -B* дорівнює нулю. Протягом усього процесу різниця потенціалів між точками *C-D* залишається рівною нулю.

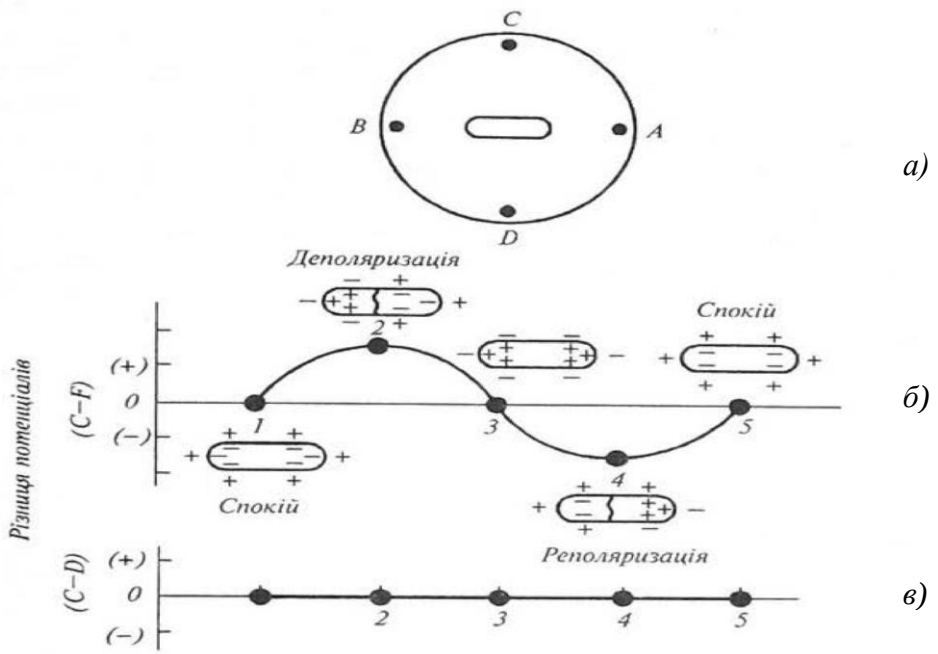


Рис. 66. Окрема серцева клітина у сольовому розчині: *а* — клітина як диполь і точки, між якими вимірюється різниця потенціалів; *б* — характер зміни різниці потенціалів між точками А-В протягом збудження та поширення потенціалу дії; *в* — характер зміни різниці потенціалів між точками C-D протягом збудження та поширення потенціалу дії

Принципи електрокардіографії

Електрокардіографія. Процедура вивчення механізмів електричної активності серця, її характеристики в нормі і при патологічних процесах, а також техніка реєстрації електричної активності міокарду впродовж серцевого циклу називається *електрокардіографією.* Залежність електричного потенціалу на поверхні тіла тварини від часу називається *електрокардіограмою (ЕКГ).*

Розглянемо характерні риси електрокардіограми. За поширення потенціалу

дії ліва передня кінцівка (їй відповідає точка *А* на рис. 67) заряджається позитивно відносно правої (точка *В* на рис. 67). Першою характерною ділянкою електрокардіограми є так звана *Р-хвиля* (або *атріальна хвиля),* якій відповідає початок деполяризації передсердя (рис. 67,*а*), Ця позитивна хвиля *Р* поширюється досить повільно — близько 0,08-0,1 с.

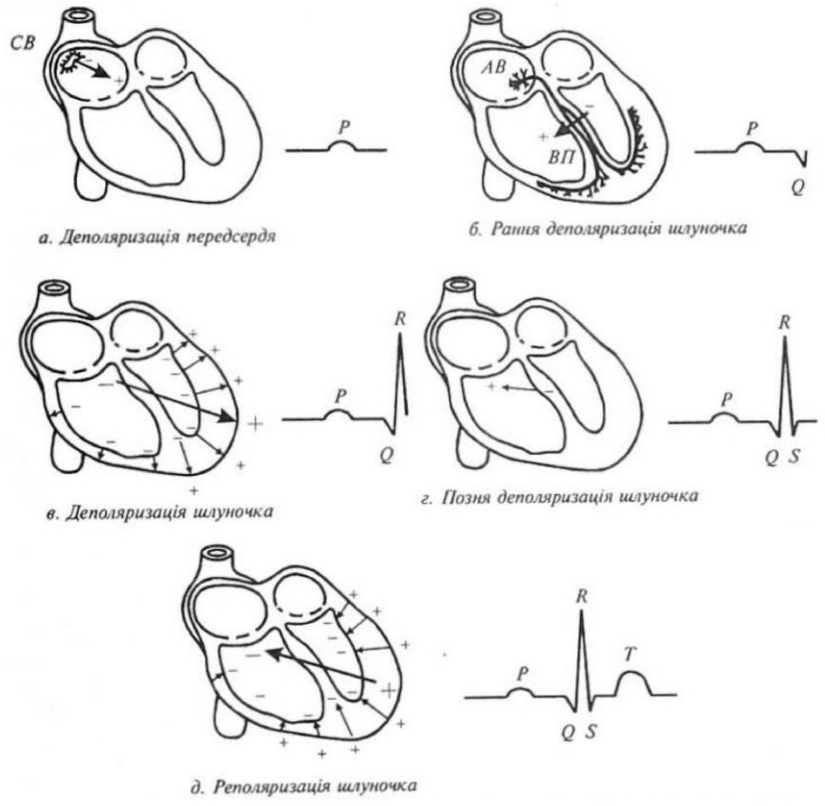


Рис. 67. Поширення потенціалу дії до передсердь та шлуночків і відповідне формування різниці потенціалів між лівою та правою передніми кінцівками тварини

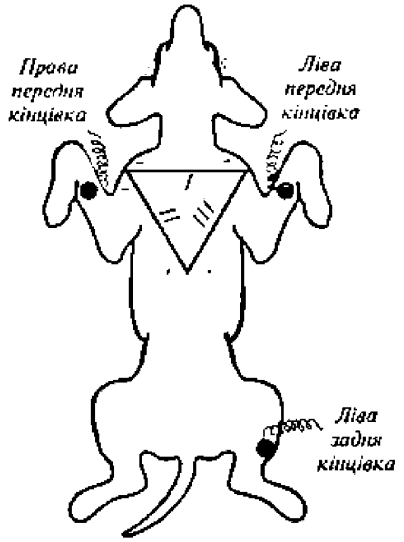


Рис. 68. Вимірювання електрокардіограми у тварини за допомогою трьох електродів

Потенціал дії досягає атріовентрикулярного (пов'язаного з передсердями та шлуночками) вузла *А В* і переходить на систему субендокардіальних (внутрішніх) волокон Пуркіньє *ВП* (рис. 67,*б*), Ці тканини настільки дрібні, що не створюють будь-якого електричного потенціалу на поверхні тіла. Наступна ділянка електрокардіограми пов'язана з деполяризацією шлуночків серця. Стрілка на рис. 67 показує напрямок поширення процесу деполяризації, який характеризується виникненням невеликої від'ємної різниці потенціалів між лівою і правою передніми кінцівками — так званої *Q-хвилі.* Подальший етап — утворення великого позитивного максимуму, який називається *R-хвилею.* Цей процес

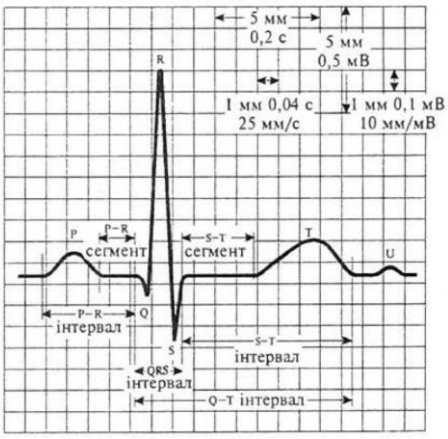


Рис. 69. Структура електрокардіограми з позначеннями максимумів(зубців) та часових інтервалів

супроводжується поширенням деполяризації до стінок обох шлуночків. Сумарним результатом цього процесу є формування електричного диполя, спрямованого по діагоналі донизу (рис. 67, *в*). *R-хвиля* є одним з найважливіших діагностичних компонентів електрокардіограми.

Закінчується процес деполяризації шлуночків формуванням невеликого негативного максимуму — *S-хвилі* (рис. 67, *г*). Фізичний зміст походження цієї хвилі ще не зовсім з'ясовано.

Процес реполяризації шлуночків супроводжується виникненням позитивного потенціалу — так званої *T-хвилі* (рис. 67, *д*).

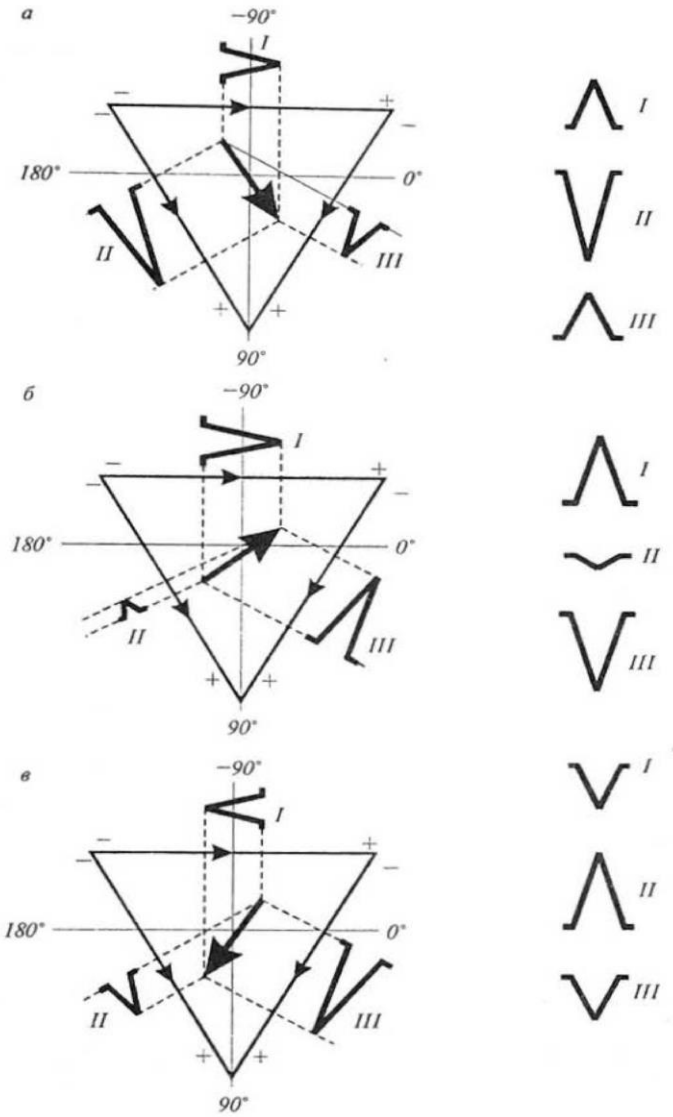


Рис. 70. Напорямок вектора, що відповідає електричній осі серця в нормі (а), зміщеного відносно анатомічної осі (б) і за патології (в)

Звичайно ці вимірювання проводять за допомогою трьох електродів, які розміщують на передніх та задніх кінцівках тварини (рис. 68). Типову електрокардіограму наведено на рис. 69. Аналіз величини максимумів та часових інтервалів між ними дає можливість аналізувати активність серця та виявляти різноманітні патологічні процеси.

Гіпотеза Ейнтховена. У 1908р. Ейнтховен, який є автором ідеї реєстрації ЕКГ, запропонував розглядати серце як вектор, розміщений в рівнобічному трикутнику. Проекції цього вектора на сторони трикутника відповідають різницям потенціалів, що реєструються між кінцівками (кожна така різниця потенціалів називається *«відведенням»).*

Амплітуди і полярності проекцій цього вектора на сторони трикутника свідчать про стан роботи серця. У нормі напрямок вектора коливається в межах між $0 \div +90^0$ (рис. 70,*а*); відхилення вектора в область 0÷-90° свідчить про зміщення анатомічної осі серця наліво (рис. 70,*б*). Розташування вектора в секторі +90÷+180° відповідає можливим патологіям серця (рис. 70,*в*).

Розглянемо зміни, що відбуваються в електрокардіограмі при різних патологіях. Електрокардіограма тварини, що хворіє на гіпертрофію правого шлуночка, подана на рис. 71. Гіпертрофія правого шлуночка пов'язана з такими дефектами як збільшення об'єму крові, що накачується правим шлуночком, або тиску, створюваного цим шлуночком в процесі скорочення. Відмітною рисою ЕКГ в даній ситуації є наявність негативної полярності *QRS*-максимуму (замість позитивного в нормі) у відведенні *I*. Зміна полярності цього максимуму викликається зсувом осі серця або збільшенням маси правого шлуночка. Крім того, спостерігається аномально високий рівень *QRS*-максимумів у *II* та *III* відведеннях.

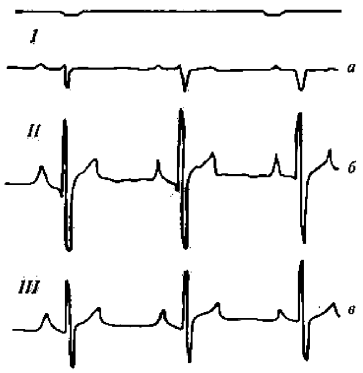


Рис. 71. Електрокардіограма тварини, що страждає гіпертрофією правого шлуночка серця: наявність від'ємної полярності QRS-комплексів у відведенні I (а); збільшення амплітуди QRS-комплексів у II (б) та III (в) відведеннях

Ішемічна хвороба серця або інфаркт викликають такі зміни в ЕКГ як зсув догори інтервалу *S-T* (рис. 72, *а*). Таку ситуацію можна пояснити тим, уражена ділянка серця не зберігає потенціалу спокою; ця область деполяризована відносно здорової тканини, що призводить до утворення диполя (рис. 72,*б*) під час інтервалу *T-P*.

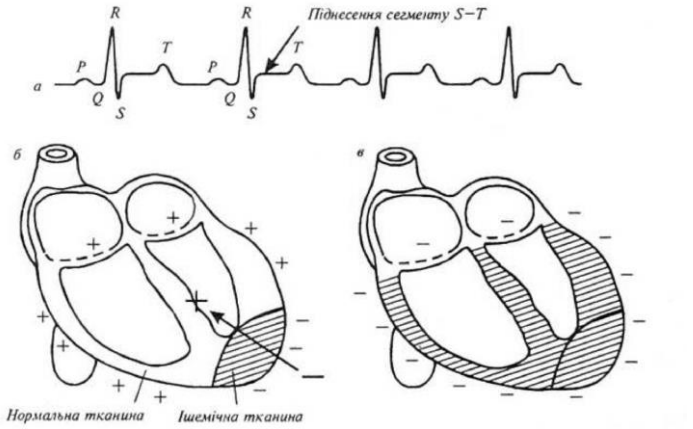


Рис. 72. Зсув догори інтервалу S-T внаслідок ішемічної роботи серця (а); виникнення диполя між ішемічною та здоровою тканинами (б); зникнення диполя через деполяризацію всього шлуночка (в)

Протягом *S-T*- інтервалу весь шлуночок, в тому числі й ішемічна область, деполяризується, внаслідок чого диполь зникає, *S-T*- інтервал зростає відносно більш негативного потенціалу, властивого стану спокою шлуночка.

Передчасне скорочення шлуночка призводить до такої картини (рис. 73): піс-

ля п'яти нормальних максимумів виникає аномальний максимум, який характеризується зникненням Р-хвилі та зростанням R- і S-максимумів. Пауза між аномальним та наступним максимумами теж збільшується.

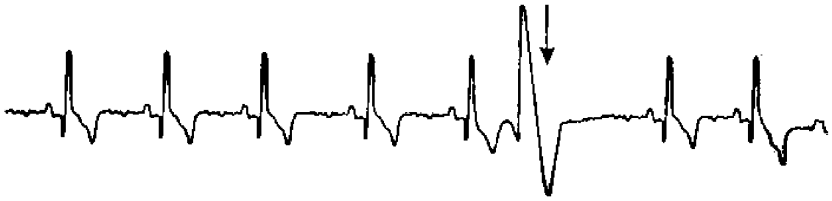


Рис. 73. Виникнення аномального максимуму після п'яти нормальних максимумів внаслідок передчасного скорочення шлуночка

Приклади електрокардіограм, що відповідають *тахікардії* (збільшенню пульсу до 235 ударів за хвилину) і *брадикардії* (зменшенню пульсу до 55 ударів за хвилину) наведено на рис. 74.

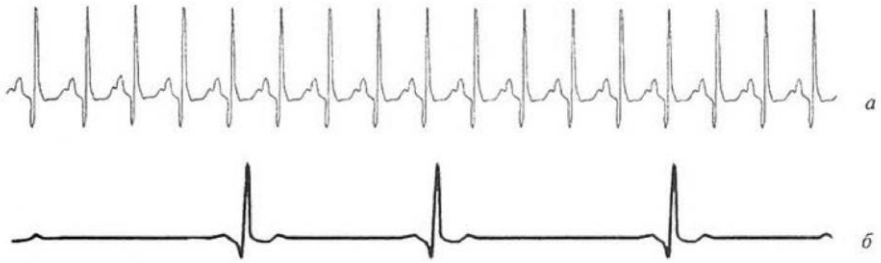


Рис. 74. Електрокардіограми, що відповідають тахікардії (а) та брадикардії (б)

Блокування атріовентрикулярного вузла викликає зростання *P-R*-інтервалу (рис. 75, *а*), часткове зникнення *QRS* -комплексів (рис. 75, *б*) або утрату синхронізації між *P*-максимумами та *QRS*-комплексами (рис. 75, *в).*

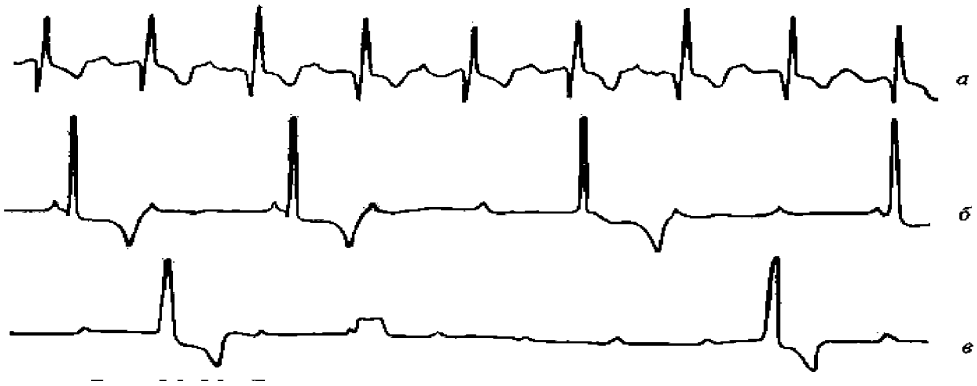


Рис. 75. Електрокардіограми, що відповідають блокуванню атріовентрикулярного вузла: зростання P-R — інтервалу (а); часткове зникнення QRS — комплексів (б); втрата синхронізації між P — максимумами та QRS — комплексами (в)

На рис. 76,*а* подано електрокардіограму тварини, що хворіє на *вентрикулярну тахікардію* (вентрикулярна — така, що стосується шлуночка серця). Перші п'ять хвиль є аномальними за формою; *P*-хвилі відсутні. Далі йдуть нормальні *QRS-T*послідовності з попередніми Р-хвилями, а потім вентрикулярна тахікардія

поновлюється.

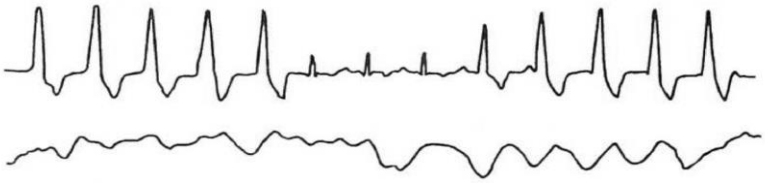


Рис. 76. Електрокардіограма тварини, що хворіє на шлуночкову тахікардію: поява перших п’яти аномальних хвиль і відсутність Р-хвиль (а); перетворення шлуночкової тахікардії у вентрикулярну фібриляцію (б)

Вентрикулярна тахікардія часто перетворюється у *вентрикулярну фібриляцію* (рис. 76,*б*), що характеризується несподіваними флуктуаціями без будь-якої помітної структури

Електрична активність мозку. Принципи електроенцефалографії

Процедура вивчення біоелектричних процесів, пов'язаних з виникненням активності в структурах мозку, з переходом їх від відносного спокою до активного або гальмівного стану з метою дослідження функціонального стану головного мозку на основі реєстрації біопотенціалів, називається *електроенцефалографією.* Типова *електроенцефалограма (ЕЕГ)* являє собою комбінований ефект нейронних потенціалів, що фіксуються на значній ділянці кори головного мозку (рис. 77*)*.

У процесі електроенцефалографії реєструють біоелектричні сигнали. Залежно від частоти *f* та амплітуди *A* цих сигналів розрізняють такі типи хвиль (рис. 78):

α— хвиля, *f* = 8÷13 Гц, *A=100* мкВ, синусоїдна форма;

β — хвиля, *f* = 20÷50 Гц менша амплітуда, нерегулярна форма;

γ — хвиля, *f* <3,5 Гц;

θ — хвиля, *f* = 3,5÷8 Гц.

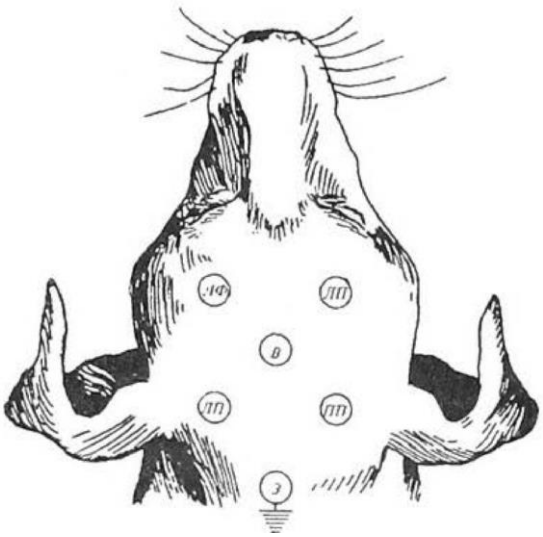


Рис. 77.Точки зондування під час реєстрації ЕЕГ: ЛФ - ліва фронтальна; ПФ – права фронтальна; В – верхівка; ЛП – ліва потилична; ПП – права потилична; З – заземлення.

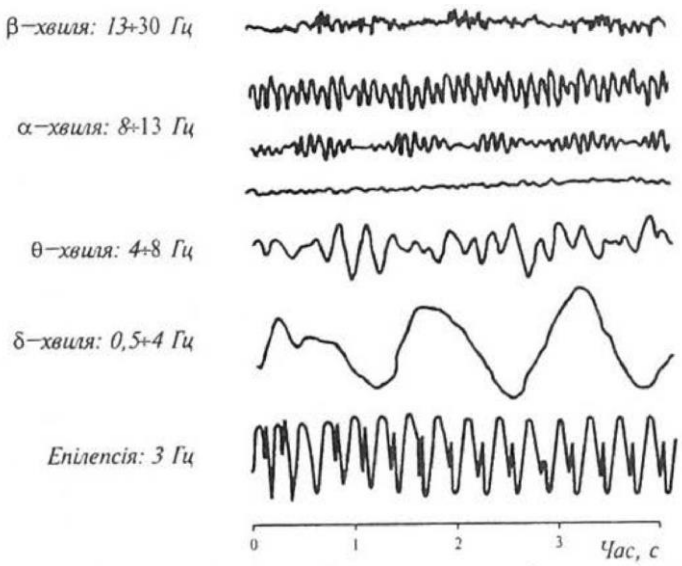


Рис. 78. Приклади електроенцефалограм

Рівень шумів, що реєструються, дорівнює близько 2 мкВ, Датчиками електричних полів мозку є диски *Ag-AgCI*, кі-

лькість яких досягає близько двох десятків. Структуру електроенцефалограм, знятих у процесі сну пацієнта,наведено на рис. 79. Чутливий уві сні пацієнт демонструє несинхронізовані високочастотні коливання (рис 79, *а*). Пацієнт, що дрімає із заплющеними очима, створює велику кількість ділянок з α-хвилями (рис. 79, *б*); легкий сон викликає збільшення амплітуди коливань (рис. 79, *в*); глибокий сон сприяє появі повільних хвиль з великою амплітудою (рис. 79, *г*), яка збільшується в процесі сну (рис. 79, *д).* Сон, що супроводжується швидким рухом очей (парадоксальний сон), характеризується високочастотними сигналами з малою амплітудою (рис. 79, *е*).

Техніка дослідження кори півкуль великого мозку шляхом реєстрації її біопотенціалів за допомогою електродів, розміщених безпосередньо на її поверхні, називається *електрокортикографією.*

Т

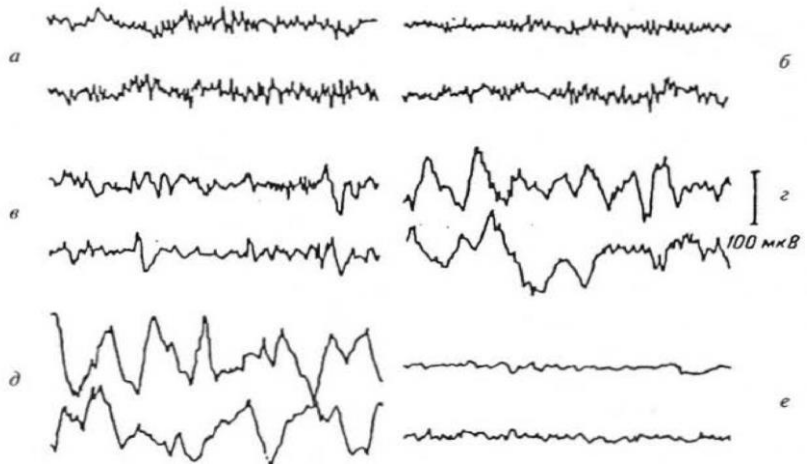


Рис. 79. Структура електроенцефалограм, знятих у процесі сну пацієнта: *а* - чутливий сон; *б* - дрімота; *в* - легкий сон; *г* - глибокий сон; *д* - тривалий сон; *е* - сон, що супроводжується рухом очей

Принципи електроміографії

Техніка дослідження функціонального стану скелетних м'язів на основі реєстрації біоелектричних потенціалів називається *електроміографією.* Реєстрацію та аналіз *електроміограм (ЕМГ)* проводять за допомогою голчастих або поверхневих електродів, прикладених до м'яза, або занурених в нього. Оскільки м'яз складається з набору м'язових волокон, електроміограма являє собою суперпозицію окремих потенціалів дії, властивих кожному волокну. Причому, всі ці потенціали відрізняються за знаком, через що вони можуть або підсилюватися, або компенсувати один одного. Через це форма електроміограми має характер випадкового шумового сигналу, енергія якого залежить від м'язової активності та місця встановлення електроду, Блок-схему си-

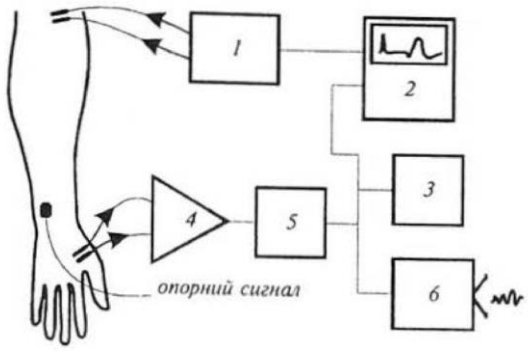


Рис. 80. Блок-схема електроміографа; 1 — стимулятор; 2 — комп'ютер; 3- принтер; 4 — попередній підсилювач; 5 — основний підсилювач; 6 — гучномовець

стеми, призначеної для реєстрації електроміограм (електроміографа), наведено на рис. 80, а типові структури електроміограми, що реєструється голчастим електродом, — на рис. 81 та поверхневим електродом — на рис. 82. Електроміографія використовується для діагностики нервово-м'язових порушень та оцінки м'язової активності.

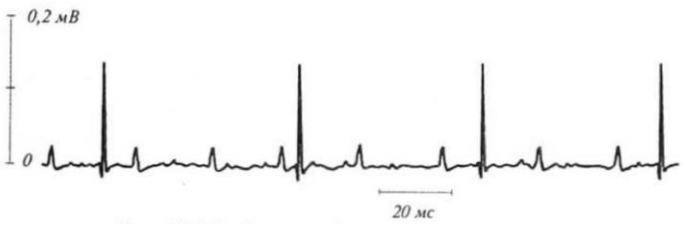


Рис. 81. Електроміограма, зареєстрована за допомогою голчастого електрода

Електрогастрографією називається техніка реєстрації потенціалів, викликаних перистальтичною (пов'язаною з ритмічними скороченнями стінок) діяльністю шлунково-кишкового тракту. *Електроінтестинографія* — вимірювання біопотенціалів кишечника з метою дослідження його моторної (рухової) діяльності. *Електроміомастикаціографія* — одночасна графічна реєстрація біопотенціалів жувальних м'язів і рухів нижньої щелепи.

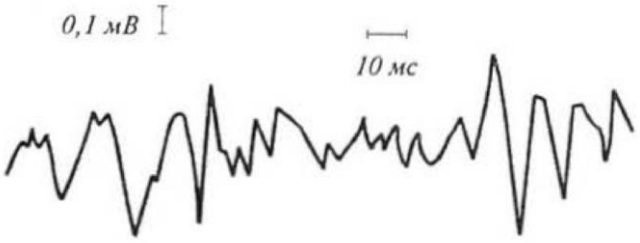


Рис. 82. Електроміограма, зареєстрована за допомогою поверхневого електрода

ВРАЖЕННЯ СТРУМОМ ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ І ЙОГО БІОФІЗИЧНИЙ МЕХАНІЗМ.

Під впливом електричного струму в живих організмах відбувається рух заряджених частинок, поляризація тканин й їх нагрівання (тепловий ефект).

Постійний струм й змінний струм, частота якого нижче 10^5 Гц, здатні створювати небезпеку для організму. Небезпека обумовлюється струмом, а не напругою. Безпечною вважають силу струму нижчу за 0,01 А (хоча навіть слабкі струми впливають на функціонування нервової системи); струм вище 0,1 А є небезпечним для життя. Ступінь небезпеки, обумовлений струмом, залежить від шляхів розповсюдження струму організмом, наприклад, від того, проходить він через серце або ні.

Електричний струм, якій проходить крізь м’яз, викликає її скорочення. При цьому реакція м’язів залежить як від сили струму, так й від довго тривалості його впливу. Сила струму нижче деякої порогової величини не викликає скорочення, так як і надто короткочасний імпульс. Якщо імпульс був поодинокий, то за скороченням наступає розслаблення, тобто м’яз здригнеться. Для того щоб м’яз після скорочення повністю розслабився потрібний деякий час. Якщо імпульси надхо-

дять один за одним, то м'яз не встигає розслабитися й її скорочення триває на протязі часу подання імпульсів. Такий стан м'яза називається *тетанусом*. Імпульси постійного струму (імпульсний струм) мають схожий на вплив змінного струму вплив на живий організм.

Електричний струм невеликої сили (0,01 - 0,025 А) може призвести до порушення дихання (у випадку скорочення дихальних м'язів), серцебиття, тощо; струм більшої сили (від 0,1 А) – до зупинки серця. Дія електричного струму також здатна викликати денатурацію білків, опіки, як результат теплового ефекту.

Всередині тіла струм в основному розповсюджується кровоносними й лімфатичними судинами, м'язами й оболонками нервових волокон. Опір тканин залежить від стану організму. Наприклад, опір збільшується під час запальних процесів, які супроводжуються набуханням клітин так як при цьому зменшується переріз міжклітинних з'єднань. Зменшення опору відбувається під час стану підвищеної пітливості.

Значення кутів зсуву фаз для біологічних об'єктів наведені в таблиці 13.

Таблиця 13.

Кут зсуву фаз для різних біологічних об'єктів (при частоті 1 кГц)

Біологічний об'єкт	Кут зсуву фаз, градус
Шкіра людини, жаби	–55°
Нерв жаби	–64°
М'яз кролика	–65°
Ламінарія	–78°

Імпеданс тканин та органів змінюється під час наповнення кровоносних судин, тобто залежить від стану серцево-судинної системи. Реєстрація імпедансу тканин й органів в процесі серцевої діяльності лежить в основі діагностичного методу, які має назву *реографія (імпеданс-плетизмографія).* Знімають реограми серця (реокардіограми), головного мозку (реоенцефалограми), магістральних судин, легенів, печінки й кінцівок. Як правило, дослідження проводять на частоті 30 кГц.

Проходження електричного струму через провідник, якій має активний опір, супроводжується нагріванням останнього, так як прискоренні електричним полем носії заряду, зіштовхуючись з іншими частинками, передають їм частину своєї кінетичної енергії, що призводить до збільшення теплового руху частинок, внаслідок чого підвищується температура провідника. Кількість виділеного тепла розраховується за законом Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2Rt$$

де I – сила струму, R – опір, t – час впливу струмом. Розділивши даний вираз на об'єм й час, отримаємо кількість теплоти, яка виділяється в одиниці об'єму тканини за одиницю часу:

$$q = j^2\rho$$

де j – щільність струму, ρ – питомий опір.

Тепловий ефект електричного струму широко застосовується в медицині для прогрівання тканин, для чого використовують струм силою 10 – 15 мА, частотою $\nu \geq 500$ кГц (зсув іонів, який він викликає, безпечне для організму), напругою ~ 10 кВ. Високочастотні струми застосовуються в хірургії для з'єднання (*діатермокоагуляції*) й розсічення (*діатермотомія*) тканин.

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ У ТВАРИННИЦТВІ

Аеронізація. У повітряному просторі тваринницького приміщення під впливом електричних полів можуть утворюватися легкі і важкі іони. Згідно з висновками, отриманими видатним біофізиком О.Л.Чижевським, вплив аероіонів на організм відбувається через кров та нервову систему. В першому випадку іони впливають на еритроцити, які змінюють електричні властивості крові. У свою чергу, кров омиває тканини і органи, обмінюючись з ними електричними зарядами. У другому випадку іони впливають на периферійну та центральну нервові системи шляхом дії на нервові рецептори шкіри або за перенесення елементами крові електричних зарядів до інтерорецепторів кровоносних судин та до головного мозку. В цілому процес аероіонізації повітря в тваринницьких приміщеннях сприяє збільшенню живої маси, поліпшенню гематологічних показників, зниженню рівня захворювань тварин.

Озонування. Озон є одним із найважливіших природних окислювачів, Застосування технології озонування повітря у птахівництві зумовлює підвищення виводу курчат, позитивні зрушення у показниках крові, зменшення інфекційних захворювань, знищення шкідливої мікрофлори. Періодичне озонування приміщень запобігає пліснявінню та псуванню яєць. Крім того, озонування можна застосовувати для знезараження питної води, стічних вод, кормів тощо.

Дія змінного струму на організм істотно залежить від його частоти. При низьких, звукових і ультразвукових частотах змінний струм, як і постійний, призводить до подразнюючої дії на біологічні тканини. Мінімальна сила струму, подразнюючу дію якої відчуває людина (поріг відчутного струму) залежить як від індивідуальних особливостей людини, так і від частоти струму, місця й площі контакту. У чоловіків для ділянки «передпліччя - кисть» на частоті 50 Гц ця величина становить приблизно 1 мА. У дітей і жінок граничні значення трохи менше. Змінний струм, частота якого нижче 10^5 Гц, може представляти загрозу для організму.

При частотах більше 500 кГц зміщення іонів становиться близьким до їх зміщення в результаті молекулярно-теплового руху, тому струм або електромагнітна хвиля не буде викликати подразнюючої дії. Основним первинним ефектом в цьому випадку є тепловий ефект. Як відомо, подразнення може викликати лише такий струм, тривалість якого перевищує деякий мінімальний час, що є необхідним для збудження м'язового волокна. Через те, що зі зростанням частоти струму тривалість подразнення знижується, то при досягненні деякої граничної величини частоти (10^5 Гц) струм вже не викликає скорочення м'язів. У цьому випадку він здійснює лише теплову дію (постійний струм і струми низької частоти для нагрівання тканин не є придатними, бо їх використання при великих значеннях може призвести до електролізу і руйнування). Через це змінний струм частотою вище 100 кГц використовують у лікувальних процедурах, призначенням яких є прогрівання тканин, що глибоко залягають в організмі.

Ефект дії змінного струму, як і постійного, на живу систему визначається опором її складових частин. Опір будь-якої системи змінному струму визначається активним і реактивним (індуктивним і ємкісним) опорами. У живих системах в якості конденсаторів виступають біологічні мембрани, а системи, які проявляють індуктивні властивості відсутні. Тому повний опір — імпеданс — біологічних си-

стем визначається лише омічним опором R і ємкісним X_C опором: $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$, а прикладена напруга відстає за фазою на кут φ: $\varphi = arctg \frac{X_c}{R}$

При змінному струмі загальний опір ланцюга знижується при збільшенні частоти струму. Для тканин організму це явище погіршується зі зростанням ємкісної провідності. Тому, наприклад, при високочастотних процедурах повний опір (імпеданс) тканин організму між електродами знижується до сотен і, навіть, десятків Ом.

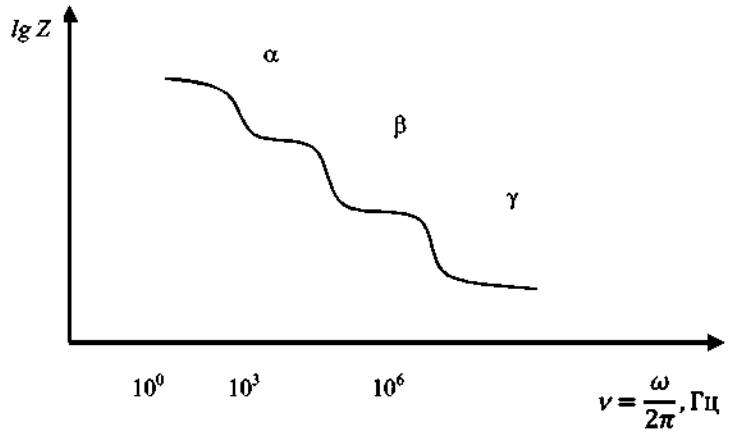


Рис. 83. Графік частотної залежності імпедансу м'язової тканини

На рис. 83. наведено графік частотної залежності імпедансу м'язової тканини. Для компактності графік побудовано в логарифмічних координатах.

З графіка прослідковуються дві особливості цієї залежності:

– поступове зменшення імпедансу з підвищенням частоти (загальний вигляд залежності імпедансу від частоти);

– наявність трьох областей частот, у яких є відхилення від загального ходу залежності імпедансу від частоти (α-, β-, γ).

Запізнення зміни поляризованості відносно зміни напруженості електричного поля залежить від механізму поляризації речовини. Найшвидший механізм - це електронна поляризація, бо маса електрона достатньо мала. Це відповідає частотам (біля 10^{15} Гц), які істотно перевищують області α-, β-, γ-дисперсії.

Орієнтаційна поляризація води, молекули якої мають відносно малу масу, відповідає γ-дисперсії (частоти біля 20 ГГц). Великі полярні органічні молекули, наприклад, білки, мають значну масу і встигають реагувати на змінне електричне поле з частотою 1^{-10} МГц. Це відповідає β-дисперсії. При α-дисперсії відбувається поляризація цілих клітин, і α-дисперсії відповідає область низьких частот ($0,1^{-10}$ кГц). У цій області ємкісний опір мембран дуже великий, тому переважають струми, що огинають клітини і протікають через оточуючі клітини розчини електролітів.

Таким чином, області α-, β-, γ-дисперсії імпедансу пояснюються тим, що із підвищення частоти змінного електричного поля все менше структур буде реагувати на зміну цього поля і меншим буде значення поляризованості:

1. при низьких частотах ($0,1^{-10}$ кГц) на зміну поля реагують усі структури (α-дисперсія);
2. з підвищенням частоти (1^{-10} МГц) реагують великі молекули — диполі органічних сполук і молекули води (β-дисперсія);
3. при високих (біля 20 ГГц) частотах реагують тільки молекули води (γ-дисперсія).

При цьому у всіх випадках має місце електронна поляризація.

З підвищенням частоти буде зменшуватися електрична проникність, а звідси і електроємність C, що призведе до підвищення ємкісного опору R_e і імпедансу Z, тому на фоні загальноспадаючого вигляду залежності $Z = f(\omega)$, з'являються області з меншим Z (α-, β-, γ-дисперсії).

Частотна залежність імпедансу дозволяє оцінити життєздатність тканин організму, що важливо знати для пересадки (трансплантації) тканин і органів. Різниця в частотних залежностях імпедансу є також у випадках здорової і хворої тканин. Імпеданс тканин залежить також від їх фізіологічного стану. Так, чим більшим є приток крові до тканин, тим меншим є їхній опір. Діагностичний метод, який заснований на реєстрації зміни імпедансу тканин, називається реографією (імпеданс-плетизмографія). Принциповою основою цього методу є залежність змін опору від змін кровонасичення у тій ділянці тіла людини, що вивчається.

За допомогою цього методу отримують реограми головного мозку (реоенцефалограма), серця (реокардіограма), магістралей судин, легенів, печінки і кінцівок.

Потрібно зазначити, що знання пасивних електричних властивостей біологічних тканин важливе при розробці теоретичних основ методів електрографії органів і тканин, бо електричний струм, що створюється струмковими діполями, проходить крізь них. Крім того, уява про дисперсію імпедансу дозволяє оцінити механізм дії струмів і полів, які використовуються у терапевтичних цілях.

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДІВ ЕЛЕКТРОЛІКУВАННЯ І ДІАГНОСТИКИ

Існує певне порогове значення сили струму, нижче від якого струм не спричиняє подразнення. Це порогове значення різне для різних організмів та залежить від їхнього фізіологічного стану.

Можна вважати, що в тварин струм з густиною 1,0...1,5 А/м^2 не зумовлює подразнення. Подразнення стає відчутним при густині струму 2,0...3,0 А/м^2. При густині струму понад 5 А/м^2 спостерігається ушкодження тканин та органів, що може призвести до смерті внаслідок подразнення нервів та нервових центрів, які керують процесами дихання.

Подразнення змінним струмом послаблюється зі збільшенням його частоти, а за частот понад 500 кГц майже зникає. Однак за великих напруг (~1000 В) високочастотний струм може спричинити сильні опіки шкіри.

Ураження струмом зумовлене двома причинами:

а) дією струму на нервові центри, наслідком чого є зупинка дихання;

б) фібриляцією шлуночків серця, яка виникає через проходження струму по серцевому м'язу. Внаслідок фібриляції волокна серцевого м'яза скорочуються асинхронно, серце перестає скорочуватись як єдине ціле, порушується його ритмічна діяльність.

Фібриляція може виникати також з інших причин, у цьому випадку використовують електричний струм певної сили та частоти для відновлення серцевої діяльності. Електричні дефібрилятори успішно використовують у клінічній практиці.

Біологічні тканини по різному проводять електричний струм. Основним механізмом, який характеризує протікання електричного струму в живих організмах, є електрична провідність, яка обумовлена іонною провідністю. Електропровідність окремих ділянок організму істотно залежить від опору шкіри і підшкірних шарів. Опір шкіри визначається фізіологічним станом, віком, товщиною, місцем

вимірювання, температурою і вологістю шкіри. В організмі струм поширюється, в основному, кровоносними і лімфатичними судинами, м'язами і нервовими стовбурами.

Всі тканини, які містять воду, можуть бути поділені на три групи:

- рідкі тканини(кров, лімфа), які містять водну суспензію клітин і білкові молекули;
- м'язові тканини і тканини внутрішніх органів (серце, нирки, печінка і ін.), які містять велику кількість води;
- тканини з малим вмістом води (жир, кістки).

Електричні параметри біологічних тканин можна охарактеризувати діелектричною проникністю ε і питомою електричною провідністю γ.

Органічні речовини (білки, жири, вуглеводи і ін.), з яких складаються живі тканини, в чистому і сухому вигляді є діелектриками. Значення ε для деяких діелектриків приведені в таблиці 14.

Таблиця 14.

Діелектрична проникність деяких речовин

Діелектрична проникність ε при 20 °С	
Хлористий натрій кристалічний	6,12
Поліетилен	2,2 –2,3
Скипидар	2,2
Нітробензол	35
Спирт етиловий	26,3
Вода	81
Білок яйця	72
Кров	85
Повітря	1,00058

Всі тканини і клітини обмиваються рідинами (кров, лімфою), різними тканинними рідинами, в склад яких, крім органічних колоїдів входять розчини електролітів, які є в відносно непоганими провідниками. Різні тканини в організмі мають неоднакову електропровідність (таблиця 15).

Таблиця 15.

Питомий опір деяких біологічних систем

Тканина	γ, Ом м
Спинномозкова рідина	$5,5\ 10^{-1}$
Сироватка крові	$7,1\ 10^{-1}$
М'язева тканина	2,0
Печінка	10
Нервової тканини	25
Жирової тканини	50
Сухої шкіри	10^{2}
Кістки без надкістя	10^{6}
Еритроцити	10^{6}

Визначення опору біологічних об'єктів на постійному струмі важко проводи-

ти через наявність поляризації. При протіканні постійного струму через живі клітини часто спостерігається дезінтеграція клітин при різкому пониженні їх електропровідності.

В роботі з живими тканинами при вимірюванні електропровідності з метою зменшення поляризаційних ефектів використовують компенсаційні схеми з спеціальними мостами на змінному струмі.

Електролікування за специфікою нагадує патогенетичну терапію. Тому призначаючи його, необхідно враховувати загальний стан організму, особливості патологічного процесу, розвиток та перебіг хвороби, наявність ускладнень. У практиці призначення електротерапії дотримуються принципу використання агентів малої інтенсивності. Нерідко ефект фізіотерапії підвищується поєднанням процедур. Наприклад, прогрівання перед електрофорезом відповідної ділянки тіла солюкс-лампою посилює його дію, особливо при травмах; діатермія і ультрафіолетове опромінення покращують ефект попередньої гальванізації. Однак призначення двох і більше процедур, пов'язаних з використанням високо-, ультра- і надвисокочастотних електромагнітних полів, протипоказане.

Під час проведення фізіотерапевтичних процедур підвищується навантаження на адаптаційні механізми організму, посилюються енергозатрати, інтенсивність яких треба зіставляти з функціональним станом організму тварин.

Варто пам'ятати, що одночасне поєднання декількох процедур (поліпрагмазія), сумарний ефект яких перевищує адаптаційні здатності хворого організму, також неприпустимо, оскільки може значно погіршити стан ослабленої хворобою тварини.

Усі методи електротерапії можна умовно розділити на три групи використання:

- постійного струму;
- імпульсного та змінного струму;
- електричних і магнітних полів.

Електролікування — це сукупність методів лікування, що базуються на використанні дозованої дії на організм електричних струмів, а також електричних та електромагнітних полів, Розглянемо основні методи електролікування.

Гальванізація – метод застосування з лікувальною метою постійного електричного струму малої сили (до 50 мА) та низької напруги (до 60 В), який проходить в тканини через потові та сальні залози, а також точки акупунктури (рис. 84). Під його впливом змінюється якісне та кількісне співвідношення іонів біля мембрани клітин, кислотно-основний стан тканинного середовища, осмотичні процеси, проникність мембран, збудливість клітин, окислювально-відновлювальні та ферментні процеси, посилюється крово- та лімфообіг, стимулюються обмінно-трофічні процеси, прискорюються процеси регенерації нервової, кісткової та сполучної тканини, а також відмічається гуморальна та рефлекторна дія на організм. Особ-

Рис. 84. Апарат для гальванізації ПОТОК-1.

ливості дії: рефлекторно-сегментарний механізм з урахуванням ефектів анода і катода; місцева дія за рахунок впливу аноду чи катоду; при загальних методиках обмінна, седативна або загальностимулююча дія.

Показання: регуляція основних нервових процесів при неврозах, виразковій хворобі, гіпертонічній хворобі I, II, ступеня; регуляція вегетативних функцій при мігрені, соляриті, бронхіальній астмі, вазомоторному риніті; стимуляція регенерації периферичних нервів; послаблення і ліквідація больового синдрому при невралгії, нейропатії; відновлення функцій та зменшення секреторних і моторних розладів у системі органів травлення (гастрити, коліти з гіпо- та гіпермоторною дискінезією жовчовивідних шляхів); розсмоктування запальних інфільтратів при хронічних запальних процесах; покращання трофічних процесів; захворювання ЛОР-органів, очей, шкіри, опорно-рухового апарату; наслідки травматичних уражень головного та спинного мозку та їх оболонок.

Перед гальванізацією ділянку шкіри, де накладають електроди, обмивають теплою водою з милом, а волосяний покрив голять. Для зменшення опірності шкіри місця накладання електродів змочують 0,85%-вим розчином натрію хлориду без розтікання по шкірі. Порізи шкіри, висипи та інші ушкодження (подряпини, рани, виразки) вкривають шаром колодію, целофану або просоченої вазеліном вати. Якщо волосяний покрив залишається, то місця для гальванотерапії знежирюють спиртом, насухо витирають і змочують ізотонічним розчином хлориду натрію.

Далі на тіло накладають електроди, виготовлені зі свинцю, олова або струмопровідної вуглецево-графітної тканини, які гнучкі й щільно фіксуються на тілі. Електроди вміщують у гідрофільні прокладки з байки, марлі, фланелі або фільтрувального паперу товщиною не менше 1 см. Прокладки виготовляють із кишенями для електродів так, щоб їх величина була на 1-2 см більшою від розміру електрода, а металева пластинка не торкалася поверхні шкіри. Гідрофільні прокладки потрібні для попередження ушкодження шкіри продуктами електролізу і зменшення початкового опору шкіри дії електричного струму. Перед початком процедур їх змочують теплою водою або ізотонічним розчином натрію хлориду, вкладають у кишені електроди і розміщують на необхідній поверхні тіла тварини.

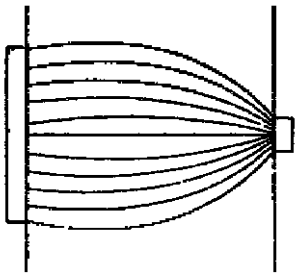


Рис. 85. Силові лінії струму

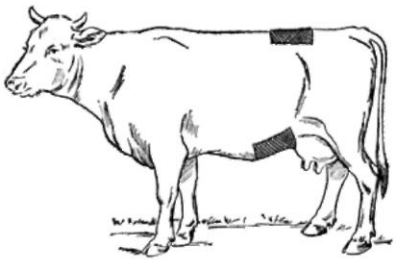


Рис. 86. Розміщення електродів при дії на нирки корови

Електроди за площею можуть бути однаковими або різними. Якщо вони різні, то густина струму і відповідно фізіологічна дія з меншого за площею електрода є інтенсивнішою (активний електрод), ніж з більшого (індиферентний пасивний електрод, рис. 85).

Протипоказання: загальні протипоказання для фізіотерапії, гострі гнійні запальні процеси, розлади чутливості шкіри, індивідуальна непереносність струму, порушення цілісності шкіряних покривів в місцях накладання електродів.

Розміщення електродів на тілі тварини, їх форма і площа залежать від особливостей патологічного процесу і конфігурації ураженої ділянки. Це розташування може бути попереково-прямим, коли електроди паралельні один одному і силові лінії поширюються переважно перпендикулярно до їх площини (рис. 86); діагонально-поперековим (площини електродів зміщені у вертикальному напрямку) і поздовжнім (електроди розташовують в одній площині тіла; дії струму піддають поверхневі тканини) (рис. 87).

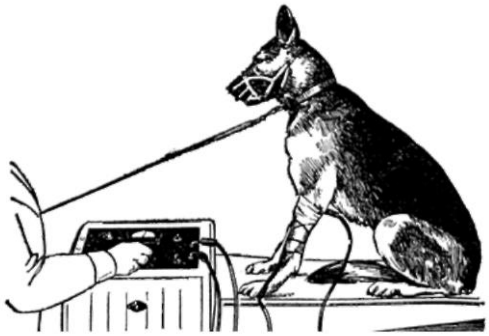


Рис. 87. Гальванізація грудної кінцівки собаки

Лікарський електрофорез — метод електролікування, що полягає в комплексній дії на організм постійного струму і зведених за його допомогою лікарських речовин. Лікарські речовини, здатні дисоціювати в розчині на позитивні негативні іони, спрямовано переміщуються в полі постійного електричного струму і здатні надходиш в іонізованому стані в організм через шкіру або слизову оболонку. Одночасний вплив на організм постійного електричного поля і лікарської речовини сприяє більш ефективному використанню ліків. Слід зауважити, що традиційні способи введення ліків (ін'єкції, інгаляції) забезпечують надходження в організм лише 2-5% лікарської речовини.

Першими методами високочастотної терапії, які увійшли в практику ще на початку XX століття, були дарсонвалізація (яка запропонована французьким фізіологом і лікарем Д'арсонвалем) і діатермія.

Дарсонвалізація — застосування змінних (або імпульсних) струмів (сила струму дорівнює 10-20 мА) та високих значень напруги (до 20 кВ) і частоти (100-1000 кГц), Використання цієї техніки призводить до активізації кровоносних судин.

Існують дві методики використання струмів Д'арсонваля загальна і місцева. З лікувальною метою в основному використовують місцеву дарсонвалізацію, тому що загальна пов'язана зі значними радіоперешкодами. Сучасні апарати місцевої дарсонвалізації генерують імпульси до 110 кГц при напрузі 10-15 кВ, тривалості модульованих імпульсів 100мкс, частоті імпульсів 50 Гц, силі струму 10-15 мА і довжині іскри з резонатора на землю не менше 25 мм (рис. 88). За такої частоти імпульсів електроактивні елементи клітин і тканин не зосереджуються на клітинних мембранах, а здійснюють коливання, збуджуючи змінні потенціали, електронну та іонну поляризацію, що приводить до посилення біохімічних процесів у клітинах і тканинах організму,

Рис. 88. Прилад для місцевої дарсонвалізації

підданих лікувальній дії.

Використовують контактну і дистанційну методики місцевої дарсонвалізації. За контактної - електрод накладають безпосередньо на шкіру або слизову оболонку, що спонукає до утворення тихого розряду. Вакуумний електрод без тиску, легкими колоподібними або лінійними рухами, не відриваючи від поверхні тіла, переміщують у зоні лікування або залишають нерухомим при невеликих ураженнях. Для кращого ковзання шкіру дещо припудрюють тальком, а вологу - висушують. Використовуючи дистанційну методику, електрод розміщують над патологічним вогнищем на віддалі 0,52 см. Це забезпечує утворення іскри, довжина якої буде залежати від величини зазору. Чим довшою буде іскра, тим більш вираженим буде припікаючий ефект.

Під час ректальних і вагінальних процедур електроди змащують стерильним вазеліном, а діючи на інші слизові оболонки, залишають сухими. Дарсонвалізацію здійснюють на поверхнях, вільних від металевих предметів. Цей метод лікування успішно поєднують з вакуумтерапією (вакуумдарсонвалізація).

Тривалість дії дарсонвалізації на одну патологічну зону становить 5-10 хв, а якщо лікують декілька ділянок тіла, то загальний час не повинен перевищувати 15хв. Процедури проводять щодоби або через добу. За необхідності повторний курс лікування призначають через 1-2 місяці.

Діатермія — метод, що полягає в дії на тіло тварини змінного електричного струму (сила струму 1÷3 А, густина струму $10 А \cdot м^{-2}$) з високою (0,4÷2,4 МГц, інколи 27 МГц) частотою. Тварину розміщують між електродами, розмір і форма яких відповідають ділянці тіла, що лікується. Основні механізми дії - теплові, причому тепло проникає крізь жирову, м'язову та кісткову тканини. Діатермія характеризується десенсибілізуючою, спазмолітичною та болезаспокійливою дією. Якщо застосувати голковий електрод, то між ним і тканиною виникає електрична дуга, що приводить до нагрівання до 1000 °С. Така техніка, що називається *хірургічною діатермією,* дає змогу забезпечувати розтин біологічних тканин та їх коагуляцію — укрупнення дрібних частинок, зокрема білків.

Високочастотні струми використовуються також у хірургічних цілях: для з'єднання (діатермокоагуляція) і розсічення (діатермотомія) тканин. Діатермокоагуляція - припікання, «зварювання» тканин під дією тепла, яке виділяється під точковим електродом. При цьому використовується щільність струму 6-10 $мА/мм^2$, у результаті чого температура тканини підвищується і тканина коагулює.

Діатермотомія - розсічення тканин за допомогою електроду у формі леза. При цьому щільність струму складає 40 $мА/мм^2$.

Імпульсні струми використовують також для стимуляції серця, нервових волокон, м'язів з метою оновлення їх скорочувальної функції або функції провідника. Так, пропускання крізь серце короткочасних імпульсів струму (порядку мілісекунд) силою 10 А викликає рівномірну деполярізацію мембран серцевого м'язу, відбувається одночасне синхронне скорочення всіх волокон м'язу, що триває протягом всього часу дії струму. Потім може повністю відновитися діяльність серця. На цьому заснований метод дефібриляції, коли через фібрілююче серце пропускають великий за величиною імпульс струму тривалістю в десятки мілісекунд. При реанімації для цих цілей використовують спеціальний апарат - дефібрилятор.

Залежно від амплітуди, тривалості і форми імпульсів струм може викликати різну фізіологічну дію на організм.

Кардіостимуляція — лікування порушень серцевого ритму шляхом впливу на міокард шлуночків електричних струмів відповідної сили і частоти. Відомо, що порогова чутливість живого організму до електричного струму становить близько 1 мА; збільшення сили струму на поверхні тіла до 70÷100 мА може викликати вентрикулярну фібриляцію — аритмію серця, що характеризується хаотичним, розрізненим і різночасним скороченням окремих волокон шлуночків серця. Електричний струм силою в декілька ампер призводить до паралічу дихання і леталь¬ного кінця. Але короткочасне застосування інтенсивного електричного струму зупиняє фібрилярні скорочення серця або передсердь для відновлення синусового ритму скорочень серця та ефективної скорочувальної діяльності шлуночків. Ця техніка називається *дефібриляцією*.

Електродерматометрія — вимірювання змін електричного опору шкіри у часі для дослідження функціонального стану вегетативної нервової системи (що регулює діяльність внутрішніх органів, залоз, судин та гладких м'язів) і емоційної сфери.

Електроплетизмографія — дослідження кровонаповнення орга¬на або ділянки тіла на основі реєстрації їх електричного опору або діелектричних властивостей, що змінюються в процесі кровообігу.

Електропунктура — метод рефлексотерапії, що базується на дії електричних імпульсів за допомогою спеціального електрода на біологічно активні точки, розміщені на поверхні тіла.

Електроімпедансна томографія — техніка утворення зображень розподілу електричного імпедансу по тілу пацієнта. Імпеданс — це комплексний опір, який чинить жива тканина змінному струму. В найпростішому випадку до тіла прикладають чотири електроди; через першу пару пропускають електричний струм, за допомогою другої пари реєструють напругу; співвідношення між струмом і напругою дає можливість оцінити імпеданс тканини. В реальній ситуації на тіло накладають 16 або 32 електроди для отримання тривимірних зображень. Отриману інформацію обробляють за допомогою Фур'є-аналізу. Слід зауважити, що ця техніка поки що перебуває в стадії експериментальних досліджень.

Індуктотермія - лікувальний метод, де дійовим фактором є високочастотні електромагнітні коливання 13,6 МГц (довжина хвилі 22,13м). Під впливом магнітного поля в струмопровідних тканинах організму наводиться електрорухлива сила, що створює в них вихрові струми або струми Фуко, які викликають тепловий і осциляторний ефект. Ендогенний тепловий вплив обумовлює особливості дії індуктотермії (в гострій фазі запалення не призначають). Особливості дії: ендогенне теплоутворення, протизапальна дія, починаючи з підгострої і в хронічній фазі запалення, спазмолітична дія. Глибина проникнення до 8-9 см.

Показання: підгострі та хронічні запальні захворювання внутрішніх органів, суглобів, сечополової системи; підгострі та хронічні запальні захворювання периферійної нервової системи з больовим синдромом, остеохондроз хребта; свіжі переломи трубчатих кісток; хронічний тонзиліт з реакцією місцевих, регіонарних лімфатичних вузлів; підгострі запалення пазух носу; захворювання з підвищеним

тонусом поперек-смугастих і гладких м'язів (клонічні скорочення стременного м'язу, гіперкінезія голосового апарату); неврити слухових нервів; неврити лицевого нерву; склеродермія; гіпертонічна хвороба I-II ступеня.

Протипоказання: гострі запальні процеси, ішемічна хвороба серця, наявність імплантованих кардіостимуляторів і металевих предметів в зоні дії, виражена гіпотонія, доброякісні та злоякісні пухлини.

Ультрависокочастотна терапія (УВЧ) – лікувальний метод, де діючим фактором є перемінне електричне поле ультрависокої частоти (40,68 МГц або 27,12МГц, потужність від 1 до 350 Вт). Електричне поле УВЧ викликає в тканинах організму тепловий та осцилятор ний ефекти. Енергія поля поглинається в тканинах, що мають велику питому опірність – нервовою, жировою, шкірою, сухожиллями, фасціями, в них утворюється велика кількість тепла. Осциляторний ефект викликає активність альбумінів крові, підвищення дисперсності білків крові, зміни pH в кислу сторону. Ендогенне тепло гомогенне, немає небезпеки перегріву в гострій фазі запалення. Особливості дії: протизапальна, починаючи з гострої фази, дегідратуюча, протибольова, спазмолітична, судинна; імунокорекція та гормональні ефекти при впливі на головний мозок. Глибина проникнення 11 см та більше.

Показання: гострі запальні процеси в органах і системах; травми спинного мозку та периферійних нервів; радикуліт, невралгія, каузалгія, фантомний біль; поліомієліт, мієліт, енцефаліт; міозит (підгостра та хронічна стадії); хвороба рейно, облітеруючий ендартеріїт; отити, гострі тубоотити і євстахіїти на фоні катаральних явищ в носоглотці; гострі риніти; гострі синусити, гострі ларингіти; фурункули, карбункули, флегмони, абсцеси, панариції, гідроаденіти, рани; артрити в гострій та підгострій фазі.

Протипоказання: новоутворення, схильність до кровотеч, наявність в тканинах ділянки впливу інорідних металевих предметів розміром 2х22 мм та більше, виражена гіпотонія, системні захворювання крові, вагітність, стенокардія з частими приступами, аневризма аорти, осумковані гнійні процеси.

УВЧ-індуктотермія – лікувальний метод, при якому на тканини хворого впливають переважно магнітною складовою електромагнітного поля ультрависокої частоти. Механізм дії відповідає опису механізму дії УВЧ і індуктотермії. Враховуючи застосовану частоту може застосовуватися в гострій фазі запалення. Особливості дії: сполучення ефектів УВЧ-терапії та індуктотермії – протизапальна, теплова, спазмолітична. Глибина проникнення до 4-5 см.

Показання: підгострі та хронічні запальні захворювання різних органів і систем.

Протипоказання: новоутворення, схильність до кровотеч, порушення больової і термічної чутливості.

Сантиметрохвильова терапія (СМХ-терапія) - метод, при якому з лікувальною метою застосовують сантиметрові хвилі довжиною 12,6 см, при частоті 2375 МГц. В зв'язку з великою частотою коливань має виражену теплову та осциляторну дію, в терапевтичних дозах активізує тканинне дихання, підвищує функції мітохондрій, стимулює ферментативну активність ферментів амінокислот, підвищуючи обмін речовин. Особливості дії: протизапальна, починаючи з підгострої

фази запального процесу, спазмолітична, судина; при призначенні необхідно враховувати можливість утворення “стоячих” хвиль. Глибина проникнення до 5 см.

Показання: запальні процеси в підгострій та хронічній фазі; лікування стоматологічних захворювань; застосування в косметології; лікування захворювань шкіри; захворювання суглобів, периферичних нервів, внутрішніх органів; захворювання ЛОР-органів; гіпертонічна хвороба 1-2 стадії.

Протипоказання: інфаркт міокарда в гострій стадії, набряки тканин в місці впливу, тиреотоксикоз, вагітність, новоутворення, схильність до кровотеч, активний туберкульоз легень.

Дециметрохвильова терапія (ДМХ-терапія) - метод, при якому з лікувальною метою застосовують дециметрові хвилі довжиною 65 і 96 см (частота 460 і 433 МГц відповідно, в деяких апаратах 915 МГц). Теплова енергія ДМВ-терапії проникає в організм на глибину до 9-10 см, поглинається різними тканинами, переважно тими, що гарно постачаються кров’ю (м'язи, парліхіматозні органи та інш.), тепло розповсюджується і на глибоко розташовані тканини і органи (глибина 9-10 см). Особливості дії: протизапальна, починаючи з підгострої фази запального процесу, спазмолітична, судинна, імуномодулююча. Глибина проникнення до 9-10 см. Оптимальний для впливу на ендокринні органи.

Показання: запальні процеси в гострій і підгострій фаз; дегенеративно-дистрофічі захворювання суглобів кінцівок та хребта; захворювання периферичних нервів; ревматоїдний поліартрит на стадії фіброзних змін; виразка шлунку без схильності до кровотеч; гіпертонічна хвороба 1-2 стадії; хронічна ішемічна хвороба.

Протипоказання: новоутворення, схильність до кровотеч, тиреотоксикоз, вагітність, загальні протипоказання.

Міліметровохвильова терапія (ММХ-терапія) – метод, при якому з лікувальними цілями застосовують міліметрові хвилі від 1 до 10 мм, частота 30-300 Гц. Згідно з сучасним уявленням, будь-яке захворювання, тобто порушення функціонування організму, супроводжується зміною генерації клітин КВЧ-сигналів, частота яких визначається характером захворювання. Штучні еталонні КВЧ-сигнали ведуть до нормалізації електромагнітного каркасу клітин, що призводить в дію механізми, які усувають порушення швидкості біохімічних реакцій та ферментативну активність. Переважно використовується для впливу на біологічно активні точки. Особливості дії: резонансний характер поглинання енергії ММХ визначає розвиток протизапального, протинабрякового, розсмоктуючого, імуномодулюючого, регенераторного впливу. Глибини проникнення до 0,2-0,6 мм.

Показання: підгострі та хронічні запальні хвороби периферійної нервової системи; хронічні захворювання внутрішніх органів; захворювання шкіри; ерозія шийки матки; консолідовані переломи кісток; вплив на біологічно активні точки.

Протипоказання: гострі гнійні запальні захворювання, гіпертиреоз, нейродерміт, вегетальгія, вагітність.

БІОЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Під впливом корпускулярних потоків Сонця відбуваються короткочасні зміни магнітного поля Землі - так звані *магнітні бурі,* що супроводжуються стиском магнітосфери, підсиленням в ній електричних струмів і виникненням на поверхні Землі іррегулярних магнітних збурень. Протягом магнітних бур збільшується кількість серцево-судинних захворювань, погіршується стан хворих, які на гіпертонію тощо. Крім того, магнітні бурі викликають полярні сяйва, іоносферні збурення, рентгенівське та низькочастотне випромінювання.

Лінії електропередачі є джерелами не тільки електричних, але й магнітних полів. В 90-х роках учені Швеції, Данії, США провели масштабні епідеміологічні дослідження, які довели, що вплив магнітних полів ЛЕП на здоров'я мешканців може проявитися в коридорах завширшки 400-800 м уздовж ліній електропередачі. В 1996 р. величина індукції магнітного поля в 0,2 мкТл була рекомендована як гранично допустимий рівень магнітного поля промислової частоти. Перевищення цієї норми призводить до раку крові і мозку.

Відомо, що морські істоти — акули, скати, вугрі, черепахи, кити, дельфіни — здатні використовувати магнітне поле Землі в пошуках кращих умов існування.

Птахи орієнтуються під час міграції не тільки за зірками, положенням Сонця, але й за магнітним полем Землі.

Печерна саламандра здатна знаходити шлях у повній темряві, орієнтуючись за магнітним полем.

Експериментальні дослідження з равликами і планаріями показали, що тварини здатні реагувати на близькі за величиною до геомагнітного поля магнітні поля. Так, равлик *Nassarius* відрізняє полюси магніта, Планарія *Dugesia,* коли віддаляється від джерела світла, завжди відхиляється від прямолінійної траєкторії; величина і напрям відхилення залежать від орієнтації і напруженості зовнішнього магнітного поля. Чутливість планарії до магнітного поля становить $4 \cdot 10^6$ Тл.

Магнітне поле Землі використовують бджоли для орієнтації. Магнітна орієнтація проявляється у бджіл в процесі будівництва нових стільників. Можна казати про амплітуди 1÷10 нТл, що відповідають чутливості бджіл до магнітних полів.

Здатність живих організмів сприймати та використовувати зовнішні магнітні поля називається *магніторецепцією.* На сучасному рівні найвірогіднішою є гіпотеза магніторецепції, що ґрунтується на концепції *магнетиту* — специфічної неорганічної сполуки заліза (оксиди, сульфати, сульфіди і фосфати заліза). У тварин основною сполукою заліза, що відповідає за магніторецепцію, є феригідрит $5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$; у бджіл — Fe_3O_4 Магнетит знайдено у голубів, пелагічних китів, деяких молюсків та бактерій, що мешкають в мулі. Мінімальна структурна одиниця магнетиту з постійними магнітними властивостями називається *доменом.* Уміщений у магнітне поле, цей домен проявляє себе як стрілка компаса, орієнтуючись вздовж поля. Цілком можлива сумарна орієнтація всіх доменів при накладанні зовнішнього магнітного поля (так званий *суперпарамагнетизм).*

МАГНІТНЕ ПОЛЕ ЗЕМЛІ

Природне силове поле, виникнення якого зумовлено джерелами, що знаходяться в Землі і навколоземному просторі, називається *магнітним полем Землі.* Магнітне поле діє на електричні заряди, що рухаються, і тіла, які мають магнітний момент. Магнітне поле Землі має постійну (≈99%) та змінну (≈1%) складові. Це поле за формою нагадує поле диполя, центр якого зміщений відносно центра Землі, вісь нахилена до осі обертання Землі на 11,5° (рис. 89). Середня величина магнітної індукції поблизу земної поверхні становить $\approx 1 \cdot 10^{-5}$Тл, а напруженість магнітного поля спадає від магнітних полюсів (55,7А/м) до магнітного екватора (33,4 А/м).

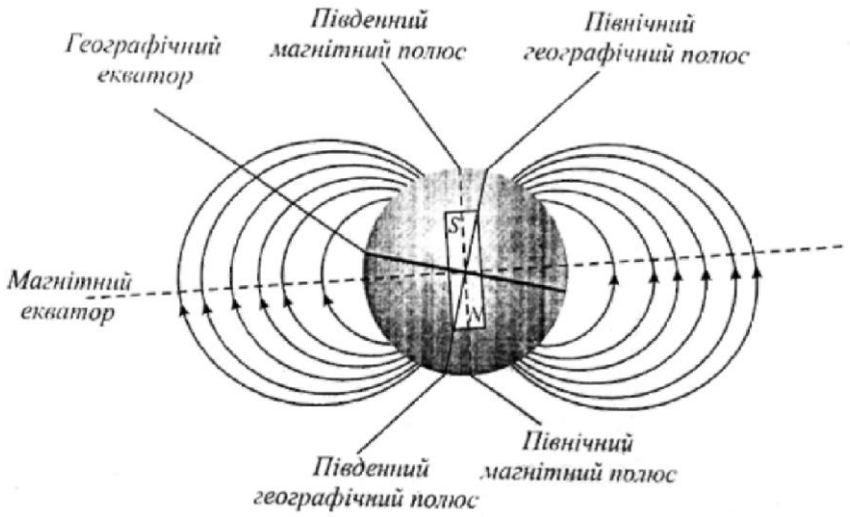


Рис. 89. Магнітне поле Землі за формою нагадує поле диполя, центр якого зміщений відносно центра Землі, а вісь нахилена до осі обертання Землі на 11,5°

Магнітне поле Землі утворює *магнітосферу* — область навколоземного простору, фізичні властивості, розміри і форма якої визначаються магнітним полем Землі та його взаємодією з потоками заряджених частинок від Сонця. Магнітосфера простягається на 70–80 тис. км (10 - 12 $R_З$) по напрямку до Сонця і на багато мільйонів кілометрів у протилежному напрямку (діаметр «хвоста» становить приблизно 20–25 $R_З$).

Крім того, на структуру та поведінку магнітосфери впливає *сонячний вітер* — швидкий (400–800 км/с) потік гарячої плазми від сонячної поверхні, який утворюється внаслідок високої температури сонячної корони.

ДЖЕРЕЛА МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ЖИВОМУ ОРГАНІЗМІ

У процесі життєдіяльності організму м'язові та нервові клітини виявляють електричну активність. Результатом такої активності є виникнення біомагнітних полів, зумовлених електричними струмами. Наприклад, клітинна мембрана проявляє здатність пропускати через себе іони речовин. При неоднорідній поляризації мембрани по всій клітинній поверхні можуть виникати позаклітинні струми, які замикаються всередині клітини і є джерелами біомагнітних полів. Біомагнітні явища можуть виникати під час роботи або руху окремих органів (серця, очей тощо), при проходженні нервових імпульсів, у результаті взаємодії організму або його частин із зовнішнім середовищем. Крім того, джерелами магнітних полів можуть бути магнітні включення, що містяться в живому організмі.

МАГНІТНА АКТИВНІСТЬ ОРГАНІЗМУ

В перші моменти магнітне поле впливає передусім на функції центральної нервової системи. Магнітні сигнали сприймаються безпосередньо мозком, найінтенсивнішими вони є в гіпоталамусі і в корі головного мозку. Магнітне поле впливає на обмін речовин нервової тканини і реакція виникає в усіх відділах, а пі-

зніше, його дія позначиться і на роботі інших органів, клітин, які також відзначаються високим рівнем обміну речовин. Таким чином на магнітне поле найбільше реагують системи, які виконують регуляторні функції (нервова, ендокринна, кровоносна системи). Вважається, що для середньо статистичної людини напруженість магнітного поля 40,0 – 56,0А/м можна прийняти за екологічну норму. Дослідження в останні роки показали, що в залізобетонному будинку напруженість геомагнітного поля Землі в три рази менша, ніж на відкритому просторі. У каюті судна воно майже відсутнє (або є в дозах, що не реєструються приладом). Таким чином, людина велику частину часу доби знаходиться в приміщеннях з пониженою дією магнітного поля. Враховуючи те, що нині велика кількість тварин – корів, курей, кішок, собак знаходяться в залізобетонних приміщеннях (а кури на великих птахофермах додатково відгороджені металевими клітками, що різко зменшує магнітний потік) усі вони, як і люди, відчувають нестачу геомагнітного поля Землі. Відновлення імунної системи людини чи тварини, яка знаходиться в залізобетонних будівлях, куди не проникає геомагнітне поле Землі не відбувається, що приводить до захворювань на грип, зокрема і мутагенний та інші хвороби. Однак, якщо створити в місцях перебування курей та інших тварин додатковий магнітний потік, то вони не лише не будуть хворіти, але й дадуть значно якісніші яйця, молоко, м'ясо. Знизиться вірогідність захворювання не лише пташиним грипом, а й лейкозом та іншими хворобами. Щоб отримати додатковий магнітний потік медична промисловість з 1976 року стала випускати пристрої для магнітотерапії постійним і низькочастотним магнітним полем. Магнітофорні аплікатори, виготовлені із суміші полімерних речовин (каучук, смола) та намагнічених порошкоподібних феромагнітних наповнювачів. Листи із цієї суміші мають на поверхні магнітну індукцію (15 – 40)мТл. Аплікатори еластичні, їх можна накладати на будь–яку частину тіла, вони чинять обезболюючу, протизапальну дію та покращують кровообіг. Проявляється і чутливість рослин до магнітного поля Землі. У результаті багаторічних спостережень канадські вчені біологи прийшли до висновку, що пшениця, посіяна в напрямі схід-захід росте краще і дає більший врожай, ніж посіяна в напрямі північ-південь. Перелітні птахи, відшукують дорогу, орієнтуючись саме у магнітному полі Землі.

Зміни електрофізіологічних процесів у серцевому м'язі викликають відповідні зміни магнітних характеристик серця; аналіз їх є суттю магнітокардіографії. При цьому вимірюються компоненти вектора магнітної індукції, перпендикулярні до поверхні грудної клітки. Кількість вимірювань варіює від 30 до 50; зондовані ділянки розміщені на однакових інтервалах (близько 5 см) по вертикалі та горизонталі. Магнітну індукцію реєструють за допомогою приймальних котушок; криві зміни у часі компоненти магнітної індукції називають *магнітокардіограмами.*

Електрична активність головного мозку зумовлює появу магнітного поля, реєстрація якого лежить в основі *магнітоенцефалографії*. Реєстрація власного магнітного поля скелетного м'яза становить суть *магнітоміографії*. Під дією імпульсу збудження, що проходить по аксону, у м'язовому волокні виникає електричний імпульс досить складної форми. Саме зміні електричного сигналу відповідає виникнення магнітного поля. Магнітні поля можуть бути індуковані у процесі електричної активності сітчастої оболонки ока; реєстрація відповідних магнітних

полів лежить в основі *магніторетинографії.* При дії зовнішніх подразників на зоровий аналізатор виникають магнітні поля на роговій оболонці ока, вимірювання яких називають магнітоокулографією.

Магнітокардіографія – діагностичний метод реєстрації зміни величини магнітної індукції серця з часом на протязі кардіоциклу. Магнітокардіографія, на відміну від електрокардіографії, записується безконтактно, тому що магнітне поле можна зареєструвати на відстані від серця, яке є джерелом поля. За діагностичні ознаки магнітокардіографії беруть тривалості хвиль та зубців, їх амплітудні значення, характеристики крутизни певних ділянок магнітокардіограми. Інформація, яку дає методика магнітокардіографії, дозволяє проводити ранню діагностику дистрофії міокарда, гіпертрофії серцевого м'яза. Магнітокардіологічне дослідження повинно обов'язково супроводжуватися повноцінним стандартним електрокардіографічним вимірюванням в однаковому стані серцевої діяльності пацієнта, що дозволяє досить надійно діагностувати багато порушень серцевої діяльності та надає важливу додаткову інформацію для магнітокардіографічних досліджень.

Джерелами слабких магнітних полів є біологічні об'єкти. Магнітні поля можуть відображати аномалії в роботі органів чи тканин. Відмічено вплив їх на нервову систему, на зміну характеристик крові, зменшення швидкості осідання еритроцитів і числа лейкоцитів. Впливає на тканинне дихання, підвищує вміст гемоглобіну крові, знижує вміст нуклеїнових кислот і окремих ферментів . Відповідно первинними в даних випадках є фізичні процеси: зміна орієнтації молекул, зміна концентрації іонів у неоднорідному магнітному полі, силова дія на іони (визначається силою Лоренца), ефект Холла, який виникає в магнітному полі при розповсюдженні електричного імпульсу збудження. Магнітні поля живого організму можуть бути визвані іонними струмами, що виникають унаслідок електричної активності клітинних мембран (головним чином м'язових і нервових клітин), наявністю феромагнітних частинок, наявних або спеціально введених в організм, при накладанні зовнішнього магнітного поля проявляються неоднорідності магнітної сприятливості органів. Відзначено, що неоднорідність біосередовища суттєво відображається на розподілі магнітних і електричних полів. Реєстрацією магнітних полів біооб`єктів займається біомагнітографія, яка має ряд переваг над методами електрографії: магнітографія не потребує прямого контакту з біооб`єктами і дає можливість проводити вимірювання через пов`язку; магнітні поля швидко слабшають при віддаленні від джерела активності, тому магнітографія більш зручна для точного визначення (локалізації) місця біоелектричної активності; індукція магнітного поля (силова характеристика), як вектор, характеризується не тільки абсолютною величиною, але і напрямком, що також може давати додаткову корисну інформацію.

Магнітоенцефалографія – діагностичний метод, що дозволяє виміряти і візуалізувати магнітні поля, які виникають внаслідок електричної активності мозку. Разом із фундаментальними дослідженнями, такими, як дослідження сенсорних і моторних функцій мозку і когнітивних процесів пам`яті, магнітокардіографія дає можливість неінвазивної локалізації епілептичних джерел патологічної нейронної активності і диференціальної діагностики різних форм епілепсії. Метод магніто-

енцефалографії базується на вимірюванні слабких магнітних полів (з індукцією магнітного поля значно менших нановеличин), які породжуються електричною нейронною активністю мозку. Реєстрація магнітних полів мозку можлива завдяки використанню надчутливих сенсорів для реєстрації магнітного поля (надпровідникових квантових інтерферометрів). Магнітоенцефалографія може служити адекватним, а іноді і найбільш інформативним методом дослідження визваної і спонтанної активності кори головного мозку, здатна виявляти джерела, зв'язані зі зміною сумарної постсинаптичної активності нейронів. Проведені дослідження за допомогою магнітоенцефалографії дають можливість тестувати і виявляти такі захворювання, як розсіяний склероз, хвороба Альцгеймера, шизофренія, синдром Шегрена.

Магнітні поля можуть бути індуковані у процесі електричної активності сітчастої оболонки ока; реєстрація відповідних магнітних полів лежить в основі *магніторетинографії.* При дії зовнішніх подразників на зоровий аналізатор виникають магнітні поля на роговій оболонці ока, вимірювання яких називають *магнітоокулоерафією.*

Реальні значення магнітних полів, що реєструються методами магнітографи, наведено в таблиці 16.

Таблиця 16.

Значення магнітних полів, що реєструються методами магнітографії

Біомагнітний сигнал	Магнітна індукція, пТл
Магнітокардіографія	50
Магнітоенцефалографія	1÷10
Магнітоміографія	10
Магнітоокулографія	10

Магнітотерапія (МТ) – лікувальний метод, при якому на тканини хворого впливають перемінним низькочастотним або постійним магнітним полем (МП) за допомогою індукторів-електромагнітів або постійних магнітів, частота 10-150 Гц, сила магнітної індукції 10-35 мТ. Для лікувального впливу використовують різні види низькочастотних магнітних полів: перемінне (ПеМП), пульсуюче (ПуМП), те, що біжить (БеМП) та ін. У механізмі дії на перший план виступають первинні фізико-хімічні явища в біологічних речовинах, елементах крові, біоколоїдах, макромолекули набувають здатності проходити через мембрани, впливаючи на біологічні процеси, в т.ч. вплив на синглет-тріплетні переходи в радикальних парах біологічних молекул, що збільшує швидкість хімічних реакцій на 10-30 %; збільшенню в тканинах вмісту цитокінів, простогландінів, токоферола; впливу на стан мембран клітин та йонні канали – іонпараметрична магнітотерапія; зменшенню збудливості нейронів зі спонтанною імпульсною активністю. В крові і лімфі індуціюються струми та змінюється їх потенціал, а при імпульсній магнітній терапії виникають вихрові струми, які забезпечують скорочення м'язів (феномен магнітоміостимуляції). Загальна дія магнітотерапії: парасимпатикотонічний (перехід енергетичних систем на більш ощадний рівень функціонування) та спазмолітичний (симпатолітичний) ефекти. Реєструється також седативна протизапальна, починаючи з гострої фази, протинабрякова, судинна, трофічна, покращання мікроциркуляції та реологічних якостей крові. Особливості дії: постійних магнітних

полів — імуномоделюючий та протиалергічний; місцевий трофічний; місцевий судинорозширюючий; південний-тонізуючий; північний-седативний; імпульсних магнітних полів — нейростимулюючий (міостимулюючий); вазоактивний; анальгетичний; протизапальний (дренуюче-дегидратуючий); протизапальний (протинабряковий); вазоактивний; трофічний; вазоактивний; гіпокоагуліруючий; місцевий анальгетичний. Магнітотерапія також має детоксикаційний ефект (10-45 мТл, час впливу – 30-60 хв.) – проникнення магнітних полів до 10 см, що дає можливість впливати на кров.

Показання: захворювання, що супроводжуються порушенням мікроциркуляції (кардіологія, артрологія, стоматологія, судинна патологія); запальні захворювання в гостру фазу; хронічні захворювання внутрішніх органів; захворювання та порушення периферійної нервової системи; гіпертонічна хвороба 1-2 ступеня; захворювання периферійних судин кінцівок.

Протипоказання: індивідуальна підвищена чутливість до фактору, гостре порушення мозкового кровопостачання, різко виражена гіпотензія, наявність імплантованих кардіостимуляторів.

ОПТИКА

ВПЛИВ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ТВАРИН

Світло є одним з найважливіших зовнішніх факторів, що впливають на сільськогосподарську тварину. Вплив світла пов'язаний з такими основними його параметрами як інтенсивність світла (освітленість), спектральний склад та тривалість освітлення (фотоперіод). Деякі птахи і комахи здатні реагувати на поляризацію оптичного випромінювання.

Сприятливі з точки зору інтенсивності світла умови в тваринницьких приміщеннях впливають на обмін речовин у тварин та окислювально-відновні процеси у тканинах, функції ендокринної системи, резистентність, відтворну здатність і продуктивність тварин. В той же час забезпечення високого рівня освітленості приміщень потребує енергетичних затрат. Пошуки виходу з цієї суперечності приводять до розробки оптимальних норм освітленості тваринницьких приміщень, які знаходяться в межах близько 5÷100лк.

Спектральний склад світла також впливає на тварину; залежно від довжини хвилі оптичного випромінювання можна досягти підвищення продуктивності та прискорення відтворних функцій тварин, збільшення вмісту гемоглобіну у крові. Помічено вплив спектрального складу світла на розвиток ембріонів, поведінку птиці, збільшення маси, кількості запліднених яєць, підвищення несучості. Тривалість освітлення враховується у птахівництві. Вибір певних режимів фотоперіоду дає можливість скоротити період линяння курей, підвищити несучість, активізувати рухову активність та інтенсивність поїдання корму курчатами. Ультрафіолетове опромінювання тварин сприяє одержанню здорового потомства, запобігає захворюванню молодняку на рахіт, підвищує приріст живої маси, прискорює інтенсивність обмінних процесів, підвищує плодючість, зумовлює інтенсивний розвиток шкіри ягнят. Використання ультрафіолетового випромінювання у птахівництві зумовлює кращий розвиток ембріонів, поліпшення пронесу виводу курчат, підвищення обміну речовин, компенсування дефіциту вітаміну D в раціоні птиці

та запобігання захворюванням. Все це підвищує несучість птиці і збільшує прирости живої маси.

ФОТОРЕЦЕПЦІЯ У ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ

Рис. 90.Зоровий аналізатор бджоли

Основне призначення фоторецепторної системи живих організмів — забезпечення інформацією про стан навколишнього середовища, зокрема, інтенсивності світлового стимулу, просторових і часових характеристик, за допомогою яких організм здатний орієнтуватися відносно одного з найважливіших зовнішніх факторів — світла. Просторові та часові зміни інтенсивності та напрямку світлового потоку можуть викликати відповідні зміни рухової та поведінкової активності цих організмів,

Фоторецепція у комах

Реакція на світло у комах здійснюється за допомогою двох складних очей і трьох простих (рис. 90). Просте око являє собою лінзоподібний горбик на хітиновому покриві голови, до внутрішнього боку якого підходять нервові клітини. Складається просте око з прозорої лінзи, шару зорових клітин (близько 800) і зорового нерва (рис. 91). На сітківці простого ока не формується зорове зображення; в той же час прості очі в змозі сприймати такі параметри оптичного випромінювання як інтенсивність, період і спектральний склад. Вважається, що прості очі здатні реагувати на сутінки або світанок, забезпечуючи орієнтацію комахи в умовах зниженої освітленості.

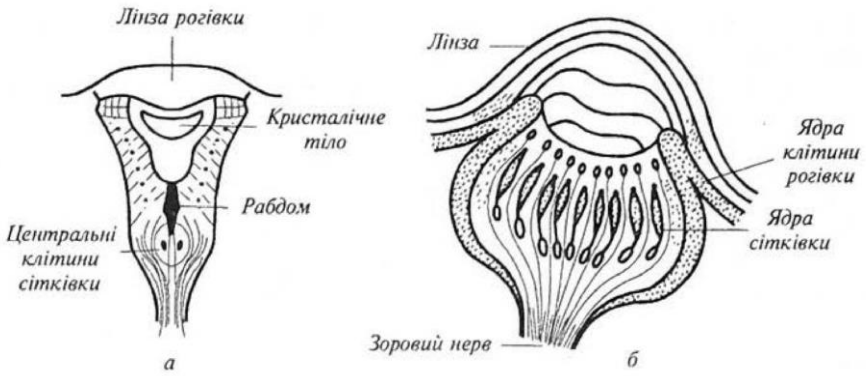


Рис. 91. Просте око комахи: а) латеральне; б) дорсальне

Складні очі мають фасеткову структуру, що формує мозаїчну картину. Складається складне око з набору оматидіїв, кількість яких становить 25000 у жуків, 8000÷10000 у бджіл, 4000 у мух, 100÷1000 у мурашок. Основними елементами оматидія є кришталева лінза (рогівка), кришталевий конус, пігментні клітини, фоторецептор, рабдом (ретинальна клітина). Зовнішній вигляд складного ока наведено на рис. 92, *а*, а оматидія — на рис. 92, *б*. У бджоли, наприклад, до внутрішнього кінця кришталевого конуса приєднано вісім радіально розміщених зорових клітин, завдяки яким комаха здатна сприймати поляризацію відбитого сонячного випромінювання і здійснювати орієнтацію у просторі.

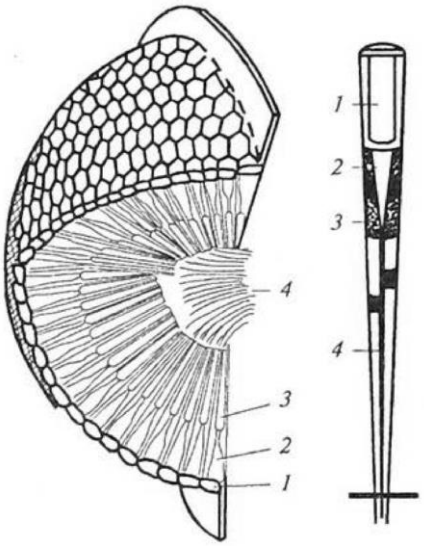


Рис. 92. Складне око бджоли:
а) фасеткова структура складного ока: 1 – рогівка; 2 – кришталевий конус; 3 - палички сітківки; 4 – зоровий нерв.
б) схема оматидія: 1 – кришталева лінза; 2 – кришталевий конус; 3 - пігментна клітина; 4 - ретинальна клітина

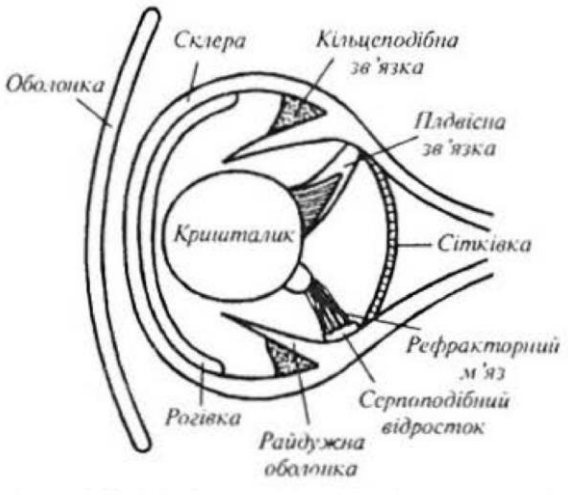


Рис. 93. Зоровий аналізатор риб

Щодо здатності комах сприймати колір, то слід зазначити, що взагалі стимулюючою дією характеризуються довжини хвиль в діапазоні 250÷700 нм. Вважається, що метелики, мухи і деякі жуки реагують на синій колір; бджоли — на червоний, жовтий, зелений і синьо-зелений. Крім того, комахам властива чутливість до ультрафіолетового випромінювання. Але можливим поясненням відвідування комахами кольорових квітів є їх здатність розрізняти інтенсивність випромінювання, відбитого від різних частин квітки.

Зоровий аналізатор риб

Структуру ока риби наведено на рис. 93. Для захисту рогівки від великих тисків і піску око обладнане оболонкою — твердим прозорим утворенням. Коефіцієнти заломлення оболонки, рогівки і води приблизно однакові. Фокусування ока на об'єкт здійснюється за допомогою втягуючого м'яза, що пересуває кришталик вздовж оптичної осі рогівки. Форма ока залежить від способу життя риби — мешканці глибин мають рурчасту форму, причому сітківка розміщена так, щоб забезпечити фокусування на об'єкти на різних віддалях. Форма ока інших типів риб нагадує правильний трикутник; така форма забезпечує різні фокусні відстані для об'єктів, розташованих нагорі або безпосередньо перед рибою. У акули, наприклад, очі взагалі позбавлені оболонки. Крім того, фокусування ока на об'єкт здійснюється за допомогою м'яза, який наближує кришталик до рогівки (на відміну від інших риб).

Зоровий аналізатор птиці

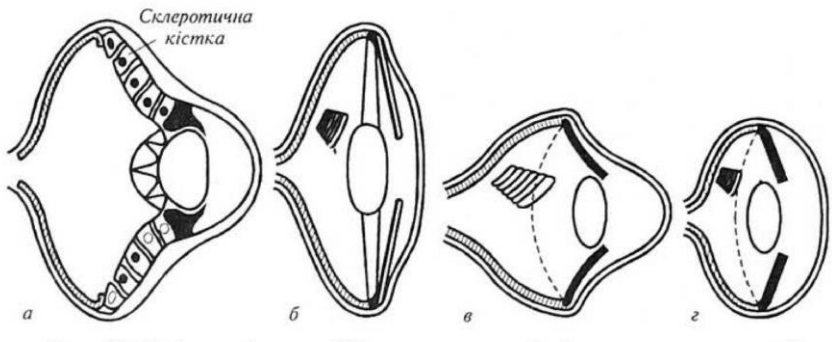


Рис. 94. Основні типи будови ока у птахів

Зоровий аналізатор птахів призначений не тільки для створення зорових зображень; функції його полягають також в формуванні кольорових образів, що важливо з точки зору розпізнавання статевих партнерів, суперників та ворогів. Більшість птахів проводить весь свій час в пошуках

корму, але спосіб життя у птахів різний. Вони можуть вести денний або нічний спосіб життя; деякі з них літають високо над поверхнею землі. Все це накладає відбиток на будову і функції зорового аналізатора, що сформувався протягом еволюції. Можна розрізнити чотири основних типи будови ока у птахів.

Рурчастий (циліндричний) тип ока характеризується грушеподібною формою, значною сітківкою і істотно меншою напівсферичною рогівкою, що виступає вперед (рис. 94, *а*). Чотири п'ятих ока сховано в черепній скрині птаха. Є чітко виражена склеротично кісточка. Такий тип ока зустрічається у сов.

Плаский тип ока властивий курям (рис. 94,*б*), Він характеризується сплощеною овальною формою.

Кулеподібний тип ока характерний для птахів-хижаків. Око цього типу має кулеподібну форму з опуклою рогівкою (рис. 94,*в*). Діаметр ока у хижаків менший, ніж у звичайних птахів. Такий тип ока забезпечує гостре фокусування на великих відстанях.

Пласко-сферичний тип ока у співочих птахів. Характерними рисами такого ока є ледве приплюснута, але сферична форма рогівки (рис. 94, *г*).

Таким чином, птахи відрізняються не лише за формою ока, але й його внутрішньою структурою. Очні яблука більшості птахів обладнані двома специфічними пристроями для підвищення гостроти зору — центральною ямкою і гребінцем.

Центральна ямка являє собою надчутливу область, насичену колбочками, розташована на сітківці. Зазвичай центральна ямка має форму вузенької смужки. Це особливо доцільно для птахів, які полюють за комахами — видовжена форма цього органа дає можливість контролювати комах без додаткових поворотів голови. Око хижака обладнане двома центральними ямками, кожна з яких настроєна на різні об'єкти. Те ж саме можна сказати щодо швидких мисливців за комахами — ластівок і стрижів. Голуби, наприклад, взагалі позбавлені центральної ямки.

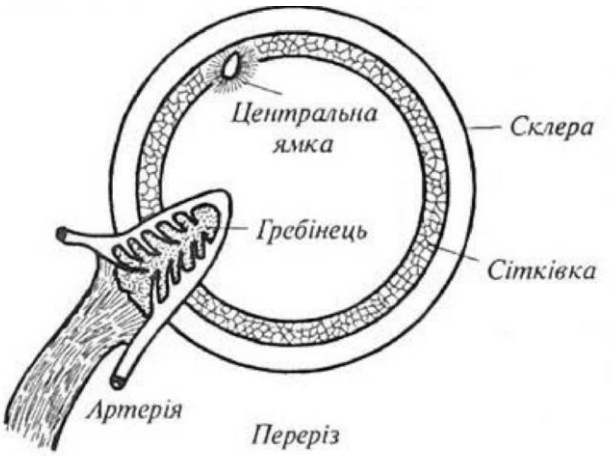


Рис. 95. Гребінець ока птаха в перерізі

Гребінець являє собою складчасте пігментоване утворення, насичене кровоносними судинами і з'єднане з оптичним нервом (рис. 95). Кількість складок в гребінці залежить від способу життя - у свійської птиці вона становить: 15 у курки, 13 - у качки і гуски. Птахи, що літають на великих висотах, мають іншу кількість складок: 24 у галки, 23-26 у ворони.

Існують гіпотези, відповідно до яких гребінець: 1) виконує функції стабілізатора тиску всередині ока, зміни якого супроводжують швидкий рух птахів; 2) є сенсорним органом, здатним відчувати зміни тиску при акомодації та забезпечувати гостроту зору віддалених об’єктів; 3) послаблює дію сфокусованого кришталиком сонячного випромінювання, що пошкоджує сітківку; 4) бере участь у навігаційних здатностях птахів орієнтуватися відносно Сонця; 5) відчуває вплив зовнішнього магнітного поля і сонячного випромінювання через участь кровоносної системи гребінця як сукуп-

ності струмопровідних витків, розміщених у двох взаємно перпендикулярних площинах, і використовує фотомагнітний ефект для орієнтації у просторі.

Зоровий аналізатор ссавців

Сенсорна інформація щодо навколишнього середовища сприймається людиною або твариною у вигляді змін таких параметрів як інтенсивність світла, довжина світлової хвилі, форма, розміри і положення об'єкта. Основний елемент зорового аналізатора (сенсорної системи, що перетворює оптичні стимули в послідовність нервових імпульсів) є око; його призначення — фокусування зображення на сітківку, регуляція кількості світла, яке бере участь у формуванні зображення, перетворення зображення фоторецепторною системою ока і передача інформації в мозок.

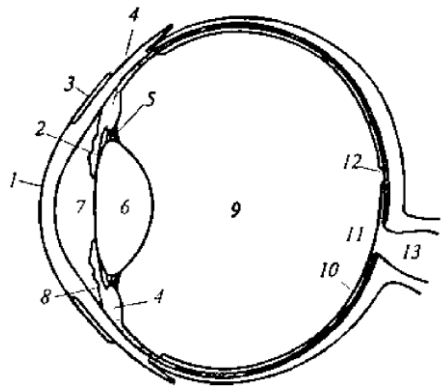


Рис. 96. Будова ока ссавців: 1- рогівка; 2 – райдужна оболонка; 3 – кон'юнктива; 4 – війчастий м'яз; 5,8 – зв'язки; 6 – кришталик; 7 – передня камера; 9 – склисте тіло; 10 – сітківка; 11 - оптичний диск; 12 – центральна ямка; 13 – зоровий нерв

Будову ока ссавців в горизонтальній площині наведено на рис. 96. Зовнішній захисний шар, що оточує очне яблуко, називається склерою. На передній частині ока склера переходить в прозору шарувату структуру, що називається рогівкою. Задніх дві третини ока вкриває пігментований шар — судинна оболонка. Саме в цій оболонці знаходиться сітківка, яка містить фоторецептори. Світло потрапляє в око крізь рогівку в передню камеру; так само, як і задня камера, вона заповнена прозорою рідиною — водянистою вологою. Між передньою і задньою камерами розміщена райдужна оболонка, що виконує функції діафрагми. Завдяки скороченню або розслабленню м'язів змінюється величина діаметра зіниці — отвору, через який світло проходить в задню частину ока. За райдужною оболонкою міститься кришталик, радіус кривизни якого може бути змінений за допомогою війчастого тіла. Простір між кришталиком та сітківкою заповнений склоподібним тілом — желатиноподібною рідиною. На сітківці, якої в решті-решт досягає світло, є оптичний диск, до якого сходяться нервові волокна, Там же розташована центральна ямка, яка є місцем найкращого зору. Розміри ока у ссавців варіюють в широких межах (табл. 17).

Таблиця 17.

Тварина	Поздовжній розмір (мм)	Вертикальний розмір (мм)	Поперечний розмір (мм)
Кінь	44	50	54
Корова	37	42	43
Свиня	22	24	25
Вівця	31	33	34

Розміри ока у ссавців

Не завжди зміна розмірів ока супроводжується адекватною зміною структурних елементів — товщина сітківки змінюється не так істотно, як розміри інших

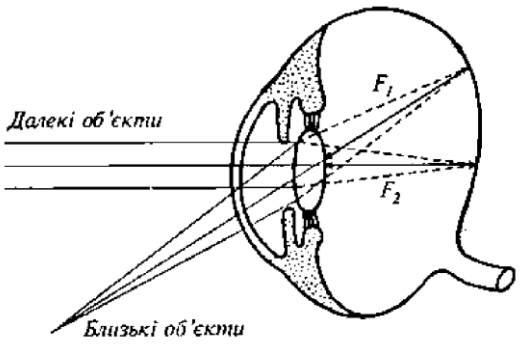


Рис. 97. Асиметрична форма очного яблука коня

елементів. Цікаво розглянути властивості зорового аналізатора деяких живих істот, які в процесі еволюції набули специфічних рис. До таких істот можна сміливо віднести коня. Очне яблуко коня асиметричне (рис. 97); рогівка розташована поблизу верхньої ділянки ока; сітківка посунута відносно оптичної осі ока. Війчасті м'язи відіграють незначну роль в зміні радіуса кривизни кришталика. Здатність коня фокусувати зоровий аналізатор на об'єкти, розташовані на різних відстанях, досягається простим нахилом голови. З кожною зміною положення голови коня змінюється фокусна відстань — від 40 до 45 мм. Ще однією особливістю зорового аналізатора коня є форма зіниці — у молодих коней вона кругла, після 5-6 років форма зіниці наближається до еліпсоїдальної.

Механізми зору тварин

Світловий потік, що потрапляє в око, зазнає заломлення на роговій оболонці (n = 1,376; r = 7,8 мм). Після цього має місце заломлення під час переходу з рогової оболонки в передню камеру (n = 1,336). Подальше заломлення відбувається в кришталику, показник заломлення якого поступово зростає від 1,386 до 1,406 в напрямку його ядра. За кришталиком прямує внутрішня камера ока (n=1,336). Таким чином, структура ока включає чотири сферичних межі розподілу середовищ з різними показниками заломлення (рис. 98). Розрахунки свідчать про те, що оптична сила ока становить: 58,64 дптр для людини; 61,3 дптр для вівці; 47,7 дптр для корови; 78,2 дптр для коня.

Сітківка ссавців складається з п'яти типів клітин - фоторецепторних, біполярних, горизонтальних, амакринових і гангліозних (рис. 99). Фоторецепторні клітини (палички і колбочки) перебувають у контакті з біполярними клітинами, що здійснюють зв'язок з гангліозними клітинами. Останні передають потенціал дії мозку.

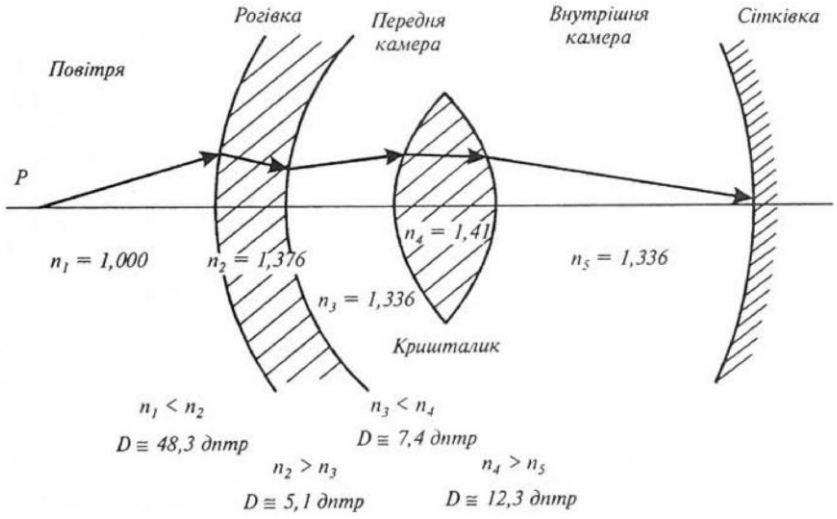


Рис. 98. Заломлююча здатність ока

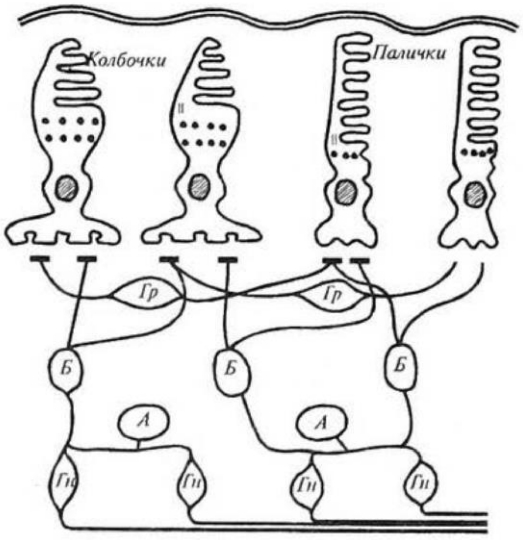


Рис. 99. Основні типи клітин сітківки: А- амакринові; Б – біполярні; Гр. - горизонтальні; Гн. - гангліозні

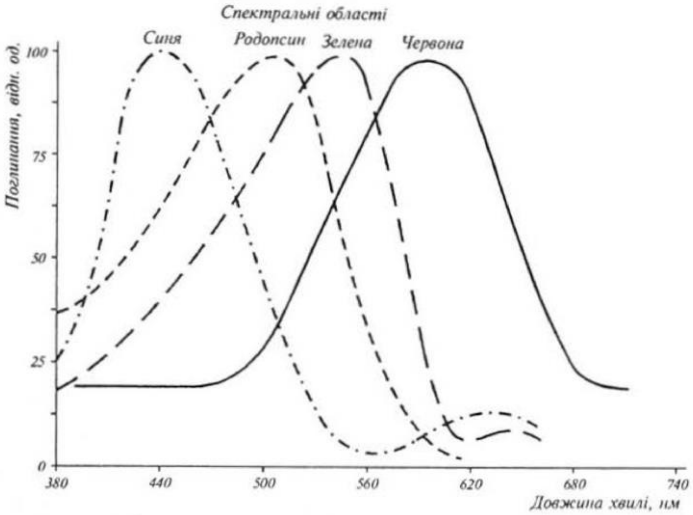


Рис. 100. Спектри дії родопсину та пігментів колбочок

Горизонтальні клітини з'єднують по горизонталі фоторецепторні і гангліозні клітини; амакринові з'єднують по горизонталі біполярні і гангліозні клітини.

Фоторецептори клітини містять зорові пігменти - родопсин в паличках і йодопсин в колбочках. Родопсин являє собою складний білок, що складається з білка опсину та хромофорної групи — ретиналю. Йодопсин також містить ретиналь, але відрізняється від родопсину білковою частиною. Під дією світла молекула ретиналю збуджується, зазнаючи при цьому фотоізомеризації. Потім відбувається серія конформаційних перебудов молекули білка опсину, пов'язаних із переміщенням по ній заряду, що утворює ранній рецепторний потенціал, а через 1 мс — пізній рецепторний потенціал. Під впливом світла відбувається зміна провідності іонних каналів, що приводить до гіперполяризації клітинної мембрани. Очевидно, аналогічні процеси відбуваються й в колбочках; поглинання кванта світла молекулою йодопсину викликає її збудження та появу раннього рецепторного потенціалу. Таким чином, процеси зору являють собою складний ланцюг ініціації світлом фотохімічних реакцій в зорових пігментах, ізомеризації молекул фотопігментів, зміни проникності мембрани фоторецептора, утворення електричного потенціалу в фоторецептор ній мембрані і передачі електричного імпульсу від зорового нерва мозку.

Кольоровий зір тварин

У кольоровому сприйнятті зображень особливу роль відіграють колбочки. Наявність трьох типів колбочок визначає три основних області поглинання світла: С (синьої), З (зеленої) і Ч (червоної). Спектральні криві колбочок наведено на рис. 100. У людей порушення сприйнятої кольору (дальтонізм) пов'язане саме з недостатньою активністю будь-яких груп колбочок. Чутливість до кольору тварин зумовлена способом життя.

Слід зазначити, що проблема вивчення кольорового зору сільськогосподарських тварин ще далека від повного розуміння.

Відомо, що велика рогата худоба здатна реагувати на кольори в довго- та середньохвильовій області спектра (550÷700 нм), але короткі хвилі (синю область) вона сприймає з труднощами.

Вівця і кінь здатні відрізняти темно-зелений корм від світло-зеленого, але не зрозуміло, то тут впливає — яскравість чи кольорові відтінки корму.

У птахів здатність реагувати на колір пов'язана з необхідністю розпізнавати друзів або ворогів; кольорове забарвлення птахів є важливою статевою ознакою. Такі свійські птахи як кури не реагують на синій колір.

Кольорове відчуття риб теж залежить від способу життя — їх здатність сприймати ті чи інші довжини світлових хвиль залежить від глибини мешкання — збільшення глибини викликає спектральний зсув в короткохвильову область. Глибоководні риби не здатні відрізняти кольори. В освітлених сонцем водоймах глибина 4,5 м є, мабуть, межею кольорового сприйняття риб. Хоча літературні дані з цієї теми повні суперечностей, можна стверджувати щодо повної відсутності кольорового зору у хрящових, акул, скатів.

Щодо комах, таких як комари, деякі види мух, міль, то їх чутливість займає область 400÷600 нм з максимумом при 500 нм; в той же час є винятки — максимум спектральної чутливості аскалафід знаходиться при 350 нм. Спектральна чутливість зору бджіл характеризується зсувом в ультрафіолетову частину спектра. Максимум спектральної чутливості безхребетних займає область 450-500 нм і ніколи не перевищує 560 нм.

Області зору у тварин

У більшості сільськогосподарських тварин очі розмішені зобабіч голови. Через це область монокулярного зору (простору, який тварина бачить кожним оком) перевищує область, яку бачить тварина, якщо очі її спрямовані уперед, Але область бінокулярного зору (тобто, простору, який тварина бачить при фіксованому положенні обох очей) у сільськогосподарських тварин вужча (рис. 101). Так, розбіжність зорових осей у котів і собак не перевищує 20-50°, тоді як у сільськогосподарських тварин цей кут достатньо великий (табл. 18).

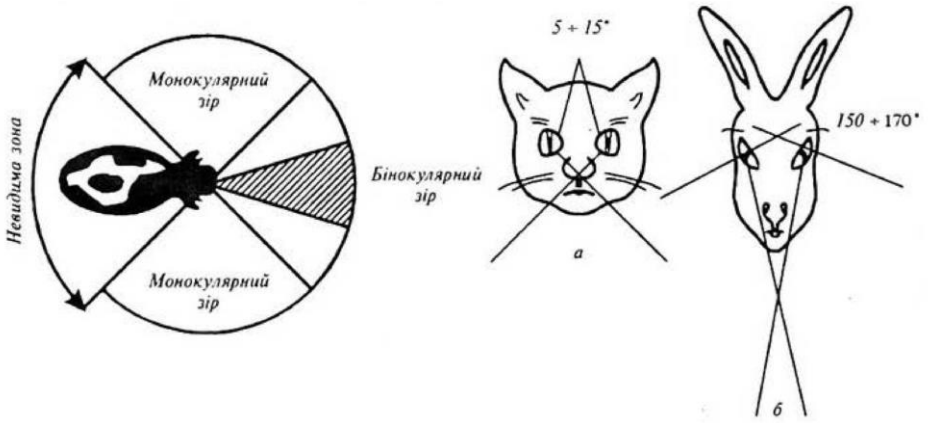


Рис. 101. Області бінокулярного зору у тварин: а – у кота;
б – у кроля

Тварини одного виду, але різних порід, можуть характеризуватися різним розміщенням очей. Так, наприклад, скакові коні мають очі, спрямовані більш фронтально порівняно з очами коней — ваговиків, яким притаманна більш широка лобова частина голови.

«Мертва зона» попереду голови коня завдає чимало прикрощів наїзнику. В цілому області зору коня залежать від положення його голови. Кінь, який пасеться, має хороший бінокулярний зір у передньому напрямку, хороший монокулярний зір у нижньому і задньому напрямках, «мертвий» простір у верхньому напрямку. Кінь, який стоїть з піднятою головою, характеризується хорошим бінокулярним і монокулярним зором в прямому напрямку, слабким монокулярним зором у задньому напрямку і нічого не бачить унизу.

Таблиця 18.

Поле зору у сільськогосподарських тварин (в градусах)

Тварина	Розходження зорових осей	Загальна область зору	Поле бінокулярного зору
Кінь	до 130	330÷350	30÷70
Велика рогата худоба	90÷115	330÷360	25÷50
Вівця	90÷100	330÷360	25÷50
Коза	100÷120	320÷340	20÷60
Свиня	70	300	30÷50
Кріль	150÷170	360 або менше	10÷35

Області зору птахів визначаються їх способом життя. Ряд птахів відзначається вузькою, уперед спрямованого діаграмою бінокулярного зору (сови, голуби, соколи). Птахи з очами, розташованими по обидва боки голови мають виключно монокулярний зір (кури, папуги, баклани).

Риба, що пливе у водоймі, бачить навколишні об'єкти у своєрідному полі зору, характер якого визначається законами відбивання і заломлення світла на межі «повітря-вода» (рис. 102).

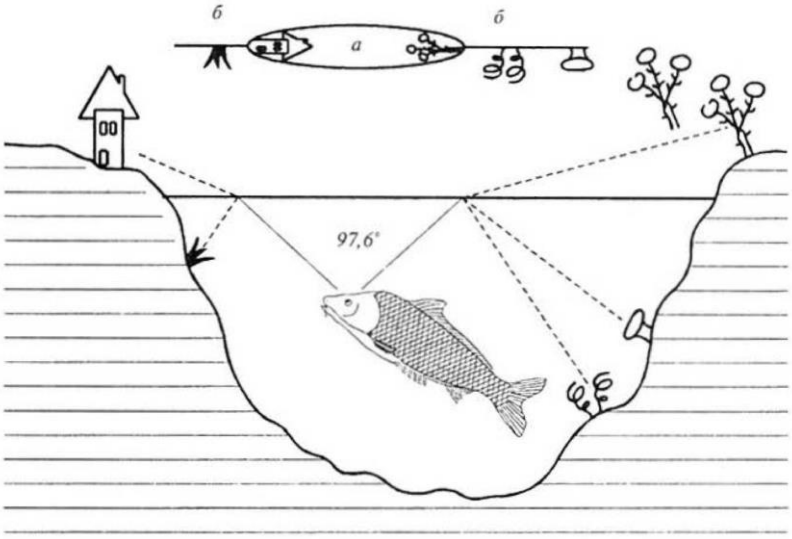


Рис. 102. Поле зору риб: *а* – поле прямого зору;
б – поле відбитого зору

Характеристики зору тварин

Важливим параметром, що характеризує розмір зображення на сітківці, є кут зору, який утворюється двома променями, що йдуть від крайніх точок предмета (рис. 103).

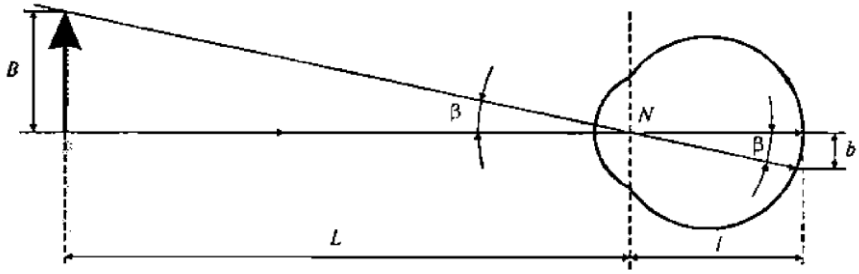


Рис. 103. Зв'язок між розміром B предмета, відстанню L його від ока і кутом зору β: *l* – відстань між вузловою точкою N і сітківкою; b – розмір зображення

Кут зору β пов'язаний із відстанями *l* та L від вузлової точки N до сітківки і об'єкта відповідно, з розмірами b зображення та B об'єкта:

$$\beta = \frac{b}{l} = \frac{B}{L}$$

Звідси отримаємо вираз, за яким можна визначити розмір зображення на сітківці: $b = l\frac{B}{L}$

Роздільна здатність ока визначається як найменший кут зору, при якому око в змозі розрізнити дві точки об'єкта. Цей кут дорівнює близько 1', що відповідає відстані між точками, рівній 70 мкм, якщо вони знаходяться на відстані L = 0,25м. Розмір зображення b в цьому випадку дорівнює 5 мкм.

У медицині роздільну здатність ока оцінюють гостротою зору. За норму гостроти зору приймається одиниця. У цьому випадку найменший кут зору дорівнює 1'. Якщо пацієнт демонструє найменший кут зору 4', то гострота зору дорівнює 1/4 = 0,25. Роздільну здатність ока можна оцінити на основі критерію Релея: якщо на зіницю потрапляє світло від двох точкових джерел, то дифракційні максимуми можуть перекриватись або не перекриватись. Граничній ситуації відповідає збігання центрального максимуму дифракційної картини, отриманої від першого джерела, з першим мінімумом дифракційної картини, отриманої від другого джерела (рис. 104).

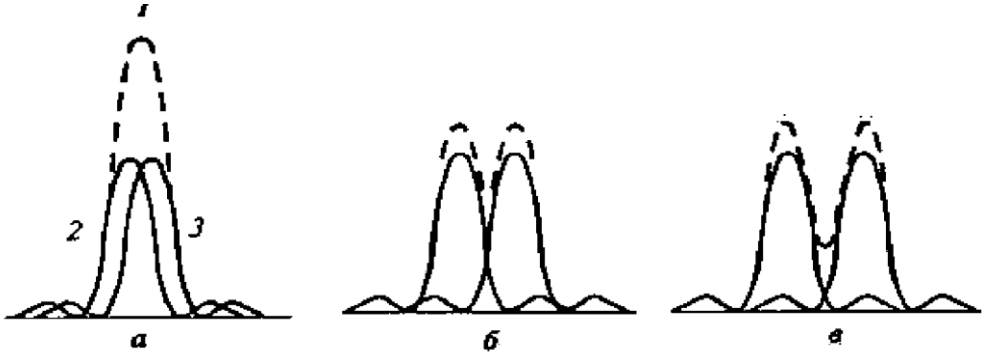


Рис. 104. Результуюча інтенсивність світла *1* від двох точкових джерел (2 і 3), випромінювання яких проходить через кругову апертуру: а – розділення відсутнє; б – часткове розділення; в - повне розділення

Зіниця являє собою коловий отвір, при проходженні якого світло зазнає дифракції. Дифракційна картина — це концентричні світлові і тем нові кільця, так звані диски Ейрі (рис. 105). Кут α, під яким видно перший темновий диск, зв'язаний з діаметром d зіниці і довжиною хвилі λ світла співвідношенням:

$$\alpha = 1{,}22 \cdot \frac{\lambda}{d}$$

Спроможність ока чітко бачити віддалені на різні відстані об’єкти називаються акомодацією. Цей параметр вимірюють оптичною силою D_a тієї тонкої скляної лінзи, яка при розміщенні перед пристосованим на дальню точку оком настроїла б око на ближню точку:

$$D_a = \frac{1}{t_Д} - \frac{1}{t_Б}$$

де $t_Д$ і $t_Б$ — відстані до дальньої та ближньої точок відповідно. «Дальня точка» відповідає максимальному віддаленню об'єкта, при якому ще можливе фокусування зображення на сітківці. Найбільш близьке розміщення об'єкта, при якому можливе різке його зображення на сітківці, відповідає «ближній точці». Величини $t_Д$ і $t_Б$ вимірюються в $м^{-1}$, тобто в діоптріях. Звичайно в геометричній оптиці на рисунках прийнято напрямок поширення світла зліва направо. Відрізки $t_Д$ і $t_Б$ вважаються додатними, якщо їх напрямок збігається з напрямком поширення світла, і навпаки.

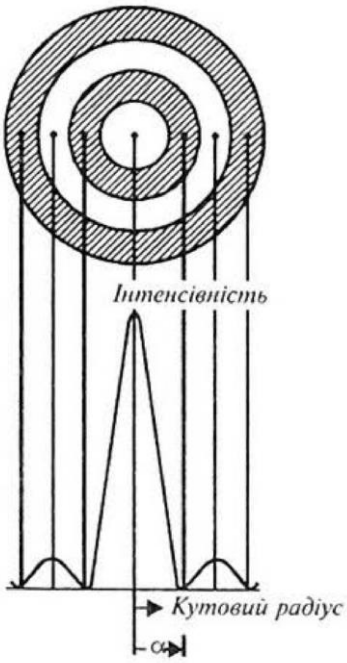


Рис. 105. Структура дисків Ейрі і залежність інтенсивності світла від кутового радіусу r

ЗАСТОСУВАННЯ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В МЕДИЦИНІ

Причиною застосування рентгенівського випромінювання в діагностиці послужила їхня висока проникаюча здатність. В перший час після відкриття, рентгенівське випромінювання використовувалося здебільшого, для дослідження переломів кісток і позиціонування чужорідних тіл (наприклад, куль) в тілі людини. В даний час застосовують декілька методів діагностики за допомогою рентгенівських променів (рентгенодіагностика).

Рентгеноскопія. Рентгенівський прилад складається з джерела рентгенівських променів (рентгенівської трубки) і флюоресціюючого екрану. Після проходження рентгенівських променів через тіло пацієнта лікар спостерігає тіньове його зображення. Між екраном і очима лікаря має бути встановлено свинцеве вікно для того, щоб захистити лікаря від шкідливої дії рентгенівських променів. Цей метод дає можливість вивчити функціональний стан деяких органів. Наприклад, лікар безпосередньо може поспостерігати рухи легенів, проходження контрастної речовини по шлунково-кишковому тракту. Недоліки цього методу - недостатньо контрастні зображення і порівняно великі дози випромінювання, одержувані пацієнтом під час процедури.

Флюорографія. Цей метод полягає в отриманні фотографії із зображенням частини тіла пацієнта. Використовують, як правило, для попереднього дослідження стану внутрішніх органів пацієнтів за допомогою малих доз рентгенівського випромінювання.

Рентгенографія. (Радіографія рентгенівських променів). Це метод дослідження за допомогою рентгенівських променів, в ході якого зображення записується на фотографічну плівку. Фотографії робляться зазвичай в двох перпендикулярних площинах. Цей метод має деякі переваги. Рентгенівські фотографії містять більше деталей, ніж зображення на флюоресцентному екрані, і тому вони є більш інформативними. Вони можуть бути збережені для подальшого аналізу. Загальна доза випромінювання менша, ніж застосовувана в рентгеноскопії.

Комп'ютерна рентгенівська томографія. Оснащений обчислювальною технікою осьовий томографічний сканер є найбільш сучасним апаратом рентгенодіагностики, який дозволяє отримати чітке зображення будь-якої частини людського тіла, включаючи м'які тканини органів.

Перше покоління комп'ютерних томографів включає спеціальну рентгенівську трубку, яка прикріплена до циліндричної рами. На пацієнта направляють тонкий пучок рентгенівських променів. Два детектори рентгенівських променів прикріплені до протилежної сторони рами. Пацієнт перебуває в центрі рами, що може обертатися на 180 ^{o} навколо його тіла.

Рентгенівський промінь проходить через нерухомий об'єкт. Детектори отримують і записують показники поглинання різних тканин. Записи роблять 160 раз, поки рентгенівська трубка переміщується лінійно вздовж скануємої площині. Потім рама повертається на 1 ^{o}, і процедура повторюється. Запис триває, поки рама не повернеться на 180 ^{o}. Кожен детектор записує 28800 кадрів (180x160) протягом дослідження. Інформація обробляється комп'ютером, і за допомогою спеціальної комп'ютерної програми формується зображення вибраного шару.

Друге покоління комп'ютерних томографів використовує кілька пучків рентгенівських променів і до 30 їх детекторів. Це дає можливість прискорити процес дослідження до 18 секунд.

В третьому поколінні комп'ютерних томографів використовується новий принцип. Широкий пучок рентгенівських променів у формі віяла перекриває досліджуваний об'єкт, і рентгенівське випромінювання, що пройшло крізь тіло, записується кількома сотнями детекторів. Час, необхідний для дослідження, скорочується до 5-6 секунд.

Комп'ютерна томографія має безліч переваг в порівнянні з більш ранніми методами рентгенодіагностики. Вони характеризуються високою дозволяючою спроможністю, яка дає можливість розрізняти тонкі зміни м'яких тканин. Комп'ютерна томографія дозволяє виявити такі патологічні процеси, які не можуть бути виявлені іншими методами. Крім того, використання комп'ютерної томографії дозволяє зменшити дозу рентгенівського випромінювання, одержуваного в процесі діагностики пацієнтами.

Застосування лазерів у медицині

Звичайне оптичне випромінювання (Сонця або лампи) складається з багатьох світлових хвиль, що поширюються у різних напрямках без будь-яких фазових

співвідношень між окремими хвилями. Лазерне випромінювання характеризується такими властивостями як висока інтенсивність, монохроматичність і когерентність, які обумовлюють високу просторову направленість лазерного випромінювання. Саме через це лазерний промінь має значно більшу густину фотонів, ніж монохроматичний та сколімований промінь звичайної лампи.

Залежно від характеристик кожний лазер знаходить застосування в тій чи іншій галузі медицині. Так, Nd:YAG-лазер відзначається глибоким проникненням випромінювання в тканину і застосовується для нагрівання, коагуляції тканини, руйнівної дії на злоякісні пухлини. Аргоновий лазер знайшов своє застосування в офтальмології, оскільки довжина хвилі його випромінювання знаходиться в синьо-зеленій області спектра, добре пропускається і фокусується оком і використовується для дії на сітківку. Довжина хвилі випромінювання напівпровідникового AlGaAs - лазера знаходиться в області «терапевтичного вікна» і саме через це цей лазер використовують для неінвазивного моніторингу глюкози в крові у хворих на діабет. Висока потужність та здатність генерувати інфрачервоне випромінювання обумовило широке застосування CO_2-лазера в хірургії. Лазери на барвниках та вільних електронах здатні плавно перестроювати частоту генерації в широких межах, що суттєво з точки зору спектроскопічних досліджень. Ультрафіолетове випромінювання ексимерних лазерів здатне руйнувати молекулярні зв'язки і саме через це знайшло своє застосування в офтальмологічних операціях.

Лазерна флуоресцентна спектроскопія ґрунтується на опромінюванні речовини, що досліджують, збудженні молекули цієї речовини та перевипромінюванні світла у вигляді флуоресценції - оптичного випромінювання з більшою довжиною хвилі. Аналіз характеру спектрів флуоресценції та часової поведінки випромінювання флуоресценції надає корисну інформацію щодо стану біомедичних об'єктів. Прикладами застосування лазерних флуоресцентних методів у медицині є діагностика злоякісних пухлин на ранніх стадіях, виявлення кров'яних бляшок, визначення концентрації глюкози в крові у хворих на діабет.

Оптико-акустична спектроскопія біомедичних об'єктів ґрунтується на опромінюванні об'єкта амплітудно-модульованим світлом, внаслідок чого відбуваються періодичні зміни тиску навколишнього повітря. Ці зміни тиску як акустичні сигнали реєструються чутливим мікрофоном. Перевагою методу є можливість аналізувати непрозорі та дисперсні середовища.

Комбінаційна спектроскопія біомедичних об'єктів передбачає непружне розсіювання світла, за рахунок якого відбувається зміна напрямку і частоти випромінювання. Комбінаційне розсіювання надає інформацію щодо структури і конформаційних змін біомолекул, стосунків цих молекул з навколишнім середовищем, кінетики різноманітних процесів. У медицині метод лазерної комбінаційної спектроскопії застосовується в офтальмології з метою ранньої діагностики катаракти кролів, аналізу *in vivo* процесу розвитку захворювання та вивчення впливу різних медпрепаратів. Техніка комбінаційної спектроскопії може бути застосована для визначення атеросклеротичних бляшок.

Лазерна спектроскопія квазіпружного розсіювання використовує реєстрацію часових змін (динаміки) амплітуди і фази (частоти) розсіяного випромінювання. Цей метод дає можливість оцінювати динамічні характеристики біологічних мік-

рооб'єктів, а саме: коефіцієнти дифузії, швидкості руху, параметри внутрішньоклітинної рухомості. В біологічних дослідженнях спектроскопія квазіпружного дослідження використовується для електрофоретичного світлорозсіювання, вимірювань швидкісних характеристик потоків крові (лазерної допплерівської анемометрії) навіть у судинах сітківки, для вимірювання рухливості сперміїв самців з метою оцінки їх якості.

Лазерна інтерферометрія дає можливість направляти в око два лазерних когерентних пучки так, щоб вони перекривалися на сітківці, внаслідок чого на ній утворюється інтерференційна картина у вигляді світлових смуг. Аналіз цієї картини дозволяє визначити ретинальну гостроту зору навіть за наявності катаракти, вимірювати товщину рогової оболонки під час операції кератомії.

Оптична когерентна томографія ґрунтується на побудові зображень поперечних перерізів внутрішньоочних структур. Метод характеризується високою роздільною здатністю і неруйнівною дією.

Голографічні методи діагностики широко застосовуються в офтальмології для отримання тривимірних зображень ока в цілому і окремих його частин, а також для дослідження внутрішніх структур ока з високим ступенем розділення. Високі можливості голографічних методів підтверджені також в ортопедії, радіології, урології.

Лазерний мікроаналіз відбувається під час взаємодії потужного лазерного випромінювання з біомедичними об'єктами, що супроводжується випаровуванням малих кількостей матеріалу, які аналізуються спектроскопічно. Метод перспективний для кількісного визначення хімічних елементів, металів, токсикантів і забруднювачів, для порівняльного дослідження нормальних і ракових клітин, для вивчення процесів дифузії арматурних металів у кістках.

Лазерна фототерапія. Для лікування патологічних станів і стимуляції життєвих процесів в медицині і ветеринарній практиці застосовуються низькоенергетичні (гелій-неонові) лазери, які випромінюють монохроматичне когерентне поляризоване світло з довжиною хвилі 632,8 нм за інтенсивності від 2-х до 25 мВт/см^2. Вважається доведеним, що червоне лазерне світло невеликої потужності діє на організм в цілому і окремі органи і системи стимулююче, оскільки їх частоти дуже близькі до частот тих життєвих процесів, які перебігають у тканинах організму, особливо в нервовій системі: під дією лазерного світла посилюється енергетичний потенціал, метаболізм у тканинах, змінюється тонус судин, оптимізується клітинний поділ і диференціювання клітин, активізуються захисні механізми, регенеративно-відновлювальні процеси, ферментативні та імунологічні системи, різко підвищується резистентність організму захворюванням.

Автори цих досліджень часто посилаються на особливу роль когерентності лазерного випромінювання, хоча цей аргумент не є переконливим, оскільки швидкість збудження молекул низькоінтенсивним світлом на декілька порядків (у 10^{10}-10^{14} разів) менша швидкості втрати когерентності збудження молекулами у конденсованій фазі за нормальної температури. Можливості застосування низькоенергетичного лазерного випромінювання у ветеринарній практиці треба обов'язково розглядати з точки зору когерентної взаємодії лазерного випромінювання з

біологічним об'єктом; така когерентна взаємодія відбувається тільки за високих (близько 2-10^{11} Вт/см^2) інтенсивностей лазерного випромінювання.

Лазерна фотохемотерапія. В основі цієї медичної технології лежить взаємодія лазерного випромінювання з хімічними сполуками *фотосенсибілізаторами,* які селективно поглинаються злоякісними пухлинами. Внаслідок цієї взаємодії пухлина спроможна флуоресціювати (що використовується для діагностики пухлин на ранніх стадіях) або руйнуватися (в чому полягає суть лазерної фотохемотерапії). За 48-72 години в організм вводять шляхом ін'єкції фотосенсибілізатор (наприклад, гематопорфіринові похідні), який вибірково концентрується в злоякісній пухлині. Далі через світловід освітлюють пухлину; активований лазерним випромінюванням сенсибілізатор флуоресціює. Випромінювання флуоресценції надходить крізь другий світловід на оптичну систему, що складається з лінз, фільтра та інтенсифікатора зображення, яке аналізується або візуально, або за допомогою фотоприймача і системи реєстрації.

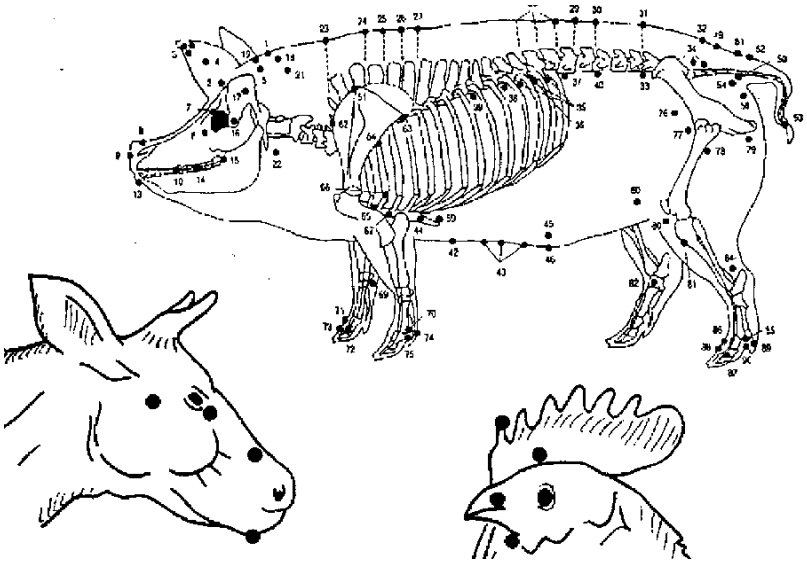


Рис. 106. Біологічно активні точки на поверхні тіла тварини

Лазерна акупунктура пов'язана зі здатністю лазерного випромінювання проникати крізь тканину, що використовується для індикації біологічно активних точок на поверхні тіла тварини (рис. 106). Перевагою лазерної акупунктури є неруйнівність, асептичність, безболісність, швидкодія.

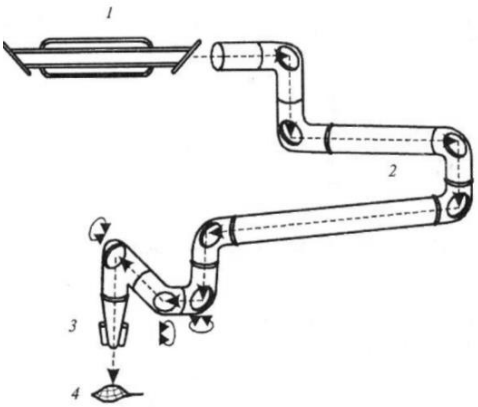


Рис. 107. Схема лазерного скальпеля

Лазерна хірургія ґрунтується на поглинанні лазерного випромінювання тканиною, її нагріванні та руйнуванні за рахунок фотохімічних, теплових або гідродинамічних процесів. Залежно від інтенсивності лазерного випромінювання та тривалості опромінювання можна досягнути різноманітних ефектів - денатурації або інактивації білків та ферментів через конвекцію теплоти і теплопровідність тканини, гіпертермії, коагуляції, зварювання, вилучення або руйну-

вання тканин. У ветеринарній хірургії використовують CO_2-лазери, Nd: YaG-лазери, рубінові й аргонові лазери. Схему можливого лазерного скальпеля зображено на рис. 107. (1 – лазер; 2 – маніпулятор променя; 3 – система освітлення; 4 – об’єкт). Такі лазерні інструменти використовують під час лазерної кератотомії - хірургічних надрізів та розтинів рогової оболонки, лікування глаукоми – захворювання очей, пов'язане з підвищенням внутрішньоочного тиску, та катаракти - помутніння кришталика. Перевагою лазерної хірургії є зменшення тривалості операції, стерильність лазерного променя, менша кількість некротичних перетворень тканин і гематом. Яскравим прикладом можливого застосування лазера в зооінженерній практиці є кастрація самців сільськогосподарських тварин та ампутація крил у домашньої птиці з метою підвищення продуктивності та несучості.

Лазерні системи у дистанційному зондуванні навколишнього середовища

Дистанційне зондування на основі лазерів полягає в опромінюванні об'єктів навколишнього середовища та реєстрації відбитого від об'єкта або розсіяного від нього лазерного випромінювання. Прилад для дистанційного зондування компонентів біосфери називається ЛІДАРом (від англійської фрази Light Detection And Ranging). Лазерні системи використовуються для дистанційного зондування атмосфери, зокрема визначення висоти хмар, дослідження структури і властивостей хмар, вимірювання параметрів вітру, вимірювання вологості і температури повітря, оцінки опадів. Лазерні системи, що встановлені на борту авіаносія чи супутника, спроможні проводити топографічні вимірювання на земній поверхні, оцінювати рослинні покриви, водяні потоки, ерозійні процеси.

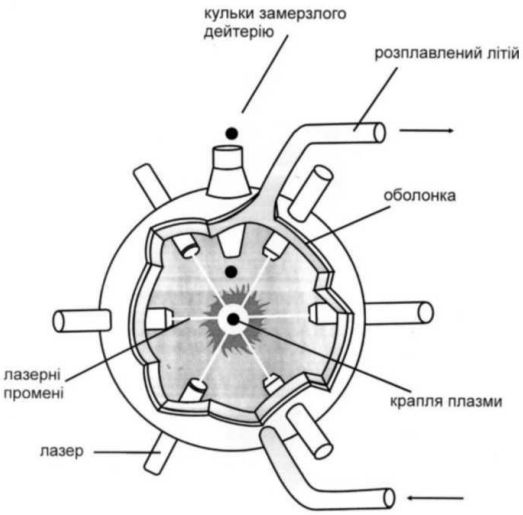


Рис. 108. Сферична капсула заповнена паливом - дейтерієм та

Лідари застосовують для оцінки в атмосфері частинок попелу з підприємств, які використовують вугілля; сполук кальцію і ртуті з плавильних та металургійних заводів, флуоридів, які супроводжують виробництво алюмінію або фосфору; частинок сульфатів, хлоридів, ванадію, миш'яку, оксидів і сульфідів різноманітних елементів; наявності та кількісної оцінки атмосферних аерозолів та молекул; вимірювання температури поверхні водойм.

Лазери у керованому термоядерному синтезі

Для здійснення реакцій керованого термоядерного синтезу необхідно наблизити ядра, що реагують, на дуже малі відстані. Щоб подолати електростатичний бар'єр, зумовлений взаємним відштовхуванням ядер як однаково заряджених частинок, необхідно забезпечити достатньо високу (близько 10 кеВ) енергію, що відповідає температурі близько 10^6 К.

Така ситуація реалізується за допомогою фокусування променів значної (близько 190) кількості лазерів на сферичну капсулу діаметром кілька міліметрів, заповнену паливом - дейтерієм та тритієм (рис. 108). Цей процес супроводжується

випаровуванням та іонізацією зовнішнього шару палива та виникненням плазми. Внаслідок розширення плазми паливо стискується, що викликає нагрівання його внутрішніх шарів.

ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ І ТЕРМОРЕГУЛЯЦІЯ У ТВАРИННОМУ СВІТІ

Медичне теплобачення (термографія)

Медичне теплобачення (термографія) - метод діагностики, заснований на реєстрації інфрачервоного випромінювання на поверхні шкіри людини. В даний час термографія може бути застосована для діагностики понад 100 захворювань, оскільки існує прямий зв'язок поверхневих ефектів із процесами що відбуваються в організмі.

Термографія - метод реєстрації видимого зображення власного інфрачервоного випромінювання поверхні тіла людини за допомогою спеціальних приладів, що використовується в цілях діагностики різних захворювань і патологічних станів. Вперше теплобачення було з успіхом застосовано в промисловості в 1925 р. в Німеччині. У 1956 р. канадський хірург R. Lawson використовував термографію для діагностики захворювань молочних залоз. Це відкриття поклало початок медичної термографії. Застосування термографії в офтальмології пов'язують з публікацією в 1964 р. Gross et al., Які застосували термографію для обстеження хворих з одностороннім екзофтальм і виявили гіпертермію при запальних і пухлинних процесах орбіти. Їм же належить і одне з найбільш великих досліджень нормального термопортрета людини. Перші термографічні дослідження у нас в країні виконали М.М. Мірошников та М.А. Собакін в 1962 р. на вітчизняному апараті. В.П.Лохманов (1988 р.) визначив можливості методу в офтальмоонкологіі.

Тепловтрати з поверхні шкіри людини в стані спокою при температурі комфорту (18 ° -20 ° С) відбуваються за рахунок інфрачервоного випромінювання - на 45%, шляхом випаровування - на 25%, за рахунок конвекції - на 30%. Тіло людини випромінює потік теплової енергії в області інфрачервоній частині спектру з діапазоном довжини хвилі від 3 до 20 мкм. Максимум випромінювання спостерігається при довжині хвилі близько 9 мкм. Величина випромінюваного потоку достатня для того, щоб його можна було виявити за допомогою безконтактних приймачів інфрачервоного випромінювання.

Фізіологічною основою термографії є - збільшення інтенсивності інфрачервоного випромінювання над патологічними вогнищами (у зв'язку з посиленням в них кровопостачання і метаболічних процесів) або зменшення його інтенсивності в областях зі зменшеним регіональним кровотоком і супутніми змінами в тканинах і органах. Переважання в клітинах пухлини процесу анаеробного гліколізу, що супроводжується великим виділенням теплової енергії, ніж при аеробному шляху розщеплення глюкози, також веде до підвищення температури в пухлині.

Крім безконтактної термографії, що виконується за допомогою термографів, існує контактна (рідкокристалічна) термографія, яку проводять з допомогою рідких кристалів, що володіють оптичної анізотропією і змінюють колір залежно від температури, а зміна їх забарвлення зіставляють з таблицями-індикаторами.

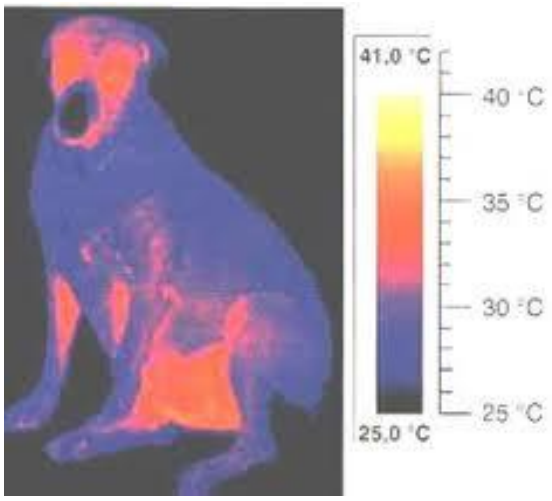


Рис.109. Термографія

Термографії, будучи фізіологічним, нешкідливим, неінвазивним методом діагностики, знаходить своє застосування в онкології для диференціальної діагностики злоякісних пухлин, а також є одним із способів виявлення вогнищевих доброякісних процесів.

Тепловізори дозволяють візуально спостерігати за розподілом тепла на поверхні тіла (рис. 109). Приймачем ІЧ-випромінювання в тепловізорах є спеціальний фотогальванічні елементи (фотодіод), що працює при охолодженні його до -196 °С. Сигнал з фотодіода посилюється, перетвориться у відеосигнал і передається на екран. При різного ступеня інтенсивності випромінювання об'єкта спостерігаються зображення різного кольору (кожному рівню температури відповідає свій колір). Роздільна здатність сучасних термографів становить до 0,01 ° С, на площі близько 0,25 мм^2.

Тепловізійна діагностика абсолютно безпечна і нешкідлива для пацієнтів і медперсоналу, і є надзвичайно ефективним методом для ранньої діагностики захворювань ще до їхнього клінічного прояву, а також для контролю за процесом лікування і реабілітації.

ДІЯ ВИДИМОГО СВІТЛА

На долю видимого світла припадає до 15 % випромінювання штучних джерел світлових променів. У природних умовах тваринний організм майже ніколи не піддається дії тільки видимих променів, оскільки в спектрі ламп розжарювання завжди переважають інфрачервоні промені. Тому під час видимого опромінення в організмі виникають реакції, притаманні інфрачервоним променям.

Видиме випромінювання включає різноманітну гаму кольорів, які вибірково діють на збудливість кори і підкоркових центрів нервової системи, модулюючи відповідним чином психоемоційні процеси поведінки тварин. Так, червоні й оранжеві промені збуджують центри кори і підкоркових структур, сині та фіолетові - пригнічують, а зелені та жовті - урівноважують процеси гальмування і збудження. Однак для нормальної життєдіяльності організму виключно важливу роль відіграє біле світло. Різні за кольором промені проникають на різну глибину в сітківку ока. Максимальною глибиною проникності володіють червоні промені, які проходять через всю склеру і взаємодіють з великою кількістю нейронів сітківки, модулюючи їх активність. У той же час промені синього і фіолетового кольорів майже повністю поглинаються сітківкою.

У процесі поглинання видимого випромінювання шкірою виділяється тепло, яке впливає на термомеханочутливі волокна шкіри. Зміна їх імпульсної активності ініціює сегментарно-рефлекторні й місцеві реакції з посиленням кровообігу і трофіки опромінених органів. Конформаційні перебудови елементів дерми під дією видимого випромінювання активують імуногенез шкіри і гуморальну регуляцію обмінних процесів в організмі шляхом індукції виділення гормонів гіпофізу.

Отже, видимі промені разом з інфрачервоними на місці свого поглинання породжують утворення тепла. Крім того, світлові промені через сітківку ока безперервно діють на кору головного мозку, через неї рефлекторно впливають на функцію ендокринних залоз та внутрішніх органів і за певних умов підвищують або понижують обмін речовин.

Видиме світло проявляє свою біологічну дію не лише через екстерорецептори шкіри та слизові оболонки, але й через корми. Червоні та синьо-фіолетові промені видимого спектра, поглинаючись хлорофілом зелених рослин у присутності води і вуглекислого газу, стимулюють синтез вуглеводів із виділенням в атмосферу чистого кисню. Важливою умовою для одержання специфічного ефекту від променевої енергії є тривалість освітлення і сила джерела світла. Зазначимо, що деякі фізіологічні стани (лактація, яйцекладка) продуктивних тварин і птиці потребують сильного світлового подразнення, а наприклад, період відгодівлі - затемнення. Із джерел світлового випромінювання у ветеринарії використовують лампи Мініна та інфраруж, солюкс-лампи, апарат Біотрон-Про та спеціальні світлотеплові ванни.

ІНФРАЧЕРВОНЕ ОПРОМІНЕННЯ

Джерелом інфрачервоного випромінювання може бути будь-яке нагріте тіло. Інфрачервоні промені складають 40-50 % сонячного випромінювання, яке досягає поверхні Землі. У штучних джерелах світла на ці промені припадає 70-80 % енергії всього випромінювання.

Організм тварини також випромінює інфрачервоні промені та добре їх поглинає (феномен радіаційного теплообміну). При поглинанні інфрачервоних променів спостерігається локальне підвищення температури поверхні шкіри на 1-2 °С зі зміною кровонаповнення поверхневих судин.

На початку опромінення відбувається короткотривалий (до 30 с), незначно виражений спазм судин шкіри, який надалі змінюється збільшенням локального кровотоку та зростанням об'єму циркулюючої в тканинах крові. Розвивається гіперемія опромінених ділянок тіла. Вона не має чітко визначених меж і безслідно зникає через 20-30 хв після припинення дії променів. Теплова енергія, що виділяється внаслідок опромінення тканин, суттєво прискорює метаболічні процеси, активує міграцію поліморфно-ядерних лейкоцитів у зону запалення, особливо в підгостру і хронічну стадії.

Під дією інфрачервоних променів розширюються кровоносні судини і посилюється випаровування, що супроводжується зменшенням вмісту води в тканинах. Цю властивість променів широко використовують під час лікування мокрих екзем, дерматитів і опіків. Проте тривале і повторне термічне подразнення шкіри спричинює, за спостереженнями І.П. Павлова, гальмування кори головного мозку.

Достатня доза оптичного опромінення знижує підвищений тонус м’язів та зменшує спастичні явища. Помірні дози опромінення мають болезаспокійливу дію, а короткочасне інтенсивне тепло може викликати його посилення.

Вплив тепла на рефлекторні зони шкіри збуджує реакції у внутрішніх органах, зумовлені метамерною іннервацією. Так, опромінення в ділянці спинних хребців розширює судинну сітку нирок і збільшує діурез, а в зоні лівої голодної ямки у жуйних посилює моторику рубця.

Рис. 110. Солюкс-лампа

Солюкс-лампа. Джерелом випромінювання є лампа розжарювання потужністю 500–1000 Вт (рис. 110). Температура нитки розжарювання 3600 °С. Світловий спектр містить 10–12 % видимих і до 90 % інфрачервоних променів із глибокою тепловою дією.

Промені солюкс-лампи активізують гіперемію шкіри і глибоко розташованих тканин, поліпшують місцеве живлення уражених ділянок, сприяють розсмоктуванню залишкових продуктів запалення, діють болезаспокійливо, підвищують імунобіологічний стан та прискорюють загоєння ран.

Опромінення проводять тільки в теплому приміщенні. Лампу розміщують на відстані 0,5-1,0м від поверхні шкіри. Інтенсивність теплового випромінювання контролюють рукою (відчуття тепла). Тривалість процедур становить 25-40 хв 1-2 рази на добу. Перед процедурою шкіру тварини очищають від бруду. Для великих тварин використовують лампу місцевого опромінення, для дрібних - загального. Після опромінення в холодну пору року тварин накривають ковдрою або попоною.

Задля поліпшення живлення шкіри, посилення кровообігу і як болезаспокійливий засіб використовують синій фільтр, який сприятливо діє на центральну нервову систему, а для глибшого прогрівання застосовують червоний фільтр, що пропускає інфрачервоні та частково оранжеві промені.

Рис. 111. Лампа Мініна

Лампа Мініна дає видиме синє світло (5%) та інфрачервоне (95 %) з вираженою тепловою дією. Джерелом випромінювання є лампа розжарювання потужністю 40-100 Вт (рис. 111).

Опромінення здійснюють 1-2 рази на добу на відстані 10-15 см протягом 30 хв. На курс лікування призначають до 15-ти сеансів.

Рис.112. Апарат Біоптрон-Про

Апарат Біоптрон-Про є світлотерапевтичним апаратом, який оснащений вмонтованим таймером на 2-8-хвилинні експозиції (рис. 112). Біоптрон-Про охоплює повний діапазон видимого і частину інфрачервоного спектра. Світло апарата Біотрон-Про має широкий діапазон електромагнітних хвиль, кожна з яких взаємно не підсумовується. Це означає, що сумарна енергія такого світлового потоку не перевищує енергії окремо взятого діапазону довжин хвиль, тому світло має постійну низьку щільність енергії, яка не проявляє руйнівної дії. Зберігається тільки біостимулювальний ефект. Ці властивості обумовлюють більш високу проникну здатність світлових електромагнітних хвиль у шкіру, шкірні судинні та нервові структури без супутнього ушкодження цих структур.

Опромінення здійснюють на відстані 30-40 см протягом 2-8 хв 1-2 рази на добу. На курс лікування призначають 10-15 сеансів.

УЛЬТРАФІОЛЕТОВЕ ОПРОМІНЕННЯ

Це оптичне випромінювання, яке має довжину хвиль від 2 до 400 нм. Від Сонця до поверхні Землі доходить незначна (1-5 %) і найменш потужна частина ультрафіолетового спектра з довжиною хвиль від 280 до 400 нм. Частина ультрафіолетових променів з довжиною хвиль до 280 нм майже повністю поглинається верхнім озоновим шаром атмосфери. Ефективність біологічної дії ультрафіолетових променів на організм тварин залежить від їх діапазону. Довгохвильова зона променів (спектр А) з довжиною хвиль від 400 до 320 нм характеризується слабовираженою біологічною дією; середньохвильова (спектр В) - з довжиною хвиль 320-280 нм проявляє виражену біологічну дію; короткохвильова зона (спектр С) з довжиною хвиль від 280 до 180 нм має бактерицидну дію, справляючи коагулювальний і денатурувальний вплив на білкові структури клітин.

При поглинанні квантів ультрафіолетового випромінювання в шкірі відбуваються такі фотохімічні й фотобіологічні реакції:

1) руйнування білкових молекул (фотоліз);
2) утворення більш складних біологічних молекул (фото-біосинтез);
3) утворення молекул з новими фізико-хімічними властивостями (фотоізомеризація);
4) утворення біорадикалів.

Вираженість цих реакцій, а також прояв подальших лікувальних ефектів визначається спектральним складом ультрафіолетових променів.

Довгохвильове опромінення має спектр ультрафіолетових променів від 400 до 320 нм. Промені цього діапазону в клітинах остеоподібного шару епідермісу (меланоцитах) стимулюють процеси декарбоксилювання тирозину з поступовим утворенням меланіну.

Найбільша кількість меланіну утворюється в шкірі на третю добу від моменту опромінення. Максимальною пігментоутворювальною дією володіють ультрафіолетові промені з довжиною хвиль 340—360 нм.

Штучні джерела ультрафіолетового довгохвильового опромінення поділяють на селективні (випромінюють довгохвильові або комбінацію довго- і середньохвильових ультрафіолетових променів) та інтегральні (всі спектри ультрафіолетового випромінювання).

У практиці ветеринарної медицини в основному застосовують інтегральні випромінювальні установки.

Середньохвильове опромінення розміщене в діапазоні хвиль від 320 до 280нм. При поглинанні квантів середньохвильового ультрафіолетового опромінення, які мають значну енергію, в шкірі утворюються низькомолекулярні продукти фотолізу білків і фоторадикали, серед яких особлива роль належить продуктам пероксидного окиснення ліпідів (токсичним метаболітам кисню).

При використанні суберитемних доз стимулюється вітаміноутворювальний, трофо- та імуностимулювальний ефекти, а у разі використання еритемних доз проявляються протизапальна, болезаспокійлива та десенсибілізувальна дії.

Штучні джерела середньохвильового ультрафіолетового опромінення поділяються на інтегральні (усі спектри ультрафіолетових променів) і селективні (тільки довго- і середньохвильові ультрафіолетові промені). (рис. 113).

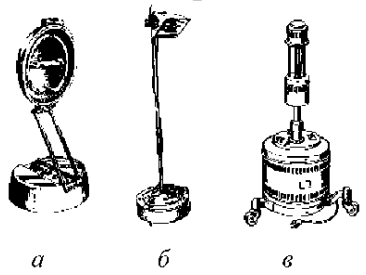


Рис. 113. Опромінювачі:
а – комбінований настільний (ОКП);
б – опромінювальна ртутно-кварцова пересувна установка (ОРКП)
в - ртутно-кварцовий маячний великий (ОКБ-30)

Для місцевої дії використовують середньохвильове опромінення в еритемних дозах на ділянках площею не більше 600см^2. Повторні опромінення здійснюють через 2-3 доби з підвищенням дози на 25-50 %. Ту ж саму ділянку опромінюють 3-4 рази. Тривалість курсу лікування визначається методикою опромінення та індивідуальною дозою.

Повторні курси за місцевого опромінення здійснюють через один місяць, а загального – через 2-3 місяці.

Показання: гострі й підгострі запальні хвороби внутрішніх органів (особливо дихальної системи), травми опорно-рухової системи, захворювання периферичної нервової системи з вираженою больовою реакцією (неврити, невралгії, міозити), захворювання суглобів і кісток, порушення обміну речовин з ознаками рахіту і остеомаляції, ураження шкіри (фурункульоз, екземи, виразки тощо), виснаження, анемії.

Протипоказання: підвищена чутливість до ультрафіолетових променів, хронічна ниркова недостатність, гіпертиреоз.

Короткохвильове опромінення розташоване в діапазоні ультрафіолетових хвиль від 280 до 180 нм. Таке опромінення викликає денатурацію і фотоліз нуклеїнових кислот та білків за рахунок надлишкового поглинання квантів коротких хвиль молекулами ДНК і РНК. Це призводить до інактивації геному і білоксинтетичного апарату клітин. Летальні мутації з іонізацією атомів і молекул, що виникають при цьому, супроводжуються інактивацією та руйнуванням структури мікроорганізмів і грибків.

У початковий період короткохвильового опромінення спостерігається короткотривалий спазм капілярів з подальшим більш довготривалим розширенням субкапілярних вен. В опроміненій ділянці формується короткохвильова еритема червонуватого кольору зі синюватим відтінком. Вона розвивається через декілька годин і зникає протягом 1-2 діб.

Місцеве короткохвильове ультрафіолетове опромінення уражених ділянок шкіри або слизових оболонок здійснюють за схемами загального середньохвильового опромінення.

Існує декілька методик щодо застосування ультрафіолетопроміненої крові (власної або донорської).

У практиці ветеринарної медицини застосування власної опроміненої крові АУФОК обмежене з ряду об'єктивних причин. Дрібним тваринам через невелику дозу, а великим - через значну кількість крові (500-700 мл) на одне введення. Для цього необхідне багаторазове опромінення невеликими дозами через малий об'єм кювет. Краще вводити опромінену кров внутрішньом'язово, виходячи з такого розрахунку:

− дорослим тваринам великої рогатої худоби від 20 до 50 мл, телятам - від 5 до 10 мл;

− дорослим вівцям і свиням від 5 до 10 мл, молодняку - від 1 до 5 мл;

− дорослим кролям і хутровим звірам від 1 до 3 мл, молодняку - від 0,5 до 1,0 мл;

− собакам середніх і великих порід 3-5 мл, котам - до 1 мл.

Із профілактичною метою для підвищення природної резистентності тварин дозу опроміненої крові зменшують наполовину за дворазового введення з інтервалом 10-15 діб.

ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ

Гамма-випромінювання (γ - промені) є короткохвильовим електромагнітним випромінюванням. Оскільки у-випромінювання має вельми малу довжину хвилі ($\lambda < 10^{-10}$ м), то, внаслідок цього, воно має яскраво виражені корпускулярні властивості, тобто є потоком частинок - гама-квантів.

Випускання γ - квантів не являється, як правило, самостійним видом випромінювання. Воно супроводжує α і β-розпади.

Розрізняють:

- м'яке γ - випромінювання з енергією квантів ε ~ кеВ;

- жорстке γ - випромінювання з енергією квантів ε ~ МеВ.

γ - випромінювання може взаємодіяти з електронною оболонкою атомів і молекул, викликаючи їх іонізацію, а також з ядрами.

При проходженні γ - променів через речовину відбувається їх ослаблення. Закон зміни інтенсивності у-випромінювання підкоряється закону:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

де I_0 - інтенсивність у-випромінювання, падаючого на поверхню речовини;

μ - коефіцієнт лінійного ослаблення у-променів в речовині, залежний від природи речовини і спектрального складу потоку у-випромінювання;

x - товщина поглинаючого шару.

Велика енергія γ - квантів пояснює їх високу проникаючу здатність. На цьому засновано їх застосування.

1. γ - дефектоскопія - метод виявлення дефектів у виробі шляхом просвічування їх γ - променями. Пошкодження виявляються за різною інтенсивністю γ -променів, що пройшли через досліджувану поверхню. Так досліджують розміри і форми дефектів (тріщини, раковини, непроварені шви і т. д.).

2. Онкологія - лікування злоякісних пухлин.

Ядерна медицина охоплює комплекс діагностичних та терапевтичних процедур, що передбачають застосування радіоізотопів.

Ізотопи, що належать радіоактивним елементам, називають *радіоізотопами.* Для потреб діагностики доцільно використовувати радіоізотопи, здатні утворювати γ-випромінювання, спроможне проникати крізь біологічну тканину і бути зареєстрованим зовні тіла пацієнта з подальшим визначенням розподілу цього випромінювання всередині тіла. Для терапії слід застосовувати ізотопи, що висилають β-частинки, невелика проникність яких у тканину зумовлює забезпечення високих доз випромінювання в області локалізації ізотопа.

Застосування радіоізотопів дає можливість вивчати фізіологічні пронеси, що відбувається в живому організмі, особливо за заміни тих елементів, з яких склада-

ється організм і які беруть участь в обміні речовин. Радіоізотопи утворюють сполуки з іншими атомами, що приводить до формування так званих «мічених» молекул, що поводять себе так само, як і звичайні молекули, але які легко можна відрізнити. В цілому радіоізотопи дають змогу отримати відомості щодо динаміки процесів в організмі; методи застосування радіоізотопів характеризуються високою чутливістю — для кількісного вимірювання достатньо 10^5—10^6 атомів (тоді як для традиційних аналітичних методів необхідно 10^{13}—10^{14} атомів); невеликі кількості радіоізотопів не впливають на стан і процеси життєдіяльності організму.

В медицині радіоізотопи знайшли застосування для діагностики щитовидної залози (^{99m}Tc, ^{123}I, ^{131}I), серцево-судинної системи (^{201}Tl, ^{99m}Tc), центральної нервової системи (^{99m}Tc) шлунково-кишкового тракту (^{99m}Tc, ^{111}In, ^{113m}In), показників крові (^{51}Cr, ^{59}Fe), запалювальних та інфекційних процесів (^{99m}Tc, ^{111}In, цитрат ^{67}Ga), легень (^{99m}Tc), дихальної системи (^{81m}Kr, ^{133}Xe, ^{127}Xe), кісток (^{99m}Tc), злоякісних пухлин (^{123}I , ^{131}I, ^{111}In, ^{99m}Tc).

ВИПРОМІНЮВАННЯ В МЕДИЦИНІ

Медична радіологія є розділом медичної науки, в якому використовуються випромінювання в діагностиці та лікуванні хвороб. Незважаючи на ризик, використання іонізуючих випромінювань в медичних дослідженнях, діагностики та терапії неоціненне. Радіонукліди, що використовуються в медичній радіології, отримують в реакторах і акселераторах.

ЯДЕРНА ТА АТОМНА ФІЗИКА

РАДІОНУКЛІДИ В МЕДИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

В даний час синтезується велика кількість різних біологічних сумішей, які містять радіонукліди водню, вуглецю, фосфору, сірки і т.і. Їх вводять в організм експериментальних тварин для того, щоб дослідити біохімічні та фізіологічні процеси. Радіоактивні ізотопи, що застосовуються для вивчення метаболізму нерадіоактивних речовин, називаються стежачими пристроями. Радіоактивний препарат готується нейтронним бомбардуванням стабільного елемента, який захоплює нейтрони з утворенням важких радіоактивних нестабільних ізотопів. Радіоактивність цих стежачих пристроїв дає можливість простежити їх магістралі й метаболізм дуже точно якісно і кількісно. Активний і пасивний транспорт натрію і калію, метаболізм цукрів і ліпидів, синтез білків і нуклеїнових кислот є прикладами фундаментальних біологічних процесів, які вивчені за допомогою радіоактивних стежачих пристроїв.

Радіонукліди в діагностиці

Радіоактивні стежачі пристрої поглинаються досліджуваним органом. Детектор випромінювання знаходиться за межами органу протягом якогось часу і в різних положеннях. Для того щоб мінімізувати дозу, вибирають недовговічні радіонукліди. Ці радіонукліди випускають гамма-промені з енергією, яку виявляють за допомогою детектора. Для цього часто придатний недовговічний радіоактивний *технецій,* який руйнується до стабільного стану, випускаючи гамма-промені з періодом напіврозпаду, що дорівнює шість годин. У складі відповідних хімічних сумішей радіоактивний технецій може бути направлений в різні органи.

Введення радіоактивних стежачих пристроїв дозволяє вивчати швидкість поглинання і виведення певних речовин серцем, нирками, печінкою, мозком, щито-

видною залозою та іншими органами. Наприклад, коли сечогінні засоби, що містять стежачий пристрій, надходять в нирки, про можливі аномалії нирок можуть сигналізувати зміни стандартних кількостей поглинання і виділення.

Сканування щитовидної залози проводять за допомогою стежачих пристроїв складного типу. Оскільки нефункціонуючі тканини щитовидної залози не поглинають таку речовину, вона утворює менш радіоактивну область в щитовидній залозі, що реєструють за допомогою поверхнево розташованих детекторів випромінювання.

Для формування зображення гамма-променів при скануванні різних органів необхідний пристрій, що виявляє радіоактивність поглиненого стежачого пристрою.

Випромінювання з невеликих областей виявляють спеціальними лічильниками. Лічильник повільно переміщують або розташовують нерухомо над досліджуваною областю тіла, і генеровані імпульси записують на дисплеї або аркуші паперу. *Емісійна позитронна томографія* - один з найбільш цінних методів діагностики, в якому використовують радіонукліди. Цей метод заснований на феномені *анігіляції,* що виникає при взаємодії позитрона з електроном, в результаті чого утворюються фотони гамма випромінювання. Короткоживучі радіонукліди виробляють за допомогою циклотрона або іншого типу акселераторів. Найчастіше використовують радіоактивні ізотопи кисню, вуглецю або азоту. Всі вони здатні до позитронного β-розпаду.

Певні хімічні склади, що містять радіонукліди, вводять в зацікавлений орган, наприклад, в мозок. Тут вони піддаються метаболізму і випускають позитрони. При взаємодії позитронів і атомних електронів відбувається їх взаємне знищення, що супроводжується гамма випромінюванням. Цей метод дає можливість отримувати точну інформацію щодо метаболізму клітини в нормальному та патологічному станах.

ТЕРАПЕВТИЧНА РАДІОЛОГІЯ

Клітини , що діляться, найбільш чутливі до дії іонізуючого випромінювання. Клітини злоякісних пухлин діляться більш часто, ніж клітини нормальних тканин. Швидко діляться ракові клітини і клітини саркоми дуже чутливі до іонізуючих випромінювань. Нормальні тканини мають велику здатність відновлюватися від ефектів іонізуючих випромінювань, ніж клітини злоякісних пухлин. Таким чином, доза випромінювання достатня, щоб знищити ракові клітини, тільки трохи і тимчасово пошкоджує суміжні нормальні клітини.

Найбільш часто випромінювання застосовують для лікування ракових пацієнтів спільно з хірургічним втручанням і лікуванням протираковими препаратами. Використовують зовнішнє опромінення за допомогою спеціальних приладів - рентгенівських апаратів; пристроїв, що містять радіоактивний кобальт, або електронних акселераторів. Поверхневе опромінення (здебільшого за допомогою рентгенівських променів) використовують при лікуванні злоякісних хвороб шкіри та очей. Гамма-промені, що випускаються радіоактивним кобальтом, забезпечують велику ефективну дозу опромінення пухлин глибоких тканин тіла. Крім того, в пухлину можуть бути імплантовані заповнені радієм голки, невеликі насіння, що містять газ радон, або проводу, що містять штучні радіонукліди. Також викорис-

товують промені акселератора, що представляють собою потік високоенергетичних електронів, які депонують більшість своєї енергії в невелику область біля місця їх впливу.

МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Внаслідок того, що енергія квантів іонізуючих випромінювань значно перевищує енергію будь-яких хімічних зв'язків, відбувається руйнування молекул живої тканини, що призводить до загибелі клітин і порушення систем життєдіяльності організму. Процес іонізації атомів і молекул пов'язаний з їх збудженням, через що вони набувають підвищеної реакційної здатності за появи неспарених електронів. Все це може сприяти утворенню нових хімічних сполук або зміні окремих ділянок молекул.

Вплив іонізуючого випромінювання на воду, що міститься в біологічних клітинах, пов'язаний з утворенням вільних радикалів, здатних завдати серйозної школи біологічно важливим молекулам. Крім того, іонізуюче випромінювання діє на молекули ДНК (руйнування нуклеотидів, розриви полінуклеотидних ланцюгів), білків (зміни амінокислотних залишків, порушення системи водневих зв'язків, втрата конформаційних станів), ліпідів (процеси радіолізу). Всі ці руйнування біологічно важливих молекул і клітинних структур призводять до розвитку променевого ураження — патологічних змін в організмі, органах і тканинах. Крім різноманітних безпосередніх порушень процесів життєдіяльності, можливі віддалені ефекти опромінення, що проявляються в формі виникнення злоякісних пухлин, скорочення тривалості життя, послаблення імунітету, мутагенних наслідків,

РАДІОАКТИВНІ ЗАБРУДНЕННЯ

З точки зору здоров'я людини найбільш небезпечними є радіоактивні елементи з періодом піврозпаду від декількох тижнів до кількох років. Наприклад, стронцій ^{90}Sr, що накопичується в кісткових тканинах (28 років), і цезій ^{137}Cs (32 роки). Крім того, небезпечними є ізотопи простих елементів, що входять до складу живої речовини ^{14}C, ^{32}P, ^{45}Ca, ^{35}S. Небезпечними є радіоактивні опади, що виникають внаслідок випробування ядерної зброї. Радіоактивні домішки розсіюються в атмосфері, а потім через грунт і воду потрапляють у біомасу. Джерелом радіоактивного забруднення може бути атомна промисловість. Забруднення може відбуватися підчас видобування і збагачення копалин, використання сировини в реакторах, обробки ядерного палива в установках. Вкрай гострою для навколишнього середовища є проблема утилізації радіоактивних відходів. Процеси обробки та експлуатації ядерного палива можна поділити з точки зору можливих впливів на здоров'я людини на дві категорії. До першої слід віднести технологічні операції, що супроводжуються утворенням невисокого рівня відходів — це добування уранових копалин та їх очищення. Ці операції можуть завдати шкоди людському організму лише протягом тривалого часу. Відходи високого рівня мають місце під час роботи з урановими стрижнями, коли за короткий час можна отримати високі рівні радіоактивності.

Води океану можуть бути сильно радіоактивними внаслідок випробувань ядерної зброї. Активно піддаються радіоактивному забрудненню планктон й водорості, з яких починаються харчові ланцюги, що призводить до потрапляння радіоактивних речовин у водні організми. Такі швидкі риби як меч-риба і тунець

можуть випереджати на декілька місяців швидкість північної екваторіальної течії, що несе радіоактивно заражені внаслідок ядерних вибухів води, і можуть в цілком чистих волах ставати джерелом радіоактивності дня своїх ворогів, а, надходячи на ринок, і для людини. Є відомості про те, що окрилені комахи, личинки яких жили і харчувались в радіоактивно заражених середовищах, мають в своєму тілі велику кількість радіоактивних ізотопів і здатні перенести їх в польоті на великі відстані від місця випуску в природу. Перелітні птахи спроможні також переносити радіоактивні частки водосховища, що забруднювалося, в інші країни, на інші материки, особливо ж – водоплавні, що мають в своєму живленні безпосередній контакт з мулом і донними організмами.

Заражені ділянки ґрунту поступово будуть звільнятися від забруднення завдяки участі бактерій і рослин, які концентрують ізотопи і передають їх іншим тваринам, а також за міграції та переміщення радіоактивно заражених організмів, насіння та частинок фунту у просторі. Суто ерозійні процеси також зроблять свою справу. Крім того, діяльність рухомих фунтових тварин — червів, личинок комах, кротів, ховрахів, мишоподібних гризунів, що так чи інакше сприймають радіоактивні забруднення, неминуче надаватимуть прискорення процесу розсіювання забруднень.

Використана література:

1. Посудін Ю.І. Фізика з основами біофізики: Підручник. - К.: Світ, 2013. - 400 с.
2. Посудін Ю.І., Семенова Н.П., Кожем'яко Л.В. Прикладна фізика і біофізика. - К.: НАУ, 2001. - 115 с.
3. Федишин Я.І. Фізика з основами біофізики: Підручник. - Львів: Світ, 2015. - 552с
4. Федишин Я.І., Когут В.М., Вакарчук С.О. Збірник задач з фізики із розв'язками: Навчальний посібник. - Львів: Видав, центр ЛНУ ім. І. Франка, 2015.-310 с.
5. Федишин Я.Л. Фізика з основами біофізики: Навчальний посібник. - Львів: Світ, 2020. - 460 с.
6. Бланк О.Я., Фізика / О.Я.Бланк, Л.Г. Гречко – Х.: Факт. 2002. – 344 с.
7. Бойко В.В. Фізика / В.В. Бойко – К.: Арістей, 2007. – 576с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Збаравська Леся Юріївна
Слободян Сергій Борисович
Торчук Михайло Васильович

Навчальний посібник
Видання друге,перероблене і доповнене

Обсяг вид. 6 авт. арк.

Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ»
вул. Шевченка 13