

Б. М. Паласюк, Ю. А. Рудяк, В. Д. Дідух, З. В. Майхрук,
О. А. Багрій-Заяць, А. Б. Горкуненко

БІОФІЗИКА

Методичний посібник для самостійної роботи

*(для студентів фармацевтичного факультету заочної форми
навчання)*

**Тернопіль
ТНМУ
2022**

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Підгурський Микола Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя.

Вадзюк Степан Несторович – доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри фізіології з основами біоетики та біобезпеки Тернопільського національного медичного університету ім. І. Я. Горбачевського МОЗ України.

Ухвалено і рекомендовано до впровадження цикловою центральною методичною комісією закладу вищої освіти (протокол № 2 від 22.11.22)

Зміст

ПЕРЕДМОВА	6
Розділ 1. Біомеханіка і біоакустика.....	7
1.1. Кінематичні характеристики поступального і обертального рухів та зв'язок між ними. Динаміка обертального руху.....	7
1.2. Опорно-рухова система людини	11
1.3. Види деформацій.....	16
1.4. Деформація біологічних тканин	20
1.5. Механічні коливання.....	24
1.6. Характеристики слухового відчуття. Закон Вебера–Фехнера	30
Приклади розв'язаних типових задач, контрольні питання, задачі для самостійного розв'язування, тестові завдання.....	32
Розділ 2. Біореологія та гемодинаміка	38
2.1. Основи реології.....	39
2.2. Формула Гагена–Пуазейля. Гідравлічний опір	42
2.3. Рівняння Бернуллі	43
2.4. Механічні хвилі	44
2.5. Звук та його характеристики	48
Приклади розв'язаних типових задач, контрольні питання, задачі для самостійного розв'язування, тестові завдання.....	50
Розділ 3. Термодинаміка біологічних систем.....	57
3.1. Рівноважна термодинаміка	57
3.1.1. Типи і параметри термодинамічних систем.....	57
3.1.2. Закони термодинаміки	57
3.2. Термодинаміка відкритих систем поблизу рівноваги	63
3.2.1. Стаціонарний стан, виробництво ентропії	63
3.2.2. Лінійний закон. Принцип симетрії кінетичних коефіцієнтів Онзагера	64
3.2.3. Теорема Пригожина	66
3.2.4. Термодинаміка відкритих систем далеко від рівноваги	67
Приклади розв'язаних типових задач, контрольні питання, задачі для самостійного розв'язування, тестові завдання.....	68
Розділ 4. Фізичні основи функціонування біологічних мембран.....	74
4.1. Структура, властивості і функції мембран	74
4.1.1. Молекулярна організація мембран.....	74
4.1.2. Основні види взаємодій, які формують мембрани. Моделі мембран	77

4.2. Транспорт речовин через мембрани.....	79
4.2.1. Пасивний транспорт речовин через мембрани	79
4.2.2. Активний транспорт речовин	83
Глава 4.3. Мембранні потенціали спокою і дії.....	86
4.3.1. Дифузійні і мембранні потенціали. Потенціал Нернста	86
4.3.2. Рівновага Доннана і потенціал Доннана.....	88
4.3.3. Стаціонарний потенціал Гольдмана-Ходжкіна-Катца	88
Приклади розв'язаних типових задач, контрольні питання, задачі для самостійного розв'язування, тестові завдання.....	90
Розділ 5. Електромагнітне медичне обладнання.....	97
5.1. Медичне обладнання для лікування електричним струмом	97
5.1.1. Електропровідність тканин організму Основні характеристики електростатичного поля.....	97
5.1.2. Характеристики електричного струму. Закони Ома і Джоуля Ленца в диференціальній формі	100
5.1.3. Електропровідність тканин організму	101
5.1.4. Змінний струм. Повний опір в колі змінного струму.....	102
5.1.5. Імпеданс тканин організму. Основи реографії.....	105
5.1.6. Імпульсний струм та його характеристики	106
5.2. Медичне обладнання для лікування електромагнітним полем.....	108
5.2.1. Магнітне поле, його характеристики	108
5.2.2. Закон Біо–Савара–Лапласа.....	110
5.2.3. Магнітні властивості речовин.....	111
Приклади розв'язаних типових задач, контрольні питання, задачі для самостійного розв'язування, тестові завдання.....	112
Розділ 6. Оптичні методи дослідження.....	117
6.1. Основи геометричної оптики	117
6.1.1. Поширення світла.....	117
6.1.2. Дисперсія світла	121
6.1.3. Волоконна оптика	122
6.1.4. Лінзи. Параметри лінзи	123
6.2. Основи хвильової оптики.....	128
6.2.1. Хвильові властивості світла.....	128
6.2.2.1. Інтерференція світла	129
6.2.2.2. Просвітлення оптики	132
6.2.2.3. Дифракція світла	132
6.2.2.4. Поляризація світла	134
6.2.2.5. Поглинання світла.....	138
Приклади розв'язаних типових задач, контрольні питання, задачі для самостійного розв'язування, тестові завдання.....	140
Розділ 7. Квантова біофізика. Фізика атомів і молекул	146
7.1. Теплове випромінювання тіл.....	146

7.1.1. Закони теплового випромінювання.....	147
7.2. Основні положення квантової механіки.....	152
7.2.1. Хвильові властивості частинок.....	152
7.2.1.1. Хвильова функція та її фізичний зміст. Співвідношення невизначеностей	156
7.2.1.2. Рівняння Шрьодінгера та його розв'язок для атома водню. Квантові числа.....	157
7.2.2. Особливості випромінювання і поглинання енергії атомами і молекулами	162
7.2.2.1. Спектри атомів	162
7.2.2.2. Спектри молекул	163
7.3. Явище люмінесценції.....	164
7.3.1. Фізичні основи люмінесценції	164
7.3.2. Люмінесцентний аналіз	165
7.4. Резонансні методи квантової механіки	166
7.4.1. Електронний парамагнітний резонанс	166
7.5. Іонізуюче випромінювання.....	168
7.5.1. Природа іонізуючого випромінювання	168
7.5.1.1. Історія відкриття X-променів.....	168
7.5.1.2. Гальмівне X-випромінювання.....	170
7.5.1.3. Характеристичне X-випромінювання	171
7.5.2. Радіоактивність.....	172
7.5.2.1. Активність. Одиниці активності.....	174
7.5.2.2. Види радіоактивного розпаду	175
7.6. Дозиметрія іонізуючих випромінювань.....	177
7.6.1. Суть методу дозиметрії	177
7.6.2. Біологічна дія іонізуючого випромінювання. Еквівалентна доза	178
Приклади розв'язаних типових задач, контрольні питання, задачі для самостійного розв'язування, тестові завдання.....	179
ЛІТЕРАТУРА.....	187
ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ	189
ДОДАТКИ	210

ПЕРЕДМОВА

„Ми повинні прийняти, що власне біологічні закономірності представляють закони природи, доповнювальні до тих, які придатні для пояснення властивостей неживих тіл.”

Нільс Бор –лауреат Нобелівської премії з фізики.

Біофізика: – розділ фізики і сучасної біології, що вивчає фізичні і фізико-хімічні процеси, які протікають на всіх рівнях біологічних систем, починаючи від молекул та клітин і закінчуючи біосферою в цілому.

Біофізичним дослідженням сприяє тісна взаємодія із суміжними науками – фізикою, хімією, математикою і фізичною хімією. Саме цим визначається вклад біофізики у вирішенні актуальних біологічних проблем.

Суттєвий вплив на розвиток біофізики і молекулярної біології мала книжка лауреата Нобелівської премії з фізики Е. Шрєдінгера „Що таке життя з точки зору фізики?”, яка була опублікована у 1945 році. У книзі автор ставить і дає відповідь на запитання: „Як можуть фізика і хімія пояснити ті явища у просторі і часі, які властиві для живого організму?”

У посібнику викладені теоретичні засади фізичних, фізико-хімічних та фізіологічних процесів, що відбуваються в біологічному середовищі, розглянуто вплив на біоб’єкти різноманітних фізичних чинників і полів.

При написанні даного навчального посібника використаний досвід викладання медичної та біологічної фізики у медичних національних університетах України.

Посібник призначений, перш за все, для студентів Тернопільського національного медичного університету ім. І. Я. Горбачевського МОЗ України, а також може бути корисним для студентів вищих медичних закладів освіти III-IV рівнів акредитації.

ГЛАВА 1. БІОМЕХАНІКА І БІОАКУСТИКА

1.1. Кінематичні характеристики поступального і обертального рухів та зв'язок між ними. Динаміка обертального руху

Для встановлення основних закономірностей обертального руху розглянемо випадок обертання твердого тіла (точки) навколо нерухомої осі.

Основними кінематичними величинами, що характеризують обертальний рух точки, є її кутова швидкість і кутове прискорення. Кутова швидкість точки у певний момент часу визначається границею відношення вектора кутового зміщення $\Delta\vec{\varphi}$ до відповідного проміжку часу Δt (рис.1.1):

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt} \quad (1.1)$$

Кутова швидкість – це вектор, напрям якого визначається за правилом правого гвинта (рис. 1.2)

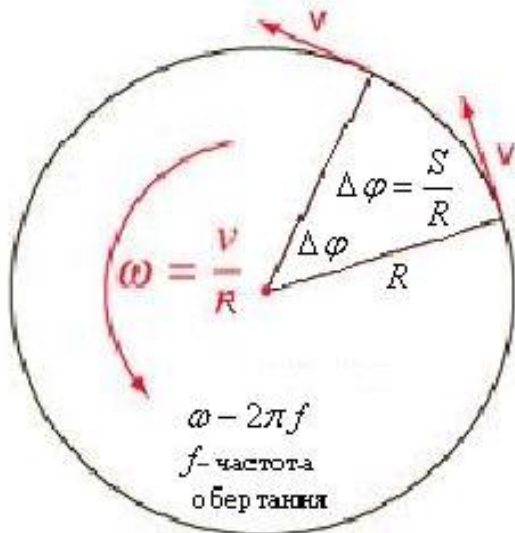


Рис. 1.1. Обертальний рух точки.

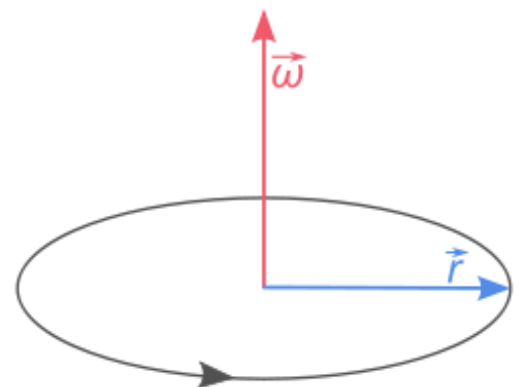


Рис. 1.2. Вектор кутової швидкості.

За одиницю кутової швидкості в СІ прийнято радіан за секунду (рад/с). Між кутовою і лінійною швидкостями існує співвідношення:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = R \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = R \frac{d\vec{\varphi}}{dt} = \vec{\omega}R. \quad (1.2)$$

Швидкість зміни кутової швидкості характеризується кутовим прискоренням:

$$\vec{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}. \quad (1.3)$$

Одиниця виміру кутового прискорення – радіан за секунду в квадраті рад/с². Кутове прискорення – це вектор, що збігається з напрямком кутової швидкості у прискорених рухах або направлений проти кутової швидкості у сповільнених рухах. Кутове прискорення $\vec{\varepsilon}$ пов'язане з тангенціальним прискоренням точки \vec{a}_r співвідношенням:

$$\vec{a}_r = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta(\vec{\omega}R)}{\Delta t} = r \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\omega}}{\Delta t} = \vec{\varepsilon}r. \quad (1.4)$$

При рівномірному русі точки по колу лінійна швидкість змінюється лише за напрямком. Прискорення при цьому направлене по радіусу до центра кола і називається доцентровим, чи нормальним прискоренням:

$$\vec{a}_n = \frac{\vec{v}^2}{r} = \vec{\omega}^2 r. \quad (1.5)$$

При нерівномірному русі точки по колу швидкість змінюється не лише за напрямком, але і за абсолютним значенням. У цьому випадку вектор повного прискорення визначається формулою:

$$\vec{a}_i = \sqrt{\vec{a}_n^2 + \vec{a}_r^2} = r_i \sqrt{\vec{\omega}^2 + \vec{\varepsilon}^2}. \quad (1.6)$$

Момент інерції є мірою інертності тіла в обертальному русі.

Момент інерції i -ї матеріальної точки масою m_i , що знаходиться на відстані r_i від осі обертання, визначається за формулою

$$I = m_i r_i^2. \quad (1.7)$$

Момент інерції тіла відносно осі обертання визначається за формулою

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2, \quad (1.8)$$

де n – загальне число матеріальних точок, з яких складається тіло.

Момент інерції чисельно рівний сумі добутків мас матеріальних точок на квадрат їхньої відстані від осі обертання.

Якщо вісь обертання тіла паралельна осі симетрії, але зміщена від неї на відстань d , то момент інерції I відносно паралельно зміщеної осі виражається співвідношенням, яке називається теоремою Штейнера:

$$I = I_0 + md^2, \quad (1.9)$$

де I – момент інерції тіла масою m відносно зміщеної осі, I_0 – момент інерції відносно паралельної осі, що проходить через центр мас тіла, d – відстань між двома паралельними осями.

Момент інерції різних однорідних тіл масою m відносно осі, що проходить через центр мас дорівнює:

Для тонкого кільця радіусом r :

$$I = mr^2, \quad (1.10)$$

для суцільного циліндра:

$$I = \frac{1}{2}mr^2, \quad (1.11)$$

для кулі:

$$I = \frac{2}{5}mr^2, \quad (1.12)$$

для тонкого стержня довжиною l (вісь обертання проходить перпендикулярно стержню через його середину):

$$I = \frac{1}{12}ml^2. \quad (1.13)$$

Обертання тіла відбувається під дією сили \vec{F} , прикладеної до точки тіла, що знаходиться на відстані \vec{r} від осі обертання. При цьому виникає момент сили, чи обертовий момент \vec{M} :

$$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}] = \vec{r}\vec{F} \sin \alpha, \quad (1.14)$$

де α – кут між векторами \vec{r} і F . Якщо \vec{r} і \vec{F} взаємно перпендикулярні, то $\alpha = 1$ і $M = rF$.

Момент сили, що діє на тверде тіло і надає йому кутового прискорення ε , рівний

$$\vec{M} = I\vec{\varepsilon} \quad (1.15)$$

Робота при обертальному русі рівна добутку моменту сили на кутове переміщення

$$A = M\varphi \quad (1.16)$$

Кінетична енергія обертального руху тіла визначається за формулою:

$$E = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (1.17)$$

Моментом кількості руху (кутовим моментом, моментом імпульсу) тіла називають добуток його моменту інерції на кутову швидкість

$$\vec{L} = I \vec{\omega} \quad (1.18)$$

Миттєвий момент сили являє собою похідну від кутового моменту за часом

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d(I\vec{\omega})}{dt} \quad (1.19)$$

Це основне рівняння динаміки обертального руху навколо нерухомої осі. Якщо на систему не діють зовнішні сили ($M = 0$), то момент кількості руху залишається сталим.

$$\vec{L} = I\vec{\omega} = \text{const} \quad (1.20)$$

Це закон збереження моменту кількості руху.

Таблиця 1.1. Порівняння поступального і обертального рухів.

<i>Поступальний рух</i>	<i>Обертальний рух</i>
$\vec{v} = \Delta\vec{S}/\Delta t$	$\vec{\omega} = \Delta\vec{\varphi}/\Delta t$
$\vec{a} = \Delta\vec{v}/\Delta t$	$\vec{\varepsilon} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{\vec{\omega} - \vec{\omega}_0}{t}$
$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$	$\vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \vec{\varepsilon}t$
$\vec{S} = \vec{v}_0 t + \frac{1}{2}\vec{a}t^2$	$\vec{\varphi} = \vec{\omega}_0 \cdot t + \frac{\vec{\varepsilon}t^2}{2}$
$v^2 = v_0^2 + 2aS$	$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\varepsilon\varphi$
$W_k = \frac{1}{2}m\vartheta^2$	$W_k = \frac{1}{2}I\omega^2$
$\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$	$\vec{M} = I\vec{\varepsilon}$
$\vec{p} = m\vec{v}$	$\vec{L} = I\vec{\omega}$
$\vec{F} = \Delta\vec{p}/\Delta t$	$M = \frac{d\vec{L}}{dt}I$

Якщо тіло одночасно бере участь прямолінійному і обертальному рухах (наприклад рух колеса), то кінетична енергія тіла дорівнюватиме сумі кінетичної енергії прямолінійного та обертального рухів:

$$T = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{I \cdot \omega^2}{2} \quad (1.21)$$

В таблиці 1.1. наведені основні величини і залежності прямолінійного та обертального рухів.

1.2. Опорно-рухова система людини

В процесах життєдіяльності біологічних систем відбуваються різноманітні механічні явища. До них можна віднести рух газоподібних і рідких біологічних середовищ, скорочення і розслаблення м'язів, функціонування опорно-рухового апарату, поширення хвиль пружної деформації, процеси деформації клітин, тканин та органів. Розглянемо найважливіші механічні властивості біологічних тканин, які визначають хід цих процесів.

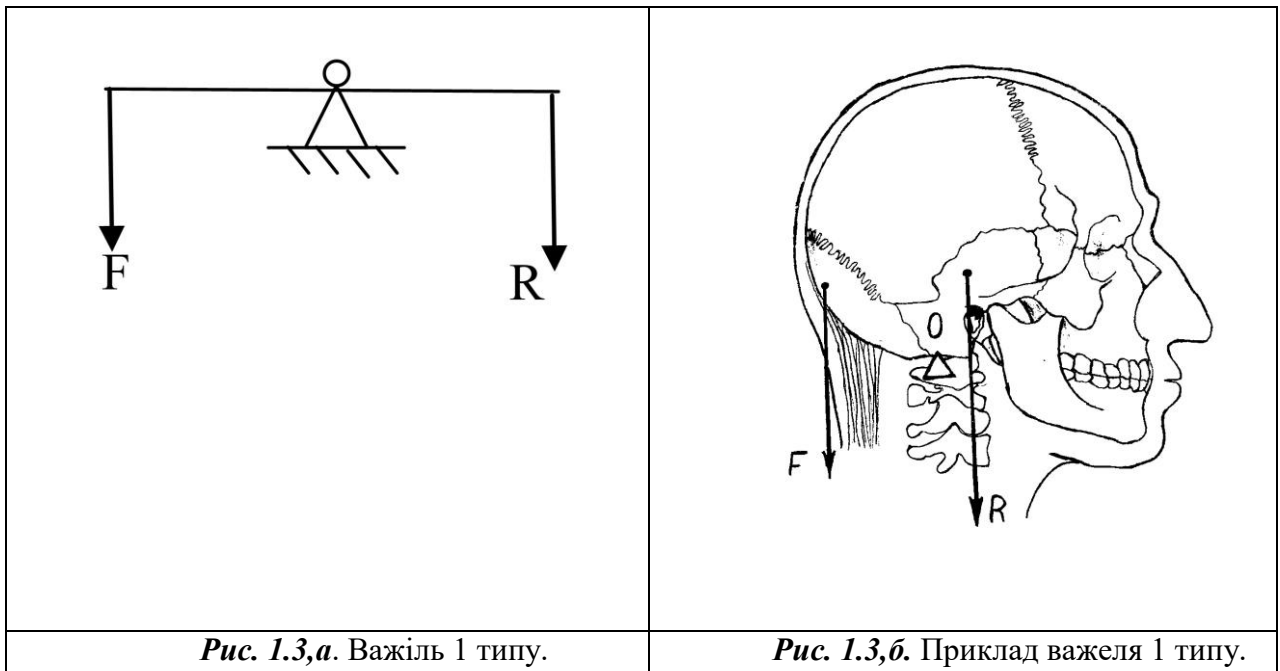
Біомеханіка – галузь природничих знань, що на основі законів механіки вивчає фізичні властивості біологічних об'єктів, закономірність їх до адаптації до навколишнього середовища, поведінку та механічні рухи у них на всіх рівнях організації і у різних станах життєдіяльності.

Термін „біомеханіка” утворений грецькими словами: „bios” – життя та „mechanē” – знаряддя (механічне життя).

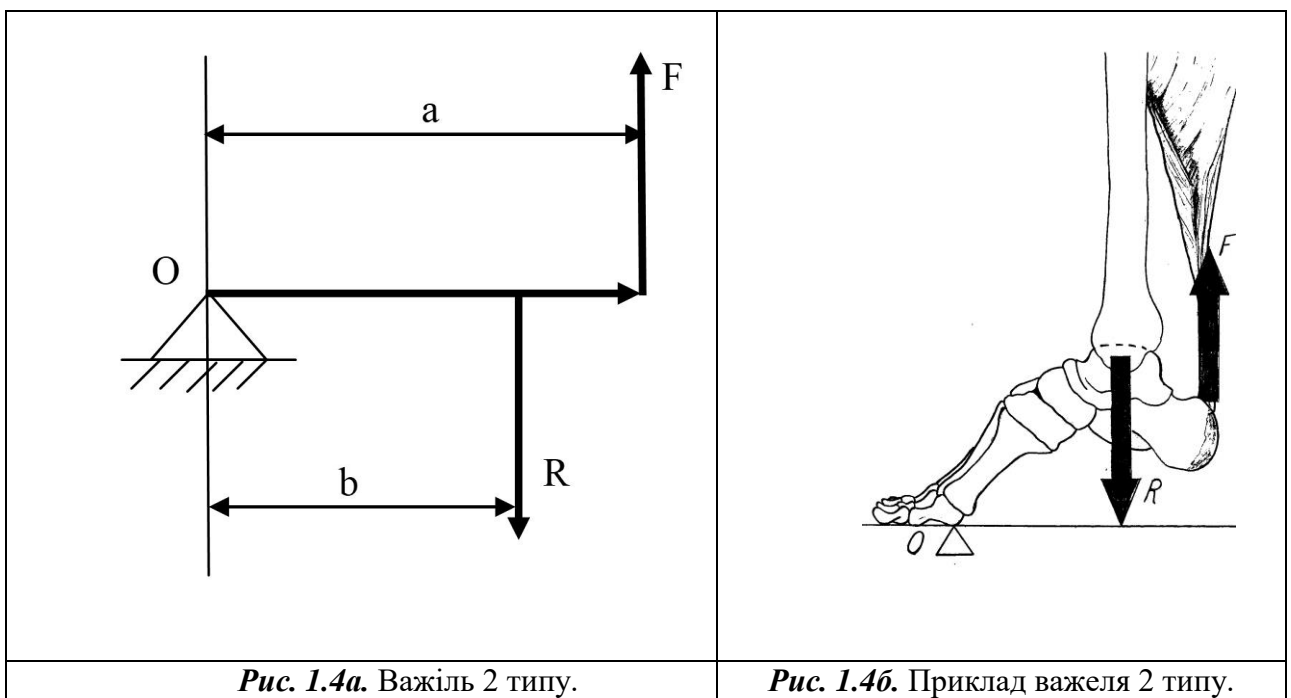
Механічна міцність тіла людини забезпечується опорно-руховим апаратом, що складається з кісток, їх з'єднань і м'язів. До скелету кріпляться м'які тканини (опорна функція), він захищає внутрішні органи від зовнішньої механічної дії та виконує рухову функцію завдяки кістковим важелям, які приводяться в рух м'язами.

Важелем називається тверде тіло (як правило стержень), що має нерухому вісь обертання, до якої прикладені сили, які створюють моменти відносно цієї осі. Розглядають три види важелів в залежності від взаєморозташування діючих сил.

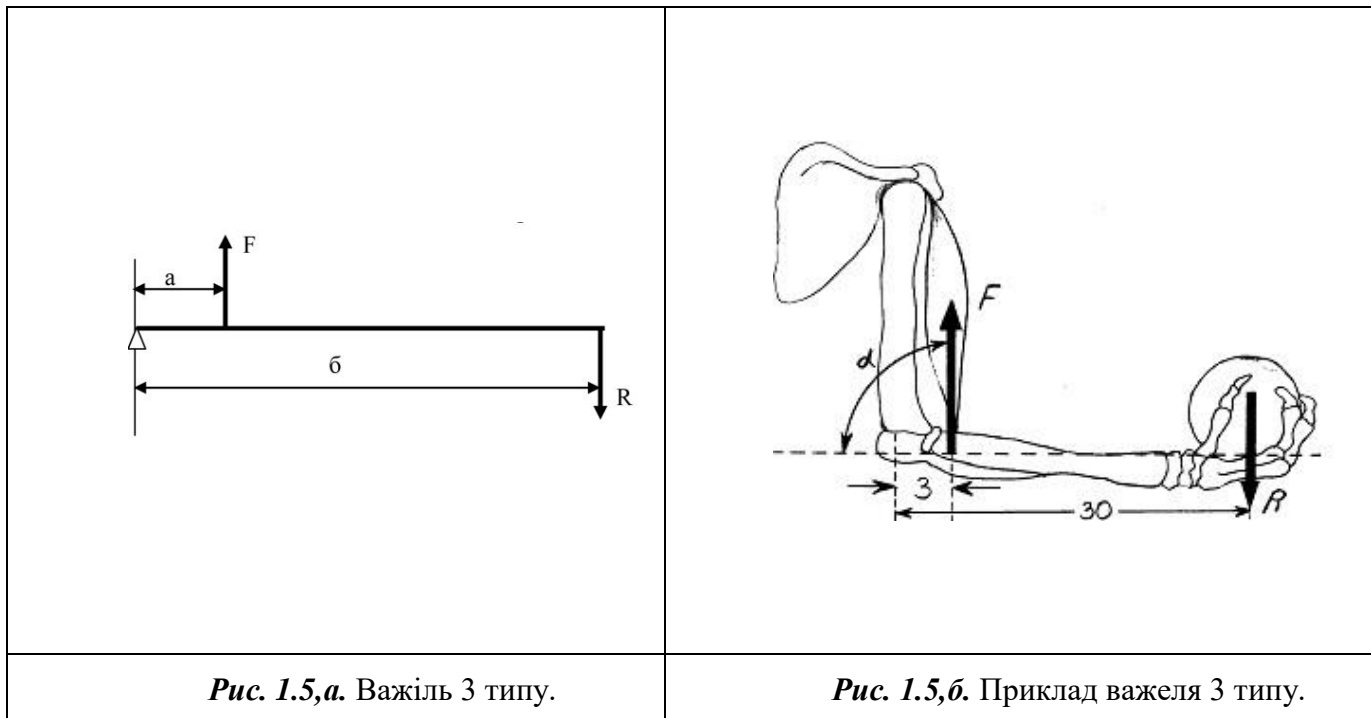
1. Сили прикладені з двох боків від точки опори (рис.1.3,а). Приклад – утримання голови м'язами шиї та спини (рис.1.3,б), F – сила, яку розвиває м'яз, R – сила тяжіння голови..



2. Сила F прикладена до кінця важеля, сила R ближче до точки опори (рис. 1.4,а). Приклад – дія зведення стопи при підйомі на півпальці (рис. 1.4,б).



3. Сила F прикладена ближче до точки опори, ніж сила R (рис. 1.5,а). Приклад – кості передпліччя. Точка опори знаходиться в ліктьовому суглобі (рис. 1.5,б). Діюча сила F – сила м'язів, що згинають передпліччя, R величина навантаження.



Умову рівноваги важеля математично можна представити у вигляді:

$$Fr = P \quad (1.22)$$

де F – сила, яку розвиває м’яз, r – відстань між точкою кріплення м’яза до кістки передпліччя та ліктьовим суглобом, P – вага вантажа, R – відстань від вантажа до ліктьового суглоба.

Якщо сила F прикладена до кінця важеля, а сила опору R ближче до точки опори, то такий важіль називається важелем сили (рис.1.4,б), він дає виграш у силі, але програш у переміщенні.

Коли ж сила F прикладена ближче до точки опори, ніж сила опору R , то важіль дає програш у силі, але виграш у переміщенні. Такий важіль називається важелем швидкості (рис.1.5,б).

Прикладом важеля швидкості є нижня щелепа. Діючу силу F створює жувальний м’яз, а силу опору R – опір їжі, яка діє на зуб. Плече діючої сили коротше, ніж у сили опору. При зменшенні плеча сили опору дія кутніх зубів зростатиме.

У тілі людини нараховується близько 600 м’язів, які складають майже 40 % маси людини. Їм властива еластичність, здатність відновлювати початкову форму після припинення дії сил, які викликають їх деформацію. З віком м’язи змінюються: вони ростуть, збільшуються в об’ємі. Від довжини м’яза залежить його скорочення (рис.1.6). В похилому віці товщина м’язових пучків і сила їх зменшується. При активному способі життя атрофія м’язів сповільнюється.



Рис. 1.6. Залежність м'язового зусилля від довжини м'яза.

У м'язах відбувається перетворення хімічної енергії (АТФ) в механічну роботу. Всі м'язи поділяються на гладкі і поперечносмугасті.

Скорочувальні елементи у м'язових волокнах являють собою витягнуті скорочувальні клітини, значну частину яких займають міофібрили, які складаються з двох видів ниток: товстих – міозинових і тонких – актинових.

Тонкі нитки (діаметром 7 нм і завдовжки 1000 нм) складаються майже з 11800 амінокислотних залишків і містять три види білка: актин, тропоміозин, тропонін.

В м'язовій тканині актин існує у двох формах: у формі мономерних молекул – глобул (G-актин) і у формі ниткоподібних (F-актин). F-актин є полімером G-актину. Мономери актину мають сферичну форму і діаметр близько 550 нм. За певних умов мономери можуть вишиковуватися в ланцюги-нитки, які утворюють товсті актинові філаменти.

Товсті нитки (діаметром 15 нм і завдовжки 1500 нм) містять у своєму складі лише один білок – міозин.

Головка молекули міозину має довжину близько 20 нм і ширину близько 4 нм. Розміри її хвоста відповідно рівні 140 нм і 2 нм. Молекули міозину за певних умов можуть з'єднуватися своїми хвостами так, що в результаті утворюються короткі або товсті нитки з виступаючими головками.

При контакті з молекулами АТФ молекули міозину вступають з ними в реакцію, причому при надлишку АТФ кожна головка міозину зв'язує одну молекулу АТФ. У результаті гідролізу АТФ міозин переходить у збуджений стан і при наявності іонів кальцію він реагує з актином. Оскільки головка міозину знаходиться в контакті з ниткою F-актину, то вона пересовує цю нитку за собою, як важіль, на відстань порядку 10 нм. Після повороту головки міозину комплекс «актин-міозин» розкладається і молекула міозину повертається до попереднього стану.

Наступний цикл реакцій почнеться, коли головка міозину зв'яже ще одну молекулу АТФ. Щоб елементарні зсуви привели до макрозміщення, необхідна структурована організація актинових і міозинових молекул, що і спостерігається у м'язових волокнах, які являють собою пучки фібрил. Кожна м'язова фібрила (міофібрила) складається з великої кількості паралельно розташованих міозинових і актинових ниток-філаментів, товщина яких відповідно дорівнює 15 – 17 нм і 6 нм. Товті і тонкі нитки розташовані паралельними шестикутниками

так, що кожна товста нитка оточена шістьма тонкими, а кожна тонка нитка може вступати у контакт з трьома товстими.

При скороченні товсті нитки всовуються між тонкими, ковзають по них у результаті асинхронної і тягучої дії міозинових головок-містків. Кожен місток відштовхує чи втягує актинову нитку на відстань 10 нм, після чого він від'єднується від актинового мономера, з яким знаходився у комплексі, і приєднується до другого в іншій точці нитки. Далі цикл повторюється.

Механічному скороченню м'яза, який здатний трансформувати хімічну енергію в механічну, виконуючи роботу, передують його електричне збудження, вивільнюється медіатор ацетилхолін, який створює потенціал дії. Потенціал дії сприяє вивільненню кальцію, у результаті чого, за рахунок енергії АТФ, вмикається скорочувальний апарат у міофібрилах, який зумовлює пружну деформацію пасивних елементів міофібрил у цілому м'язі. Наслідком дії скорочувального апарату та пружної деформації міофібрил є скорочення м'яза, виникнення м'язової сили і, нарешті, виконання роботи.

Важливими характеристиками роботи м'яза являються сила і швидкість скорочення. А. Хіллом було показано, що між швидкістю скорочення м'яза та м'язовою силою P існує гіперболічна залежність:

$$(P + a)(V + b) = (P_0 + a)b = a(V_{max} + b) \quad (1.23)$$

де P – м'язова сила або навантаження, що прикладається до м'язу (зовнішня сила, яка діє на м'яз), [Н]; V – швидкість скорочення м'язу при навантаженні P , [мм/с]; V_{max} – максимальна швидкість скорочення м'язу ($V = V_{max}$ при $P = 0$); P_0 – сила, яку розвиває м'яз в ізометричному режимі скорочення (коли не змінюється довжина м'язу); a і b – константи, відповідно розмірність яких [Н] та [мм/с].

$$(P + a)(V + b) = const, \quad (1.24)$$

Швидкість укорочення м'яза тим більша, чим менше навантаження.

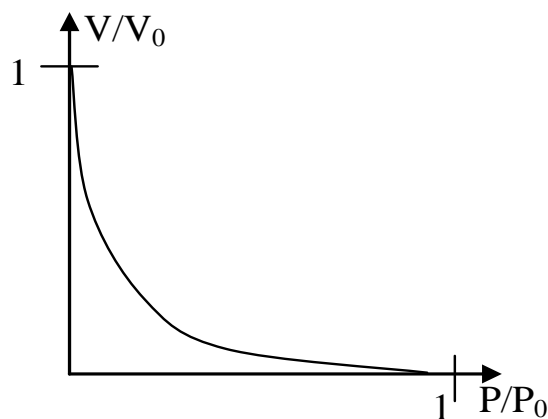


Рис. 1.7. Залежність відносної швидкості скорочення м'яза від відносної сили.

При скороченні протягом часу t м'яз виконує роботу:

$$A = PVt \quad (1.25)$$

Знайшовши V з рівняння (1.22) і підставивши у (1.23) отримаємо:

$$A = bP \frac{P_0 - P}{P + a} t \quad (1.26)$$

Робота, яку виконує організм при ходьбі, не змінюється, якщо людина рухається зі швидкістю близько до 90 м/хв, а при підвищенні швидкості вона зростає і вже при швидкості 130 м/хв виявляється більшою, ніж при бігу з швидкістю 150 м/хв. Таким чином, сповільнений біг енергетично вигідніший за швидку ходьбу.

У процесі скорочення м'яза виділяється певна кількість теплоти Q . Ця величина називається теплопродукцією і залежить лише від зміни довжини x м'яза: $Q = ax$.

За відкриття явища прихованого теплоутворення в м'язах у 1923 р. А. Хіллу було присуджено половину Нобелівської премії, а другу її половину отримав О. Мейергоф за відкриття законів регуляції і поглинання кисню м'язом та утворення в ньому молочної кислоти.

1. 3. Види деформацій

Тіло, під дією прикладеної сили, може змінювати свою форму або об'єм. Зміну форми або об'єму тіла під дією прикладених до нього сил називають деформацією (табл.1.2).

Таблиця 1.2. Зміни, які виникають у тілах при дії зовнішніх сил.

Деформація	Зміна форми	Зміна об'єму
<i>Розтяг</i>	Відбувається	Відбувається
<i>Всестороннє стискування</i>	Не відбувається	Відбувається
<i>Зсув</i>	Відбувається	Не відбувається

<i>Кручення</i>	Відбувається	Не відбувається
-----------------	--------------	-----------------

Якщо після припинення дії сил тіло відновлює свої форму і об'єм, то деформація називається пружною. Сили, які виникають при пружних деформаціях тіл, називають силами пружності. Вони виникають при взаємодії тіл, коли їхні молекули зближаються до відстані $10^{-9} - 10^{-10}$ м. Сили пружності діють між взаємодіючими шарами деформованого тіла, а також в місці контакту деформованого тіла з тілом, яке викликає деформацію.

Розглянемо одновимірні (лінійні) деформації розтягу або стиску. В цих випадках сили пружності напрямлені вздовж лінії дії деформуючої сили. Сили пружності, які діють на тіло з боку опори або підвісу, називаються силою реакції опори або силою натягу підвісу.

Закон Гука для розтягу (або стиску), що характеризується вектором видовження (стиску) $\Delta \vec{l}$, формулюється так:

Сила пружності пропорційна вектору видовження (стиску) і протилежна йому за напрямом:

$$\vec{F}_{\text{пр}} = -k\Delta \vec{l} \quad (1.27)$$

де k -коефіцієнт пружності (жорсткості), який визначається силою пружності, що виникає при одиничній деформації даного тіла.

Сили пружності залежать тільки від зміни відстаней між взаємодіючими частинами даного пружного тіла. Механічні властивості твердого тіла розглянемо на прикладі деформацій розтягу стержня. Деформацію розтягу характеризують: абсолютним видовженням $\Delta l = l - l_0$, відносним видовженням $\varepsilon = \Delta l / l_0$, механічною напругою $\sigma = \frac{F}{S}$, де l, l_0 – кінцева і початкова довжини стержня, F – сила пружності, S – площа поперечного перерізу стержня.

Для дослідження деформації розтягу стержень розтягують за допомогою спеціальних пристроїв і вимірюють видовження зразка та напругу, що виникає в ньому. За результатами дослідів креслять графік залежності напруги σ від відносного видовження ε . Цей графік називають діаграмою розтягу (рис.1.8).

Дослідження показали, що для малих деформацій напруга σ прямо пропорційна відносному видовженню ε :

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1.28)$$

де E – модуль Юнга.

Цю залежність називають законом Гука.

Модуль Юнга чисельно рівний напрузі, при якій довжина тіла збільшується вдвічі: $E = \sigma$, при $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{(l-l_0)}{l_0} = 1$, звідки $l = 2l_0$.

Максимальна напруга σ_n , при якій ще справджується закон Гука, називається границею пропорційності. Максимальну напругу σ_{np} , за якої ще не виникають помітні залишкові деформації (не більше 0,1%), називають межею пружності. Із збільшенням навантаження деформація зростає дедалі швидше. При деякому значенні напруги, що відповідає точці С, видовження зростає практично без збільшення навантаження. Це явище називають плинністю матеріалу (відрізок CD). Далі крива напруг піднімається і досягає максимуму у точці Е. Потім напруга різко спадає і зразок руйнується (в точці К). Максимальне значення напруги σ_m , при якій відбувається руйнація тіла, називається межею міцності (рис.1.8). Технічні споруди і конструкції надійні, якщо напруги, які виникають в них у процесі експлуатації, у кілька разів менші за межу міцності.

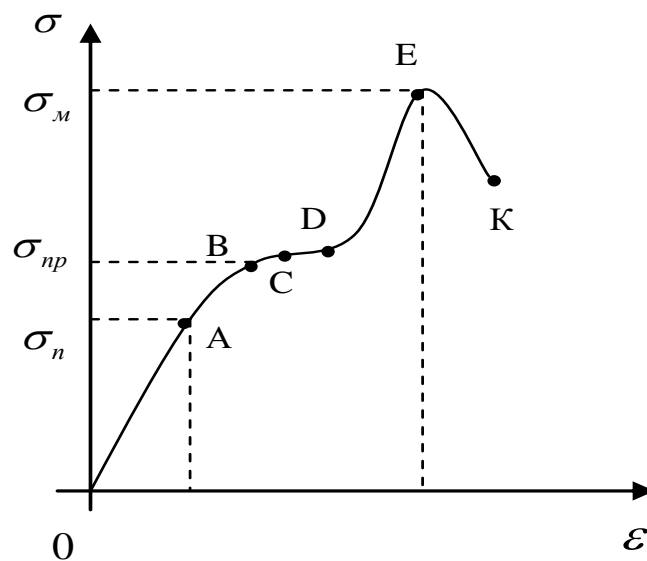


Рис. 1.8. Діаграма розтягу сталі.

Зсувом називають таку деформацію тіла, коли його плоскі шари зміщуються паралельно один одному (рис.1.9).

Закон Гука при зсуві:

$$\sigma_{\tau} = \frac{F}{S} = G\gamma, \quad (1.29)$$

де G – модуль зсуву, γ – кут зсуву, F – пружна сила, яка діє вздовж шару тіла, S – площа цього шару, σ_{τ} – дотична напруга CD – відстань між шарами, CC' – абсолютний зсув.

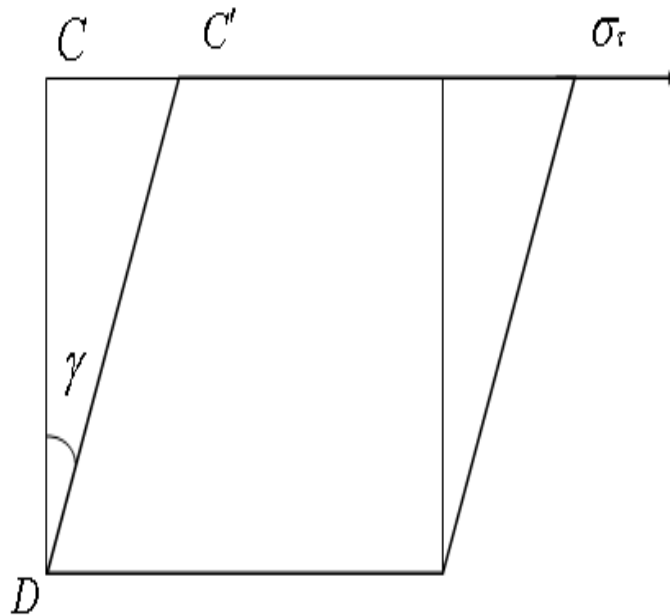


Рис. 1.9. Деформація тіла при зсуві.

Якщо d – поперечний розмір тіла (діаметр, товщина), а Δd – зміна його поперечного розміру, μ – коефіцієнт Пуассона, то

$$\frac{\Delta d}{d} = \mu \frac{\Delta l}{l} \quad (1.30)$$

Модуль зсуву G , модуль пружності E і коефіцієнт Пуассона μ пов'язані співвідношенням

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1.31)$$

Робота, яка виконується при деформації розтягу тіла,

$$A = \frac{k(\Delta l)^2}{2}, \quad (1.32)$$

Потенціальна енергія розтягнутого або стиснутого тіла

$$\Pi = \frac{k(\Delta l)^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2E} V = \frac{E\varepsilon^2}{2} V, \quad (1.33)$$

де V – об'єм тіла.

Напруження нормальне:

$$\sigma = F_{\text{пр}}/S, \quad (1.34)$$

де $F_{\text{пр}}$ – пружна сила, перпендикулярна до поперечного перерізу тіла; S – площа перерізу.

Напруження дотичне:

$$\tau = \frac{F_{\tau}}{S}, \quad (1.35)$$

де F_{τ} – пружна сила, яка діє вздовж шару тіла; S – площа цього шару.
Для в'язкого середовища напруження:

$$\sigma_{\text{в}} = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1.36)$$

де η – коефіцієнт в'язкості середовища; $\frac{d\varepsilon}{dt}$ – швидкість деформації.

Для в'язко-пружного середовища лінійна деформація:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (1.37)$$

де $\tau = \frac{\eta}{E}$ – час запізнювання, E – модуль Юнга.

1. 4. Деформація біологічних тканин

Як фізичний об'єкт, біологічна тканина – композитний матеріал, механічні властивості якого відрізняються від механічних властивостей кожного компонента, взятого окремо. Ми розглянемо діаграми деформацій кісткової тканини, м'язів і судин. Методи визначення механічних властивостей біологічних тканин аналогічні методам визначення цих властивостей в технічних матеріалах.

Кісткова тканина. Основними матеріалами кісткової тканини є гідроксилапатит $Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(OH)_2$ і колаген. Перший з них є неорганічним матеріалом, який має форму мікроскопічних кристалів. Другий – високомолекулярний волокнистий еластичний білок. Кристалики гідроксилапатиту розташовуються між колагеновими волокнами. Така композитна будова кісток надає їм потрібних механічних властивостей: твердості, пружності і міцності. Вони значною мірою залежать від індивідуальних умов росту організму та його віку.

Діаграма розтягу кісткової тканини показана на рисунку 1.10. Як бачимо, при малих деформаціях виконується закон Гука. Модуль Юнга кісткової тканини $E = 10$ ГПа, межа міцності $\sigma_{\text{м}} = 100$ МПа.

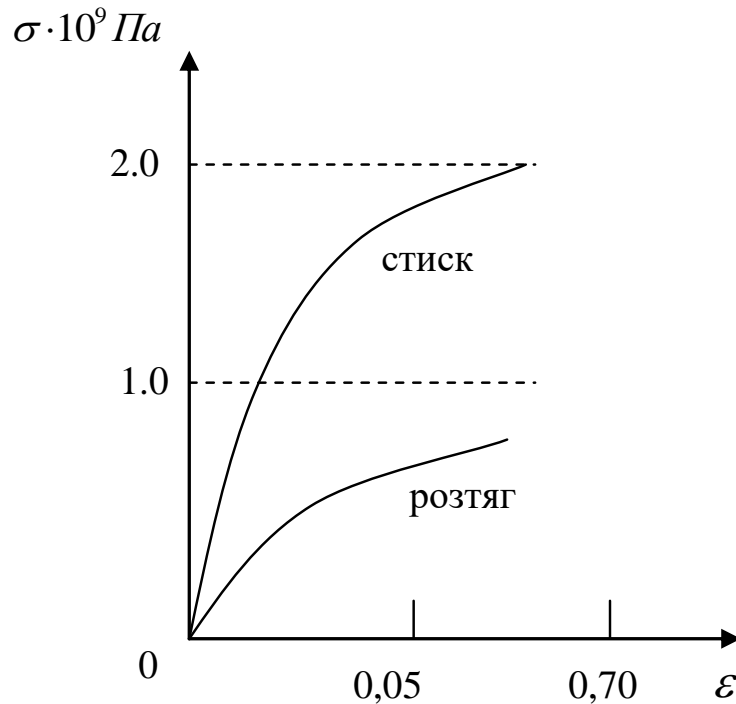


Рис. 1.10. Діаграма розтягу кісткової тканини.

У людини і тварин механічну міцність тіла забезпечує опорно-руховий апарат, що складається зі скелета і цілої групи м'язів. В організмі людини нараховується більше двохсот кісток, які завдяки трубчастій будові здатні витримувати величезні навантаження. Так, стегнова кістка (основа нижньої кінцівки), поставлена вертикально, витримує навантаження 15 кН, а великогомілкова – 1,6 – 1,8 тонни.

Якщо вага тіла людини чи тварини пропорційна її об'єму, то міцність пропорційна площі несучих конструкцій, які її підтримують. Тому у велетнів, описаних Джонатаном Свіфтом, що мали зріст у 12 разів більший, ніж у звичайної людини, відношення міцності до об'єму мало б бути у 12 разів меншим, ніж у звичайної людини.

Шкіра складається з волокон колагену та еластину, розташованих в основній матриці. Еластин є волокнистим високогнучким та розтяжним білком. Він розтягується до 200 – 300 %, приблизно як гума. Колаген може розтягуватись до 10%, тобто як капронове волокно. Модуль пружності колагену (10 – 100) МПа, еластину – (0,1 – 0,6) МПа, границя міцності, відповідно, 100 МПа і 5 МПа. Отже, шкіра є пружним матеріалом з високоеластичними властивостями. Вона добре розтягується та скорочується.

М'язи. До їх складу входить сполучна тканина, що складається з волокон колагену та еластину. Механічні властивості м'язів подібні до механічних властивостей полімерів. Між пружними властивостями полімерів і кристалічних мономерів існує принципова відмінність. В останніх сили пружності повністю визначаються зміною міжатомних відстаней. Полімери складаються з дуже довгих і гнучких молекул. Частини молекул перебувають у хаотичному тепловому русі, тому їх форма і довжина постійно змінюються. Під дією навантаження молекули випрямляються у відповідному напрямі і довжина

зразка зростає. У полімерах випрямлення молекул при навантаженні матеріалу та ковзання макромолекул триває значно довше, ніж повзучість в металах. В певній мірі процеси повзучості в полімерах подібні до течії в'язкої рідини. Поєднання в'язкої плинності з високою еластичністю дозволяє називати деформацію, характерну для полімерів, в'язкопружною. Пружні та в'язкі властивості тіл зручно описувати відповідними моделями (табл. 1.3).

Таблиця 1.3. Моделі деформації та їх закони.

Модель деформації	Закони деформації
Модель пружного тіла	$\sigma = E\varepsilon$
Модель в'язкого тіла	$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$ (η – коефіцієнт в'язкості)
Модель Максвелла	$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E}{\eta}t}$
Модель Кельвіна-Фойхта	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right)$

Моделлю пружного тіла можна вважати пружину, малі деформації якої відповідають закону Гука.

Моделлю в'язкого тіла може служити поршень з отворами, що рухається в циліндрі з в'язкою рідиною (рис.1.11)



Рис. 1.11. Модель в'язкого тіла.

В'язкопружні властивості тіл моделюються системами, що складаються з різних комбінацій простих моделей „пружина” і „поршень”.

Модель Максвелла – це послідовне з'єднання в'язкого і пружного елементів (рис.1.12):

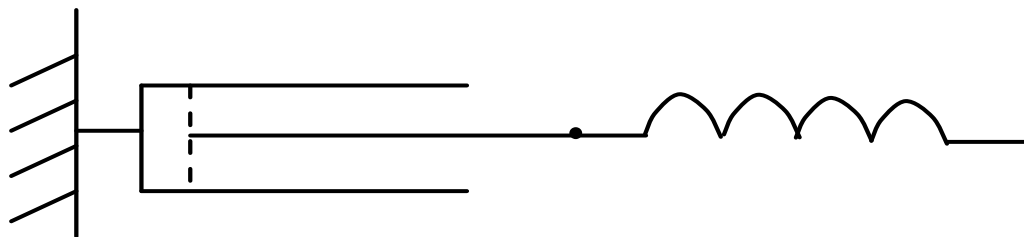


Рис. 1.12. Модель Максвелла.

Модель Кельвіна–Фойгта являє собою паралельне з'єднання в'язкого і пружного елементів (рис.1.13):

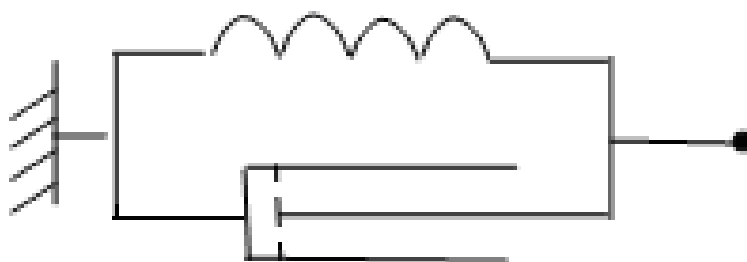


Рис. 1.13. Модель Кельвіна – Фойгта.

Механічні властивості гладких в'язів описує модель Максвелла. Залежність $\sigma = f(\varepsilon)$ для скелетного м'яза показана на рис.1.14. До певної міри механізм деформації зумовлений випрямленням молекул колагена. При $\varepsilon \geq 25\%$ зростають міжатомні відстані в молекулах.

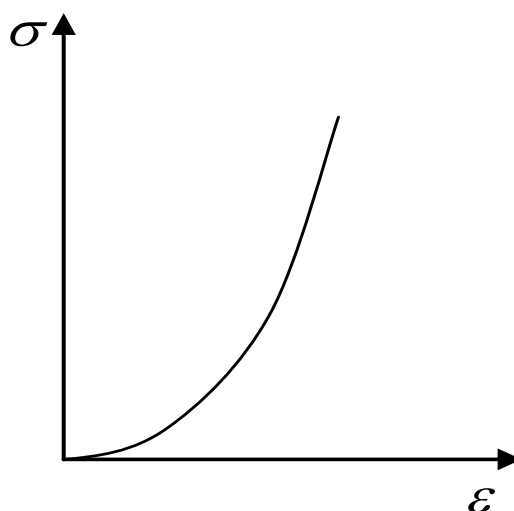


Рис. 1.14. Залежність напруги від відносного видовження для скелетного м'яза.

Судинна тканина. Механічні властивості судин визначаються, головним чином, властивостями гладких м'язових волокон, еластину і колагену. Стінки судин неоднорідні за своєю будовою, відрізняються анізотропними механічними

властивостями. До них можна застосовувати вищезгадані методи дослідження пружних властивостей лише наближено.

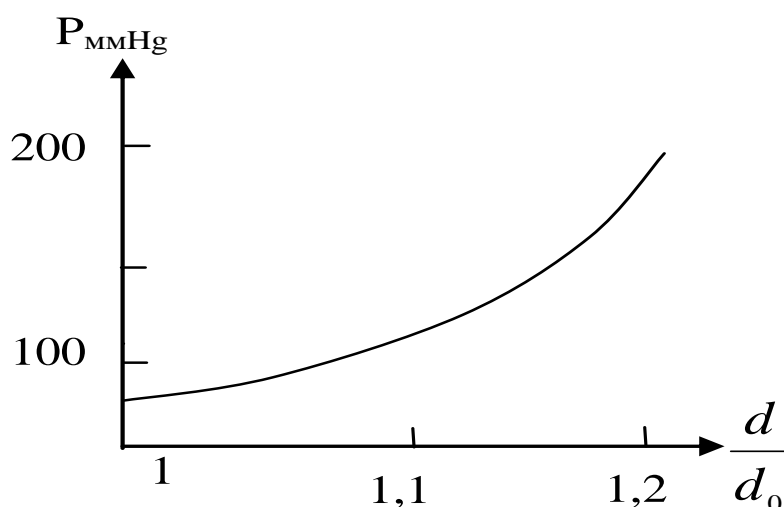


Рис. 1.15. Діаграма розтягу аорти під впливом трансмурального тиску P .

На рисунку 1.15 наведено діаграму розтягу аорти під впливом трансмурального тиску p (різниці тисків всередині і зовні судини). При зростанні тиску жорсткість судин або їх тонус різко зростає. Біофізичний механізм цього явища досить складний і досі недостатньо вивчений.

Механічна напруга стінки судин визначається рівнянням Ламе

$$\sigma = \frac{pr}{h} \quad (1.38)$$

де p – тиск крові зсередини на стінку судини, r – радіус внутрішньої частини судини, h – товщина судини.

Зв'язок між тиском, радіусом і модулем пружності визначається наступним рівнянням:

$$dp = \frac{Eh}{r^2} dr \quad (1.39)$$

На основі рівняння (1.39) отримують кількісні співвідношення, що характеризують процес поширення пульсової хвилі по судинах організму.

1. 5. Механічні коливання

Механічні коливання, що відбуваються під дією сили, пропорційної зміщенню і напрямленої до положення рівноваги, називаються гармонічними коливаннями і описуються гармонічним законом:

$$s = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.40)$$

де s – зміщення тіла (точки) від положення рівноваги, A – амплітуда, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ – циклічна частота, T – період, φ_0 – початкова фаза.

Швидкість v коливань тіла (точки):

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega \cdot A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.41)$$

$$v = \omega \cdot A \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.42)$$

З рівняння (1.42) випливає, що швидкість коливання змінюється з часом. Отже, коливальний рух відбувається з прискоренням:

$$a = \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -\omega^2 s \quad (1.43)$$

$$a = \omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi) \quad (1.44)$$

Зміщення, швидкість і прискорення у гармонічному коливальному русі є гармонічно змінними величинами з однаковим періодом, але з різницею за фазою відповідно $\frac{\pi}{2}$ та π .

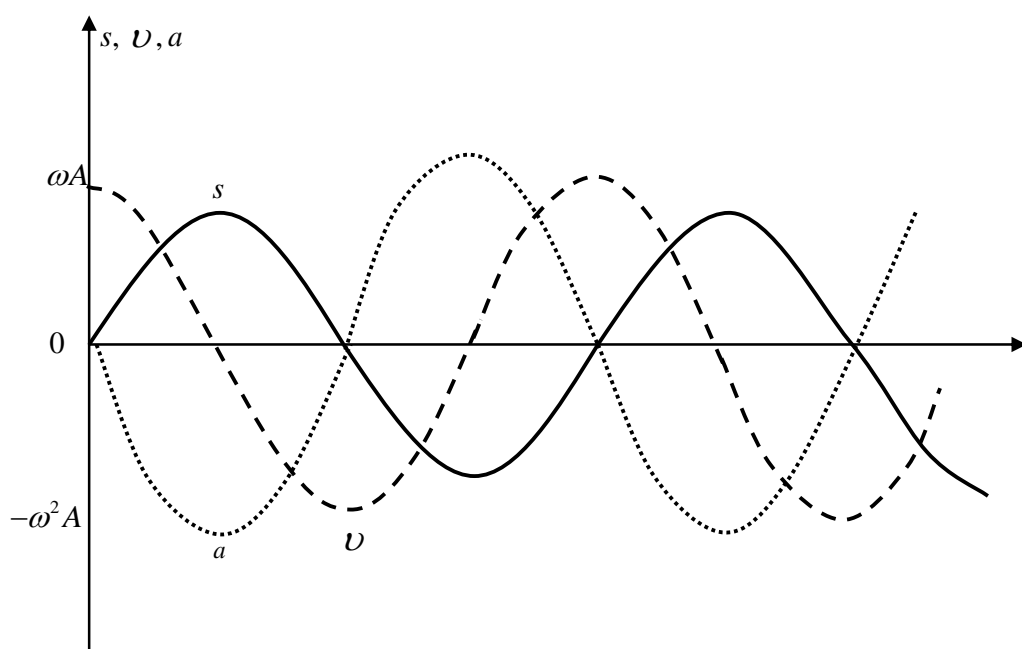


Рис. 1.16. Графік залежності переміщення, швидкості і прискорення від часу.

Для наочності, зміна s, v і a з часом (при гармонічному коливанні), розраховані за формулами (1.46–1.50) при $\varphi_0 = 0$ представлені на рисунку 1.16. Коли на тіло діє лише сила пружності:

$$F_{mp} = -k \cdot s \quad (1.45)$$

де k – коефіцієнт жорсткості, то згідно з другим законом Ньютона, враховуючи (1.45) одержимо:

$$m \frac{d^2s}{dt^2} + k \cdot s = 0 \quad (1.46)$$

Позначивши через $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ отримаємо диференціальне рівняння гармонічного коливання:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0 \quad (1.47)$$

Розв'язком цього рівняння є функція $s = f(t)$ задана формулою (1.42).

При невеликих швидкостях руху можна вважати, що сила тертя пропорційна швидкості руху тіла:

$$F_{mp} = -rv = -r \frac{ds}{dt} \quad (1.48)$$

де r – коефіцієнт опору середовища. Тоді другий закон Ньютона, для випадку, який розглядається, запишемо у вигляді:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \frac{r}{m} \cdot \frac{ds}{dt} + \frac{k}{m} \cdot s = 0 \quad (1.49)$$

Позначивши $\frac{r}{m} = 2\beta$ (β – коефіцієнт затухання), отримаємо диференціальне рівняння затухаючих коливань:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2\beta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = 0 \quad (1.50)$$

розв'язком якого є функція $s(t)$ (рис. 1.17):

$$s = A_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1.51)$$

де $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$.

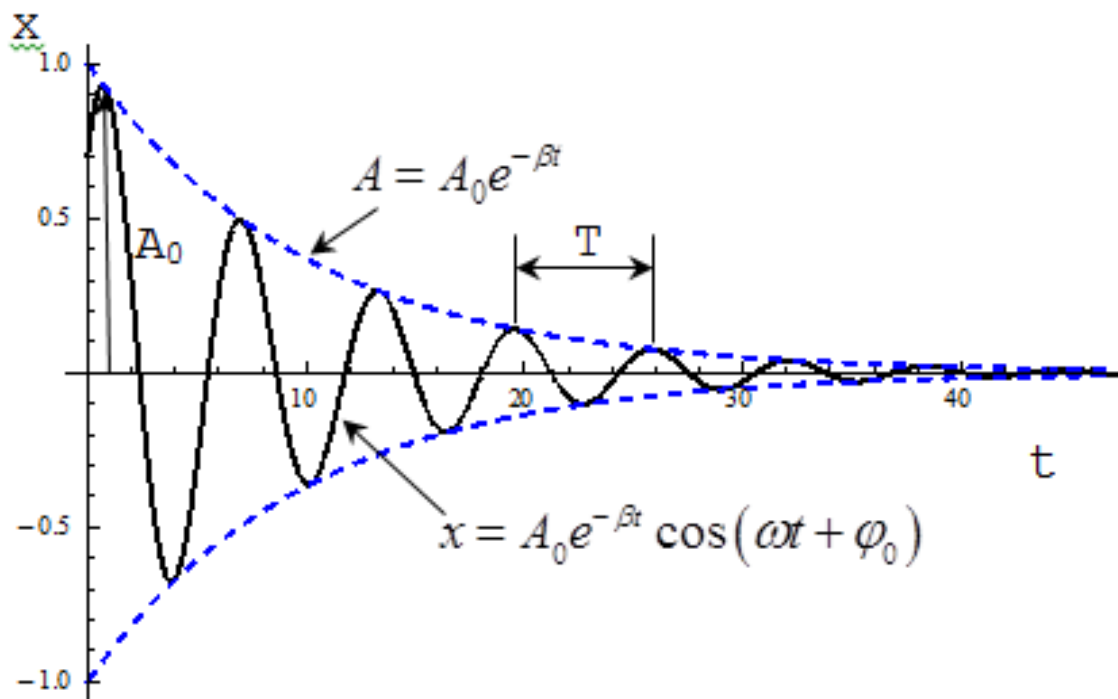


Рис. 1.17. Затухаючі коливання.

Залежність зміни амплітуди з часом має вигляд:

$$A = A_0 e^{-\beta \cdot t} \quad (1.52)$$

і графічно показана на рисунку 1.17.

Період затухаючих коливань визначається за формулою:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (1.53)$$

Відношення двох сусідніх амплітуд, розділених інтервалом часу, рівним періоду коливань, називається декрементом затухання – δ :

$$\delta = \frac{A(t)}{A(t+T)} \quad (1.54)$$

У практиці частіше використовують логарифмічний декремент λ :

$$\lambda = \ln \delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta \cdot T \quad (1.55)$$

Щоб коливання не затухали, до системи треба підводити енергію ззовні.

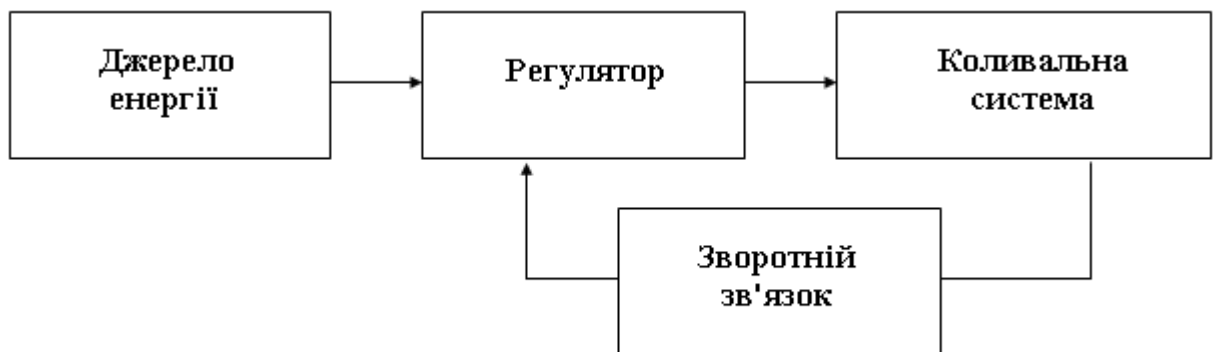


Рис. 1.18. Автоколивальна система.

Система, яка за допомогою певних пристроїв підтримує коливання, називається автоколивальною (рис.1.18.), а її коливання – автоколиваннями.

Основними елементами автоколивальних систем є:

1. Джерело енергії, яке підтримує незатухаючі коливання;
2. Коливальна система;
3. “Регулятор”, який регулює надходження енергії від джерела до коливної системи;
4. Зворотній зв’язок, за допомогою якого, коливальна система керує “регулятором”.

Коливання, які виникають у системі при дії зовнішньої сили, що змінюється за періодичним законом, називаються вимушеними коливаннями.

Якщо на матеріальну точку, крім квазіпружної сили і сили тертя, діє зовнішня змушувальна сила

$$F = F_0 \cos \omega t \quad (1.56)$$

де F_0 – її амплітуда, ω – кругова частота змушувальної сили, то другий закон Ньютона матиме вигляд:

$$m = \frac{d^2s}{dt^2} = -ks - r \frac{ds}{dt} + F_0 \cos \omega t \quad (1.57)$$

або

$$\frac{d^2s}{dt^2} = +2\beta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = f_0 \cos \omega t \quad (1.58)$$

де $f_0 = \frac{F}{m}$

Рівняння плоскої хвилі:

$$s = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1.59)$$

де

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}, \quad \text{tg} \varphi_0 = -\frac{2\beta \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (1.60)$$

Резонансна кругова частота, при якій зміщення досягає максимальної амплітуди, визначається за формулою:

$$\omega_{\text{раз}} = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (1.61)$$

Амплітуда при резонансі дорівнює:

$$A = \frac{f_0}{2\beta \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (1.62)$$

Залежність амплітуди коливань від частоти представлена на рисунку 1.19 ($\beta_1 < \beta_2 < \beta_3$).

При дії зовнішніх механічних коливань резонансні явища відбуваються і у внутрішніх органах. У цьому, очевидно, одна з причин негативного впливу інфразвукових коливань і вібрацій на організм людини.

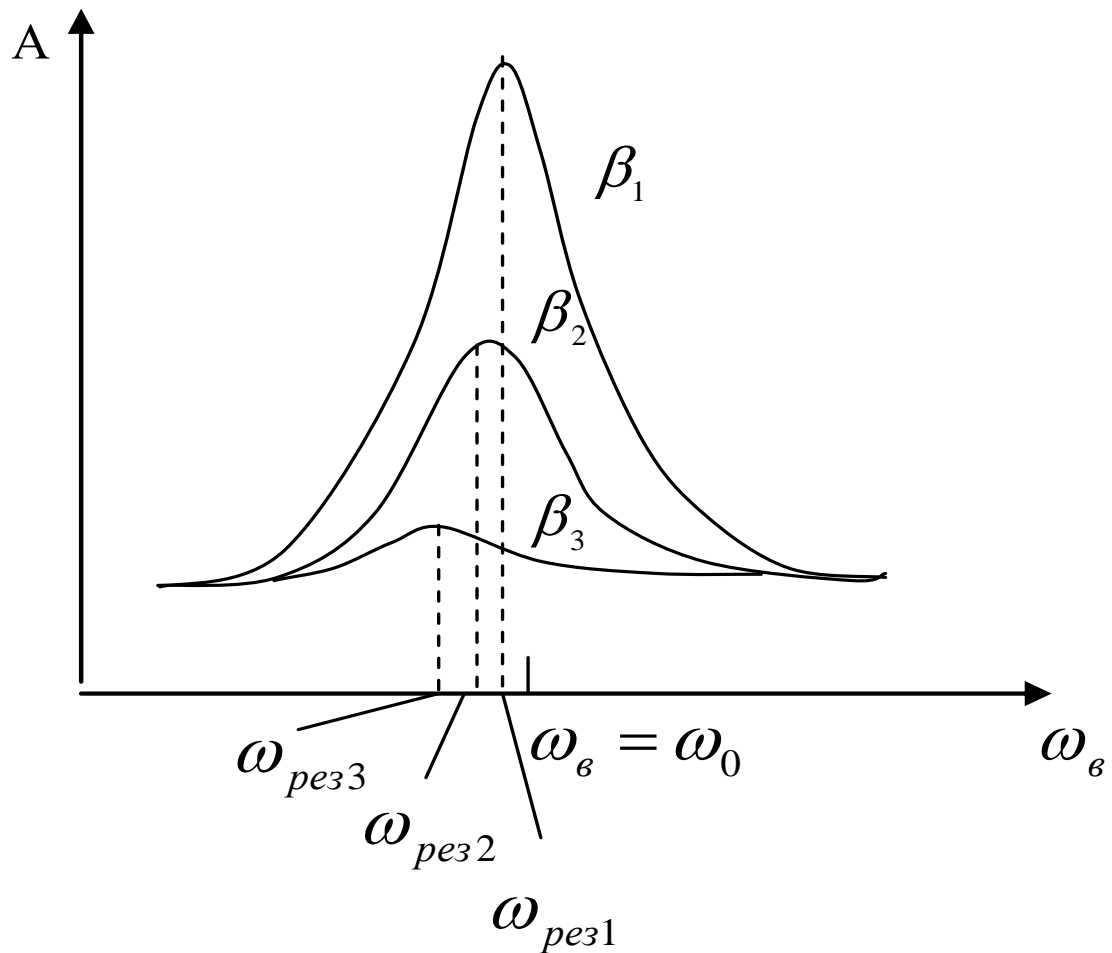


Рис. 1.19. Залежність амплітуди коливань від частоти.

1. 6. Характеристики слухового відчуття. Закон Вебера–Фехнера

Нормальне людське вухо сприймає достатньо широкий діапазон інтенсивностей звуку: так на частоті 1000 Гц від $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ($P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$) – поріг чутливості, до $I_\sigma = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ($P_\sigma = 63 \text{ Па}$) – порогу больового відчуття.

Відмінність між мінімальною інтенсивністю звуку, яку здатна сприймати людина, I_0 , та інтенсивністю звуку, яка викликає больові відчуття I_δ , дуже велика ($\frac{I_\delta}{I_0} = 10^{13}$), тому при вимірюваннях користуються логарифмічною шкалою. Величина рівня інтенсивності звуку рівна десятковому логарифму відношення інтенсивності досліджуваного звуку I до інтенсивності I_0 на межі чутності.

$$L = \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{P}{P_0}. \quad (1.63)$$

Рівень інтенсивності вимірюють у белах. Із вищенаведеної формули випливає, що при $I = 10 \cdot I_0$; $L = 1\text{Б}$. Отже, бел є одиницею шкали рівнів інтенсивності звуку, що відповідає збільшенню інтенсивності в 10 разів. Рівні інтенсивності звуку також виражають у децибелах (дБ) $1\text{Б} = 10 \text{ дБ}$.

Основною суб'єктивною (фізіологічною) характеристикою звуку є його гучність, яка є мірою сили слухового відчуття, викликаного звуком. Вона залежить від слухового тиску й чутливості вуха, яка неоднакова для звуків різної інтенсивності та частоти. Для порівняння гучності звуку різної частоти використовують фізичну величину, яка називається рівнем гучності і виражається формулою:

$$E = K \cdot \lg \frac{I}{I_0}, \quad (1.64)$$

де коефіцієнт пропорційності K залежить від частоти та інтенсивності. Приймають, що для частоти $\nu = 1000$ Гц, $K = 1$. Одиницею рівня гучності в системі СІ є фон. Рівень гучності у фонах визначається за формулою:

$$E_\phi = 10K \cdot \lg \frac{I}{I_0} \quad (1.65)$$

При постійній частоті рівень гучності зв'язаний з рівнем інтенсивності законом Вебера–Фехнера, згідно з яким рівень гучності на даній частоті пропорційний рівню інтенсивності.

Згідно із законом Вебера–Фехнера, якщо подразнення збільшуватиметься в геометричній прогресії, то відчуття цього подразнення зростатиме в арифметичній прогресії.

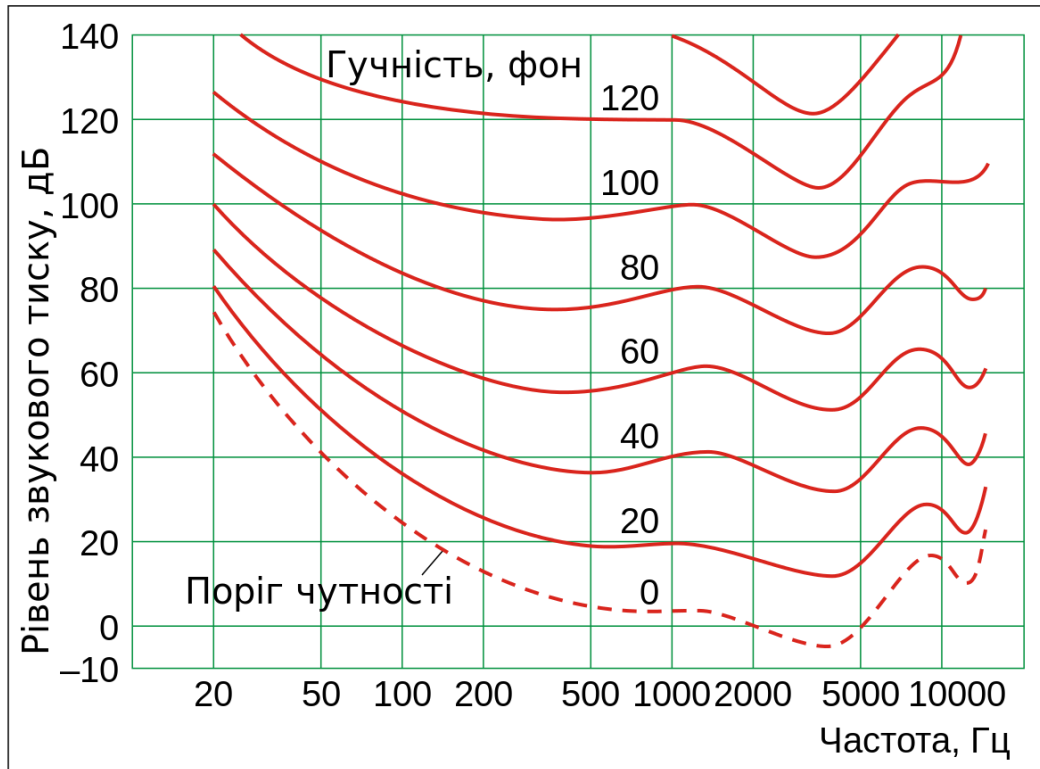


Рис. 1.20. Стандартні криві рівної гучності/

Щоб визначити рівень гучності довільного звуку, потрібно взяти тон з частотою 1кГц і змінювати його інтенсивність доти, поки його гучність не стане однаковою з

гучністю досліджуваного звуку. Рівень інтенсивності цього тону в децибелах буде чисельно рівним рівню гучності досліджуваного звуку у фонах. Проводячи досліди з багатьма людьми і усереднюючи отримані результати вдалося побудувати стандартні криві рівної гучності, показані на рисунку 1.20.

Приклади розв'язку задач до I розділу

Задача 1.1. Загальна жорсткість декількох однакових пружин, з'єднаних паралельно, у 16 разів більша жорсткості цих пружин, з'єднаних послідовно. Яка кількість з'єднаних пружин?

Дано:	Розв'язок:
$\frac{k_1}{k_2} = 16$	1. При паралельному з'єднанні пружин, їх жорсткість буде $k_1 = k_0 \cdot n$, де k_0 – жорсткість однієї пружини.
$n = ?$	2. При послідовному з'єднанні пружин, їх жорсткість буде $k_2 = \frac{k_0}{n}$, де k_0 – жорсткість однієї пружини.

3. Отримуємо

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{k_0 \cdot n}{\left(\frac{k_0}{n}\right)} = \frac{k_0 \cdot n^2}{k_0} = n^2$$

$$n = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}}$$

4. Обчислення: $n = \sqrt{16} = 4$.

Відповідь: з'єднано 4 пружини.

Задача 1.2. Для деякого м'яза при навантаженні $P = 0.3 \text{ Н}$ швидкість скорочення складає $v = 24 \text{ мм/с}$. Навантаження в ізометричному режимі скорочення (при ізометричному режимі скорочення $P = P_0$ при $v = 0$) $P_0 = 1.1 \text{ Н}$. Постійна $a = 0.2 \text{ Н}$. Обчислити максимальну швидкість скорочення.

Дано:
 $P = 0.3H$
 $v = 24 \text{ мм/с}$
 $P_0 = 1.1 H$
 $a = 0.2 H$

$v_{max} - ?$

Розв'язок:

1. Рівняння Хілла:

$$(P + a)(v + b) = (P_0 + a)b = a(v_{max} + b).$$

Знаходимо максимальну швидкість скорочення м'яза:

$$v_{max} = \frac{P_0 b}{a}.$$

2. Константа b :

$$b = \frac{v(P+a)}{P_0 - P}.$$

3. Отримуємо:

$$v_{max} = \frac{P_0}{a} \cdot \frac{v(P+a)}{P_0 - P}.$$

4. Обчислення:

$$\{v_{max}\} = \frac{1.1}{0.2} \cdot \frac{0.024(0.3 + 0.2)}{1.1 - 0.3} = 82.$$

$$v_{max} = 82 \text{ мм/с}$$

Відповідь: максимальна швидкість скорочення м'яза 82 мм/с.

Задача 1.3. Враховуючи модель в'язко-пружного середовища, розрахувати відносну деформацію $\varepsilon(t)$ скелетного м'яза за три хвилини, якщо модуль пружності м'яза $E = 1.2 \text{ МПа}$, площа поперечного перерізу $S = 0.8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, а навантаження $F = 6.3 \text{ Н}$. В'язкість речовини м'яза взяти $\eta = 0.125 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Дано:
 $E = 1.2 \text{ МПа} = 1.2 \cdot 10^6 \text{ Па}$,
 $S = 0.8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$,
 $\eta = 0.125 \text{ Па} \cdot \text{с}$,
 $F = 6.3 \text{ Н}$
 $t = 3 \text{ хв} = 180 \text{ с}$.

$\varepsilon(t) - ?$

Розв'язок:

1. Відносна деформація скелетного м'яза:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

де

$$\tau = \frac{\eta}{E}$$

2. Напруженість:

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

3. Отримуємо:

$$\varepsilon(t) = \frac{F}{S \cdot E} \left(1 - e^{-\frac{Et}{\eta}} \right).$$

4. Обчислення:

$$\{\varepsilon\} = \frac{6.3}{0.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1.2 \cdot 10^6} \left(1 - e^{-\frac{-1.2 \cdot 10^6 \cdot 180}{0.125}} \right) = 6.56.$$

$$[\varepsilon] = \frac{H}{m^2 \cdot Pa} \left(1 - e^{-\frac{-Pa \cdot c}{Pa \cdot c}} \right) = \frac{Pa}{Pa} = 1.$$

Відповідь: $\varepsilon = 6.56$.

Задача 1.4. Куля котиться без ковзання по горизонтальній поверхні і зупиняється через $t = 7c$. Визначіть відстань S , яку проходить куля до зупинки, якщо коефіцієнт тертя $k = 0.3$.

Розв'язок:

Дано:

$$t = 7c$$

$$k = 0.3$$

$S = ?$

1. За законом збереження енергії

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} = kmgS$$

2. Врахувавши, що

$$I = \frac{2}{5}mR^2, \quad v = \omega R \quad i \quad S = vt,$$

3. Отримуємо:

$$S = \frac{5gkt^2}{4} = \frac{(5,98 \text{ м/с}^2 \cdot 0.3 \cdot (0.7)^2 \cdot \text{с}^2)}{4} = 1.8 \text{ м}$$

4. Відповідь: $S = 1.8 \text{ м}$.

Контрольні питання до 1 розділу.

1. Що називають коливанням ?
2. Яке коливання називають гармонійним?
3. Які коливання називають вільними, затухаючими?
4. Від яких величин залежать період та частота вільних коливань пружинного маятника та коливального контуру?
5. Які фізичні величини визначають частоту та швидкість затухання вільних коливань маятника та заряду в LC-контурі?
6. Від яких факторів залежить початкова амплітуда вільних коливань?
7. Що називається логарифмічним декрементом затухання?



Тестові завдання до 1 розділу.

1. Сформулюйте закон Гука для деформації розтяг-стиск через модуль сили пружності й абсолютне видовження

А. модуль сили пружності прямо пропорційний відносному видовженню;

Б. модуль сили пружності прямо пропорційний напруженню;

В. модуль сили пружності обернено пропорційний абсолютному подовженню;

Г. модуль сили пружності прямо пропорційний початковій довжині зразка;

Д. модуль сили пружності прямо пропорційний абсолютному видовженню.

2. У яких напрямках відбуваються коливання в поперечній хвилі?

А. тільки по напрямку поширення хвилі;

Б. в усіх напрямках;

В. одночасно в двох напрямках;

Г. половину періоду в одному напрямку, половину періоду в іншому;

Д. тільки перпендикулярно напрямку поширення хвилі.

3. Швидкість руху це:

А. перша похідна імпульсу по координаті;

Б. перша похідна імпульсу по часу;

В. друга похідна переміщення по часу;

Г. друга похідна прискорення по часу;

Д. перша похідна переміщення по часу.

4. Повна енергія матеріальної точки, що коливається по гармонічному закону, прямо пропорційна

А. амплітуді швидкості зміщення;

В. амплітуді зміщення;

С. частоті коливань;

Д. квадрату амплітуди

прискорення зміщення;

Е. квадрату частоти зміщення.

5. Пружні механічні коливання і хвилі, частота яких перевищує 20 кГц, відносяться до області

А. рентгенівського випромінювання;

Б. гіперзвуку;

В. інфразвуку;

Г. звуку;

Д. ультразвуку.

6. Кінетична енергія матеріальної точки, що коливається по гармонічному закону, прямо пропорційна

А. частоті коливань;

Б. квадрату амплітуди прискорення зсуву;

В. амплітуді швидкості зміщення;

Г. амплітуді зміщення;

Д. квадрату амплітуди зміщення.

7. Потенціальна енергія матеріальної точки, що коливається по гармонічному закону, прямо пропорційна

А. амплітуді зміщення;

Б. амплітуді швидкості зміщення;

В. квадрату амплітуди прискорення зміщення;

Г. частоті коливань;

Д. квадрату частоти зміщення.

8. Вкажіть одиницю нормального напруження в СІ

А. паскаль-секунда;



Б. секунда в мінус першій степені;

В. радіан у мінус першій степені;

Г. кілограм-метр-секунда в мінус першій степені;

Д. паскаль.

9. Вкажіть одиницю відносної деформації в СІ

А. секунда;

Б. радіан;

В. метр-секунда;

Г. паскаль-секунда;

Д. величина безрозмірна;

ANSWER: E

10. Дайте визначення відносної деформації розтягу.

А. це відношення початкової довжини до довжини після деформації;

Б. це відношення об'єму до деформації до об'єму після деформації;

В. це відношення об'єму після деформації до об'єму до деформації;

Г. це відношення довжини після деформації до початкової довжини;

Д. це відношення абсолютного збільшення довжини до початкової довжини.

11. Рівняння $S = A \cos[w(t-x/v)]$ є:

А. рівнянням гармонійних коливань;

Б. хвильовим рівнянням;

В. рівнянням плоскої негармонійної хвилі;

Г. рівнянням сферичної гармонійної хвилі;

Д. рівнянням плоскої гармонічної хвилі.

12. Амплітуда плоскої незатухаючої хвилі в заданій точці середовища

А. обернено пропорційна часу;

Б. зменшується пропорційно квадрату часу;

В. лінійно зростає з часом;

Г. експоненціально спадає з часом;

Д. залишається постійною.

13. Закон Вебера-Фехнера можна сформулювати так:

А. відчуття подразнення прямо пропорційне силі подразнення;

Б. гучність звуку пропорційна інтенсивності звуку;

В. рівень гучності пропорційний силі подразнення;

Г. гучність пропорційна рівню інтенсивності;

Д. рівень гучності пропорційний рівню інтенсивності.

14. Знайти момент сили 10 Н якщо плече сили 0,1 м

А. 1 Н м

Б. 2 Нм

В. 3 Нм

Г. 4 Нм

Д. 5 нм

ANSWER: A

15. Знайти силу плече якої 0,2 м ,якщо вона створює момент сили 0,6 Нм

А. 1 Н

Б. 2 Н

В. 3 Н

Г. 4 Н

Д. 5 Н

16. Знайти напруження. Якщо модуль Юнга 10000 Н/м^2 , а відносне видовження 0,02

А. 100 Н/ м^2

Б. 200 Н/ м^2

В. 300 Н/ м^2

Г. 400 Н/ м^2

Д. 500 Н/ м^2

17. Знайти відносне видовження зразка при напруженні 5 кН/м^2 ($E=10 \text{ МН/м}^2$)

А. 0.001

- Б. 0.003
- В. 0.0002
- Г. 0.0005
- Д. 0.0004

18. Знайти модуль Юнга, якщо при напруженні 5000Н/м^2 відносне видовження рівне 0,001

- А. 1МН/м^2
- Б. 2МН/м^2
- В. 5МН/м^2
- Г. 3МН/м^2
- Д. 4МН/м^2

19. Дайте визначення мірі деформації ``відносний зсув``.

- А. це відношення довжини після деформації до початкової довжини;
- Б. це тангенс кута зсуву;
- В. це відношення об'єму після деформації до об'єму до деформації;
- Г. це відношення абсолютного збільшення довжини до початкової довжини;
- Д. це відношення початкової довжини до довжини після деформації.

20. 4. Вкажіть одиницю дотичного (тангенціального) напруження в СІ.

- А. паскаль;
- Б паскаль-секунда;
- В. кілограм/метр-секунда в мінус першій степені;
- Г. радіан у мінус першій степені;
- Д. секунда в мінус першій степені.

21. Межа пружності – це напруга, перевищення якої призводить до:

- А. до виникнення явища надплинності;
- Б. перетворення діелектрика у провідник;

- В. плавлення твердого тіла;
- Г. до виникнення явища провідності;

Д. порушення пропорційності між напруго і відносно деформацією.

22. Тіло Фойгта – це:

- А. послідовне з'єднання двох пружних елементів;
- Б. послідовне з'єднання в'язкого та пружного елементів;
- В. паралельне з'єднання двох пружних елементів;
- Г. паралельне з'єднання двох в'язких елементів;
- Д. паралельне з'єднання в'язкого та пружного елементів.

23. Які перетворення енергії відбуваються у м'язах?

- А. хімічної енергії в електричну та теплову;
- Б. хімічної енергії в механічну та теплову;
- В. теплової енергії у світлову та електричну;
- Г. теплової енергії у механічну та електричну;

Д. механічної енергії акустичних хвиль в електричну.

24. Важелем першого роду називають важіль, до якого діюча сила і сила опору прикладені:

- А. по різні сторони від точки опори;
- Б. у точках, що лежать по одну сторону від осі обертання;
- В. в одній точці і напрямлені назустріч одна одній;
- Г. в одній точці і напрямлені в одну сторону;
- Д. правильної відповіді немає.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗКУ

Задача 1.1. М'яз, скорочуючись зі швидкістю $\vartheta = 6$ мм/с, розвиває загальну потужність $N_{\text{заг}} = 2.7$ мВт. Навантаження в ізометричному режимі скорочення для цього м'язу складає $F = 0.8$ Н, константа b дорівнює 23 мм/с. Обчисліть роботу A , яку виконує м'яз за $t = 0.5$ сек.

Задача 1.2. В ізотонічному режимі м'яз піднімає вантаж масою $m = 100$ г на висоту $h = 20$ см. Розрахуйте теплопродукцію Q м'язу, якщо його ККД $\eta = 40\%$.

Задача 1.3. Який максимальний вантаж може підняти м'яз на висоту $h = 1$ м за рахунок енергії $Q = 1$ кДж тепла? ККД м'язу $\eta = 40\%$.

Задача 1.4. При скороченні м'язу за час $t = 0.3$ с було виділено $Q = 5.5$ кДж тепла. Обчисліть корисну потужність $N_{\text{кор}}$, яка розвивається м'язом, якщо його ККД $\eta = 45\%$.

Задача 1.5. Максимальна загальна потужність, яка розвивається м'язем, складає $N_{\text{загmax}} = 10$ Вт, а навантаження в ізометричному режимі скорочення $F_0 = 300$ Н. Обчисліть загальну потужність $N_{\text{кор}}$ м'язу при навантаженні $F = 180$ Н.

Задача 1.6. В експериментах на м'язі лягушки було визначено, що навантаження в ізометричному режимі дорівнює $F_0 = 0.65H$, максимальна швидкість скорочення $\vartheta_{\text{max}} = 10$ мм/с, а при навантаженні $F = 0.3H$ швидкість скорочення складала $\vartheta = 10$ мм/с. Обчисліть значення констант a і b для даного м'язу.



ГЛАВА 2. БІОРЕОЛОГІЯ ТА ГЕМОДИНАМІКА

*...Питання про те, яким чином
і в якій мірі рух крові судинами
залежить від м'язових
і пружних сил серця і артерій.
Томас Юнг*

У 1628 році англійський фізіолог, анатом і лікар Вільям Гарвей (1578 – 1657 рр.) опублікував працю «Анатомічне дослідження про рух серця і крові у тварин», в якій вперше в історії медицини експериментально довів, що кров рухається від шлуночків серця артеріями, а повертається до передсердя венами. Гарвей обґрунтував сучасну схему кровообігу людини й інших ссавців, що включає два кола. Гарвей був першим, хто кількісно оцінив серцевий викид у людини, хоча й зі значною неточністю (1020,6 г/хв, тобто близько 1 л/хв замість 5 л/хв).

2.1. Основи реології

Реологія – наука, що вивчає плинність і деформацію речовини, біореологія займається плинністю біологічних середовищ, а гемореологія вивчає реологічні властивості крові. Розглянемо просту модель лінійно в'язкої рідини. Для цієї мети розглянемо тонкий шар рідини, що знаходиться між двома паралельними пластинками, розміщеними на певній відстані (рис.2.1):

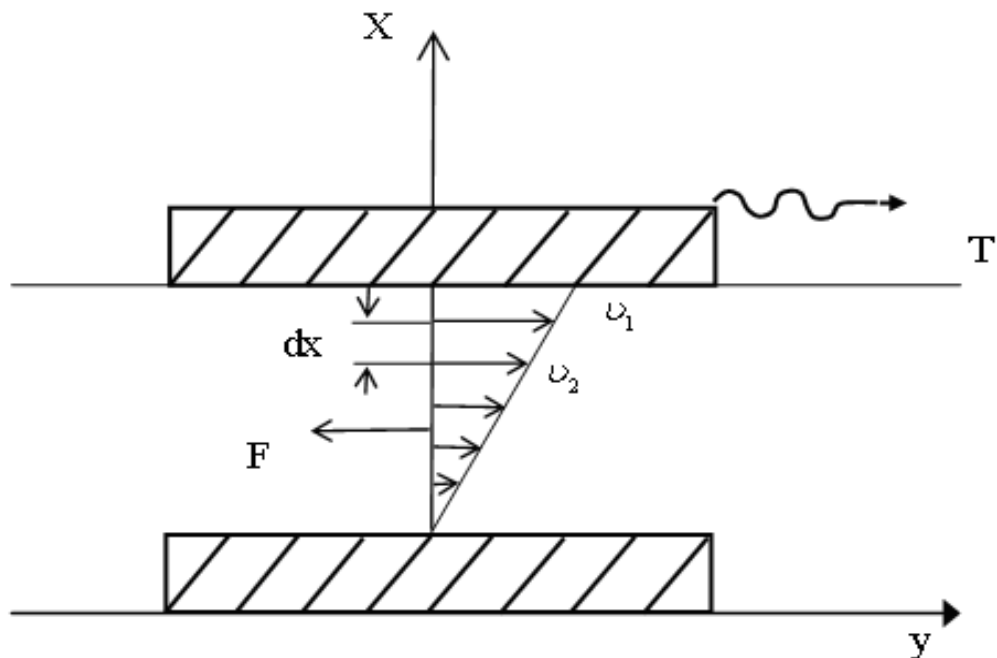


Рис. 2.1. Шар рідини, що знаходиться між двома паралельними пластинками.

Вважатимемо одну пластинку нерухомою, а до іншої прикладемо зсовуюче зусилля T . При рівномірному русі воно врівноважується з боку рідини силою F , яка обумовлена її в'язкістю і визначається за формулою Ньютона:

$$F = \eta \cdot S \frac{dv}{dx}, \quad (2.1)$$

де η – коефіцієнт в'язкості, який дорівнює силі внутрішнього тертя, що діє на одиницю площі поверхні шару при градієнті швидкості рівному одиниці, S – площа дотику шарів рідини, dv/dx – градієнт швидкості, який визначається відношенням зміни швидкості двох шарів до найкоротшої відстані між ними.

Відношення $\eta = \frac{F}{S}$ називається напругою зсуву

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (2.2)$$

Величина $\frac{dv}{dx} = \gamma$ в реології називається швидкістю зсуву, а графік функціональної залежності τ і γ називають кривою плинності.

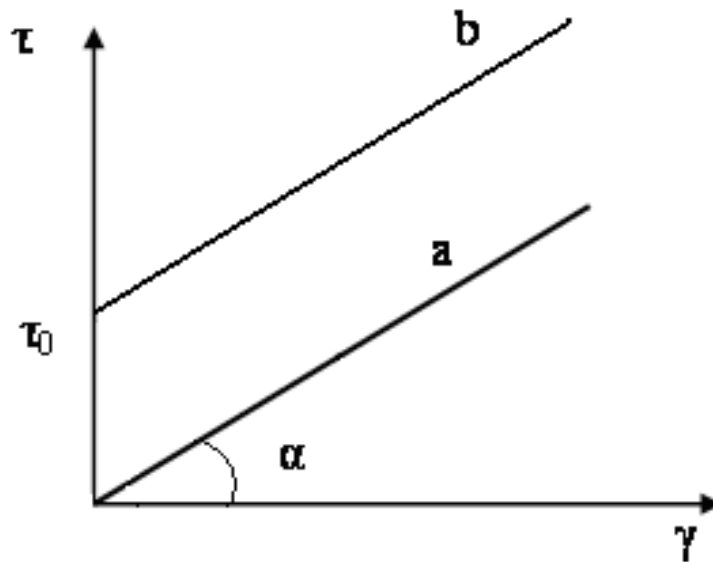


Рис. 2.2. Залежність напруги зсуву від швидкості зсуву.

Рух ньютонівської рідини (в'язкість якої постійна і не залежить від швидкості зсуву) можна описати законом Ньютона. До таких рідин належать легеневі гази, вода, сеча, низькомолекулярні рідини. Графік має вигляд прямої лінії, що проходить через початок координат (рис.2.2). Тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис рівний η і є єдиним реологічним параметром для ньютонівських рідин.

Кров є суспензією формених елементів (еритроцитів, лейкоцитів і тромбоцитів) у плазмі. Частина об'єму крові, яка припадає на долю еритроцитів – гематокрит – складає в нормі близько 0,44. Звідси випливає, що кров є високо концентрованою суспензією, що і відрізняє її від ньютонівських речовин.

Якщо швидкість крові зменшується, еритроцити утворюють так звані «монетні стовпчики», що призводить до підвищення в'язкості крові. Проте орієнтація еритроцитів вздовж осі судини (ефект Фареуса – Ліндквіста), протидіє цьому процесу. Еритроцити, формуючи циліндричну осьову течію, ковзають по шару навколишньої плазми крові.

За аналогією з ньютонівською рідиною для в'язкопластичних рідин вводиться поняття ефективної в'язкості:

$$\eta_{\text{еф}} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.3)$$

Для неньютонівських рідин, в'язкість яких залежить від градієнта швидкості (наприклад, при дуже малих швидкостях зсуву в'язкість крові зростає, при збільшенні ж швидкості зсуву до 100с^{-1} зменшується) плинність починається при, після $\tau > \tau_0$ перевищення деякого порогу – межі плинності. Величина τ_0 характеризує пластичні властивості середовища, а нахил кривої плинності до осі γ – її рухливість.

Рівняння Шведова–Бінгама для цих рідин має вигляд:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \gamma \quad (2.4)$$

де η_p – структурна в'язкість. Так, в аорті $\tau = (0.43 - 0.53) \cdot 10^{-2}$ Па, в артеріях $\tau = 4.8 \cdot 10^{-2}$ Па, у капілярах $\tau = 3.7 \cdot 10^{-12}$ Па. Це реологічний параметр. Збільшення в'язкості крові при малих швидкостях зсуву спостерігається при захворюваннях і після великих травм м'язів. При швидкостях зсуву, близьких до 100с^{-1} , плинність крові з достатньою точністю описується рівнянням Кесона:

$$\tau^{\frac{1}{2}} = \tau_0^{\frac{1}{2}} + S \cdot \gamma^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

де τ_0 – межа плинності, S – константа, що відповідає квадратному кореню з ефективної ньютонівської в'язкості, що досягається при дуже великих швидкостях зсуву. Ця функціональна залежність показана на рисунку 2.3.

Кров починає рухатися, коли $\tau > \tau_0$. Значення параметра Кесона S для крові, $(0.05 - 0.15) \text{П, с}^{1/2}$ а $\tau_0 = (0.001 - 0.005) \text{Па}$.

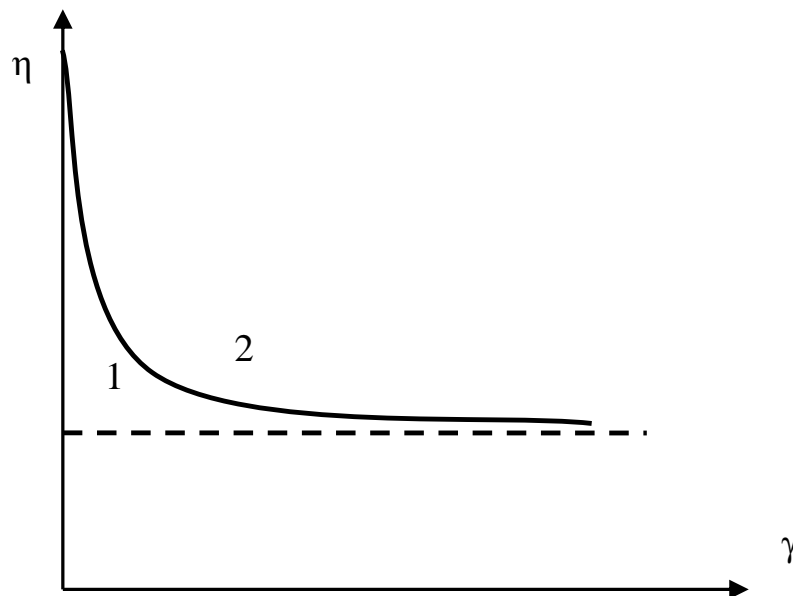


Рис. 2.3. Залежність коефіцієнта в'язкості від швидкості зсуву
1 – в'язкість деякої ньютонівської рідини; 2 – в'язкість крові.

$$\eta_{\text{сир}} = (4.3 - 5.3) \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Як видно з графіка (рис. 2.3) при великих швидкостях зсуву рівняння Ньютона і Кесона збігаються. Коефіцієнт в'язкості крові в нормі лежить у межах $(3,9-5,3) \text{мПа} \cdot \text{с}$, при патології він змінюється від $1.7 \cdot 10^{-3}$ до $22.9 \cdot 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$. У здорової людини при 37°C коефіцієнти в'язкості плазми і сироватки крові відповідно становлять $\eta_{\text{пл}} = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$ і $\eta_{\text{сир}} = 1.1 \cdot 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$.

У чоловіків і жінок в'язкість крові різна. У жінок коефіцієнт в'язкості крові у нормі становить $(3.9 - 4.9) \cdot 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$, в чоловіків $(4.3 - 5.3) \cdot 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$.

Суттєво змінюється в'язкість крові при деяких захворюваннях. При крупозній пневмонії, бронхіальній астмі, гіпертонічній хворобі, при великих загальних інфекціях, системному атеросклерозі, перитоніті в'язкість крові підвищується, при черевному тифі, туберкульозі, анемії – зменшується.

2.2. Формула Гагена–Пуазейля. Гідравлічний опір

Внутрішнє тертя істотно впливає на характер течії рідин і газів. Коли вектори швидкостей шарів рідини (газу) мають однакову направленість, то такий рух рідини (газу) називається ламінарним. При зростанні швидкості течії рідини (газу), по всьому об'єму виникають безладні завихрення рідини (газу), відбувається перемішування її шарів. Таку течію називають турбулентною.

Характер будь-якої течії рідини (газу) визначається числом Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} \quad (2.6)$$

де ρ – густина рідини або газу; v – швидкість течії рідини (газу); d – діаметр труби (судини); η – коефіцієнт в'язкості.

Було встановлено, що поки для течії в круглій трубці (судині) $Re < 2000$, течія ламінарна, у протилежному випадку – турбулентна.

Число Рейнольдса у вені сягає 500 – 700, а в капілярі – 0,001.

Гаген і Пуазейль дослідним шляхом встановили, що середня швидкість v_{cp} ламінарного руху рідини по трубці постійного перерізу прямо пропорційна градієнту тиску: $\frac{\Delta p}{\Delta l} = \frac{p_1 - p_2}{l}$ (p_1 і p_2 – тиск на початку і в кінці трубки довжиною l), квадрату радіуса R трубки і обернено пропорційна коефіцієнту в'язкості η рідини (закон Гагена – Пуазейля):

$$v_{cp} = \frac{p_1 - p_2}{l} \cdot \frac{R^2}{8 \cdot \eta} \quad (2.7)$$

Середня швидкість v_{cp} течії рідини визначає кількість рідини Q , що протікає через поперечний переріз S трубки за одиницю часу й називається об'ємною швидкістю течії рідини:

$$Q = v_{cp} \cdot S = \frac{p_1 - p_2}{l} \cdot \frac{\pi R^4}{8 \cdot \eta} \quad (2.8)$$

Формулу (2.9), що встановлює зв'язок між об'ємною швидкістю рідини з різницею тисків на кінцях судини можна переписати так:

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{W} \quad (2.9)$$

Величина $W = \frac{8 \cdot \eta \cdot l}{(\pi \cdot R^2)}$ називається гідравлічним опором.

Гідравлічний опір зростає при збільшенні довжини труби і зменшенні її діаметра. Якщо n судин (труб) з однаковими опорами Z_i з'єднані послідовно чи паралельно, то їх повні опори відповідно дорівнюють:

$$Z = n z_i, \text{ та } Z = \frac{z_i}{n} \quad (2.10)$$

Якщо судина (труба), розгалужується на n однакових судин (труб) меншого перерізу і якщо загальна площа перерізу розгалужень в K разів більша за площу перерізу основної судини (труби), то гідравлічний опір розгалуженої системи буде рівний:

$$Z = \frac{z_i}{n} = \frac{n}{K^2} z_0 \quad (2.11)$$

Таким чином, гідравлічний опір розгалуженої системи змінюється в $\frac{n}{K^2}$ порівняно з опором основної труби (судини). У стільки ж разів змінюється і різниця тисків на ділянці розгалуження.

Знайдемо швидкість зсуву, шарів рідини, використовуючи (2.7):

$$\gamma = \frac{dV}{dR} = \frac{R \Delta P}{4 \cdot \eta \cdot l} \quad (2.12)$$

Враховуючи (2.8) одержимо:

$$\gamma = \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot R^3} \quad (2.13)$$

Тепер на основі отриманої формули можна побудувати криву течії і визначити потрібні реологічні характеристики рідини.

2.3. Рівняння Бернуллі

Якщо P_1, v_1 і P_2, v_2 – відповідно тиски і швидкості у перерізах 1 і 2 труби, h_1, h_2 – висоти її перерізів відносно деякого рівня, а ρ – густина рідини (рис.2.4),

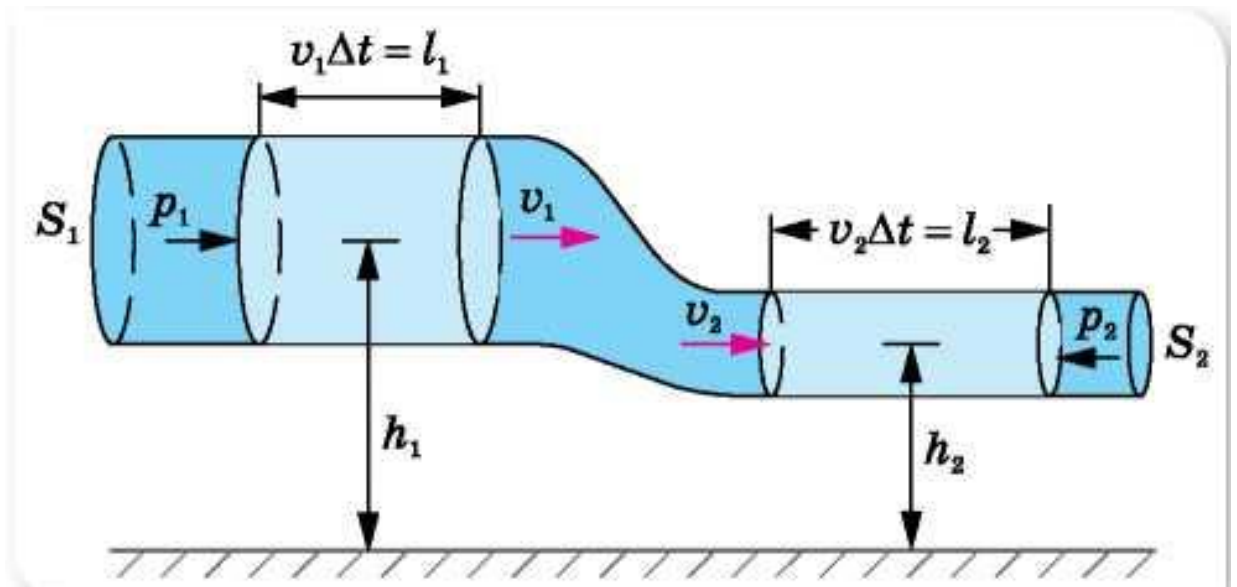


Рис. 2.4. Рух рідини у трубі різного перерізу.

то, згідно закону Бернуллі, сума статичного тиску P , гідростатичного тиску, зумовленого вагою стовпа рідини h і динамічного тиску $\frac{\rho \cdot v^2}{2}$ залишається постійною вздовж лінії течії рідини:

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 \quad (2.14)$$

Закон Бернуллі: сума статичного тиску P , гідростатичного тиску, зумовленого вагою стовпа рідини h і динамічного тиску $\frac{\rho v^2}{2}$ залишається постійною вздовж лінії течії.

Якщо рідина тече приблизно на одній висоті, $h_1 \approx h_2$, то рівняння Бернуллі спрощується і має вигляд:

$$P + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const} \quad (2.15)$$

Звідси випливає, що у місцях звуження (розширення) потоку рідини швидкість її зростає (зменшується), а тиск знижується (збільшується). Це пояснює випадки розриву аневризм (розширення ділянки судини), закупорювання певної ділянки судини (явище тромбозу), при якому кров починає текти поштовхами. За допомогою стетоскопа можна прослухати шум, що свідчить про порушення циркуляції крові.

2.4. Механічні хвилі

Механічною хвилею називають механічні коливання, що поширюються у середовищі.

Розрізняють два основні види механічної хвилі: пружні хвилі – поширення пружних деформацій – і хвилі на поверхні рідини.

У будь-якій точці середовища, розміщеній на відстані x від першої в напрямку поширення хвилі, зміщення S коливної точки від положення рівноваги також відбувається за гармонічним законом, проте із запізненням на час $t = \frac{x}{v}$, де v – швидкість поширення хвилі.

Запишемо рівняння плоскої хвилі:

$$s = A \cdot \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (2.16)$$

Провівши вказані нижче перетворення:

$$\frac{ds}{dt} = -A\omega \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right), \quad \frac{d^2s}{dt^2} = -A\omega^2 \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right);$$

$$\frac{ds}{dx} = -A \frac{\omega}{v} \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right), \quad \frac{d^2s}{dx^2} = -A \frac{\omega^2}{v^2} \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right);$$

отримуємо диференціальне рівняння хвилі, яке називають хвильовим рівнянням

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{d^2s}{dt^2} \quad (2.17)$$

Хвилі переносять енергію. Кількість енергії E в одиниці об'єму V середовища називається густиною енергії:

$$w = \frac{E}{V} \quad (2.18)$$

Пружною хвилею, коли коливання одних частинок середовища масою m спричиняють коливання сусідніх частинок, переноситься повна енергія:

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \quad (2.19)$$

Густина енергії:

$$w = \frac{m\omega^2 A^2}{2V} = \frac{1}{2}\rho\omega^2 A^2. \quad (2.20)$$

де $\rho = \frac{m}{V}$ – густина середовища.

Для характеристики енергії хвилі використовують такі фізичні величини, як потік енергії хвилі та її інтенсивність.

Інтенсивність енергії хвиль чисельно дорівнює потокові енергії хвилі, яка переноситься через одиницю площі поверхні, розташованої перпендикулярно до напрямку поширення хвилі:

$$I = \frac{\Phi}{S} = \frac{1}{S} = \frac{dE}{dt} \quad (2.21)$$

Одиницею інтенсивності енергії є Вт/м².

Інтенсивність хвилі I називають вектором Умова, який чисельно дорівнює густині потоку енергії і співпадає за напрямом з вектором швидкості поширення хвилі:

$$\vec{I} = \frac{\vec{\Phi}}{S} = w \cdot \vec{v} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \vec{v} \quad (2.22)$$

Вектор Умова для пружної хвилі залежить від густини середовища, квадрата амплітуди коливань частинок, квадрата частоти коливань і швидкості поширення хвилі.

Потік енергії хвилі – кількісна характеристика перенесеної енергії, яка дорівнює відношенню енергії dE , яка переноситься хвилями через поверхню, до часу dt , протягом якого вона переноситься:

$$\Phi = \frac{dE}{dt}. \quad (2.23)$$

Одиницею потоку енергії хвиль в системі СІ є Ват (Вт).

Знайдемо зв'язок між потоком енергії хвиль Φ , енергією коливних точок і

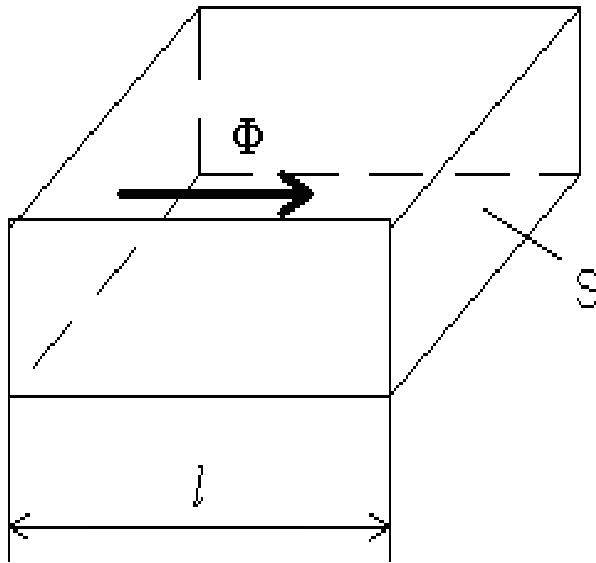


Рис. 2.5. Паралелепіпед в якому поширюється хвиля.

швидкістю поширення хвилі v . Виділимо об'єм середовища V , в якому поширюються хвилі, у вигляді прямокутного паралелепіпеда (рис.2.5); з площею основи S , довжиною ребра l , яке збігається з напрямом поширення хвилі. За 1с через основу паралелепіпеда пройде та енергія, яку мають частинки в об'ємі паралелограма $V = S \cdot l$. Це і є потік

енергії хвиль.

$$\Phi = w \cdot S \cdot v \quad (2.24)$$

Тоді

$$\vec{I} = \frac{\vec{\Phi}}{S} = w \cdot \vec{v} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 = A^2 \cdot \vec{v}. \quad (2.25)$$

Інтенсивність хвилі I називають вектором Умова, який чисельно дорівнює густині потоку енергії і співпадає за напрямом з вектором швидкості поширення хвилі.

Вектор Умова для пружної хвилі залежить від густини середовища, квадрата амплітуди коливань частинок, квадрата частоти коливань і швидкості поширення хвилі.

Інтенсивність плоскої хвилі пов'язана зі звуковим тиском p залежністю:

$$I = \frac{p^2}{2 \cdot \rho \cdot c} \quad (2.25)$$

де ρ – густина середовища, c – швидкість звуку. Добуток швидкості c звуку в даному середовищі на густину ρ середовища називається питомим акустичним опором середовища $\omega = \rho \cdot c$ і є основною характеристикою його акустичних властивостей. Для повітря (за нормальних умов) $\omega \approx 430 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$.

2.5. Звук та його характеристики

*Жодне слово не входить
у наше вухо безкарно.*

Сенека

Звукові методи дослідження організму людини відомі ще з античних часів. Історія розвитку медицини засвідчує, що тибетські монахи використовували звуки для лікування багатьох хвороб людини.

Звук – механічні коливання частотою від 16 Гц до 20 кГц, які поширюються у пружному середовищі. Основними фізичними(об’єктивними) характеристиками звуку є такі:

Інтенсивність звуку – це величина енергії, яку в середньому переносить звукова хвиля за одиницю часу через одиницю площі поверхні перпендикулярної до напрямку поширення хвилі:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot \omega^2 \cdot A^2 \quad (2.27)$$

де ρ – густина середовища, v – швидкість поширення хвилі, ω – циклічна частота, A – амплітуда хвилі. Як видно із формули (2.7), енергія та інтенсивність хвилі прямо пропорційні квадрату її амплітуди.

Звуковий тиск – це ефективне значення надлишкового над атмосферним тиском, яке утворюється у місцях згущення часток повітря у звуковій хвилі. Інтенсивність звуку I рівна квадрату амплітуди звукового тиску діленого на $2\rho v$, і визначається за формулою:

$$I = \frac{p^2}{2 \cdot \rho \cdot v} \quad (2.28)$$

де $\rho \cdot v$ – акустичний опір (імпеданс), P – звуковий тиск.

Акустичний гармонічний спектр – це результат розкладання складного коливання (тону) на прості тони (гармоніки), які його складають, з вказанням їх частоти і амплітуди (інтенсивності).

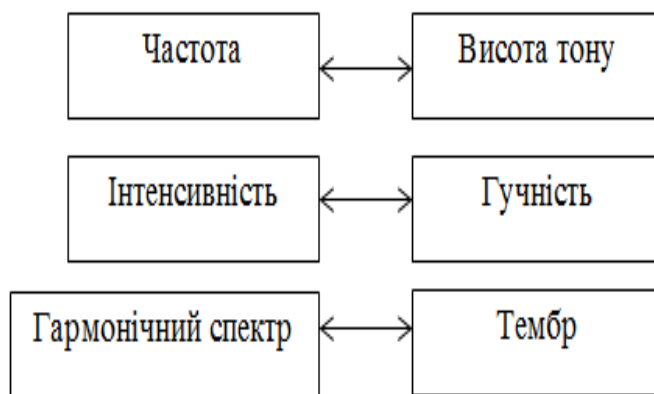


Рис. 2.6. Зв'язок об'єктивних і суб'єктивних характеристик звуку.

Так на частоті 1000 Гц від $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² (поріг слухового відчуття) до $I = 10$ Вт/м² (поріг больового відчуття). Відношення цих інтенсивностей рівне 10^{-13} , тому для зручності користуються шкалою рівня інтенсивності. Шкала рівня інтенсивностей звуку створюється таким чином: значення I_0 приймається за початковий рівень шкали, будь-яку іншу інтенсивність виражають через десятковий логарифм її відношення до I_0 :

$$L = \lg \cdot \frac{I}{I_0}, \quad (2.29)$$

За одиницю рівня інтенсивності прийнято 1 Бел (Б), який відповідає зміні інтенсивності в 10 разів, а також 1дециБел (дБ) = 0,1 Б

$$L = \lg \cdot \frac{I}{I_0} (\text{Б}) = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} (\text{дБ}), \quad (2.30)$$

Для фізіологічної оцінки гучності звуку вводять шкалу рівня гучності L_E . При постійній частоті рівень гучності зв'язаний з рівнем інтенсивності законом Вебера-Фехнера, згідно з яким рівень гучності на даній частоті пропорційний логарифму інтенсивності:

$$L_E = k \cdot \lg \frac{I}{I_0}, \quad (2.31)$$

Іншими словами: якщо інтенсивність звуку змінюватиметься у геометричній прогресії (тобто в однакове число раз), то рівень гучності змінюватиметься в арифметичній прогресії (тобто, на однакову величину); k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від частоти та інтенсивності. Відносно звуку це означає, що якщо інтенсивність звуку приймає ряд послідовних значень, наприклад $aI, 2aI, 3aI$ а (a – деякий коефіцієнт, $a > 1$), то відносно їм відчуття гучності звуку буде $E_0, 2E_0, 3E_0$ і т.д. Якщо б коефіцієнт k був сталим, то шкала інтенсивностей відповідала б шкалі гучності.

Вважають, що на частоті 1000 Гц шкали рівня гучності і рівня інтенсивності звуку співпадають, тобто ($k = 1$); на цій частоті децибел шкали рівня інтенсивності буде відповідати децибелу шкали рівня гучності, який називають фоном.

Приклади розв'язку задач до 2 розділу

Задача 2.1. Розрахувати величину значення тиску на одиницю довжини аорти ($l = 1\text{см}$), якщо об'ємна швидкість кровотоку $Q = 25\text{л/хв}$. Відомо, що радіус аорти $R = 1\text{см}$. Виразити відповідь у Паскалях та мм. рт. ст. ($1\text{мм.рт.ст.}=133\text{Па}$).

Розв'язок:

Дано:

$$Q = \frac{25\text{л}}{\text{хв}} = 25 \cdot \frac{10^{-3}}{60} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$l = 1\text{см} = 10^{-2}\text{м}$$

$$R = 1\text{см} = 10^{-2}\text{м}$$

$$\eta = 0.004\text{Па} \cdot \text{с}$$

$$\Delta P = ?$$

1. Об'ємна швидкість кровотоку:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l}$$

2. Зміна тиску:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{8\eta Q l}{\pi R^4}$$

3. Одиниці, обрахунок:

$$[\Delta P] = P_1 - P_2 = \frac{\text{Па} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{м}^4} 1\text{Па}$$

$$\{\Delta P\} = \frac{8 \cdot 0.004 \cdot 25 \cdot \text{м} \cdot 10^{-3}}{3.14 \cdot (10^{-2})^4} \cdot \frac{1}{60} = 425 \quad \Delta P = 425\text{Па}$$

Оскільки $1\text{ мм рт. ст.}=133\text{ Па}$, то

$$\Delta P = \frac{425}{133} = 3.2\text{мм. рт. ст.}$$

Відповідь: $\Delta P = 425\text{ Па}$ або $\Delta P = 3.342\text{ мм. рт. ст.}$

Задача 2.2. Спостерігаючи під мікроскопом рух еритроцитів у капілярі, можна виміряти лінійну швидкість течії крові ($v_k = 0.5\text{мм/с}$). Середня швидкість течії крові в аорті становить $v_a = 40\text{см/с}$. На підставі цих даних

визначити, у скільки разів сума поперечних перерізів усіх функціональних капілярів більша за поперечний переріз аорти.

Розв'язок:

Дано:

$$v_k = 0.5 \text{ мм/с} = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$$

$$v_a = 40 \text{ см/с} = 40 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$$

$$S_k/S_a - ?$$

1. Рівняння неперервності рідини:

$$v_k \cdot S_k = v_a \cdot S_a,$$

де S_k і S_a відповідно площі поперечного перерізу капілярів і артерії.

2. Знаходимо:

3.

$$S_k/S_a = v_a/v_k$$

3. Обчислення:

$$S_k/S_a = 40 \cdot \frac{10^{-2}}{0.5} \cdot 10^{-3} = 800.$$

Відповідь: Сума поперечних перерізів усіх функціональних капілярів більша за поперечний переріз аорти у 800 разів.

Задача 2.3. Амплітуда звукової хвилі збільшилася в три рази: а) у скільки разів зростає інтенсивність звукової хвилі? б) на скільки децибелів збільшився рівень інтенсивності звукової хвилі L ?

Дано:

$$A_2 = 3A_1$$

$$I_2/I_1 - ?$$

$$L_2 - L_1 - ?$$

Розв'язок:

1. Інтенсивність хвилі пропорційна до квадрату амплітуди:

$$I = \rho \cdot A^2 \cdot \omega^2 \cdot \frac{v}{2}.$$

2. Відношення інтенсивностей звуку I_2 і I_1 для двох різних амплітуд:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{A_2^2}{A_1^2} = 9.$$

3. Вирази для рівня інтенсивностей звуку L_1 і L_2 для двох розглядуваних випадків:

$$L_1 = 10 \lg(I_1/I_0),$$

$$L_2 = 10 \cdot \lg(I_1/I_0).$$

4. Зміна рівня інтенсивності:

$$L_2 - L_1 = 10 \lg \left(\frac{I_2}{I_0} \right) - 10 \lg \left(\frac{I_1}{I_0} \right) = 10 \lg(I_2/I_1)$$

4. Обчислення:

5.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{A_2^2}{A_1^2} = 9.$$

$$L_2 - L_1 = 10 \lg(9) = 9.5 \text{ дБ.}$$

Відповідь: 9; 9.5 дБ.

Задача 2.4. Визначити силу, що діє на барабанну перетинку людини під дією звукової хвилі інтенсивністю: а) $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ – поріг чутності. Площу барабанної перетинки взяти $S = 66 \text{ мм}^2$.

Дано:

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$$

$$S = 66 \text{ мм}^2 = 66 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$v_{\text{зв}} = 331 \text{ м/с} \quad v_{\text{зв}} =$$

$F - ?$

Розв'язок:

1. Сила, що діє на барабанну перетинку визначається за формулою: $F = P \cdot S$, де P – тиск, S – площа барабанної перетинки.

2. Інтенсивність звуку:

$$I = \frac{P^2}{2 \cdot \rho \cdot c}$$

Тиск P : $P = \sqrt{2 \cdot I_0 \cdot \rho \cdot v_{\text{зв}}}$

3. Врахувавши залежність між силою і тиском, отримуємо:

$$F = S \cdot \sqrt{2 \cdot I_0 \cdot \rho \cdot v_{\text{зв}}}$$

4. Обчислення:

$$\{F\} = 66 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{-12} \cdot 1.29 \cdot 331}; F = 1.9 \text{ нН.}$$

Відповідь: сила, що діє на барабанну перетинку людини під дією звукової хвилі становить 1.9 нН.

Задача 2.5. Знайти, у скільки разів зменшиться інтенсивність ультразвукової хвилі частотою $\nu = 1 \text{ МГц}$ при проходженні м'яких тканин на глибину $\alpha = 10 \text{ см}$, якщо коефіцієнт поглинання ультразвуку м'якими тканинами на цій частоті $\alpha = 10 \text{ см}^{-1}$.

Розв'язок:

Дано:

$$\nu = 1 \cdot 10^6 \text{ МГц}$$

$$h = 0.1 \text{ м}$$

$$\alpha = 0.16 \text{ см}^{-1}$$

$$I_0/I = ?$$

1. Інтенсивність ультразвукової хвилі, при проходженні тканин змінюється згідно формули:

$$I = I_0 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot h},$$

де I і I_0 – інтенсивності хвилі перед початком і після проходження тканин.

2. Отже,

$$I_0/I = e^{-2 \cdot \alpha \cdot h}.$$

3. Обчислення:

$$I_0/I = e^{2 \cdot 0.16 \cdot 10^2 \cdot 10 \cdot 10^{-2}} = 24.5.$$

Відповідь: інтенсивність ультразвукової хвилі зменшиться у 24,5 рази.

Контрольні питання до 2 розділу.

1. Сформулюйте рівняння нерозривності струменя рідини.
2. Сформулюйте рівняння Бернуллі.
3. Дати визначення (енергетичне і силове) коефіцієнта поверхневого натягу, його одиниць вимірювання. Які речовини називаються поверхнево-активними?
4. Який механізм їх впливу на поверхневий натяг рідини?
5. Які речовини називаються поверхнево-активними? Який механізм їх впливу на поверхневий натяг рідини?



Тестові завдання до 2 розділу.

1. Чи є вода ньютонівською рідиною?
А. ні, не є;
Б. є в'язкопружною псевдопластичною рідиною;
В. так, є, і її в'язкість завжди дорівнює асимптотичній в'язкості;
Г. так, є, і її в'язкість дорівнює кесонівській в'язкості;
Д. так, є.
2. Пояснити як використовується число Рейнольдса для ідентифікації режиму течії в'язкої ньютонівської рідини по гладкостінній трубі. Задано діаметр просвіту труби.
А. якщо число Рейнольдса виявиться менше ніж 3300, то режим ламінарний;
Б. якщо число Рейнольдса виявиться менше ніж 2300, то режим турбулентний;
В. якщо число Рейнольдса виявиться більше чим 2300, то режим ламінарний;



Г. якщо число Рейнольдса виявиться менше ніж 1000, то режим турбулентний;

Д. якщо число Рейнольдса виявиться менше ніж 2300, то режим ламінарний.

3. По циліндричній гладкостінній довгій трубці тече ньютонівська рідина в ламінарному режимі. Вкажіть формулу для розрахунку об'ємної швидкості течії рідини (Q). P – різниця тиску на кінцях трубки, X – гідродинамічний опір трубки

А. $Q = PX$;

Б. $Q = 2P/X$;

В. $Q = P/(2X)$;

Г. $Q = P/(8X)$;

Д. $Q = P/X$.

4. Вкажіть режим течії ньютонівської рідини, для якого справедлива формула Пуазейля.

А. нестационарний;

Б. вихровий;

В. турбулентний;

Г. строгий;

Д. ламінарний.

5. В якому відділі судинного русла лінійна швидкість кровотоку мінімальна?

А. венах;

Б. артеріолах;

В. артеріях;

Г. аорті;

Д. капілярах.

6. Основною рухомою силою кровотоку є

А. сила тяжіння;

Б. гідростатичний;

В. трансмуральний;

Г. статичний тиск;

Д. кров'яний тиск, обумовлений перевищенням тиску, що викликане роботою серця, над атмосферним тиском.

7. Ідеальною рідиною називається

А. рідина, коефіцієнт в'язкості якої не залежить від температури і тиску;

Б. рідина, що складається з неоднорідних частинок;

В. рідина, перебіг якої підкоряється рівнянню Ньютона;

Г. рідина, молекули якої не взаємодіють між собою;

Д. рідина, яка не стискується, густина її стала, а коефіцієнт в'язкості дорівнює нулю.

8. Турбулентною називається така течія рідини, при якій

А. профіль середніх за часом швидкостей має параболічну форму;

Б. по всьому об'єму потоку залишається постійним гідродинамічний тиск;

В. всі частинки рідини мають постійну швидкість;

Г. шари рідини ковзають один відносно одного не змішуючись;

Д. відбувається інтенсивне перемішування між шарами рідини.

9. Сила Стокса дорівнює

А. $F_c = h \cdot R$;

Б. $F_c = p \cdot h \cdot R \cdot v$;

В. $F_c = v \cdot S$;

Г. $F_c = 4 \cdot r \cdot v \cdot h$;

Д. $F_c = 6 \cdot p \cdot h \cdot R \cdot v$;

10. Вкажіть реологічну модель, що підходить для опису реологічного поведінки цільної крові при високих швидкостях зсуву

А. модель Кесона;

Б. модель Бінгама-Шведова;

В. модель Максвелла;

Г. модель Кельвіна-Фойгта;

Д. модель Ньютона.

11. Одиницею рівня інтенсивності звуку є

А. фон;

Б. ват;

- В. непер;
Г. мел;
Д. бел.
12. Одиницею рівня гучності звуку є
А. бел;
Б. мел;
В. непер;
Г. ват;
Д. фон.
13. Що розуміють під терміном висота звуку?
А. частоту основного тону звуку;
Б. Середню частоту обертонів;
В. суб'єктивне відчуття інтенсивності звуку;
Г. суб'єктивне відчуття частоти звуку;
Д. частота звуку.
14. Що виражає поняття “гучність звуку”?
А. звуковий тиск;
Б. суб'єктивне сприйняття інтенсивності звуку;
В. потужність звуку;
Г. суб'єктивне сприйняття частоти звуку;
Д. інтенсивність звуку.
15. Гучність є
А. частотою тону;
Б. акустичним спектром звуку;
В. суб'єктивною характеристикою звуку;
Г. об'єктивною характеристикою звуку;
Д. звуковим тиском.
16. Тембр звуку
А. є енергетичною характеристикою звуку;
Б. визначається амплітудою звукової хвилі;
В. є об'єктивною характеристикою звуку;
Г. визначається його акустичним спектром;
Д. не залежить від акустичного спектра.
17. Звук не може поширюватися в
А. вакуумі;
Б. воді;
В. повітрі;
Г. металі;
Д. тканинах організму людини.
18. Фізіологічні характеристики звуку це:
А. висота тону, інтенсивність, тембр;
Б. частота, інтенсивність, тембр;
В. гучність, тембр, частота;
Г. тембр, спектр, гучність;
Д. тембр, гучність, висота тону.
19. Втратою слуху називається:
А. зниження рівня гучності сприйняття звуку даної частоти стосовно норми;
Б. різниця рівнів гучності при патології та нормі;
В. різниця рівнів інтенсивності при патології та нормі;
Г. зниження рівня гучності звуку стосовно його норми;
Д. зниження рівня інтенсивності звуку даної частоти стосовно норми.
20. Сформулювати рівняння Бернуллі?
А. повна енергія частинок ідеальної рідини при стаціонарному русі є величина стала;
Б. повна енергія одиниці об'єму неідеальної рідини при стаціонарному русі є величина стала;
В. повна енергія рухомої ідеальної рідини є величина стала;
Г. повний тиск ідеальної рідини при стаціонарному русі в будь-якому перерізі сталий;
Д. при стаціонарному русі ідеальної рідини сума статистичного

і динамічного тисків є величина стала.

21. Інтенсивність пружної хвилі

А. прямо пропорційна густині середовища;

Б. обернено пропорційна амплітуді хвилі;

В. обернено пропорційна щільності середовища;

Г. прямо пропорційна частоті хвилі;

Д. не залежить від густини середовища.

22. Інтенсивність пружної хвилі

А. прямо пропорційна квадратові частоти;

Б. прямо пропорційна частоті хвилі;

В. обернено пропорційна щільності середовища;

Г. обернено пропорційна амплітуді хвилі;

Д. не залежить від щільності середовища.

23. Вкажіть режим течії ньютонівської рідини, для якого справедлива формула Пуазейля

А. нестационарний;

Б. вихровий;

В. турбулентний;

Г. строгий;

Д. ламінарний.

24. Основною рухомою силою кровотоку є

А. сила тяжіння;

Б. кров'яний тиск, обумовлений перевищенням тиску, що викликане роботою серця, над атмосферним тиском;

В. гідростатичний;

Г. трансмуральний;

Д. статичний тиск.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗКУ

Задача 2.1. Знайдіть в'язкість крові при нормальному гематокриті ($c = 45\%$), якщо в'язкість плазми η_0 складає $2.0 \text{ мПа} \cdot \text{с}$.

Задача 2.2. Розрахуйте максимальний хвилинний об'єм Q_{\max} крові, при якому течія крові в аорті залишається ламінарною. Діаметр аорти $d = 2 \text{ см}$, в'язкість крові $\eta = 5 \text{ мПа} \cdot \text{с}$, щільність $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$, критичне значення числа Рейнольдса $R_{\text{екр}} = 2000$.

Задача 2.3. Розрахуйте гідравлічний опір аорти $R_{\text{аор}}$, якщо її діаметр складає $d = 2.4 \text{ см}$, довжина $l = 40 \text{ см}$, в'язкість крові $\eta = 5 \text{ мПа} \cdot \text{с}$.

Задача 2.4. Розрахуйте швидкість осідання еритроцитів $os \ v$, вважаючи їх сферичними частками діаметром $d = 7 \text{ мкм}$. В'язкість плазми складає $\eta = 2.2 \text{ мПа} \cdot \text{с}$, щільність еритроцитів $3\rho_{\text{ер}} = 1080 \text{ кг/м}$, щільність плазми $3\rho_{\text{пл}} = 1027 \text{ кг/м}$.

Задача 2.5. Швидкість розповсюдження пульсової хвилі за артеріями складає $v = 10 \text{ м/с}$. Визначте модуль пружності E артерії, якщо товщина її стінки $h = 0.7 \text{ мм}$, внутрішній діаметр $d = 8 \text{ мм}$, щільність крові $3\rho = 1050 \text{ кг/м}$.



Задача 2.6. Хвилиний об'єм крові в стані спокою дорівнює $Q_1 = 5$ л/хв, а при інтенсивній фізичній роботі може зростати до $Q_2 = 25$ л/хв. Визначте тип течії крові в аорті для цих двох випадків. Діаметр аорти $d = 2$ см, в'язкість крові 5 мПа · с, щільність 1050 кг/м³, критичне значення числа Рейнольдса дорівнює 2000 .

Задача 2.7. Дослідження показали, що в результаті відкладень холестерину в аорті людини, товщина її стінок збільшилася в $1,5$ рази, внутрішній діаметр зменшився на 25% , а швидкість розповсюдження пульсової хвилі зросла в $1,9$ рази. Як зміниться, при цьому, модуль пружності стінки, відносно норми?

ГЛАВА 3. ТЕРМОДИНАМІКА БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

3.1. РІВНОВАЖНА ТЕРМОДИНАМІКА

3.1.1. Типи і параметри термодинамічних систем

Під поняттям «Тіло» в термодинаміці розуміють ту частину простору, яка заповнена речовиною. Тіло або групу тіл, які взаємодіють з середовищем шляхом обміну енергією через роботу та теплоту, називають термодинамічною системою. Середовищем вважають усі тіла, які оточують термодинамічну систему, але до її складу не входять. Термодинамічний метод дозволяє описати процеси, які відбуваються у системах. Закони термодинаміки справедливі для макроскопічних систем, тобто для таких, які мають великі об'єм і число частинок. Термодинамічні системи за характером взаємодії з середовищем поділяють на ізольовані, закриті і відкриті. Ізольованими називають системи, які не обмінюються з середовищем ні масою, ні енергією. У природі не існує ізольованих систем. Закритими називають системи які обмінюються з середовищем тільки енергією. Живі організми (біологічні системи) обмінюються з середовищем речовиною і енергією. Такі системи називаються відкритими.

Під термодинамічним процесом розуміють явища, які відбуваються в термодинамічній системі і пов'язані зі зміною її станів.

Як і в молекулярно-кінетичній теорії, стан системи в термодинаміці описують певними параметрами. Термодинамічні параметри поділяють на інтенсивні та екстенсивні. Інтенсивні параметри не залежать від числа частинок системи і описують загальний стан теплового руху в речовині. До інтенсивних параметрів належать, наприклад, тиск P , температура T хімічний потенціал μ тощо.

Екстенсивні параметри визначаються загальною масою або кількістю частинок речовини. До екстенсивних параметрів відносять масу m , об'єм V , енергію E , ентропію S тощо.

3.1.2. Закони термодинаміки

У стані термодинамічної рівноваги інтенсивні параметри системи набувають однакових значень в усіх частинах системи і не змінюються з часом. Тому рівноважний стан повністю описується певним набором екстенсивних та інтенсивних параметрів системи. Зв'язок між параметрами стану називається рівнянням стану. Наприклад, рівняння рівноважного стану ідеального газу

пов'язує температуру, тиск (інтенсивні параметри), об'єм і масу (екстенсивні параметри).

Відкриття першого закону термодинаміки історично пов'язано з встановленням еквівалентності теплоти і механічної роботи.

У 1840 – 1841 рр. німецький вчений, доктор медицини Юліус Роберт фон Маєр (1814 – 1878 рр.) брав участь у плаванні на острів Ява як корабельний лікар.

Під час перебування в тропіках він помітив, що колір венозної крові матросів у тропіках значно світліший, ніж у північних широтах. Це спостереження підштовхнуло його до висновку, що в жарких країнах для підтримання нормальної температури тіла повинно окислятися («згоряти») менше харчових продуктів, ніж в холодних, тобто існує зв'язок між споживанням речовини і утворенням тепла. Він також встановив, що кількість окислюваних продуктів в організмі людини зростає із збільшенням роботи, яку вона виконує. Все це дало Маєру підстави вважати, що теплота і механічна робота здатні взаємно перетворюватися.

У 1847 р. славетний німецький природознавець Герман Гельмгольц, професор фізіології Кьонігсберського, Бонського, Гельдельберзького університетів, професор фізики Берлінського університету, а з 1888 р. – директор Фізико-технічного інституту, надав закону математичного виразу.

За своєю суттю перший закон термодинаміки є законом збереження енергії – одним з найбільш фундаментальних принципів, встановлених у природознавстві. У рівноважній термодинаміці закон збереження енергії формулюється так: при будь-яких процесах в ізольованій системі внутрішня енергія системи U залишається сталою:

$$U = \text{const}, \quad dU = 0. \quad (3.1)$$

Під внутрішньою енергією системи розуміють суму кінетичної і потенціальної енергії частинок, з яких складається система. Внутрішня енергія є функцією стану системи. Величина $d \cdot U$ це повний диференціал, який залежить тільки від початкового і кінцевого стану системи. Очевидно, що при поверненні в той же рівноважний стан, який характеризується тими ж самими параметрами P, V, T , тощо, функція U приймає те ж саме значення, тому $d \cdot U = 0$. Кількість теплоти Q , як і робота A , є функціями процесу, а не стану системи, вони залежать від шляху або способу переходу між двома станами системи. Тому замість знаку диференціала використовується символ δ .

У замкнутій термодинамічній системі приріст її внутрішньої енергії при зміні стану рівний сумі кількості теплоти, переданої системі, і роботи зовнішніх сил над системою:

$$dU = \delta Q + \delta A. \quad (3.2)$$

Цей вираз закону збереження і перетворення енергії називається першим законом термодинаміки. Перший закон термодинаміки показує еквівалентність теплоти і роботи як двох форм передачі енергії. Проте цей закон нічого не говорить про умови перетворення теплоти і роботи.

К. Тімірязєв на основі закону збереження енергії встановив (1875 р.) кількісну залежність між швидкістю фотосинтезу і вбиранням хлорофілом світлових хвиль різної довжини.

З точки зору першого закону термодинаміки, кожний процес, що не суперечить законові збереження енергії, є можливим, наприклад, коли взяти два тіла, температура яких T_1 і T_2 , причому $T_1 > T_2$, то перший закон термодинаміки не заперечує можливості передачі теплоти від менш нагрітого до більш нагрітого тіла, тобто не заперечує перебігу процесу передачі теплоти в будь-якому напрямку (рис.3.1).

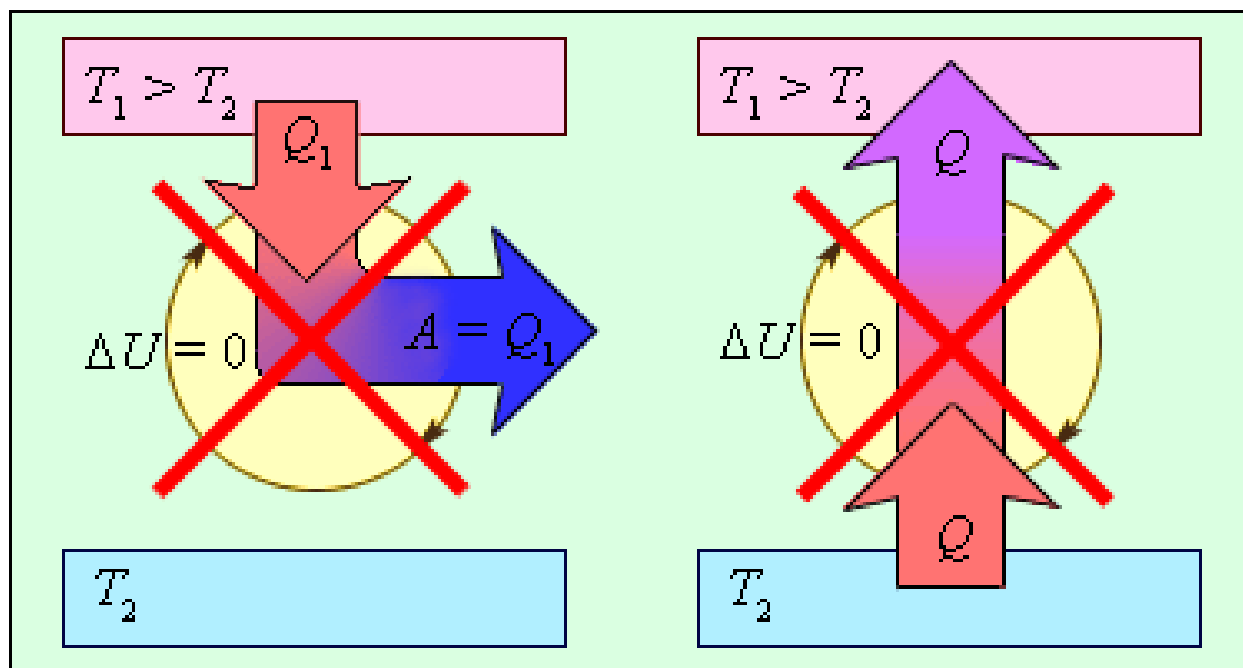


Рис.3.1. Процеси, що не заперечують перший закон термодинаміки, але заборонені другим законом: 1 – вічний двигун другого роду; 2 – передача теплоти від менш нагрітого тіла до більш нагрітого тіла.

Згідно другого закону термодинаміки, теплота може передаватись від більш нагрітого тіла до менш нагрітого (формулювання Клаузіуса).

Перший закон термодинаміки заперечує можливість побудови вічного двигуна першого роду, тобто такої машини, яка виконувала б роботу з нічого, без затрати будь-якої енергії. Але він не заперечує можливості побудови такої машини, яка всю енергію перетворювала б у роботу. Таку машину називають вічним двигуном другого роду. Згідно з другим законом термодинаміки, побудувати вічний двигун другого роду неможливо (формулювання Томсона), тобто неможливий такий періодичний процес, єдиним результатом якого було б перетворення теплоти в роботу внаслідок охолодження одного тіла.

Із другого закону термодинаміки випливає, що реальний процес не можна здійснити за наявності лише двох тіл: нагрітника і робочого тіла, тобто не вся теплота може бути перетворена в роботу. Для здійснення реального процесу необхідно мати три тіла: нагрітник, холодильник, робоче тіло (рис.3.2).

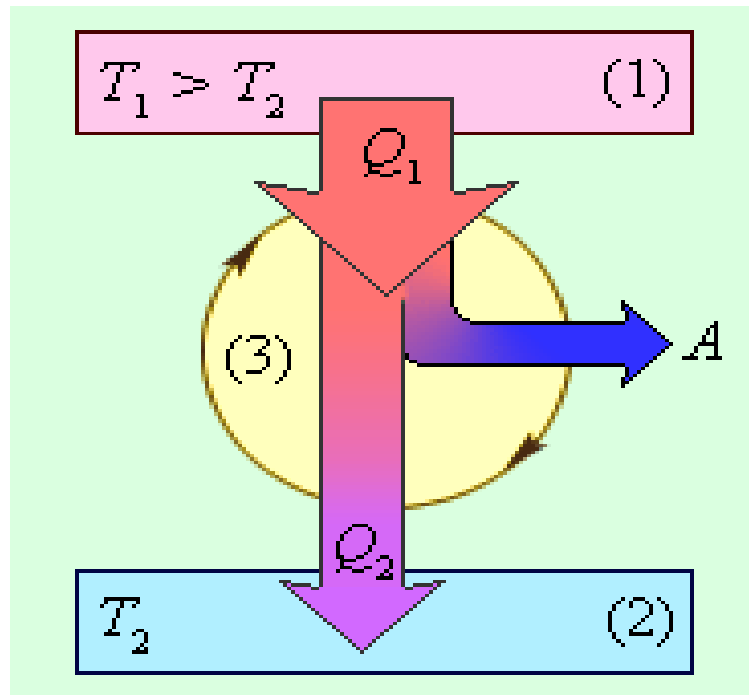


Рис. 3.2. Енергетична схема теплової машини $Q_1 > 0$, $A > 0$, $Q_2 < 0$.

Це означає, що така машина може перетворити в роботу лише частину теплоти $Q_1 - Q_2$, яку нагрівник віддає робочому тілу.

Яскравою ілюстрацією другого закону термодинаміки є дослід Дарлінга. У високу хімічну посудину на дно наливають шар аналіну, а зверху воду. Посудину нагрівають, внаслідок теплового розширення густина аналіну стає меншою від густини води і він спливає у вигляді великої краплини. При контакті з повітрям краплина аналіну охолоджується і осідає на дно посудини. Далі все повторюється.

Відношення кількості теплоти $Q_1 - Q_2$, перетвореної у роботу за один цикл, до загальної кількості теплоти, взятої від нагрівника, називається термодинамічним коефіцієнтом корисної дії.

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (3.3)$$

У 1824 р. французький інженер і фізик С. Карно ввів поняття про ідеальну теплову машину, що працює за ідеальним циклом, який складається з двох ізотерм 1-2, 3-4, яким відповідають температури T_1 і T_2 ($T_1 > T_2$) і двох адіабат 2-3, 4-1 (Рис.3.3.) .

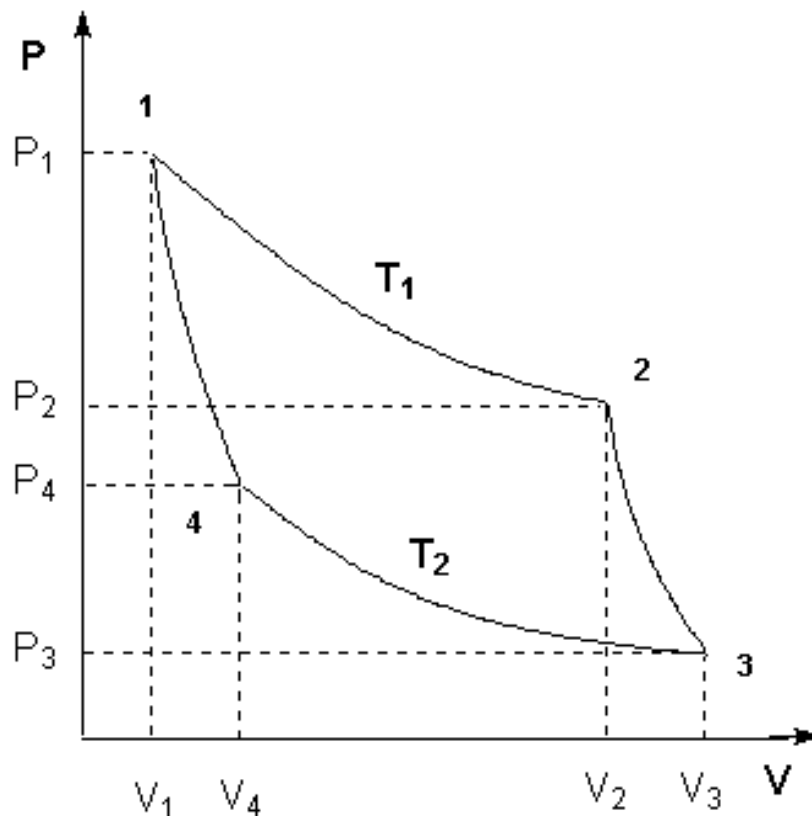


Рис. 3.3. Цикл Карно.

У циклі Карно робочим тілом є ідеальний газ, що забезпечує найвищий коефіцієнт корисної дії теплової машини, який не залежить від природи робочого тіла, а лише від абсолютних температур нагрівника і холодильника:

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (3.4)$$

Всі процеси в ідеальному циклі Карно повинні бути оборотними. Процес 1 – 2 називають оборотним, якщо можна здійснити зворотний процес 2 – 1 через всі проміжні рівноважні стани так, щоб після повернення системи в стан 1 в навколишньому середовищі не відбулося ніяких змін. Всі реальні процеси необоротні, а ККД необоротної машини менший від ККД оборотної машини

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (3.5)$$

звідки випливає

$$\frac{Q_1}{T_1} + \left(-\frac{Q_2}{T_2}\right) \leq 0; \quad \sum \frac{Q}{T} \leq 0. \quad (3.6)$$

Відношення $\frac{Q}{T}$ називається приведеною теплотою. З (3.6) випливає, що алгебраїчна сума приведених теплот за цикл не більше нуля (в оборотних циклах рівна нулю, в необоротних – менша нуля).

Вирази (3.5) та (3.6) представляють собою кількісне формулювання другого закону термодинаміки. Сума приведених теплот є функцією стану S і називається ентропією системи. Нехай процес є нескінченно малим. Тоді

$$dS \geq \frac{dQ}{T}. \quad (3.7)$$

Рівняння (3.7) є найзагальнішим кількісним виразом другого закону термодинаміки. Отже

$$S_2 - S_1 = \Delta S \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T}, \quad (3.8)$$

де S_2 і S_1 – ентропія в кінцевому 2 і початковому 1 станах.

Таким чином, ентропія є функцією стану системи, різниця якої для двох станів рівна сумі приведених теплот при оборотному переході системи з одного стану в інший. Знак " $=$ " відноситься до оборотних, а знак " $>$ " – до необоротних процесів.

Якщо процес відбувається в ізольованій системі ($dQ = 0$), в оборотному процесі ентропія не змінюється, а в необоротному – зростає

$$\Delta S \geq 0. \quad (3.9)$$

Отже, в ізольованій системі не можуть відбуватися такі процеси, які приводять до зменшення ентропії (другий закон термодинаміки).

При таненні льоду ентропія системи зростає в 1,5 рази, а при перетворенні води в пару – в 4 рази. У водяній парі молекули рухаються хаотично, тоді як в шматку льоду вони фіксовані; це показує, що ентропія є мірою неупорядкованості системи.

Очевидно, що в стані рівноваги ентропія системи максимальна.

А. Шательє сформулював принцип, згідно з яким система, що перебуває в стані рівноваги, чинить опір дії зовнішніх факторів, тобто при зміні якогось параметра в рівноважній системі починають відбуватися такі процеси, що цю зміну певною мірою компенсують.

Наприклад, збільшення тиску система компенсує за рахунок перебігу хімічної реакції, яка характеризується зменшенням загального числа молів.

Висновок про те, що ентропія хімічно однорідного твердого чи рідкого тіла при абсолютному нулі температури дорівнює нулю, називають третім законом термодинаміки, чи тепловою теоремою Нерста.

За свої роботи в галузі термодинаміки В. Нерст був відзначений у 1920 р. Нобелівською премією з хімії.

У реальній системі ентропія може зростати і зменшуватися. Проте всяке зменшення ентропії вимагає участі зовнішніх сил, при цьому ентропія зовнішньої системи, яка взаємодіє з даною, буде зростати. Зростання ентропії самодовільне і необоротне. Зростаюча ентропія, за виразом Уодінгтона, є "стрілою часу" самодовільної еволюції систем.

Ентропію можна охарактеризувати як міру неупорядкованості частинок системи. Так, наприклад, при зменшенні об'єму газу його молекули змушені займати все більш визначені положення одна відносно одної, що відповідає більшому порядку в системі, при цьому ентропія зменшується. Коли газ конденсується або рідина кристалізується при постійній температурі, то виділяється теплота, ентропія зменшується, а порядок в розташуванні частинок зростає.

Неупорядкованість системи кількісно характеризується термодинамічною ймовірністю W_T . Під нею розуміють число мікро-розподілів, якими може здійснитись даний макророзподіл, або, іншими словами, число мікростанів, які реалізують даний макростан.

3.2. ТЕРМОДИНАМІКА ВІДКРИТИХ СИСТЕМ ПОБЛИЗУ РІВНОВАГИ

3.2.1. Стаціонарний стан, виробництво ентропії

Рівноважна термодинаміка оперує співвідношеннями, у які не входить поняття часу. Тому в ній відсутні уявлення про швидкості перебігу процесів. Введення часового фактора в термодинамічні рівняння означає появу в них параметра, здатного врахувати необоротний, нерівнозначний розвиток реальних термодинамічних процесів.

Як в рівноважній термодинаміці особливим станом є стан рівноваги, так у нерівноважній термодинаміці особливу роль відіграє стаціонарний стан. Якщо параметри системи при взаємодії з середовищем не змінюються з часом, то стан системи називають стаціонарним. У різних частинах системи, яка перебуває в стаціонарному стані, значення параметрів різні, наприклад, температура в різних частинах тіла. В системі, таким чином, підтримуються постійні градієнти деяких параметрів, з постійною швидкістю перебігають хімічні реакції. Стаціонарний стан підтримується за рахунок потоків енергії і речовини, які проходять через систему.

Загалом, живий організм, як відкрита біологічна система, що розвивається, не перебуває в стаціонарному стані. Проте в невеликому проміжку часу стан біологічної системи приймають за стаціонарний. Розглянемо у цьому припущенні деякі питання.

Основною термодинамічною характеристикою в нерівноважній термодинаміці є швидкість виробництва (продукування) ентропії в часі. В загальному випадку ентропія системи складається з двох частин:

$$dS = dS_i + dS_e \quad (3.10)$$

де dS_i – зміна ентропії, зумовлена необоротними процесами в системі;
 dS_e – потік ентропії, зумовлений взаємодією з навколишнім середовищем.

Для організму – стаціонарної системи $dS = 0$, $S = const$. Внаслідок необоротності процесів $dS_i \geq 0$, тому $dS_e \leq 0$. Це означає, що більша ентропія повинна бути в продуктах виділення, а не в продуктах харчування. Отже, ентропія, вироблена всередині системи, повністю виходить в навколишнє середовище. Ентропія системи «Організм – зовнішнє середовище» зростає, як у ізольованій системі, але ентропія організму при цьому зберігається постійною. Диференціюючи рівність (3.10) за часом отримаємо:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_e}{dt} \quad (3.11)$$

Це співвідношення означає, що швидкість виробництва ентропії у відкритій системі складається зі швидкості збільшення ентропії всередині системи $\frac{dS_i}{dt}$ і швидкості обміну системи ентропією з навколишнім середовищем.

Вважається, що $\frac{dS_i}{dt} > 0$, тоді як знак $\frac{dS_e}{dt}$ може бути різним, так як і знак $\frac{dS}{dt}$.

Феноменологічну теорію лінійних необоротних процесів розробив на початку 30-х років ХХ ст. Л. Онсагер. Основне рівняння цієї теорії виражає швидкість виробництва ентропії в одиниці об'єму системи:

$$\sigma = \frac{1}{V} \frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n I_i X_i \quad (3.12)$$

де X_i – термодинамічні сили, які діють в системі. Це інтенсивні фактори, різноманітні градієнти (температури, тиску, концентрації, хімічного потенціалу); I_i – узагальнені потоки, обумовлені цими силами.

3.2.2. Лінійний закон. Принцип симетрії кінетичних коефіцієнтів Онзагера

Лінійний закон є узагальненням відомих емпіричних законів: закону Ома,

$$\vec{I}_e = -\gamma \cdot \nabla \vec{\varphi} \quad (3.13)$$

закону Фур'є,

$$\vec{I}_q = -\chi \cdot \nabla \vec{T} \quad (3.14)$$

закону Фіка,

$$\vec{I}_C = -D\nabla\vec{C}, \quad (3.15)$$

де $\vec{I}_e, \vec{I}_q, \vec{I}_C$ – потоки заряду, тепла, речовини, $\nabla\vec{\varphi}, \nabla\vec{T}, \nabla\vec{C}$ – відповідно градієнти електричного поля, температури, концентрації, γ, χ, D – коефіцієнти електропровідності, теплопровідності, дифузії. Нагадаємо, що градієнт величини $\nabla A = \frac{A_1 - A_2}{x_1 - x_2}$ – вектор, який показує напрямок найшвидшої зміни величини A , значення якої змінюється від однієї точки простору x_1 до іншої x_2 . Крім вказаних вище прямих процесів переносу, існують також так звані перехресні процеси. Наприклад, процес термодифузії – процес виникнення потоку частинок під дією градієнта температури, зворотний процес – виникнення потоку тепла під дією градієнта концентрації.

Лінійний закон пов'язує потоки і термодинамічні сили, він формулюється так: потоки є лінійними функціями термодинамічних сил у відкритих системах, що знаходяться поблизу рівноваги:

$$I_i = \sum_k L_{ik} \cdot X_k \quad (3.16)$$

де L_{ik} – кінетичні коефіцієнти.

Принцип симетрії (теорема) Онзагера пов'язує кінетичні коефіцієнти в перехресних процесах переносу:

$$L_{ik} = L_{ki} \quad (3.17)$$

Кінетичні коефіцієнти в перехресних процесах рівні між собою.

Розглянемо систему, яка має дві термодинамічні сили, X_1 і X_2 . Тоді лінійні закони для потоків I_1 і I_2 будуть такими:

$$I_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2; \quad (3.18)$$

$$I_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2. \quad (3.19)$$

Принцип симетрії означає, що з чотирьох кінетичних коефіцієнтів лише три є незалежними, а саме: $L_{22}, L_{11}, L_{21} = L_{12}$. Так, в процесі термодифузії коефіцієнт L_{12} , який пов'язує потік тепла і градієнт концентрації, дорівнює коефіцієнту L_{21} , що пов'язує потік частинок і градієнт температури.

За вклад у світову науку Л. Онзагер був відзначений Нобелівською премією з хімії у 1968 р.

3.2.3. Теорема Пригожина

В ізольованій системі виробництво ентропії завжди додатне $\sigma \geq 0$, $I_1 X_1 + I_2 X_2 \geq 0$. Окремі члени цієї суми можуть бути від'ємними. Припустимо, що $I_1 X_1 > 0$ і $I_2 X_2 < 0$. Якщо $|I_1 X_1| > |I_2 X_2|$, то умова $\sigma \geq 0$ виконується. Ми приходимо до важливих наслідків. Від'ємне значення $I_2 X_2$ означає, що окремо взятий цей необоротний процес неможливий, бо він проходить зі зменшенням, а не зі зростанням ентропії. Але одночасний перебіг процесу 1, для якого $I_1 X_1 > 0$ і виділення ентропії переважає її зменшення в процесі 2, робить процес 2 можливим у відкритій системі. Потоки 1 і 2 називаються спряженими. Спряженість потоків – це таке співвідношення між ними, при якому додатне виробництво ентропії від одного потоку компенсує зменшення ентропії від другого потоку, який був би неможливий в ізольованій системі. Як приклад можна розглядати явище термодифузії в посудині, що містить однорідну суміш двох газів. Внаслідок різниці температур відбувається розділення суміші – поблизу гарячішої стінки посудини зростає концентрація одного з газів, поблизу холоднішої – другого. Причому рух молекул газу може відбуватися в напрямі зростання концентрації, що неможливо при звичайній дифузії. Втрата ентропії при розділенні газів перекривається її виграшем внаслідок теплопро відності. Потоки речовини і теплової енергії спряжені.

На відміну від ізольованих систем, які по мірі перебігу в них необоротних процесів наближаються до стану рівноваги, відкриті системи можуть досягати не рівноважного, а стаціонарного стану. Основним питанням теорії є питання про критерії такого стану. В термодинаміці лінійних необоротних процесів приймається, що стаціонарний стан характеризується екстремальним принципом. Цей принцип (його називають також теоремою) був сформульований І. Пригожином: в стаціонарному стані при фіксованих зовнішніх параметрах швидкість виробництва ентропії в системі постійна в часі і мінімальна за величиною.

З цієї теореми випливає, що якщо система з тієї чи іншої причини виведена зі стаціонарного стану, то вона буде змінюватись доти, доки питома швидкість виробництва ентропії не прийме найменшого значення. Іншими словами, еволюція відкритої системи до стаціонарного стану описується нерівністю

$$\frac{d\beta}{dt} \leq 0, \quad (3.20)$$

де $\beta = \frac{T}{V} \frac{dS}{dt}$ питома дисипативна функція системи (зауважимо, що дисипація енергії системи – це перехід частини енергії впорядкованого процесу, наприклад електричного струму, в енергію невпорядкованого процесу).

І. Пригожину, за вклад в термодинаміку необоротних процесів, особливо в теорію дисипативних систем, у 1977 р. присудили Нобелівську премію з хімії.

Термодинаміка лінійних необоротних процесів використовується для опису таких явищ як проникність клітин і активний транспорт, скорочення м'язів і процеси збудження, розвиток і ріст організмів. В сильно нерівноважних системах необхідно враховувати принцип Пригожина – Глансдорфа, згідно з яким швидкість виробництва ентропії зменшується.

3.2.4. Термодинаміка відкритих систем далеко від рівноваги

Видатним досягненням в розвитку науки за останні роки стало розуміння фундаментальних основ і принципів самоорганізації у відкритих системах різноманітної природи (фізичних, хімічних, біологічних та ін.) далеко від рівноваги. Самоорганізація – це процес самочинного виникнення у відкритих сильно нерівноважних системах нових структур, що, як правило, володіють більшою складністю і ентропією, аніж старі. Загальні принципи просторових, часових і просторово-часових структур у відкритих системах самої різноманітної природи далеко від рівноваги вивчає синергетика.

Існує багато прикладів утворення нових структур (впорядкування) в процесі еволюції різноманітних систем:

у фізиці – це фазові переходи типу надпровідність і надплинність, страти у газовому розряді, когерентне випромінювання лазерів тощо;

у хімії – періодична окисно-відновна реакція Білоусова-Жаботинського;

у біології – періодичні процеси при гліколізі і фотосинтезі, морфогенетичні процеси в сімействі колективних амеб, коливальна динаміка чисельності популяцій;

у медицині – утворення ревербераторів (спіральних хвиль) в міокарді.

Ці приклади показують, що синергетика тісно зв'язана з різними сферами науки і техніки. Найбільш цінним досягненням синергетичного підходу є те, що він дозволяє обґрунтувати нові "спільні" принципи, які лежать в основі процесів самоорганізації. Суть її зводиться до наступного: просторові, часові і просторово-часові структури в органічному і неорганічному світі виникають як прояв колективних коливань через флуктуації, їх взаємодію і відбір тих, які мають найбільший час релаксації.

Зауважимо, що між виникненням порядку через флуктуації в далеких від рівноваги системах і тим, що має місце у живих системах, існує суттєва відмінність. Вона полягає в тому, що у першому випадку це процес самоорганізації дисипативних структур, в другому – явище саморегуляції, яке підтримує стійкість стану біологічної системи, далекої від рівноваги. В першому випадку процеси мають спонтанний характер, в другому вони жорстко детерміновані генетичною програмою.

Приклади розв'язку задач до 3 розділу

Задача 3.1. Одноатомному газу, кількістю речовини 2 моля, передано кількість теплоти 1,2 кДж. При цьому газ виконав роботу 600 Дж. На скільки змінилась температура газу?

Дано: $\nu = 2$ моль $Q = 1.2 \cdot 10^3$ Дж $A = 600$ Дж	Розв'язок: I закон термодинаміки для цього випадку має вигляд $Q = \Delta U + A.$ Зміна внутрішньої енергії одноатомного газу $\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T.$
<hr/> $\Delta T - ?$	

Отримуємо:

$$Q = \frac{3}{2} \nu R \Delta T + A.$$

$$\Delta T = (Q - A) \cdot \frac{2}{3 \nu R}.$$

$$\{\Delta T\} = \text{Дж} \cdot \text{моль} \cdot \text{K} / \text{моль} \cdot \text{Дж} = \text{K}.$$

$$\{\Delta T\} = (1200 - 600) \cdot 2 / 3 \cdot 2 \cdot 8.31 = 24.$$

Відповідь: збільшилась на 24 K.

Задача 3.2. Знайти діаметр молекули кисню, якщо відомо, що коефіцієнт внутрішнього тертя кисню при 0°C дорівнює $\eta = 18.8 \cdot 10^{-6} \text{H} \cdot \text{c} / \text{m}^2$.

Дано: $\eta = 18.8 \cdot 10^{-6} \text{H} \cdot \text{c} / \text{m}^2$	Розв'язок: Коефіцієнт внутрішнього тертя визначається за формулою $\eta = \frac{1}{3} \cdot \vec{v} \cdot \vec{\lambda} \cdot \rho$
<hr/> $d - ?$	

Враховувавши, що:

$$\vec{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad \vec{\lambda} = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2\pi d^2 p}}, \quad \rho = \frac{p \cdot \mu}{R \cdot T}.$$

Знаходимо

$$d^2 = \frac{2 \cdot k}{3 \cdot \pi \cdot \eta} \cdot \sqrt{\frac{\mu \Gamma}{RT}} = 9 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2.$$

$$d = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Відповідь: $d = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Задача 3.3. Парціальний тиск пари хлороформу в альвеолярному повітрі складає 0.4% від нормального атмосферного тиску. Знайти густину пари хлороформу. Температура альвеолярного газу $t = 37^\circ\text{C}$.

Дано:

$$p_{\text{парі}} = 0.4\% \quad p_{\text{атм}} =$$
$$0.4\% \cdot 1.01 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$$
$$t = 37^\circ\text{C} = 310\text{K}$$

$$\rho = ?$$

Розв'язок:

Виходячи з рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T,$$

де p – тиск газу, V – його об'єм, m – маса газу, M – його молярна маса, T – температура, знаходимо:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}.$$

Підставляючи числові значення і враховуючи, що молярна маса хлороформу (CHCl_3) рівна $119 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$, отримуємо:

$$\rho = \frac{4}{1000} \cdot 1.01 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot 119 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 18.6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$
$$8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 310\text{K}$$

Відповідь: $\rho = 8.6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Задача 3.4. Знайти кількість n_0 молекул водню в 1см^2 , якщо тиск $p = 200$ ммрт. ст., а середня квадратична швидкість молекул при даних умовах становить $v_{\text{кв}} = 2400\text{м/с}$.

Розв'язок:

Дано:
 $p = 200$ ммрт. ст.
 $v_{\text{КВ}} = 2400$ м/с

$n_0 - ?$

Відповідно до основного рівняння кінетичної теорії

$$p = \frac{1}{3} \cdot n_0 \cdot m \cdot v_{\text{КВ}}^2,$$

де m – маса молекул водню, пов'язана з масою кіломоля водню $\mu = 2$ кг/моль і число Авогадро $N_A = 6.025 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹ співвідношенням:

$$m = \frac{\mu}{N_A}.$$

Тому

$$n_0 = \frac{3 \cdot p \cdot N_A}{\mu \cdot v_{\text{КВ}}^2} = \frac{3 \cdot 200 \cdot 133 \text{ Н/м}^2 \cdot 6.025 \cdot 10^{26} \cdot 1/\text{кмоль}}{2 \text{ кг/моль} \cdot 2400^2 \text{ м}^2/\text{с}^2} = 4.15 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3} \\ = 4.15 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}.$$

Відповідь: $n_0 = 4.15 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Контрольні питання до 3 розділу.

1. Поясніть, у чому полягає принцип розгляду організму людини як відкритої термодинамічної системи.
2. У чому полягає I закон термодинаміки біологічних систем?
3. Ентальпія. Закон Гесса.
4. Другий закон термодинаміки (формулювання Клаузіуса, формулювання Томпсона). Ентропія. Інформація і її зв'язок з ентропією.
5. Чому дорівнює загальна зміна ентропії у біологічних системах?
6. Чому дорівнює швидкість зміни ентропії біологічної системи?
7. При яких змінах ентропії в живому організмі відбуваються патологічні зміни його функціонування, а при яких – підтримання його життєдіяльності?
8. Теорема Пригожина. Критерії стійкості системи при термодинамічній рівновазі і в стаціонарному стані.



Тестові завдання до 3 розділу.

1. Питома теплоємність тіла:
А. теплоємність за сталою тиску;
Б. теплоємність за сталою об'єму;
В. відношення теплоємності тіла до його маси;
Г. відношення теплоємності тіла до кількості речовини;
Д. теплоємність за сталої температури.



2. В яких одиницях вимірюється теплоємність системи?

- А. Дж;
- Б. Дж/(кг · К);
- В. Дж/(моль · К);
- Г. Дж/(м³ · К);
- Д. Дж/К.

3. Які термодинамічні параметри називаються інтенсивними?

- А. які не залежать від маси;
- Б. які пропорційні до маси системи;
- В. які залежать від прикладеної до системи зовнішньої сили;
- Г. які залежать від кількості теплоти, наданої системі;
- Д. які обернено пропорційні до маси системи.

4. Які термодинамічні параметри називаються екстенсивними?

- А. які не залежать від маси;
- Б. які пропорційні до маси системи;
- В. які залежать від прикладеної до системи зовнішньої сили;
- Г. які залежать від кількості теплоти, наданої системі;
- Д. які обернено пропорційні до маси системи.

5. Закрита термодинамічна система не обмінюється з довкіллям:

- А. інформацією;
- Б. масою;
- В. теплотою;
- Г. ні масою, ні теплотою;
- Д. ні масою, ні теплотою, ні інформацією.

6. Адіабатна термодинамічна система не обмінюється з довкіллям:

- А. інформацією;
- Б. масою;
- В. теплотою;
- Г. ні масою, ні теплотою;

Д. ні масою, ні теплотою, ні інформацією.

7. Ізольована термодинамічна система не обмінюється з довкіллям:

- А. інформацією;
- Б. масою;
- В. теплотою;
- Г. ні масою, ні теплотою;
- Д. ні масою, ні теплотою, ні інформацією.

8. Ізотермічний процес – це зміна стану фізичної системи...

- А. за сталого тиску;
- Б. за сталого об'єму ;
- В. за сталої температури;
- Г. без теплообміну з довкіллям;
- Д. при незмінній ентропії.

9. В процесі гідролізу АТФ найбільше енергії витрачається на:

- А. роботу серця;
- Б. роботу дихальних м'язів ;
- В. підтримування фізико – хімічних градієнтів;
- Г. синтез біополімерів у клітинах;
- Д. утворення біоелектричних потенціалів.

10. Молярна теплоємність тіла:

- А. теплоємність за сталою тиску;
- Б. теплоємність за сталою об'єму;
- В. відношення теплоємності тіла до його маси;
- Г. відношення теплоємності тіла до кількості речовини;
- Д. теплоємність за сталої температури.

11. Ізохорна теплоємність тіла:

- А. теплоємність за сталого тиску;
- Б. теплоємність за сталої температури;
- В. відношення теплоємності тіла до його маси;

Г. відношення теплоємності тіла до кількості речовини;

Д. теплоємність за сталого об'єму.

12. Ізобарна теплоємність тіла:

А. теплоємність за сталого тиску;

Б. теплоємність за сталої температури;

В. відношення теплоємності тіла до його маси;

Г. відношення теплоємності тіла до кількості речовини;

Д. теплоємність за сталого об'єму.

13. Питома теплоємність тіла:

А. теплоємність за сталого тиску;

Б. теплоємність за сталої об'єму;

В. відношення теплоємності тіла до його маси;

Г. відношення теплоємності тіла до кількості речовини;

Д. теплоємність за сталої температури.

14. Молярна теплоємність тіла:

А. теплоємність за сталого тиску;

Б. теплоємність за сталої об'єму;

В. відношення теплоємності тіла до його маси;

Г. відношення теплоємності тіла до кількості речовини;

Д. теплоємність за сталої температури.

15. В яких ділянках живого організму відбувається перетворення хімічної енергії у теплову?

А. у сітківці ока;

Б. у м'язових тканинах;

В. у фоторецепторах сітківки ока;

Г. в усіх клітинах і тканинах;

Д. в органі Корті у внутрішньому вусі.

16. В яких ділянках живого організму відбувається перетворення хімічної енергії в електричну?

А. у сітківці ока;

Б. у м'язових тканинах;

В. у фоторецепторах сітківки ока;

Г. в усіх клітинах і тканинах;

Д. в органі Корті у внутрішньому вусі.

17. В яких ділянках живого організму відбувається перетворення світлової енергії в хімічну?

А. у сітківці ока;

Б. у м'язових тканинах;

В. у фоторецепторах сітківки ока;

Г. в усіх клітинах і тканинах;

Д. в органі Корті у внутрішньому вусі.

18. В яких ділянках живого організму відбувається перетворення світлової механічної енергії акустичних хвиль в електричну?

А. у сітківці ока;

Б. у м'язових тканинах;

В. у фоторецепторах сітківки ока;

Г. в усіх клітинах і тканинах;

Д. в органі Корті у внутрішньому вусі.

19. В яких ділянках живого організму відбувається перетворення всіх видів енергії в теплову?

А. у сітківці ока;

Б. у м'язових тканинах;

В. у фоторецепторах сітківки ока;

Г. в усіх клітинах і тканинах;

Д. в органі Корті у внутрішньому вусі.

20. Питома ентропія визначається відношенням ентропії S системи до її:

- А. маси;
- Б. об'єму;
- В. температури;
- Г. кількості речовини;
- Д. імпульсу.

21. Молярна ентропія визначається відношенням ентропії S системи до її:

- А. маси;
- Б. об'єму;
- В. температури;
- Г. кількості речовини;
- Д. імпульсу.

22. Питома об'ємна ентропія – величина, яка визначається відношенням ентропії S системи до її:

- А. маси;
- Б. об'єму;

- В. температури;
- Г. кількості речовини;
- Д. імпульсу.

23. В яких одиницях вимірюється теплоємність системи?

- А. Дж;
- Б. Дж/(кг*К);
- В. Дж/(моль*К);
- Г. Дж/(м²*К);
- Д. Дж/К.

24. В яких одиницях вимірюється питома ентропія?

- А. Дж;
- Б. Дж/(кг*К);
- В. Дж/К;
- Г. Дж/(м³*К);
- Д. Дж/(моль*К).

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗКУ

Задача 3.1. У результаті незворотнього процесу всередині системи ентропія зростає на $S \Delta i = 8.5$ кДж/К за час $t = 10$ с. Розрахуйте дисипативну функцію β цього процесу, якщо система підтримується при температурі $T = 300$ К.

Задача 3.2. Розрахуйте загальну зміну ентропії ΔS у відкритій системі, якщо відомо, що в результаті незворотніх процесів всередині неї виділилося $Q_i = 1240$ кДж/К тепла, 25 % якої було передано в навколишнє середовище. Температура система підтримується постійною і дорівнює 37°C.

Задача 3.3. Розрахуйте зміну стандартної вільної енергії реакції, константа рівноваги якої $K = 10$.

Задача 3.4. Парціальний тиск азоту в альвеолярному повітрі $p = 620$ мм. рт. ст. Яка середня довжина вільного пробігу і середнє число зіткнень молекул азоту в альвеолярному повітрі за температури $t = 37$ °С? Ефективний діаметр молекул кисню $d = 0.27$ нм.



ГЛАВА 4. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ БІОЛОГІЧНИХ МЕМБРАН

4.1. СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ І ФУНКЦІЇ МЕМБРАН

4.1.1. Молекулярна організація мембран

Клітина – єдина основна біологічна структура, елементарна жива система. Вона може існувати як окремий організм (бактерії, найпростіші, деякі водорості) чи у складі багатоклітинних рослин і тварин, являє собою відкриту термодинамічну систему. Формує клітину і підтримує чітко визначений внутрішньоклітинний гомеостаз плазматична, або поверхнева, мембрана. Вона вибірково регулює швидкість руху речовин у клітину та з неї за допомогою транспортних систем, до складу яких входять специфічні переносники і мембранозв'язані ферменти. Плазматична мембрана є складним ферментативним, постійно функціонуючим комплексом, що забезпечує такі прояви життєдіяльності, як дихання, імунітет, травлення, міжклітинні взаємодії, передачу збудження тощо. Вона першою зустрічає, класифікує впливи зовнішнього середовища і трансформує їхню енергію біологічного збудження.

Вчені вважають, що ідея про існування особливої перегородки, яка оточує клітину, вперше була висловлена Бернаром. Вивчаючи проникність барвників у клітину, Негілі у 1855 р. також висловив думку про те, що зовні протоплазма вкрита особливою оболонкою, яка виконує функцію бар'єра проникності. І тільки через три десятиріччя, повторюючи досліди Негілі та проводячи власні оригінальні дослідження, Пфєффер встановив, що клітина поводить себе як мініатюрний осмометр, змінюючи ступінь набухання залежно від концентрації зовнішнього розчину. На підставі своїх експериментів та ідей Бєрнара і Негілі, Пфєффер у 1890 р. сформулював поняття клітинної (плазматичної) мембрани як специфічної структури, що регулює надходження у клітину і вихід з неї різних речовин.

Результати досліджень Е. Овертона (1895–1899) показали, що в клітину швидше проникають ті речовини, які краще розчиняються у жирах. Виходячи з цього, а також з пфєфферівського визначення поверхневої мембрани як бар'єра проникності, Е. Овертон у 1902 р. висловив припущення, що мембрана повністю або частково побудована з ліпідів.

У 1904 р. Е. Овертон висунув гіпотезу, що електричний заряд мембран зумовлений відмінністю концентрації натрію і калію з різних сторін мембрани нервової клітини. Майже через півстоліття ця гіпотеза була підтверджена дослідями А. Ходжкіна і А. Хакслі.

У 1925 р. Гєртер і Грендаль екстрагували ліпіди з еритроцитів і порівнювали площу моношару цих ліпідів з площею клітин. Автори встановили, що площа моношару екстрагованих ліпідів достатня щоб вкрити еритроцит двічі. Крім цього, вони, мабуть вперше висловили думку про те, що такий подвійний шар ліпідів певним чином зв'язаний з білками.

У 1925 р. вийшла робота Фріке, в якій не тільки повністю підтримувалася ідея існування мембрани, а й було виміряно її товщину. Фріке встановив, що ємність мембран еритроцитів становить $0.85 = \text{мкФ/см}^2$, що відповідає

товщині діелектрика в 3,3 нм. Таким діелектриком на поверхні клітини може бути лише подвійний шар ліпідів.

Завершенням цього етапу досліджень стали роботи Даніелі і Давсона (1935). Автори встановили, що поверхневий натяг краплі ліпідів на межі поділу ліпід-вода набагато перевищував поверхневий натяг на межі поділу ліпід-цитоплазма. Даніелі і Давсон припустили, що зниження поверхневого натягу може бути зумовлене речовинами протоплазми, передусім білками. Ці дані, з урахуванням попередніх робіт, дали змогу вченим висловити гіпотезу про будову біологічних мембран. За цією гіпотезою, плазматична мембрана складається з подвійного ліпідного шару, вкритого з внутрішнього і зовнішнього боків моношарами білків.

Припущення про існування на поверхні клітин плазматичної мембрани ґрунтувалися не тільки на підставі даних проникнення у клітину різних речовин, а й на основі електричного опору і ємності, що притаманні поверхневим шарам клітин. Проте фактичні докази існування мембрани було добуто після широкого впровадження у біологію методів електронної мікроскопії. Тоді вдалося «побачити» мембрану, про існування якої біологи здогадувалися. З 1955 р. почали виявляти внутрішньоклітинні мембрани.

На електронно-мікроскопічних фотографіях мембрана має вигляд плівки до 10 нм завтовшки, яка складається з трьох шарів: одного (середнього) світлого і двох темних, що прилягають до першого. Плазматична мембрана асиметрична: з внутрішнього цитоплазматичного боку електронно-щільний шар товстіший і темніший, ніж ззовні.

Отже, мембрани є місцем відмежування вмісту клітин від зовнішнього середовища і поділу внутрішнього простору клітин на відсіки, або компартменти. Компартменталізація зіграла важливу роль як в добіологічній, так і в біологічній еволюції. Існування живого як відкритої системи неможливе без контакту із зовнішнім середовищем. Тому мембрани не тільки розмежовують, а й здійснюють регуляцію взаємозв'язків клітин і зовнішнього середовища, взаємозв'язків між окремими клітинами і компартментами клітин. Такі взаємозв'язки базуються на обміні речовиною, енергією та інформацією.

Встановлено, що біологічні мембрани – це складні надмолекулярні структури, побудовані з ліпідів, білків, вуглеводів і неорганічних іонів. До складу мембран входить і вода.

Між молекулами ліпідів, білків і води існує декілька типів взаємодій, які і визначають структуру біологічних мембран. Щоб зрозуміти, як формуються мембрани і які їхні властивості, треба знати склад і будову молекул, які утворюють мембрани.

За хімічною природою мембранні ліпіди можна віднести до трьох класів: фосфоліпіди, гліколіпіди і нейтральні ліпіди. В середньому ліпіди становлять близько 40 % сухої маси біологічних мембран, з яких 80 % складають фосфоліпіди.

До складу ліпідів входять жирні кислоти, спирти, альдегіди, азотисті основи, вуглеводи, фосфорна кислота тощо. Ці компоненти ліпідів зв'язуються ефірними, амідними, фосфодіефірними та іншими типами зв'язків.

Жирні кислоти – один з основних компонентів ліпідів мембран; вони певною мірою зумовлюють хімічні властивості ліпідів, взаємодію між молекулами ліпідів і білків, що в кінцевому результаті визначає структурні особливості самих мембран і їхню ферментативну активність. Жирні кислоти, що входять до складу ліпідів мембран вищих організмів, мають ряд спільних ознак. Майже всі вони мають парне число атомів вуглецю (від 14 до 22, найчастіше 16 або 18). Вміст ненасичених жирних кислот, як правило, вищий, ніж насичених.

Вуглеводневі ланцюги жирних кислот зумовлюють гідрофобні властивості мембранних ліпідів. Проте якби ліпіди характеризувались тільки гідрофобними властивостями, вони були б не здатні до утворення мембранних структур. Молекули мембранних ліпідів характеризуються і різною мірою вираженою гідрофільністю. Гідрофільні властивості ліпідних молекул зумовлюються полярними головками, які можуть мати різну хімічну будову. В молекулах фосфоліпідів полярні головки утворені похідними фосфорної кислоти, а в молекулах гліколіпідів – похідними цукрів.

Хімічні властивості мембранних білків вивчено значно гірше, ніж ліпідів. Це пов'язано з тим, що мембранні білки нерозчинні у воді і погано розчинні в органічних розчинниках. Оскільки білки в мембрані перебувають у контакті з ліпідами, дуже складно встановити, чи справді білки в мембрані існують у такому стані, в якому їх виділяють. За допомогою оптичних методів методів дослідження було встановлено, що в мембранах поряд з глобулярними білками існують і фібрилярні білки, що мають α -та β -конфігурацію.

Мембранні білки за функцією поділяють на три групи: структурні білки, білки-ферменти та рецепторні білки. Труднощі виділення білків у чистому вигляді, а також у можливості врахування асоціації і дисоціації поліпептидних ланцюгів у процесі виділення, ускладнюють завдання зі встановлення білків, які входять до складу мембран.

Властивості мембранних білків зумовлені амінокислотним складом, оскільки тільки через амінокислоти реалізується зв'язок білків з іншими компонентами мембран. Якщо на поверхні молекули білка більше гідрофільних груп, то реалізуватимуться зв'язки з водою, що може привести до витягування молекул білка. Коли ж на поверхні молекули переважають гідрофобні групи, більшою мірою відбуватиметься гідрофобна взаємодія білкових і ліпідних молекул, що має значення в утворенні білково-ліпідних комплексів мембран.

Серед вуглеводів, що входять до складу мембран тваринних клітин, найчастіше зустрічаються полісахариди. Встановлено, що мукополісахариди зв'язані з ліпідами мембран і певною мірою відповідальні за антигенність клітин.

Крім того, полісахаридам приписують також важливу роль у процесах адгезії клітин. Експериментально показано, що поверхня клітин вкрита тонким клейким шаром. Він складається в основному з білків і полісахаридів. Оскільки клітинна поверхня рухлива, мембрана весь час деформується. Ці рухи змінюють розміщення макромолекул або поліпептидних ланцюгів, що й зумовлює зміну здатності клітинної поверхні до адгезії.

Встановлено, що за хімічним складом поверхня плазматичної мембрани тваринних клітин має щонайменше три основних компоненти: вуглеводні компоненти гліколіпідів, глікопротеїнів, кислі мукополісахариди.

Кислі мукополісахариди дуже гідратовані і мають желеподібну форму, ці липкі або слизькі речовини є міжклітинним "мастилом" і одночасно лабільним цементуючим матеріалом.

4.1.2. Основні види взаємодій, які формують мембрани. Моделі мембран

Виходячи з хімічного складу та асиметричної локалізації компонентів мембран можна сказати, що всі вони формують надмолекулярний мембранний комплекс за рахунок взаємодії і, передусім, за рахунок двох найважливіших типів нековалентних взаємодій: гідрофобних і гідрофільних. Гідрофобні взаємодії є результатом відштовхування води ліпофільними групами молекул. Оскільки молекули води мають більшу спорідненість до інших молекул води або полярних груп, то поблизу гідрофобних ділянок молекул збільшується квазікристалічний порядок у структурі води. В разі відштовхування гідрофобних груп з водного оточення відбувається зменшення впорядкованості молекул води. Окрім гідрофобних і гідрофільних взаємодій важливу роль у структурі мембран відіграють іонні взаємодії і зв'язки через двовалентні іони, а також водневі зв'язки. Іонні зв'язки існують між молекулами, які мають протилежні електричні заряди, наприклад, між фосфатидилсерином і основними білками. Двовалентні катіони, насамперед іони кальцію, можуть зв'язувати або дві молекули фосfolіпідів, або молекулу білка з молекулою фосfolіпиду.

Водневі зв'язки також можуть відігравати важливу роль у білково-ліпідних взаємодіях в мембранах, оскільки багато груп мембранних білків і ліпідів можуть бути донорами або акцепторами водню.

Застосування термодинамічного принципу мінімуму вільної енергії до моделей структури біологічних мембран вимагає виконання двох умов:

- білки і ліпіди мають бути розміщені в мембранах таким чином, щоб максимально можливе число полярних груп перебувало в контакті з водою і іншими полярними групами;
- неполярні вуглеводневі ланцюги ліпідів і амінокислотних залишків мають розміщуватися так, щоб якнайменше контактувати з водою.

Гортер і Грендель перші припустили, що в основі структури мембрани лежить бімолекулярний шар ліпідів. В 1935 р. Даніелі і Даусон запропонували модель мембрани, яка протягом кількох десятиріч була основною в розумінні структури біологічних мембран. Згідно з моделлю Даніелі – Даусона, серцевина мембрани, її внутрішня частина, складається з двох ліпідних моношарів, молекули яких розміщені паралельно одна одній і орієнтовані так, що неполярні "хвости" обох шарів спрямовані один до одного. Полярні кінці ліпідів спрямовані назовні по обидва боки мембрани. З обох боків такий бімолекулярний шар ліпідів покритий білками, які зв'язані з полярними кінцями ліпідів завдяки електростатичним силам і захищають ліпіди від безпосереднього контакту з водою. Подвійний шар ліпідів, згідно з цією моделлю, є основним енергетичним

бар'єром для проникнення гідрофільних речовин. З огляду на це модель було модифіковано (Стейн, Даніелі, 1956) припущенням про існування в структурі мембран полярних пор. Припускалось, що пори утворюються білками, які сполучають обидві поверхні мембран і зв'язані з ланцюгами ліпідів гідрофобними взаємодіями. Згідно з моделлю, кількість білків, що проникають крізь подвійний шар ліпідів, обмежена.

Останнім часом досить перспективною вважається "рідинно-мозаїчна" модель, схема якої показана на рисунку 4.1.

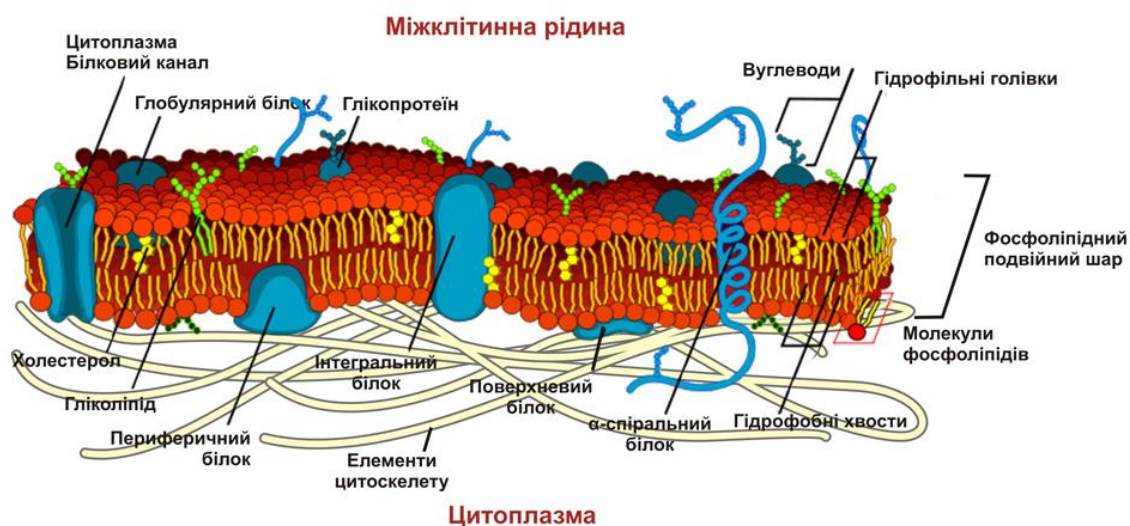


Рис 4.1. "Рідинно-мозаїчна" модель будови мембрани.

Згідно з цією моделлю, основу (матрицю) мембрани становить подвійний ліпідний шар. Для розуміння ролі білків в структурі мембрани останні поділяються на дві групи: периферійні та інтегральні білки. Периферійними вважаються білки, слабо зв'язані з ліпідами (електростатичні сили), які можуть легко виділятися з мембрани при збільшенні іонної сили розчину, або під дією хелатуючих агентів. Вони становлять близько 30% всіх мембранних білків. Інтегральні білки досить міцно зв'язані з ліпідами і часто виділяються з мембрани (під впливом органічних розчинників, детергентів, денатуруючих агентів тощо) разом з ліпідами. Ці білки в чистому вигляді малорозчинні в нейтральних водних і буферних розчинах, мають аліфатичну природу і входять до складу гліко- або ліпопротеїнів. Глобули гліко- і ліпопротеїнів занурені в ліпідні шари, деякі з них мають трансмембранну локалізацію. Чергування ділянок білків та ліпідів і дає "мозаїчну" картину мембрани. Більша частина фосфоліпідів представлена переривчастим біомолекулярним шаром, полярні групи яких перебувають у контакті з водою або з білками. Полярні групи амінокислот білків, глікопротеїнів і гліколіпідів також знаходяться на поверхні мембрани. Взагалі ця модель передбачає високий рівень специфічної взаємодії між компонентами мембрани і, відповідно, забезпечує термодинамічний принцип мінімуму вільної енергії системи. Передбачається також асоціація двох або кількох субодиниць інтегральних білків з утворенням специфічних агрегатів всередині мембрани. В

таких агрегатах між білками субодиницями можуть утворюватись гідрофільні пори (канали).

Ліпіди всередині мембрани перебувають у "рідкому" стані, що забезпечує їх значну рухливість. У свою чергу, ця якість зумовлює динамічність мембрани. Товщина мембрани за "рідинно-мозаїчною" моделлю варіює від товщини білкової ділянки до товщини ліпідного бімолекулярного шару.

Основним структурним елементом мембран є фосфоліпіди, які визначають непроникність мембран для іонів, а отже їх осмотичні і електричні властивості. Обмін клітини речовиною з навколишнім середовищем здійснюють транспортні білки мембран (канали, переносники, насоси).

4.2. ТРАНСПОРТ РЕЧОВИН ЧЕРЕЗ МЕМБРАНИ

4.2.1. Пасивний транспорт речовин через мембрани

Розрізняють активний і пасивний транспорт нейтральних молекул та іонів через біомембрани. Пасивний транспорт не пов'язаний з використанням хімічної енергії клітини: він здійснюється в результаті дифузії речовин в сторону меншого електрхімічного потенціалу і перебігає самовільно.

Прийнято розрізняти наступні види пасивного транспорту речовин через мембрани: 1) дифузія нейтральних молекул; 2) осмос; 3) фільтрація; 4) дифузія іонів; 5) дифузії через канали (пори); 6) дифузія з допомогою молекул-переносників за рахунок: а) дифузії переносника разом з речовиною в мембрані (рухомий переносник); б) естафетної передачі речовини від однієї молекули-переносника до іншої. Дифузії за механізмами 5 і 6 називають полегшеною.

Поряд з пасивним транспортом в мембранах клітин відбувається перенос іонів та молекул в сторону більшого електрхімічного потенціалу. Цей процес, не є дифузією і відбувається за рахунок енергії гідролізу АТФ в результаті роботи спеціальних ферментів, які називаються транспортними АТФ-азами – активний транспорт.

Розглянемо механізми пасивного транспорту речовин через біомембрани.

Густина потоку речовини при пасивному транспорті підлягає рівнянню Теорелла:

$$I = -uC \frac{d\tilde{\mu}}{dx}, \quad (4.1)$$

де u – рухливість частинок; C – концентрація.

Електрхімічний потенціал μ – величина, що чисельно дорівнює енергії Гіббса одного моля розчиненої речовини, яка знаходиться в електричному полі:

$$\mu = \mu_0 + zF\varphi + RT \ln C_i, \quad (4.2)$$

де $F = 96500$ Кл/моль – число Фарадея, R – універсальна газова стала, T – температура, φ – потенціал електричного поля; Z – заряд іона електроліту, μ_0 – хімічний потенціал.

Знак в (4.1) показує, що перенос речовини зв'язаний із зменшенням μ в бік від більшого електрохімічного потенціалу до меншого. Для неелектролітів ($z = 0$) у відсутності електричного поля ($\varphi = 0$) рівняння (4.1) переходить у рівняння Фіка:

$$I = -uRT \frac{dc}{dx}, \quad (4.3)$$

або

$$I = -D \frac{dc}{dx}. \quad (4.4)$$

Рівняння Фіка описує один із найпоширеніших механізмів пасивного транспорту – дифузію.

Дифузія – це процес самостійного повільного проникнення речовини з області з більшою концентрацією в область з меншою концентрацією внаслідок теплового хаотичного руху молекул. Для існування дифузії необхідний градієнт концентрації. Закон Фіка для дифузії:

$$\frac{dm}{dt} = -DS \frac{dc}{dx}, \quad (4.5)$$

де $\frac{dm}{dt}$ – швидкість дифузії, це кількість речовини, яка дифундує за одиницю часу через площину S , D – коефіцієнт дифузії. Він чисельно дорівнює швидкості дифузії через одиничну площу при одиничному градієнті концентрації $[D] = \text{м}^2/\text{с}$, залежить від природи і температури речовини, яка дифундує.

Дифузія речовин через ліпідний бішар мембрани викликається градієнтом концентрації в мембрані. Тоді

$$\frac{dc}{dx} = \frac{C_1^M - C_2^M}{l}, \quad (4.6)$$

де l – товщина мембрани C_1^M і C_2^M – концентрація речовини біля зовнішньої і внутрішньої сторони мембрани, відповідно.

Оскільки виміряти C^M неможливо, оцінюють C^M за концентрацією цієї речовини в розчині ззовні мембрани C_1 , або зсередини її C_2 :

$$C_1^M = kC_1; \quad (4.7)$$

$$C_2^M = kC_2, \quad (4.8)$$

де k – коефіцієнт розподілу, показує, яку частину концентрація всередині складає від концентрації ззовні. Тоді рівняння Фіка буде:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{D \cdot k \cdot S}{l} \cdot (C_1 - C_2). \quad (4.9)$$

Ввівши $P = \frac{D \cdot k}{l}$ – коефіцієнт проникності мембрани, отримаємо рівняння Коллендера–Берлунда:

$$\frac{dm}{dt} = -PS(C_1 - C_2). \quad (4.10)$$

Проникність мембрани більша при меншій в'язкості мембрани (більшому D), при меншій товщині (меншій l), при кращій розчинності речовини в ліпідній фазі (більшому k). Добре розчиняються в ліпідах органічні жирні кислоти, ефіри; погано розчиняються і проникають через мембрану водорозчинні речовини: солі, основи, цукри, амінокислоти, спирти. Але дослід показує, що молекули води – полярної речовини, яка не розчиняється в ліпідах – добре проникають через мембрани.

Дифузія молекул води через напівпроникну мембрану з області меншої концентрації розчиненої речовини в область більшої її концентрації називається осмосом.

Сила, яка викликає рух молекул розчинника (води), називається осмотичним тиском.

За законом Вант-Гоффа:

$$P = iCRT \quad (4.11)$$

де i – ізотопічний коефіцієнт, який показує, у скільки разів збільшується кількість розчинених часток при дисоціації молекул в електролітах; для неелектролітів $i = 1$;

C – концентрація розчиненої речовини; R – газова стала;

T – абсолютна температура розчину.

Рівняння осмосу аналогічне рівнянню (4.10):

$$\frac{dm_B}{dt} = -kS(p_1 - p_2), \quad (4.12)$$

де $\frac{dm_B}{dt}$ – швидкість переносу води через площу S ; p_1 і p_2 – осмотичні тиски розчинів по обидва боки мембрани; k – коефіцієнт проникності.

Осмоз відіграє значну роль в біологічних явищах. Наприклад, осмос зумовлює гемоліз еритроцитів у гіпотонічних розчинах. Вода доти проникає всередину клітини, доки гідростатичний тиск всередині клітини не зрівноважить осмотичний тиск. Внаслідок цього клітина набрякає, а мембрана розтягується.

Дія деяких послаблюючих медикаментозних препаратів ґрунтується на осмосі води в ділянку підвищеної концентрації цього препарату в шлунку.

Рух молекул води через пори у мембрані під дією градієнта статичного тиску називається фільтрацією. Швидкість фільтрації підлягає закону Пуазейля:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi R^4 (p_1 - p_2)}{8\eta l}, \quad (4.13)$$

де V – об'єм фільтрованої води; t – час; R – радіус; l – її довжина; η – коефіцієнт в'язкості води; $p_1 - p_2$ перепад тиску на кінцях пори.

В артеріальних ділянках кровоносної системи вода із плазми крові у результаті фільтрації під дією кров'яного тиску виходить із кров'яного русла в лімфу і сполучну тканину, а на венозних ділянках поступає у плазму.

При гіпертонії виведення води із судин під дією підвищеного тиску крові починає перевищувати приплив води всередину судин і розвивається набряк тканин.

Фільтрація плазми крові в ниркових нефронах приводить до утворення первинної сечі.

На мембрані існує різниця потенціалів, так звані біологічні потенціали, а в самій мембрані – електричне поле.

В загальному випадку перерос іонів через мембрану визначається двома факторами: нерівномірністю їх розпаду і дією електричного поля мембрани, тобто наявністю двох градієнтів – концентраційного $\frac{dc}{dx}$ і електричного $\frac{d\varphi}{dx}$.

Підставимо (4.2) в (4.1) і отримаємо рівняння Ернста–Планка:

$$I = -uRT \frac{dc}{dx} = u cz F \frac{d\varphi}{dx}. \quad (4.14)$$

Іншу формулу рівняння Нернста–Планка можна одержати, якщо згадати співвідношення між коефіцієнтом дифузії D і абсолютною температурою: $D = u \cdot R \cdot T$.

Оскільки електричне поле в мембрані можна вважати постійним $\frac{d\varphi}{dx} = \frac{\varphi_m}{l}$, де φ_m – різниця потенціалів на мембрані, l – її товщина, то:

$$I = -D \left(\frac{dc}{dx} + \frac{czF\varphi_m}{RTl} \right). \quad (4.15)$$

Позначимо $\frac{zF\varphi_m}{RT} = \psi$. Шляхом математичних перетворень, які ми тут не приводимо, можна рівнянню (4.15) надати вигляду:

$$I = P\psi \frac{C_i - e^{-\psi} C_e}{e^{-\psi} - 1}, \quad (4.16)$$

де C_i, C_e – концентрації іонів всередині і ззовні клітини, P – проникність мембрани для даного іона.

Взаємодія мембранних структур з іоном буває різною, якщо пара в мембрані та іон одного заряду, то вони відштовхуються, а якщо різнойменного, то іон притягується в центр пори, потрапляє в потенціальну яму і перешкоджає пересуванню інших іонів.

Вибіркова проникність мембрани залежить від того, яка густина фіксованих зарядів одного знаку в порі. Якщо вона велика, то добре проникають іони протилежного знаку і погано – однойменні.

Іони H^+ і OH^- в клітину практично не проникають, оскільки вони адсорбуються поверхнею мембрани, заряджають її і відштовхують інші іони. Проникнення іонів з розчинів підлягає правилу: чим вищий ступінь дисоціації, тим менша проникність іонів. Однобічна проникність електролітів та їх нагромадження в клітині зумовлені різницею між вмістом клітини і зовнішнім середовищем.

4.2.2. Активний транспорт речовин

Механізми активного транспорту іонів локалізовані в мембрані, оскільки перенесення іонів можна спостерігати на препаратах, в яких немає аксоплазми, але зберігається неушкодженою мембрана. Безсумнівно, що в транспорті іонів беруть участь компоненти мембрани і насамперед фермент $Na^+, K^+ -$ АТФ-аза є основною структурою транспортного механізму, який дістав назву натрій-калієвої помпи і здійснює нагромадження в клітині калію і виведення з клітини натрію.

$Na^+, K^+,$ АТФ-аза – це великий мембранний комплекс з складною структурою. Її молекула складається з двох субодиниць – великої, α – ліпопротеїда і меншої, β – глікопротеїда.

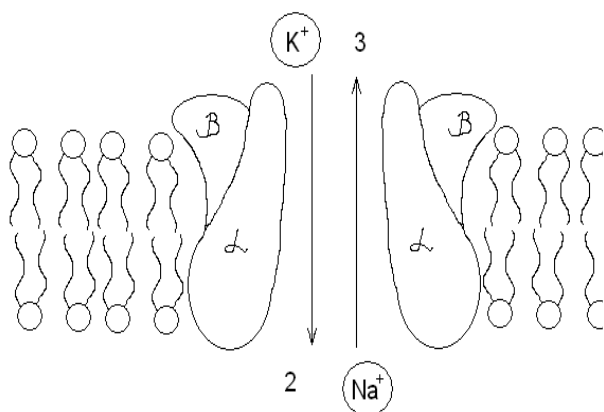


Рис. 4.2. Молекула мембранного комплексу

центр молекули, відповідальний за гідроліз АТФ, повернутий всередину клітини і локалізований на α – поліпептидові (рис. 4.2.).

Основні етапи роботи $Na^+ - K^+ -$ АТФ-ази показані на рис. 4.3.

α – поліпептид виявляє каталітичну активність і може фосфоризуватися в присутності АТФ.

β – глікопротеїд не здатний каталізувати гідроліз АТФ, але виявляє Na^+ -специфічну іонофоретичну активність. Являючись інтегральним мембранним білком $Na^+, K^+ -$ АТФ-аза пронизує мембрану наскрізь і тому частини молекули виступають як в середину клітини (α – одиниця), так і за межі клітини (β – одиниця.) Активний

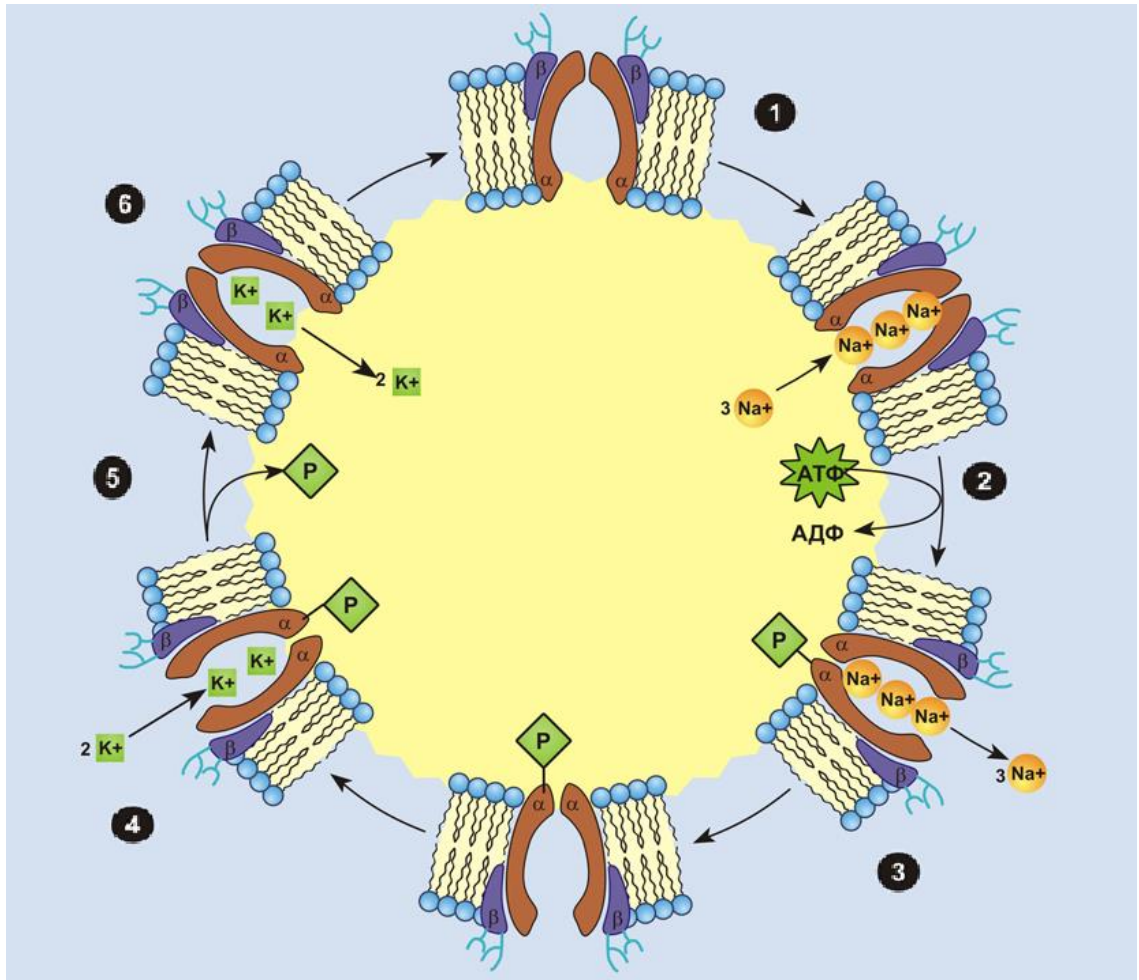


Рис. 4.3. Схематична модель роботи натрій-калієвого насосу:

- 1 – три катіони натрію заходять до насосу;
- 2 – фосфорилування за участю АТФ змінює конформацію насосу;
- 3 – натрій виводиться з клітини у міжклітинний простір, насос відкритий назовні;
- 4 – два катіони калію входять з міжклітинного простору до насосу;
- 5 – дефосфорилування насосу спричиняє зворотню зміну його конформації;
- 6 – два катіони калію входять до клітини.

Натрієво-калієвий насос із внутрішнього боку мембрани має центри зв'язування АТФ і натрію, а із зовнішнього – калію. Перенесення натрію і калію через мембрану здійснюється за рахунок зміни конфігурації білкової молекули. При цьому насос діє як фермент АТФ-гідролаза, енергія, що виділяється під час гідролізу АТФ, витрачається на перенесення йонів через мембрану проти градієнта концентрації.

Перенесення $2K^+$ всередину клітини і вихід $3Na^+$ назовні приводить в підсумку до переносу одного позитивного заряду із цитоплазми в навколишнє середовище, а це сприяє появі мембранного потенціалу (зі знаком «мінус») всередині клітини. Безпосереднім джерелом енергії такого процесу є енергія, яка акумульована в макроергічних зв'язках молекул АТФ, величина якої сягає 45 кДж/моль.

На кінетику натрієвого насоса можуть впливати зовнішні чинники. Так, під дією ціаністого калію натрій перестає відкачуватися з клітини, його концентрація всередині нервових клітин і волокон зростатиме, що може привести до загибелі живої істоти.

Хоча конкретні механізми активного транспорту іонів кальцію, амінокислот, нуклеотидів ще точно невідомі, запропоновано багато гіпотез, які пояснюють його. Частина гіпотез ґрунтується на уявленнях про участь в транспорті спеціальних переносників.

Згідно з однією з таких гіпотез Na^+ переноситься з переносником Y . На зовнішній поверхні мембрани переносник Y спонтанно перетворюється в переносник X , здатний зв'язувати тут іони K^+ . Калій переноситься на внутрішню поверхню мембрани, вивільняється тут, а переносник X перетворюється в переносник Y . На це перетворення витрачається енергія метаболізму (31 ÷ 36 кДж/моль.).

Сучасні уявлення про механізм дії натрій-калієвої помпи будуються на уявленнях про те, що білки які її утворюють можуть знаходитися в двох різних конформаційних станах. В першій конформації білок зв'язує три іони Na^+ тобто виступає в ролі переносника Y в другій – два іони K^+ , що відповідає переноснику X . Не слід думати, що в клітині все відбувається саме так. Ця схема одна із спроб наочно подати роботу натрій-калієвої помпи. Ще не встановлено точно природу носіїв проте висловлюються припущення, що комплекс АТФ-фаза може виконувати функції справжнього носія. Є підстави вважати, що з активним перенесенням може бути пов'язаний транспорт інших речовин. Цей підхід висувають на противагу, традиційному, згідно з яким, скільки речовин транспортується, стільки є транспортних механізмів.

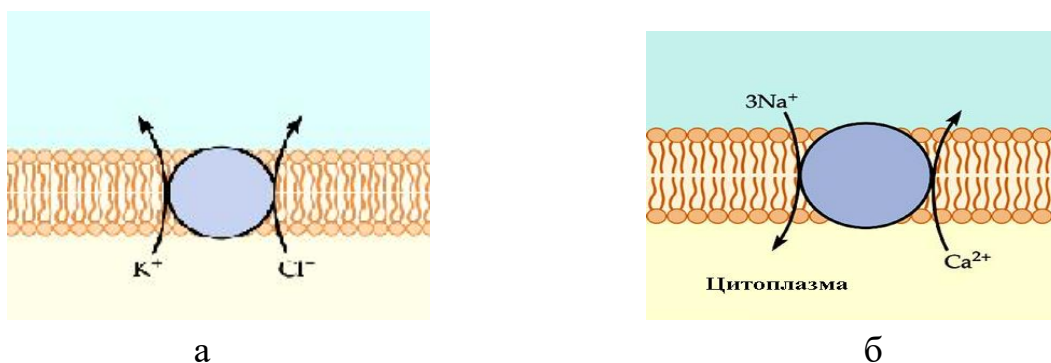


Рис. 4.5. Транспорт частинок: а – симпорт, б – антипорт.

Транспорт двох частинок в одному напрямі називають симпортом, а в протилежному напрямку – антипортом (рис 4.5).

Симпорт – це активне перенесення речовини через мембрану, що здійснюється за рахунок енергії градієнта концентрації іншої речовини. Транспортна АТР-аза в даному випадку має центри зв'язування для двох речовин. Антипорт – це перенесення речовини проти градієнта своєї концентрації. При цьому інша речовина переміщається в протилежному напрямку по градієнту своєї концентрації. Симпорт і антипорт можуть відбуватися при всмоктуванні амінокислот із кишечника і реабсорбції глюкози із первинної сечі. При цьому використовується енергія градієнта концентрації іонів Na^+ , який створений Na^+ , K^+ -АТР-азою.

4.3. МЕМБРАННІ ПОТЕНЦІАЛИ СПОКОЮ І ДІЇ

4.3.1. Дифузійні і мембранні потенціали. Потенціал Нернста

У нормально функціонуючій клітині, яка перебуває в стані спокою, завжди існує різниця потенціалів між цитоплазмою і наколишнім середовищем, яке називається потенціалом спокою. Виникнення потенціалу спокою пов'язано з нерівністю концентрації іонів всередині клітини і в навколишньому середовищі та неоднаковою проникністю мембран для різних іонів. Мембранний потенціал є тим запасом потенціальної електричної енергії, яка використовується для генерації електричних імпульсів, що забезпечують зв'язок, регуляцію і управління в організмі і служать елементом кодування інформації.

Для розуміння і вивчення цих процесів необхідно з'ясувати механізм електрогенезу в клітинах. У протоплазмі і міжклітинному середовищі міститься у великій кількості вода, яка виконує роль розчинника і дисперсійного середовища. Звідси зрозуміло, що тканинний електрогенез відбувається в умовах розчинів. Механізм виникнення різниці потенціалів у живих тканинах зумовлений нерівномірним розподілом іонів. Типовим прикладом утворення різниці потенціалів за рахунок нерівномірного розподілу катіонів і аніонів є дифузійний потенціал.

Якщо взяти два однойменні розчини різної концентрації і привести їх у контакт, то почнеться вирівнювання концентрацій розчинів за рахунок дифузії катіонів і аніонів з місця більшої їх концентрації. Але якщо рухливість катіонів і аніонів різна, то одні з них дифундують швидше, а інші повільніше. Внаслідок цього катіони і аніони розподіляться нерівномірно по відношенню до будь-якої межі. Величину дифузійної різниці потенціалів визначають за формулою Гендерсона:

$$\Delta\varphi_{\text{диф}} = \frac{u_K - u_A}{u_K + u_A} \cdot \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_1}{C_2} \quad (4.17)$$

де u_K , u_A – рухливість катіонів і аніонів відповідно; R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура; z – валентність іонів; F – число Фарадея; C_1 , C_2 – концентрації першого і другого розчинів.

В описаних умовах дифузійна різниця потенціалів не може існувати довго, а тільки доти, доки не встановиться рівномірний розподіл іонів у всьому об'ємі, тобто поки не зрівняються концентрації розчинів. Отже, дифузійні потенціали мають перехідний характер, біологічний електрогенез не може відбуватися за принципом простої дифузії.

Якщо на шляху дифузії іонів помістити перегородку, здатну пропускати іони тільки одного знаку, то рухливість іонів, які затримуються перегородкою, дорівнюватиме 0. Внаслідок цього різниця рухливості, виявиться максимальною і по обидві зони перегородки утвориться різниця потенціалів. Якщо перегородка затримує аніони, $u_A = 0$ то з формули маємо:

$$\varphi_M^0 = \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_1}{C_2} \quad (4.18)$$

Перегородками, що здатні затримувати одні іони і пропускати інші, служать цитоплазматичні мембрани живих клітин. Потенціал φ_M^0 який виникає на біологічних мембранах, називається потенціалом Нернста.

Процес електродифузії зумовлений градієнтом електрохімічного потенціалу. При переході системи з стану 1 в стан 2 зміна хімічного потенціалу рівна:

$$\Delta\mu = \mu_2^0 - \mu_1^0 + RT \ln \frac{c_2}{c_1} + zF(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (4.19)$$

Фізичний зміст електрохімічного потенціалу полягає в тому, що його зміна рівна роботі, яку треба затратити щоб:

а) синтезувати 1 моль речовини (стан 2) з вихідних речовин (стан 1) і помістити його в розчинник (це хімічна робота – доданок $(\mu_2^0 - \mu_1^0)$);

б) сконцентрувати розчин від концентрації c_1 до c_2 (це осмотична робота доданок $-RT \ln \frac{c_2}{c_1}$);

в) подолати сили електричного відштовхування, що виникають при різниці потенціалів $(\varphi_1 - \varphi_2)$ між розчинами (це електрична робота – доданок $zF(\varphi_1 - \varphi_2)$).

Якщо клітинна мембрана проникна для якого-небудь одного іона, то на мембрані встановлюється рівноважний, так званий Нернстівський потенціал φ_M^0 , що визначається як різниця потенціалів $(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Рівноважний стан – це стан, при якому відсутні термодинамічні потоки, а параметри стану однакові і незмінні з часом в будь-якій частині системи. У цьому стані немає різниці електрохімічних потенціалів ($\Delta\mu = 0$), на іон не діє рушійна сила, внаслідок чого він проходить в обидва боки через мембрану тільки під час безладних теплових рухів. При цьому протилежно напрямлені потоки в клітину і з клітини збалансовані. Такий стан називають рівновагою пасивних потоків. У водному середовищі по обидві сторони мембрани для іона і в рівновазі $\Delta\mu = RT \ln \frac{c_2}{c_1} + zF(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$, звідки

$$\varphi_M^0 = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{RT}{zF} \ln \frac{c_1}{c_2}, \quad (4.20)$$

де $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – різниця потенціалів між внутрішньою і зовнішньою поверхнями мембрани.

Отже, потенціал Нернста визначається значеннями концентрації іонів всередині клітини C_2 зовні клітини C_1 . При рівності концентрацій $C_1 = C_2$, $\varphi_M^0 = 0$.

Для іонів калію

$$\varphi_{MK^+}^0 = -\frac{RT}{F} \ln \frac{[K^+]_B}{[K^+]_3} \quad (4.21)$$

Наведемо значення потенціалу Нернста для іонів Na^+ , K^+ , і Cl в мВ.

Таблиця 4.1. Значення потенціалу Нернста

	K^+	Na^+	Cl	Спокою
Аксон кальмара	-90	+46	- 29	-60
М'язове волокно жаби	-98	+49	-105	-88
Мотонейрон кішки	-90	+60	-70	-70

4.3.2. Рівновага Доннана і потенціал Доннана

Наявність у клітині нездатних до дифузії через мембрану великих органічних аніонів створює передумови для виникнення рівноваги Доннана, яка є одним з можливих фізико-хімічних механізмів, що підтримують нерівномірний розподіл іонів між цитоплазмою і міжклітинним середовищем.

Розглянемо, як виникає така рівновага у простій фізико-хімічній системі, яка поряд з іонами калію і хлору містить нездатні до дифузії через мембрану великі аніони. У вихідному стані (1) відсік містить здатні до дифузії через мембрану іони K^+ і Cl в концентрації C_1 . Відсік (2) містить великі аніони P і K^+ у концентрації C_2 .

Оскільки мембрана проникна для хлору, розпочинається його дифузія з відсіку (1) у відсік (2). Разом з аніонами хлору спочатку дифундуватимуть катіони калію, хоча калій рухатиметься проти зростаючого градієнта концентрації, цей процес триватиме доти, поки різниця концентрацій, що примушує дифундувати хлор, не зрівноважиться протилежно напрямленою силою з боку електричного поля. У рівноважному стані сумарного потоку не буде і електричне поле збалансує дифузію. Для цього стану можна записати

$$\varphi_M = \frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{K}^+]_1}{[\text{K}^+]_2} = \frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{Cl}^-]_2}{[\text{Cl}^-]_1}.$$

Звідси випливає рівність Доннана:

$$[\text{K}^+]_1 \cdot [\text{Cl}^-]_1 = [\text{K}^+]_2 \cdot [\text{Cl}^-]_2. \quad (4.22)$$

Якщо провести обчислення, то Доннанівський потенціал буде порядку одиниць мілівольтів (-1,4 мВ). Тому Доннанівські потенціали не можуть пояснити високі значення потенціалів спокою більшості живих клітин – мінус 60 – мінус 90 мВ в нервових і м'язових клітинах.

4.3.3. Стаціонарний потенціал Гольдмана-Ходжкіна-Катца

В 1902 році Бернштейн висунув гіпотезу, згідно з якою потенціал спокою виникає тому, що цитоплазматична мембрана проникна для іонів K^+ і на ній створюється потенціал, що описується рівнянням Нернста. Це припущення

підтвердилося на практиці для великих концентрацій, K^+ але для низьких концентрацій дані дослідів не збігаються з розрахунками.

Причина відхилення потенціалу на мембрані від потенціалу Нернста – проникність мембрани не тільки для іонів K^+ , але й для інших іонів. Ходжкін і Катц використали те, що потенціал спокою не рівноважний, а стаціонарний. Стаціонарний стан – це стан, при якому параметри стану системи не змінюються з часом, але різні в різних частинах системи, тобто в системі існують термодинамічні сили і потоки.

Основний внесок в сумарний потік зарядів практично в усіх клітинах роблять іони Na^+ , K^+ , і Cl^- . Тому

$$I = I_{Na^+} + I_{K^+} - I_{Cl^-} \quad (4.23)$$

де I – сумарна густина потоку іонів.

Дифузія іонів приведе до зміни мембранного потенціалу, який почне гальмувати перенесення іонів. Через певний час сумарний струм через мембрану припиниться і $I = 0$. При цьому система не обов'язково прийде в рівноважний стан, оскільки нульове значення сумарного потоку не означає рівності нулю всіх потоків-складників.

Отже

$$I_{Na^+} + I_{K^+} - I_{Cl^-} = 0 \quad (4.24)$$

Підставивши сюди розв'язки рівняння Нернста-Планка для кожного з іонів і $\psi = \varphi_M \frac{F}{RT}$ пригадавши, що отримаємо:

$$\varphi_M = \frac{R \cdot T}{F} \ln \frac{P_{Na} [Na^+]_B + P_K [K^+]_B + P_{Cl} [Cl^-]_B}{P_{Na} [Na^+]_3 + P_K [K^+]_3 + P_{Cl} [Cl^-]_3}. \quad (4.25)$$

Отримане рівняння називається рівнянням стаціонарного потенціалу, Гольдмана-Ходжкіна-Катца.

Це рівняння враховує роль коефіцієнта проникності мембрани для іонів і тому точніше описує величину мембранного потенціалу спокою.

Рівняння Нернста – це частковий випадок рівняння Гольдмана-Ходжкіна-Катца. Дійсно, якщо $P_{Na} = 0$, $P_{Cl} = 0$, а $P_K \neq 0$, то:

$$\varphi_M = \frac{RT}{F} \ln \frac{[K^+]_B}{[K^+]_3}. \quad (4.26)$$

Приклади розв'язку задач до 4 розділу

Задача 4.1. Розрахувати діелектричну проникність мембранних ліпідів, якщо товщина мембрани складає 10 нм, питома електрична ємність дорівнює $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ Ф/м}^2$.

Дано: $C/S = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ Ф/м}^2$ $d = 10 \text{ нм} = 10 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
$\varepsilon - ?$

мембрани:

Розв'язок:

Електрична ємність

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$$

Отримуємо для діелектричної проникності

$$\varepsilon = \frac{dC}{\varepsilon_0 S}$$

Обчислення:

$$\varepsilon = \frac{10 \cdot 10^{-9} \cdot 1.7 \cdot 10^{-3}}{8.85 \cdot 10^{-12}} = 1.9$$

Відповідь: діелектрична проникність мембранних ліпідів становить 1,9.

Задача 4.2. Скільки молекул фосфоліпиду знаходиться в ліпосомі, діаметр якої $d = 40 \text{ нм}$. Відомо, що площа, яку займає одна молекула фосфоліпиду, дорівнює $A = 0.6 \text{ нм}^2$. Площі внутрішнього і зовнішнього шарів приблизно однакові, густина фосфоліпідів в шарі ліпосоми однакова.

Дано: $d = 40 \text{ нм}$ $S_m = 0.6 \text{ нм}^2 = 0.6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$
$N - ?$

Розв'язок:

Оскільки

$$d_1 \approx d_2,$$

тоді

$$S_{\text{сф}} = 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 4.314 \cdot (20 \cdot 10^{-9})^2 = 5.024 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$$

$$S_{\text{пов}} = 2 \cdot S_{\text{сф}} = 2 \cdot 5.024 \cdot 10^{-15} = 10.048 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2.$$

Знаходимо

$$N = S_{\text{пов}}/S_{\text{м}} = 10.048 \cdot 10^{-15} / 0.6 \cdot 10^{-18} = 1.67 \cdot 10^4.$$

Відповідь: $1.67 \cdot 10^4$ молекул фосфоліпиду знаходиться в ліпосомі.

Задача 4.3. Потенціал спокою нерва кінцівки краба дорівнює 89 мВ. Чому дорівнює концентрація йонів калію всередині нерва, якщо зовні вона складає 12 ммоль/л. Температуру вважати рівною 20°C.

Розв'язок:

Дано:

$$[K^+]_0 = 12 \text{ ммоль/л} \\ = 12 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л} \\ \Delta\varphi = 89 \text{ мВ} = 89 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

$$T = 293 \text{ К}$$

$$R = 8.31 \text{ Дж/моль К} \\ \text{— газова стала}$$

$$F = 9.65 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль В} \\ \text{— стала Фарадея}$$

$$[K^+]_i - ?$$

Із рівняння Нернста

$$\Delta\varphi = \frac{RT}{F} = \ln \frac{[K^+]_0}{[K^+]_i}$$

знаходимо

$$[K^+]_i = \frac{[K^+]_0}{\exp\left(\frac{\Delta\varphi \cdot F}{R \cdot T}\right)}$$

Обчислення:

$$[K^+]_i = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{\exp\left(\frac{89 \cdot 10^{-3} \cdot 9.65 \cdot 10^4}{8.31 \cdot 293}\right)} \\ = 3.52 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л}$$

Відповідь: концентрація йонів калію всередині нерва становить $3.52 \cdot 10^{-4}$ моль/л.

Задача 4.4. Визначити мембранний потенціал, створений на бішаровій ліпідній мембрані йонами натрію при температурі 27°C, якщо концентрація натрію з однієї сторони мембрани дорівнює 10^{-3} моль/л, а з іншої – 10^{-4} моль/л. Зміною хімічного потенціалу нехтувати. Зміна електрохімічного потенціалу 5мВ.

Дано:
 $[Na^+]_0 = 10^{-3}$ моль/л
 $[Na^+]_i = 10^{-4}$ моль/л
 $\Delta\mu = 0$
 $\Delta\tilde{\mu} = 5 \cdot 10^{-3} B$
 $T = 300K$
 $R = 8.31$ Дж/моль K
 – газова стала
 $F = 9.65 \cdot 10^4$ Дж/моль B
 – стала Фарадея

$\Delta\varphi$ – ?

Розв'язок:

Зміна електрохімічного потенціалу при транспорті йонів через мембрану із фази A у фазу B визначається як:

$$\Delta\tilde{\mu} = \mu_B^O - \mu_A^O + RT \ln \frac{C^B}{C^A} + zF\Delta\varphi,$$

де $\Delta\varphi$ – різниця електричних потенціалів на мембрані.

Враховуючи те, що $\mu_B^O = \mu_A^O$, отримуємо:

$$\Delta\tilde{\mu} = RT \ln \frac{[Na^+]_0}{[Na^+]_i} + zF\Delta\varphi$$

звідки

$$\Delta\varphi = \frac{\left| \Delta\tilde{\mu} - RT \ln \frac{[Na^+]_0}{[Na^+]_i} \right|}{zF}.$$

Обчислення:

$$\Delta\varphi = \frac{\left| 5 \cdot 10^{-3} - 8.31 \cdot 300 \cdot \ln \frac{10^{-3}}{10^{-4}} \right|}{1 \cdot 96500} = 0.06B = 6mB.$$

Відповідь: мембранний потенціал становить 6мВ.

Контрольні питання до 4 розділу.

1. Опишіть структуру біологічної мембрани та її основні функції.
2. Чим викликана наявність потенціалу спокою на міжклітинній мембрані клітини?
3. До якого потенціалу (калієвого, кальцієвого, натрієвого) наближується потенціал спокою клітини?
4. У чому виражаються гіперполяризація та деполяризація клітинної мембрани?
5. Що таке потенціал дії, і коли він виникає на клітинній мембрані?
6. Що є необхідною умовою для виникнення потенціалу дії?
7. Які кількісні відношення між іонами калію, натрію та хлору в клітинній мембрані у стані спокою та при збудженні?
8. Які процеси в клітинній мембрані відбуваються при дії електричного струму?
9. Що таке сила осмотичного тиску на біологічні мембрани? Чому вона дорівнює?
10. Які види роботи існують у біологічних системах?



11. У чому полягає осмотична робота у біологічних системах?
12. Що таке осмотична енергія іона або молекули?
13. У чому полягає електрична робота у живому організмі?
14. Чому дорівнює робота при перенесенні зарядів крізь клітинну мембрану?

Тестові завдання до 4 розділу

1. Якою системою з точки зору термодинаміки є жива клітина:

- А. закритою;
- Б. відкритою;
- В. ізольованою;
- Г. адіабатною;
- Д. напіввідкритою.

2. Пасивний транспорт речовин відбувається в напрямі:

- А. зменшення електрохімічного градієнта;
- Б. збільшення електрохімічного градієнта;
- В. збільшення градієнта гідростатичного тиску;
- Г. збільшення градієнта температури;
- Д. збільшення градієнта швидкості молекул.

3. Ліпідна частина біологічної мембрани знаходиться у такому фізичному стані:

- А. рідкому аморфному;
- Б. твердому кристалічному;
- В. твердому аморфному;
- Г. рідкокристалічному;
- Д. газоподібному.

4. За рідинно-мозаїчною моделлю біомембрана складається із:

- А. ліпідного шару, на поверхні якого розміщені вуглеводи;
- Б. потрійного ліпідного шару, на поверхні якого розміщені інтегральні білки;
- В. ліпідного бішару, на поверхні якого розміщені інтегральні білки;
- Г. ліпідного шару, на поверхні якого розміщені периферичні білки;

Д. потрійного ліпідного шару, на поверхні якого розміщені вуглеводи.



5. В якому агрегатному стані у фізіологічних умовах знаходиться ліпідна фаза біологічних мембран:

- А. газоподібному;
- Б. рідинному;
- В. твердому;
- Г. рідиннокристалічному;
- Д. низькотемпературної плазми.

6. Залежно від природи ліпідів товщина ліпідних шарів мембрани дорівнює:

- А. 8,5 - 9,5 мм;
- Б. 6,5 - 7,5 нм;
- В. 5,6 мкм;
- Г. 4 - 9 мм;
- Д. 7,9 нм;

7. Фільтрація – це:

А. дифузія молекул фосфоліпідів поперек біологічної мембрани;

Б. переміщення, при якому ліпідні молекули обмінюються місцями, не покидаючи свій шар;

В. рух рідини крізь пори якої-небудь перегородки під дією гідростатичного тиску;

Г. зростання швидкості дифузії внаслідок дії ферментів клітинних мембран;

Д. Розклад молекули на дві або декілька частин.

8. Осмос – це

А. дифузія молекул фосфоліпідів поперек біологічної мембрани;

Б. переміщення, при якому :

В. рух рідини крізь пори якої-небудь перегородки під дією гідростатичного тиску;

Г. дифузія молекул розчинника крізь напівпроникну мембрану;

Д. перенесення води за одночасної наявності осмотичного і електричного градієнтів.

9. Деполяризацією мембрани живої клітини називають:

А. різновид полегшеної дифузії;

Б. відновлення початкового рівня різниці потенціалів;

В. підвищення різниці потенціалів між зовнішньою і внутрішньою її поверхнями;

Г. зменшення мембранного потенціалу;

Д. здатність пропускати і клітину або випускати з неї молекули речовин.

10. Потенціал дії описується рівнянням:

А. Теорелла;

Б. Фіка для мембрани;

В. Нернста;

Г. Гольдмана;

Д. електроди фузійним рівнянням Нернста-Планка.

11. Залежно від природи ліпідів товщина шарів мембрани дорівнює:

А. 8.5 - 9.5 мм;

Б. 6.5 - 7.5 нм;

В. 5 - 6 мкм;

Г. 4 - 9 мм;

Д. 7 - 9 пм.

12. При полегшеній дифузії...

А. ліпідні молекули міняються місцями, не покидаючи свій шар;

Б. молекули фосфоліпідів дифундують поперек біологічної мембрани;

В. рідина рухається крізь пори перегородок під дією гідростатичного тиску;

Г. внаслідок дії ферментів клітинних мембран швидкість дифузії зростає;

Д. молекули речовини, що дифундують, рухаються без утворення комплексів з іншими молекулами.

13. Порівняно з простою дифузією при полегшеній дифузії перенесення речовин крізь мембрану відбувається:

А. з меншою швидкістю;

Б. з більшою швидкістю;

В. з такою ж швидкістю;

Г. в протилежну сторону;

Д. з більшими енергетичними затратами.

14. Аномальний осмос – це:

А. дифузія молекул фосфоліпідів поперек біологічної мембрани;

Б. переміщення, при якому :

В. рух рідини крізь пори якої-небудь перегородки під дією гідростатичного тиску;

Г. дифузія молекул розчинника крізь напівпроникну мембрану;

Д. перенесення води за одночасної наявності осмотичного і електричного градієнтів.

15. В процесі гідролізу АТФ найбільше енергії витрачається на:

А. роботу серця;

Б. роботу дихальних м'язів ;

В. підтримування фізико – хімічних градієнтів;

Г. синтез біополімерів у клітинах;

Д. утворення біоелектричних потенціалів.

16. Питома теплоємність тіла:
 А. теплоємність за сталою тиску;
 Б. теплоємність за сталою об'єму;
 В. відношення теплоємності тіла до його маси;
 Г. відношення теплоємності тіла до кількості речовини;
 Д. теплоємність за сталої температури.
17. В яких одиницях вимірюється теплоємність системи?
 А. Дж;
 Б. Дж/(кг · К);
 В. Дж/(моль · К);
 Г. Дж/(м³ · К);
 Д. Дж/К.
18. Ізольована термодинамічна система не обмінюється з довкіллям:
 А. інформацією;
 Б. масою;
 В. теплотою;
 Г. ні масою, ні теплотою;
 Д. ні масою, ні теплотою, ні інформацією.
19. Ізотермічний процес – це зміна стану фізичної системи...
 А. за сталого тиску;
 Б. за сталого об'єму;
 В. за сталої температури;
 Г. без теплообміну з довкіллям;
 Д. при незмінній ентропії.
20. В яких ділянках живого організму відбувається перетворення всіх видів енергії в теплову?
 А. у сітківці ока;
 Б. у м'язових тканинах;
 В. у фоторецепторах сітківки ока;
 Г. в усіх клітинах і тканинах;
 Д. в органі Корті у внутрішньому вусі.
21. Питома ентропія визначається відношенням ентропії S системи до її:
 А. маси;
 Б. об'єму;
 В. температури;
 Г. кількості речовини;
 Д. імпульсу.
22. Молярна ентропія визначається відношенням ентропії S системи до її:
 А. маси;
 Б. об'єму;
 В. температури;
 Г. кількості речовини;
 Д. імпульсу.
23. Які термодинамічні параметри називаються інтенсивними?
 А. які не залежать від маси;
 Б. які пропорційні до маси системи;
 В. які залежать від прикладеної до системи зовнішньої сили;
 Г. які залежать від кількості теплоти, наданої системі;
 Д. які обернено пропорційні до маси системи.
24. Які термодинамічні параметри називаються екстенсивними?
 А. які не залежать від маси;
 Б. які пропорційні до маси системи;
 В. які залежать від прикладеної до системи зовнішньої сили;
 Г. які залежать від кількості теплоти, наданої системі;
 Д. які обернено пропорційні до маси системи.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗКУ

Задача 4.1. Внутрішньоклітинна концентрація іонів Na^+ складає $C_i = 0.015$ моль/л, зовнішньоклітинна $C_o = 0.15$ моль/л, внутрішньоклітинний потенціал дорівнює $\varphi_i = -60$ мВ відносно зовнішнього, який дорівнює нулю. Температура клітини $t = 37$ °С. Визначте осмотичну A_{osm} і електричну A_{el} роботи при перенесенні іонів натрію крізь мембрану зсередини нервової клітини.



Задача 4.2. Осмотична робота A_{osm} , яка витрачена на перенесення 3 нмоль іонів хлору з гігантського аксона кальмара, склала 8,7 мДж при температурі $t = 270$ °С. Визначте відношення концентрацій C_o/C_i ззовні і всередині клітини.

Задача 4.3. Яка різниця потенціалів існує на міжклітинній мембрані, якщо при перенесенні 10 мкмоль іонів натрію у міжклітинне середовище було виконано роботу $A_{el} = 57$ мкДж?

Задача 4.4. При перенесенні 5 нмоль іонів калію з м'язового волокна жаби в міжклітинне середовище робота, яка витрачена на переборення сил електричного відштовхування, склала $A_{el} = 42.24$ мкДж. Розрахуйте різницю потенціалів $\Delta\varphi$ на цитоплазматичній мембрані.

Задача 4.5. Розрахуйте рівноважний мембранний потенціал $\Delta\varphi$, який створюється іонами калію, якщо їх внутрішньоклітинна концентрація $C_i = 500$ ммоль/л, зовнішньоклітинна – $C_o = 10$ ммоль/л. Температура $t = 270$ °С.

Задача 4.6. Зовнішньо- і внутрішньоклітинна концентрації іонів хлора дорівнюють відповідно $C_o = 500$ ммоль/л, $C_i = 150$ ммоль/л. Потенціал спокою при цьому $\Delta\varphi = -31$ мВ. Розрахуйте температуру t клітини.

Задача 4.7. У скільки разів внутрішньоклітинна концентрація іонів калію повинна перевищувати зовнішню, щоб потенціал спокою склав $\Delta\varphi = -32$ мВ? Температура $t = 37$ °С.

Задача 4.8. Розрахуйте теоретичне значення максимуму потенціалу дії $\Delta\varphi$ при температурі $t = 37$ °С, вважаючи, що цитоплазматична мембрана нервового волокна в цих умовах є проникненою лише для іонів натрію. Зовнішньо- і внутрішньоклітинна концентрації натрію дорівнюють відповідно $C_o = 150$ ммоль/л, $C_i = 23$ ммоль/л.

ГЛАВА 5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ МЕДИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ

5.1. МЕДИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЛІКУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ

5.1.1. Основні характеристики електростатичного поля

Електричне поле, яке не змінюється у часі називається електростатичним. Електростатика вивчає взаємодію і умову рівноваги нерухомих заряджених тіл, а також їхні властивості, обумовлені електричними зарядами.

Будемо розглядати заряд q як "джерело" електричного поля, в яке на відстані r поміщений пробний заряд q' . Згідно закону Кулона: два точкових заряди взаємодіють з силою \vec{F} , пропорційною величинам зарядів q і q' , обернено пропорційна квадрату відстані між ними і направлена по лінії, що з'єднує ці заряди:

$$\vec{F} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \quad (5.1)$$

де величина ϵ_0 називається електричною постійною, а ϵ – діелектричною провідністю середовища.

Силову характеристикою електростатичного поля є величина напруженості електричного поля \vec{E} , яка дорівнює відношенню сили \vec{F} , з якою поле діє на точковий заряд q' , до величини цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \quad (5.2)$$

Напрямок вектора \vec{E} збігається з напрямком сили, що діє на позитивний заряд.

На точковий електричний заряд q , що знаходиться в електричному полі \vec{E} , діє сила $\vec{F} = q'E$.

Знайдемо повну роботу, яку здійснює поле, створене точковим зарядом q , при переміщенні пробного заряду q' з положення 1 в положення 2:

$$A = \int_1^2 F ds = \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(-\frac{1}{r}\right) \Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (5.3)$$

Електричний потенціал чисельно дорівнює роботі, яку необхідно затратити, щоб перемістити одиничний заряд із нескінченності ($r_2 \rightarrow \infty$) на відстань r_1 до точкового заряду q . В загальному випадку потенціал електричного заряду q дорівнює

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (5.4)$$

Потенціал φ – скалярна фізична величина, яка характеризує здатність поля виконувати роботу.

Геометричне місце точок електростатичного поля з однаковими потенціалами називається екіпотенціальною поверхнею (для поля на площині – екіпотенціальною лінією).

Потенціал електричного поля дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів від кожного заряду:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i \quad (5.5)$$

Електростатичне поле потенціальне, тому робота, виконана полем дорівнює зменшенню потенціальної енергії:

$$A = W_2 - W_1 = q(\varphi_2 - \varphi_1) = qU \quad (5.6)$$

де $U = \varphi_1 - \varphi_2$ – різниця потенціалів, її називають також напругою.

Різниця потенціалів між двома точками дорівнює відношенню роботи, яку виконує поле по переміщенню заряду з початкової точки в кінцеву, до величини заряду.

Напруженість електричного поля системи точкових зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей полів, утворених кожним з цих зарядів окремо:

$$E = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i \quad (5.7)$$

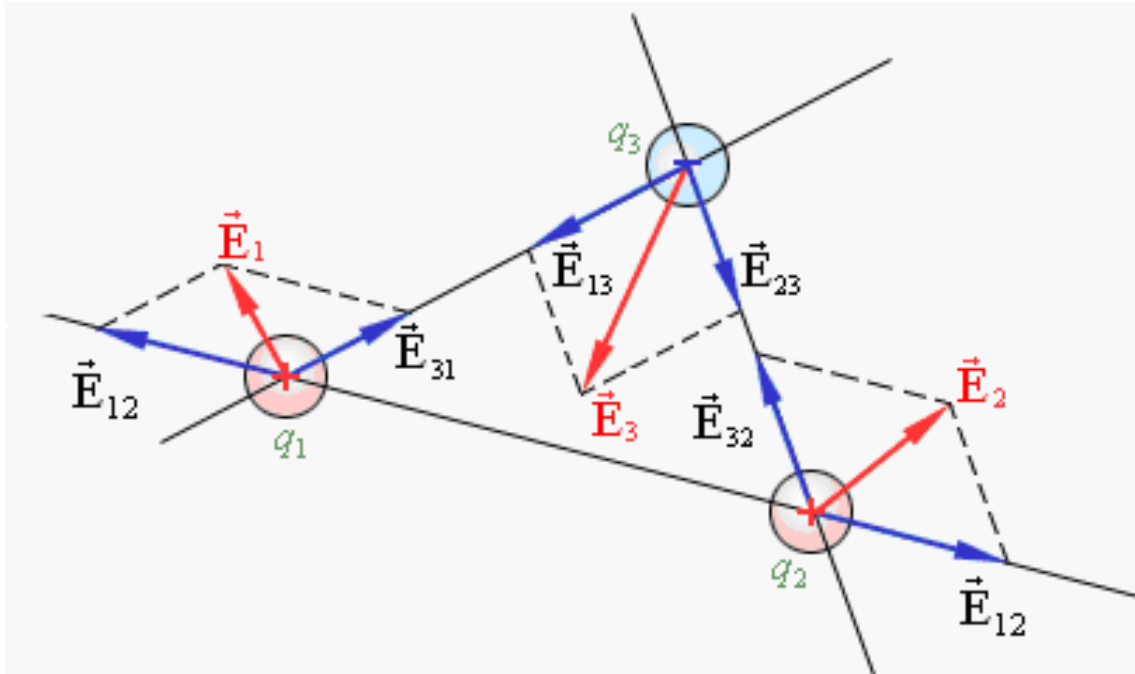


Рис. 5.1 Принцип суперпозиції електричних полів.

Цю властивість називають принципом незалежності дії електричних полів, або принципом їх суперпозиції.

Електростатичне поле графічно зображається як за допомогою силових ліній, так і екіпотенціальних поверхонь (рис.5.2. а, б.).

Метод зображення електростатичних полів за допомогою ліній напруженості (силових ліній) був запропонований М. Фарадеєм. Силowymi лініями називаються лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора напруженості поля.

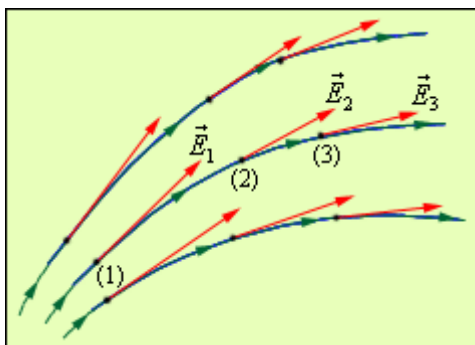


Рис. 5.2 а) Силлові лінії електричного поля.

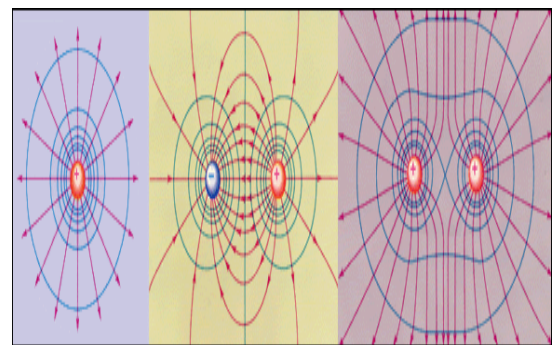


Рис. 5.2 б) Еквіпотенціальні та силлові лінії зарядів.

Прикладом екіпотенціальної поверхні є поверхня зарядженого провідника.

5.1.2. Характеристики електричного струму. Закони Ома і Джоуля Ленца в диференціальній формі

Електричним струмом називають впорядкований (напрявлений) рух електричних зарядів.

Сила струму I визначається відношенням кількості заряду dq , який переноситься через переріз провідника, до проміжку часу dt , за який цей заряд переноситься:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (5.8)$$

Якщо за будь-які однакові проміжки часу переносяться однакові кількості електричного заряду, такий струм називають постійним. Тоді

$$I = \frac{q}{t} \quad (5.9)$$

Густина струму j – величина, яка дорівнює відношенню струму dI до площі поперечного перерізу провідника dS , через який цей струм проходить.

$$j = \frac{dI}{dS} \quad (5.10)$$

У випадку постійного струму

$$j = \frac{I}{S} \quad (5.11)$$

Закон Ома в диференціальній формі:

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad (5.12)$$

густина струму пропорційна напруженості електричного поля і має однаковий з нею напрям. Тут ρ – питомий опір, σ – питома електропровідність.

Закон Ома в такому вигляді встановлює зв'язок між локальними величинами, які відносяться до даної точки провідника, тому він застосовний і до неоднорідних провідників.

Пропускання електричного струму через біологічні тканини супроводжується нагріванням. Кількість теплоти, яка при цьому виділяється

$$Q = I^2 R t. \quad (5.13)$$

Теплова потужність одиниці об'єму:

$$q = j^2 \rho = \sigma E^2 = jE \quad (5.14)$$

Отримані формули виражають закон Джоуля–Ленца в диференціальній формі.

5.1.3. Електропровідність тканин організму

Багато біологічних середовищ є електролітами. Носіями струму в електролітах є позитивно і негативно заряджені іони, які виникають в результаті електролітичної дисоціації.

Напрявлений рух іонів в електроліті буде рівномірним, якщо електростатичне поле діятиме на іони із силою F_e , яка дорівнюватиме силі тертя $F_{тр}$:

$$F_e = F_{тр}, \quad qE = r v, \quad (5.15)$$

тут r – коефіцієнт тертя, v – швидкість руху іона. Тоді

$$v = \frac{q}{r} \cdot E = bE, \quad b = \frac{v}{E} \quad (5.16)$$

де b – рухливість іонів.

Рухливість іонів b чисельно дорівнює швидкості їх впорядкованого руху в електричному полі з напруженістю $[E] = 1 \frac{B}{M}$, $[b] = 1 \frac{M^2}{B \cdot C}$.

Питома електропровідність електролітів визначається за формулою:

$$\delta = \alpha n q (b_+ + b_-), \quad (5.17)$$

тут α – коефіцієнт електролітичної дисоціації, n – концентрація іонів.

Український фізіолог В. Чаговець виходячи з теорії електролітичної дисоціації вперше (1846) запропонував фізико-хімічну теорію електричних явищ у живих тканинах. Ним був впроваджений у практику метод електрогастрографії – метод реєстрації електричних потенціалів шлунка (1935). В. Чаговець створив біоелектричну теорію нервово-м'язової провідності.

Густина струму в електроліті дорівнює:

$$j = \alpha n q (b_+ + b_-) E. \quad (5.18)$$

Тканини людського організму є провідниками другого роду (метали – першого), і мають різну електропровідність. Добре проводять струм спинномозкова рідина, лімфа, кров, м'язова тканина. Кістки, епідерміс шкіри, жирова тканина за електропровідністю ближчі до діелектриків. Явище протікання електричного струму через біологічні тканини може бути описаним законом Ома для електролітів:

$$j = \frac{Fzn}{N_A} (b_+ + b_-) \quad (5.19)$$

де j – густина електричного струму,

F – число Фарадея,

z – валентність, а n – концентрація іонів,

N_A – число Авогадро,

b_+, b_- – електрофоретична рухливість іонів,

E – напруженість електростатичного поля.

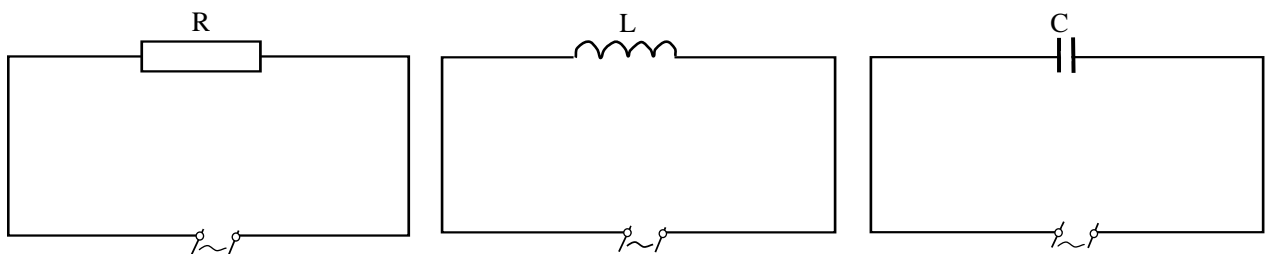
Рівняння (5.12) є виразом закону Ома в диференціальній формі.

У загальному випадку, його записують у вигляді: $j = \sigma E$, де σ – питома електропровідність середовища. Для біологічних тканин слід враховувати електричну гетерогенність ($\sigma_{\text{шкіри}} = 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$, ($\sigma_{\text{крові}} = 0.6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$) та залежність електропровідності від фізіологічного стану організму.

5.1.4. Змінний струм. Повний опір в колі змінного струму.

В широкому розумінні слова змінний струм – це будь-який струм, що змінюється з часом. Ми будемо розглядати змінний струм як вимушені електромагнітні коливання.

Розглянемо три різних кола до кожного з яких прикладена напруга



а) коло з резистором

б) коло з індуктивністю

в) коло з конденсатором

Рис. 5.3. Кола змінного струму до яких прикладена напруга.

$$U = U_{max} \cos \omega t \quad (5.20)$$

Сила струму в колі з резистором (рис.5.3а) буде змінюватися у фазі з прикладеною напругою:

$$I_R = I_{max} \cos \omega t \quad (5.21)$$

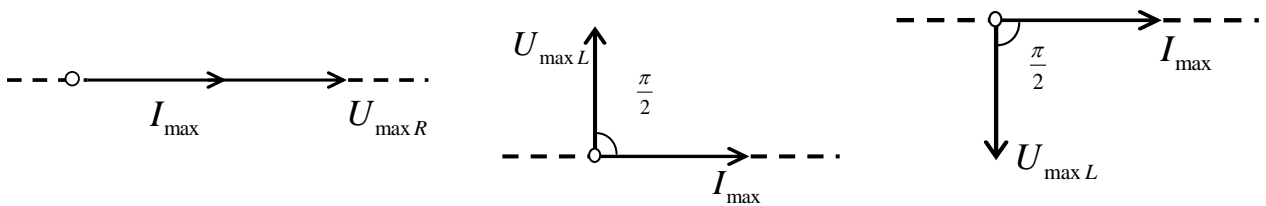
Сила струму в колі з котушкою індуктивності (рис.5.3б) буде відставати по фазі від прикладеної напруги на $\frac{\pi}{2}$:

$$I_L = I_{maxL} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (5.22)$$

а сила струму в колі з конденсатором (рис.5.3в) буде випереджувати по фазі напругу на $\frac{\pi}{2}$

$$I_C = I_{maxC} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (5.23)$$

За допомогою векторних діаграм це можна зобразити таким чином:



а) коло з резистором б) коло з індуктивністю в) коло з конденсатором

Рис. 5.4. Векторні діаграми напрямків сили струму та напруги.

Для кола із резистором

$$R = \frac{U_{maxR}}{I_{maxR}} \quad (5.24)$$

омічний опір, для кола з котушкою індуктивності

$$X = \frac{U_{maxL}}{I_{maxL}} \omega L. \quad (5.25)$$

індуктивний опір, а для кола з конденсатором

$$X_C = \frac{U_{maxC}}{I_{maxC}} = \frac{1}{\omega C}. \quad (5.26)$$

ємнісний опір.

Розглянемо коло в якому послідовно з'єднані резистор, котушка і конденсатор

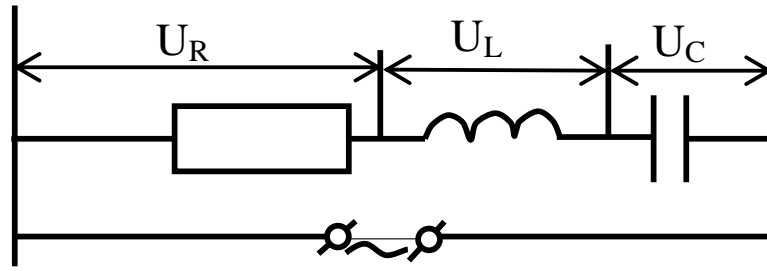


Рис. 5.5. Коло в якому послідовно з'єднані резистор, котушка і конденсатор.

В загальному випадку сила струму в колі і напруга змінюються не в одній фазі. Знайдемо U_{max} за методом векторних діаграм. Шукану напругу можна подати як суму трьох векторів U_{max} , U_{maxL} , U_{maxC} (рис. 5.5.).

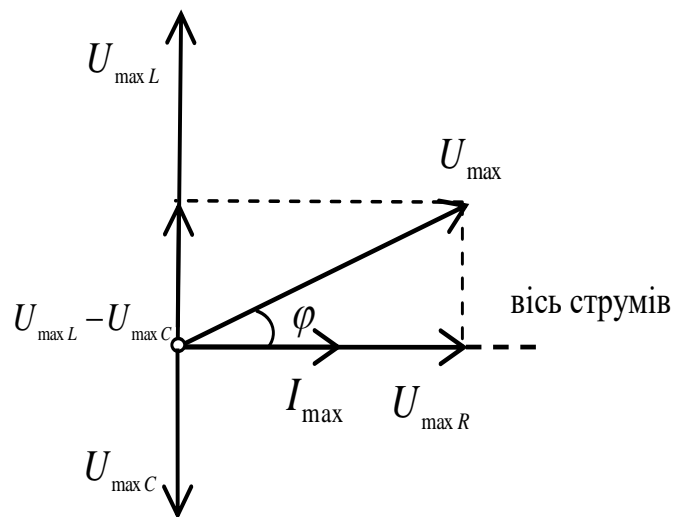


Рис. 5.6. Векторна діаграма напруг.

Величину U_{max} можна знайти за теоремою Піфагора:

$$U_{max}^2 = U_{maxR}^2 + (U_{maxL} - U_{maxC})^2 \quad (5.27)$$

або

$$I_{max}^2 Z^2 = I_{max}^2 R^2 + I_{max}^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \quad (5.28)$$

звідки

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (5.29)$$

Z – повний опір кола змінного струму, який називається імпедансом.

Зсув фаз φ між силою струму і напругою визначається із трикутника напруг:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{\max L} - U_{\max C}}{U_{\max R}} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (5.30)$$

5.1.5. Імпеданс тканин організму. Основи реографії

Для характеристики пропускання струму живими клітинами використовують еквівалентні схеми, які можуть моделювати електричні параметри біологічних тканин. При частоті, меншій 10^{10} Гц індуктивністю біологічних тканин нехтують. Таким чином, вважають, що імпеданс (повний опір) біологічних тканин дорівнює геометричній сумі активного R і ємнісного X_C опорів. Найбільш вдала еквівалентна електрична схема має вигляд, зображений на рис.5.7.

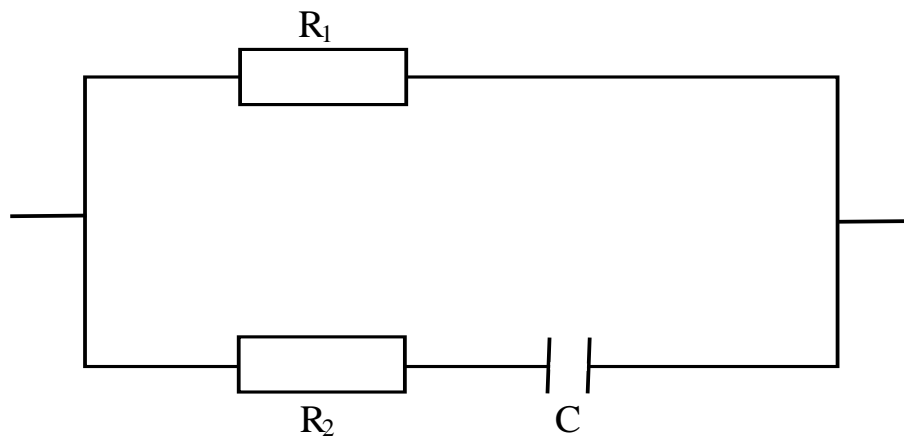


Рис. 5.7. Еквівалентна електрична схема тканин організму.

Частотна залежність імпедансу (дисперсія імпедансу) дозволяє оцінити життєздатність тканин організму, що важливо при трансплантації органів. На рисунку 5.8 наведені графіки дисперсії імпедансу: крива 1 – здорова тканина, 2 – мертва.

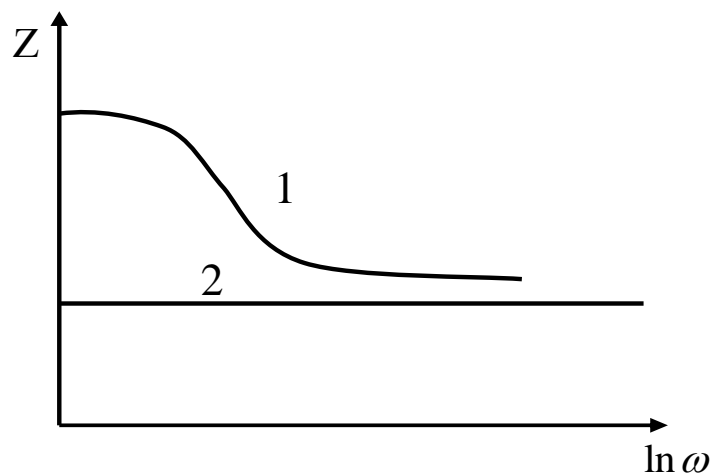


Рис. 5.8. Графіки дисперсії імпедансу.

Імпеданс тканин визначається їх функціональним станом і може служити діагностичним показником.

Так, імпеданс кровоносних судин залежить від їх кровонаповнення, а значить і від серцево-судинної діяльності.

5.1.6. Імпульсний струм та його характеристики

Електричним імпульсом називається короткочасна зміна сили струму. Імпульси, що повторюються, називаються імпульсним струмом.

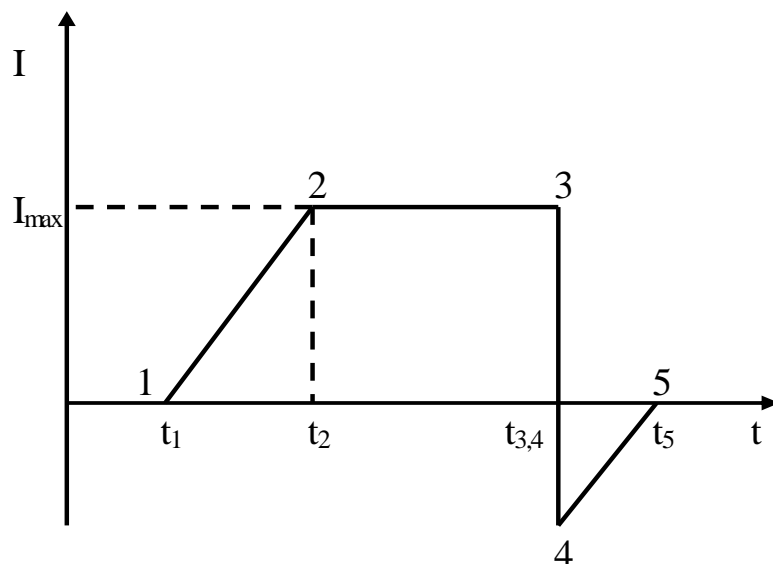


Рис. 5.9. Характерні ділянки імпульсу: 1-2 фронт, 2-3 вершина, 3-4 зріз (або задній фронт), 4-5 хвіст.

$$\frac{0.8 I_{max}}{t_2 - t_1} = \frac{0.8 I_{max}}{\tau_0}$$

Відношення $\frac{0.8 I_{max}}{t_2 - t_1} = \frac{0.8 I_{max}}{\tau_0}$ називають крутизною фронту.

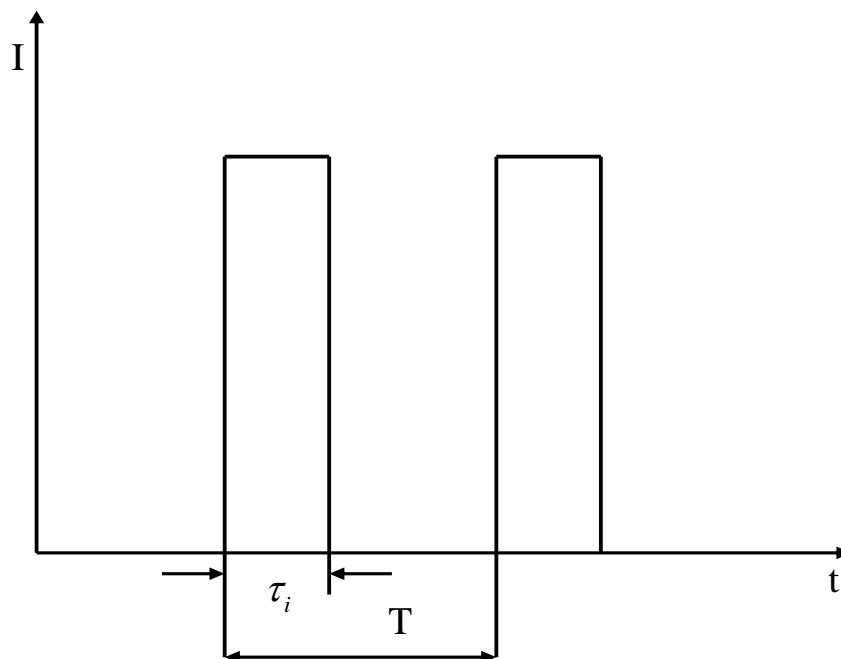


Рис. 5.10. Період імпульсного струму.

Період імпульсного струму T – це середній час між початками сусідніх імпульсів. Обернена величина називається частотою повторення імпульсів

$$f = \frac{1}{T}. \quad (5.31)$$

$$Q = \frac{T}{\tau_i} = \frac{1}{f\tau_i} \quad (5.32)$$

Відношення (5.32) називається шпаруватістю слідування імпульсів, а обернена до Q величина K – коефіцієнтом заповнення:

$$K = \frac{1}{Q} = f\tau_i \quad (5.33)$$

Дія імпульсного струму на організм визначається його частотою і формою. При низьких частотах (<500 кГц) електричний струм чинить подразнювальну дію на біологічні тканини. Ця дія визначається законом Дюбуа–Реймона і Хорвега–Вейса–Ланіка.

1. Подразнювальна дія струму прямо пропорційна швидкості зростання сили струму, тобто крутизни фронту імпульсу.
2. У певних межах подразнювальна дія пропорційна тривалості імпульсу.
3. Фізіологічна дія імпульсного струму залежить від його шпаруватості (коефіцієнта заповнення).

Специфічна фізіологічна дія імпульсного струму, або окремого імпульсу, визначається його формою.

Імпульси прямокутної форми використовують для стимуляції центральної нервової системи (електросон, електронаркоз) $\tau_i = 0,1 - 1\text{мс}$; $\nu = 5 - 150\text{Гц}$ і при кардіостимуляції $\tau_i = 0,8 - 3\text{мс}$; $\nu = 1 - 1,2\text{Гц}$.

При електрогімнастиці використовують імпульси трикутної та експоненційної форми $\tau_\Delta = (1 - 1,5)\text{мс}$, $\nu = 100\text{Гц}$; $\tau_e = 3 - 60\text{мс}$, $\nu = 8 - 80\text{Гц}$.

Електростимуляція – метод електротерапії, спрямований на відновлення порушеної функції органу шляхом заміни природнього нервового імпульсу низькочастотним імпульсним струмом. Відновлення порушеного ритму – основна мета електролікування.

5.2. МЕДИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЛІКУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ

5.2.1. Магнітне поле, його характеристики

Із давнини до нас доходять відомості про лікувальні властивості магнітних полів. Кожен відомий лікар минулого пропонував власний рецепт використання магнітів. Вважалося, що магніт відтягує грижу, знімає переломи, витягує жовтуху і водянку, заспокоює болі різного походження, заліковує рани, відновлює порушену чутливість шкіри.

Магнітне поле – силове поле, яке діє на рухомі електричні заряди і на об'єкти, у яких є магнітний момент. До джерел магнітного поля відносять: змінне електричне поле; намагнічені тіла, провідники і з струмом і рух зарядів. Природа цих джерел єдина: магнітне поле обумовлене рухом заряджених мікрочастинок (електронів, протонів, іонів), а також наявністю у цих мікрочастинок власного магнітного моменту.

Магнітний момент – одна з найголовніших магнітних характеристик.

Для контуру зі струмом магнітний момент дорівнює добуткові сили струму I на охоплювану ним площу контуру S :

$$P = IS \quad (5.34)$$

Можна показати, що магнітний момент електрона,

$$P_e = \frac{q \cdot v \cdot R}{2}, \quad (5.35)$$

де q – заряд електрона, v – його швидкість, R – радіус орбіти.

Одиницею магнітного моменту в СІ є $\text{А} \cdot \text{м}^2$.

Відношення максимального моменту сили M_{max} до магнітного моменту $P_{ш}$ є величиною постійною, і тому може бути характеристикою магнітного поля:

$$B = \frac{M_{max}}{P} \quad (5.36)$$

Цю величину називають магнітною індукцією (індукцією магнітного поля). Індукція магнітного поля – векторна величина і є силовою характеристикою поля. Одиниця магнітної індукції в СІ – Тесла (Тл), $1\text{Тл}=1\text{Н}/(\text{А}\cdot\text{М})$.

Магнітне поле зображають у вигляді силових ліній. У кожній точці такої лінії вектор B розміщений уздовж дотичної. На відміну від силових ліній електричного поля, силові лінії магнітного поля – замкнені. Магнітне поле – вихрове.

У кожному тілі існують мікроскопічні струми, зумовлені рухом електронів у атомах і молекулах. Ці струми створюють власні магнітні поля. Тому вектор магнітної індукції характеризує не магнітне поле, а результуюче магнітне поле, обумовлене макрострумами і мікрострумами. Отже, для одного і того струму і при всіх інших однакових умовах, індукція магнітного поля в різних середовищах буде мати різне значення.

Магнітне поле макрострумів характеризується вектором напруженості \vec{H} , який пов'язаний з вектором магнітної індукції \vec{A} співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (5.37)$$

тут $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – абсолютна магнітна проникність середовища, μ – безрозмірна величина, фізичний зміст якої буде описано пізніше.

Одиницею напруженості магнітного поля в СІ є Ампер на метр (А/м).

Намагнічення тіл характеризується вектором намагнічення j – величиною, рівною сумарному моменту атомів і молекул в одиниці об'єму речовини:

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\Delta V} \quad (5.38)$$

де P_i – магнітний момент атома (чи молекули) ΔV – достатньо малий об'єм речовини (в якому поле вважається однорідним).

Вектор намагнічення прямо пропорційний напруженості поля, яке викликає намагнічення:

$$j = \chi \cdot H \quad (5.39)$$

де χ – безрозмірна величина, яка залежить від природи речовини і називається магнітною сприйнятливістю.

Магнітну індукцію B поля у речовині можна виразити як алгебраїчну суму індукції B_0 намагнічуючого поля (чи поля, обумовленого намагнічуючим струмом у вакуумі) і індукції B_v власного поля. Індукцію власного поля можна визначити через вектор намагнічення:

$$B_B = \mu_0 j = \mu_0 x \cdot H_0 \quad (5.40)$$

тоді магнітна індукція поля у речовині

$$B = B_0 + B_B = \mu_0 H_0 + \mu_0 x \cdot H_0 = \mu_0 H_0 (1 + x) = \mu \mu_0 H \quad (5.41)$$

Тут $\mu = 1 + x$, називається магнітною проникністю і показує, у скільки разів магнітна індукція поля, утворювана намагнічуючим струмом у даній речовині, більша за індукцію поля, створюваного цим же струмом у вакуумі.

Добуток $\mu \mu_0$ – називається абсолютною магнітною проникністю і позначається через μ_A .

Індукція магнітного поля Землі в районі курської магнітної аномалії – 10^{-4} Тл, на екваторі – $3.4 \cdot 10^{-5}$ Тл, мозку – 10^{-12} Тл, ока – 10^{-11} Тл, серця – $5 \cdot 10^{-11}$ Тл.

При роботі на магнітних пристроях безпечною слід вважати магнітну індукцію для рук меншу від 20 мТл, а для інших частин тіла близько 30 мТл.

Під час підвищеної сонячної активності, коли магнітна індукція магнітного поля Землі збільшується у тисячі, а інколи у десятки тисяч разів, зростає розмноження і токсичність хвороботворних бактерій, підвищується швидкість згортання крові і число лімфоцитів, порушується серцево – судинна діяльність, частішають нервово-психічні захворювання.

5.2.2. Закон Біо–Савара–Лапласа

Згідно з законом Біо–Савара–Лапласа, малий відрізок провідника dl (рис. 5.11), по якому протікає струм I , утворює в точці A , яка знаходиться на відстані r від dl , магнітне поле напруженістю dH :

$$dH = \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{4\pi \cdot r^2} \quad (5.42)$$

тут α – кут, утворений між напрямком I і вектором r .

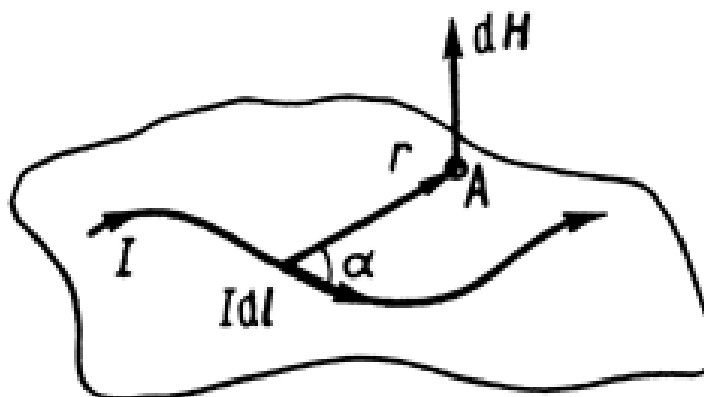


Рис. 5.11. Магнітне поле елемента провідника зі струмом.

Індукція магнітного поля безмежно довгого провідника із струмом у будь-якій точці визначається за формулою:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (5.43)$$

У центрі колового струму:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2 \cdot r} \quad (5.44)$$

5.2.3. Магнітні властивості речовини

Магнетики за їх магнітними властивостями поділяють на три основних класи: діамагнетики, парамагнетики і феромагнетики.

У всіх діамагнітних матеріалах сумарне магнітне поле орбітальних рухів всіх електронів дорівнює нулю. Проте, під впливом зовнішнього середовища, у атомах речовин виникає (індукується) магнітний момент, направлений протилежно до зовнішнього поля. Для всіх діамагнетиків $\mu \leq 1$, $\chi \leq 1$. До діамагнетиків належать багато металів (наприклад Ag, Au, Cu); більшість органічних сполук, смоли, водень, азот, вода.

У парамагнітних речовинах при відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти електронів не скомпенсовані і атоми мають певний магнітний момент.

При внесенні парамагнетика у зовнішнє магнітне поле встановлюється орієнтація магнітних моментів атомів уздовж зовнішнього магнітного поля. Парамагнетизм властивий багатьом елементам у неметалічному стані (лужним і лужноземельним металам), деяким металам перехідних груп з незаповненими d або f шарами електронної оболонки – групи заліза, паладію, платини, молекули газів O_2 і No.

Для парамагнетиків $\mu \leq 1$, $\chi \geq 1$.

Феромагнетики – це магнітно впорядковані речовини, при якому всі магнітні моменти носіїв магнетизму і при відсутності зовнішнього магнітного поля впорядковані у певному напрямку. Серед хімічних елементів феромагнетиками є перехідні елементи: Fe, Co, Ni, ряд рідкоземельних металів: Cd, Er, Tb тощо.

Магнітна проникність феромагнетиків сягає значень $10^4 - 10^5$.

Магнітна сприйнятливність феромагнетиків росте зі збільшенням температури. При деякій температурі T_K феромагнетик перетворюється в парамагнетик; ця температура називається температурою (точкою) Кюрі. Поблизу температури Кюрі магнітна сприйнятливність феромагнетика різко зростає.

Магнітна сприйнятливність діамагнетиків і деяких парамагнетиків (наприклад, в лужних металах) не залежить від температури. Магнітна

сприйнятливість парамагнетиків (за деякими винятками) змінюється обернено пропорційно абсолютній температурі.

Феромагнетик, поміщений у магнітне поле, змінює свої лінійні розміри, тобто деформується. Це явище називається магнітострикцією. Відносне видовження залежить від природи феромагнетика і напруженості магнітного поля. Величина магнітострикційного ефекту не залежить від напрямку поля; у одних речовин спостерігається скорочення (нікель), у інших видовження (залізо у слабких полях) вздовж поля. Це явище використовується для отримання ультразвукових коливань з частотою до 100 кГц.

За фундаментальні роботи в області магнетизму французькому фізику, першовідкривачу антиферомагнетизму Л. Неелю у 1970 р. була присуджена Нобелівська премія.

Приклади розв'язку задач до 5 розділу

Задача 5.1. Визначити кількість одноразово іонізованих йонів лікарської речовини, введених хворому протягом $t = 10$ хв при густині струму $j = 0.05 \text{ мА/см}^2$ з електроду площею $S = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Розв'язок:

Дано:

$$j = 0.05 \text{ мА/см}^2 = 0.5 \text{ А/м}^2$$

$$t = 10 \text{ хв} = 600 \text{ с}$$

$$S = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$N - ?$

1. Густина струму j дорівнює:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{Ne}{S \cdot t}$$

2. Звідси знаходимо:

$$N = \frac{j \cdot S \cdot t}{e}$$

3. Обчислення:

$$N = \frac{0.5 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 600}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 9.4 \cdot 10^{17}$$

Відповідь: $N = 9.4 \cdot 10^{17}$.

Контрольні питання до 5 розділу.

1. Електричне поле і його основні характеристики.
2. Електричний диполь (дипольний момент, диполь в однорідному і неоднорідному електричному полі).
3. Електричне поле в речовині (поляризація та її види, відносна діелектрична проникність і поляризованість речовини, діелектрична проникність біологічних тканин, сегнетоелектрики).
4. П'єзоелектричний ефект і його застосування.
5. Основні характеристики електричного струму (сила та густина струму, закони Ома та Джоуля–Ленца, питома електропровідність, рухливість вільних носіїв).
6. Магнітне поле і його основні характеристики (індукція і напруженість магнітного поля). Закон Біо–Савара–Лапласа.
7. Дія магнітного поля на провідники зі струмом та рухомі електричні заряди (сила Ампера, сила Лоренца).
8. Магнітні властивості речовини (намагніченість, магнітна проникність). Діа, пара- і феромагнетики.



Тестові завдання до 5 розділу.

1. Електричним струмом називають...
 - А. не впорядкований рух електричних зарядів;
 - Б. рух електричних зарядів;
 - В. рух електричних імпульсів;
 - Г. впорядкований (напрявлений) рух електричних імпульсів;
 - Д. впорядкований (напрявлений) рух електричних зарядів.
2. Електричним імпульсом називається:
 - А. короткочасна зміна напруги;
 - Б. короткочасна зміна густини струму;
 - В. короткочасна зміна опору;
 - Г. короткочасна зміна сили струму;
 - Д. короткочасна зміна імпедансу.
3. Силовою характеристикою магнітного поля є:
 - А. електрорушійна сила;
 - Б. магнітна індукція;
 - В. магнітний потік;
 - Г. напруженість;
 - Д. намагніченість.
4. Лініями магнітної індукції називають...
 - А. лінії, криві до яких спрямовані так само, як і вектор B в даній точці поля;
 - Б. лінії, прямі до яких спрямовані так само, як і вектор B в даній точці поля;
 - В. лінії, дотичні до яких спрямовані так само, як і вектор B в даній точці поля;
 - Г. лінії, до яких спрямований вектор B в точці поля;
 - Д. лінії, криві, як і вектор B в даній точці поля.



5. Імпедансом тканини або органа називають:

А. ємнісний опір;

Б. індуктивний опір;

В. суму ємнісного та індуктивного опорів;

Г. суму ємнісного та омичного опорів;

Д. омичний опір.

6. Кондуктометрия це...

А. вимірювання електропровідності;

Б. вимірювання показника рухливості іонів;

В. визначення кількості іонів;

Г. визначення густини сили струму;

Д. визначення потужності одиниці об'єму.

7. Дія імпульсного струму на організм визначається:

А. періодом;

Б. швидкістю;

В. періодом і формою;

Г. частотою і швидкістю;

Д. частотою і формою.

8. Фізіологічна дія імпульсного струму залежить від:

А. напруги;

Б. опору;

В. густини сили струму;

Г. коефіцієнта заповнення;

Д. кількості іонів.

9. Опір вимірюється у:

А. В;

Б. м;

В. А;

Г. Ом;

Д. А/м.

10. За допомогою закону Біо-Савара-Лапласа..

А. можна розрахувати силу магнітного поля;

Б. можна розрахувати напруженість магнітного поля,

створеного будь-яким провідником з струмом;

В. можна розрахувати модуль вектора магнітної індукції, що діє на прямий провідник зі струмом

Г. можна розрахувати величину й напрям магнітного поля в даній точці в даний час;

Д. можна розрахувати струм магнітного поля, створеного будь-яким провідником з струмом.

11. Струм називають постійним...

А. якщо за будь-які однакові проміжки часу переносяться однакові кількості електричного заряду;

Б. якщо за будь-які однакові проміжки часу переносяться неоднакові кількості електричного заряду;

В. якщо за будь-які неоднакові проміжки часу переносяться неоднакові кількості електричного заряду;

Г. якщо за будь-які однакові проміжки часу переносяться однакові кількості електричних імпульсів;

Д. якщо за будь-які неоднакові проміжки часу переносяться однакові кількості електричних імпульсів.

12. Сила струму визначається...

А. відношенням кількості заряду до проміжку часу;

Б. відношенням проміжку часу до кількості заряду;

В. сумою кількості заряду до проміжку часу;

Г. сумою проміжку часу до кількості заряду;

Д. відношенням кількості заряду до періоду Т.

13. Електричним імпульсом називається:

- А. короткочасна зміна напруги;
- Б. короткочасна зміна густини струму;
- В. короткочасна зміна опору;
- Г. короткочасна зміна сили струму;
- Д. короткочасна зміна імпедансу.

14. Імпульси, що повторюються називаються:

- А. високо-частотним струмом;
- Б. імпульсним струмом;
- В. низько-частотним струмом;
- Г. постійним струмом;
- Д. змінним струмом.

15. Дія імпульсного струму на організм визначається:

- А. періодом;
- Б. швидкістю;
- В. періодом і формою;
- Г. частотою і швидкістю;
- Д. частотою і формою.

16. Змінний струм – це...

- А. струм, що короткочасно змінюється з часом;
- Б. струм, що імпульсно змінюється з часом;
- В. струм, що змінюється з частотою;
- Г. струм, що змінюється з швидкістю;
- Д. струм, що змінюється з часом.

17. Сила струму в колі з резистором буде:

- А. змінюватися у фазі з прикладеною напругою;
- Б. відставати по фазі від прикладеної напруги на $3,14/2$;
- В. випереджувати по фазі від прикладеної напруги на $3,14/2$;
- Г. відставати по фазі від прикладеної напруги на $3,14$;

Д. випереджувати по фазі від прикладеної напруги на $3,14$.

18. Сила струму в колі з конденсатором буде:

- А. змінюватися у фазі з прикладеною напругою;
- Б. відставати по фазі від прикладеної напруги на $3,14/2$;
- В. випереджувати по фазі від прикладеної напруги на $3,14/2$;
- Г. відставати по фазі від прикладеної напруги на $3,14$;
- Д. випереджувати по фазі від прикладеної напруги на $3,14$.

19. Сила струму в колі з котушкою індуктивності буде:

- А. змінюватися у фазі з прикладеною напругою;
- Б. відставати по фазі від прикладеної напруги на $3,14/2$;
- В. випереджувати по фазі від прикладеної напруги на $3,14/2$;
- Г. відставати по фазі від прикладеної напруги на $3,14$;
- Д. випереджувати по фазі від прикладеної напруги на $3,14$.

20. Сила струму вимірюється у:

- А. В;
- Б. А/м;
- В. А;
- Г. А/с;
- Д. Ом.

21. Напруга вимірюється у:

- А. А;
- Б. В;
- В. Ом;
- Г. В/м;
- Д. А/с.

22. Напруга визначається за формулою:

- А. $R \cdot I$;
- Б. I/R ;
- В. R/i ;
- Г. $J \cdot R$;
- Д. J/L .

23. Густина сили струму вимірюється у:

- А. В;
- Б. А;
- В. Вт;
- Г. А/м²;
- Д. Ом.

24. Густина сили струму визначається за формулою:

- А. S/I;
- Б. s/I;
- В. i/S;
- Г. I/s;
- Д. I/S.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗКУ

Задача 5.1. Внутрішньоклітинна концентрація іонів Na^+ складає $C_i = 0.015$ моль/л, зовнішньоклітинна $C_o = 0.15$ моль/л, внутрішньоклітинний потенціал дорівнює $\varphi_i = 60$ мВ відносно зовнішнього, який дорівнює нулю. Температура клітини $t = 37^\circ C$. Визначте осмотичну A_{osm} і електричну $A_{ел}$ роботи при перенесенні іонів натрію крізь мембрану зсередини нервової клітини.



Задача 5.2. При перенесенні 5 нмоль іонів калію з м'язового волокна жаби в міжклітинне середовище робота, яка витрачена на переборення сил електричного відштовхування, склала $A_{ел} = 42.24$ мкДж. Розрахуйте різницю потенціалів $\Delta\varphi$ на цитоплазматичній мембрані.

Задача 5.3. У скільки разів внутрішньоклітинна концентрація іонів калію повинна перевищувати зовнішню, щоб потенціал спокою складав $\Delta\varphi = -32$ мВ? Температура $t = 37^\circ C$.

Задача 5.4. Осмотична робота A_{osm} , яка витрачена на перенесення 3 нмоль іонів хлору з гігантського аксона кальмара, склала 8,7 мДж при температурі $t = 27^\circ C$. Визначте відношення концентрацій C_o/C_i ззовні і всередині клітини.

Задача 5.5. Яка різниця потенціалів існує на міжклітинній мембрані, якщо при перенесенні 10 мкмоль іонів натрію у міжклітинне середовище було виконано роботу $A_{ел} = 57$ мДж?

Задача 5.6. Розрахуйте теоретичне значення максимуму потенціалу дії $\Delta\varphi$ при температурі $t = 37^\circ C$, вважаючи, що цитоплазматична мембрана нервового волокна в цих умовах є проникненою лише для іонів натрію. Зовнішньо- і внутрішньоклітинна концентрації натрію дорівнюють відповідно $C_o = 150$ ммоль/л, $C_i = 23$ ммоль/л.

ГЛАВА 6. ОПТИЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

6.1. ОСНОВИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ОПТИКИ

6.1.1. Поширення світла

Оптика вивчає природу світла, закономірності світлових явищ і взаємодію світла з речовиною. Оптику прийнято ділити на геометричну і фізичну (хвильову і квантову).

Геометрична оптика не розглядає фізичну природу світла і досліджує його поширення на основі геометричних понять. Цей розділ оптики допомагає вирішувати багато проблем, які мають прикладне значення.

Фізична оптика складається з хвильової і квантової, що зумовлено подвійною природою світла. Воно одночасно представляє собою потік електромагнітних хвиль і фотонів – квантів електромагнітного випромінювання, які мають певні властивості частинок.

Оптика має значення для медицини тому, що на основі її законів можна зрозуміти біофізичну природу зору і методи, що дозволяють виправляти його недоліки. На законах оптики заснована дія великої кількості приладів, починаючи зі світлового мікроскопа, без яких було б неможливе становлення теоретичної і практичної медицини.

Видиме світло являє собою електромагнітні хвилі, які сприймаються оком людини з довжиною від 400 до 700 нм. Тіло, яке випромінює світло, називають джерелом світла. Джерела світла розрізняють за багатьма параметрами, наприклад, штучні і природні. Теплові джерела - ті, які світяться в результаті нагрівання, і нетеплові, які світяться завдяки хімічним реакціям окиснення. Джерела світла можуть бути точковими та протяжними і випромінювати світло різних довжин хвиль. Діапазон довжин хвиль оптичного випромінювання вказаний у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1. Спектр оптичного випромінювання.

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

Про дуалізм світла свідчать його хвильові і корпускулярні властивості. Явища інтерференції, дифракції, поляризації можна пояснити на основі хвильових властивостей світла, а явище фотоефекту – лише на основі його корпускулярної (квантової) природи. Виходячи з цього оптику поділяють на хвильову, геометричну і квантову.

Напрямок поширення світлових променів у речовині залежить від показника заломлення.

Світло виявляє двоякі властивості. Явища інтерференції, дифракції, поляризації можна пояснити на основі хвильових властивостей світла, а явище фотоефекту – лише на основі його корпускулярної (квантової) природи. Виходячи з цього оптику поділяють на хвильову, геометричну і квантову.

Оскільки світло є електромагнітною хвилею, то в однорідному середовищі воно поширюється рівномірно і прямолінійно. Це дозволяє використовувати пучки світла для точних робіт (будівництва тунелів, високих будинків і т.п.).

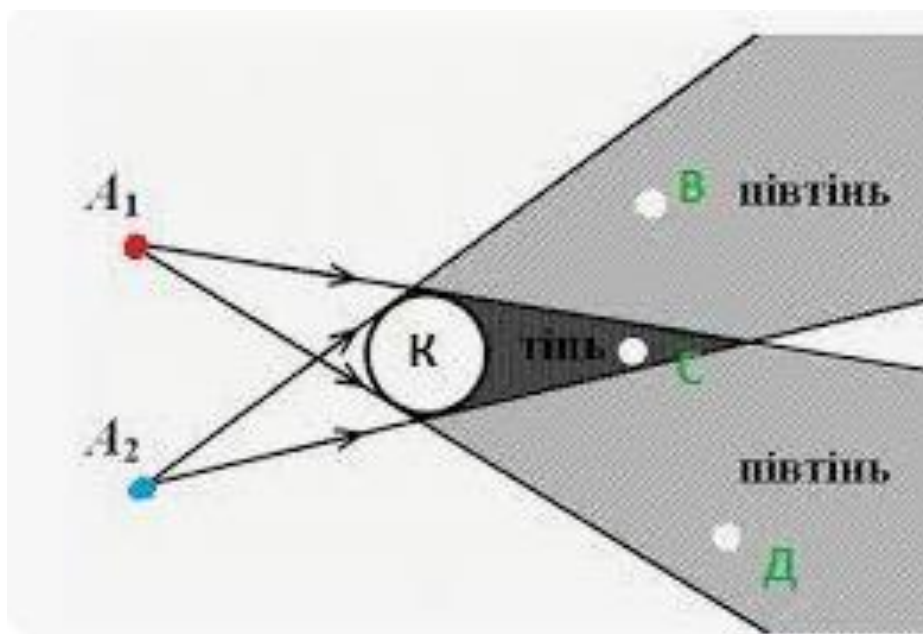


Рис. 6.1. Утворення тіні та півтіні.

Прямолінійне поширення світла від точкового джерела утворює тіні – зони, куди не потрапляють промені від частин поверхонь джерела світла (рис. 6.1). Якщо джерело світла протяжне, то утворюються також зони півтіней, куди попадають промені від частин поверхні джерела світла (рис.6.1).

На різних етапах розвитку фізики використовували різні способи вимірювання швидкості світла. Першим її спробував розрахувати Галілей, але йому не вдалось цього зробити. У XVII ст. її вперше визначив датський астроном Ремер, вивчаючи рухи супутника Юпітера – Іо. Реєструючи його появу із-за планети, він отримав приблизні дані швидкості світла $v_{\text{св}} \approx 215000$ км/с. У XIX ст. було вперше визначено лабораторним шляхом. За сучасними даними швидкість світла у вакуумі дорівнює $299792458 \pm 1,2$ м/с.

Основним поняттям геометричної оптики є світловий промінь. Світловий промінь – умовна лінія, вздовж якої світлове випромінювання переносить енергію. Основні закони геометричної оптики можуть бути отримані на основі врахування хвильових властивостей світла. Однак історично вони були отримані на основі узагальнення результатів експериментів.

Поширення світлових променів у речовині визначає її показник заломлення. Показник заломлення речовини – величина, яка показує у скільки разів швидкість світла у вакуумі відрізняється від швидкості світла у речовині:

Абсолютний показник заломлення речовини – величина, яка показує у скільки разів швидкість світла у вакуумі більша від швидкості світла у речовині:

$$n = \frac{c}{v} \quad (6.1)$$

де $c = 2.99792458 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі; v – швидкість світла у середовищі.

Показник заломлення дистильованої води за нормального тиску і температури 293°К становить $1.333 \approx \frac{4}{3}$; показник заломлення скла різних сортів залежить від домішок $n \approx \frac{1.5}{2}$.

На межі розділення середовищ (відрізняються за показниками заломлення) спостерігають (рис. 6.2):

відбивання світла – явище, коли внаслідок взаємодії із межею розділення середовищ світлове випромінювання повертається у попереднє середовище;

заломлення світла – явище, коли внаслідок взаємодії із межею розділення середовищ світлове випромінювання проникає у наступне середовище (рис.6.2).

На рис. 6.2 світлові промені 1, 2, 3 відповідно падаючий, заломлений і відбитий, а σ – межа розділення середовищ ($v_1 \neq v_2$).

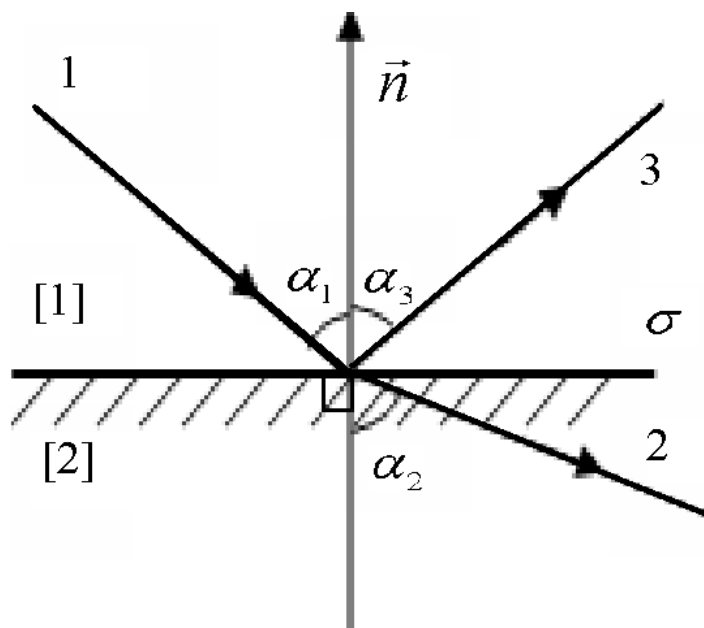


Рис. 6.2. Поширення світла на межі двох середовищ.

Основні закони геометричної оптики:

закон незалежності світлових променів: світлові промені незалежні, тобто перетинаючись не зазнають ніяких змін;

— закон *оборотності* світлових променів: світлові промені оборотні, тобто у випадку обміну місцями джерела і приймача світла не зазнають ніяких змін, окрім зміни напрямку на протилежний;

— закон *прямолінійності* світлових променів: у однорідному середовищі світлові промені прямолінійні;

— закон *відбивання* світла: світлові промені падаючий, відбитий і перпендикуляр до межі розділення середовищ, проведений у точку падіння променя, лежать в одній площині, до того ж кут падіння променів дорівнює куту відбивання (рис. 6.1):

$$\alpha_3 = \alpha_1 \quad (6.2)$$

— закон *заломлення*: світлові промені падаючий, заломлений і перпендикуляр до межі розділення середовищ, проведений у точку падіння променів, лежать в одній площині, до того ж відношення синуса кута падіння променя α_1 до синуса кута заломлення α_2 для двох даних середовищ є величина стала і дорівнює відносному показнику заломлення другого середовища відносно першого середовища $n_{1,2}$ (рис. 6.1):

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n_{2,1} \quad (6.3)$$

Відносний показник заломлення середовища $n_{2,1}$ показує у скільки разів швидкість світла в одному середовищі більша (менша) від другого:

$$n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (6.4)$$

Тоді співвідношення (6.3–6.4) можна подати так:

$$\sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2, \quad (6.5)$$

або інакше

$$n \sin \alpha = \text{const} \quad (6.6)$$

Отже, для межі розділення середовищ добуток $n \sin \alpha$ – інваріант.

Закон відбивання і заломлення справедливий у разі оберненого напрямку ходу світлових променів. Промінь, що поширюється по шляху відбитого променя, відбивається по шляху падаючого. Площину, здатну дзеркально відбивати світлові промені, називають плоским дзеркалом.

6.1.2. Дисперсія світла

Середовище із більшим абсолютним показником заломлення називають оптично більш густим, а з меншим – оптично менш густим. Якщо світло з оптично менш густого середовища переходить у більш густе, промінь буде "притискатись" до перпендикуляра ($\alpha_1 > \alpha_2$).

Якщо ж світло переходить із більш оптично густого середовища в менш густе, то промінь світла буде відхилятися від перпендикуляра ($\alpha_1 < \alpha_2$) (рис. 6.2).

Функція $n = A + B/\lambda^2$ виражає залежність показника заломлення від довжини світлової хвилі (рис. 6.3). Дисперсія світла називається нормальною у випадку монотонного зростання показника заломлення з зростанням частоти (з зменшенням довжини хвилі). В протилежному випадку дисперсія називається аномальною.

Явище залежності показника заломлення від довжини світлової хвилі називають дисперсією світла.

Із закону заломлення світла: $\sin \beta = \sin \alpha / n(\lambda)$ випливає, що кути заломлення променів різної довжини хвилі, які мають однаковий кут падіння, виявляються різними.

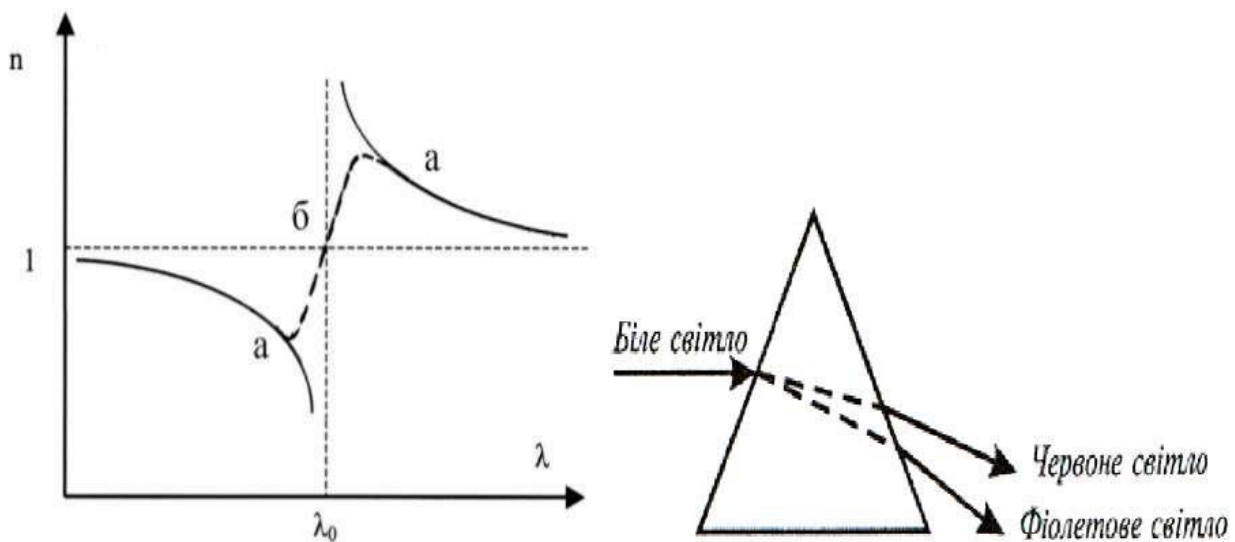


Рис. 6.3. Залежність показника заломлення від довжини світлової хвилі:
а – аномальна дисперсія; б – нормальна дисперсія.

Дисперсія світла називається нормальною у випадку монотонного зростання показника заломлення з зростанням частоти (з зменшенням довжини хвилі). В протилежному випадку дисперсія називається аномальною.

Розкладання світла у спектр за допомогою призми лежить в основі роботи приладів для визначення хімічного складу найрізноманітніших тіл.

Ультрафіолетовий спектр має підвищену біологічну дію, викликає засмагу, вбиває патогенні бактерії, може розкладати молекули на частинки під час поглинання. Промені ультрафіолетового діапазону знайшли застосування в медицині, техніці, науці. Інфрачервоні промені випромінюють всі тіла, зокрема

тіло людини випромінює хвилі довжиною 10 мкм. Із підвищенням температури тіла випромінюють більш короткі інфрачервоні хвилі, а при температурі 600 – 700°C – лише промені оптичного діапазону. Спектральний аналіз дозволяє визначати хімічний склад речовини з високою точністю.

6.1.3. Волоконна оптика

Якщо промінь світла переходить із оптично більш густого середовища в оптично менш густе, то кут заломлення променя буде більшим від кута падіння. Отже, при збільшенні кута падіння буде зростати і кут заломлення (рис. 6.4), і при кутах падіння $\alpha > \alpha_{\text{гр}}$, де $\sin \alpha_{\text{гр}} = n$, заломлення світла не відбудеться. При $\alpha > \alpha_R$ всі падаючі промені відбиваються від межі розділу середовищ. Таке явище називається повним внутрішнім відбиванням.

Найменший кут падіння, при якому настає повне внутрішнє відбивання, називають граничним кутом повного внутрішнього відбивання.

Якщо світло переходить з речовини, абсолютний показник якої $n_1 = n$, у повітря, де $n_2 = 1$, то умова повного внутрішнього відбивання набере вигляду:

$$\sin \alpha_{\text{гр}} = \frac{1}{n} \quad (6.7)$$

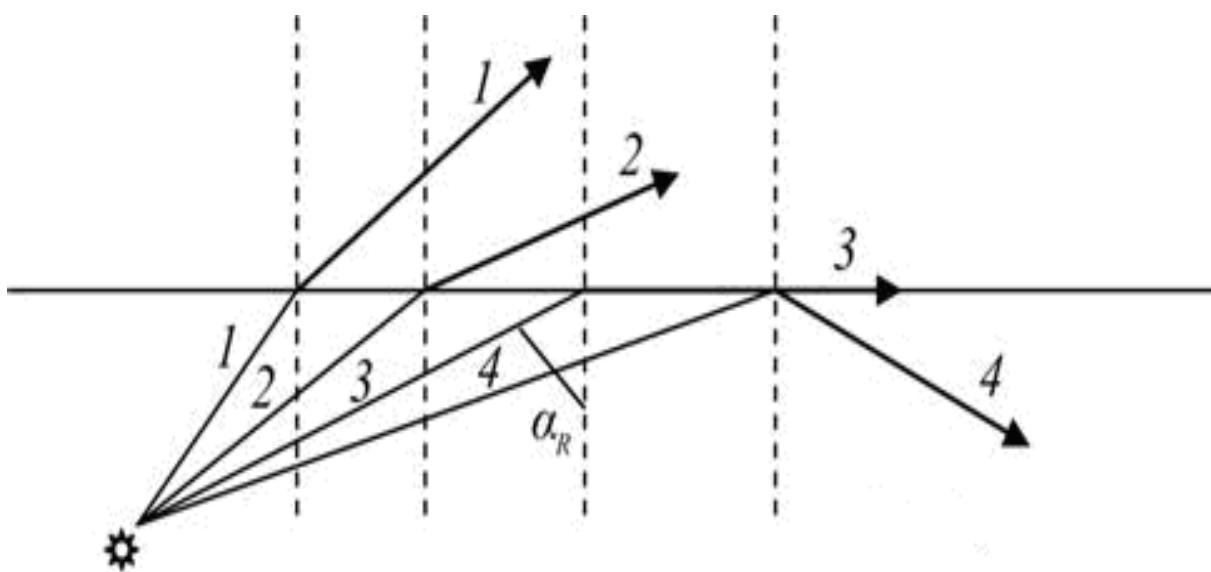


Рис. 6.4. Хід променів на межі поділу двох середовищ.

Для діаманта граничний кут рівний 24°. Внаслідок цього при правильній його огранці більша частина світла, що падає на нього з усіх боків, повністю відбивається і виходить з верхньої грані діаманта. Тому діамант так сяє.

6.1.4. Лінзи. Параметри лінзи

Лінзи використовуються для зміни напрямку поширення світлових променів в оптичних системах. Лінзою називається прозоре тіло, обмежене двома сферичними поверхнями, яке за показником заломлення відрізняється від навколишнього середовища.

Оптична лінза – прозоре тіло, обмежене двома заломлюючими поверхнями, одна з яких може бути плоскою.

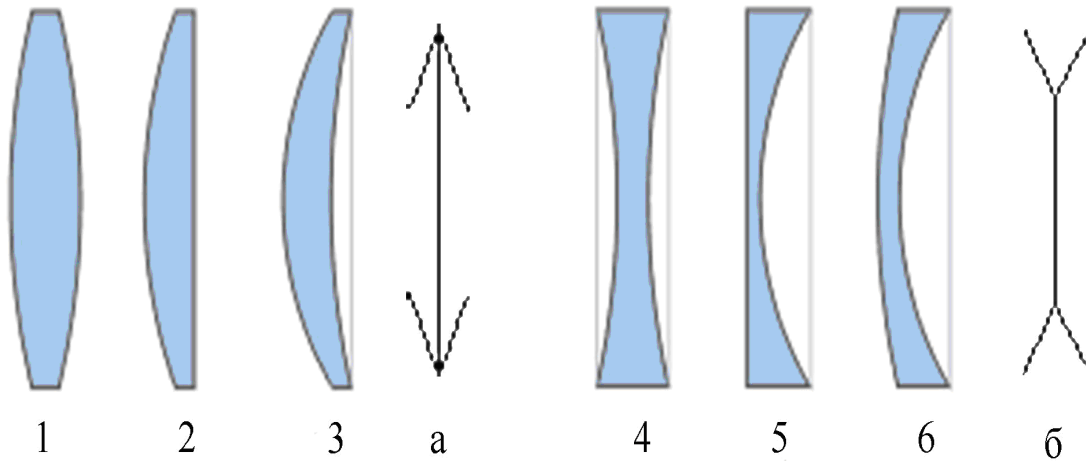


Рис.6.5. Тонкі лінзи

Залежно від розташування центрів сферичних поверхонь та їхнього радіусу розрізняють наступні типи лінз (рис.6.5): двовипукла лінза, плоско-випукла лінза, збірний меніск, двоввігнута лінза, плоско-ввігнута лінза, розсіювальний меніск.

В залежності від того, сходяться чи розходяться паралельні пучки променів після проходження лінзи, лінзи поділяють на збиральні й розсіювальні.

Якщо товщина лінзи значна і менша від радіуса її кривизни, то таку лінзу називають тонкою. Якщо паралельний пучок променів, що падають на поверхню лінзи, лінза збирає в одній точці (фокусі), то її називають збиральною (рис.6.6).

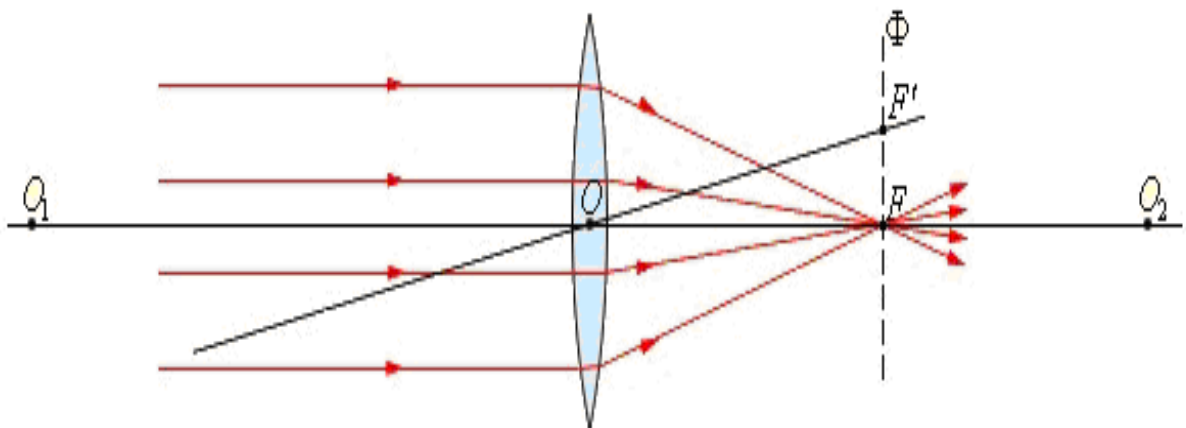


Рис.6.6. Хід променів через збиральну лінзу.

Якщо ж паралельний пучок променів, який падає на лінзу, лінза розсіює, то її називають розсіювальною (рис.6.7.).

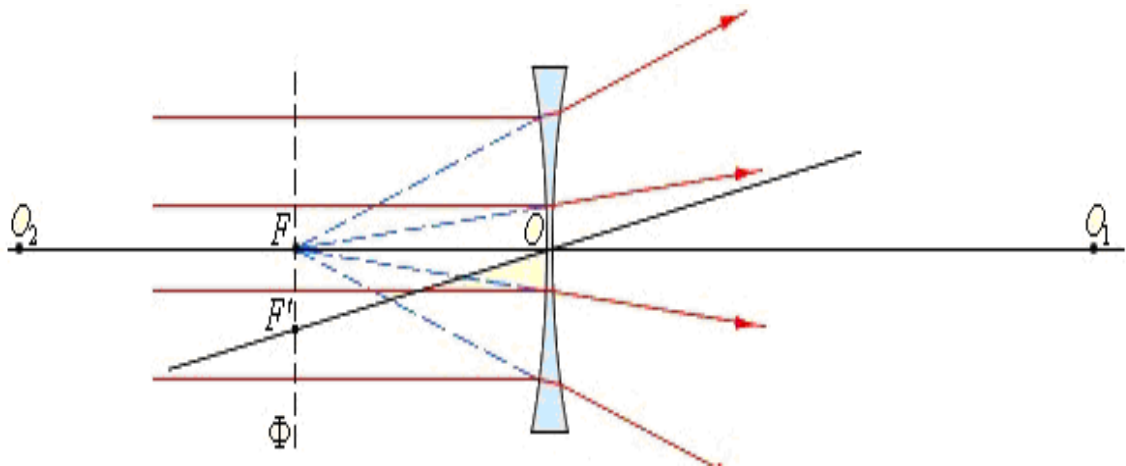


Рис.6.7. Хід променів через розсіювальну лінзу.

Після проходження такої лінзи паралельні промені рівномірно розходяться так, що їх продовження перетинаються в уявній точці – фокусі. У збиральній лінзі фокус буде дійсним, а в розсіювальній - уявним.

Центр лінзи називають оптичним центром. Пряма лінія, яка проходить через обидва фокуси лінзи і її центр, перпендикулярно до площини лінзи, називається головною оптичною віссю, а будь-яка інша пряма, яка проходить через центр лінзи – побічною віссю. Дві площини, паралельні головній площині з обох боків лінзи, які проходять через фокуси, називають фокальними площинами. Точки перетину побічних осей з ними називають побічними фокусами. У цих точках збігаються паралельні промені (для розсіювальних лінз – їх продовження після проходження лінзи), що утворюють паралельний до даної побічної осі пучок променів.

Відстань від фокуса до оптичного центра називають фокусною відстанню лінзи (F). Фокусна відстань збиральної лінзи є додатною, а розсіювальної - від'ємною. Величину, обернену до фокусної відстані, називають оптичною силою лінзи D .

$$D = \frac{1}{F}, [D] = 1/\text{м} = 1 \text{ дптр.} \quad (6.8)$$

Оптична сила лінзи дорівнює одній діоптрії, якщо її фокусна відстань дорівнює одному метру.

Якщо d – відстань від предмета до лінзи (див. рис.2, 3), то f – відстань від лінзи до зображення на екрані, F – фокусна відстань, то розміщення предмета і його зображення можна визначити за формулою тонкої лінзи:

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm D' \quad (6.9)$$

Користуючись формулою слід враховувати правило знаків:

- 1) якщо лінза розсіювальна, то величину F беруть зі знаком "-".
- 2) якщо лінза дає уявне зображення, то і f також беруть з "-".

3) якщо предмет уявний, то і d беруть зі знаком "-".

Якщо оптична система складається із двох центрованих лінз (D_1, D_2), розміщених близько одна до одної, то справедливою є така формула:

$$D_{\text{системи}} = D_1 + D_2 - \delta D_1 D_2, \quad (6.10)$$

де D_1, D_2 – оптична сила відповідно першої і другої лінз; δ - відстані між оптичними центрами тонких лінз. Для двох близьких лінз останнім додатком можна знехтувати.

З урахуванням сказаного для ока з дефектами зору можна записати такі дві залежності:

а) Для нормального ока

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a'} = D \quad (6.11)$$

де a_1 – відстань найкращого зору, D – оптична сила ока.

б) Для озброєного ока

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{a'} = D + D_{\text{ок}} \quad (6.12)$$

де $d = 25$ см – відстань найкращого зору ока, $D_{\text{ок}}$ – оптична сила окуляра, a' – відстань від оптичного центра ока до сітківки (змінюється мало).

Визначимо оптичну силу окуляра:

$$D_{\text{ок}} = \frac{1}{d} - \frac{1}{a_1} \quad (6.13)$$

Якщо лінзи розміщені в різних точках простору, то спочатку будують зображення першої лінзи. Це зображення служить предметом для другої лінзи і так далі. Повторюючи цей процес необхідну кількість разів, знаходять потрібне зображення для всієї оптичної системи.

Оптична сила лінзи характеризує її заломлюючу здатність. Оптичну силу лінзи можна розрахувати за формулою:

$$\frac{1}{F} = \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (6.14)$$

де n_1, n_2 – абсолютні показники заломлення матеріалу з якого виготовлена лінза і середовища в якому знаходиться вона; R_1, R_2 – радіуси сферичних поверхонь лінзи. При цьому радіус опуклої поверхні вважається додатнім, радіус вгнутої – від'ємним.

Система лінз, центри сферичних поверхонь яких лежать на головній оптичній осі називається центрованою. Оптична сила системи лінз, які

дотикаються між собою, рівна алгебраїчній сумі оптичних сил лінз, які складають систему:

$$\frac{1}{F_c} = \pm \frac{1}{F_1} \pm \frac{1}{F_2} \pm \dots \quad (6.15)$$

$$D_c = \pm D_1 \pm D_2 \pm \dots \quad (6.16)$$

де F_1, F_2 – фокусні відстані лінз, що складають систему, F_c – фокусна відстань системи лінз, D_c – їх оптична сила.

Для характеристики зображення, утвореного лінзою, потрібно знати її лінійне збільшення K :

$$K = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} \quad (6.17)$$

де H – лінійний розмір зображення, h – лінійний розмір предмету.

Величина світлового потоку, який пройшов через лінзу, буде пропорційна площі лінзи, тобто квадрату діаметра лінзи D^2 . Освітленість екрану, на якому утворюється зображення, буде тим більше, чим ближче екран лінзи, тобто обернено пропорційна f^2 . При достатній віддаленості предмету від лінзи можна наближено вважати, що зображення буде знаходитись в фокальній площині, тобто: $f = F$. Таким чином, освітленість зображення одержаного з допомогою лінзи, буде пропорційна величині $(D/F)^2$, яка називається світлосилою лінзи.

У побудові зображень бере участь величезна кількість променів, хід багатьох з яких передбачити дуже важко, але в цьому і немає потреби. Для того, щоб визначити, яким буде зображення, достатньо знати хід двох променів.

Зображення у лінзах бувають прямими й переверненими, дійсними й уявними, збільшеними й зменшеними.

Положення і зображення предмета створеного лінзою можна визначити за допомогою геометричних побудов. Для цього використовують властивості деяких стандартних променів, хід яких відомий. Це промені, що проходять через оптичний центр або один з фокусів лінзи, а також промені, паралельні головній або однієї з побічних оптичних осей. Приклади таких побудов представлені на рис.6.8 і рис.6.9.

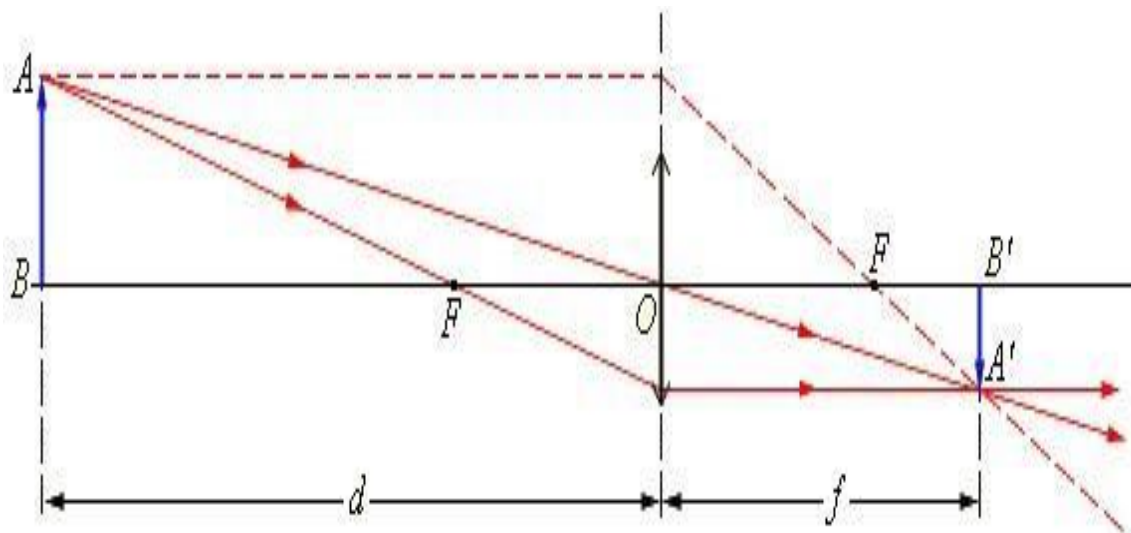


Рис.6.8а. Побудова зображення у збиральній лінзі.

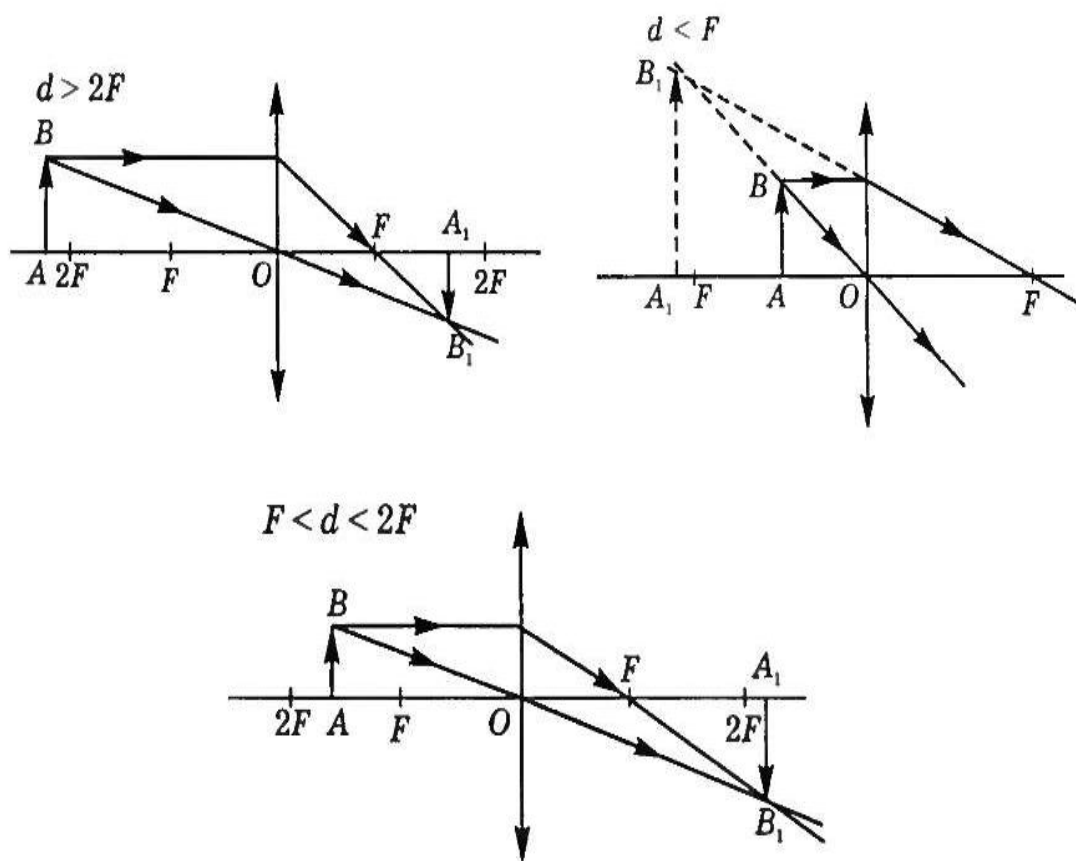


Рис.6.8.б. Побудова зображення у збиральній лінзі (залежно від положення предмета).

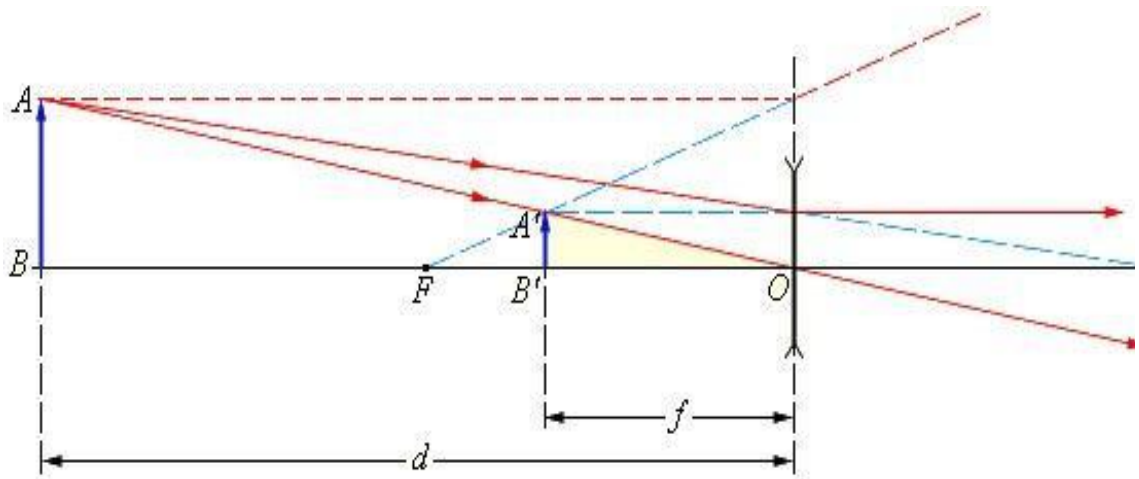


Рис.6.9. Побудова зображення у розсіювальній лінзі.

Варто звернути увагу на те, що деякі зі стандартних променів, використаних на рис.6.8 і рис.6.9 для побудови зображень, не проходять через лінзу. Ці промені реально не беруть участь в утворенні зображення, але вони можуть бути використані для побудов.

Таблиця 6.1.Зображення, утворюване збиральною лінзою ($F>0$).

Відстань до предмета, d	Відстань до зображення, f	Розмір зображення	Вид зображення
1. $d > 2F$	$2F > f > F$	$H < h$	Дійсне, обернене
2. $d = 2F$	$f = 2F$	$H = h$	
3. $2F > d > F$	$f > 2F$	$H > h$	Те саме
4. $d = F$	$f = \infty$	$H = \infty$	Те саме
5. $d < F$	$f < 0$	$H > h$	Те саме Уявне, пряме
Зображення, утворене розсіювальною лінзою ($F<0$)			
6. d довільне	$f < 0$	$H < h$	Уявне, пряме

6.2. ОСНОВИ ХВИЛЬОВОЇ ОПТИКИ

6.2.1. Хвильові властивості світла

Світло за своєю природою є електромагнітною хвилею, тобто світло – це процес розповсюдження електромагнітної взаємодії в просторі у вигляді змінних зв'язаних між собою електричного та магнітного полів. Електромагнітне поле утворюється електричним і магнітним полями, які взаємно індукують один одного. Електромагнітні хвилі в природі мають різну частоту і довжину хвилі. Залежно від цих параметрів їх поділяють на діапазони. Всі електромагнітні хвилі мають спільну природу, проте відрізняються один від одного своїми фізичними

властивостями, застосуванням і характером впливу на живі організми. За діапазонами виділяють: радіохвилі, інфрачервоне випромінювання, видиме світло, ультрафіолетової випромінювання, рентгенівське випромінювання і гамма-випромінювання.

Видиме світло займає досить вузьку частину спектру електромагнітних хвиль, яка сприймається органом зору. Її границі – від 780 нм (червоне світло) до 400 нм (фіолетове світло). Хвильова природа світла проявляється в таких явищах як інтерференція, дифракція та поляризація.

6.2.1.1. Інтерференція світла

При розгляді питань, що стосуються роздільної сили оптичних приладів метод геометричної оптики не придатний.

Інтерференція – накладання когерентних хвиль, при якому відбувається підсилення чи послаблення амплітуди результуючих коливань.

Когерентні хвилі – це хвилі, що мають однакову частоту і сталу різницю фаз.

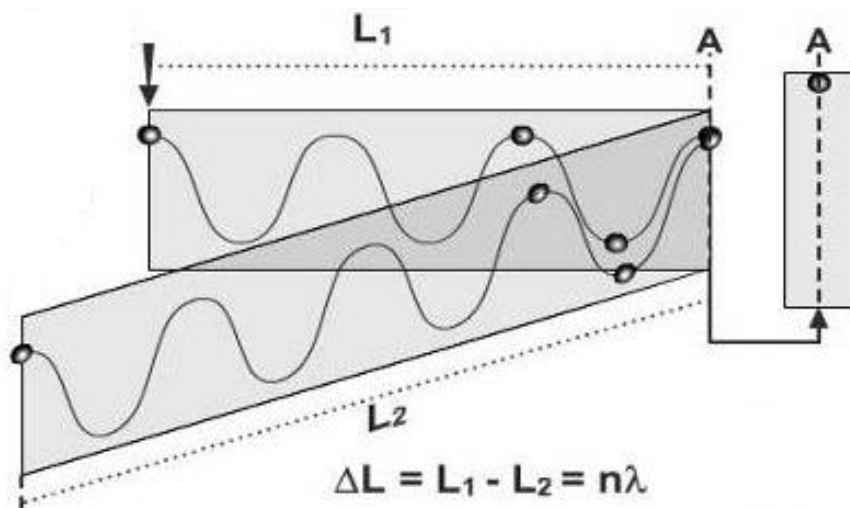


Рис. 6.10. Когерентність хвиль.

Нехай у точці \$A\$ накладаються дві хвилі однакової частоти, що пройшли перед цим різні відстані \$l_1\$ і \$l_2\$ від своїх джерел (рис.6.10). Амплітуда результуючого коливання залежить від величини, що називається різницею ходу хвиль.

$$\Delta l = l_1 - l_2 \quad (6.18)$$

$$\Delta = n_1 l_1 - n_2 l_2 \quad (6.19)$$

тут – \$\Delta l\$ – різниця ходу, \$l_1, l_2\$ – шлях хвиль, \$\Delta\$ – оптична різниця ходу; \$n_1, n_2\$ – показники заломлення середовищ.

Умова максимуму інтенсивності інтерферуючих хвиль:

$$\Delta l = m\lambda, \dots m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6.20)$$

λ – довжина хвилі, m – довільне ціле число
Умова мінімуму:

$$\Delta l = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6.21)$$

У інших точках простору спостерігається часткове посилення або послаблення результуючої хвилі.

При спостереженні явища інтерференції у монохроматичному світлі з певною довжиною хвилі, інтерференційна картина являє собою чергування світлих і темних ділянок. Інтерференційна картина у білому світлі є забарвленою, бо кожна складова білого світла дає посилення і послаблення у певних місцях екрана.

Фізична основа роботи приладів для спостереження явища інтерференції світла така: світло від одного джерела поширюється до екрана двома різними шляхами, внаслідок чого утворюється певна різниця ходу променів, і якщо вона у відповідних точках екрана дорівнює $2k\lambda / 2$ або $(2k + 1)\lambda / 2$, то на екрані спостерігатиметься чітка інтерференційна картина.

За допомогою інтерферометрів, в основі яких лежить явище інтерференції, з великою точністю визначають довжини хвиль, показники заломлення речовин, якість оптичних поверхонь.

Одним із приладів для спостереження явища інтерференції світла є біпризма Френеля (рис.6.11).

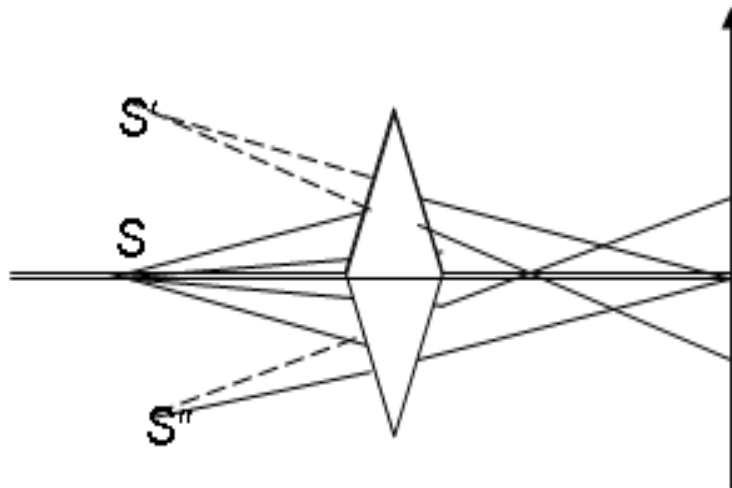


Рис. 6.11. Хід променів у біпризмі Френеля.

Вона складається з двох однакових скляних призм з малими заломлюючими кутами і загальною основою. Внаслідок заломлення в біпризмі світловий промінь роздвоюється. Світло поширюється так, ніби в точках S' і S'' розміщені два когерентні джерела.

Світло, що іде від джерела S , роздвоюється. Внаслідок заломлення в двох половинах біпризми світло доходить до точок екрана різними шляхами. В ділянці перекриття хвиль спостерігаємо інтерференційну картину.

Оскільки положення інтерференційних смуг залежить від довжини хвилі, то, провівши відповідні вимірювання, можна визначити її довжину.

Явище інтерференції можна спостерігати за допомогою дзеркала Ллойда, яке роздвоює світловий промінь шляхом відбивання його від дзеркала. Якщо у випадку з біпризмою Френеля обидва когерентні джерела були уявними, то у даному випадку одне когерентне джерело уявне, а друге – дійсне (рис.6.12).

Розглянемо випадок коли, на тонку прозору плівку (пластинку) падає пучок променів (рис.6.13). Вважатимемо, що показник заломлення плівки рівний n , а середовище яке оточує плівку – одиниці. У точці C відбиті промені відповідно від передньої і задньої стінок плівки (пластинки) мають оптичну різницю ходу (рис.6.13)

$$\delta = (AB + BC)n - \left(CD + \frac{\lambda}{2} \right). \quad (6.22)$$

При відбиванні світла від оптично більш густого середовища фаза хвилі змінюється на π , що відповідає зміні оптичної різниці ходу на $\frac{\lambda}{2}$.

Якщо різниця ходу променів δ рівна цілому числу довжин хвиль λ падаючого світла, то промені 1 і 2 максимально підсилюють один одного. Якщо ж δ рівне непарному числу півхвиль, то всі відбиті від її поверхні промені взаємно погасяться і плівка буде здаватись темною.

Подібного типу інтерференційна картина спостерігається при відбитті світла від дзеркала, від тонких прозорих пластинок і плівок.

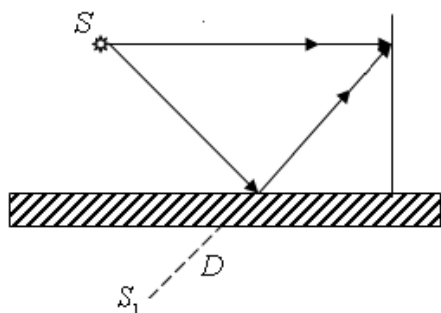


Рис. 6.12. Хід променів у дзеркалі Ллойда.

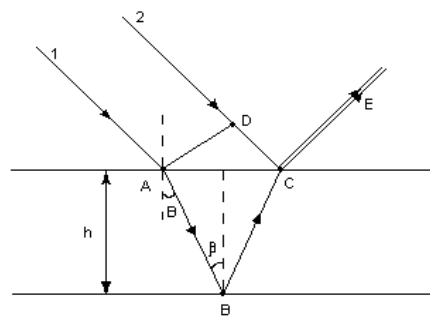


Рис. 6.13. Хід променів у тонкій прозорій плівці.

Кільцями Ньютона називається інтерференційна картина, яка утворюється на плосковипуклій лінзі, що дотикається до плоскопаралельної пластинки. Темна пляма в місці дотику оточена світлими і темними кільцями в монохроматичному світлі або кольоровими у білому. Із збільшенням товщини повітряного прошарку кольорові смуги вужчають, а потім зовсім зникають.

За допомогою спеціальних приладів – інтерферометрів, в основі яких лежить явище інтерференції, з великою точністю визначають довжини хвиль, показники заломлення речовини, якість оптичних поверхонь.

6.2.1.2. Просвітлення оптики

Винахідником способу поліпшення якості оптичних приладів, що отримав назву «просвітлення оптики» був український фізик Олександр Смакула (9.09.1900 – 17.05.1983), який народився у селі Добриводи Збараського району на Тернопільщині. Суть винаходу полягає у тому, що поверхні лінз оптичних пристроїв (фотоапаратів, біноклів, далекомірів, мікроскопів, перископів, телескопів та ін.) покривають спеціальним тонким шаром певного матеріалу, що значно зменшує відбивання світла від поверхні лінзи і набагато збільшує контрастність зображення. Гасіння відбитих від різних поверхонь світлових променів відбувається тоді, коли амплітуди хвиль однакові, а різниця фаз хвиль дорівнює π , що відповідає їх різниці ходу $\lambda / 2$. Амплітуди хвиль будуть однаковими при виконанні рівності $n_{\text{пл}} = \sqrt{n_{\text{ск}}}$, де $n_{\text{пл}}$ – показник заломлення прозорої металевої плівки, $n_{\text{ск}}$ – показник заломлення скляної поверхні. Різниця фаз хвиль дорівнюватиме π , якщо оптична товщина плівки буде задовільняти умові:

$$n_{\text{пл}} \cdot d_{\text{пл}} = (2k + 1) \frac{\lambda}{4}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (6.23)$$

О. Смакула є автором понад 100 наукових праць. Помер учений у місті Обурн, штат Массачусетс, США.

Враховуючи визначні заслуги Олександра Смакули у розвитку науки ХХ - го століття, рішенням 30-ї сесії Генеральної конференції ЮНЕСКО 2000 рік був оголошений роком О. Смакули.

6.2.1.3. Дифракція світла

Явище дифракції полягає у відхиленні світлових променів від прямолінійного поширення в середовищах з перешкодами (дуже вузькі отвори, краї з перешкодами). В області геометричної тіні і поблизу неї в освітленій частині поля зору спостерігається така ж картина, як і при інтерференції когерентних світлових пучків. Це дає змогу зробити висновок, що основою явищ дифракції та інтерференції є хвильові властивості світла. Явище дифракції свідчить про порушення законів геометричної оптики. Воно спостерігається на відстанях $l = D^2 / 4D\lambda$ від перешкоди, де D – лінійні розміри отвору перешкоди, λ – довжина хвилі.

Дифракція світлових хвиль не дозволяє розрізняти найдрібніші деталі предметів за допомогою оптичних приладів. Найменша відстань між двома точками, при якій їх зображення не зливаються, називається роздільною відстанню оптичного приладу (δ). Для мікроскопа роздільна відстань $\delta \geq \frac{\lambda}{2n \sin u}$, де u – апертурний кут (половина кута між крайніми променями, які

падають від точки предмета на об'єктив і попадають в око спостерігача), n – показник заломлення середовища.

При дифракції монохроматичного світла на вузькій довгій щілині ВС (рис. 6.15) утворюється смугаста дифракційна картина.

При цьому в центрі екрану E буде світла смуга (нульовий максимум), положення темних смуг визначається умовою: $a \sin \alpha = \pm n \lambda (n = 1, 2, 3 \dots)$, а світлих (крім нульового максимуму) – умовою $a \sin \alpha = \pm (2n + 1) \lambda / 2 (n = 1, 2, 3 \dots)$, де a – ширина щілини, α – кут між нормаллю до щілини і положенням відповідного мінімуму чи максимуму, λ – довжина хвилі, n – порядок максимуму або мінімуму. У точці F_φ на екрані збираються всі паралельні промені, що падають на лінзу МЛ під кутом φ . Біле світло дає замість світлих і темних смуг райдужні (забарвлені) смуги.

Дифракційна ґратка – сукупність великої кількості вузьких щілин, розділених непрозорими проміжками.

Якщо ширина прозорих щілин – a , ширина непрозорих проміжків – b , то величина $d = a + b$ називається періодом (сталюю) дифракційної ґратки.

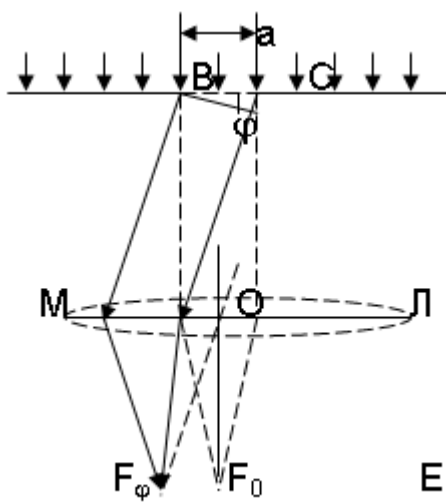


Рис. 6.14. Дифракція на щілині.

Величина $\delta = d \sin \varphi$ – оптична різниця ходу між променями BM і DN, що йдуть від сусідніх щілин (рис. 6.15).

Головні максимуми при дифракції на ґратці спостерігаються під кутами, що задовільняють умову:

$$\sin \varphi = \pm n \lambda, (n = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (6.24)$$

Умова дифракційних мінімумів:

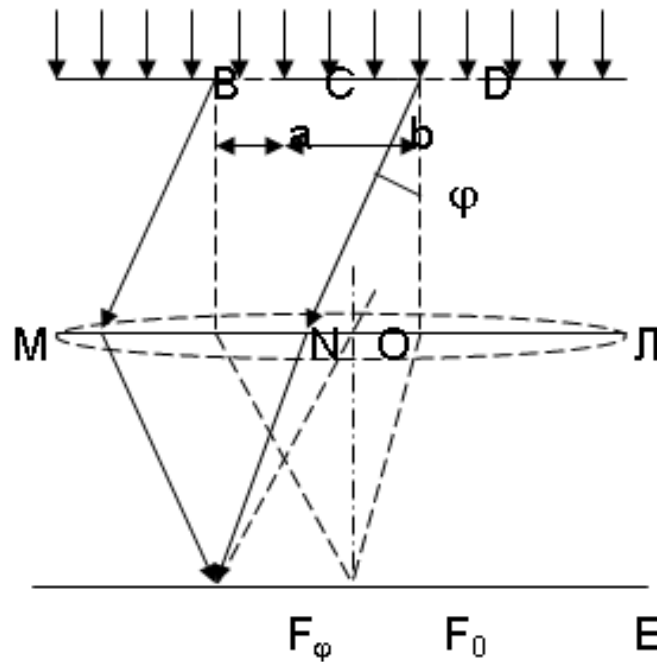


Рис. 6.15. Дифракційна решітка.

$$d \sin \varphi = (2n + 1) \lambda / 2, \quad (n = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (6.25)$$

Між головними дифракційними максимумами розміщені $N - 1$ мінімуми і $N - 2$ слабкі вторинні максимума, де N – число щілин у ґратці.

Знаючи період дифракційної ґратки, можна визначити довжину світлової хвилі. Вимірявши величину кута φ , що визначає відповідне положення максимуму, знайдемо:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{n} \quad (6.26)$$

6.2.1.4. Поляризація світла

Видиме світло – це поперечні електромагнітні хвилі з довжинами від 380 до 760 нм, оскільки напрям коливань векторів напруженості електричного \vec{E} і магнітного \vec{H} полів перпендикулярні до швидкості поширення світла і один до одного (рис.6.16). Розрізняють світло природне і поляризоване. Світло, у якого вектор напруженості електричного поля \vec{E} змінює свою орієнтацію у просторі, називається природним. Це зумовлено тим, що ми одночасно спостерігаємо випромінювання величезної кількості атомів. Джерелами світла є Сонце, лампи розжарення, випромінювання нагрітих тіл тощо. Світло, у якого вектор напруженості електричного поля \vec{E} не змінює своєї орієнтації у не оптично-активному середовищі, називається поляризованим.

Площину, що проходить через вектор напруженості електричного поля \vec{E} і вектор швидкості світла, називають площиною поляризації. Світло може поляризуватися при відбиванні, заломленні і розсіюванні. Око людини не відрізняє поляризованого світла від природного, тому для дослідження поляризації світла використовують поляризаційні прилади – поляриметри.

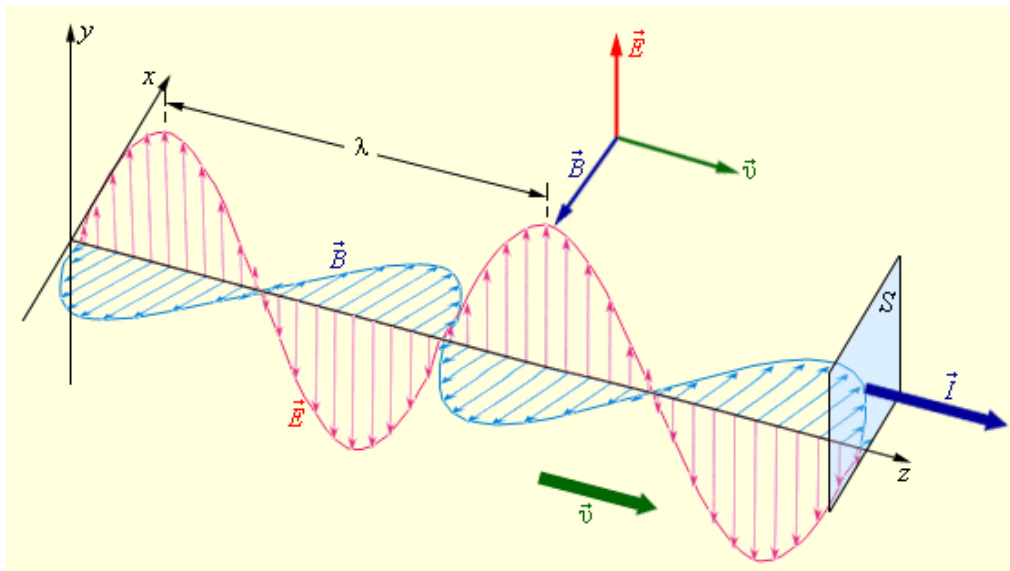


Рис. 6.16. Поширення поперечних електромагнітних хвиль.

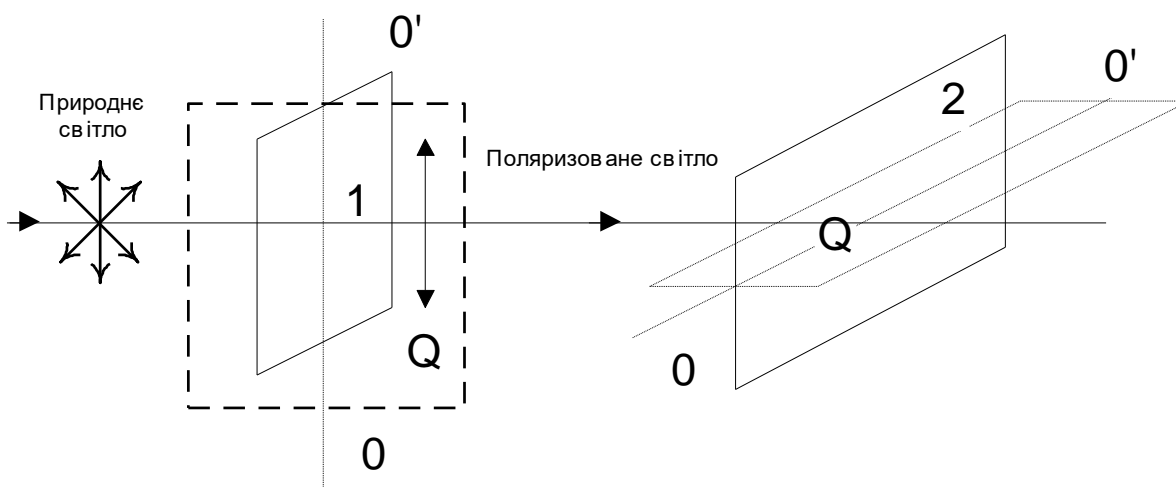


Рис. 6.17. Схема отримання поляризованого світла.

До природних кристалів, які поляризують світло, належить турмалін. Природний промінь, проходячи через пластинку турмаліну (рис.6.17), вирізану паралельно оптичній осі $O'O'$ кристала, що являє собою напрямок відносно якого атоми (чи іони) кристалічної решітки розташовані симетрично (в деяких кристалах таких напрямків може бути два), повністю поляризується. Якщо за пластинкою 1 розташована інша пластинка турмаліну 2, яка орієнтована так, що її оптична вісь перпендикулярна оптичній осі пластинки 1, то через другу пластинку промінь не пройде, оскільки коливання вектора напруженості електричного поля E будуть перпендикулярні до головної площини пластинки 2, тобто площини, що містить оптичну вісь і промінь. Якщо ж оптичні осі

пластинок 1 і 2 складуть кут α , відмінний від 90° , то світло (промінь) проходить через пластину 2. Проте, як видно з рисунка, амплітуда світлових коливань, що пройшли через пластину 2, буде меншою від амплітуди світлових коливань, падаючих на пластинку:

$$E = E_0 \cdot \cos\alpha \quad (6.27)$$

Оскільки інтенсивність світла пропорційна квадрату амплітуди світлових коливань, то

$$I = I_0 \cdot \cos^2\alpha \quad (6.28)$$

де I_0 – інтенсивність світла, що падає на пластинку 2,
 I – інтенсивність світла, що проходить через пластинку.
 Співвідношення (6.28) називається законом Малюса.

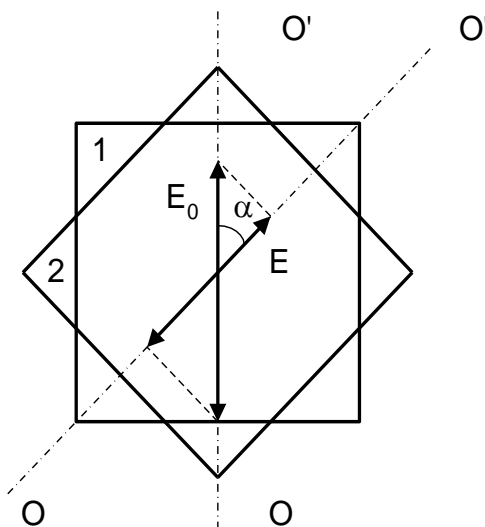


Рис. 6.18. Амплітуда світлових коливань.

Пластинка 1, що поляризує природне світло, називається поляризатором, а пластинка 2, за допомогою якої змінюється інтенсивність поляризованого світла – аналізатором (рис.6.18). Прилад, що складається з поляризатора і аналізатора, що дозволяє знайти кут повороту площини поляризації світла називається поляриметром.

Найчастіше для отримання поляризованого світла використовують явище подвійного променезаломлення. При цьому явищі відбувається роздвоєння світла на два промені (звичайний і незвичайний), що йдуть у різних напрямках. Промені внаслідок анізотропії кристалів поширюються з різними швидкостями.

Для отримання поляризованого світла необхідно розвести звичайний і незвичайний промені на певний кут. Це досягається в призмі Ніколя, що являє собою 4-гранну призму, яка складається із двох 3-гранних призм, виготовлених з монокристалів ісландського шпату і склеєних канадським бальзамом (рис. 6.19).

Природне світло, падаючи на грань АВ призми із ісландського шпату, зазнає подвійного променезаломлення, утворюються звичайний і незвичайний промені, які падають на грань АС – межу двох середовищ: ісландського шпату і канадського бальзаму, речовини з меншим показником заломлення ніж у ісландського шпату; крім того, кут падіння звичайного променя більший, ніж у незвичайного і більший від граничного кута повного внутрішнього відбивання для ісландського шпату. Оскільки кут падіння незвичайного променя на грань АС менший від граничного кута повного внутрішнього відбивання, промінь проходить шар канадського бальзаму і, заломлюючись у призмі АСD, виходить повністю поляризованим. Звичайний промінь зазнає повного внутрішнього відбивання, попадає на грань ВС і там поглинається чорною фарбою, що її покриває.

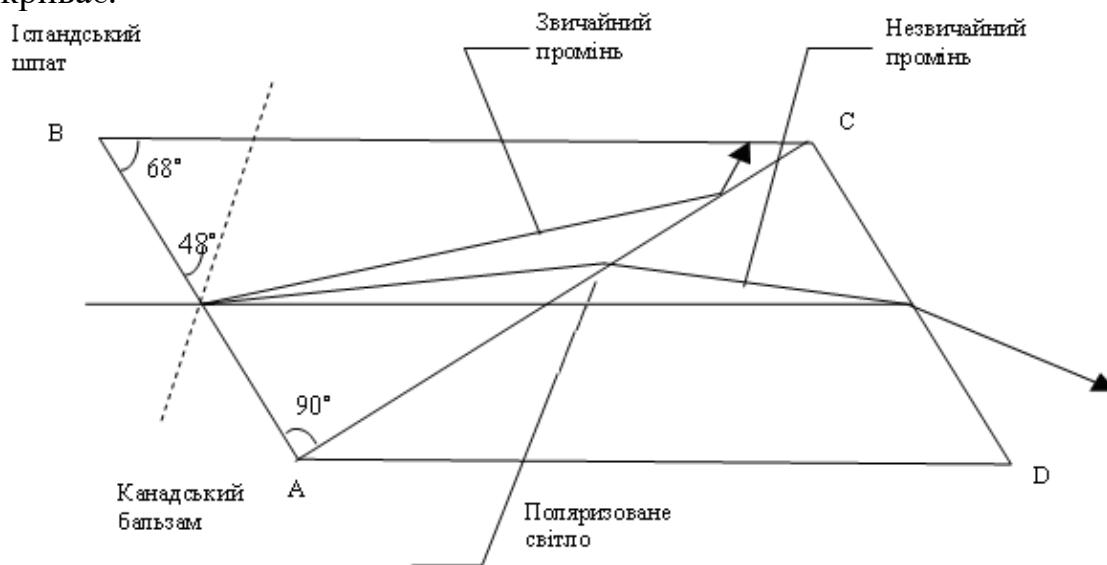


Рис. 6.19. Хід променів у призмі Ніколя.

При проходженні поляризованого світла через певні середовища площина коливань вектора \vec{E} повертається на деякий кут φ . Це явище називається явищем повороту площини поляризації і обумовлене структурою речовини, будовою молекул. Речовини, які здатні повертати площину поляризації, називаються оптично-активними речовинами. Величина кута повороту φ площини поляризації пропорційна довжині ходу променя у речовині, а у випадку розчину залежить і від концентрації оптично-активної речовини. Ця залежність виражається формулою:

$$\varphi = \alpha l C \quad (6.29)$$

тут φ – кут повороту площини поляризації, l – довжина ходу променя у розчині, C – концентрація речовини у розчині, α – питоме обертання, що характеризує кут повороту площини поляризації світла певної довжини хвилі на одиницю відстані, пройдені світлом у даному розчині. Питоме обертання чисельно рівне куту повороту площини поляризації шаром розчину одиничної товщини, що містить 1 г речовини на 100 см^3 розчину. Знаючи кут повороту площини

поляризації φ , питоме обертання λ і довжину кювету l , можна знайти концентрацію розчину.

Величина α залежить від роду розчиненої речовини, від вибору розчинника і обернено пропорційна квадрату довжини хвилі (закон Біо):

$$\alpha = \frac{b}{\lambda^2} \quad (6.30)$$

Цю залежність використовують для дослідження структури білків та нуклеїнових кислот, оскільки значна кількість біомолекул містить оптично активні центри. Прилади для дослідження таких структур називаються спектрополяриметрами.

6.2.1.5. Поглинання світла

Світлова хвиля, проходячи через речовину, поступово згасає. Цей процес супроводжується поглинанням, відбиванням і розсіюванням енергії. Перехід енергії світлової хвилі у різні види внутрішньої енергії речовини називають поглинанням світла.

Розглянемо однорідну речовину у вигляді паралелепіпеда товщиною d , (рис. 6.20), на який падає монохроматичне світло з довжиною хвилі λ .

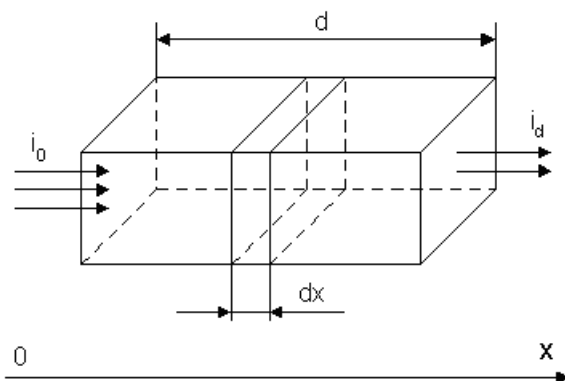


Рис. 6.20. Поглинання світла шаром речовини.

Нехай I_0 – інтенсивність падаючого світла.

На відстані X від поверхні умовно виділимо нескінченно тонкий шар речовини dx .

Інтенсивність світла dI , поглинутого цим шаром, пропорційна інтенсивності падаючого на нього світла і кількості атомів (молекул), що знаходяться в цьому шарі, яка пропорційна товщині шару dx :

$$dI = -x_\lambda \cdot I dx, \quad (6.31)$$

тут x_λ – монохроматичний показник поглинання, який залежить від роду речовини. Знак мінус означає, що інтенсивність світла в напрямку OX зменшується.

Проінтегруємо (6.20), попередньо розділивши змінні:

$$\int_{I_0}^{I_\alpha} \frac{dI}{I} = -x_\lambda \int_0^d dx$$

В результаті одержимо:

$$\ln I_\alpha = \ln I_0 - x_\lambda d. \quad (6.32)$$

Звідси:

$$I_\alpha = I_0 \cdot e^{-x_\lambda d}. \quad (6.33)$$

Рівняння (6.33) називають законом Бугера, згідно якого інтенсивність світла при проходженні через речовину зменшується за експоненціальним законом. Виходячи із формули (6.33) можна дати інше формулювання закону Бугера: в шарах однорідного середовища однакової товщини поглинається одна і та ж частина енергії.

Фізичний зміст монохроматичного показника поглинання такий: він чисельно дорівнює оберненій товщині шару d , проходячи через який інтенсивність світла зменшується в e разів.

Бер встановив, що для забарвлених прозорих розчинів монохроматичний показник поглинання пропорційний концентрації речовини, тобто:

$$x_\lambda = \alpha \cdot C \quad (6.34)$$

де α – показник поглинання світла; C – концентрація.

Підставивши (6.34) у (6.33), отримаємо закон Бугера–Бера:

$$I_d = I_0 e^{-\alpha \cdot C \cdot d}. \quad (6.35)$$

Відношення $\frac{I_d}{I_0} = \tau$ називають коефіцієнтом пропускання чи прозорістю розчину, а величину $D = \lg \frac{I_0}{I_d} = -\lg \tau$ – оптичною густиною. Оптична густина, рівна 1, відповідає пропусканню 0.1 чи 10%. Оптичній густині $D = 2$ відповідає 1% пропускання.

Враховуючи, що $\ln x = 2.3 \lg x$, з (6.35) отримуємо:

$$D = \frac{1}{2.3} \alpha c d = \varepsilon c d \quad (6.36)$$

де $\varepsilon = \alpha/2.3$ – стала для даного розчину величина, яка називається молекулярною оптичною густиною.

Оптична густина розчину пропорційна концентрації речовини і товщині шару, в якому відбувається поглинання.

На законі Бугера–Бера ґрунтується один з методів визначення концентрації речовини в забарвлених розчинах.

Якщо два розчини однієї речовини з концентраціями C_1 і C_2 і товщинами шарів відповідно d_1 і d_2 поглинають світло в однаковій мірі, то їхні оптичні густини рівні ($D_1 = dD_2$).

З формули (6.36) випливає, що

$$C_1 d_1 = C_2 d_2. \quad (6.37)$$

Це співвідношення лежить в основі концентраційної колориметрії.

Для визначення концентрації розчину використовують фотоелектроколориметр, у якому один фотоелемент освітлюють променями, що пройшли через розчин, а інший – променями, які пройшли через розчинник, і за різницею двох фотострумів визначають концентрацію розчину.

Залежність оптичної густини від довжини хвилі називають спектром поглинання. Графік цієї залежності являє собою криву з максимумами в певних інтервалах довжин хвиль, у яких відбувається сильне поглинання. У білків максимум поглинання припадає на довжину хвилі 280 нм, у нуклеїнових кислот – 260 нм, хлорофіл має два максимума поглинання в інтервалах 400 – 440 нм і 600 – 630 нм (рис. 5.38), тобто майже у всьому діапазоні видимого світла, крім зеленого. Тому то листя рослин має зелене забарвлення.

Приклади розв'язку задач до 6 розділу

Задача 6.1. Кут відхилення променів зеленого світла у спектрі другого порядку, отриманого з допомогою дифракційної решітки з періодом 10 мкм, дорівнює $6^{\circ}00'$. Яка довжина хвилі зеленого світла?

Розв'язок:

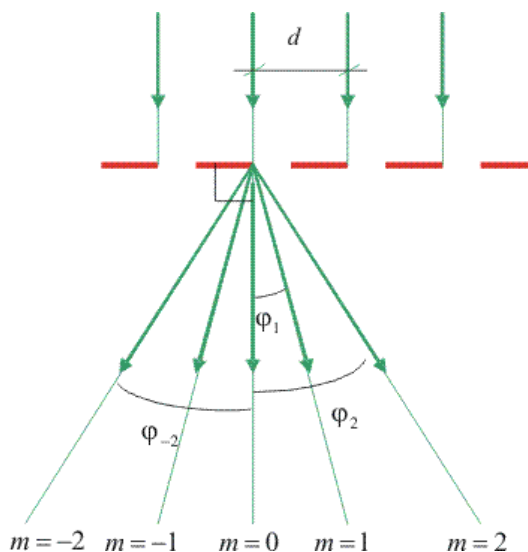
Дано: $d = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ $m = 2$ $\varphi = 6^{\circ}00'$
$\lambda - ?$

Період решітки

$$d = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м} \gg 760 \text{ нм} = 0.760 \cdot 10^{-6} \text{ м} = \lambda_{\text{ч}} \cdot \lambda_{\text{з}},$$

тобто розміри перешкоди істотно більші від максимально можливої довжини хвилі світла. Якщо спостереження вести дуже близько біля решітки, дифракція помітна не буде. Однак, якщо екран (око) розмістити далеко від решітки ($l \gg d$), що завжди має місце в реальності, то відхилення від прямолінійності світла буде виражене яскраво (ще раз повертаємось до досліду з дифракції світла на решітці, пропускаючи його крізь

шкілну дифракційну решітку $d = (1/100\text{мм} = 10\text{мкм})$, попередньо поставивши на його шляху зелений фільтр).



Умова спостереження дифракційного максимуму на решітці:

$$d \cdot \sin\varphi = m \cdot \lambda, \dots \dots m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Знаходимо λ :

$$\lambda = \frac{d}{m} \sin\varphi.$$

Проводимо обрахунок:

$$\lambda = \frac{10 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{2} \sin 6^{\circ} 00' = 0.520 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 520 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 520 \text{ нм}.$$

Відповідь. Довжина хвилі зеленого світла 520 нм. Взагалі кажучи, світло спричиняє відчуття зеленого кольору, якщо довжина його хвилі у вакуумі $500 \leq \lambda \leq 550 \text{ нм}$.

Задача 6.2. Довжина світлової хвилі в склі становить 450 нм. Світло в склі поширюється зі швидкістю $1.8 \cdot 10^5 \text{ км/с}$. Визначити частоту коливань світла, абсолютний показник заломлення скла і довжину хвилі світла у вакуумі.

Дано:

$$\begin{aligned} \lambda_c &= 4.5 \cdot 10^{-7} \text{ м} \\ v_c &= 1.8 \cdot 10^8 \text{ м/с} \\ c &= 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \end{aligned}$$

$$v, n_c, \lambda_0 - ?$$

Розв'язок:

Частоту світлової хвилі можна знайти з формули

$$v = \frac{v_c}{\lambda_c} = \frac{1.8 \cdot 10^8}{4.5 \cdot 10^{-7}} = 4 \cdot 10^{14} \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Під час переходу світла з повітря в скло швидкість і довжина хвилі змінюються, а частота залишається незмінною; вона визначає колір світла.

Показник заломлення скла знайдемо за формулою

$$n = \frac{c}{v_c} = \frac{3 \cdot 10^{-8}}{1.8 \cdot 10^{-8}} = 1.67.$$

Довжину хвилі світла у вакуумі знайдемо за формулою

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^{14}} = 0.75 \cdot 10^{-6}(\text{м}).$$

Відповідь. Частота світлової хвилі $\nu = 4 \cdot 10^{14}(\text{с}^{-1})$, показник заломлення скла $n = 1.67$, довжина хвилі світла у вакуумі $\lambda_0 = 0.75 \cdot 10^{-6}(\text{м})$.

Задача 6.3. Оцінити граничний кут роздільної здатності людського ока, припускаючи, що він обмежується лише дифракцією. Довжина хвилі світла 500 нм (біля центра видимого спектра), а діаметр зіниці $D = 2\text{мм}$. Визначити мінімальну відстань між двома точковими джерелами, які око може розрізнити, якщо вони знаходяться на відстані найкращого зору $L = 25\text{см}$ від спостерігача.

Дано:

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-7}\text{м}$$

$$D = 2\text{мм} = 2 \cdot 10^{-3}\text{мм}$$

$$L = 25\text{см} = 0.25\text{м}$$

$$\theta, d - ?$$

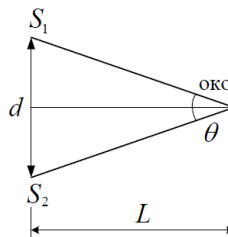
Розв'язок:

Найменшу кутову відстань між двома світлими точками, при якій зображення цих точок у фокальній площині ока можуть бути видні роздільно, знайдемо за формулою

$$R = \frac{1}{\theta} = \frac{D}{1.22\lambda},$$

$$\theta = \frac{1.22 \cdot \lambda}{D} = \frac{1.22 \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-3}} = 3.05 \cdot 10^{-4}(\text{рад}).$$

Використаємо цей результат для визначення мінімальної відстані між двома точковими джерелами, які око може розрізнити (рис.)



$$\text{tg} \frac{\theta}{2} \approx \sin \frac{\theta}{2} = \frac{d}{L}; \quad \frac{\theta}{2} \approx \frac{d}{L}; \quad \theta \approx \frac{d}{L}$$

$$d \approx \theta \cdot L = 3.05 \cdot 10^{-4} \cdot 0.25 \approx 0.763 \cdot 10^{-4}(\text{м})$$

Відповідь. Мінімальна відстань між двома точковими джерелами, які око може розрізняти, якщо вони знаходяться на відстані найкращого зору $L = 25\text{см}$ від спостерігача $0.763 \cdot 10^{-4}(\text{м})$.

Контрольні питання до 6 розділу.

1. Інтерференція і дифракція світла. Дисперсія ?
2. Поглинання і розсіяння світла. Колориметрія?
3. Поляризація світла?
4. Для чого використовують явище інтерференції світла?
5. Як утворюється дифракційний спектр ?
6. У чому полягає метод концентраційної колориметрії?
7. Які лікарські речовини мають здатність обертати площину коливання?



Тестові завдання до 6 розділу.

- | | |
|---|--|
| <p>1. Питома обертальна здатність у СІ вимірюється у</p> <p>А. рад х²/кг;
 Б. рад/м³;
 В. рад х м/кг;
 Г. рад/м;
 Д. рад.</p> <p>2. Які речовини, крім розчину цукру, мають властивість повертати площину поляризації?</p> <p>А. скипидар;
 Б. водяна пара;
 В. мідний купорос;
 Г. винна кислота.
 Д. немає правильної відповіді</p> <p>3. За яким принципом визначають концентрацію зафарбованих розчинів?</p> <p>А. дисперсії світла
 Б. поглинання світла розчинами
 В. за принципом визначення оптичної густини розчину
 Г. визначення сили світлового потоку в цьому середовищі
 Д. визначення коефіцієнта пропускання світла розчинами</p> | <p>4. Оптично активним називається середовище, яке;</p> <p>А. розсіює світло;
 Б. світиться;
 В. поглинає світло;
 Г. здатне поляризувати світло;
 Д. здатне повертати площину плоскополяризованого світла.</p> <p>5. Звичайні і незвичайні промені поляризовані:</p> <p>А. у площинах, які утворюють кут 30 (градусів);
 Б. у площинах, які утворюють кут 60 (градусів);
 В. у площинах, які утворюють кут 10 (градусів);
 Г. у паралельних площинах;
 Д. у взаємно перпендикулярних площинах.</p> <p>6. Від чого залежить кут повороту площини поляризації при проходженні світла через розчин цукру?</p> <p>А. від площі перерізу трубки;
 Б. від густини розчину цукру;
 В. від температури;</p> |
|---|--|



Г. від довжини світлової хвилі;
Д. від довжини трубки, в якій міститься розчин цукру.

7. Від чого залежить кут повороту площини поляризації при проходженні світла через розчин цукру?

А. при відбиванні від неметалевих предметів;

Б. при заломленні в склі або воді;

В. при подвійному променезаломленні;

Г. при пропусканні світла через ряд скляних пластинок;

Д. за допомогою призми Ніколя.

ANSWER: E

8. За яким принципом визначають концентрацію зафарбованих розчинів?

А. дисперсії світла;

Б. поглинання світла розчинами;

В. за принципом визначення оптичної густини розчину;

Г. визначення сили світлового потоку в цьому середовищі;

Д. визначення коефіцієнта пропускання світла розчинами.

9. Інтерференція світла - це явище:

А. накладання хвиль різних частот;

Б. розкладання білого світла на кольори;

В. накладання хвиль різних довжин;

Г. огинання світлом дрібних перешкод;

Д. накладання когерентних хвиль, в результаті якого спостерігається підсилення або послаблення світла.

10. Когерентними називаються, хвилі які мають:

А. сталу різницю фаз і однакові частоти, однаковий напрям;

Б. однаковий напрям поширення та різні частоти;

В. однакову амплітуду та постійну різницю початкових фаз;

Г. сталу різницю початкових фаз та різні частоти;

Д. різні амплітуди і різні частоти.

11. Від чого залежить кут повороту площини поляризації при проходженні світла через розчин цукру?

А. від площі перерізу трубки;

Б. від концентрації розчину цукру;

В. від температури;

Г. від довжини світлової хвилі;

Д. від діаметру трубки, в якій міститься розчин цукру.

12. За яким принципом визначають концентрацію зафарбованих розчинів?

А. дисперсії світла;

Б. поглинання світла розчинами;

В. за принципом визначення оптичної густини розчину;

Г. визначення сили світлового потоку в цьому середовищі;

Д. визначення коефіцієнта пропускання світла розчинами.

13. Що таке центрована оптична система?

А. система, що складається з декількох лінз, які мають спільну головну оптичну вісь;

Б. система, що складається з декількох лінз;

В. система, що складається з розсіювальної і збірної лінз;

Г. система, що має два фокуси;

Д. система, що має один фокус.

14. Монохроматичними називаються хвилі:

- А. з різними фазами;
- Б. однієї частоти;
- В. з однаковими фазами;
- Г. з однаковими амплітудами;
- Д. з однаковими швидкостями поширення.

15. Явище інтерференції світла використовується для:

- А. зменшення частоти світла;
- Б. визначення коефіцієнта поглинання;
- В. вимірювання часу;
- Г. визначення показника заломлення речовини;
- Д. визначення коефіцієнта екстинкції речовини.

16. Як утворюється дифракційний спектр?

- А. при пропусканні білого світла крізь дифракційну ґратку;
- Б. при пропусканні світла крізь тригранну призму;
- В. при повному внутрішньому відбиванні;
- Г. внаслідок дисперсії світла;
- Д. внаслідок поляризації світла.

17. Чим визначається порядок дифракційного максимуму?

- А. частотою коливань;
- Б. періодом коливань;
- В. фазою коливань;
- Г. амплітудою коливань;
- Д. числом довжин хвиль в оптичній різниці ходу.

18. Що називають дисперсією світла?

- А. залежність показника заломлення від частоти;
- Б. вада зображення яку дає оптична система;
- В. огинання хвилями зустрічних перешкод;

Г. властивість деяких тіл змінювати забарвлення залежно від напрямку їх розглядання;

Д. розсіювання світла на дрібних частинках.

19. Що таке 1 діоптрія?

- А. це оптична сила лінзи з фокусною відстанню 1 см
- Б. одиниця вимірювання оптичної сили лінзи;
- В. величина, що дорівнює фокусній відстані лінзи;
- Г. оптична сила лінзи з фокусною відстанню 1м;
- Д. визначає заломлювальну здатність лінзи.

20. Інтенсивність хвилі це

- А. амплітуда коливань хвилі;
- Б. енергія хвилі;
- В. об'ємна густина енергії;
- Г. середнє по часу значення густини потоку потужності, що переноситься хвилею;
- Д. густина енергії.

21. Чому дорівнює оптична сила системи однієї збиральної і однієї розсіювальної лінзи?

- А. вона завжди більша 1;
- Б. нулю;
- В. алгебраїчній сумі оптичних сил;
- Г. вона завжди менша 1;
- Д. різниці оптичних сил.

22. Який закон описує явище поглинання світла?

- А. закон Бугера-Ламберта-Бера;
- Б. закон Брюстера;
- В. закон Малюса;
- Г. немає Віна;
- Д. закон Релея.

23. Величина, обернена фокусній відстані називається:

- А. оптичною силою лінзи;
- Б. оптичною потужністю лінзи;
- В. лінійним збільшенням лінзи;

Г. енергетичною світністю;

Д. лінійним збільшенням.

24. Дифракція світлових хвиль на краях отвору призводить до:

А. розмиття зображення та зменшення роздільної здатності зорової системи;

Б. збільшення чіткості зображення;

В. збільшується позитивний вплив дифракції світла;

Г. руху світлової плями;

Д. кривизни рогівки ока.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗКУ

Задача 6.1. Знайти швидкість світла у середовищі з показником заломлення $n = 1.5$, якщо швидкість світла у вакуумі $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Задача 6.2. В плунжерному колориметрі відношення довжин оптичних кювет $l_{ст}/l_x = 1.5$, яка концентрація досліджуваного розчину, якщо концентрація стандартного розчину $C_{ст} = 2\%$?

Задача 6.3. Яка роздільна здатність дифракційної ґратки в спектрі першого порядку, якщо вона містить 200 штрихів?

Задача 6.4. Знайти за законом Малюса відношення (I/I_0) інтенсивності світла, яке вийшло з аналізатора під кутом φ до інтенсивності світла, яке виходить з аналізатора для кута $\varphi = 0$, якщо $\cos^2 \varphi = 0.2$.

Задача 6.5. Знайти числову апертуру мікроскопа, якщо показник заломлення $n = 2$, а $\sin L = 0.5$.

Задача 6.6. Питома оптична оберտальна здатність рафінози $a=1$ (градус*см²/г). Яка концентрація розчину рафінози, якщо кут повороту площини поляризації $\varphi = 5^\circ$, довжина $L = 20$ см?



ГЛАВА 7. КВАНТОВА БІОФІЗИКА. ФІЗИКА АТОМІВ І МОЛЕКУЛ

7.1. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТІЛ

Закони теплового випромінювання становлять основу медичної термографії, яка дозволяє проводити вимірювання температури тіла без фізичного контакту з ним і визначає температуру різних його ділянок з точністю до десятих градуса.

Квантова механіка описує поведінку мікрочастинок та їх систем, явища електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) та ядерного магнітного резонансу (ЯМР) які містять цінну інформацію про будову органічних молекул, природу міжмолекулярних взаємодій, характер молекулярних рухів.

В основі магнітно-резонансних методів дослідження лежить принцип поглинання енергії системою частинок індукованих високочастотним електромагнітним випромінюванням, що спричиняє переходи між енергетичними рівнями, на які розщеплюються у зовнішньому магнітному полі квантові системи.

7.1.1. Закони теплового випромінювання

У 1800 р. Вільгельм Гершель (1738 – 1822 рр.), переміщаючи чутливий термометр вздовж сонячного спектра, помітив, що його покази змінюються від ультрафіолетової ділянки спектра до червоної, але максимум був за червоною частиною. Так було відкрито інфрачервоне випромінювання. Цей же вчений у 1781 р. відкрив планету Уран.

Німецький фізик Йоган Ріттер (1776 – 1810 рр.), досліджуючи у 1801 р. дію різних ділянок сонячного спектра на хлористе срібло, встановив, що хімічна дія випромінювання зростає від червоної ділянки спектра до фіолетової й досягає максимуму за фіолетовою областю, яка не сприймається людським оком. Нове випромінювання, наявне у сонячному спектрі, отримало назву «ультрафіолетового випромінювання».

До ультрафіолетових променів належать відкриті у 1923 р. Гурвічем мітогенетичні промені – випромінювання живих організмів, які збуджуються процесами, що відбуваються всередині клітин і стимулюють клітинний поділ (спектральна ділянка 190 – 250 нм).

Теплове випромінювання – це електромагнітне випромінювання тіл, зумовлене збудженням атомів і молекул під час співударів у процесі їхнього теплового руху. Кожне тіло, температура якого вище $0^0 K$, є джерелом теплового випромінювання. При тепловому випромінюванні енергія від одного тіла передається до іншого за допомогою випромінювання і поглинання електромагнітних хвиль. Потужність теплового випромінювання людини сягає 100 Вт.

Розглянемо кількісні характеристики теплового випромінювання.

Середню потужність випромінювання за час, значно більший періоду світлових коливань, приймають за потік випромінювання ϕ . Потік енергії, що випромінюється $1m^2$ поверхні тіла, називається енергетичною світністю R , або випромінювальною здатністю R . Вона виражається у $Вт/м^2$.

Нагріте тіло випромінює хвилі різної довжини хвилі. Виділимо певний інтервал довжини хвилі від λ до $\lambda + d\lambda$. Енергетична світність, що відповідає цьому інтервалу, пропорційна його ширині.

$$dR_\lambda = r_\lambda d\lambda \quad (7.1)$$

тут r_λ – спектральна густина енергетичної світності. Проінтегрувавши (7.1) знаходимо повну енергетичну світність у всьому інтервалі довжин хвиль:

$$R_\lambda = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda \quad (7.2)$$

Здатність тіла поглинати енергію випромінювання характеризується коефіцієнтом поглинання, який дорівнює відношенню поглинутого тілом потоку випромінювання до падаючого потоку:

$$\alpha = \frac{\Phi_{\text{погл.}}}{\Phi_{\text{пад.}}} \quad (7.3)$$

Оскільки коефіцієнт поглинання залежить від довжини хвилі, то потрібно ввести поняття монохроматичного коефіцієнта поглинання:

$$\alpha_{\lambda} = \frac{\Phi_{\text{погл.}}(\lambda)}{\Phi_{\text{пад.}}(\lambda)} \quad (7.4)$$

При розкладанні світла, випромінюваного нагрітими твердими тілами, рідинами чи газами, виникає спектр випромінювання. Конденсована речовина (тверде тіло чи дуже стиснений газ) випромінює так званий суцільний спектр, у якому присутні всі довжини хвиль видимого діапазону. Причина цього – сильна взаємодія сусідніх атомів між собою. Спектр свічення атомарних газів і парів являє собою набір окремих ліній з характерними значеннями довжин хвиль, обумовлених структурою електронних оболонок атомів даного елемента.

Тіло, коефіцієнт поглинання якого $\alpha = 1$, називається абсолютно чорним.

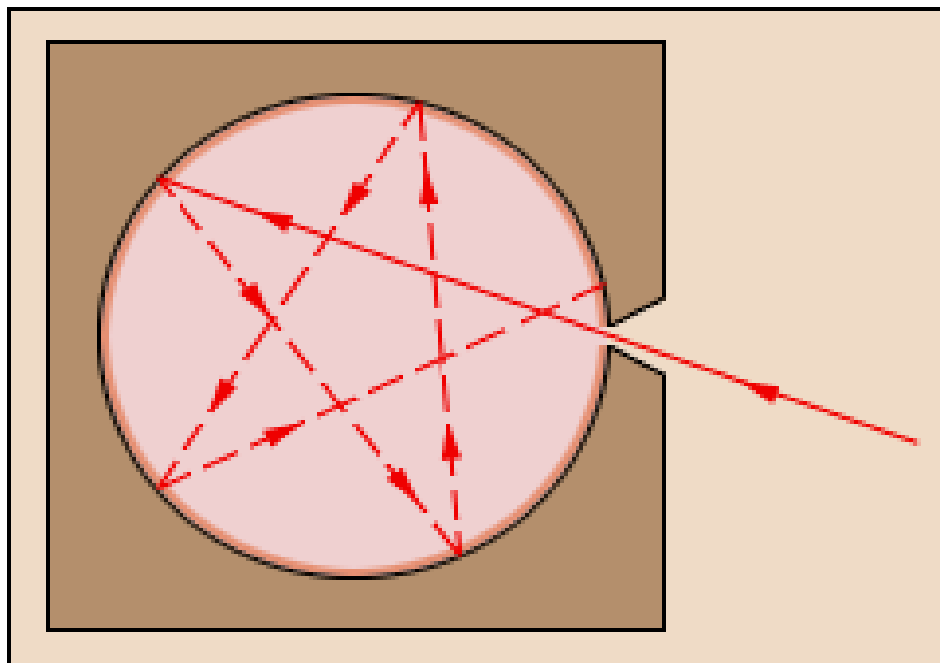


Рис. 7.1. Модель абсолютно чорного тіла.

Сірим називається тіло, коефіцієнт поглинання якого менше від 1. Для тіла людини вважають $\alpha = 0.9$.

Згідно із законом Кірхгофа, відношення спектральної густини енергетичної світності до монохроматичного коефіцієнта поглинання для всіх тіл при даній температурі є постійною величиною, яка дорівнює спектральній густині енергетичної світності абсолютно чорного тіла:

$$\left(\frac{r_\lambda}{\alpha_\lambda}\right)_1 = \left(\frac{r_\lambda}{\alpha_\lambda}\right)_2 = \dots = \varepsilon_\lambda \quad (7.5)$$

З (7.5) отримуємо:

$$r_\lambda = \alpha_\lambda \varepsilon_\lambda \quad (7.6)$$

З (7.6) слідує, що більше енергії випромінює те тіло, яке більше поглинає.

Зв'язок між енергетичною світністю абсолютно чорного тіла R і його абсолютною температурою T встановлює закон Стефана-Больцмана: енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степені його температури.

$$R = \sigma T^4 \quad (7.7)$$

де σ – стала Стефана-Больцмана, $\sigma = 5.6710^{-8} \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$.

У загальному випадку: $R = \delta T^4$, де $\delta = \alpha\sigma$, коефіцієнт випромінювання, що дорівнює добутку сталої Стефана-Больцмана на коефіцієнт α , який менший від одиниці.

На рисунку 7.2 показана залежність спектральної густини енергетичної світності абсолютно чорного тіла від довжини хвилі для різних температур.

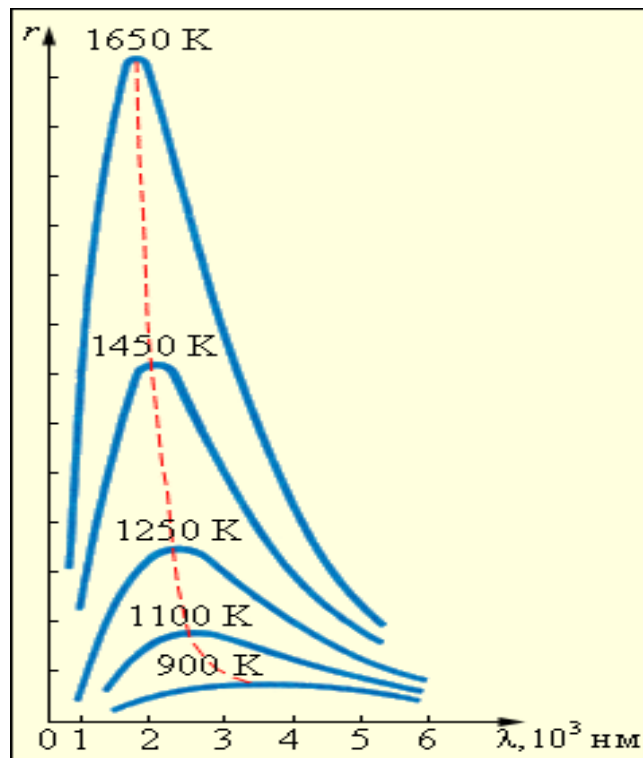


Рис. 7.2. Залежність спектральної густини енергетичної світності абсолютно чорного тіла від температури (розподіл Планка).

Довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини енергетичної світності, визначається за законом зміщення Віна (лауреат Нобелівської премії):

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (7.8)$$

де b – стала Віна, $b = 2.910^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Із (4) випливає, що із збільшенням температури максимум спектральної густини енергетичної світності зміщується в бік коротких довжин хвиль.

У кінці XIX століття був зроблений ряд спроб отримати залежність, що виражає густину енергетичної світності ε_λ абсолютно чорного тіла як функцію довжини хвилі λ і абсолютної температури T :

$$\varepsilon_\lambda = f(\lambda, T). \quad (7.9)$$

Формулу, яка добре описує спектральну густину випромінювання абсолютно чорного тіла лише в області великих довжин хвиль, отримали Релей і Джінс:

$$\varepsilon(\lambda, T) = 8\pi k T \lambda^{-4}. \quad (7.10)$$

У класичній фізиці випромінювання і поглинання енергії розглядалися як неперервні процеси. М. Планк прийшов до висновку, що саме ці основні положення не дозволяють отримати правильну залежність $\varepsilon(\lambda, T)$. Він

запропонував гіпотезу, згідно якої тіло випромінює і поглинає енергію не неперервно, а певними дискретними порціями – квантами.

Розглядаючи тіло, що випромінює енергію ε як сукупність осциляторів, енергія яких може змінюватися лише на величину, кратну $h\nu$, де h – стала Планка ($h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с), ν – частота випромінювання.

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (7.11)$$

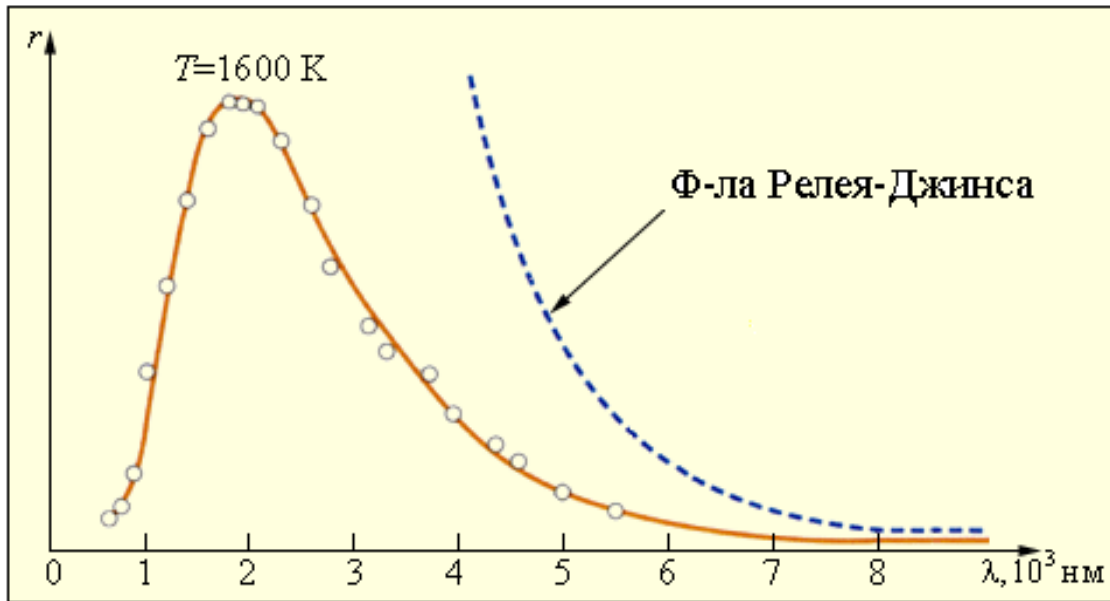


Рис. 7.3. Порівняння закону розподілу енергії за довжинами хвиль

М. Планк отримав формулу для густини енергетичної світимості абсолютно чорного тіла, яка правильно описує випромінювальну здатність абсолютно чорного тіла у всьому діапазоні хвиль:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \text{ або } \varepsilon_{\nu} = \frac{2\pi h\nu^2}{c^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (7.12)$$

тут h – стала Планка, λ – довжина хвилі, T – абсолютна температура, c – швидкість світла у вакуумі, k – стала Больцмана, ν – частота випромінювання (поглинання).

Виходячи з (7.12) можна отримати закони Стефана – Больцмана і Віна.

7.2. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ

7.2.1. Хвильові властивості частинок.

Фізика атомів, молекул, атомних ядер і елементарних частинок вивчається в квантовій механіці. Об'єкти мікросвіту, що вивчаються квантовою механікою, мають лінійні розміри порядку $10^{-10} \div 10^{-15}$ м. В основі квантової механіки лежать такі уявлення:

1. В 1900 р. М. Планк (Нобелівський лауреат 1919 р.), вивчаючи випромінювання чорного тіла, прийшов до висновку про те, що енергія випромінюється тілом певними порціями (квантами енергії).

2. В 1905 р. А. Ейнштейн (Нобелівський лауреат 1922 р.), вивчаючи механізм фотоефекта, запропонував розглядати випромінювання як потік матеріальних частинок, “квантів випромінювання” чи “фотонів”.

3. У 1913 р. Н. Бор (Нобелівський лауреат 1922 р.), використовуючи розроблену Розерфордом планетарну модель атома, пояснив закономірності лінійчастих спектрів.

Н. Бор припустив, що величини, які характеризують мікросвіт повинні квантуватися, тобто вони не можуть приймати будь-які значення, а тільки певні дискретні значення кратні сталій Планка. Основу теорії Бора становлять такі постулати:

I. Атом може існувати лише в певних стаціонарних станах з відповідними енергіями E_n . В стаціонарних станах атом не випромінює енергію.

II. Перехід атома з одного стаціонарного стану в інший супроводжується випромінюванням чи поглинанням квантів, енергія яких визначається за формулою: $h\nu = E_k - E_n$, де k і n – цілі числа (номери стаціонарних станів), h – стала Планка.

III. Радіуси r стаціонарних станів, по яких рухається електрон масою m , з швидкістю U , задовільняють умову: $mv_n r_n = n\hbar$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) де $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

Постулати Бора дали змогу пояснити походження лінійчастих спектрів випромінювання і поглинання водню, розрахувати частоти спектральних ліній атома водню.

Стаціонарні стани атома водню (енергетичні рівні) визначаються за формулою:

$$E_n = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}. \quad (7.13)$$

тут m – маса електрона, e – його заряд, ε_0 – електрична стала.

Виходячи з другого постулата Бора можна знайти частоти випромінювання атома водню:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right). \quad (7.14)$$

тут n і k – відповідні енергетичні рівні атома.

Стан атома з $n = 1$ називається основним. В основному стані $n = 1$ атом водню може перебувати як завгодно довго (за умови, що зовнішні впливи

відсутні). Стани з $n > 1$ називаються збудженими. На мал.7.4. показана система переходів у атомі водню.

А. Комптон (Нобелівський лауреат 1927 р.) в 1923 р., вивчаючи розсіювання рентгенівських променів на атомах речовини, встановив, що воно підлягає законам пружного удару, а значить фотон володіє імпульсом певної величини. Таким чином було встановлено, що крім хвильових, фотон має також і корпускулярні властивості.

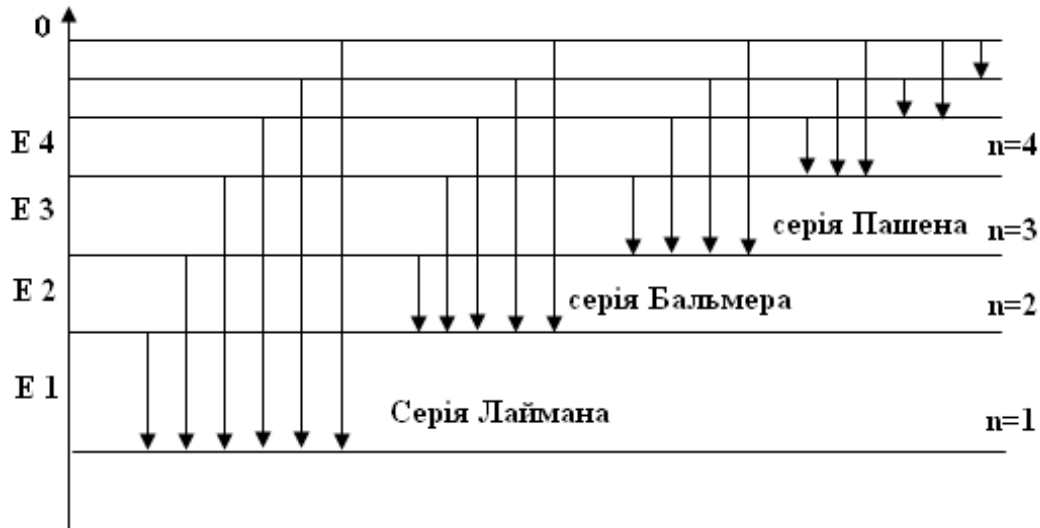


Рис. 7.4. Спектр атома водню

А. Комптон (Нобелівський лауреат 1927 р.) в 1923 р., вивчаючи розсіювання рентгенівських променів на атомах речовини, встановив (рис.7.5), що воно підлягає законам пружного удару, а значить фотон володіє імпульсом певної величини.

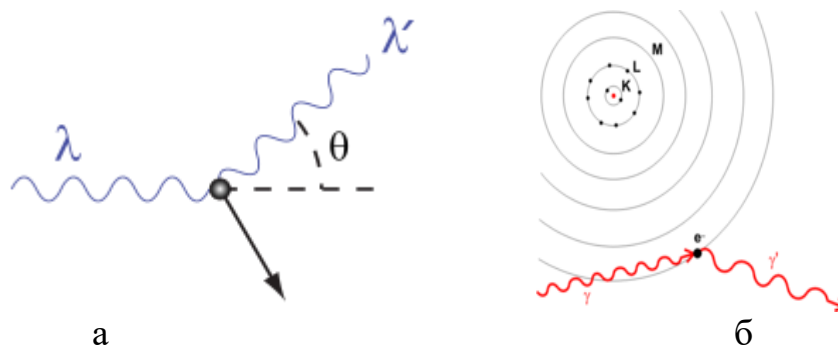


Рис. 7.5. Схематичні зображення:

- а) Комптонівського розсіювання на вільному електроні;
- б) електроні зовнішньої оболонки атома.

Таким чином було встановлено, що крім хвильових, фотон має також і корпускулярні властивості. Досліди Комптона показали, що довжина хвилі λ' розсіяного випромінювання більша за довжину хвилі λ падаючого випромінювання, причому різниця $\lambda' - \lambda$ залежить від кута розсіювання:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2 \cdot \lambda_k \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (7.15)$$

тут $\lambda_k = 2.49 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ – стала Комптона, θ – кут між початковим і розсіяним напрямками фотонів.

В основі квантової механіки лежить припущення про те, що хвильово-корпускулярний дуалізм, встановлений для світла, має універсальний характер. Вперше ідея, що всі частинки які мають певний імпульс p , володіють хвильовими властивостями, а їх рух супроводжується деяким хвильовим процесом, була висловлена французьким фізиком Луї де Бройлем (Нобелівський лауреат 1929 р.) в 1924 р.

Формулу для імпульсу фотона:

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad (7.16)$$

Можна застосувати для інших частинок масою m , які рухаються зі швидкістю v :

$$p = m \cdot v = \frac{h}{\lambda}, \quad (7.17)$$

Звідки

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{m \cdot v}. \quad (7.18)$$

Хвилі, про які йде мова, називаються хвилями де Бройля.

Електрон, який рухається з швидкістю 40 м/с, буде мати довжину хвилі:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 40 \text{ м/с}} = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}, \quad (7.19)$$

яка може бути підтверджена експериментом.

Формулу де Бройля експериментально підтвердили в дослідах К. Девісон і Л. Джермер (1927 р.), які спостерігали розсіювання електронів монокристалом нікелю. Згодом Г. Томпсон і С. Тартаковський спостерігали дифракцію електронів на металічній фользі (товщиною 10^{-5} см) (полікристалічне тіло) (рис. 7.6).

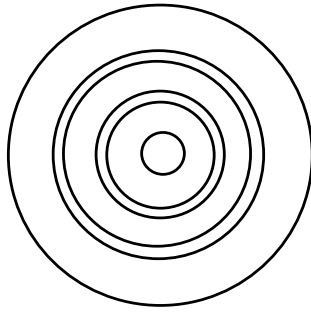


Рис. 7.6. Дифракційна картина, створена електронами.

Хвильові властивості електрона можна використовувати не тільки для дифракційного структурного аналізу, але і для отримання збільшених зображень предметів (електронний мікроскоп).

Роздільна відстань оптичного мікроскопа:

$$z = \frac{0.5 \cdot \lambda}{n \cdot \sin \varphi}, \quad (7.20)$$

де λ довжина хвилі; n – показник заломлення; φ – апертурний кут.

Як випливає з (7.20), роздільна відстань оптичного мікроскопа обмежена довжиною хвилі видимого спектра (400 – 700 нм) і не перевищує 0.5λ .

Для електронного мікроскопа:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot e \cdot m \cdot u}}, \quad (7.21)$$

де u – прискорююча напруга, і роздільна здатність

$$z = \frac{0.5 \cdot h}{n \sin \varphi \sqrt{2 \cdot e \cdot m \cdot u}}, \quad (7.22)$$

Як бачимо роздільна відстань залежить від прискорюючої напруги u і можна добитися, щоб вона була значно менша ніж у оптичного мікроскопа.

Широко використовується в науково-дослідних лабораторіях прилад, який поєднує функції електронного мікроскопа і рентгенівського мікроаналізатора, який дає інформацію про хімічний склад матеріалу досліджуваного зразка.

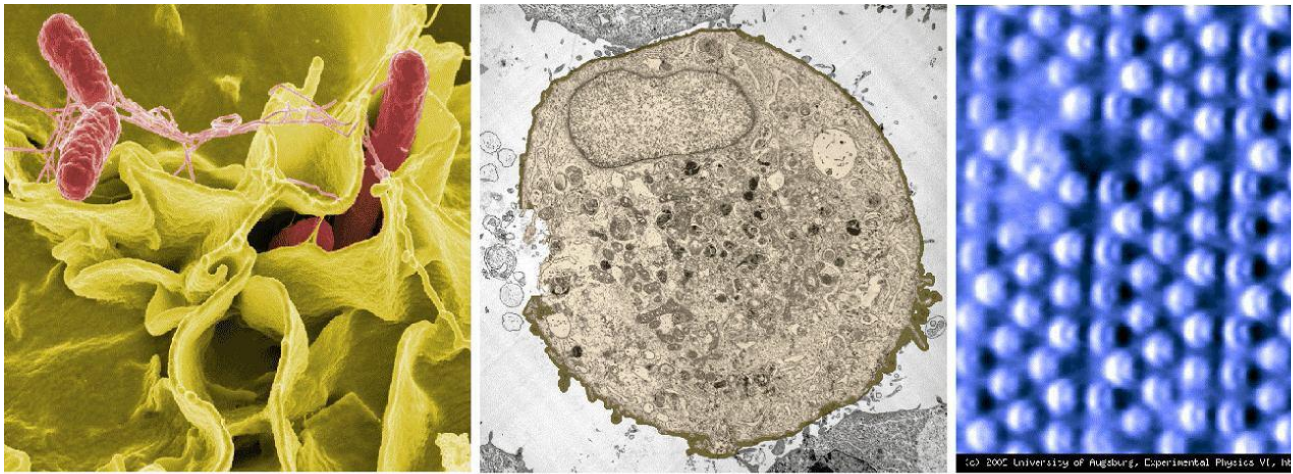
Довжина хвилі електрона прискорена, прискореного різницею 150 В становить 0,1 нм, що майже співпадає з роздільною відстанню електронного мікроскопа.

Типи електронних мікроскопів:

1. Просвічуючий (трансмісійний) електронний мікроскоп – прилад, в якому електронний пучок променів проходить крізь об'єкт дослідження (рис. 7.7(а)).
2. Скануючий електронний мікроскоп застосовують для дослідження поверхні об'єкта за допомогою вибитих електронним пучком вторинних електронів.

3. Рефлекторний електронний мікроскоп, з відповідною системою детектування рентгенівських променів, застосовують для дослідження хімічного складу об'єкта дослідження.

Електронні мікроскопи можуть збільшувати зображення у 2 млн. разів.



а)

б)

в)

Рис. 7.7. Зображення, отримані за допомогою електронного мікроскопа:

а) бактерії сальмонели (скануючий мікроскоп); б) зображення клітини (просвічуючий мікроскоп); в) зображення атомів на поверхні кристала.

7.2.1.1. Хвильова функція та її фізичний зміст. Співвідношення невизначеностей

Оскільки з мікрочастинкою співставляють хвильовий процес, який відповідає її рухові, то її стан у квантовій механіці описується хвильовою функцією, яка залежить від координат і часу: $\psi = \psi(x, y, z, t)$.

Інтенсивність хвилі де Бройля визначається величиною квадрата модуля хвильової функції $|\psi^2|$.

З дослідів по дифракції електронів випливає, що інтенсивність хвиль у певній точці простору визначає число електронів, що потрапили в цю точку за 1с. Це стало основою для своєрідного імовірнісного тлумачення хвиль де Бройля, які описуються ψ функцією. Ймовірність того, що частинка знаходиться в елементі об'єму dV , пропорційна $|\psi^2|$ і елементу об'єму dV

$$dW = |\psi^2| \cdot dV \quad (7.23)$$

Величина $|\psi^2|$ є густиною ймовірності і задає ймовірність перебування частинки в даній точці простору.

$$|\psi^2| = \frac{dW}{dV} = \rho \quad (7.24)$$

У квантовій механіці існують обмеження в можливостях одночасного визначення координати частинки і величини її імпульсу. Ці обмеження зумовлені хвильово-корпускулярним дуалізмом мікрочастинок. В. Гейзенберг (Нобелівський лауреат 1933 р.) показав, що чим точніше визначена одна з двох

змінних величин, які визначають стан мікрочастинки, тим з меншою точністю може бути визначена друга з них, і навпаки. Добуток похибок, з якими визначаються ці величини, не може бути менше сталої Планка $\hbar = \frac{h}{2\pi}$. Наприклад, якщо координата частинки, яка рухається вздовж осі X визначена з похибкою Δx , то імпульс частинки визначається з похибкою Δp , згідно з принципом невизначеності:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar \quad (7.25)$$

Зміст формули (7.25) полягає не лише в тому, що є певна границя для точності виміру, але і в тому, що при зменшенні області локалізації частинки у просторі збільшується неозначеність у визначенні її імпульса.

Інше співвідношення неозначеностей встановлює зв'язок між енергією і часом:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar \quad (7.26)$$

Чим більша точність буде досягнута при вимірі часу dt , тим буде менша точність у визначенні енергії.

Фундаментальний принцип невизначеності Гайзенберга свого часу був оголошений в СРСР таким, що суперечить діалектичному матеріалізму і його заборонили публічно згадувати в наукових доповідях.

В квантовій механіці дію на об'єкти в процесі вимірювання не можна вважати малою або несуттєвою – стан об'єкта при вимірюванні змінюється. Наприклад, для визначення положення електрона його необхідно “освітити” потоком фотонів. В результаті співудару електрона з фотоном імпульс електрона зміниться на величину $\Delta p \geq \frac{\hbar}{\Delta x}$.

7.2.1.2. Рівняння Шрödінгера та його розв'язок для атома водню. Квантові числа

Після відкриття в 1927 р. Гейзенбергом співвідношення невизначеностей постало питання створення квантової теорії руху частинок, оскільки виявилася принципова неможливість описати рух частинок за допомогою поняття траєкторії. Стан мікрочастинок можна задати ψ – функцією, яка визначається рівнянням Е. Шрödінгера (Нобелівський лауреат 1933 р.), яке відіграє в квантовій механіці таку ж роль, як і рівняння Ньютона в класичній механіці. Образно кажучи, Шрödінгер переніс поняття класичної механіки на мову квантової теорії. За допомогою хвильового рівняння Шрödінгера можна описати еволюцію ψ – функції, якщо вона відома в якийсь момент часу. Е. Шрödінгер – автор книжки “Что такое жизнь с точки зрения физики” (1943 р.).

Якщо ψ – функція не залежить від часу $\psi = \psi(x, y, z, t)$, вона задовільняє стаціонарному рівнянню Шрödінгера, яке для одномірного випадку має вигляд:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar} (E - E_n) \cdot \psi = 0 \quad (7.27)$$

тут m – маса частинки, E і E_n – її повна і потенціальна енергія.

Функції ψ , які задовільняють рівняння Шррьодінгера при заданому вигляді E_n , називаються власними функціями. Вони існують лише при певних значеннях енергії. Сукупність власних значень енергії утворює енергетичний спектр частинки. Знаходження власних значень і власних функцій складає основну задачу квантової механіки.

Опис стану атомів і молекул з допомогою рівняння Шррьодінгера є досить складною задачею. Найпростіше вона розв'язується для одного електрона в полі ядра.

При центральній симетрії поля, створеного ядром, задачу зручно розв'язувати у сферичних координатах r , Q і φ . Розв'язок рівняння Шррьодінгера (7.27) знаходять у вигляді добутку трьох функцій, кожна з яких залежить від однієї змінної

$$\psi = (r, Q, \varphi) = f_1(r) \cdot f_2(Q) \cdot f_3(\varphi) \quad (7.28)$$

Загальний розв'язок рівняння Шррьодінгера є дискретним, тобто кожна з функцій $f_1 - f_3$ має набір (спектр) розв'язків, кожному з яких відповідає відповідне квантове число. Перше з них головне квантове число $n = 1, 2, 3, \dots$. Воно визначає рівні енергії атома:

$$E = - \frac{m \cdot e^4 \cdot z^2}{8 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^2 \cdot n^2} \quad (7.29)$$

Друге квантове число – орбітальне l , яке при даному n може приймати значення $0, 1, 2, 3, \dots, n - 1$. Це число характеризує орбітальний момент імпульсу L_l електрона відносно ядра:

$$L_l = \hbar \cdot \sqrt{l(l + 1)} \quad (7.30)$$

Третє квантове число – магнітне m_l яке при даному l приймає значення $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$; всього $(2l + 1)$ значень.

Це число визначає проекції орбітального момента імпульса електрона на довільно вибраний напрям Z :

$$L_{l_s} = \hbar \cdot m_l. \quad (7.31)$$

Четверте квантове число – спінове s . Воно може приймати тільки два значення $\pm 1/2$.

Спіновий момент імпульсу електрона:

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)} \quad (7.32)$$

Проекція спінового моменту імпульсу електрона L_s на напрямок зовнішнього магнітного поля, що співпадає з віссю Z ,

$$L_{l_z} = \hbar \cdot m_s. \quad (7.33)$$

Число $m_s = \pm 1/2$ називається магнітним спіновим квантовим числом.

Спіновий магнітний момент електрона і його проекція на напрям зовнішнього магнітного поля, який співпадає з віссю Z :

$$\mu_s = \mu_A \sqrt{S(S+1)}, \quad (7.34)$$

тут μ_B – магнетон Бора.

Електрон, рухаючись по орбіті навколо атомного ядра, має орбітальний момент імпульсу \vec{L}_l , власний спіновий момент \vec{L}_s , а також повний момент імпульсу \vec{J} , який визначається векторною сумою цих моментів:

$$\vec{J} = \vec{L}_l + \vec{L}_s. \quad (7.35)$$

Величину повного моменту імпульсу знаходимо за формулою:

$$J = \hbar \sqrt{j(j+1)}. \quad (7.36)$$

Квантове число повного моменту імпульсу J може приймати значення $j = l + s$ або $j = l - s$.

Стаціонарний квантовий стан електрона в атомі характеризується повним набором чотирьох квантових чисел: головного n , орбітального l , магнітного m_l і спінового s .

Для елементарних частинок, що мають спін, рівний $\hbar/2$ (електрони, протони, нейтрони та ін.) справедливий принцип Паулі (Нобелівський лауреат 1945 р.): в будь-якій системі частинок із спіном $\hbar/2$ не може бути більше однієї

частинки, що знаходяться в стаціонарному стані, який визначається даним набором чотирьох квантових чисел.

Якщо $z_1(n, l, m_l, s)$ є число електронів в атомі, які знаходяться у станах, що визначається даним набором чотирьох квантових чисел, то

$$z_2(n, l, m_l, s) = 0 \text{ або } 1.$$

Найбільше число $z_2(n, l, m_l)$ електронів в атомі, які знаходяться в станах, що визначаються набором трьох квантових чисел n, l і m_l :

$$z_2(n, l, m_l) = 2$$

Найбільше число $z_3(n, l,)$ електронів в атомі, які знаходяться в станах, що визначаються набором двох квантових чисел n, l :

$$z_3(n, l,) = 2(2l + 1).$$

Найбільше число $z(n)$ електронів в атомі, які знаходяться в станах, що визначаються значенням головного квантового числа n :

$$z(n) = 2 \sum_{l=0}^{l=n-1} (2l + 1) = 2 \cdot n^2. \quad (7.37)$$

Стану з $n = 2$ відповідають 4 орбіталі: $(n, l, m_l) = (2, 0, 0), (2, 1, 1), (2, 1, 1), (2, 1, 0)$ чи $(2, 1, -1)$. Таким чином, в стані з $n = 2$ може знаходитися 8 електронів.

Повний орбітальний момент атома:

$$L_L = \hbar \sqrt{L(L + 1)}, \quad (7.38)$$

тут L – повне орбітальне квантове число, яке приймає лише цілі невід'ємні значення:

$$L = \sum_l l_i, \left(\sum_l l_i - 1 \right), \sum_l l_i - 2, \dots \dots$$

Наприклад, для двох електронів з $l_1 = 1$ і $l_2 = 3$ отримуємо: $L_2 = 4, 3, 2, 1$.
Повний спіновий момент атома:

$$L_s = \hbar\sqrt{S(S+1)}, \quad (7.39)$$

тут S – повне спінове квантове число.

У випадку парного числа електронів, коли спіни різних електронів попарно компенсуються $S = 0$ і $S = 1/2$ – для системи з непарним числом електронів коли всі спіни, крім одного, попарно компенсуються. Таким чином, для двох, трьох, чотирьох, і т.д. електронів S може приймати відповідні значення: $S^2 = 0,1$; $S^3 = \frac{3}{2}$; $S^{42} = 2,1,0$ і т.д.

Повний момент імпульсу атома:

$$L_j = \hbar\sqrt{j(j+1)}, \quad (7.40)$$

тут j – повне внутрішнє квантове число, яке для даних L і S може приймати такі значення:

$$L + S, \quad L + S - 1, \quad |L - S|.$$

При описі енергетичного стану кожного електрона застосовується спектроскопічна символіка, яка складається із великих літер, які відповідають різним значенням квантового числа:

Значення l	0	1	2	3	4	5
Символ	S	P	D	F	G	H

Приведемо приклад загальноприйнятого короткого запису (при $l = 2$): $n^{2S+1}D_j$, тут n – головне квантове число, $2S + 1$ мультиплетність, D позначає, що $l = 2$, $j = \pm s$ – квантове число повного моменту імпульсу.

Такий короткий запис дозволяє, наприклад, позначати $3d$ – електрон як $32 \cdot D_5/2$ чи $32 \cdot D_3/2$, ($n = 3$, $l = 2$, $2s + 1 = 2 \cdot \frac{1}{2} + 1 = 2$, $j = 2 + \frac{1}{2} = 5/2$) або $j = 2 - \frac{1}{2} = 3/2$.

Символічне позначення стану атома (спектральний терм): $^{2s+1}T_j$, де $2S + 1 = K$ – мультиплетність.

Приклад: $T_{\text{терм}} \cdot {}^3P_2$ розшифровується так: мультиплетність $2S + 1 = 3$; отже, $S = 1$, символу P відповідає (згідно спектральної символіки), $L = 1$ а $j = 2$.

Взаємодія повного моменту атома j із магнітним полем веде до розщеплення його енергетичних рівнів (ефект Зеемана).

7.2.2. Особливості випромінювання і поглинання енергії атомами і молекулами

7.2.2.1. Спектри атомів

Атоми, перебуваючи в основному стані E_0 мають мінімальну енергію. Їхній перехід із основного рівня E_0 на збуджений рівень E_i зумовлений поглинанням кванта світла $h \cdot \nu$ (рис.6.17, а); при переході з рівня E_i на рівень E_0 , згідно закону збереження енергії, випромінюється аналогічний квант світла (рис.6.17, б). Переходи супроводжуються різкою зміною поглинання (або випромінювання) під час зміни частоти оптичного випромінювання (рис.6.17, в) або довжини хвилі (рис.6.17, г), тобто характеризується появою вузьких спектральних ліній поглинання або випромінювання.

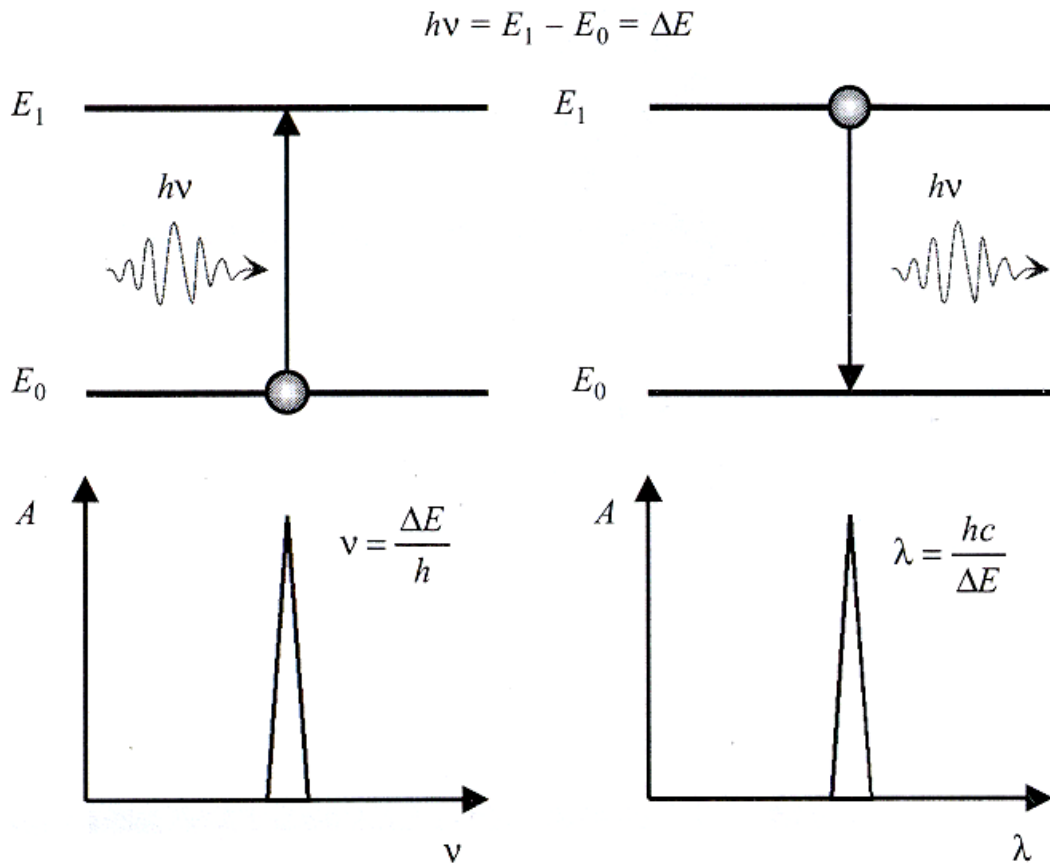


Рис. 7.8. Спектральні властивості атома: а – поглинання атомом кванта світла; б – випромінювання атомом кванта світла; в – спектральна лінія поглинання (або випромінювання); г – те саме, в масштабі довжин хвиль

7.2.2.2. Спектри молекул

Спектри молекул характеризуються дещо складнішою структурою, ніж спектри атомів. Це пов'язано, насамперед, з участю молекули як динамічної системи (що складається з атомів), у трьох видах рухів: *електронному* (рух електронів навколо ядер), *коливальному* (коливання ядер навколо положень рівноваги) та *обертальному* (обертання молекул як цілого у просторі). Таким чином, енергія молекули може бути представлена як:

$$E = E_{\text{ел}} + E_{\text{кол}} + E_{\text{об}}, \quad (7.41)$$

Згідно постулатів Бора, молекула знаходиться у певних дискретних енергетичних станах. Повна енергія E молекули характеризується набором електронних, коливальних та обертельних рівнів. Міжрівневі переходи молекул супроводжуються утворенням електронно-коливально-обертельних спектрів. Електронні спектри розміщені в ультрафіолетовій та видимій ділянках спектра, коливальні – в інфрачервоній, обертельні – в далекій інфрачервоній та надвисокочастотній ділянках спектра. Енергетична діаграма молекули показана на рис.7.9.

Спектри молекул мають складніший характер ніж спектри атомів, що зумовлено набором окремих спектральних ліній, які перекриваються. Саме тому спектри поглинання молекул характеризуються широкими смугами (рис. 7.9.).

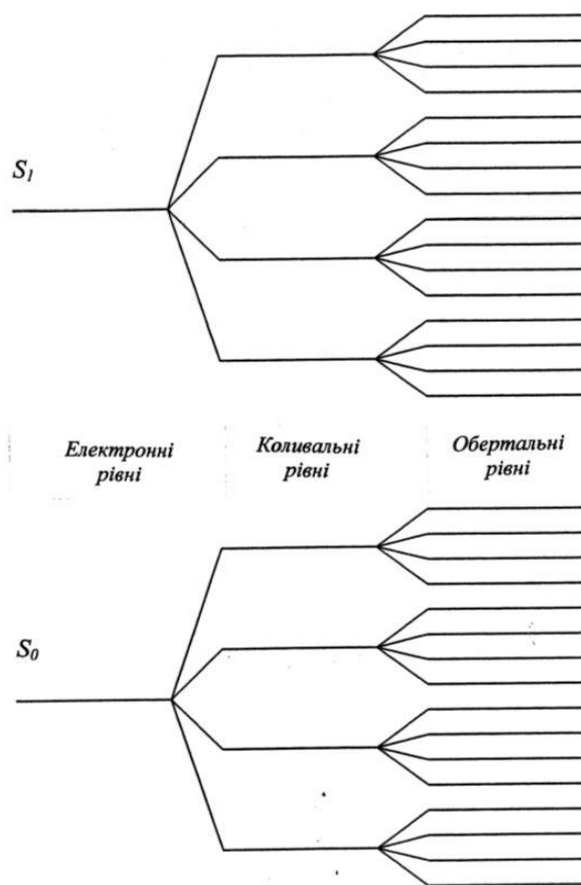


Рис. 7.9. Енергетична діаграма молекули.

Найбільшу величину енергії мають електронні збуджені рівні. Коливальні рівні мають меншу енергію, обертальні – ще меншу: $E_{\text{ел}} > E_{\text{кол}} > E_{\text{об}} > 1000:100:1$. Відносні енергії переходів зменшуються в ряду: електронні $>$ коливальні $>$ обертальні, причому вони відрізняються приблизно на порядок. Для обертальних переходів достатньо низької енергії (великі довжини хвиль, мікрохвильова або дальня ІЧ-область). Коливальні переходи потребують більшої енергії (ближня ІЧ-область), а для здійснення електронних переходів необхідна ще більш висока енергія (видима і УФ-області).

Після поглинання кванта світла та переходу молекули у збуджений стан вона бере участь у переходах між підрівнями. Тому пік поглинання завжди розміщений у ділянці більш високих частот (або коротких довжин хвиль), ніж пік випромінювання.

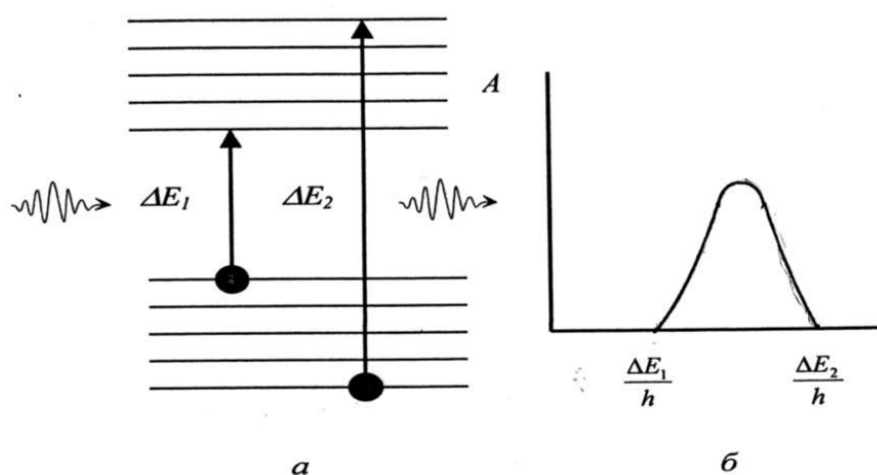


Рис. 7.10. Енергетичні рівні молекули (а) та смуга поглинання (б).

7.3. ЯВИЩЕ ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ

7.3.1. Фізичні основи люмінесценції

Люмінесценцією тіла в даній спектральній області називають надлишок випромінювання над тепловим і яке має тривалість понад 10^{-15}с , що значно перевищує період (10^{-15}с) світлових хвиль.

Люмінесценцію можна спричинити бомбардуванням тіл електронами, пропусканням крізь речовину електричного струму або дією електричного поля, освітленням видимим світлом, рентгенівськими і гама-променями, а також деякими хімічними реакціями в речовині. Залежно від способів збудження люмінесцентного світіння розрізняють, відповідно, катодолюмінесценцію, електролюмінесценцію, фотолюмінесценцію, рентгенолюмінесценцію, хемілюмінесценцію.

Люмінесценцію з часом затухання порядку $10^{-8} - 10^{-9}\text{с}$ називають флуоресценцією. Такий час затухання характерний для рідин і газів. Фосфоресценція це – люмінесценція, яка зберігається тривалий час після припинення дії збудника світіння.

Розглянемо явище фотолюмінесценції, яке збуджується електромагнітним випромінюванням видимого або ультрафіолетового діапазону. Д. Стокс

встановив, що фотолюмінесценціююча речовина випромінює, як правило, світло, що має більшу довжину хвилі, ніж те випромінювання, яке спричиняє люмінесценцію. Справді, фотон світла, який викликає фотолюмінесценцію, має енергію $h \cdot \nu$, яка, за законом збереження енергії, частково витрачається на створення кванта люмінесцентного випромінювання з енергією $h \cdot \nu_{\text{люм}}$, і на різні неоптичні процеси:

$$h\nu = h\nu_{\text{люм}} + E, \quad (7.42)$$

де E – енергія, витрачена на різні процеси, крім фотолюмінесценції. Звичайно $E > 0$ і $\nu_{\text{люм}} < \nu$, тобто і $\lambda_{\text{люм}} > \lambda$, що відповідає правилу Стокса.

У деяких випадках фотолюмінесцентне випромінювання має довжину хвилі, меншу за довжину хвилі збуджуючого світла (так зване антистоксове випромінювання). Це явище пояснюється тим, що до енергії $h \cdot \nu$ кванта збуджуючого випромінювання додається енергія теплового руху атомів (молекул або іонів) люмінесціюючої речовини:

$$h\nu_{\text{люм}} = h\nu + akT, \quad (7.43)$$

тут a – коефіцієнт, що залежить від природи люмінесціюючої речовини; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура.

Антистоксове випромінювання проявляється дедалі чіткіше з підвищенням температури.

На явищі люмінесценції ґрунтується люмінесцентний аналіз, принцип якого такий: речовина або сама по собі, або після відповідної дії дає характерне люмінесцентне світіння. За характером цього світіння можна, визначаючи інтенсивність лінії у спектрі, визначити не лише якісний, а й кількісний вміст досліджуваної речовини. Люмінесцентний аналіз дозволяє виявити наявність мізерних домішок порядку 10^{-11} г в 1 г досліджуваної речовини. Його у медицині застосовують для діагностики захворювань. При злоякісних хворобах люмінесценція уражених тканин, крові і сечі переважно яскравіша, ніж у здорових людей. Ряд біологічно функціональних молекул, наприклад молекули мембранних білків флуоресценціюють. Флуоресціюючі молекули видозмінюють структуру свого оточення, що дозволяє вивчати хімічні перетворення і міжмолекулярну взаємодію.

7.3.2. Люмінесцентний аналіз

Люмінесцентний аналіз мікроскопічних об'єктів проводять за допомогою спеціальних люмінесцентних мікроскопів, в яких замість звичайних джерел світла використовуються ртутні лампи високого (150 – 400 мм рт. ст.) і надвисокого (вище атмосферного) тиску, які мають два світлофільтри. Один з них, розташований перед конденсором, виділяє ту частину спектра джерела світла, яка спричиняє люмінесценцію об'єкта. Інший, розташований між об'єктивом і окуляром, виділяє світло люмінесценції.

Основний принцип роботи флуоресцентного мікроскопа полягає в опроміненні зразка певними довжинами хвиль які викликають флуоресценцію

зразка і виділити набагато більше слабке випромінювання флуоресценції. На рис.7.12 показана схема (у розрізі) сучасного флуоресцентного мікроскопа для проведення досліджень в прохідному і відбитому світлі.

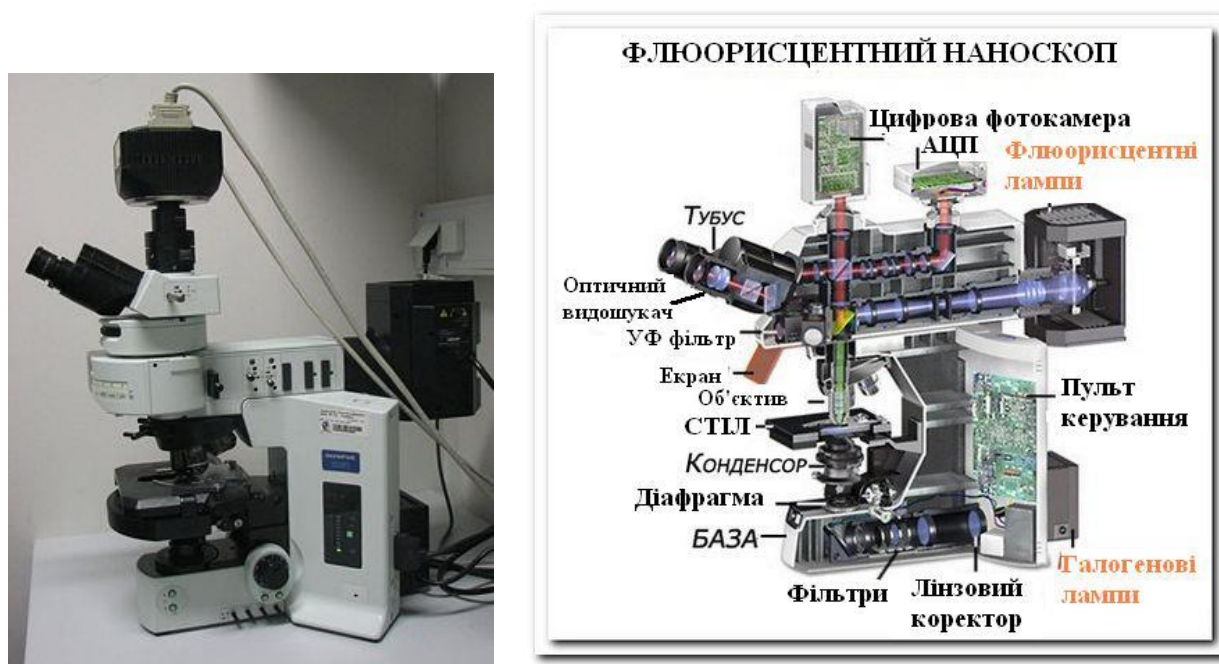


Рис. 7.12. Зовнішній вигляд і будова флуоресцентного мікроскопа.

7.4. РЕЗОНАНСНІ МЕТОДИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ

7.4.1. Електронний парамагнітний резонанс

Із розщепленням енергетичних рівнів у магнітному полі (ефект Зеемана), яке зумовлено наявністю в електронів, а також у протонів магнітних моментів, пов'язане явище магнітного резонансу, яке відіграє велику роль у сучасних методах дослідження будови і властивостей речовини.

Магнітним резонансом називають вибіркове поглинання енергії змінного електромагнітного поля речовиною, яка перебуває в постійному магнітному полі. Важливим випадком резонансного поглинання є електронний парамагнітний резонанс, відкритий у 1944 році Є. К. Завойським.

Явище електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) полягає в поглинанні парамагнітною речовиною мікрохвильового радіовипромінювання за рахунок переходів між підрівнями зееманівського розщеплення енергетичних рівнів. Розщеплення енергетичних рівнів зумовлене дією постійного магнітного поля на магнітні моменти частинок речовини.

Магнетон Бора μ_B є одиницею вимірювання електронних магнітних моментів:

$$\mu_B = -\frac{e}{2 \cdot m} \hbar, \quad (7.44)$$

тут e – заряд, m – маса електрона, \hbar – стала Планка.

Подібно до цього, величина $g\mu_B B$ визначає енергію розщеплення енергетичних рівнів електронів в атомах, які перебувають у магнітному полі. Тут g – фактор Ланде, безрозмірний коефіцієнт $g = 1$, якщо спіновий момент атома $S = 0$, і $g = 2$, якщо орбітальний момент атома $L = 0$, а повний момент атома рівний спіновому моменту атома $J = S$.

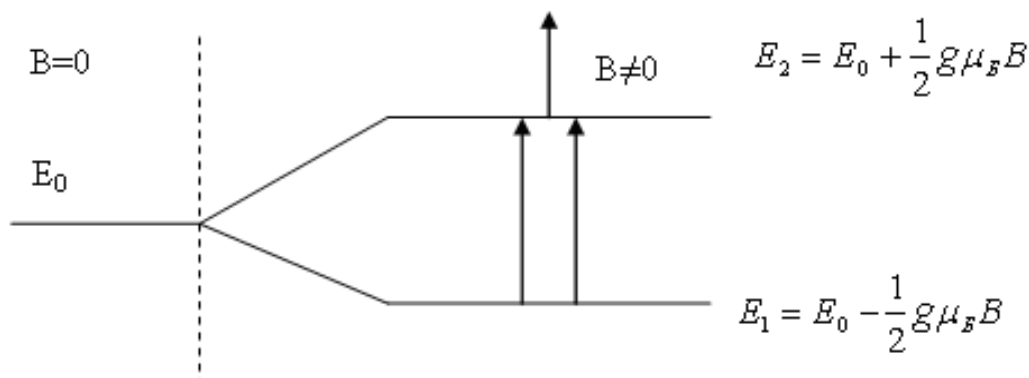


Рис. 7.13. Розщеплення енергетичних рівнів.

При ЕПР розглядають лише спіновий магнітний момент атома. Розщеплення енергетичних рівнів приводить і до розщеплення спектральних ліній атомів, що знаходяться в магнітному полі.

Відстань між сусідніми підрівнями визначається за формулою:

$$\Delta E = \mu_B \cdot g \cdot B \quad (7.45)$$

Розщеплення енергетичних рівнів зумовлене дією постійного магнітного поля на магнітні моменти електронів, які визначають парамагнітні властивості речовини. Існує переважна орієнтація магнітних моментів атомів уздовж напрямку магнітного поля, що відповідає намагніченому стану парамагнітної речовини. При накладанні на речовину змінного магнітного поля з частотою

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{\mu_B \cdot g \cdot B}{h}, \quad (7.46)$$

яка збігається з частотою переходу між підрівнями зеєманівського розщеплення, відбуватиметься резонанс поглинання електромагнітних хвиль.

Він зумовлений переважанням числа переходів з більш заселених нижніх енергетичних рівнів на менш заселені верхні рівні. Поглинання пропорційне числу поглинаючих атомів в одиниці об'єму речовини. При індукції $B = 10^3$ мТл резонансна частота $\nu = 10^{11}$ Гц, що відповідає радіодіапазону шкали електромагнітних хвиль ($\lambda = 3$ см).

Графік залежності потужності P поглинутої електромагнітної енергії від індукції магнітного поля B називають спектром ЕПР (рис. 7.14).

При ЕПР, поряд з поглинанням енергії, має місце зворотний процес. Відбуваються переходи атомів на нижчі енергетичні рівні, а їх енергія передається кристалічній решітці. Цей процес називають спин-гратковою

взаємодією і характеризують часом релаксації τ . Отже, резонансне поглинання відбувається в деякому інтервалі ΔB . Чим менший час спін-решіткової релаксації, тим більша ширина лінії ($\tau_1 < \tau_2$).

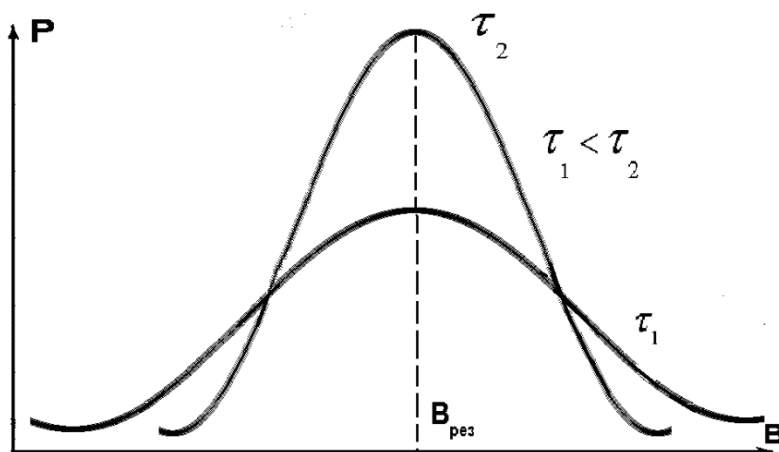


Рис. 7.14. Спектр ЕПР.

7.5. ІОНІЗУЮЧЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

7.5.1. Природа іонізуючого випромінювання

Іонізуючим випромінюванням називаються випромінювання, здатне іонізувати середовище, в якому воно поширюється. До нього відносяться: X-промені (рентгенівські), γ -випромінювання, а також потоки заряджених і нейтральних частинок (електронів, позитронів, нейтронів, α -частинок і інших).

Джерелом іонізуючих випромінювань є природна і штучна радіоактивність. Радіоактивність – самочинне перетворення (розпад) атомних ядер, яке приводить до зміни їх атомного номера (якщо випромінюються заряджені частини) або масового числа при випромінюванні нейтральних частинок. Зміна атомного номера приводить до перетворення одного хімічного елемента в інший: при зміні масового числа проходить перетворення ізотопів даного елемента

7.5.1.1. Історія відкриття X-променів

Рентгенівське випромінювання – це електромагнітні хвилі з довжиною хвилі від 80 нм до 10^{-5} нм, що займають ділянку спектра між гамма і ультрафіолетовим випромінюванням. У медицині для рентгенодіагностики і рентгенотерапії застосовують рентгенівське випромінювання з довжиною хвиль від 10 до 10^{-3} нм.

Вперше про відкриття X-променів, які виникали при співударі швидких електронів з речовиною (названих X-променями) було повідомлено у листопаді 1895 р. німецьким фізиком В. Рентгеном (Нобелівський лауреат 1901 р.).

Досліди по взаємодії швидких електронів із тугоплавкою речовиною проводив світового рівня фізик і електротехнік І. Пулюй (1845 – 1918 р.), знаменитий своїми дослідженнями в галузі молекулярної фізики, катодних та X-променів, який народився у містечку Гримайлові на Тернопільщині. Після завершення навчання у Тернопільській гімназії закінчив теологічний і

філософський факультети Віденського університету, а у 1877 році в Страсбурзі, захистивши дисертацію з фізики, здобув науковий ступень доктора натуральної філософії. У 1884 році Міністерством освіти Австрії І. Пулюй був призначений професором експериментальної і технічної фізики Німецької вищої технічної школи у Празі, а через п'ять років його обрали ректором цього ж навчального закладу.

Він не лише відкрив іонізуючу здатність Х-променів під час їх проходження через розріджені гази, дослідив місце їх виникнення та просторовий розподіл, але й, що дуже важливо, першим дав пояснення їх природи та механізму утворення.

”Лампа Пулюя” (1881 р.) була прототипом рентгенівської трубки. За видатні наукові досягнення в галузях фізики і електротехніки в 1906 році І. Пулюй був нагороджений орденом Залізної корони, а в 1910 році отримав титул радника цісарського двору.

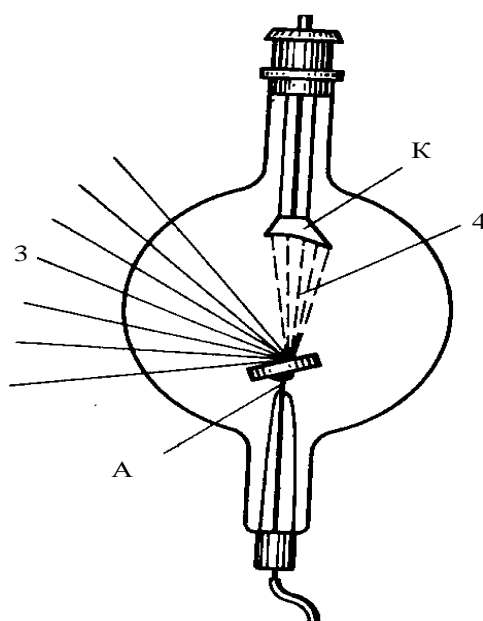


Рис. 7.23. “Лампа Пулюя”.

Рентгенівські (Х-промені) виникають у трубках Пулюя – скляних балонах, з яких викачано повітря до тиску $10^{-6} - 10^{-7}$ мм рт. ст., в які впаяні катод *K* і анод *A* (рис. 7.23). Останній зроблений з тугоплавкого металу. Спіраль катода розігрівається електричним струмом від джерел розжарювання і випромінює електрони, які, прискорюючись електричним полем, бомбардують анод, у результаті чого виникає Х-випромінювання.

Інтенсивність Х-випромінювання *W* пропорційна квадратові напруги *U* між анодом і катодом, атомному номеру речовини *z* анода і силі струму *I*:

$$W = kzIU^2, \quad (7.47)$$

тут *k* – коефіцієнт пропорційності.

7.5.1.2. Гальмівне X-випромінювання

Гальмівне X-випромінювання зумовлене гальмуванням швидких електронів $10^{-14} - 10^{-16}$ еВ (1 еВ – енергія, яку набуває електрон рухаючись в електричному полі між точками, різниця потенціалів між якими рівна 1 В) електростатичним полем атомами речовини. Знайдемо мінімальну величину довжини хвилі X-випромінювання. Нехай вся кінетична енергія електрона перетворюється в енергію фотона:

$$eU = h\nu_{max}, \quad \nu_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}}, \quad \text{тоді } eU = \frac{hc}{\lambda_{min}}, \quad (7.48)$$

Звідки знаходимо:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eU}. \quad (7.49)$$

Враховуючи значення сталої Планка, швидкості світла і заряду електрона одержуємо:

$$\lambda_{min} = \frac{1.24}{U} 10^{-6} \text{ м}, \quad (7.50)$$

тут λ_{min} – мінімальна довжина рентгенівського випромінювання при даному U .

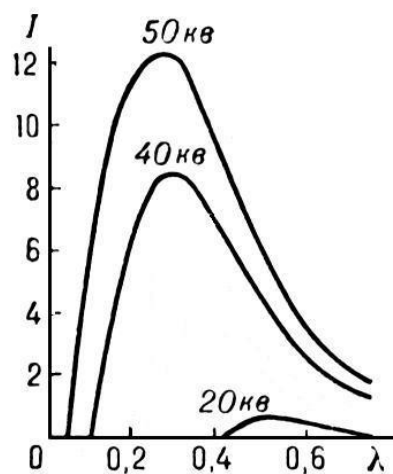


Рис. 7.24. Залежність інтенсивності гальмівного X-випромінювання від напруги.

Довжина рентгенівської хвилі, на яку припадає максимум енергії випромінювання, пов'язана з мінімальною довжиною рентгенівської хвилі U такою залежністю:

$$\nu_{max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{hc}{eU} = \frac{3}{2} \lambda_{min}. \quad (7.51)$$

Характер суцільного спектра гальмівного рентгенівського випромінювання залежить від матеріалу анода.

Спектр гальмівного X -випромінювання є суцільним; його вигляд залежить від прикладеної напруги між катодом і анодом.

7.5.1.3. Характеристичне X -випромінювання

Характеристичне X -випромінювання виникає після іонізації атома, при якому відбуваються електронні переходи в оболонках, ближчих до ядра.

При збільшенні напруги між катодом і анодом спектр X -випромінювання буде зміщуватися у бік коротких хвиль, як і у випадку гальмівного випромінювання.

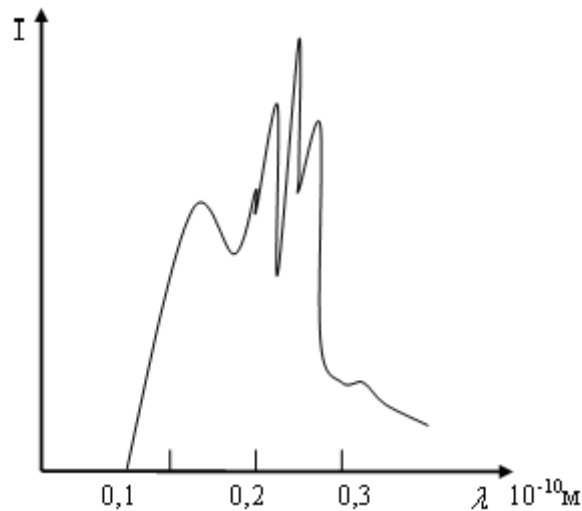


Рис. 7.25. Характеристичний спектр

Характеристичний (лінійчастий) спектр X -випромінювання спричинений вибиванням електронів із внутрішніх шарів атома.

Спектр такого випромінювання є характерним для атомів кожного елемента, тому лінійчастий рентгенівський спектр називається характеристичним. Згідно міжрівневим переходам певні групи характеристичних ліній отримали відповідно назви K, L, M, N – електронні оболонки атома (рис. 7.26).

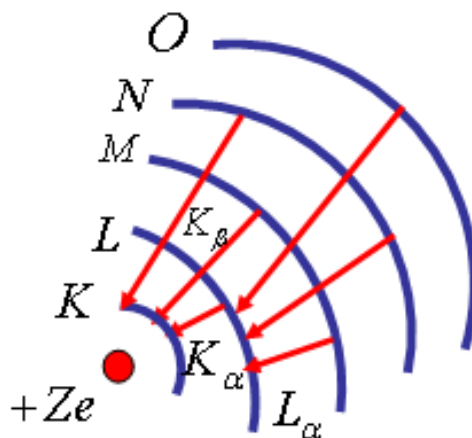


Рис. 7.26. Механізм виникнення характеристичних спектрів.

Г. Мозлі відкрив закон (закон Мозлі), який пов'язує частоту спектральних ліній з порядковим номером випромінюючого елемента в періодичній таблиці Менделєєва:

$$\sqrt{\nu} = C(Z - \sigma), C = \sqrt{R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)}. \quad (7.52)$$

тут σ – коефіцієнт, характерний для певної серії випромінювання (для K – серії $\sigma = 1$ для L – серії $\sigma = 7,5$), R – стала Рідберга.

Характеристичні спектри атомів, на відміну від оптичних, у сполуках і у вільному стані мають однаковий вигляд.

Ч. Баркле за відкриття характеристичного випромінювання у 1917 р. була присуджена Нобелівська премія з фізики.

7.5.2. Радіоактивність

*...І впала з неба зоря велика, що палала,
як смолоскип, і впала на третину річок і на
джерела вод. Ім'я зорі тій – Полин.
І стала третина вод полином,
і багато людей померло від вод, бо згіркли.*

Одкровення Івана Богослова, гл. 8

Природна радіоактивність – це явище самовільного перетворення атомних ядер нестійких ізотопів у стійкі, що супроводжується випромінюванням частинок речовини і високочастотним електромагнітним випромінюванням. Радіоактивність була відкрита в 1896 р. французьким фізиком А. Беккерелем (Нобелівський лауреат 1903 р.). Він виявив, що солі урану випускають невидимі промені або частинки, які проникають через непрозорі тіла, викликаючи фотолюмінесценцію, іонізують речовину і здатні засвічувати фотопластинку. А. Беккерель, пропускаючи бета-частинки через перехресні електричні і магнітні поля, першим виміряв відношення заряду до маси бета-частинки (1900 р). Він, незалежно від П. Кюрі, виявив фізіологічну дію радіоактивного випромінювання (1901 р). Подальші дослідження, які були проведені П. Кюрі і М. Кюрі – Склодовською (лауреати Нобелівської премії 1903 р.), показали, що природна радіоактивність властива не тільки для урану, але й для багатьох важких хімічних елементів.

М. Склодовська – Кюрі також отримала Нобелівську премію з хімії (1911 р.) за відкриття і виділення природного радіоактивного елементу радю.

Радіоактивний розпад має імовірнісний характер, оскільки неможливо передбачити, який саме атом розпадеться. Інтенсивність радіоактивного випромінювання зменшується з часом.

Експериментально було встановлено, що число атомів dN , які розпалися за час dt , пропорційне часу і загальному числу атомів N радіоактивного елемента:

$$dN = -\lambda N dt, \quad (7.53)$$

тут λ – стала розпаду. Ця величина пропорційна імовірності розпаду ядра і неоднакова для різних радіоактивних елементів. Знак мінус показує, що число атомів у радіоактивному елементі з часом зменшується.

Інтегруючи рівняння (7.53) в межах від $t = 0$ до t отримуємо:

$$N = N_0 \exp\{-\lambda t\}, \quad (7.54)$$

тут N_0 – число атомів елемента в початковий момент часу $t = 0$; N – число атомів у момент часу t .

Графічно закон радіоактивного розпаду зображений на рис. 7.5.

Період напіврозпаду T – проміжок часу, за який кількість ядер, які розпалися, зменшується у двічі. Підставляючи в рівняння (7.54) $N = N_0/2$ і $t = T$, одержуємо зв'язок між T і λ :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}. \quad (7.55)$$

Величину $\tau = 1/\lambda$ називають середнім часом життя радіоактивного ядра. За середній час життя атомів у збудженому стані приймається час, протягом якого число атомів зменшиться в $e = 2.72$ рази.

Оскільки всі рослини використовують для свого росту вуглекислий газ, який засвоюється ними із атмосфери, частина вуглецю в рослинах дещо радіоактивна. Коли рослина гине, додаткова кількість вуглецю C^{14} у неї не поступає, а той вуглець, який накопичився у тканинах рослини, починає розпадатися. Вимірюючи кількість ізотопів вуглецю C^{14} і C^{12} в органічних археологічних залишках, можна датувати вік знайденого предмета чи оцінити час певної історичної події.

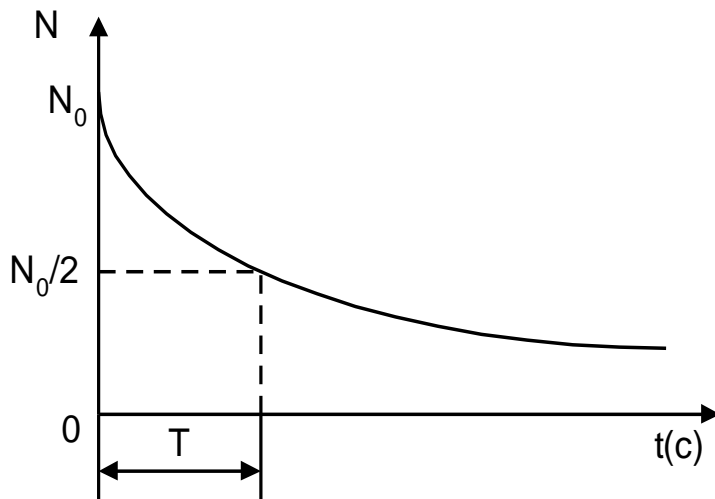


Рис. 7.27. Графічне зображення закону радіоактивного розпаду.

7.5.2.1. Активність. Одиниці активності

Активністю A елемента називається число атомних розпадів, які відбуваються в радіоактивному елементі за одну секунду:

$$A = |-dN/dt|. \quad (7.56)$$

Тоді

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda \cdot t} = \lambda N = N \frac{\ln 2}{T} \quad (7.57)$$

Активність елемента пропорційна кількості атомів елемента і обернено пропорційна періоду напіврозпаду. Активність препарату з часом зменшується за експоненціальним законом.

Розглянемо одиниці активності.

Бекерель (Бк) – така активність ядерного ізотопу, при якій за 1с відбувається один акт розпаду, $1\text{Бк} = \frac{1}{\text{с}}$.

Резерфорд (Рд): $1\text{Рд} = 10^6\text{Бк} = 10^6 \frac{1}{\text{с}}$.

Кюрі (Ки). За одиницю активності приймають Кюрі (Ки) – активність такого препарату, в якому за 1с відбуваються $3.7 \cdot 10^{10}$ актів розпаду.

$1\text{Ки} = 3.7 \cdot 10^{10}\text{розпадів/с}$.

Використовують також похідні одиниці від Ки: мКи (мілікюрі) і мкКи (мікрюрі).

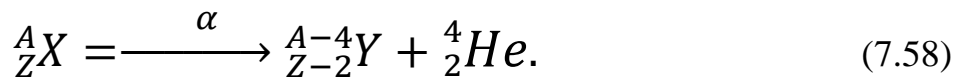
$$1\text{мКи} = 10^{-3}\text{Ки}, 1\text{мкКи} = 10^{-6}\text{Ки}.$$

Для характеристики активності одиниці маси радіоактивного джерела вводять величину, яка є питомою активністю, що дорівнює відношенню активності ізотопу до його маси (Бк/кг).

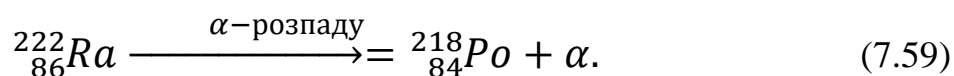
7.5.2.2. Види радіоактивного розпаду

Альфа – розпад. Альфа – випромінювання – це потік α -частинок, які вилітають із ядер атома. α -частинки складаються із двох протонів і двох нейтронів – це ядра гелію. Швидкість α -частинок $(0.4 \div 2)10^8$ м/с, що відповідає кінетичній енергії від 4 до 8,8 МеВ. Спектр α -випромінювання складається з декількох близько розміщених ліній, тобто лінійчастий.

При α -розпаді "материнське ядро" випускає α частинку і перетворюється в "дочірнє ядро". Якщо врахувати закон збереження заряду і маси, то реакція має вигляд:



Наприклад, перетворення радону ${}^{222}_{86}Ra$ в полоній ${}^{218}_{84}Po$ здійснюється за схемою:

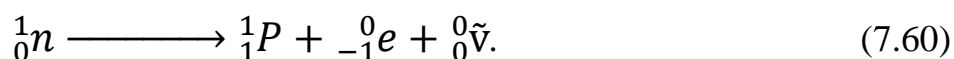


Вперше пояснив α -розпад геніальний фізик Г. Гамов (1904 – 1968) який народився в Одесі.

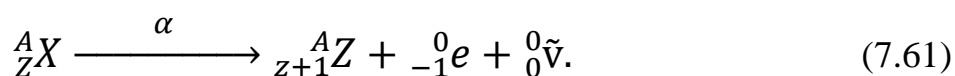
Г. Гамову належить теорія "великого вибуху" Всесвіту, і саме він першим зробив розрахунок генетичного коду. Недооцінений за життя, сьогодні він є одним з найбільш цитованих авторів. І навіть через десятиріччя після його смерті, висунуті ним наукові гіпотези знаходять підтвердження. Серед них гіпотеза про реліктове випромінювання космосу, температуру якого він зумів оцінити, і та, що зірка, яка спалахує, як нова, втрачає 99 % енергії внаслідок випромінювання величезного потоку нейтронів.

Бета – розпад. Існують три різновиди β -розпаду. В першому випадку ядро, яке зазнає радіоактивного розпаду, випускає електрон, в другому – позитрон, а в третьому електрон захоплюється ядром – κ -захоплення (або електронне захоплення).

Електронний β -розпад. Якщо в ядрі є надлишок нейтронів, то відбувається електронний β -розпад ядра, при якому один з нейтронів перетворюється в протон, при цьому утворюються електрон і антинейтрино:



При β -розпаді елемент у періодичній таблиці зміщується на один номер без зміни масового числа. Символічно це зміщення записується так:

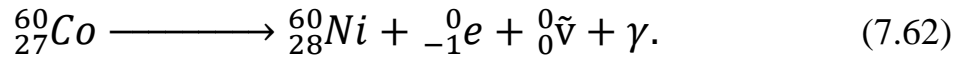


Наприклад, ізотоп калію ${}^{40}_{19}K$ перетворюється в ізотоп кальцію ${}^{40}_{20}Ca$.

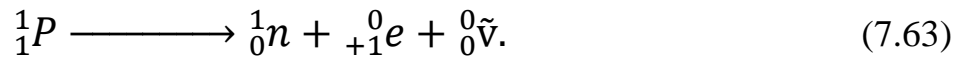
β -розпад, так само як і α -розпад, може супроводжуватися випусканням γ -променів. дочірнє ядро, яке виникає, може перебувати не тільки в нормальному

стані, але і в збуджених його станах. Переходячи у стан з меншою енергією, ядро випромінює γ -квант.

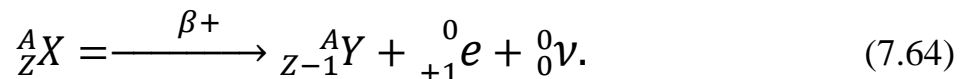
Наприклад, кобальт ${}_{27}^{60}\text{Co}$ є джерелом γ -квантів великих енергій, які використовуються в медицині з терапевтичною метою:



Позитронний β^+ -розпад. Якщо в ядрі є надлишок протонів, то відбувається позитронний β^+ -розпад ядра, при якому один з протонів перетворюється в нейтрон при цьому утворюються позитрон і нейтрино:



Для вільного протона такий процес неможливий.
Схема β^+ -розпаду:



Прикладом β^+ -розпаду є перетворення ізоотопу фосфору ${}_{15}^{30}\text{P}$ в ізоотоп кремнію ${}_{14}^{30}\text{Si}$.

Експериментно було доведено, що при β -розпаді енергія розподіляється між β -частинкою і нейтрино або антинейтрино.

Швидкість β -частинок змінюється в широких інтервалах. Найбільша їх початкова швидкість порядку $1.6 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Максимальна кінетична енергія для м'якого β -випромінювання лежить у межах $(0.015 \div 0.05) \text{ MeV}$, а для жорсткого – $(10 \div 12) \text{ MeV}$. Спектр β -випромінювання неперервний. Альфа і бета частинки відхиляються в електричному і магнітному полях.

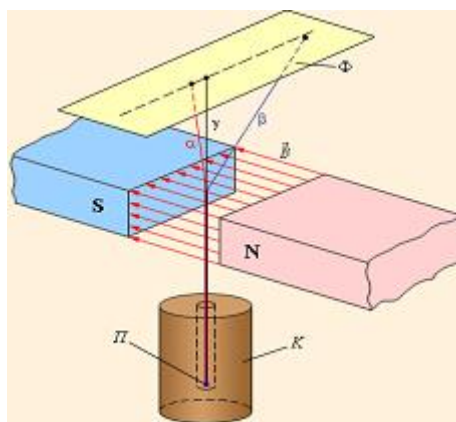


Рис. 7.28. Схема досліду з виявлення природи α , β і γ випромінювань. К-свинцевий контейнер, П-радіоактивний препарат, Ф- фотопластина.

κ -захоплення або e -захоплення полягає в тому, що ядро поглинає один із електронів, який знаходиться на K оболонці (рідше захоплюється електрон із L -

або M -оболонки). В результаті такого ефекту один з протонів перетворюється в нейтрон і випромінює нейтрино:

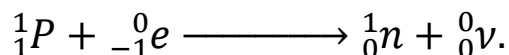
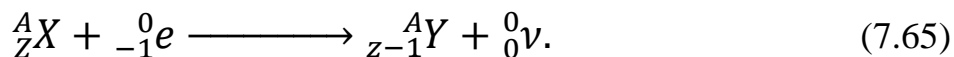


Схема електронного κ -захоплення:



Прикладом κ -захоплення є перетворення ізотопу калію ${}^{30}_{19}K$ ізотоп аргону ${}^{40}_{18}Ar$.

Існує також протонна радіоактивність. При такому виді радіоактивності ядро випромінює один або два протони.

Гамма промені – це потік квантів електромагнітного випромінювання великої частоти – порядку 10^{20} Гц, що відповідає довжині хвилі порядку 10^{-12} м. Енергія γ -променів для різних радіоактивних речовин лежить у межах від 0.2 до 5.0 MeV і більше.

7.6. ДОЗИМЕТРІЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

7.6.1. Суть методу дозиметрії

Дозиметрія – це галузь прикладної ядерної фізики, в якій вивчають фізичні величини, котрі характеризують дію іонізуючого випромінювання на різні об'єкти, а також методи і прилади їх вимірювання. Дія іонізуючого випромінювання перш за все визначається поглинутою дозою.

Поглинута доза випромінювання D_n (або просто доза випромінювання) – це кількість енергії іонізуючого випромінювання, яка поглинається одиницею маси опроміненої речовини.

D_n залежить від природи і властивостей випромінювання (зокрема, від енергії частинок), та від природи речовини, в якій воно поглинається, і пропорційна часу опромінення. Одиницею вимірювання поглинутої дози випромінювання в системі СІ є грей (Гр), $1\text{Гр}=1\text{Дж/кг}$. Застосовується також позасистемна одиниця, яка називається рад (Radiation Absorbed Dose). Співвідношення між греєм і радом таке: $1\text{Гр}=100\text{ рад}$. Відношення дози до часу опромінення, називають потужністю дози. В системі СІ потужність дози вимірюється в Гр/с, позасистемна одиниця – рад/с.

На практиці для визначення радіаційного ефекту практично неможливо оцінити D_n , оскільки тіло, як правило, неоднорідне і енергія іонізуючого випромінювання розсіюється по всіх можливих напрямках і т.п., але можна розрахувати поглинуту дозу за іонізуючою дією випромінювання, яке оточує тіло. У зв'язку з цим вводять ще одне поняття дози для рентгенівського і γ -випромінювання – експозиційну дозу випромінювання, яка є мірою іонізації сухого повітря рентгенівським або γ -випромінюванням при нормальному атмосферному тиску.

За одиницю експозиційної дози прийнято Кл/кг. На практиці частіше використовують позасистемну одиницю, яку називають рентгеном (Р). Рентген –

експозиційна доза рентгенівського або γ -випромінювання, при якій в результаті повної іонізації в 1 см^3 повітря при нормальному атмосферних умовах (0°C і 760 мм рт. ст.) утворюється $2,8 \cdot 10^9$ пар іонів. Одиницею потужності експозиційної дози є 1 А/кг , а позасистемною одиницею – 1 Р/с .

Для переходу в розрахунках від експозиційної дози $D_{\text{екс}}$, як характеристики взаємодії поля і опроміненого середовища, необхідно знати властивості цього середовища і врахувати, що поглинута доза пропорційна падаючому іонізуючому випромінюванню. Зв'язок між цими величинами має наступний вигляд:

$$D_n = f \cdot D_{\text{екс}}, \quad (7.66)$$

тут f – коефіцієнт пропорційності, який залежить від складу опромінюваної речовини і енергії фотонів.

7.6.2. Біологічна дія іонізуючого випромінювання. Еквівалентна доза

Виявилось, що для живих організмів потрібно врахувати при переході від $D_{\text{екс}}$ до $D_{\text{к}}$ не лише склад тканин і енергію частин (коефіцієнт f), але й тип випромінювання – рентгенівське, нейтронне, γ -випромінювання тощо. Одні і ті ж поглинуті дози випромінювання різної природи по різному діють на живий організм. Крім того, виявилось, що радіобіологічний ефект залежить не тільки від поглинутої дози, але й від деяких інших факторів. Основним серед них слід вважати лінійну густину іонізації.

Для кількісної оцінки цього фактора введено поняття коефіцієнта відносної біологічної ефективності або коефіцієнта якості випромінювання. Цей коефіцієнт показує, у скільки разів ефективність біологічної дії даного виду випромінювання більша, ніж рентгенівське або γ -випромінювання, при однаковій поглинутій дозі в тканинах. Так, катаракта, яка виникає при опроміненні γ -випромінюванням, виникає при дозі 200 рад , а при дії швидких нейтронів при дозі 20 рад . Таким чином, для швидких нейтронів коефіцієнт якості рівний 10 .

В таблиці 7.2 наведені значення коефіцієнта якості для деяких видів іонізуючого випромінювання.

Таблиця 7.2. Значення коефіцієнта якості іонізуючого випромінювання.

Вид іонізуючого випромінювання	Значення коефіцієнта якості
Рентгенівське (X -промені), i γ -випромінювання	1
α -випромінювання	20
Нейтрони з енергією $0.1 - 10 \text{ MeV}$	10
Нейтрони з енергією 20 KeV (теплові)	3

Поглинута доза разом з коефіцієнтом якості дає уявлення про біологічну дію іонізуючого випромінювання. В зв'язку з цим в радіобіології і радіаційній дозиметрії з'явилось нове поняття – еквівалентна доза $D_{\text{екв}}$.

$$D_{\text{екв}} = K \cdot D_n \quad (7.67)$$

тут K – коефіцієнт якості. Оскільки K – безрозмірний коефіцієнт, то еквівалентна доза випромінювання має ту ж розмірність, що й поглинута доза, але називається зівертом (Зв), на честь відомого шведського радіолога Рольфа Зіверта. Позасистемною одиницею вимірювання $D_{\text{екв}}$ є біологічний еквівалент рентгена – бер; 1 бер – 10^{-2} Зв. Еквівалентна доза в берах рівна поглинутій дозі в радах, помноженій на коефіцієнт якості: 1бер=1/год·К.

У випадку сумарної дії α - і β -випромінювання, що характерно для забрудненої місцевості після аварії ядерного реактора, можна користуватись вимірюванням поглинутої дози і потім переводити її в еквівалентну дозу $D_{\text{екв}}$. Практично в таких випадках завжди вимірюють потужність експозиційної дози $D_{\text{екс}}$ в мР/год або мкР/с.

Радіаційну загрозу радіоактивної речовини оцінюють за активністю, яка вимірюється в Кюрі (Ки) або бекерелях (Бк).

Знаючи активність джерела можна розраховувати потужність експозиційної дози на різних відстанях від нього і таким чином визначити допустимий час перебування в цьому полі.

Приклади розв'язку задач до 7 розділу

Задача 7.1. Визначити енергію, яка випромінюється через спостережуване віконце печі протягом 2 хв. Температура печі 1500 К, площа віконця 10 см^2 . Вважати, що піч випромінює як абсолютно чорне тіло.

Розв'язок:

Дано:
 $t = 2 \text{ хв} = 120 \text{ с}$

$T = 1500 \text{ К}$

$S = 10 \text{ см}^2 = 10^{-3} \text{ м}^2$

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}$

Енергія, яка випромінюється через спостережуване віконце печі, визначається за формулою

$$E = RSt,$$

де R – енергетична світність віконця печі, яка визначається за законом Стефана-Больцмана $R = \sigma T^4$, де σ – стала Стефана-Больцмана. Підставивши числові значення у формули,

$E - ?$

отримаємо:

$$E = \sigma T^4 St$$

$$E = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \cdot (1500 \text{ К})^4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot 120 \text{ с} = 3.4 \cdot 10^4 \text{ Дж}$$

Відповідь: $E = 3.4 \cdot 10^4 \text{ Дж}$.

Задача 7.2. Червона межа фотоелекту для калію 620 нм. Чому дорівнює мінімальна енергія фотона, виражена в Дж і еВ, який викликає фотоелект?

Дано:

$$\lambda_{max} = 620 \text{ нм} = 62 \cdot 10^{-8} \text{ м}$$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$E = ?$

Для червоної межі фотоелекту

Тоді

$$E = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{62 \cdot 10^{-8} \text{ м}} = 3.2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = \frac{3.2 \cdot 10^{-19}}{1.6 \cdot 10^{-19}} \text{ еВ} \approx 2 \text{ еВ}.$$

Відповідь: $E = 3.208 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 2 \text{ еВ}$.

Задача 7.3. Визначити сталу радіоактивного розпаду і активність ізольованого ізооту ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ масою 1 г. Визначити час, протягом якого активність зменшить на 10%. Період піврозпаду ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ складає 1620 років.

Дано:

$$m = 1 \text{ г}$$

$$T_{1/2} = 1620 \text{ років}$$

$$A = 0.9 \cdot A_0$$

$$\mu = 226 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$$

$$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$\lambda_{\text{Ra}} = ?, A = ?, t = ?$

Розв'язок:

Зв'язок між енергією фотона E і довжиною хвилі λ випромінювання виражається формулою

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

h – стала Планка; c – швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі.

$$\lambda = \lambda_{max}.$$

$$E = h \frac{c}{\lambda_{max}}.$$

Розв'язок:

Виразимо сталу радіоактивного розпаду через період піврозпаду:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$$\lambda = \frac{0.69}{1620 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с}} = 1.35 \cdot 10^{-11} \cdot \text{с}^{-1}$$

Активність ізооту в початковий

момент часу:

$$t = 0.9 \cdot A_0 = \lambda \cdot N_0$$

$$A = 1.35 \cdot 10^{-11} \cdot c^{-1} \frac{1\Gamma}{226 \frac{\Gamma}{\text{моль}}} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \text{моль}^{-1} = 3.61 \cdot 10^{10} \text{Бк} = 0.97 \text{Ки}.$$

Так як активність прямо пропорційна кількості радіоактивних ядер, то зменшення активності на 10% відповідає умові $N = 0.9 \cdot N_0$. Згідно закону радіоактивного розпаду $N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$, тоді

$$0.9 \cdot N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t},$$

звідси

$$t = \frac{\ln 0.9}{\lambda} = - \frac{\ln 0.9}{1.35 \cdot 10^{-11} \cdot c^{-1}} \approx 7.78 \cdot 10^9 \approx 267 \text{ років}.$$

Відповідь: $\lambda = 1.35 \cdot 10^{-11} \cdot c^{-1}$; $A = 3.61 \cdot 10^{10} \text{Бк} = 0.97 \text{Ки}$; $t = 7.78 \cdot 10^9 \approx 267 \text{ років}$.

Задача 7.4. Знайти довжину хвилі де Бройля для нерелятивістського електрона, який набув кінетичної енергії 100 еВ.

<p style="text-align: center;">Дано:</p> <p style="text-align: center;">$E = 100 \text{ еВ}$</p>	<p style="text-align: right;">Розв'язок:</p> <p style="text-align: center;">Кінетична енергія і імпульс електрона пов'язані співвідношенням:</p> $E = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$
---	---

Підставивши цей вираз у формулу де Бройля, отримаємо:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mE}} = 1.23 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Відповідь: $\lambda = 1.23 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Задача 7.5. Частина, прискорена різницею потенціалів $U = 200 \text{ В}$, має довжину хвилі де Бройля $\lambda_B = 2.02 \text{ пм}$. Вважати, що її заряд рівний заряду електрона, обрахуйте її масу m .

<p style="text-align: center;">Дано:</p> <p style="text-align: center;">$U = 200 \text{ В}$</p> <p style="text-align: center;">$\lambda_B = 2.02 \cdot 10^{-12} \text{ м}$</p> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 5px 0;"/> <p style="text-align: center;">$m - ?$</p>	<p style="text-align: right;">Розв'язок:</p> <p style="text-align: center;">Згідно формулою для довжини хвилі де Бройля,</p> $\lambda_B = \frac{h}{mv} \quad (1)$ <p>Швидкість v знаходимо з умови, що кінетична енергія</p>
---	---

$$\frac{mv^2}{2}$$

частина з зарядом e , пройшовши різницю потенціалів U , рівне $e \cdot U$.

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (2)$$

Підставивши (2) в (1), отримаємо

$$\lambda_B = \frac{h}{m\sqrt{\frac{2eU}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2eUm}}$$

Звідки знаходимо:

$$m = \frac{h^2}{2eU\lambda_B^2}$$

Підставивши числові значення, отримуємо:

$$m = \frac{(6.63 \cdot 10^{-34})^2}{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 200 \cdot (2.02 \cdot 10^{-12})^2} = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Відповідь: $m = 1.67 \cdot 10^{-27}$ кг, таку масу має протон у стані спокою .

Контрольні питання до 7 розділу.

1. Що називають дозиметрією ?
2. Які ви знаєте закони теплового випромінювання?
3. Які основні положення квантової механіки?
4. Які фізичні методи аналізу?
5. Резонансні методи квантової механіки?



Тестові завдання до 7 розділу.

1. Яка гіпотеза лежить в основі закону Планка для теплового випромінювання?

А. теплове випромінювання дискретне;

Б. густина потоку енергії випромінювання залежить від температури;

В. випромінюваність залежить від температури;

Г. частота теплового випромінювання залежить від температури;

Д. теплове випромінювання має електромагнітну природу.

2. Згідно закону Віна, максимум спектральної густини абсолютно чорного тіла обернено пропорційний

- А. абсолютній температурі;
- Б. квадрату абсолютної температури;
- В. абсолютній температур в четвертій степені;
- Г. абсолютній температурі в п'ятій степені;
- Д. довжині хвилі.

3. Абсолютно чорне тіло - це тіло, у якого коефіцієнт поглинання світла не залежить від довжини хвилі і рівний

- А. 0;
- Б. 100;
- В. 0,1;
- Г. 1;
- Д. 0,001.

4. Виділіть фізичне явище, спостережуване при взаємодії світла з речовиною

- А. фотолюмінесценція;
- Б. кавітація;
- В. поглинання;
- Г. деформація;
- Д. резонанс.

5. Принцип Паулі стверджує, що в атомі не може бути двох електронів з однаковими значеннями:

- А. головного квантового числа;
- Б. довільних двох квантових чисел;
- В. довільних трьох квантових чисел;
- Г. спінового квантового числа;
- Д. всіх чотирьох квантових чисел.

6. Визначення закону Стефана-Больцмана для теплового випромінювання тіл.

- А. повна енергетична світність абсолютно чорного тіла прямо пропорційна його абсолютній температурі;
- Б. абсолютній температурі;

В. повна енергетична світність абсолютно чорного тіла не залежить від його температури;

Г. повна енергетична світність абсолютно чорного тіла прямо пропорційна четвертого ступеня його абсолютної температури;

Д. повна енергетична світність абсолютно чорного тіла прямо пропорційна другого ступеня його абсолютної температури.

7. Формула закону зміщення Віна для теплового випромінювання тіл.

А. довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії випромінювання абсолютно чорного тіла, прямо пропорційна його абсолютній температурі;

Б. довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії випромінювання абсолютно чорного тіла, обернено пропорційна його абсолютній температурі;

В. довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії випромінювання абсолютно чорного тіла, не залежить від абсолютної температури;

Г. довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії випромінювання абсолютно чорного тіла, пропорційна четвертого ступеня його абсолютної температури;

Д. довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії випромінювання абсолютно чорного тіла, пропорційна другого ступеня його абсолютної температури.

8. Вкажіть гранично допустиму дозу йонізуючого випромінювання протягом року.

- А. 10 Зв;
- Б. 100 Зв;
- В. 5 бер;
- Г. 50 бер;
- Д. 500 бер.

9. Чому рівний 1 Кюрі (Ки), як одиниця вимірювання активності радіоактивного препарату, якщо його виразити через Бк (Беккерель)?

- А. 10^6 Бк;
- Б. $3.7 \cdot 10^{10}$ Бк;
- В. 1Бк;
- Г. 10^8 Бк;
- Д. 100^9 актів розпаду.

10. Найглибше в організм проникає:

- А. альфа-частинки;
- Б. гамма-промені;
- В. бета-частинки;
- Г. нейтрони;
- Д. протони.

11. Що називають тепловим випромінюванням?

А. явище, зумовлене взаємозв'язком між електричними і тепловими процесами у провіднику;

Б. процес перенесення теплоти від одного середовища до іншого;

В. теплообмін між поверхнею тіла і навколишнім середовищем;

Г. електромагнітне випромінювання, джерелом енергії якого є тепловий рух частинок речовини;

Д. передача енергії одних тіл до інших.

12. Потік випромінювання – фізична величина, яка:

А. переноситься випромінюванням;

Б. характеризує просторовий розподіл випромінювання в заданому напрямку;

В. визначається відношенням енергії випромінювання до часу перенесення;

Г. визначається відношенням потоку випромінювання до просторового кута;

Д. визначається відношенням світлової енергії до малого об'єму, який заповнюється світлом.

13. Що називають енергетичною світністю тіла?

А. кількість енергії, яка випромінюється тілом з одиниці площі за одиницю часу;

Б. яскравість тіла;

В. кількість енергії, яка випромінюється всією поверхнею тіла;

Г. кількість енергії, яка випромінюється в одиничному спектральному інтервалі з одиниці площі за одиницю часу;

Д. кількість енергії, яка випромінюється всією поверхнею тіла за одиницю часу.

14. Спектральна густина енергетичної світності за частотою – фізична величина, яка:

А. дорівнює повній енергії, що випромінюється тілом;

Б. характеризує просторовий розподіл випромінювання в заданому напрямку;

В. визначається відношенням енергетичної світності, яка розглядається в безмежно малому спектральному інтервалі, до ширини цього інтервалу;

Г. визначається відношенням світлової енергії до малого об'єму, який заповнюється світлом;

Д. визначається відношенням потоку випромінювання елемента поверхні до площі цього елемента.

15. Сірі тіла – тіла, коефіцієнт поглинання яких дорівнює

А. 1;

Б. нулю;

В. менше 1;

Г. більше 1;

Д. менше 0,9;

16. Теплове випромінювання тіл:

А. гамма-випромінювання, що випускається радіоактивними тілами;

Б. електромагнітне випромінювання, що випускається під дією світла;

В. електромагнітне випромінювання, що випускається під дією електронів;

Г. електромагнітне випромінювання, яке випромінюють нагріті тіла;

Д. електромагнітне випромінювання.

17. Квантовим числом n - визначається:

А. проекція L_z моменту кількості руху частинки на вибраний напрямок зовнішнього магнітного поля Z ;

Б. значення повного моменту імпульсу електрона;

В. значення орбітального механічного моменту імпульсу;

Г. значення власного моменту імпульсу електрона;

Д. енергетичний рівень атома.

18. Квантовим числом l - визначається:

А. проекція моменту кількості руху частинки на вибраний напрямок зовнішнього магнітного поля Z ;

Б. основний енергетичний рівень електрона;

В. значення орбітального механічного моменту імпульсу;

Г. значення власного моменту імпульсу електрона;

Д. значення повного моменту імпульсу електрона.

19. Квантовим числом m_l - визначається:

А. проекція L_z моменту кількості руху частинки на вибраний

напрямок зовнішнього магнітного поля Z ;

Б. основний енергетичний рівень електрона;

В. значення орбітального механічного моменту імпульсу;

Г. значення власного моменту імпульсу електрона;

Д. значення повного моменту імпульсу електрона. ANSWER: А

20. Квантовим числом m_s - визначається:

А. проекція L_z моменту кількості руху частинки на вибраний напрямок зовнішнього магнітного поля Z ;

Б. основний енергетичний рівень електрона;

В. значення орбітального механічного моменту імпульсу;

Г. значення повного моменту імпульсу електрона;

Д. значення власного моменту імпульсу електрона.

21. Червона межа фотоефекту визначається за формулою:

А. $hc \cdot \nu = A$;

Б. $\nu = A/h$;

В. $hc/\nu = A$;

Г. $hc \cdot \nu = A$;

Д. $\nu = Ah/c$.

22. Зовнішній фотоефект - це:

А. виникнення пари електрон - дірка;

Б. йонізація атомів або молекул під дією фотонів;

В. розклад молекул під дією світла;

Г. виривання електронів з поверхні тіла під дією світла;

Д. вид люмінесценції, що збуджується ультрафіолетовим світлом.

23. ЯМР-томографія - це:

А. метод тримання на основі ядерного магнітного резонансу

зображень довільних перерізів непрозорих об'єктів;

Б. метод дослідження діяльності серця реєстрацією змін у часі магнітної складової електромагнітного поля серця;

В. запис біоелектричних потенціалів сітківки ока;

Г. застосування з лікувальною метою магнітного поля;

Д. метод дослідження різних об'єктів, оснований на явищі ЕПР.

24. Характеристичне рентгенівське випромінювання

А. електромагнітне випромінювання вільних електронів;

Б. електромагнітне випромінювання, що спостерігається при гальмуванні електронів на антикатоді;

В. теплове випромінювання антикатада, нагрітого під дією електронного променя;

Г. випромінювання, що спостерігається при переході електронів з верхніх енергетичних рівнів атомів антикатада на нижчі;

Д. випромінювання антикатада, нагрітого потоком прискорених електронів.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗКУ

Задача 7. 1. Знайти довжину хвилі де Бройля λ для електронів, які пройшли різницю потенціалів $U_1 = 1 \text{ В}$ і $U_2 = 100 \text{ В}$.

Задача 7. 2. Знайти довжину хвилі де Бройля λ для атома водню, що рухається при температурі $T = 293 \text{ К}$ з найімовірнішою швидкістю.

Задача 7. 3. Тіло масою $m = 70 \text{ кг}$ протягом $t = 24 \text{ год.}$ поглинуло енергію іонізуючого випромінювання $E = 10 \text{ Дж.}$ Яка поглинена доза і потужність поглиненої дози?

Задача 7. 4. Визначити питому активність штучно одержаного радіоактивного ізотопу ${}^{90}_{38}\text{Sr}$, період піврозпаду якого 28 років.



ЛІТЕРАТУРА

1. Авоста В. Основы современной физики / В. Авоста, К. Коган, Б. Брэм // – М.: Просвещение, 1981. – 490 с.
2. Антонов В.Ф. Практикум по биофизике / В.Ф. Антонов, А. М. Черныш, В.И. Пасечник. – М.: ГИЦ ВЛАДОС, 2001. – 352 с.
3. Антонюк В.С, Тимчак Г.С, Бондаренко М.О. та ін. Біофізика в задачах та прикладах. К.: НТУУ „КПІ”, 2015, 208 с.
4. Бегун П.И. Биомеханика: учебник для вузов / П.И. Бегун, Ю.А. Шукейло. – СПб.: Политехника, 2000. – 464 с.
5. В.Д. Дідух, Ю.А. Рудяк, Р.Б. Ладика та ін. Фізичні основи променевих та ядерних методів діагностики та лікування: навч. посіб. /– ТДМУ, 2018. – 104 с.
6. В.Д. Дідух, Ю.А. Рудяк, Р.Б. Ладика, О.А. Багрій-Заяць та ін. Фізичні основи функціонування медичного обладнання. – ТДМУ, 2015. – 284 с.
7. Васькін Р. А., Васькіна І. А. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Радіоекологія» / укладачі: Р. А. Васькін, І. В. Васькіна. – Суми: Сумський державний університет, 2010. – с.42.
8. Біофізика: Підруч. для студ. біолог., медичних та фізичних факультетів ВУЗів / Під ред. П.Г. Костюка. - К.: Обереги, 2001. – 544 с.
- Біофізика і біомеханіка: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / В.С. Антонюк, М.О. Бондаренко, В.А. Ващенко [та ін.]. – К.: НТУУ «КПІ», 2012.– 344 с.
9. Г. С. Корнющенко, У. С. Швець, Л. Ф. Суходуб. Медична та біологічна фізика: практикум Навчальний посібник У двох частинах Частина 1. Суми. Сумський державний університет, 2017. – 186 с.
10. Злепко С. М., Коваль Л. Г., Гаврілова Н. М., Ткачик І. С. Медична апаратура спеціального призначення. Навчальний посібник. Вінниця. ВНТУ, 2010, с.17.
11. Кравчук С. Ю. Основи променевої діагностики / С. Ю. Кравчук, А.П. Лазар // - Чернівці, 2005. - 208 с.
12. Марценюк В. П., Дідух В. Д., Ладика Р. Б.,Сверстюк А. С., Андрущак І. Є.Чернецький Д. В. Медична та біологічна фізика.
13. О. П. Овчаренко, А. П. Лазар, Р. П. Матюшко. Основи радіаційної медицини. Одеса. Одеський університет, 2002, с.12-13.
14. Пулюй І. Листи /І. Пулюй; збір, упор. Та «Слово до читача» О. Збожної. – Тернопіль, 2007. – с.337 - 339.
15. Пулюй І. «Україна та її міжнародне значення» / І. Пулюй. – Прага, 1915, с.15–20.
16. Сторчун Є. В., Матвійчук Я. М. Біофізичні та математичні основи інструментальних методів медичної діагностики. Навч. посібник. – Львів: Вид. «Ростр – 7», 2009. –216 с.
17. Федів В, І, Олар О. І, Микитюк О. Ю., Д. І. Остафійчук, Боєчко В. Ф. Медична та біологічна фізика. Навчальний посібник для студентів вищих медичних навчальних закладів. Чернівці. «Буковинський державний медичний університет. 2018. –194 с.

18. Чалий О.В. Медична і біологічна фізика в 2-ох томах. / О.В. Чалий //– К.:ВІПОЛ, 2001 – 840 с.
19. Черняев А. П., Волков Д. В., Лыкова Е. Н. Физические методы визуализации в медицинской диагностике. Учеб. Пособ. – М. : ООП физического факультета МГУ, 2019, с.42.
20. Яворський Б.М. Курс фізики ч.ІІ / Б.М. Яворський, А.А. Детлаф, Л.Б. Милковська // - К.: Вища школа, 1972. – 345 с.
21. Ярослав Лопушанський. Медична і біологічна фізика. Збірник задач і запитань. Вінниця.»Нова книга», 2010 – 583 с.
22. Василенко І. А. Збірник задач та вправ для вивчення термодинамічних процесів. Навч. посіб. / І. А. Василенко, С. О. Куманьов, О. А. Півоваров – Д.: Акцент ПП, 2014. – 249 с.
23. Біофізика і фізичні методи аналізу: Навчальний посібник для студентів фармацевтичного факультету/ Е.І. Сливко, О.З. Мельнікова, О.З.Іванченко, Н.С. Біляк, О.Є. Прокопченко. - Запоріжжя, 2018.- 234 с.
24. Біофізика. Практикум/ М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик, І.О. Яковенко - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. – 288 с.
25. Москаленко О.В., Циганков С.А., Янченко В.О., Суховєєв О.В. Сучасні методи аналізу сполук і матеріалів (спектральні методи аналізу). – Ніжин: Видавництво НДУ імені Миколи Гоголя, 2017. – 250 с.
26. Назаренко Н.С. Методичні вказівки для самостійної роботи студентів при підготовці до практичного заняття. Вінниця, ВНМУ – 2010, 38 с.
27. Біофізика. Фізичні методи аналізу та метрологія: підручник. /Е. І. Личковський, В. О. Тиманюк, О. В. Чалий [та ін.]: за редакцією Е. І. Личковського, В. О. Тиманюка. – Вінниця. Нова книга, 2014. 464 с.
29. Энциклопедия физики и техники femto.com.ua7.

Електронні ресурси

1. Part 2 Computer tomography: URL: <http://www.youtube.com> – Назва з екрану.
2. Комп'ютерна томографія. URL:<http://www.youtube.com> – Назва з екрану.
3. Gama Knife Surgery. URL: <http://www.youtube.com> – Назва з екрану.
4. Redefining Radiosurgery. URL: <http://www.youtube.com> – Назва з екрану.
5. Linear acceleration. URL: <http://www.youtube.com> – Назва з екрану.
6. c:\users\admin\Desktop\фотоелектроколориметр. html.
7. www.cmd/sumdu.edu.ua/files/metodiki_org_mikroelementov/pdf
8. Просвічуючий електричний мікроскоп. URL: <http://www.youtube.com> – Назва з екрану.
9. Теплове випромінювання біооб'єктів. Термографія. Koleso – to.narod.ru/med/biofizika/teplo/teplo/.html
10. Ядерний магнітний резонанс: МРТ. URL: <http://www.youtube.com> – Назва з екрану.
11. МРТ. Магнітно-резонансна томографія. URL: <http://www.youtube.com> – Назва з екрану.
12. Біомедична апаратура високої інтелектуальної складності. URL: http://www.Posibnyky.VNTU.edu.ua/b_ap?11.html – Назва з екрану.
13. oftalmolog.in.ua. URL: <http://oftalmolog.in.ua> – Назва з екрану.

14. C:\users\admin\Desktop\Курс истории физики (Кудрявцев П. С.).html.
15. <https://mipt.ru/dmcp/.../lab21-arpfeluv/uj.pdf>.
16. https://ru.wikipedia.org/wiki/флуоресценция_в_биологических_исследованиях.
17. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса высокого разрешения. www.chem.msu.su./rus/teaching/ustyniuk-nmr-lectures/Lecture-1.
18. www.wikivand.com/uk/Флуоресцентная_микроскопия.
19. www.lazer.ru/groups/show-68.htm.
20. www.imc-ua.com/blog/jadernaja_medicina/2014-12-13-35.
21. bourabai.kzp/physics/lasers.html.
22. http://www.romanenko.biz/ua/library/artikle_pilchikov.html.

ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Вказівки щодо вивчення дисципліни та виконання контрольної роботи.

1. Ознайомитися з програмою дисципліни.
2. Опрацювати відповідні теми підручника.
3. В процесі вивчення дисципліни «Біофізика» студент повинен виконати контрольну роботу. Номери контрольної роботи визначаються шифром студента.
4. Контрольна робота виконується в зошиті, на титульній сторінці якого слід вказати:

Біофізика
Контрольна робота
Студента фармацевтичного
факультету
Тернопільського державного медичного
Університету імені І.Я. Горбачевського

(ПП)

(№ залікової книжки, шифр)

(адреса)

5. Кожна задача контрольної роботи повинна починатися з нової сторінки; умова задачі переписується повністю без будь-яких скорочень; графіки, які пояснюють умову задачі або її розв'язок, повинні виконуватися акуратно із застосуванням креслярських засобів.

6. Розв'язок кожної задачі контрольної роботи повинен супроводжуватися короткими, але вичерпними поясненнями.

7. При захисті контрольної роботи студент повинен не лише дати пояснення, стосовно розв'язків задач, а й відповісти на питання з теоретичного матеріалу, який стосується контрольної роботи

8. Після закінчення вивчення дисципліни студенти здають іспит. До здачі іспиту допускається студент, який захистив контрольні роботи та засвоїв, передбачувані програмою, теми практичних занять.

**Варіанти контрольної роботи з «Біофізики» для студентів 1 курсу
фармацевтичного факультету заочної форми навчання**

№	A(1)													
1	14	32	41	65	91	110	121	141	161	181	201	221	241	261
2	9	38	60	76	92	111	123	142	168	182	203	223	243	262
3	7	23	43	80	93	112	125	143	162	183	205	225	245	263
4	4	24	44	78	94	113	127	144	169	184	207	227	247	264
5	11	25	45	79	95	114	129	160	163	185	209	229	249	265
6	6	26	46	77	96	115	131	146	170	186	211	231	251	266
7	3	27	47	74	97	116	133	147	164	187	213	233	253	267
8	8	40	55	71	98	117	135	148	171	188	215	235	255	268
9	2	29	49	72	99	118	137	149	165	189	216	237	257	269
10	10	30	50	73	100	119	139	150	172	190	217	239	259	270
11	5	31	51	70	87	120	122	151	166	191	218	222	242	271
12	12	21	52	69	85	101	124	152	173	192	219	224	244	272
13	13	33	53	75	83	102	126	153	167	193	220	226	246	273
14	1	22	54	61	81	103	128	154	174	194	212	228	248	274
№	Б(2)													
1	5	35	47	64	90	104	130	141	175	181	202	221	258	275
2	16	36	56	62	89	105	131	153	162	187	204	222	257	276
3	17	37	46	63	88	106	132	152	176	182	206	236	256	277
4	18	32	58	61	87	107	133	151	163	190	208	224	255	278
5	8	29	59	65	86	108	137	150	177	183	210	225	254	279
6	20	40	48	66	85	109	138	149	164	188	212	226	253	280
7	3	21	41	67	84	110	139	148	178	184	214	227	252	261
8	2	22	42	68	83	111	140	147	165	189	216	235	251	262
9	1	23	43	69	82	112	131	146	179	185	218	229	250	263
10	4	24	44	70	81	113	129	145	166	199	220	230	249	264
11	15	25	45	71	100	114	127	144	180	198	203	231	248	265
12	6	30	57	72	99	115	125	143	167	200	201	232	247	266

13	7	27	55	73	98	116	123	142	161	196	207	233	246	267
14	19	28	60	74	97	117	121	155	168	195	205	234	245	268
№	B(3)													
1	9	29	49	71	96	120	122	156	169	200	212	230	245	269
2	3	30	50	62	95	108	133	155	176	199	211	228	244	270
3	11	25	51	63	94	104	132	154	170	198	209	226	243	271
4	7	32	52	67	93	119	131	153	177	185	207	224	242	272
5	13	33	53	65	92	118	124	152	171	196	205	222	241	273
6	4	27	54	66	91	117	129	151	178	195	203	237	259	274
7	5	35	55	64	90	115	126	145	172	194	201	235	257	275
8	6	36	56	68	89	103	127	149	179	184	220	233	255	276
9	17	37	57	69	88	111	128	148	173	192	219	231	253	277
10	18	38	58	70	87	109	125	147	180	191	218	229	251	278
11	8	39	59	61	86	114	124	146	174	190	217	227	249	279
12	20	40	60	72	85	106	130	150	161	189	216	225	247	280
13	1	21	41	73	84	103	135	144	175	188	215	223	245	261
14	2	23	42	74	83	101	121	143	162	187	214	221	243	262
№	Г(4)													
1	15	38	43	78	82	101	122	142	176	181	200	222	242	262
2	1	36	44	79	81	102	124	141	169	183	201	224	241	263
3	5	23	45	80	100	103	126	160	175	185	202	226	260	264
4	11	24	46	61	99	104	128	159	168	187	203	228	259	265
5	7	25	47	62	98	112	130	158	174	189	204	230	258	266
6	3	35	48	63	97	106	132	157	167	191	205	232	257	267
7	9	27	49	64	96	114	134	156	173	193	206	234	256	268
8	10	28	50	65	95	108	139	155	166	195	207	236	255	269
9	6	22	51	66	94	116	131	154	172	197	208	238	254	270
10	12	30	52	67	93	110	129	153	165	199	209	240	253	271
11	13	31	53	68	92	118	127	152	171	182	210	223	252	272
12	14	32	54	69	91	112	125	151	164	184	211	225	251	273

13	8	37	55	70	90	120	123	150	170	186	212	227	250	274
14	17	34	56	71	89	114	121	149	163	188	213	229	249	275

Задачі для контрольної роботи

- Обертний рух твердого тіла описується рівнянням $\Delta \cdot \varphi = A + B \cdot t + C \cdot t^3$, де $A=3$ рад, $B=2$ рад/с, $C=1$ рад/с². Визначити: 1) кут повороту, кутову швидкість і кутове прискорення в моменти часу $t_1 = 1$ с і $t_2 = 5$ с; 2) середню кутову швидкість за інтервал часу $\Delta t = t_1 - t_2$.
- Фігурист обертається з частотою $\nu_1 = 15$ Гц. Як зміниться момент інерції фігуриста, якщо він випростає руки в сторони і частота обертання при цьому стане $\nu_2 = 5$ Гц?
- Кутова швидкість тіла, що обертається, змінюється за законом $\omega = A + B \cdot t + C \cdot t^2$, де $A=2$ рад/с², $B=6$ рад/с³, $C=4$ рад/с³. Знайти середню кутову швидкість за інтервал часу від $t_1 = 1$ с до $t_2 = 5$ с та відповідний кут повороту.
- Вважаємо, що електрон в атомі водню рухається по коловій орбіті з сталою швидкістю v . Визначити кутову швидкість обертання електрона навколо ядра і його нормальне прискорення. Радіус орбіти прийняти рівним $0,7 \cdot 10^{-10}$ м і швидкість електрона на цій орбіті $2,2 \cdot 10^6$ м/с.
- Число обертів ротора центрифуги 10^3 об/хв. Після відключення двигуна обертання припинилося через 2 хв. Визначити кутове прискорення. Записати рівняння даного руху.
- Який кут опише радіус-вектор матеріальної точки в проміжку від 2 до 5 с від початку руху, якщо кутова швидкість змінюється за законом $\omega = A \cdot t + B \cdot t^2$, якщо $A=2$ рад/с², $B=4$ рад/с³?
- Обруч і диск однакової маси котяться без ковзання з однаковою швидкістю. Кінетична енергія обруча 20 Дж. Визначити кінетичну енергію диску.
- Однорідний стержень довжиною 2 м і масою 2 кг обертається в горизонтальній площині навколо вертикальної осі, яка проходить через його центр. Визначити кутове прискорення стержня викликане обертним моментом $9,81 \cdot 10^{-2}$ Н · м.
- Розглядаючи тіло людини як циліндр з радіусом 30 см, висотою 1,9 м і масою 90 кг, визначити момент інерції людини в положенні стоячи відносно вертикальної осі, яка проходить через центр маси людини.
- Визначити момент інерції однорідного стержня довжиною 1 м і масою 0,5 кг відносно осі обертання, яка перпендикулярна стержню і проходить через його а) середину; б) кінець.
- Діаметр великогомілкової кістки $d = 3,2$ см, товщина стінки $h = 3$ мм. Розрив кістки відбувся при навантаженні $F = 18$ кН. Знайдіть за цими даними руйнуюче напруження і відносну поздовжню деформацію в момент розриву кістки, якщо модуль Юнга кістки $E = 2,3$ ГПа.

12. В даний час виготовлений сталевий рояльний дріт з межею міцності на розрив $\sigma_p = 2.77$ ГПа. Яку максимальну довжину можна взяти, щоб підвішений дріт не обірвався під дією власної ваги? Густина дроту $\rho = 7.8$ г/см³.
13. Стегнова кістка з ефективною площею перерізу $S = 2$ см² розірвалася під дією сили розтягу $F = 28$ кН. Знайти відносну поздовжню деформацію кістки і об'ємну густину потенціальної енергії кістки. Модуль Юнга для живої кістки $E = 2,3$ ГПа.
14. Знайти роботу, яку виконує спортсмен при розтягуванні пружини еспандера на $l = 70$ см, якщо відомо, що при зусиллі $F = 10$ Н еспандер розтягується на $\Delta l = 1$ см.
15. Прямолінійна однорідна дротина довжиною l і масою m зігнута так, що точка перегину ділить дротину на дві частини, довжини яких відносяться як 1:3. Визначити момент інерції дротини відносно осі обертання, яка проходить через точку згину перпендикулярно площині дротини.
16. Визначити силу необхідну для видовження сухожилля перерізом 5 мм² на $0,02$ його початкової довжини. Модуль Юнга вважати 10^9 Н/м².
17. Яка робота виконується при розтязі на 1 мм м'яза довжиною 7 см і діаметром 4 мм? Модуль Юнга м'язової тканини дорівнює $19.8 \cdot 10^6$ Н/м².
18. Навантаження на гомілкову кістку в 1700 Н викликає відносну деформацію стиску $5 \cdot 10^{-4}$. Визначити ефективну площу поперечного перерізу кістки, якщо модуль пружності $22.5 \cdot 10^9$ Н/м².
19. М'яз довжиною 12 см і діаметром 1 см під дією навантаження в 50 Н видовжився на 7 мм. Визначити модуль пружності м'яза.
20. Визначити абсолютне видовження сухожилля довжиною 4 см і діаметром 5 мм під дією сили $31,4$ Н. Модуль пружності сухожилля 10^9 Н/м².
21. Написати рівняння гармонічного коливання з амплітудою 5 см, періодом 4 с і початковою фазою $\pi/3$. Визначити зміщення коливної точки від положення рівноваги при $t = 0$ і $t = 2$ с. Намалювати графік даного руху.
22. Записати рівняння гармонічного коливання з амплітудою 6 см і періодом 5 с, якщо початкова фаза коливань дорівнює: а) 0 ; б) $\pi/2$. Намалювати графік даного руху для випадків а) і б).
23. Рівняння руху точки має вигляд $x = \sin(\pi \cdot t/2 + \pi/4) \cdot x$ см. Визначити період коливань, максимальну швидкість і максимальне прискорення матеріальної точки.
24. Яка частота коливань, якщо найменша відстань між точками, що коливаються в однакових фазах, дорівнює 1 м? Швидкість поширення хвиль 330 м/с.
25. Точка, що знаходиться на відстані $0,5$ м від джерела коливань, має в момент часу $t = T/3$ зміщення, яке дорівнює половині амплітуди. Визначити довжину хвилі, якщо при $t = 0$ зміщення джерела рівне нулю.
26. Період коливань хвилі $3 \cdot 10^{-3}$ с, а швидкість поширення 330 м/с. Визначити довжину хвилі.
27. Частота коливань хвилі 300 Гц, а довжина хвилі $1,15$ м. Визначити швидкість поширення хвилі.

28. Хвиля описується рівнянням $x = 0.1 [\sin \cdot \pi \cdot (t - y/10)]$. Визначити зсув точок середовища для часу $t = 5$ с у точці $y = 40$ м.
29. Хвиля описується рівнянням $x = 0.05 \cdot \sin[2 \cdot \pi \cdot (t - y/2)]$. Визначити найближчу координату точки середовища, для якої в момент часу $t = 1$ с зміщення дорівнює $x = 0.005$ м.
30. Головка випромінювача УЗ-генератора має діаметр 4,5 см. Визначити повну потужність, випромінювання при терапевтичній інтенсивності $0,5 \text{ Вт/м}^2$.
31. Визначити силу, що діє на барабанну перетинку людини площею 70 мм^2 при порозі больового відчуття та порозі слухового відчуття на частоті 1000 Гц ($I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$, $I_6 = 10 \text{ Вт/м}^2$).
32. Розрив барабанної перетинки настає при рівні інтенсивності звуку 150 дБ . Визначити інтенсивність і амплітудне значення звукового тиску для звуку частотою 1 кГц , при яких може наступити розрив барабанної перетинки.
33. Два звуки частотою 1000 Гц відрізняються за гучністю на 1 фон. В скільки разів відрізняються їх інтенсивності?
34. Розмова людини оцінюється рівнем гучності $E = 50$ фон ($\nu = 1 \text{ кГц}$). Яким буде рівень гучності, якщо одночасно говоритимуть 10 осіб?
35. Визначити силу, яка діє на барабанну перетинку при гучності 80 фон, якщо частота $\nu = 1 \text{ кГц}$, а площа перетинки $S = 60 \text{ мм}^2$?
36. Диференціальне рівняння згасаючих коливань має вигляд: $0,2x'' + 0,6x' + 0,8x = 0$. Знайти частоту коливань та декремент затухання.
37. Логарифмічний декремент затухання $\lambda = 0,02$. За який час амплітуда зменшиться у 50 разів, якщо $\nu = 50 \text{ Гц}$?
38. У скільки разів відрізняються довжини хвиль звуку частотою $\nu = 1 \text{ кГц}$ у крові і кістковій тканині при температурі $t = 37^\circ\text{C}$? При температурі $t = 37^\circ\text{C}$ швидкість звуку у крові $\nu_1 = 1530 \text{ м/с}$, у кістковій тканині $\nu_2 = 3200 \text{ м/с}$.
39. Механічне пошкодження барабанної перетинки відбулося при рівні інтенсивності звуку $L = 16 \text{ Б}$ при частоті $\nu = 1 \text{ кГц}$. Знайдіть інтенсивність звуку.
40. При обстеженні печінки ультразвуковий сигнал, відбитий від каменів печінки, був отриманий через $t = 120 \text{ мкс}$ після подачі сигналу. На якій глибині були виявлені камені, якщо швидкість поширення ультразвуку в печінці $\nu = 1560 \text{ м/с}$.
41. З горизонтально розміщеного медичного шприца діаметром $d = 1 \text{ см}$ витискається фізіологічний розчин силою $F = 5 \text{ Н}$. Знайти швидкість витікання рідини з голки. Густина фізіологічного розчину $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$. Де більша швидкість руху рідини: в шприці чи в руслі його голки? Відповідь обґрунтуйте.
42. В спокої через аорту діаметром $d = 2.5 \text{ см}$ викидається $V_1 \approx 78 \text{ мл}$ крові за секунду. Середня швидкість крові по капілярі великого кола буває порядку $\nu = 0.28 \text{ мм/с}$ в тканині, яка знаходиться в стані спокою. Знайти площу поперечного перерізу відкритого капілярного ложа. Поясніть, чому швидкість крові в капілярах значно менша від швидкості крові в артеріях?

43. Голова людини розміщена на $h = 45$ см вище від серця. Тиск на рівні серця $p = 118$ мм. рт. ст. Який тиск крові в мозку людини? Який тиск крові в ногах людини на рівні $h = 1.6$ м нижче від серця? До чого це може призвести? Густина крові $\rho = 1050$ кг/м³.

44. Через трубку потрібно за 15 хвилин пропустити 10 кг води, за умови ламінарної течії рідини. Який діаметр трубки необхідно вибрати для такої операції? (В'язкість води 10^{-3} Па·с (при 20°C)).

45. Для перекачування рідини з однієї цистерни в іншу, змонтували трубопровід. При такій самій відстані, діаметр труби зменшили в три рази. У скільки разів збільшився гідравлічний опір системи?

46. Визначити густину частинок пилу кулеподібної форми з діаметром 2 мкм, що повністю осіли в кімнаті висотою 3 м за час рівний 2,5 год.

47. Створили емульсію касторової олії у воді з крапель олії діаметром 10^5 м. Через який час уся касторова олія збереться на поверхні води? Висота води в посудині 10 см, густина касторової олії $0.96 \cdot 10^3$ кг/м³, в'язкість води 10^{-3} Па·с (при 20°C).

48. У воді знаходяться зважені часточки глини (каламутний розчин). Через який час часточки глини осядуть на дно стакану? Товщина шару води 20 см, діаметр часточок глини 10^{-4} м, густина глини $3 \cdot 10^3$ кг/м³.

49. Величина сили поверхневого натягу рідини залежить від температури. Ліки дозують за допомогою піпетки краплями. У скільки разів змінюється доза водного розчину лікарської речовини, якщо при 20°C його коефіцієнт поверхневого натягу $\sigma = 71,8 \cdot 10^{-3}$ Н/м, а при 10°C $\sigma_B = 74,0 \cdot 10^{-3}$ Н/м?

50. В'язкість крові у нормі $4 \cdot 10^{-3}$ Па·с. При якій швидкості протікання крові в судині діаметром $3 \cdot 10^{-2}$ м, почнуть виникати завихрення? Густина крові $\rho_{\text{крові}} = 1.05 \cdot 10^3$ кг/м³.

51. При течії рідини по трубці діаметром 1 см, градієнт тиску дорівнює 2 Па/см. Який об'єм рідини проходить через трубку за 1 хвилину, якщо її динамічна в'язкість дорівнює $4.8 \cdot 10^{-3}$ Па·с?

52. Визначити час, за який у кімнаті висотою 2,75 м повністю осяде пил. Частинки пилу вважати кульками з діаметром 3 мкм і густиною 2,5 г/см³.

53. Визначити швидкість осідання еритроцитів у плазмі крові, вважаючи їх ізольованими кульками діаметром 7 мкм і густиною 1090 кг/м³. Густина плазми крові 1030 кг/м³.

54. Визначити час осідання частинок масла, вважаючи їх кульками з діаметром 3 мкм, при відстоюванні молока. Висота шару молока 20 см. Густина молока 1028 кг/м³, а масла 940 кг/м³. В'язкість молока $1,8 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

55. Визначити час спливання частинок касторової олії кулеподібної форми з діаметром 4 мкм у воді. Товщина шару води 25 см.

56. З якого матеріалу виготовлена кулька з діаметром 4 мм, яка в гліцерині падає з швидкістю 0,45 м/с?

57. Чому дорівнює коефіцієнт поверхневого натягу скипидару, якщо за допомогою піпетки, діаметр кінця якої 1,2 мм, його можна дозувати краплями масою 0,01 г.

58. Визначити масу 35 крапель касторової олії, одержаних за допомогою крапельниці, діаметр кінця трубки якої дорівнює 2 мм.
59. При дозуванні водяного розчину ліків краплями температура в приміщенні змінилася від 20°C до 25°C. На скільки відсотків зміниться доза ліків, якщо поверхневі натяги, що відповідають цим температурам $\sigma_1 = 72.65$ мН/м і $\sigma_2 = 71.16$ мН/м.
60. Який діаметр має перетяжка при відриві краплі дистильованої води масою 50 мг?
61. Яка середня квадратична, середня арифметична і найімовірніша швидкості молекул анестетика трихлоретилену ($C_{12}C = CHC_{13}$) в альвеолах людини? Температура альвеолярного повітря $t = 37^\circ C$.
62. Знайти середню швидкість (за розподілом Максвелла) молекули аргону при температурі 250 К.
63. Знайти середню квадратичну швидкість молекули криптону при температурі 270 К.
64. Середня швидкість молекул ідеального газу дорівнює 500 м/с. Тиск газу складає $1.5 \cdot 10^5$ Па. Знайти густину газу за цих умов.
65. Скільки молекул ідеального газу міститься у балоні об'ємом 100 л при температурі 350 К та тиску 10^4 Па?
66. Густина газу при температурі 27°C складає 2 кг/м³. Знайти тиск, якщо маса молекули дорівнює 10^{-25} кг.
67. Знайти середню квадратичну, найбільш ймовірну та середню (за розподілом Максвелла) швидкості молекул водню при температурі 0°C.
68. Замкнена посудина з об'ємом 7 л містить деякий газ масою 0,8 г під тиском 300 кПа. Визначити середню квадратичну швидкість молекул цього газу.
69. Знайти імпульс молекули кисню, що рухається з найбільш ймовірною швидкістю при температурі 27°C.
70. Знайти коефіцієнт внутрішнього тертя повітря при нормальних умовах. Діаметр молекули повітря прийняти рівним 0,9 нм.
71. Знайти коефіцієнт дифузії водню при нормальних умовах, якщо середня довжина вільного пробігу молекул складає 0,18 мкм.
72. Знайти коефіцієнт дифузії гелію при нормальних умовах. Діаметр атома гелію дорівнює 0,19 нм.
73. При якому тиску відношення коефіцієнта внутрішнього тертя деякого газу до коефіцієнта його дифузії дорівнює $0,3$ кг/м³, а середня квадратична швидкість його молекул дорівнює 632 м/с?
74. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул гелію при температурі 0°C і тиску 760 мм. рт. ст., якщо при цих умовах коефіцієнт внутрішнього тертя для нього дорівнює $1.3 \cdot 10^{-4}$ Па · с.
75. Знайти діаметр молекули кисню, якщо відомо, що для кисню коефіцієнт внутрішнього тертя при 0°C дорівнює 18,8 мкПа · с.
76. Знайти коефіцієнт дифузії повітря при тиску 760 мм.рт.ст. і температурі 10°C. Діаметр молекули повітря прийняти рівним 0,3 нм.
77. Знайти коефіцієнт внутрішнього тертя повітря при тиску $1,01 \cdot 10^5$ Па і температурі 20°C. Діаметр молекули повітря прийняти рівним 0,5 нм.

78. У скільки разів коефіцієнт внутрішнього тертя кисню більший від коефіцієнта внутрішнього тертя азоту? Температура газів однакова.
79. Знайти коефіцієнт дифузії кисню при нормальних умовах, якщо середня довжина вільного пробігу молекул складає $0,16 \text{ мкм}$.
80. Середня довжина вільного пробігу молекул азоту при температурі 270 К і нормальному атмосферному тиску $7,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}$. Визначте середнє число зіткнень за секунду при тиску $0,275 \text{ Н/м}^2$ і при тій самій температурі.
81. Суміш складається з 64 кг кисню та 44 кг вуглекислого газу. Яку густину має суміш при температурі 10°C та під тиском $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$?
82. Балон об'ємом 30 л наповнений киснем. Визначити масу кисню, що знаходиться в балоні при температурі 47°C і тиску $0,11 \text{ МПа}$.
83. Визначити температуру водню, що має густину 6 кг/м^3 при тиску $10,1 \text{ МПа}$.
84. Визначити тиск газу з кількістю речовини 2 моли , що займає об'єм 6 л при температурі -38°C .
85. У посудині знаходиться кисень масою $3,2 \text{ кг}$. Якою повинна бути мінімальна місткість посудини з киснем, якщо стінки посудини розраховані на тиск $15,2 \text{ МПа}$? Температура газу в посудині 17°C .
86. У балон накачали водень, створивши при температурі 6°C тиск $7,73 \text{ МПа}$. Визначити густину газу в балоні.
87. Визначити густину водню, що створює при температурі 27°C тиск $24,5 \text{ МПа}$.
88. Визначити молярну масу газу, у якого при температурі 58°C і тиску $0,25 \text{ МПа}$ густина 4 кг/м^3 .
89. Визначити кількість речовини газу, що займає об'єм 2 см^3 при температурі 241 К і тиску 1 ГПа .
90. Який газ при тиску $0,808 \text{ МПа}$ і температурі 240 К має густину $0,81 \text{ кг/м}^3$?
91. При зворотньому термодинамічному процесі, який протікає при температурі 73°C , тіло виконує роботу 80 Дж , а внутрішня енергія тіла зростає на $7,5 \text{ Дж}$. Визначити зміну ентропії тіла.
92. Визначити кількість теплоти, яка виділяється при ізотермічному стиску 7 г азоту від нормального тиску 10^5 Па до тиску $51,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Температура азоту 27°C .
93. Визначити зміну ентропії в процесі перетворення 2 молів льоду при 0°C у воду і наступному нагріванні до 50°C .
94. Визначити зміну ентропії у процесі нагрівання 1 моля води від 20°C до 100°C і наступному перетворенні у пару.
95. Обчислити питому теплоємність повітря c_v і c_p , вважаючи, що в його складі 25% кисню і 75% азоту.
96. Визначити приріст ентропії ΔS при змішуванні $m_1 = 2 \text{ г}$ фторотану ($\text{F}_3\text{C}-\text{CH}-\text{ClBr}$), $m_2 = 120 \text{ г}$ закису азоту (N_2O) і $m_3 = 78 \text{ г}$ кисню. Температури та тиски газів до змішування однакові.

97. Визначити коефіцієнт теплопровідності шкіри товщиною $\Delta x = 1.5$ мм, якщо різниця температур на зовнішній і внутрішній поверхнях $\Delta T = 0,2$ К, площа поверхні тіла $S = 1.7\text{ м}^2$, а енергія основного обміну $Q = 8$ МДж.

98. При утворенні одного моля глюкози вільна енергія рослини зростає на $\Delta G \approx 50$ кДж, а ентропія знижується на $\Delta S = -150$ Дж/К при $T = 285$ К. При синтезі однієї молекули глюкози поглинається $n = 3$ кванти світла. На скільки змінюється ентропія системи рослини – Сонце в цьому процесі? Для обчислень прийняти довжину хвилі квантів світла $\lambda = 750$ нм.

99. Яку роботу виконують зовнішні сили в ідеальній холодильній машині для того, щоб забрати з холодильної камери 107 Дж теплоти, якщо температура в камері 253 К, а температура охолоджуючої води 290 К?

100. Кусок льоду масою $0,2$ кг, що має початкову температуру 250 К, перетворено в пару при температурі 373 К. Визначити зміну ентропії, вважаючи, що теплоємність льоду і води не залежить від температури. Тиск атмосферний. Питомі теплоємності льоду і води дорівнюють відповідно $1.8 \cdot 10^3$ Дж/кг·град і $4.18 \cdot 10^3$ Дж/кг·град, питома теплота плавлення льоду $3.35 \cdot 10^5$ Дж/кг, питома теплота кипіння води $2.26 \cdot 10^6$ Дж/кг.

101. Всередині клітини водорості Нітелла концентрація калію 500 мМ, при температурі 23°C . Яка різниця потенціалів встановлюється на мембрані клітини, якщо концентрація калію у воді $0,5$ мМ? Мембрана проникна тільки для іонів калію.

102. За рівнянням Нернста обчисліть концентрацію калію в жовчі кроля, якщо в сироватці крові концентрація калію 4 мМ, а рівноважний потенціал для цього випадку -28 мВ. $t = 23^\circ\text{C}$.

103. Яка різниця потенціалів реєструється в гігантському аксоні каракатиці, якщо концентрації калію, натрію і хлору ззовні мембрани відповідно: $10,4$ мМ, 463 мМ, 592 мМ, а всередині аксона: 340 , 49 і 114 мМ?

104. Який рівноважний потенціал для іонів калію на мембрані аксону кальмара, при температурі 23°C ? Концентрація іонів калію всередині аксона 321 мМ, а ззовні -13 мМ.

105. Всередині клітини водорості Нітелла концентрація калію 500 мМ, при температурі 23°C . Яка різниця потенціалів встановлюється на мембрані клітини, якщо концентрація калію у воді $0,5$ мМ? Мембрана проникна тільки для іонів калію.

106. За рівнянням Нернста обчисліть концентрацію калію в жовчі кроля, якщо в сироватці крові концентрація калію 4 мМ, а рівноважний потенціал для цього випадку -28 мВ. $t = 23^\circ\text{C}$.

107. Яка різниця потенціалів реєструється в гігантському аксоні каракатиці, якщо концентрації калію, натрію і хлору ззовні мембрани відповідно: $10,4$ мМ, 463 мМ, 592 мМ, а всередині аксона: 340 , 49 і 114 мМ? Відношення проникностей для іонів в стані спокою клітини: $P_{\text{K}}:P_{\text{Na}}:P_{\text{Cl}}=1:0,04:0,45$. $t = 23^\circ\text{C}$.

108. При генерації потенціалу дії мембрана нервової клітини, в основному, проникна для іонів натрію. Яка різниця рівноважного потенціалу для іонів натрію може бути досягнута при генерації потенціалу дії нервової клітини (температура 23°C)? Концентрація іонів натрію зовні мембрани -150 мМ. Всередині клітини -15 мМ.

109. Визначити рівноважний потенціал для іонів хлору в еритроцитах людини при температурі 23°C. Концентрація іонів хлору всередині клітини 80 мМ, а ззовні – 3 мМ.

110. Відношення концентрації іонів натрію ззовні і всередині клітина – 10:1. Яка різниця потенціалів створених ними встановлюється на мембрані? Температура 27°C.

111. Потенціал спокою для м'язових клітин жаби дорівнює – 88 мВ. Чи відповідає він рівноважному потенціалу для іонів калію: відношення концентрації іонів калію всередині м'язової клітини до зовнішньої концентрації – 50:1? Температура 20°C.

112. За який час встановлюється рівноважна концентрація речовини в клітині, якщо її об'єм відноситься до площі поверхні, як 2,6:1,3? Проникність оболонки становить $2.8 \cdot 10^{-6}$ м/с.

113. Визначити величину коефіцієнта дифузії для речовини, розчиненій у воді, коли при градієнті концентрації 100 моль/см, густина потоку речовини дорівнює $5 \cdot 10^{-6}$ моль·м/с.

114. При генерації потенціалу дії мембрана м'язового волокна проникна, в основному, для іонів натрію. Потенціал спокою для м'язової клітини – 92 мВ. На скільки зміниться величина мембранного потенціалу при генерації потенціалу дії? Температура 27°C.

115. Яку величину різниці потенціалів на мембрані еритроцитів визначають іони калію? Вважати мембрану селективною тільки для іонів калію. Відношення концентрацій іонів всередині і ззовні еритроциту як 27:1. Температура 37°C.

116. Рівноважний потенціал для іонів натрію, виміряний у – мотонейронів кішки – 90 мВ. В міжклітинній рідині концентрація іонів натрію 150 мМ. Яка концентрація іонів натрію всередині нейрона? Температура 300 С.

117. В якому відношенні знаходяться концентрації іонів натрію в м'язовому волокні жаби, якщо рівноважний потенціал для іонів натрію в таких клітинах, при температурі 23°C дорівнює +49 мВ?

118. Яку різницю потенціалів зареєструє рН-метр, якщо при 37°C різниця в концентрації іонів водню всередині і ззовні клітини складає – 100:1?

119. Який коефіцієнт дифузії для іонів натрію у воді при 18°C якщо за одну секунду середня величина зміщення складає 2.10^{-5} см?

120. У скільки разів відрізняється час встановлення рівноважної концентрації в гігантських нервових клітинах моллюска, діаметр 1 мм, і в нейронах мозку людини, діаметр 10 мкм? Всі інші параметри вважати однаковими.

121. Визначити величину коефіцієнта дифузії для речовини, розчиненій у воді, коли при градієнті концентрації 100 моль/см, густина потоку речовини дорівнює $5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{моль} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

122. За який час встановлюється рівноважна концентрація речовини в клітині, якщо її об'єм відноситься до площі поверхні, як 2,6:1,3? Проникність оболонки становить $2.8 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

123. Концентрація іонів Na^+ у клітині дорівнює 15 ммоль/л, а в оточуючому середовищі 145 ммоль/л. Визначити потенціал Нернста на мембрані, який підтримуватиме рівноважне співвідношення зазначених концентрацій при температурі 310 К.

124. Концентрація іонів калію в клітинах м'язу ссавця 180 ммоль/л, у міжклітинному просторі 4,5 ммоль/л. Визначити значення потенціалу на мембрані при температурі 37°C.

125. Визначити рівноважний мембранний потенціал, створений на бішаровій ліпідній мембрані іонами калію при температурі 20°C, якщо концентрація іонів калію з одного боку мембрани дорівнює 10^{-3}M , а з іншого боку – 10^{-5}M .

126. Визначити рівноважний мембранний потенціал, створений на мембрані іонами калію при температурі 17°C, якщо концентрація іонів калію з однієї сторони мембрани 10^{-3}M , а іншої – 10^{-5}M .

127. Визначити потенціал дії гігантського аксона кальмара, якщо відомо, що концентрація іонів натрію зовні становить 440 мМ, а всередині – 49 мМ. Температура дорівнює 37°C.

128. Розрахувати потенціал спокою аксона кальмара, який знаходиться у морській воді. Концентрація іонів в аксоплазмі кальмара 400 мМ [K^+], 50 мМ [Na^+], і 100 мМ [Cl^-]; в морській воді – 10 мМ [K^+], 460 мМ [Na^+] і 540 мМ [Cl^-]. Співвідношення констант проникливості іонів калію, натрію і хлору через мембрану відповідно: (1:0,04:0,045). Температуру вважати різною 293 К.

129. Потенціал спокою нерва кінцівки краба становить 60 мВ. Визначити концентрацію іонів калію ззовні нерва, якщо всередині вона складає 360 мМ. Температуру вважати рівною 37°C

130. Визначити потенціал спокою клітини при температурі 20°C, якщо відношення концентрацій іонів калію в клітині і навколишньому середовищі дорівнює 10:1.

131. Потенціал спокою в клітинах м'язу дорівнює 88 мВ. Визначити відношення концентрації іонів калію усередині м'язового волокна і в зовнішньому середовищі. Температуру тіла людини вважати рівною 37°C.

132. Середнє значення концентрації іонів K^+ в аксоплазмі гігантського аксона кальмара дорівнює 360 моль/м³, а ззовні – 10 моль/м³. Обчислити потенціал Нернста для цих іонів при температурі 27°C.

133. Середнє значення концентрації іонів Na^+ в аксоплазмі гігантського аксона кальмара дорівнює 49 моль/л, а в морській воді 460 моль/л. Обчислити потенціал Нернста для цих іонів при температурі 27°C.

134. Середнє значення концентрації іонів Cl^- в аксоплазмі гігантського аксона кальмара дорівнює 40 моль/м³, а в морській воді 540 моль/м³. Обчислити потенціал Нернста при температурі 27°C.

135. Концентрація іонів K^+ усередині клітини дорівнює 150 ммоль/л, а в оточуючому середовищі 5 ммоль/л. При якій різниці потенціалів на мембрані підтримується рівноважне відношення концентрацій іонів? Температура 37°C.

136. Концентрація іонів Cl^- усередині клітини дорівнює 9 ммоль/л, а в оточуючому клітину середовищі 125 ммоль/л. Різниця потенціалів на мембрані

дорівнює 70 мВ. Чи знаходиться концентрація іонів Cl^- у рівновазі? Температуру вважати рівною 310 К.

137. Концентрація іонів Na^+ у клітині дорівнює 15 ммоль/л, а в оточуючому середовищі 145 ммоль/л. Визначити потенціал Нернста на мембрані, який підтримуватиме рівноважне співвідношення концентрацій при температурі 310 К.

138. Визначити рівноважний мембранний потенціал мітохондрій, якщо при 37°C усередині мітохондрій $\text{pH}=9$, а в навколишньому середовищі – 7? Температура дорівнює 20°C .

139. Визначити рівноважний мембранний потенціал при відношенні концентрацій натрію зовні й усередині клітини: 1) 1:1; 2) 10:1; 3) 100:1.

140. Визначити рівноважний мембранний потенціал, створений на бішаровій ліпідній мембрані іонами калію при температурі 37°C , якщо концентрація іонів калію з одного боку мембрани дорівнює 10^{-4} М, а з іншого боку 10^{-5} М.

141. Визначити потенціал поля, створеного диполем у точці, яка розмішена на відстані 0,5 м в напрямі під кутом 30° відносно електричного моменту диполя. Середовищем є вода, відносна діелектрична проникність якої 81. Диполь утворений зарядами $2 \cdot 10^{-6}$ Кл, які розміщені на відстані 0,5 см один від одного.

142. Два точкових заряди 1 мкКл і 2 мкКл знаходяться на відстані 30 см. Знайти силу взаємодії даних зарядів?

143. Сила струму в колі пацієнта становить 8 мА при напрузі 50 В. Визначити опір ділянки між електродами апарату для гальванізації і площу пластин, якщо густина струму складає $0,1$ мА/см².

144. Джерело струму, е.р.с. якого становить 1,5 В, забезпечує струм в колі 1 А. Внутрішній опір джерела струму 0,2 Ом. Визначити коефіцієнт корисної дії джерела струму.

145. Яка кількість іонів K^+ буде введена хворому при іонофорезі за 10 хв при густині струму $0,02$ мА/см² з електрода площею 10 см²?

146. Визначити, яку кількість іонів йоду буде введено хворому при іонофорезі за 10 хв при густині струму $0,25$ мА/см³ з електрода площею 5 см².

147. Опір тканини постійному струму в колі між електродами при гальванізації складає 200 Ом при площі прокладок 100 см² і густині струму $0,1$ мА/см². Визначити напругу, яку забезпечує апарат для гальванізації.

148. Е.р.с. батареї 50 В, внутрішній опір 2,5 Ом. Визначити силу струму в колі і напругу на електродах батареї, якщо зовнішній опір кола 20 Ом.

149. Сила струму в колі пацієнта становить 8 мА при напрузі 50 В. Визначити опір постійному струму ділянки між електродами апарату для гальванізації і площу обкладок, якщо густина струму складає $0,1$ мА/см².

150. Джерело струму, ЕРС якого 1,5 В, створює в колі силу струму 1 А. Внутрішній опір джерела струму 0,2 Ом. Визначити коефіцієнт корисної дії джерела струму.

151. Через графітовий провідник у формі паралелепіпеда довжиною 3 см і площею поперечного перерізу 30 мм² проходить струм 5 А. Знайти спад напруги на кінцях графітового провідника. Питомий опір графіту $8 \cdot 10^6$ Ом·м.

152. Термопара з опором 6 Ом і сталою 0,05 мВ/К підключена до гальванометра, з опором 14 Ом і чутливістю 10^8 А. Визначити зміну температури, що дозволяє визначити ця термопара.

153. Визначити температуру середовища, в якому розміщена термопара зі сталою 50 мкВ/К, якщо стрілка включеного в коло термопари гальванометра з ціною поділки 1 мкА і опором 12 Ом відхиляється на 40 поділок. Другий спай термопари занурений в лід, що тане. Опором термопари знехтувати.

154. Встановити питому теплоємність електроліту густиною $1,5 \text{ г/см}^3$, якщо при розміщенні його в електричному полі УВЧ (50 МГц) за 1 с в 1 м виділилось $5,84 \cdot 10^4$ Дж теплоти і протягом 5 хв його температура зросла на 5 К.

155. Порівняти теплову дію одного і того ж електричного поля УВЧ (7 МГц) на електроліт густиною $1,2 \text{ г/см}^3$ і питомою теплоємністю 2500 Дж/(кг·К) та діелектрик густиною $0,75 \text{ г/см}^3$ і питомою теплоємністю 3200 Дж/(кг·К), якщо температура електроліту зросла на 5 К за 5 хв, а діелектрика - на 6 К за 4 хв.

156. Індукція магнітного поля в центрі дротяного кільця радіусом 20 см, по якому тече струм, становить 5 мкТл. Визначити різницю потенціалів на кінцях кільця, якщо його опір 5,2 Ом.

157. З мідного дроту довжиною 6,28 м і опором 1 Ом зробили кільце. Визначити індукцію магнітного поля в центрі кільця, якщо до кінців дроту кільця прикладена різниця, потенціалів 2 В. Чи вплине матеріал кільця на величину індукції при незмінних інших характеристиках кільця?

158. На кінцях дротяного кільця радіусом 25 см і опором 15 Ом різниця потенціалів 4,2 В. Визначити індукцію магнітного поля в центрі кільця.

159. Дротяне кільце опором 3 Ом ввімкнене в електричне коло так, що різниця потенціалів на кінцях кільця 5 В. Індукція магнітного поля в центрі кільця 4 мкТл. Визначити радіус кільця.

160. З мідного дроту довжиною 6,28 м і площею поперечного перерізу 0,5 мм: зроблено кільце. Чому дорівнює індукція магнітного поля в центрі кільця, якщо на кінцях дроту різниця потенціалів 3,4 В.

161. Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 0,5 Тл по колу радіусом 5 мм. Визначити кінетичну енергію електрона.

162. В однорідному магнітному полі з індукцією 5 мТл електрон рухається по колу зі швидкістю $5 \cdot 10^6$ м/с. Який радіус кола?

163. Електрон влетів у однорідне магнітне поле з індукцією 30 мТл перпендикулярно лініям індукції поля і описав дугу радіусом 10 см. Визначити імпульс електрона.

164. Протон влетів в однорідне магнітне поле індукцією 500 мкТл, перпендикулярно лініям індукції і описав дугу радіусом 5 см. Яка кінетична енергія протона?

165. Заряджена частинка рухається по колу радіусом 5 см в однорідному магнітному полі з індукцією 12,56 мТл. Визначити питомий заряд q/m частинки, якщо її швидкість 10 м/с.

166. Електрон рухається по колу радіусом 3 мм в однорідному магнітному полі з індукцією 0,5 Тл. Яка кінетична енергія електрона?

167. Електрон влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до ліній індукції зі швидкістю $2 \cdot 10^6$ м/с. Індукція поля 2 мТл. Обчислити прискорення протона в магнітному полі.

168. Протон, пройшовши прискорюючу різницю потенціалів 1 кВ, влітає в однорідне магнітне поле з індукцією 1 мТл під кутом 45° . Визначити силу, що діє на протон.

169. Протон рухається по колу зі швидкістю $2 \cdot 10^6$ м/с в однорідному магнітному полі з індукцією 2 мТл. Обчислити радіус кола.

170. Електрон влетів в однорідне магнітне поле, індукція якого 20 мТл, перпендикулярно лініям індукції поля і описав дугу радіусом 5 см. Визначити імпульс електрона.

171. Протон влетів в однорідне магнітне поле, індукція якого 209 мкТл, перпендикулярно лініям індукції і описав дугу радіусом 4 см. Визначити кінетичну енергію електрона.

172. Електрофорез застосовують для введення лікарських препаратів у біологічні тканини. Знайти масу іонів йоду, які введені хворому за 5 хв. при густині струму $j = 0.04$ А/см² з електроду площею 4 см².

173. Іонофорез застосовується для введення лікарських речовин в біологічні тканини. Визначити, яка кількість іонів йоду буде введена хворому за 10 хв при густині струму 0,05/см² з електроду площею 5 см².

174. Знайти потенціал поля, створеного диполем в точці, віддаленій на відстань $r = 0.5$ м, в напрямку, що утворює кут $\alpha = 30^\circ$ відносно електричного моменту диполя. Диполь знаходиться у воді і має дипольний момент $2 \cdot 10^{-10}$ Кл·м.

175. Знайти потенціал поля, створеного диполем в точці, віддаленій на відстань $r = 1.2$ м, в напрямку, що утворює кут $\alpha = 60^\circ$ відносно електричного моменту диполя. Диполь знаходиться у воді і має дипольний момент $5 \cdot 10^{-10}$ Кл·м.

176. Знайти густину струму в провіднику, якщо швидкість впорядкованого руху електронів $v = 0.2$ см/с, а їхня концентрація $n = 10^{19}$ см⁻³.

177. Знайти густину струму в електроліті, якщо концентрація іонів у ньому $n = 10^5$ см⁻³, їх рухливість $b_+ = 4.5 \cdot 10^{-4}$ см²/В·с, $b_- = 6.5 \cdot 10^{-4}$ см²/В·с і напруженість електричного поля $E = 10$ В/с. Вважаючи густину струму скрізь однаковою, знайти силу струму, якщо площа кожного електрода $S = 1$ дм². Заряд іона вважати рівним заряду електрона $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

178. Знайти потенціал поля, створеного диполем $p = 2 \cdot 10^{-10}$ Кл·м в точці, віддаленій на віддаль $r = 2.5$ мм в напрямку під кутом $\alpha = 30^\circ$ відносно напрямку p , якщо диполь знаходиться у воді.

179. На відстані $r = 3$ см від прямолінійного провідника зі струмом індукція магнітного поля дорівнює 10^{-4} Тл. Визначити силу струму, що тече по провіднику і напруженість магнітного поля у цій точці (середовище – вакуум), $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

180. В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0.25$ Тл знаходиться прямолінійний провідник довжиною 1,4 м, на який діє сила 2,1 Н.

Визначити кут між напрямком струму в провіднику і напрямком магнітного поля, якщо сила струму в провіднику 12 А.

181. Скільки штрихів на 1 см має дифракційна решітка, якщо дифракційний максимум четвертого порядку, для світла з довжиною хвилі 550 нм, відхиляється на кут 6° ?

182. Промінь світла виходить із скипидару у повітря. Граничний кут повного внутрішнього відбиття для скипидару 42° . Чому дорівнює швидкість світла в скипидарі?

183. Оптична густина розчину дорівнює 2. Чому дорівнює його коефіцієнт пропускання світла?

184. Коефіцієнт пропускання світла для розчину дорівнює 0,1. Чому дорівнює оптична густина розчину?

185. При проходженні світла через шар розчину товщиною 0,14 мм інтенсивність зменшилась на 63% від початкового значення. Знайти показник поглинання k для розчину.

186. Яка фокусна відстань об'єктива мікроскопа, що дає збільшення в 500 разів? Фокусна відстань окуляра 4 см, довжина тубуса 20 см.

187. Світловий промінь падає на поверхню води і відбивається від неї. Під яким кутом до поверхні води потрібно дивитись на відбитий промінь, щоб він був повністю поляризований? ($n_{\text{води}} = 1.33$).

188. Під яким кутом до горизонту знаходиться Сонце, якщо промені світла, що відбивається від води є плоскополяризовані? ($n_{\text{води}} = 1.33$).

189. Розчин цукру з концентрацією $0,22 \text{ г/см}^3$ налили в кювету довжиною 2 дм. На який кут потрібно повернути призму аналізатора, щоб компенсувати обертання площини поляризації світла розчином цукру? Питомий кут обертання для сахарози $[\alpha_0] = \frac{\text{град см}^3}{\text{г/дм}}$.

190. Інтенсивність плоскополяризованого світла після призми аналізатора зменшилась в 9 разів. На який кут повернута призма поляризатора відносно аналізатора?

191. У скільки разів інтенсивність релеевського розсіювання світла відрізняється при довжині світлової хвилі в 670 нм (червоне світло) і 546 нм (зелене світло)?

192. При проходженні світла через шар 6% розчину сахарози в кюветі довжиною 20 см площина поляризації обертається на кут $\varphi = 14^\circ$. В розчині іншої концентрації сахарози, при довжині кювети в 10 см площина поляризації обертається на кут $\varphi = 6.8^\circ$. Яка концентрація сахарози другого розчину?

193. Розчин глюкози з концентрацією $0,28 \text{ г/см}^3$ в кюветі довжиною 10 см, обертає площину поляризації світла, що проходить через кювету на кут $11,4^\circ$. Визначити питомий кут обертання для глюкози.

194. На дифракційну решітку, що має 500 штрихів на 1 мм, падає нормально світло з довжиною хвилі 650 нм. Знайти кут відхилення дифракційного променя, що відповідає другому дифракційному максимуму.

195. Граничний кут повного внутрішнього відбивання світла на межі скипидар-повітря становить 43° . Визначити швидкість поширення світла в скипидарі.

196. На стакан, повністю заповнений водою, поклали скляну пластинку. Під яким кутом повинен падати з води на пластинку промінь світла, щоб на поверхні розділу пластинки з повітрям мало місце повне внутрішнє відбивання? Показник заломлення скла 1,5, води 1,33.

197. Показники заломлення деякого сорту скла для червоного і фіолетового променів становлять відповідно 1,51 і 1,53. Визначити граничні кути повного внутрішнього відбивання при переході цих променів через границю розділу скло-повітря.

198. Монохроматичний промінь падає нормально на бічну поверхню призми, заломлюючий кут якої дорівнює 30° . Показник заломлення матеріалу призми для цього променя 1,55. Знайти кут відхилення променя при виході з призми від початкового напрямку.

199. Монохроматичний промінь падає нормально на бічну поверхню призми і виходить з неї відхиленим на кут 30° . Показник заломлення матеріалу призми для цього променя 1,55. Визначити заломлюючий кут призми.

200. Показник заломлення скла дорівнює 1,52. Знайти граничні кути повного внутрішнього відбивання для поверхонь розділу: 1) скло-повітря; 2) вода-повітря; 3) скло-вода.

201. Промінь світла виходить із скипидару в повітря. Граничний кут повного внутрішнього відбивання для цього променя $42^\circ 23'$. Яка швидкість поширення світла в скипидарі?

202. Визначити кількість штрихів на 1 мм дифракційної решітки, якщо світло з довжиною хвилі 555 нм, що нормально падає на решітку, дає перший максимум на відстані 3,5 см від центрального. Відстань від решітки до екрану становить 100 см.

203. Під яким кутом спостерігається дифракційний максимум третього порядку для монохроматичного світла з довжиною хвилі 555 нм, якщо на 1 см дифракційної решітки припадає 500 штрихів?

204. Монохроматичне світло з довжиною хвилі 555 нм падає нормально на дифракційну решітку. Максимум другого порядку спостерігається під кутом 15° від центрального. Яка кількість штрихів припадає на 1 см даної решітки?

205. Монохроматичне світло з довжиною хвилі 555 нм, яке падає нормально на дифракційну решітку, дає максимум третього порядку під кутом 5° . Визначити сталу решітки.

206. Визначити кут відхилення монохроматичного променя з довжиною хвилі 750 нм, що падає перпендикулярно на дифракційну решітку з кількістю штрихів 500 на 1 мм, для другого дифракційного максимуму.

207. Визначити відстань між штрихами дифракційної решітки, якщо дифракційний максимум четвертого порядку для монохроматичного світла з довжиною хвилі 0,5 мкм, що падає перпендикулярно на решітку, відхилений на кут 5° від центрального.

208. Визначити період дифракційної решітки, якщо для монохроматичного світла з довжиною хвилі 500 нм відстань між максимумами третього порядку на екрані, розміщеному від решітки на 1 м, становить 8 см.

209. На дифракційну решітку нормально падає світло з довжиною хвилі 0,6 мкм. Третій дифракційний максимум спостерігається під кутом 2° . Визначити сталу решітки.

210. Під яким кутом спостерігається максимум третього порядку, одержаний за допомогою дифракційної решітки, що має 500 штрихів на 1 см, якщо довжина хвилі падаючого нормально на решітку світла 0,6 мкм?

211. На дифракційну решітку нормально падає світло з довжиною хвилі 0,8 мкм. Четвертий дифракційний максимум спостерігається під кутом 3° . Визначити сталу решітки.

212. Визначити число штрихів на 1 мм дифракційної решітки, якщо світло з довжиною хвилі 600 нм нормально падає на решітку і дає перший максимум на відстані 33 см від центрального. Відстань від решітки до екрана 110 см.

213. Монохроматичне світло з довжиною хвилі 0,5 мкм падає нормально на решітку. Другий дифракційний максимум, що спостерігається на екрані, зміщений від центрального на кут 14° . Визначити число штрихів на 1 мм решітки.

214. На дифракційну решітку, що має 400 штрихів на 1 мм, падає нормально монохроматичне світло з довжиною хвилі 700 нм. Визначити кут відхилення променів, що відповідають першому дифракційному максимуму.

215. Визначити оптичну густину водного розчину йоду з концентрацією 0,2 моль/л і товщиною шару 2 см. Натуральний молярний показник поглинання розчину йоду прийняти рівним $13 \text{ л}/(\text{моль}\cdot\text{см})$.

216. При проходженні монохроматичного світлового пучка з довжиною хвилі 0,436 мкм через розчин товщиною 15 мм його інтенсивність зменшується на 70% від початкового значення. Визначити показник поглинання розчину для даної довжини хвилі.

217. Розчин глюкози з концентрацією $0,25 \text{ г}/\text{см}^3$ і товщиною шару 15 см повертає площину поляризації монохроматичного світла, що проходить через розчин, на кут 32° . Визначити питомий кут повороту.

218. Розчин цукру товщиною шару 20 см повертає площину поляризації світла на 30° . Визначити концентрацію цукру в розчині, якщо питомий кут повороту становить $6,67 \text{ град}\cdot\text{см}^2/\text{г}$.

219. Визначити питомий кут повороту розчину сахарози в соці цукрової тростини, якщо кут повороту площини поляризації складає 17° при довжині трубки з розчином 10 см. Концентрація розчину $0,25 \text{ г}/\text{см}^3$.

220. Визначити концентрацію розчину глюкози, якщо при проходженні світла через трубку довжиною 20 см площина поляризації повертається на кут $35,5^\circ$. Питомий кут повороту розчину глюкози $76,2 \text{ град}/\text{дм}$ на $1 \text{ г}/\text{см}^3$ концентрації.

221. На скільки відрізняється довжина хвилі, яка відповідає максимуму спектральної густини енергетичної світності з ділянки поверхні тіла людини, де має місце запальний процес порівняно з поверхнею, де температура в нормі ($t_n = 31^\circ\text{C}$) Вважати $\Delta T = 3 \text{ К}$.

222. Як зміниться енергетична світність абсолютно чорного тіла, якщо λ_{max} зменшилася в 1,2 рази?

223. Температура фотосфери Сонця дорівнює 5,3 кК. Вважаючи Сонце абсолютно чорним тілом, знайти частоту, що відповідає максимуму спектральної густини його випромінюванню.

224. У скільки разів зростає енергетична світність тіла людини, якщо його температура зростає від 36,6°C до 39,6°C?

225. Як зміниться енергетична світність випромінювання абсолютно чорного тіла, якщо температура підвищиться від 0°C до 273°C?

226. Поверхня чорного тіла нагріта до температури $T=1000$ К. У скільки разів зміниться потужність випромінювання цього тіла, якщо половину поверхні нагріти, а іншу половину охолодити на $\Delta T=100$ К?

227. Визначити енергетичну світність тіла людини при температурі $t=36^\circ\text{C}$, приймаючи його за сіре тіло з коефіцієнтом поглинання $\alpha=0,9$.

228. Температура чорного тіла $T=1000$ К. На скільки відсотків зміниться його енергетична світність при підвищенні температури на $\Delta T=1$ К?

229. На яку довжину хвилі припадає максимум спектральної густини енергетичної світності таких джерел теплового випромінювання: а) тіло людини з температурою поверхні шкіри $t=30^\circ\text{C}$; б) спіраль електричної лампочки ($T=2000$ К); в) поверхня Сонця ($T=5800$ К); г) атомна бомба, що має в момент вибуху температуру $T=10^7$ К. Тіла, що випромінюють, вважати чорними або сірими.

230. Внаслідок зміни температури сірого тіла максимум спектральної густини енергетичної світності змістився з $\lambda_1 = 2400$ нм на $\lambda_2 = 800$ нм. У скільки разів зміниться енергетична світність тіла?

231. З якою швидкістю вилітають електрони з цезію при освітленні його поверхні світлом з довжиною хвилі $\lambda = 589$ нм, якщо робота виходу електрона з цезію $A = 1,6 \cdot 10^{-9}$ Дж.

232. Знайти довжину хвилі червоної границі фотоэффекту для калію, якщо робота виходу $A = 1,92$ еВ.

233. Фотоелектрони, що вилітають з металу при освітленні світлом з частотою $\nu_1 = 2,2 \cdot 10^{15}$ Гц, мають кінетичну енергію 6,6 еВ, при частоті $\nu_2 = 4,6 \cdot 10^{15}$ Гц мають кінетичну енергію 16,5 еВ. Визначити постійну Планка.

234. Знайти швидкість фотоелектрона при освітленні поверхні цинку світлом з довжиною хвилі 200 нм, якщо червона границя для цинку $\lambda_0 = 300$ нм.

235. Визначити роботу виходу для металу, якщо при освітленні його поверхні світлом з довжиною хвилі $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-7}$ м і фотоелектрони мають кінетичну енергію $E_K = 4,5 \cdot 10^{-20}$ Дж.

236. Фотон з енергією 15,5 еВ вибив електрон з не збудженого атома водню. Яку швидкість матиме цей електрон?

237. Визначити червону границю фотоэффекту для літію, якщо робота виходу $A = 2,4$ еВ ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ К).

238. Визначити червону межу фотоэффекта для цинку і максимальну швидкість фотоелектронів, що вириваються з поверхні цинку світлом із довжиною хвилі $\lambda=200$ нм. Робота виходу для цинку $A = 3,7$ еВ.

239. Робота виходу електрона з літію $A=2,5$ еВ. Чи буде фотоэффект при освітленні літію монохроматичним світлом із довжиною хвилі $\lambda = 50$ нм?

240. Червона межа фотоефекта у вольфраму $\lambda_{\text{чер}} = 230$ нм. Визначити кінетичну енергію електронів, що вириваються з вольфраму ультрафіолетовим світлом із довжиною хвилі $\lambda = 150$ нм.
241. Знайти довжину хвилі де Бройля для електрона при різниці потенціалів $U = 90$ кеВ.
242. Знайти границю розрізнення електронного мікроскопу при різниці потенціалів $U = 90$ кеВ, а кутова апертура $\theta = 10^2$ рад та $n = 1$ (вакуум).
243. Електрон пролітає щілину шириною $\Delta x = 1$ мкм. З якою похибкою може бути визначена складова його швидкості вздовж осі X під час прольоту цієї щілини?
244. Розрахувати довжину хвилі де Бройля для електрона, який пройшов прискорюючу різницю потенціалів $\Delta\varphi = 200$ В.
245. Знайти довжину хвилі де Бройля λ для електронів, які пройшли різницю потенціалів $U_1 = 1$ В і $U_2 = 100$ В.
246. Заряджена частинка, прискорена різницею потенціалів $U = 200$ В, має довжину хвилі де Бройля $\lambda = 2.02$ пм. Знайти масу m частинки, якщо її заряд чисельно дорівнює заряду електрона.
247. α -частинка рухається по колу радіусом $r = 8.3$ мм в однорідному магнітному полі, напруженість якою $H = 18.9$ кА/м. Знайти довжину хвилі де Бройля λ для α -частинки.
248. Знайти довжину хвилі де Бройля λ для атома водню, що рухається при температурі $T = 293$ К з найімовірнішою швидкістю.
249. Порівняйте довжини хвиль де Бройля для електрона і кульки масою $m=1$ г, якщо їх швидкості однакові і рівні $v = 100$ м/с.
250. Знайти період T обертання електрона на першій борівській орбіті атома водню і його кутову швидкість ω .
251. Радіоактивний натрій ${}_{11}^{24}\text{Na}$, має період напіврозпаду 14,8 год. Яка кількість ядер розпадеться за 10 год в 1 мг препарату?
252. Обчислити період напіврозпаду радону, якщо за добу з 1 млн ядер розпадається 175000.
253. Деякий радіоактивний препарат має постійну розпаду $\lambda = 1.44 \cdot 10^{-3}$ год $^{-1}$. Через який час розпадеться 75% початкової кількості атомів?
254. Кінетична енергія α -частинки дорівнює 4,78 МеВ. Знайти швидкість α -частинки, що вилітає з ядра атома радію при радіоактивному розпаді.
255. Тіло масою $m = 60$ кг протягом 6 годин поглинуло енергію рентгенівського випромінювання $E = 1$ Дж. Знайти поглинуту дозу і потужність поглинутої дози в одиницях СІ і у позасистемних одиницях.
256. В $m = 10$ г тканини поглинається 10^9 α -частинок з енергією $E = 5$ МеВ. Знайти поглинуту і еквівалентну (біологічну) дози. Коефіцієнт якості k для α -частинок прийняти рівним 20.
257. Чому дорівнює потік рентгенівського випромінювання, якщо анод виготовлений з вольфраму, а $U = 100$ кВ, $I = 0.7$ А?
258. Активність радіоактивного препарату, що містить ${}_{92}^{238}\text{U}$ з періодом напіврозпаду $T_{1/2} = 4.5$ млрд. років, складає 9 нКі. Знайти кількість радіоактивних ядер.

259. Визначити постійну розпаду радіоактивного елемента, якщо за місяць число радіоактивних ядер зменшилося в $e = 2.718$ разів.
260. Потужність експозиційної дози в рентгенівському кабінеті становить $6 \cdot 10^{-12}$ Кл/кг·с протягом 5 годин роботи. Знайти експозиційну дозу протягом 5-денного тижня та відповідні поглинуту і еквівалентну біологічні дози та їх потужності (в системних і позасистемних одиницях).
261. Тіло масою $m = 70$ кг протягом $t = 24$ год. поглинуло енергію іонізуючого випромінювання $E = 10$ Дж. Яка поглинена доза і потужність поглиненої дози?
262. Активність насіння, замоченого у розчині азотнокислого натрію, що містить радіоактивний ізотоп ${}_{11}^{24}\text{Na}$, складає $\alpha = 6.02 \cdot 10^{-16}$ Кі. Яка маса поглиненого зернами радіоактивного ізотопу? Період напіврозпаду $T_{1/2} = 14.96$ год.
263. Скільки атомів полонію розпадається за добу з 1 млн. атомів? Період напіврозпаду $T_{1/2} = 138$ діб.
264. Скільки ядер у 1 г урану ${}_{92}^{238}\text{U}$ розпадається за секунду? Період напіврозпаду $T_{1/2} = 7.1 \cdot 10^8$ років.
265. Скільки атомів йоду розпадається в 1 г йоду ${}_{53}^{124}\text{I}$ за 8 діб? Період напіврозпаду $T_{1/2} = 4,15$ доби.
266. У поживну суміш введено 5 мг радіоактивного ізотопу фосфору, період піврозпаду якого становить 14,3 доби. Визначити сталу розпаду і активність фосфору.
267. При радіометричних дослідженнях у зразку виявлений стронцій ${}_{38}^{90}\text{Sr}$, активність якого 108 Бк. Яка маса стронцію в зразку? Період піврозпаду стронцію 28,5 років.
268. Для біологічного дослідження кролику з їжею введений радіоактивний ${}_{11}^{24}\text{Na}$, активність якого 0,5 мкК. Визначити масу введеного радіоактивного елемента. Період піврозпаду для даного ізотопу становить 14,96 годин.
269. Активність насіння, замоченого у розчині азотнокислого натрію, що містить радіоактивний ізотоп ${}_{11}^{24}\text{Na}$ становить $3.01 \cdot 10^{-15}$ Кі. Яка маса радіоактивного ізотопу поглинута насінням? Період піврозпаду ізотопу становить 14,96 годин.
270. Скільки ядер розпадається за добу з одного моля полонію? Період піврозпаду полонію 138 діб.
271. Скільки ядер плутонію розпадається за рік із початкової кількості ядер 109? Період піврозпаду плутонію 89,6 років.
272. Скільки ядер йоду ${}_{53}^{124}\text{I}$ із загальною масою 5 г розпадається за 10 діб? Період піврозпаду йоду становить 4,15 доби.
273. Визначити маси полонію і радію, що відповідають активності в 1 Кі. Періоди піврозпаду полонію – 138 діб, а радію – 1620 років.
274. Визначити питому активність штучно одержаного радіоактивного ізотопу ${}_{38}^{90}\text{Sr}$, період піврозпаду якого 28 років.

275. У джерелі мінеральної води активність радону складає $A_0 = 1000$ Бк в 1 літрі. Яка кількість атомів радону потрапить в організм пацієнта, якщо він вип'є стакан мінеральної води об'ємом 0,2 л. Період напіврозпаду радону $T_{1/2} = 3/82$ доби?

276. Відразу після синтезу препарату радіонуклід $^{130}_{53}I$, період напіврозпаду якого $T_{1/2} = 12.3$ годин, почали вимірювати зміну його активності в часі. За 1,23 години розпалося 103 ядер. Скільки ядер $^{130}_{53}I$ було в препараті на початку експерименту?

277. В організмі людини знаходиться у середньому $m = 6 \cdot 10^{-9} \text{ г } ^{226}_{88}Ra$. Визначити його активність, якщо період напіврозпаду $T_{1/2} = 1622$ роки.

278. При масі людини 70 кг кількість калію у середньому складає $m = 140$ г. У тому числі 0,01% припадає на радіоактивний ізотоп $^{90}_{40}K$. Визначити кількість гамма-квантів, що виникають щосекунди при розпаді, якщо із 100 розпадів 11 супроводжуються випромінюванням гамма-квантів. Період напіврозпаду $T_{1/2} = 4.1 \cdot 10^{16}$ с.

279. Питома активність розчину $^{131}_{53}I$ на 1 вересня складала $A_1 = 300$ МБк/мл. Яку кількість мл розчину йоду потрібно дати пацієнту 9 вересня, щоб його активність складала $A_2 = 400$ кБк? Період напіврозпаду $T_{1/2} = 8$ діб.

280. При дослідженні 6 травня розчину радіоактивного йоду $^{131}_{53}I$ в радіологічній лабораторії його активність дорівнювала $A_0 = 200$ МБк/мл. Радіоізотопне дослідження щитоподібної залози проводилось 20 травня. Яка активність препарату йоду на момент діагностичного дослідження, якщо період напіврозпаду $T_{1/2} = 8.1$ діб?

Додатки

Відповіді на тестові завдання до 1 розділу

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Відповіді	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д
Завдання	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Відповіді	Д	А	В	Б	Г	В	Д	А	Д	Д	Б	А

Відповіді на тестові завдання до 2 розділу

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Відповіді	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д
Завдання	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

Відповіді	А	Б	В	Г	А	Д	А	Г	А	А	Д	Б
------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Відповіді на тестові завдання до 3 розділу

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Відповіді	В	Д	Д	Б	В	Б	Д	В	Г	Г	Д	А
Завдання	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Відповіді	В	Г	Г	А	В	Д	Г	А	Г	Б	Д	Б

Відповіді на тестові завдання до 4 розділу

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Відповіді	Б	А	Г	В	Г	Б	В	Г	Г	В	Б	Г
Завдання	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Відповіді	Б	Г	Г	В	Д	Д	В	Г	А	Г	Д	Б

Відповіді на тестові завдання до 5 розділу

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Відповіді	Д	Г	Б	В	Г	А	Д	Г	Г	Б	А	А
Завдання	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Відповіді	Г	Б	Д	Д	А	В	Б	В	Б	А	Г	Д

Відповіді на тестові завдання до 6 розділу

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Відповіді	Д	Г	Б	В	Г	А	Д	Г	Д	А	Б	Б
Завдання	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Відповіді	А	Б	Г	А	Д	А	Г	Г	В	А	А	А

Відповіді на тестові завдання до 7 розділу

Завдання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Відповіді	А	Д	Г	В	Д	Г	Б	Г	Б	Б	Г	В
Завдання	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Відповіді	А	В	В	Г	Д	В	А	Д	Б	Г	А	Г

Основні одиниці SI

Величина			Одиниця				
Назва	Символ	Розмірність	Назва	Позначення		Рекомендовані кратні та частинні одиниці	
				укр.	міжн.	укр.	міжн.
Довжина	l, L	L	метр	м	m	км; см; мм; мкм; нм; пм; фм	km; cm; mm; μm; nm; pm; fm
Маса	m	M	кілограм	кг	kg	кг; г; мг; мкг	kg; g; mg; μg
Час	t, T	T	секунда	с	s	кс; мс; мкс; нс	ks; ms; μs; ns
Сила електричного струму	I	I	ампер	А	A	кА; мА; мкА; нА	kA; mA; μA; nA
Термодинамічна температура	T, Θ	Θ	кельвін	К	K	МК; кК; мК; мкК	MK; kK; mK; μK
Сила світла	I_v	J	кандела	кд	cd		
Кількість речовини	N	N	моль	моль	mol	кмоль; ммоль; мкмоль	mol; mmol; μmol

Примітка 1. Одиницю кельвін та її позначення К можна використовувати для вираження інтервалу чи різниці температури.

Примітка 2. Додатково до термодинамічної температури (символ T), поданої у кельвінах, використовують температуру за Цельсієм (символ t), яка визначається співвідношенням $t = T - T_0$, де за визначенням $T_0 = 273,15$ К. Дозволено використовувати вираз “температура за Цельсієм” та одиницю “градус Цельсія”. за розміром градус Цельсія дорівнює кельвіну. Інтервал чи різницю температур за Цельсієм можна виражати у кельвінах так само, як у градусах Цельсія.

Розмірність деяких фізичних величин, які найчастіше застосовують у медико-біологічних дослідженнях

Фізична величина	Позначення	Визначальне рівняння	Розмірність	Позначення одиниці в SI	
				укр.	міжн.
Площа	S, A	$S = a^2$	L^2	м ²	m ²
Частота	ν	$\nu = 1/T$	T^{-1}	Гц	Hz
Об'єм	V	$V = a^3$	L^3	м ³	m ³
Сила	F	$F = m \cdot a$	$LM T^{-2}$	Н	N
Тиск	P	$P = F / S$	$L^{-1} M T^{-2}$	Па	Pa
Осмотичний тиск	Π	$\Pi = C_B R T$	$L^{-1} M T^{-2}$	Па	Pa
Енергія, робота	E, A	$A = F d$	$L^2 M T^{-2}$	Дж	J
Гرادієнт температури	$\text{grad } T$	$\text{grad } T = dT / dl$	$L^{-1} \theta$	К/м	K/m
Теплоємність	C	$C = \Delta Q / \Delta T$	$L^2 M T^{-2} \theta^{-1}$	Дж/К	J/K
Ентропія	ΔS	$\Delta S = \int \delta Q / T$	$L^2 M T^{-2} \theta^{-1}$	Дж/К	J/K
Молярна концентрація речовини	C	$C = n / V_p$	$L^{-3} N$	моль/м ³	mol/m ³
Масова концентрація речовини	ρ	$\rho = m / V$	$L^{-3} M$	кг/м ³	kg/m ³
Молярність речовини в розчині	C_m	$C_m = n / m_s$	$M^{-1} N$	моль/кг	mol/kg
Молярна маса	M	$M = m / n$	$M N^{-1}$	кг/моль	kg/mol
Кількість електрики	Q	$Q = I \cdot t$	$T I$	Кл	C
Електричний опір	R	$R = U / I$	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	Ом	Ω

Електрична провідність	σ	$\sigma = 1/R$	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	См	S
Електричний потенціал	φ, U	$\varphi = W/q$	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	В	V
Магнітна індукція	B	$B = F(qv)$	$MT^{-2}I^{-1}$	Тл	T
Світловий потік	Φ	$\Phi = I \cdot \omega$	J	лм	lm
Освітленість	E	$E = \Phi/S$	$L^{-2}J$	лк	lx
Активність радіонукліда	A	$A = N/T$	T^{-1}	Бк	Bq

**Таблиці фізичних величин
Фундаментальні фізичні сталі**

Назва величин	Позначення	Значення величин
Швидкість світла у вакуумі	c	299 792 458 м/с
Магнітна сила	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м = $12,566370614 \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Електрична сила	ϵ_0	$8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Гравітаційна сила	G	$(6,67259 \pm 0,00085) \cdot 10^{-11}$ м ³ кг ⁻¹ ·с ⁻²
Стала Планка	h	$(6,6260755 \pm 0,0000040) \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Стала Дірака	\hbar	$(1,05457266 \pm 0,00000063) \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Елементарний заряд	e	$(1,60217733 \pm 0,00000049) \cdot 10^{-19}$ Кл
Магнетон Бора	μ_B	$(9,2740154 \pm 0,0000031) \cdot 10^{-24}$ Дж·Тл ⁻¹
Ядерний магнетон	μ_N	$(5,0507866 \pm 0,0000017) \cdot 10^{-27}$ Дж·Тл ⁻¹
Стала Рідберга	R	$10973731,534 \pm 0,013$ м ⁻¹
Борівський радіус	a_0	$(0,529177249 \pm 0,000000024) \cdot 10^{-10}$ м
Маса спокою електрона	m_0	$(9,1093897 \pm 0,0000054) \cdot 10^{-31}$ кг
Відношення заряду електрона до його маси	-	$(-1,75881962 \pm 0,00000053) \cdot 10^{11}$ Кл·кг ⁻¹
g- фактор вільного електрона	g	$2,002319304386 \pm 0,000000000020$
Маса спокою протона	m_p	$(1,6726231 \pm 0,0000010) \cdot 10^{-27}$ кг
Маса спокою нейтрона	m_n	$(1,6749286 \pm 0,0000010) \cdot 10^{-27}$ кг
Стала Авогадро	N_A	$(6,0221367 \pm 0,0000036) \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Атомна одиниця маси (уніфікована)	$a.o.m.$	$(1,660 5402 \pm 0,0000010) \cdot 10^{-27}$ кг
Стала Фарадея	F	$96485,309 \pm 0,029$ Кл·моль ⁻¹

Універсальна (молярна) газова стала	R	$8,314510 \pm 0,000070 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Стала Больцмана	k	$(1,380658 \pm 0,000012) \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Стала Лошмідта	n_o	$(2,686763 \pm 0,000023) \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
Стала Стефана Больцмана	σ	$(5,67051 \pm 0,00019) \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \text{ К}^{-4}$
Стала Віна	b	$(2,897756 \pm 0,000024) \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$

МНОЖНИКИ І ПРЕФІКСИ ДЛЯ УТВОРЕННЯ ДЕСЯТКОВИХ, КРАТНИХ І ЧАСТКОВИХ ОДИНИЦЬ І ЇХ НАЙМЕНУВАННЯ

Множник	Префікс		
	вимова	позначення	
		українське	міжнародне
10^{18}	екса	Е	E
10^{15}	пета	П	P
10^{12}	тера	Т	T
10^9	гіга	Г	G
10^6	мега	М	M
10^3	кіло	к	k
10^2	гекто	г	h
10^1	дека	да	da
10^{-1}	деци	д	d
10^{-2}	санти	с	c
10^{-3}	мілі	м	m
10^{-6}	мікро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	n
10^{-12}	піко	п	p
10^{-15}	фемто	ф	f
10^{-18}	атто	а	a

Співвідношення між одиницями

$1 \text{ а.о.м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
$(1 \text{ а.о.м.}) c^2 = 931,481 \text{ МеВ} , c - \text{ швидкість світла у вакуумі}$
$1 \text{ еВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
$1 \text{ МеВ} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$
$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2 = 10^4 \text{ Гс}$

$$1 \text{ ккал} = 14186 \text{ Дж}$$

Відношення інтенсивностей (сил) звуку, виражені в дБ

L_1/L_2	$\Delta\beta = 10\lg(L_1/L_2)$	L_1/L_2	$\Delta\beta = 10\lg(L_1/L_2)$
1	0	6	7.78
2	3.01	7	8.45
3	4.77	8	9.03
4	6.02	9	9.54
5	6.99	10	10.00

Характеристики різних видів електромагнітного випромінювання

Вид випромінювання	Характерна довжина хвилі	Частота, Гц	Енергія фотона
γ - випромінювання	10^{-13}	$3 \cdot 10^{21}$	12 МеВ
Рентгенівське	10^{-11}	$3 \cdot 10^{19}$	120 кеВ
Ультрафіолетове	10^{-7}	$3 \cdot 10^{15}$	12 еВ
Видиме світло	$6 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{14}$	2 еВ
Інфрачервоне	10^{-5}	$3 \cdot 10^{13}$	0, 12 еВ
Ультракороткохвиль	10^{-2}	$3 \cdot 10^{10}$	$1,92 \cdot 10^{-23}$ Дж
Радіохвилі	300	10^6	$4 \cdot 10^{-9}$ еВ