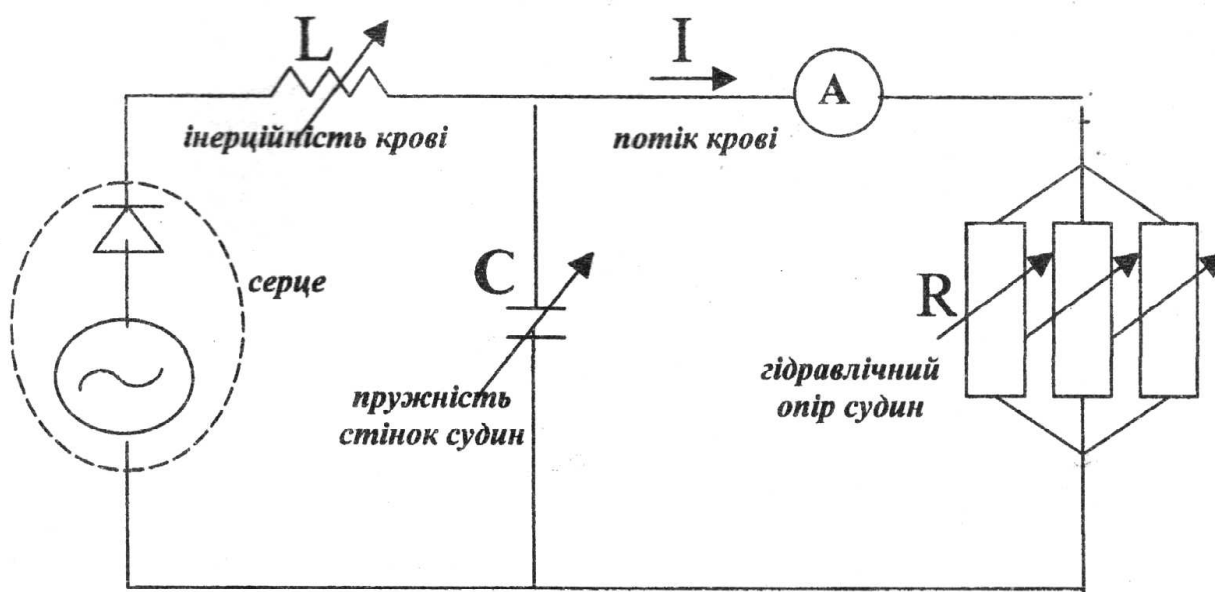


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Є.Г. Попов, В.І. Цоцко

БІОФІЗИКА

Лабораторний практикум і збірник задач



Біофізика. Лабораторний практикум і збірник задач. Вид. 3-є, випр. /
Є.Г. Попов, В.І. Цоцко. -
Дніпровський державний аграрно-економічний університет. Дніпро, 2017. -
139 с.: іл.

В навчальному посібнику наведені інструкції 22 лабораторних робіт і 360 задач біофізичного змісту. У вступній частині посібника пояснюються основні правила виконання лабораторних робіт, приводяться стислі відомості про Міжнародну систему одиниць вимірювання, про універсальні фізичні константи та принципи обробки результатів вимірювання. Кожен розділ збірника задач починається з рекомендацій і вибірки формул для розв'язання задач. В додатках посібника поданий необхідний довідковий матеріал. Все це дозволяє використовувати посібник як на аудиторних заняттях, так і для самостійної роботи студентів. Автори вирішили повернути даному посібнику початкову назву “Біофізика”, як найбільш адекватну його змісту.

Слід відмітити значний творчий внесок в методичну розробку даного посібника та її практичне втілення колишніх викладачів кафедри фізики: Є.Х. Куценка, М.І. Гулівця, О.В. Толстенка, А.А. Свергуненка, В.О. Чумака та колишнього декана факультету ветеринарної медицини В.Г. Грибана.

Рецензенти:

докт. біологічних наук, проф. Посудін Ю. І.
докт. фіз.- мат. наук, проф. Чернай А. В.

Затверджено Міністерством аграрної політики України, як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів II-IV рівнів акредитації за напрямом “Ветеринарна медицина”, “Зооінженерія” (лист № 18-1-13/357 від 24.03. 2006 р.)

ЗМІСТ

Вступ до лабораторного практикуму	
1. Основні правила роботи в лабораторіях	4
2. Методика лабораторних занять	4
3. Побудова графіків та проведення обчислень	5
4. Міжнародна система одиниць (SI)	6
5. Фізичні константи	10
6. Методика обробки результатів досліду	11
7. Розгорнута схема обробки результатів досліду	15
Лабораторні роботи	
1. Визначення вологості повітря	18
2. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин	24
3. Дослідження в'язкості рідини методом Стокса	27
4. Визначення коефіцієнта в'язкості повітря методом витікання крізь капіляр	30
5. Дослідження рідин малої в'язкості капілярним віскозиметром	34
6. Дослідження кінетики контракції біологічних тканин	36
7. Визначення молярної маси глюкози методом осмометрії	38
8. Визначення теплоємності рідин	44
9. Дослідження теплопровідності твердих тіл	50
10. Визначення горизонтальної складової магнітного поля Землі	54
11. Градування термоелемента	57
12. Вивчення електрокінетичних явищ в розчинах електролітів	59
13. Визначення імпедансу живої тканини	62
14. Дослідження розчинів за допомогою рефрактометра	66
15. Дослідження оптичної активності водних розчинів цукру	70
16. Дослідження радіоактивного фону в умовах лабораторії	74
17. Біоелектричні явища у тканинах, що збуджуються	81
18. Дослідження впливу аероіонізації на мікрофлору повітря	83
19. Кров'яний тиск. Методи вимірювання тиску крові	86
20. Визначення опору живої тканини	91
21. Дослідження світла та кольорового зору за допомогою дифракційної ґратки	96
22. Дослідження випромінювання лазера за допомогою дифракційної ґратки	100
Збірник задач	
1. Гемодинаміка. Властивості біологічних рідин	105
2. Біоакустика	110
3. Термодинаміка біологічних систем	115
4. Електричні явища у біологічних тканинах	120
5. Оптичне випромінювання у біології	125
6. Аерозолі. Аероіони	130
Додатки	136

ВСТУП ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

Лабораторний практикум з фізики та біофізики має на меті закріплення знань, що студенти одержують на лекціях та практичних заняттях в умовах безпосередньої взаємодії з фізичними явищами в контексті біологічних об'єктів. Під час практикуму студенти знайомляться з класичними фізичними приладами та основними методами біофізичних досліджень. Окремо фокусується увага на види вимірювань та методи обробки результатів вимірювань. Кожна лабораторна робота містить стислі теоретичні відомості про явища, що вивчаються, опис методу вимірювання, порядок виконання лабораторної роботи, а також контрольні запитання, на які студент має підготувати усну відповідь.

1. ОСНОВНІ ПРАВИЛА РОБОТИ В ЛАБОРАТОРІЯХ

1. На початку практикуму студент повинен пройти інструктаж з техніки безпеки користування приладами в лабораторії.

2. Забороняється працювати студенту в лабораторії при відсутності викладача.

3. Користуватися приладами та обладнанням дозволяється тільки за вказівкою викладача.

4. Перед виконанням лабораторної роботи шляхом зовнішнього огляду потрібно переконатися в тому, що прилади, вимірювальні установки, обладнання справні. Про помічені недоліки необхідно повідомити викладача.

5. При роботі з нагрівачами слід остерігатися прямих при дотиків до нагрівача або пари, що можуть привести до опіків.

6. Під'єднання електричних приладів до джерел живлення та їх вимикання студент здійснює лише під контролем викладача.

7. При роботі з лазерами та дуже яскравими джерелами світла потрібно остерігатися попадання прямих світлових променів в очі.

2. МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

1. Виконання лабораторних робіт відбувається згідно графіку, що його на вступному занятті видає кожному студенту викладач.

2. Студенти готуються виконувати лабораторні роботи до початку занять. Підготовка складається з ознайомлення з інструкцією до лабораторної роботи, короткому конспектуванні інструкції в окремому зошиті. Конспект має містити номер роботи та її назву, основні закони та робочі формули (без доведень), малюнок схеми установки, таблиці для занесення результатів вимірювань і наступних розрахунків.

3. Викладач контролює готовність студента до виконання лабораторної роботи. До контролю входять перевірка конспекту роботи, перевірка знання мети роботи, основних явищ і законів, формул, порядку виконання роботи і розрахунку шуканих величин.

4. Після короткого пояснювання особливостей лабораторної роботи та дозволу викладача на початок її виконання, студент проводить безпосередні вимірювання та розрахунок підсумкових величин в чернетці.

5. Результати чорнового оформлення звіту студент повинен завізувати у викладача.

6. Захист лабораторної роботи проводиться після закінчення оформлення звіту. В таблицю мають бути занесені результати вимірювань та розрахунків, їх розмірність. Після таблиці має бути наведений приклад розрахунку із зазначенням розмірностей всіх величин, що входять в розрахункову формулу. Закінчують звіт кінцевим результатом, в якому наводять шукану величину та її похибку, відповідно округлені і з розмірністю.

7. Захист лабораторної роботи проводиться на данному або наступному занятті. Студенти, що мають заборгованість з двох робіт, не допускаються до виконання наступної роботи до ліквідації боргу.

3. ПОБУДОВА ГРАФІКІВ ТА ПРОВЕДЕННЯ ОБЧИСЛЕНЬ

У деяких роботах результати досліджень подають у вигляді графіків. Для побудови графіка необхідно на підставі зроблених вимірювань скласти таблицю, в котрій кожному значенню однієї величини відповідає визначене значення другої.

При побудові графіка значення незалежної змінної величини (аргументу) слід відкладати на осі абсцис, а значення залежної змінної (функції) – на осі ординат. Біля кожної осі треба написати найменування відповідної величини і вказати, в яких одиницях вона виміряна. Для правильної побудови графіка важливим є вибір масштабу. Слід вибирати масштаб таким чином, щоб графік зайняв все графічне поле і щоб розміри графіка по обох осях були наближено однаковими. При цьому слід мати на увазі, що перетини числових осей не обов'язково повинні збігатися з нульовими значеннями величин, що відкладаються по осях. Побудова графіка зводиться до нанесення в координатному полі точок, визначених парою відповідних координат.

Оскільки всі вимірювання зроблені з тією чи іншою похибкою, точки не вкладаються точно на криві. Тому між точками проводять таку плавну криву лінію, щоб якомога більша кількість точок лягла на цю лінію, а інші розподілились рівномірно вище і нижче кривої (рис.1).

Побудований графік дозволяє виявити ті вимірювання, які були зроблені

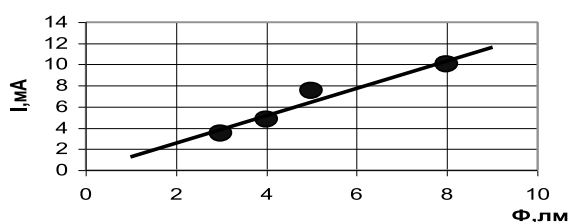


Рис. 1

неправильно, якщо яка-небудь точка занадто випадає з графіка, нею треба знехтувати, а дані вимірювань перевірити. Користуючись графіком, можна у межах проведених вимірювань інтерполювати, інакше кажучи,

знайти значення величини “Y” для таких значень “X”, котрі безпосередньо не вимірювались. Для цього з вибраної точки осі абсцис треба провести ординату до перетину з графіком. Довжина цієї ординати і буде визначати значення “Y” для відповідного “X”.

Часто при побудові графіків на осях координат відкладають не самі величини, а їх функції (квадрати, логарифми, показникові функції і т.і.). У цьому випадку зручніше користуватися напівлогарифмічними, або логарифмічними масштабами.

Напівлогарифмічна система координат – це прямокутна система, на одній осі якої відкладено рівномірний масштаб, а на другій – логарифмічний. Напівлогарифмічна система координат зручна для побудови графіків показникових функцій $y=Aexp(kx)$. Дійсно, $lgy = lgA+kxlg e$. Нехай $lgy = Y$; $lgA = a$; $klge = b$. Після підстановки маємо функціональну залежність $Y = a + bx$. Якщо побудувати графік такої залежності, то він буде являти собою пряму лінію.

Логарифмічна система координат – така система, коли на обох осях відкладаються логарифмічні масштаби. Вона дуже зручна для побудови графіків ступеневих функцій типу $y=Ax^k$. Дійсно, $lgy=lgA+klgx$. Нехай $lgy=Y$, $lgx=X$. Тоді $Y = a+kX$. З шкільного курсу відомо, що цей графік є пряма лінія.

Точність обчислень в лабораторних та практичних завданнях обмежується трьома значущими цифрами в розрахованих величинах. Наприклад: 3,14; 0,00539; 2130.

4. МІЖНАРОДНА СИСТЕМА ОДИНИЦЬ (SI)

Основу стандарту вимірювань, що діє в Україні, складає Міжнародна система одиниць вимірювання (SI). Система SI складається з **основних** (що обираються незалежно) та **похідних** (що комбінуються на базі основних) одиниць вимірювання.

Основні одиниці SI:

Секунда (с) – час, який дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133.

Метр (м) – відстань, яку проходить у вакуумі плоска електромагнітна хвиля за $1/299\,792\,458$ частку секунди або довжина, що дорівнює $1650763,73$ довжин хвилі у вакуумі випромінювання, яке відповідає переходу між рівнями $2p^{10}$ і $5d^5$ криптону-86.

Кілограм (кг) – маса, що дорівнює масі міжнародного прототипу кілограму.

Моль (моль) – кількість речовини системи, що містить стільки ж структурних елементів, скільки їх є в $0,012$ кг нукліду C^{12} .

Кельвін (К) – $1/273,16$ частина термодинамічної температури потрійної точки води.

Ампер (А) – сила незмінного струму, при проходженні якого по кожному з двох паралельних прямолінійних бесконечних провідників безмежно малого кругового перетину, що розміщені на відстані 1 м. один від іншого, викликає між цими провідниками силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожен метр довжини.

Кандела (кд) – сила світла, випромінюваного з поверхні площею $1/600000$ м² повного випромінювача в перпендикулярному напрямку при температурі твердіння платини при тискові 101325 Па.

Похідні одиниці

Найменування одиниці	Визначальне рівняння	Одиниця виміру	Скорочене позначення
1	2	3	4

Механічні та теплові величини

Площа	$S=xy$	квадратний метр	м ²
Об'єм	$V=xyz$	кубічний метр	м ³
Швидкість	$v=x/t$	метр за секунду	м/с
Кутова швидкість	$\omega=\varphi/t$	радіан за секунду	рад/с
Прискорення	$a=v/t$	метр на секунду в квадраті	м/с ²
Кутове прискорення	$\beta=\omega/t$	радіан на секунду в квадраті	рад/с ²
Період	$T=t/n$	секунда	с
Частота	$\nu=1/T$	герц	Гц=1/с
Кутова частота	$\omega=2\pi\nu$	радіан за секунду	рад/с
Сила	$F=ma$	ньютон	Н=кг·м/с ²
Питома вага	$d=P/V$	ньютон на кубічний метр	Н/м ³
Густина	$\rho=m/V$	кілограм на кубічний метр	кг/м ³
Імпульс	$p=mv$	кілограм - метр за секунду	кг·м/с
Робота, енергія	$A=Fl$	джоуль	Дж=Н·м
Потужність	$N=A/t$	ват	Вт=Дж/с
Тиск	$P=F/S$	паскаль	Па=Н/м ²
Кількість теплоти	$Q=c(T_2 - T_1)$	джоуль	Дж=Н·м
Ентропія	$S=\Delta Q/T$	джоуль на кельвін	Дж/К
Теплоємність	$C=\Delta Q/\Delta T$	джоуль на кельвін	Дж/К

Коефіцієнт:

в'язкості	$\eta = \frac{F}{(\Delta v / \Delta x)S}$	паскаль – секунда	Па·с
теплопровідності	$\lambda = \frac{Q}{(\Delta T / \Delta z)S \cdot t}$	ват на метр-кельвін	Вт/(м·К)
дифузії	$D = \frac{m}{(\Delta c / \Delta z)S \cdot t}$	метр квадратний за секунду	м ² /с
поверхневого натягу	$\alpha = F/l$	ньютон на метр	Н/м

1	2	3	4
---	---	---	---

Електричні, магнітні та світлові величини

Електричний заряд	$q=I \cdot t$	кулон	Кл=А·с
Потенціал, ЕРС	$\varphi=A/q$	вольт	В=Дж/Кл
<i>Напруженість:</i>			
електричного поля	$E=F/q$	вольт на метр	В/м
магнітного поля	$H=I/D$	ампер на метр	А/м
Густина струму	$j=I/S$	ампер на квадратний метр	А/м ²
Електроємність	$C=q/\varphi$	фарад	Ф=Кл/В
Електричний опір	$R=U/I$	ом	Ом=В/А
Електрична провідність	$Y=I/U$	сименс	См=А/В
Індукція м-поля	$B=F_{max}/I\Delta l$	тесла	Тл=Н/(А·м)
Магнітний потік	$\Phi=B \cdot S$	вебер	Вб=Тл·м ²
Індуктивність	$L=\Phi/I$	генрі	Гн=Вб/А
Магнітний момент	$p=IS$	ампер - квадратний метр	А·м ²
Потік енергії	$\Phi=W/t$	ват	Вт
Інтенсивність хвилі	$I=W/(S \cdot t)$	ват на метр квадратний	Вт/м ²
Світловий потік	$\Delta F=I \cdot \Delta \Omega$	люмен	лм=кд·ср
Освітленість	$E=\Phi/S$	люкс	лк=лм/м ²
Світлотиімість	$R=\Phi/S$	люкс	лк=лм/м ²
Яскравість	$B=I/S_n$	нит	нт=кд/м ²
<i>Доза опромінення:</i>			
Поглинута доза	$D_0=E/m$	грей	Гр=Дж/кг
Експозиційна доза	$D_i=D_0/f$	кулон на кілограм	Кл/кг
Еквівалентна доза	$D_e=Q \cdot D_0$	зіверт	Зв=Гр·Q
Активність препарату	$A=\Delta N/\Delta t$	беккерель	Бк=1/с
Рухливість іону	$\mu=v/E$	метр квадратний на вольт-с	м ² /(В·с)

Префікси для утворення кратних та часткових величин

Префікс кратності	Кратність	Префікс частковий	Частковість
дека (да)	10 ¹	деци (д)	10 ⁻¹
гекто (г)	10 ²	санти (с)	10 ⁻²
кіло (к)	10 ³	мілі (м)	10 ⁻³
мега (М)	10 ⁶	мікро (мк)	10 ⁻⁶
гіга (Г)	10 ⁹	нано (н)	10 ⁻⁹
тера (Т)	10 ¹²	піко (п)	10 ⁻¹²
пета (П)	10 ¹⁵	фемто (ф)	10 ⁻¹⁵
екса (Е)	10 ¹⁸	атто (а)	10 ⁻¹⁸

Визначення деяких похідних одиниць системи SI

Ньютон (Н) – сила, що надає тілу масою 1 кг прискорення 1 м/с^2 за напрямком дії сили.

Джоуль (Дж) – робота, яка виконується силою 1Н на шляху 1 м.

Ват (Вт) – потужність, при якій за 1 с виконується робота 1 Дж.

Паскаль (Па) – тиск, що спричиняється силою 1 Н, рівномірно розподілений по нормальній до неї поверхні площею 1 м^2 .

Кулон (Кл) – кількість електрики, що проходить через поперечний перетин провідника за час 1 с при силі струму 1А.

Вольт (В) – різниця потенціалів двох точок електричного поля, при переміщенні між якими заряду 1 Кл виконується робота 1 Дж.

Фарад (Ф) – ємність провідника, потенціал якого підвищується на 1 В при наданні йому заряду 1 Кл.

Ом (Ом) – опір провідника, по якому тече струм 1 А при напрузі 1 В на його кінцях.

Вебер (Вб) – магнітний потік, при зменшенні якого до нуля за 1 с в зчепленому з ним контурі виникає ЕРС 1 В.

Тесла (Тл) – індукція такого однорідного магнітного поля, в якому магнітний потік через площу 1 м^2 , перпендикулярну напрямку поля, дорівнює 1 Вб.

Генрі (Гн) – індуктивність провідника, який при силі струму 1 А генерує магнітний потік 1 Вб.

Люмен (лм) – світловий потік, що дає точкове джерело силою світла 1 кд в тілесний кут 1 стерadian.

Люкс (лк) – освітленість, що створює світловий потік 1 лм при рівномірному його розподілі на площі 1 м^2 .

Співвідношення між одиницями SI та одиницями інших систем

$$1 \text{ м} = 10^2 \text{ см} = 10^6 \text{ мкм} = 10^9 \text{ нм} = 10^{10} \text{ \AA}$$

$$1 \text{ кг} = 10^3 \text{ г} = 0,102 \text{ т.о.м.} = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ а.о.м.}$$

$$1 \text{ Н} = 10^5 \text{ дн} = 0,102 \text{ кГ}$$

$$1 \text{ Дж} = 0,102 \text{ кГм} = 0,239 \text{ кал}$$

$$1 \text{ Вт} = 0,102 \text{ кГм/с} = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ к.с.}$$

$$1 \text{ Па} = 0,102 \text{ кГ/м}^2 = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ ат} = 9,87 \cdot 10^{-6} \text{ атм} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.} = 0,102 \text{ мм вод. ст.}$$

$$1 \text{ Кл} = 3 \cdot 10^9 \text{ од. СГСЕ}$$

$$1 \text{ Ф} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см.}$$

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

$$1 \text{ Вб} = 10^8 \text{ максвел (Мкс)}$$

$$1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ гаус (Гс)}$$

$$1 \text{ Гн} = 10^9 \text{ од. СГСЕ.}$$

5. ФІЗИЧНІ КОНСТАНТИ

Всі фізичні закони відповідають ідеї **елементарності**, і співвідношення між величинами в них визначенні з точністю до **пропорційних** залежностей з відповідними коефіцієнтами пропорційності.

При формуванні **систем одиниць вимірювань** використовуюється група коефіцієнтів, що узгоджують між собою різні фізичні величини, зв'язані різними законами та визначеннями – **універсальні** фізичні сталі (**світові константи**). В цьому їх відмінність від інших специфічних сталих, що характеризують властивості конкретних об'єктів.

До найважливіших **світових** констант, які відповідають вибору **основних одиниць** вимірювання SI, відносяться наступні:

<i>Фізична стала</i>	<i>Позначення</i>	<i>Числове значення*</i>
Швидкість світла у вакуумі	c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала	γ	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м ² /кг ²
Електрична стала	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Стала Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

*(Числа округлені)

Вказані сталі є чинниками наступних фундаментальних співвідношень:

$$E = mc^2, \quad L = cT$$

- формули **Ейнштейна** та закону **максимально** швидкого руху матерії;

$$F_T = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad F_q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad F_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i_1 l_1 \sin \alpha_1 \cdot i_2 l_2 \sin \alpha_2}{r^2}$$

- закону тяжіння або **законів** електричної чи магнітної **взаємодії**; та формули кванта дії:

$$E = h\nu$$

Крім вказаних сталих семивекторний базис Міжнародної системи одиниць доповнюють стала Больцмана – $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, стала Авогадро – $N = 6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль та механічний еквівалент світла – $A = 683$ лм/Вт.

Фундаментальні константи несуть в собі глибоку сутність і безпосередньо визначають **число незалежних одиниць** вимірювання.

6. МЕТОДИКА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

Вимірювання

Вимірюванням будь-якої фізичної величини називають дію, в результаті якої визначають, у скільки разів вимірювана величина більша (менша) за величину, обрану за еталон.

В основу системи SI, як ми бачили вище, покладені сім основних еталонів: метр, кілограм, секунда, кельвін, моль, ампер, кандела та два додаткові – радіан і стерадіан.

Процес вимірювання може здійснюватись по-різному, залежно від роду вимірюваної величини та прийомів вимірювань. Розрізняють два різновиди вимірювань – прямі вимірювання та непрямі.

Класифікація вимірювань

Всі вимірювання, які здійснюються в фізиці, можуть бути поділені на дві групи: прямі та непрямі.

Прямі вимірювання

При прямих вимірюваннях величина, яка визначається, безпосередньо порівнюється з одиницею виміру за допомогою приладу з градуйованою шкалою. До таких вимірювань належать вимірювання довжини масштабною лінійкою або штангенциркулем, мікрометром, оптиметром, інтерферометром, лазерним довгоміром; вимірювання маси на терезах, на автоматичних або електронних вагах; вимірювання проміжків часу за допомогою годинника, секундоміра, частотоміра, осцилографа; вимірювання температури термометром, термопарою та пірометром випромінювань; вимірювання сили струму за допомогою амперметра, гальванометра, електронними приладами і т. д. Значення вимірюваної величини при цьому відраховується за шкалою або підраховується за числом та значенням мір.

Непрямі вимірювання.

При непрямих (посередніх) вимірюваннях шукана величина вираховується за результатами прямих вимірювань інших величин, що пов'язані з вимірюваною функціональною залежністю.

Наприклад, якщо неможливо безпосередньо визначити значення прискорення сили тяжіння g , її легко знайти із співвідношень:

$$g = 2h/t^2, \quad g = 4\pi^2 l/T^2.$$

Прикладами непрямих вимірювань є результати вимірювань швидкості руху за величиною шляху та проміжку часу, вимірювання густини за вимірами маси тіла та його об'єму та ін.

Точність вимірів та її роль

Немає жодної галузі техніки, галузі господарства, де не проводили б вимірювань фізичних величин. Вимірювання дозволяють об'єктивно оцінити фізичні явища і використати їх для розвитку науки і техніки.

Без вимірювань неможливий контроль за технологією та якістю кінцевого продукту.

Однак, ніяке вимірювання не може бути абсолютно точним. Його результат неодмінно містить деяку похибку. Вимірюючи приладом якусь величину, ми не спроможні зробити похибку меншу тієї, що визначається похибкою вимірювального пристрою. Разом з тим немає сенсу домагатися більшої точності вимірювань, ніж це необхідно для вирішення поставленого завдання. Удосконалення техніки вимірювань шляхом підвищення їх точності сприяє не тільки досягненням в науці, але й має важливе технічне чи господарське значення.

Джерела та типи похибок

Вимірюючи якусь фізичну величину, ми будемо одержувати в кожному окремому вимірюванні різні її значення, котрі групуються біля певного значення. Змінивши метод вимірювання тієї ж самої величини, ми виявляємо, що друга серія дає значення, що згруповуються біля якогось іншого значення.

Нехай, наприклад, вимірюють прискорення сили тяжіння методом падаючої кульки, а також за допомогою математичного маятника. В першому випадку одержуємо серію gI , в другому – серію gII (рис. 2).

Чому одержуються різні значення в межах однієї серії, чому результати вимірювань однієї й тієї ж величини групуються в окремі серії в залежності від методу вимірювання? Відповідь на ці питання можна одержати, ознайомившись з теорією похибок та методами обробки експериментальних результатів.

Припустимо, що ми одержали величезну сукупність вимірювань однієї і тієї ж величини. Які методи маємо застосовувати при вивченні цієї сукупності?

Розділ математики, в якому займаються вивченням систем, що складаються з великої сукупності елементів, називається математичною статистикою. В математичній статистиці і теорії ймовірностей доводиться, що середнє арифметичне значення ряду вимірювань наближається до істинного значення краще, ніж більшість вимірюваних значень.

Оскільки часто ми не знаємо істинного значення, то логічно прийняти замість нього величину середнього арифметичного: $\langle g \rangle = (g_1 + g_2 + \dots + g_n) / n$, де n – число вимірювань, g_i – значення окремих вимірювань.

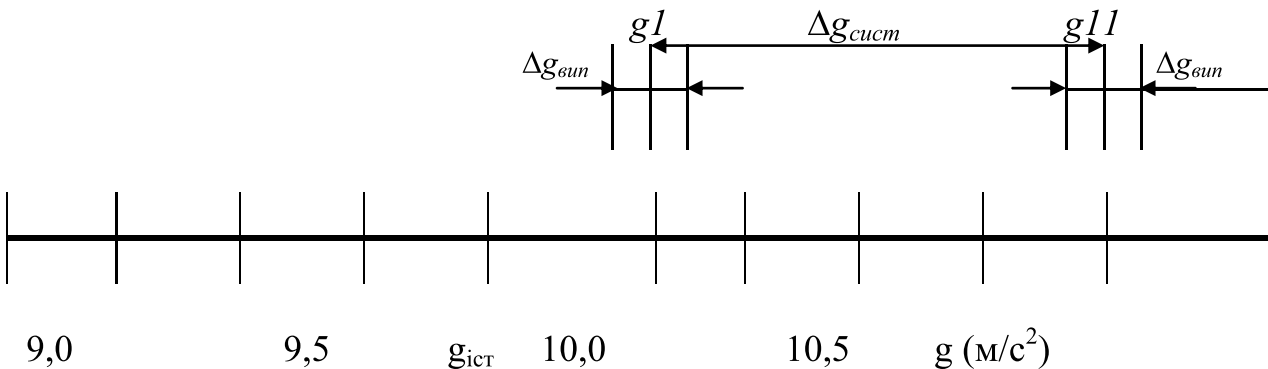


Рис. 2

Похибки, що викликають розсіяння результатів біля середнього арифметичного, визначаються випадковими причинами, тому передбачити кожний черговий результат вимірювань неможливо, проте можна передбачити параметри розсіяння результатів біля середнього значення вимірюваної величини $\Delta g_{вип}$ на рис. 2.

Крім випадкових, існують ще так звані систематичні похибки, які породжуються цілим рядом причин, наприклад, зіпсованістю або недосконалістю приладів, невірним методом вимірювань, властивостями об'єкту вимірювань. Систематичні похибки можуть не впливати на розсіяння результатів вимірювань навколо середнього значення, але знайдене середнє значення буде далеко відстояти від істинного. Величина систематичної похибки визначається так:

$$\Delta g = \langle g \rangle - g_{ист}$$

В процесі вимірювань можуть з'явитись грубі помилки (промахи), котрі виникають у разі використання неперевіреного або зіпсованого приладу, недбалого відліку показу, неправильного вмикання приладу, нерозбірливості запису його показань.

Від систематичних похибок та промахів має позбутись сам експериментатор, застосовуючи найдосканаліші методи вимірювань та проявляючи особливу ретельність та увагу під час вимірювань.

Отже, не враховуючи грубі похибки, існують принципово два різних типи похибок вимірювань: 1) систематичні похибки, 2) випадкові похибки.

Перші мають бути вилучені повторними вимірюванням, які проводяться в дещо змінених умовах, дбайливим проведенням експерименту, повторенням експерименту іншим спостерігачем, повторенням експерименту з іншим аналогічним приладом і т.д. Систематичні похибки можна усунути застосуванням досконалих приладів, методів вимірювань, нарешті, використанням теоретичних формул, що найбільш правильно описують зв'язок між спостережуваними та шуканими величинами. Випадкові похибки

підлягають теорії похибок, але слід пам'ятати, що використання результатів останньої можливо тільки у випадку помітного розсіяння результатів вимірювань. Вимірювальні прилади, що використовуються в лабораторіях, часто дають систематичні похибки, які значно перевершують випадкові.

Абсолютна і відносна похибки

Нехай при вимірюванні деякої фізичної величини g одержано ряд її значень:

$$g_1, g_2, g_3, \dots, g_n$$

Середнє значення результатів вимірювань визначається за формулою:

$$\langle g \rangle = (g_1 + g_2 + \dots + g_n) / n, \quad (1)$$

де n - загальне число вимірювань.

Абсолютною похибкою окремого виміру називають різницю між вимірним значенням g_i і середнім значенням декількох результатів вимірювань:

$$\Delta g = g_i - \langle g \rangle. \quad (2)$$

Абсолютна похибка не характеризує якість вимірювань. Наприклад, абсолютна похибка вимірювання довжини 1 мм нічого не говорить нам про його точність. Якщо вимірювалася відстань 10 м., то точність результату слід визначати високою, проте при вимірюванні діаметра кульки в 10 мм така точність явно незадовільна. Для характеристики якості окремого виміру беруть на розгляд відносну похибку: відношення абсолютної похибки окремого виміру до вимірюваної величини. Абсолютні похибки можуть бути як позитивними, так і негативними, тому що частина вимірювань завжди матиме значення, більші за середні, а інша – менші.

При спрощеному методі врахування похибок знаходять відношення середнього значення модуля абсолютної похибки

$$\langle \Delta g \rangle = (|\Delta g_1| + |\Delta g_2| + \dots + |\Delta g_n|) / n, \quad (3)$$

до середнього значення вимірюваної величини, і цим відношенням характеризують точність вимірювань:

$$\varepsilon = \langle \Delta g \rangle / \langle g \rangle. \quad (4)$$

Можна знайти таку величину Δg , що в середині інтервалу $[\langle g \rangle - \Delta g, \langle g \rangle + \Delta g]$ завжди буде попадати задана частка результатів вимірювань. Звичайно ж, значення Δg не дорівнює середньому значенню модуля абсолютної похибки, про яку йшла мова вище. Якщо ми бажаємо, наприклад, щоб в певний інтервал потрапило 90% результатів вимірів, то таке значення Δg буде істотно більше середнього значення модуля абсолютної похибки. Інтервал (1) називають довірчим інтервалом, а частку результатів, що потрапляють в цей інтервал, надійністю. При безмежному числі вимірювань надійність наближається до так званої довірчої ймовірності. Постає питання: чи можна зменшити інтервал (1), зберігаючи незмінною надійність?

Відповідь на це та багато інших питань дає статистична теорія випадкових похибок.

7. РОЗГОРНУТА СХЕМА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

При вивченні випадкових похибок розглядають загальні закономірності, що описують характер розподілу випадкових похибок, розсіяння їх при повторних вимірах та ін.

Введемо в розгляд середнє значення квадрату відхилення результатів вимірювання від середнього:

$$S_n^2 = ((g_1 - \langle g \rangle)^2 + (g_2 - \langle g \rangle)^2 + \dots + (g_n - \langle g \rangle)^2) / n \quad (5)$$

При безмежному зростанні числа вимірювань середнє значення випадкової величини $\langle g \rangle$ наближається до математичного сподівання m , а середнє значення квадрату відхилення від середнього S_n^2 - до усталеного значення, яке називається **дисперсією** даної випадкової величини σ^2 :

Величина σ називається **середньоквадратичним** відхиленням (стандартним відхиленням або просто стандартом).

Ймовірністю p_i появи певного результату g_i називається відношення кількості випадків n_i , які будуть давати даний результат, до загальної кількості випробувань n , при необмеженому зростанні числа вимірів

$$P_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_i}{n}$$

При досить великому числі вимірювань певної величини g її розподіл відповідає **нормальному закону** розподілу випадкової величини (**закон Гаусса**), при якому густина її ймовірності визначається формулою

$$p(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(g-\langle g \rangle)^2}{2\sigma^2}}, \quad (6)$$

де g - випадкове значення величини; m - її математичне сподівання; σ - її стандарт; $\pi = 3,1415925\dots$

Даний закон використовує граничні поняття математичного сподівання та стандарту, але вже при числі вимірів порядку 30 ним можна користуватись, якщо математичне сподівання замінити **середнім** значенням $\langle g \rangle$, а замість стандарту σ використати **ефективне** його значення σ_n :

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{(g_1 - \langle g \rangle)^2 + (g_2 - \langle g \rangle)^2 + \dots + (g_n - \langle g \rangle)^2}{n-1}} \quad (7)$$

При вимірюваннях важливо знати ймовірність попадання результату в певний визначений інтервал $[\langle g \rangle - \Delta g, \langle g \rangle + \Delta g]$, зумовлений величиною абсолютної похибки Δg . Такий інтервал називають **довірчим інтервалом**, а частку результатів, що потрапляють в цей інтервал, довірчою ймовірністю або надійністю вимірювань $P = P(\langle g \rangle - \Delta g < g < \langle g \rangle + \Delta g)$. Розширюючи або звужуючи довірчий інтервал, ми приходимо до збільшення або зменшення відповідної надійності результатів вимірювань.

Для нормального закону розподілу ймовірностей (6) величину довірчого інтервалу звичайно подають в частках стандарту σ :

$$e = \frac{\Delta g}{\sigma}, \quad (8)$$

причому замість математичного сподівання m використовується середнє арифметичне значення не менше ніж 20 вимірів. Стандарт розраховують по співвідношенню (7). Нижче наведені довірчі ймовірності для цілих значень e :

Довірчий інтервал	Довірча ймовірність
1	0,68
2	0,95
3	0,997

В науковій літературі звичайно наводять величину середньої квадратичної похибки, що відповідає значенню $e=1$. В цьому випадку не вказується надійність, тому що вона відома ($P= 0,68$).

В умовах фізичного практикуму кількість вимірювань не перевищує 3-6 разів, і тому розподіл Гаусса не відображує реальний розподіл результатів вимірювань. Але існує методика **Госсета (Стюдента)**, яка придатна для **незначного** числа вимірювань $2 \leq n \leq 20$.

Розподіл Стюдента вже при $n=7$ відрізняється від гауссівського не більше ніж на 3 %. А при $n \rightarrow \infty$ він фактично переходить в нормальний розподіл. У випадку обмеженого числа вимірювань замість **ефективної** середньоквадратичної похибки σ_n (7) використовують так звану **вибіркову** середньоквадратичну похибку середньоарифметичного $\sigma(\Delta g)$:

$$\sigma(\Delta g) = \sqrt{\frac{(g_1 - \langle g \rangle)^2 + (g_2 - \langle g \rangle)^2 + \dots + (g_n - \langle g \rangle)^2}{(n-1)n}}, \quad (9)$$

Довірчий інтервал при цьому подається в частках $\sigma(\Delta g)$ і називається **коефіцієнтом Стюдента s** :

$$s(P, n) = \frac{\Delta g}{\sigma \langle g \rangle} \quad (10)$$

Для різних значень довірчої ймовірності p та числа вимірювань n існують таблиці коефіцієнтів Стюдента, наприклад таблиця 1:

Таблиця 1

P n	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	0,16	0,51	1,0	1,4	2,0	3,1	6,3	12	32	64
3	0,14	0,45	0,82	1,1	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9
4	0,14	0,42	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8
5	0,13	0,41	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6
6	0,13	0,41	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0
7	0,13	0,40	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7
8	0,13	0,40	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5
9	0,13	0,40	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4
10	0,13	0,40	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,8	3,3

Відповідно до заданої довірчої ймовірності і конкретної серії вимірювання, за допомогою таблиці 1 та співвідношення (10) обчислюють величину довірчого інтервалу.

Кінцевий результат записують у вигляді:

$$g = \langle g \rangle \pm \Delta g, \text{ при } P = A \%,$$

або

$$P(\langle g \rangle - \Delta g < g < \langle g \rangle + \Delta g) = A$$

де A – надійність вимірювань. Тобто ймовірність попадання результатів вимірювань в межі довірчого інтервалу дорівнює A .

В більшості випадків шукану фізичну величину g визначають **непрямим** вимірюванням, шляхом обчислень її за формулою, в яку підставляють величини x, y, z, \dots , що вимірюються безпосередньо:

$$g = f(x, y, z, \dots)$$

Вимірювання величин x, y, z, \dots проводять незалежно одна від іншої, тому довірчий інтервал функції $f(x, y, z, \dots)$ визначають законом складання незалежних випадкових похибок (абсолютних та відносних):

$$\Delta g = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \langle \Delta x \rangle^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \langle \Delta y \rangle^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \langle \Delta z \rangle^2 + \dots}; \quad (11)$$

$$\frac{\Delta g}{\langle g \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \frac{\langle \Delta x \rangle}{\langle x \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \frac{\langle \Delta y \rangle}{\langle y \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \frac{\langle \Delta z \rangle}{\langle z \rangle}\right)^2 + \dots}; \quad (12)$$

(Похідні обчислюються при середніх значеннях аргументів.)

Існує й інша можливість обчислення довірчого інтервалу при непрямим вимірюваннях для функції декількох аргументів. Кожний аргумент вимірюється n разів. За виміряними аргументами обчислюють n разів шукану функцію. Обчислення похибок вимірів ведуть на основі одержаних значень функції за схемою для прямих вимірів.

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Лабораторна робота № 1.

ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

Прилади та обладнання: психрометр Асмана, барометр-анероїд, таблиця тиску насиченої водяної пари (таблиця пружності водяної пари), психрометрична таблиця-номограма.

Мета роботи: засвоїти один із методів (метод Августа) вимірювання вологості повітря.

Коротка теорія та метод вимірювань

Земна поверхня на 71% покрита водою. Випаровування води з поверхні водних басейнів і з поверхні суші Землі призводить до того, що повітря завжди містить деяку, локально змінну кількість водяної пари. Загальна маса водяної пари в атмосфері Землі оцінюється величиною $1,4 \cdot 10^{13}$ т, що складає близько 2,8% від загальної маси атмосфери. Таким чином, повітря завжди вологе.

Розрізняють абсолютну та відносну вологість повітря.

Абсолютною вологістю повітря називається маса водяної пари в одиниці об'єму повітря. По суті це густина водяної пари, розчиненої в повітрі, і вона вимірюється в кг/м^3 або г/м^3 . Абсолютну вологість можна оцінювати також концентрацією молекул водяної пари або її мольною концентрацією.

Застосовуючи рівняння Клапейрона-Менделєєва у формі

$$P = \frac{1}{V} \cdot \frac{m}{\mu} RT \quad (1)$$

чи рівняння кінетичної теорії ідеального газу

$$P = nkT \quad (2)$$

(V - об'єм газу, T - температура за шкалою Кельвіна, m - маса газу, μ - молярна маса газу, n - концентрація молекул газу, R і k - універсальна газова стала та стала Больцмана) до розчиненої в повітрі водяної пари, як до компоненту суміші, можна зробити висновок, що парціальний тиск (тиск одного з компонентів суміші в тому ж об'ємі, що займає вся суміш газів) пари при даній температурі пропорційний абсолютній вологості і може бути використаний, як рівнозначна їй величина.

Абсолютної вологості не достатньо для завдання водного стану атмосфери. Одна і та ж кількість пари в одиниці об'єму повітря при різних температурах порізному впливає на протікання природних процесів в атмосфері. Більшість явищ, пов'язаних з вологістю, наприклад швидкість випаровування рідин або швидкість висихання різних речовин, зокрема будівельних матеріалів, тканин і т.д., залежить не від кількості вологи, що міститься в повітрі, а від того, близько чи далеко знаходиться ця кількість від насичення. В зв'язку з цим вводять ще одну характеристику вологості повітря - відносну вологість.

Відносна вологість визначається, як відношення абсолютної вологості до густини насиченої пари для даної температури. Як правило, це відношення переводять в проценти. Відносна вологість, як бачимо, спирається на поняття насиченої пари. Насичена пара даної рідини утворюється при встановленні термодинамічної рівноваги між парою і рідиною, тобто при встановленні однієї і тієї ж температури в рідині і парі, а також при рівності двох зворотних потоків: потоку молекул, які випаровуються з рідини, і потоку молекул, які конденсуються із пари.

Згідно з рівняннями (1) і (2) густині чи концентрації насиченої пари відповідає певний тиск, величина якого залежить від температури. Цей тиск називається тиском насиченої пари або пружністю насиченої пари. Залежність тиску насиченої пари від температури називають кривою рівноваги рідини і її насиченої пари або кривою випаровування. В даній роботі тиск насиченої водяної пари при різних температурах наведений у спеціальній таблиці.

Отже, відносну вологість можна задати як виражене в процентах відношення тиску P пари води, що міститься в повітрі (парціального тиску), до тиску насиченої пари P_n при тій же температурі:

$$B = \frac{P}{P_n} \cdot 100\% \quad (3)$$

Таким чином, швидкість випаровування води залежить не від абсолютної вологості повітря, а від близькості водяної пари до насичення, тобто від відносної вологості. Відносна вологість 100% означає, що пара в повітрі стає насиченою, додаткова волога в повітря вже не поступає. Чим менша відносна вологість, тим далі пара від насичення, тим інтенсивніше відбувається випаровування.

Оскільки тиск насиченої пари залежить від температури - він зростає з підвищенням температури, - то одна й та ж сама абсолютна вологість може відповідати ненасиченому і насиченому стану пари в залежності від температури. Та температура, починаючи з якої пара, що знаходиться в

повітрі, стає насиченою, називається точкою роси. Точка роси характеризує початок конденсації водяної пари при зниженні температури.

Психрометр Асмана складається з двох однакових термометрів, закріплених в спеціальному корпусі, і вентилятора з годинниковим механізмом заводу, розміщеним в верхній частині приладу. Ртутний резервуар одного з термометрів, обгорнутий батистом чи марлею, попередньо змочують у воді. Під час вимірювань термометри інтенсивно обдуваються повітрям за допомогою вентилятора. «Сухий» термометр практично не змінює свої показання, які відповідають температурі оточуючого повітря. Температура «вологого» термометра $t_в$, внаслідок випаровування води з поверхні батисту, встановлюється нижчою від температури «сухого» термометра $t_с$. Вказана різниця температур - психрометрична різниця - залежить від відносної вологості повітря.

Кількість теплоти, що йде на випаровування води за одиницю часу з одиниці поверхні батисту q_1 виражається через атмосферний тиск P_0 і різницю $P'_н - P$, де $P'_н$ - тиск насиченої пари води при температурі «вологого» термометра (максимальна абсолютна вологість при температурі $t_в$), P - парціальний тиск водяної пари повітря (абсолютна вологість), таким чином

$$q_1 = k_1 \frac{P'_н - P}{P_0}, \quad (4)$$

k_1 - коефіцієнт, залежний від конструкції приладу.

З іншого боку, кількість теплоти, що надходить за одиницю часу до одиниці поверхні вологого батисту з повітряного потоку q_2 , пропорційна різниці температур «сухого» і «вологого» термометрів $t_с - t_в$

$$q_2 = k_2 (t_с - t_в) \quad (5)$$

k_2 - коефіцієнт тепловіддачі даної системи.

При досягненні системою термодинамічної рівноваги, приплив теплоти q_2 з оточуючого середовища буде компенсуватись втратами теплоти q_1 на випаровування води з поверхні батисту. Прирівнюючи q_1 і q_2 одержимо співвідношення для визначення тиску водяної пари, що знаходиться в повітрі - абсолютної вологості:

$$P = P'_н - a P_0 (t_с - t_в) \quad (6)$$

де $a = \frac{k_1}{k_2}$ - коефіцієнт, залежний від конструкції психрометра, головним чином від швидкості обтікання повітря ртутного резервуара «вологого» термометра (стала Асмана). Сталу a визначають експериментально, в даній роботі $a = 0,0005$ град⁻¹.

Як правило, кожному психрометру надається психрометрична таблиця, де в залежності від температури і психрометричної різниці температур вказані абсолютна і відносна вологості. В даній роботі абсолютну і відносну вологості слід розрахувати самостійно і тільки для контролю відносної вологості застосована психрометрична таблиця-номограма.

Вказаний метод вимірювання вологості повітря вперше був запропонований Августом (1825 р.). Точними розрахунками метод забезпечив Аніон, удосконалив техніку вимірювання Асман.

Вологість повітря відіграє важливу роль для зберігання зерна, овочів і фруктів у сховищах, для прогнозування погоди, зокрема надходження заморозків, для формування мікроклімату в інкубаторах, тваринницьких приміщеннях, книгосховищах, бібліотеках, музеях і т. д.

Пов'язані з вологістю повітря явища випаровування і конденсації води визначають круговорот вологи і теплообмін на земній поверхні. При конденсації водяної пари в атмосфері утворюються хмари (в вільній атмосфері), туман (в приземному шарі повітря), роса (на поверхні Землі і наземних предметах). Атмосферні опади знову повертають на Землю випарену з неї воду. Кругообіг води постійно супроводжується кругообігом теплоти: в місцях, де відбувається випаровування води, величезна кількість теплоти поглинається, а в районах, де відбувається конденсація пари, ця теплота виділяється. Процеси випаровування і конденсації формують помірність клімату приморських районів. Випаровування і конденсація регулюють теплообмін і обмін вологи тварин і рослин.

Вплив вологості на організм сільськогосподарських тварин можна вважати досить помірним. Однак при оцінці впливу вологи слід виходити також із необхідності врахування всього комплексу кліматичних факторів: температури навколишнього середовища, атмосферного тиску, аероіонного та радіаційного стану атмосфери і ін. Так, висока вологість у поєднанні з високою температурою знижує рівень випаровування зі шкіри тварин, що ускладнює тепловіддачу і, як наслідок, спричиняє зниження апетиту у тварин, погіршення засвоюваності кормів і зниження продуктивності. Крім того, знижується резистентність тварин, зростає захворюваність і падіж внаслідок розвитку патогенної та грибнової мікрофлори. Підвищена вологість призводить до поганого оперення птиці.

Оптимальною для тваринницьких приміщень вважають відносну вологість в межах 65-75%. У холодну пору року допускають зниження відносної вологості до 50%.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтесь з конструкцією психрометра Асмана. Переконайтесь, що один з термометрів має батистову обгортку.

2. Змочіть батистову обгортку термометра за допомогою гумової груші або склянки з водою.

3. Обережно заведіть пружину вентилятора (6-9 півобертів ручки заводу) і проведіть спостереження за змінами температур «вологого» t_w та «сухого» t_s термометрів.

4. Після того, як температури обох термометрів перестануть зменшуватись і встановляться на певних рівнях, запишіть значення цих температур з точністю до 0,1°C.

5. За таблицею пружності насиченої пари води (таблиця 2) визначте тиски насиченої пари P'_n і P_n відповідно для температур «вологого» t_w та «сухого» t_s термометрів.

6. За допомогою барометра визначте атмосферний тиск P_o і переведіть його в мм рт. ст. відповідно одиницям вимірювання тиску насиченої пари за таблицею пружності насиченої пари води. (Пам'ятайте, що 101325 Па відповідає 760 мм рт. ст.)

7. Обчисліть за формулою (6) абсолютну вологість повітря.

8. За формулою (3) визначте відносну вологість повітря B .

9. Використовуючи психрометричну таблицю-номограму, визначте відносну вологість B' за відомими значеннями t_s і t_w . Порівняйте B' і B .

Результати вимірювань та розрахунків подайте у вигляді таблиці (таблиця 1):

Таблиця 1

t_w	t_s	a	P_o	P'_n	P_n	P	B	B'

Дайте відповіді на запитання:

1. Що таке абсолютна та відносна вологість? Якими одиницями може бути виміряна абсолютна вологість? За результатами вимірювань визначте абсолютну вологість в одиницях густини водяної пари.

2. Чому роса випадає вночі та вранці?

Таблиця 2

Залежність тиску насиченої водяної пари $P_{нас}$ (мм рт. ст.) від температури

Температура повітря, С°	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	4,58	4,61	4,65	4,68	4,71	4,75	4,79	4,82	4,85	4,89
1	4,92	4,96	5,00	5,03	5,07	5,10	5,15	5,18	5,21	5,25
2	5,29	5,33	5,37	5,41	5,45	5,48	5,52	5,57	5,60	5,64
3	5,69	5,72	5,76	5,84	5,89	5,93	5,93	5,97	6,02	6,05
4	6,10	6,14	6,18	6,23	6,27	6,32	6,36	6,41	6,45	6,50
5	6,54	6,59	6,63	6,68	6,73	6,77	6,82	6,87	6,92	6,96
6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7,41	7,46
7	7,52	7,54	7,61	7,67	7,72	7,77	7,83	7,88	7,94	7,99
8	8,04	8,10	8,15	8,21	8,27	8,33	8,38	8,44	8,49	8,55
9	8,61	8,67	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08	9,15
10	9,21	9,27	9,33	9,40	9,46	9,53	9,59	9,65	9,71	9,78
11	9,85	9,91	9,98	10,04	10,11	10,18	10,25	10,32	10,38	10,45
12	10,52	10,59	10,66	10,74	10,80	10,88	10,95	11,02	11,09	11,16
13	11,24	11,31	11,39	11,46	11,54	11,61	11,69	11,76	11,84	11,91
14	11,99	12,07	12,15	12,23	12,31	12,39	12,47	12,55	12,63	12,72
15	12,78	12,87	12,95	13,03	13,12	13,20	13,29	13,38	13,46	13,55
16	13,64	13,72	13,80	13,89	13,98	14,07	14,16	14,25	14,34	14,43
17	14,53	14,62	14,71	14,81	14,90	15,00	15,09	15,18	15,27	15,38
18	15,48	15,57	15,67	15,77	15,87	15,97	16,07	16,17	16,27	16,38
19	16,47	16,58	16,68	16,79	16,89	17,00	17,10	17,21	17,31	17,43
20	17,53	17,64	17,75	17,86	17,97	18,08	18,19	18,30	18,42	18,54
21	18,65	18,76	18,88	18,99	19,11	19,23	19,35	19,47	19,59	19,71
22	19,83	19,95	20,07	20,20	20,32	20,44	20,56	20,69	20,82	20,94
23	21,07	21,19	21,33	21,46	21,58	21,71	21,83	21,98	22,11	22,24
24	22,38	22,51	22,65	22,78	22,92	23,06	23,20	23,33	23,47	23,62
25	23,76	23,90	24,04	24,19	24,33	24,47	24,62	24,76	24,91	25,06
26	25,21	25,36	25,51	25,66	25,81	25,96	26,12	26,27	26,43	26,59
27	26,74	26,90	27,06	27,21	27,37	27,54	27,70	27,86	28,18	28,18
28	28,34	28,51	28,69	28,85	29,02	29,19	29,36	29,53	29,70	29,87
29	30,04	30,22	30,40	30,57	30,75	30,92	31,10	31,28	31,46	31,64
30	31,83	32,01	32,20	32,38	32,57	32,75	32,94	33,13	33,32	33,51
31	33,70	33,89	34,09	34,28	34,49	34,67	34,87	35,07	35,27	35,47
32	35,67	35,87	36,07	36,28	36,48	36,69	36,89	37,10	37,31	37,52
33	37,73	37,95	38,16	38,38	38,59	38,81	39,02	39,24	39,47	39,68
34	39,91	40,13	40,35	40,58	40,80	41,03	41,26	41,49	41,72	41,95
35	42,18	42,42	42,66	42,89	43,13	43,37	43,61	43,85	44,09	44,33
36	44,58	44,82	45,06	45,31	45,57	45,81	46,06	46,32	46,57	46,83
37	47,08	47,34	47,60	47,85	48,12	48,38	48,64	48,90	49,17	49,44
38	49,71	49,98	50,25	50,52	50,80	51,07	51,34	51,62	51,09	52,18
39	52,46	52,61	53,02	53,31	53,60	53,89	54,17	54,46	54,76	55,05

Лабораторна робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН

Прилади та обладнання: вимірювальна установка, різноваги, розчин, що досліджується, розчин поверхнево-активної речовини.

Мета роботи:

1. Вивчити явище поверхневого натягу рідин.
2. Визначити поверхневий натяг рідин методом відриву кільця.
3. Визначити вплив поверхнево-активних речовин на поверхневий натяг рідин.

Теорія і метод вимірювання

Однією з характеристик рідинних середовищ є коефіцієнт поверхневого натягу α . Визначення α плазми крові, хребетно-мозкової рідини, сечі, сироватки крові має важливе значення для діагностики захворювань. Наприклад, при анарїлактичному шоці α різко зменшується. При захворюванні жовтяницею поверхневий натяг сечі зменшується внаслідок появи у ній жовчних кислот. При діабеті і деяких інших захворюваннях збільшується вміст ліпази у крові. Про збільшення ліпази свідчить зміна поверхневого натягу розчину трибутилену при додаванні до нього крові.

Поверхневим натягом рідин пояснюється явище газової емболії, яка виникає, якщо пухирець газу попадає у кровоносну судину маленького діаметра. У цьому випадку може наступити повна закупорка судини. Тому при ін'єкціях, вливаннях та інших процедурах у кровоносні судини не повинні попадати пухирці повітря. Газова емболія може виникнути і при різкому переході організму з середовища з високим тиском у середовище з низьким тиском. Справа у тому, що у крові і тканинних рідинах завжди є розчинені гази. Якщо тиск різко зменшити, то ці гази виділяються і у кровоносних судинах з'являються пухирці (кесонна хвороба).

Поверхневий натяг відіграє важливу роль при ендоцитозі, фагоцитозі, коли клітини організму захоплюють зовнішні речовини, чужорідні тіла і переварюють їх. Захоплення здійснюється за допомогою вип'ячувань, що виникають на поверхні клітин. Вип'ячування поверхні відбувається внаслідок зменшення поверхневого натягу у тих ділянках клітини, де відбувається ендоцитоз.

Зменшення поверхневого натягу ділянок клітин здійснюється під впливом поверхнево-активних речовин. Поверхнево-активні речовини (ПАР) мають велике значення у біології і медицині, оскільки вони беруть участь у

багатьох процесах, які відбуваються у живих організмах. ПАР, не розчиняючись у рідині, збираються на поверхні і змінюють величину α .

Багато біологічних сполук виявляють поверхневу активність. Так, у альвеолах легень у поверхневому їх шарі є моношар сурфактанту - поверхнево-активної речовини, який збільшує тиск у альвеолах і перешкоджає їх складанню при глибокому видиху. Інколи у легенях новонароджених виникає недостатність сурфактанту. І тоді розвивається легенева недостатність.

Важливу роль відіграють ПАР і у процесах травлення. Здатність жовчі сприяти травленню жирів залежить не тільки від її хімічної дії. Жовч по відношенню до жирів є ПАР і тому зменшує поверхневий натяг крапель жиру, що сприяє їх подрібненню на менші краплини.

Вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу клітин дозволило у свій час вказати на наявність білків у цитоплазматичній мембрані, що здобуло підтвердження у електронно-мікроскопічних та рентгеноструктурних дослідженнях. Взаємодія деяких ПАР з мембранними білками може призвести до сильних конформаційних змін і до зниження біологічної активності аж до їх повної денатурації.

Пояснимо суть явища поверхневого натягу. Молекули рідини притягуються одна до одної з силою F . Для молекули А (рис. 1), що знаходиться в середині рідини, дія всіх сил в середньому дорівнює нулю.

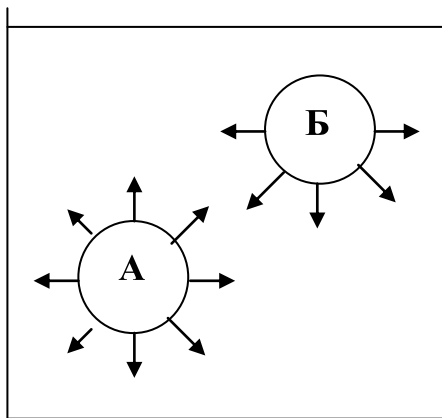


Рис. 1

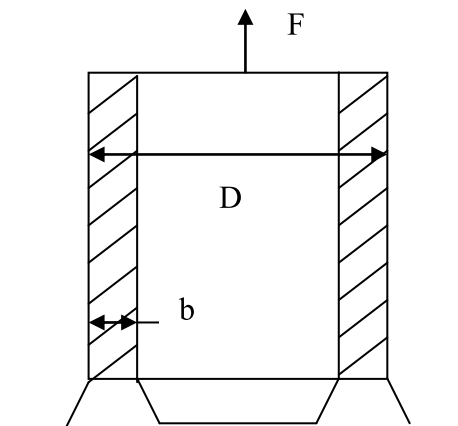


Рис. 2

Інакше стоїть справа з молекулою Б, що міститься біля поверхні рідини. Оскільки густина пари значно менша густини рідини, на молекулу буде діяти сила, спрямована вертикально вниз. Під дією цієї сили молекули поверхні втягуються у середину рідини. При відсутності зовнішніх сил рідина набуває такої форми, при якій площа її поверхні мінімальна - форму сфери. Для збільшення поверхні рідини необхідно, щоб частина її молекул вийшла на поверхню, у протихід силам молекулярного притягання. Для цього необхідно

виконати роботу зовнішніх сил. При зростанні температури рідини хаотичний рух молекул збільшується, він протидіє молекулярному притяганню і поверхневий натяг зменшується.

Силу поверхневого натягу рідини можна виміряти, розірвавши поверхневий шар. Для цього у даній роботі застосовується відрив від рідини кільця, що змочується (рис. 2).

При занурюванні кільця, молекули рідини взаємодіють з матеріалом кільця з більшою силою, ніж одна з одною. При підніманні кільця разом з ним піднімається і частина рідини. Для подальшого піднімання кільця треба перебороти його вагу, вагу піднятої рідини і силу поверхневого натягу по зовнішньому і внутрішньому колу кільця. Вагою піднятої рідини можна знехтувати порівняно з силою поверхневого натягу. Тоді:

$$F = \alpha \cdot l, \quad (1)$$

де α - коефіцієнт поверхневого натягу рідини, l - довжина контуру, по якому розривається поверхня. У нашому випадку l є сума довжин зовнішнього і внутрішнього кола:

$$l = \pi D + \pi(D - 2b) = 2\pi(D - b), \quad (2)$$

де b - товщина кільця, D - зовнішній і $(D - 2b)$ внутрішній діаметри кільця. Якщо виміряти силу, при якій відбувається відрив кільця від рідини, і розміри кільця, то формула (2) дозволяє визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідини:

$$\alpha = \frac{F}{2\pi(D - b)} \quad (3)$$

Порядок виконання роботи:

Завдання 1.

1. Ознайомтесь з установкою. Штангенциркулем виміряйте зовнішній діаметр D та товщину b кільця.

2. Налийте у чашку Петрі рідину і поставте її на столик під кільце. Обертаючи маховичок приладу, опустіть кільце у рідину. Повільно підіймаючи кільце, на шкалі приладу зафіксуйте положення кільця у момент відриву його від рідини.

3. За допомогою різноваг, що додаються до установки, визначте силу $P = mg$, необхідну для розтягування пружини до зафіксованого значення ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

4. За формулою (3) визначте коефіцієнт поверхневого натягу рідини.

Виконайте дії пп. 2-4 ще два рази. Результати вимірювань та розрахунків занесіть до таблиці 1. Визначте похибки вимірювань.

Таблиця 1

№	D	b	F	α	$\Delta\alpha$	ε
1						
2						
3						
Середні значення:						

Завдання 2.

Додайте до розчину поверхнево-активної речовини (наприклад спирту або розчину мила). Виконайте дії, що перелічені у завданні 1. Результати вимірювань та розрахунків занесіть до таблиці 2, аналогічної таблиці 1.

Дайте відповіді на запитання:

1. В чому полягає явище поверхневого натягу конденсованих речовин?
2. Які речовини називають поверхнево-активними? Наведіть приклади поверхнево-активних речовин.
3. Як залежить коефіцієнт поверхневого натягу від температури?

Лабораторна робота №3

ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

Прилади і обладнання: скляний циліндр з досліджуваною рідиною, мікрометр, дрібні металеві кульки, пінцет, секундомір та лінійка.

Мета роботи: засвоїти метод Стокса (метод падаючої кульки) для визначення коефіцієнта в'язкості середовища.

Коротка теорія та метод вимірювань

Будь-яка рідина спричиняє опір відносному переміщенню її шарів. Цю властивість, зумовлену взаємодією молекул, називають в'язкістю, або внутрішнім тертям.

Силу внутрішнього тертя визначає закон Ньютона:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S, \quad (1)$$

де η - коефіцієнт в'язкості, S - площа шарів, що труться, $\frac{dv}{dx}$ — градієнт швидкості шарів рідини (зміна швидкості шарів на одиницю довжини в напрямку найбільшої зміни швидкості - вздовж нормалі до шарів, що труться). З (1) можна впевнитися, що в системі SI коефіцієнт в'язкості вимірюється в кг/(м·с), або в Па·с.

В роботі для визначення коефіцієнта в'язкості застосовується метод падаючої кульки, запропонований Стоксом. Інтегруючи вираз (1) Стокс знайшов співвідношення, яке описує силу тертя, що зазнає сферичне тіло:

$$F = 6\pi\eta r v, \quad (2)$$

де r - радіус кульки, v - швидкість її руху.

Якщо важка кулька падає у в'язкій рідині, то крім сили тертя (2) на неї діє сила тяжіння $P=mg$ і сила Архімеда F_A , що дорівнює вазі рідини, витісненої кулькою. Якщо радіус кульки r , густина матеріалу кульки і рідини відповідно ρ_1 і ρ_2 , то вага кульки і сила Архімеда мають вигляд:

$$P = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g; \quad F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_2 g \quad (3)$$

Спочатку кулька рухається рівноприскорено під дією сили $F' = P - F_A$, але разом із зростанням швидкості v зростає сила внутрішнього тертя F (2), спрямована проти руху, і сумарна сила F' наближається до нуля:

$$F' = P - F_A - F = 0 \quad (4)$$

Встановлюється стала швидкість руху кульки, яку можна виміряти.

Підставляючи в (4) вирази для сил (2) і (3), одержимо:

$$6\pi\eta r v = \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_1 - \rho_2) g \quad (5)$$

Звідси випливає розрахункова формула для визначення коефіцієнта в'язкості рідини:

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho_1 - \rho_2) g r^2 / v \quad (6)$$

Формулу (6) можна застосовувати для розрахунку швидкості осідання еритроцитів (ШОЕ) в крові, вважаючи їх у першому наближенні сферичними. Необхідно враховувати ефект склеювання еритроцитів у конгломерати, із-за чого ефективний радіус частинок збільшується і ШОЕ зростає.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтесь з інструкцією та методикою вимірювань, мікрометром і секундоміром.

2. Змінюючи положення кульки, виміряйте мікрометром її діаметр в трьох напрямках: d_1 , d_2 , d_3 . Визначте середнє значення радіуса - $r=(d_1+d_2+d_3)/6$.

3. Опустіть кульку в рідину і секундоміром виміряйте час опускання t кульки між двома помітками на циліндрі з рідиною.

4. Виміряйте відстань між помітками l і розрахуйте швидкість опускання кульки $v=l/t$. За формулою (6) знайдіть значення коефіцієнта в'язкості η .

5. При розрахунках використайте значення густини матеріалів: свинцю - $11,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; сталі - $7,80 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; гліцерину - $1,18 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

6. Повторіть виміри і розрахунки ще для двох кульок. Результати вимірів занесіть до таблиці:

№	r	t	l	v	η	$\Delta\eta$
1						
2						
3						
Середні значення:						

Кінцевий результат запишіть як: $\eta = \eta_{\text{сер}} \pm \Delta\eta_{\text{сер}}$

Дайте відповіді на запитання:

1. Як залежить швидкість опускання кульки від її радіуса?
2. Який коефіцієнт в'язкості - води чи гліцерину - можна визначити точніше розглянутим методом? Чому?
3. Як залежить коефіцієнт в'язкості рідин від температури?

Лабораторна робота № 4

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ ПОВІТРЯ МЕТОДОМ ВИТІКАННЯ КРИЗЬ КАПІЛЯР

Прилади та обладнання: експериментальна установка ФПТІ-І, до складу якої входить скляна капілярна трубка, компресор з регулятором подачі повітря, водяний манометр та пристрій індикації об'ємного розходу повітря крізь капіляр.

Мета роботи: вивчення закону Гагена-Пуазейля та засвоєння одного з методів визначення коефіцієнта в'язкості.

Коротка теорія і метод вимірювань

В газах і рідинах хаотичний рух молекул і сили взаємодії між ними перешкоджають відносному переміщенню шарів середовища – це явище називається внутрішнім тертям або в'язкістю. Ньютон встановив, що сила взаємодії між двома шарами рідини або газу при їх паралельному русі з швидкостями v_1 і v_2 залежить від відносної швидкості їх руху $v_1 - v_2$, від площі контактуючих шарів S та від відстані між шарами d і виражається формулою (закон Ньютона для внутрішнього тертя) –

$$F = \eta \frac{v_1 - v_2}{d} S, \quad (1)$$

де η - динамічний коефіцієнт в'язкості (часто просто в'язкість).

Співвідношення (1) визначає коефіцієнт в'язкості як силу внутрішнього тертя, яка виникає між двома шарами середовища з площею контакту 1 м^2 , розміщених на відстані 1 м один від одного, при різниці швидкостей між шарами в 1 м/с . Звідси розмірність коефіцієнта в'язкості: $\text{Н/м}^2 \cdot \text{м}/(\text{м/с}) = \text{Па} \cdot \text{с}$.

В системі одиниць СГС в'язкість вимірюється в пуазах (Пз) – $1 \text{ Пз} = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Часто в'язкість виражають у відносних одиницях, які визначають в'язкість даного середовища відносно в'язкості води (коефіцієнт в'язкості води за нормальних умов становить $0,001 \text{ Па} \cdot \text{с}$).

В газах з ростом температури хаотичний рух молекул збільшується, тому їх в'язкість теж зростає. У рідинах навпаки вона зменшується, бо руйнується взаємопритягання між молекулами, що грає у рідинах значну роль.

Відхилення від норми коефіцієнта в'язкості крові ($4,5 \cdot 10^{-3} - 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$) є надійним критерієм перебігу хвороб у сільськогосподарських тварин і у людини. Так, наприклад, різке зростання в'язкості крові і пов'язане з ним підвищення агрегації еритроцитів помічено при атеросклерозі, облітеруючому тромбангіозі і венозному тромбозі, гіпертонічній хворобі, ішемічній хворобі серця і інфаркті міокарда, діабеті, серповидно-клітинній анемії, захворюванні нирок та ін.

Для характеристики режиму течії в'язкої рідини або реального газу використовується спеціальна безрозмірна величина - число Рейнольдса, яке є одним з критеріїв гідродинамічно подібних течій і визначає співвідношення інерційних і в'язких властивостей рідини при течії. Число Рейнольдса Re задається відношенням

$$Re = \rho Dv / \eta, \quad (2)$$

ρ - густина рідини (газу), D - характерний розмір поперечного перерізу потоку, наприклад діаметр труби, v - швидкість потоку, η - динамічний коефіцієнт в'язкості рідини (газу).

Із зростанням швидкості потоку при певних значеннях числа Рейнольдса (критичне значення числа Рейнольдса $Re_{кр}$) відбувається перетворення ламінарної течії потоку на турбулентну. Причини цього переходу, як і питання нестійкості ламінарної течії взагалі, на сьогодні недостатньо з'ясовані. Критичні значення числа Рейнольдса визначаються експериментально. Так, для води, що тече в гладкій циліндричній трубі, $Re_{кр}=2300$ (за характерний розмір перерізу потоку взятий діаметр труби).

При русі в'язкої нестисливої рідини вздовж прямолінійної циліндричної труби радіусом r і довжиною l в умовах ламінарної течії ($Re < Re_{кр}$) можна довести, що швидкість рідини не змінюється вздовж труби, а на різних відстанях від осі труби x вона задається формулою:

$$v(x) = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (r^2 - x^2) \quad (3)$$

де $p_1 - p_2$ - різниця тисків на вході і виході труби, η - коефіцієнт в'язкості рідини.

Із закону (3) випливає, що з зміною x швидкість v змінюється за параболічним законом від максимального значення v_0 на осі труби,

$$v_0 = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} r^2 \quad (4)$$

до мінімального значення (нуля) на стінці труби, при $x = r$. Цю залежність легко прослідкувати на такому досліді. Наповнимо вертикально розміщену бюретку до половини безбарвною в'язкою рідиною (наприклад гліцерином), а зверху обережне наллємо підфарбований гліцерин. При закритому крані бюретки видно чітку плоску границю між рідинами. Якщо кран відкрити, то рідина почне витікати, причому її центральні шари будуть рухатись швидше, ніж периферичні, і межа між рідинами матиме форму параболи.

З формули (3) можна обчислити об'ємний розхід рідини в трубі Q , тобто її об'єм, що проходить через поперечний переріз труби за одиницю часу

$$Q = \pi \frac{p_1 - p_2}{8\eta l} r^4 \quad (5)$$

- об'ємний розхід рідини в трубі пропорційний четвертому ступеню радіуса труби, різниці тисків на вході і виході труби і обернено пропорційний довжині труби і коефіцієнту в'язкості рідини. Рівняння (5) носить назву закону Гагена-Пуазейля.

Якщо ввести позначення

$$Z = \frac{8\eta l}{\pi r^4}, \quad (6)$$

то закон Гагена-Пуазейля можна виразити так:

$$Q = \frac{p_1 - p_2}{Z} \quad (7)$$

Вказаний вираз аналогічний закону Ома, згідно з яким сила струму провіднику I пропорційна різниці потенціалів на кінцях провідника $\varphi_1 - \varphi_2$ і обернено пропорційна електричному опору провідника R , тобто

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}. \quad (8)$$

Приймаючи об'ємний розхід рідини Q , як аналог сили струму, а перепад тисків $p_1 - p_2$ як аналог різниці потенціалів, величину Z , можна вважати, аналогічною електричному опору - гідравлічним опором труби. Вказана аналогія активно використовується при електричному моделюванні гідродинамічних процесів.

Закону Гагена-Пуазейля відповідає, наприклад, фільтрація, яка полягає в переносі рідин крізь пори клітинних мембран або стінок кровоносних судин під дією гідростатичного і осмотичного тисків. Утворення первинної сечі в ниркових нефронах відбувається в результаті фільтрації під дією тиску крові. В артеріальних ділянках кровоносної системи вода з плазми крові в процесі фільтрації виходить з кровоносного русла в лімфу і сполучну тканину, а у венозних ділянках надходить в плазму. В нормі обидва процеси врівноважують один одного, Але не завжди - наприклад при гіпертонії вихід води з судин під дією підвищеного тиску крові починає перевищувати надходження води в середину судин, і розвивається набряк тканин.

Закон Гагена-Пуазейля з певними поправками може бути застосований і для газів, зокрема для визначення їх в'язкості.

В даній роботі досліджуються в'язкі властивості повітря. Коефіцієнт в'язкості, згідно рівнянню (5), можна виразити наступним чином:

$$\eta = \pi \frac{p_1 - p_2}{8lQ} r^4, \quad (9)$$

тобто для його визначення слід знати об'ємний розхід газу Q в трубі, перепад тисків $p_1 - p_2$ на кінцях труби, довжину l та радіус труби r . В роботі повітря за допомогою компресора прокачують через скляну капілярну трубку, діаметр якої задається, а довжина легко вимірюється. Індикація об'ємного розходу повітря, що проходить через капіляр, та показання водяного манометра, фіксуючого різницю тисків на кінцях капіляра, винесені на передню панель вимірювального блока лабораторної установки.

Порядок виконання роботи:

1. Уважно ознайомтесь з лабораторною установкою.
2. Підключіть блок живлення до електричної мережі. Тумблер «Мережа» переведіть в положення «Увімкнуто».
3. Переведіть тумблер "Повітря" в положення "Увімкнуто" і перевірте можливість регулювання роботою компресора ручкою інтенсивності подачі повітря.
4. Виставте регулятором інтенсивності подачі повітря рівень рідини в індикаторі проти довільної відмітки (в діапазоні $0,5-3,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$) на його шкалі і за показаннями манометра зафіксуйте різницю тисків на кінцях капілярної трубки.
5. Виконайте виміри п. 4 декілька разів для інших значень об'ємного розходу повітря в капілярі.
6. Виміряйте штангенциркулем довжину капілярної трубки, а також за вказаним викладачем внутрішнім діаметром трубки визначте її радіус.
7. За формулами (7) або (6) та (9) обчисліть гідравлічний опір капіляра та коефіцієнт в'язкості повітря.

Результати вимірювань та розрахунків занесіть до таблиці:

№	Q , $\text{м}^3/\text{с}$	$p_1 - p_2$, Па	l , м	r , м	η , Па·с	Z , $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^4)$
Середні значення:						

Дайте відповіді на запитання:

1. Який фізичний смисл та розмірність коефіцієнта внутрішнього тертя?
2. Як має змінюватись в'язкість газів і рідин в залежності від температури?

3. У якому випадку і у скільки разів можливо прокачувати більший об'єм газу або нафти - крізь дві однакові паралельні гілки трубопроводу, чи крізь один трубопровід в 2 рази більшого діаметра?

4. Подайте знайдене значення коефіцієнта в'язкості в пузах.

Лабораторна робота № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ РІДИН МАЛОЇ В'ЯЗКОСТІ КАПІЛЯРНИМ ВІСКОЗИМЕТРОМ

Прилади та обладнання: капілярний віскозиметр з краником, еталонна рідина - дистильована вода, досліджувана рідина, мірний циліндр, терези, склянка.

Мета роботи: засвоїти метод вивчення коефіцієнта внутрішнього тертя за допомогою віскозиметра.

Коротка теорія та метод вимірювання

Будь-яка рідина (або газ) мають властивість протидіяти відносному переміщенню її шарів. В газах ця властивість зумовлена переносом імпульсу хаотичним тепловим рухом молекул, а в рідинах – переважно зчепленням молекул, і називається внутрішнім тертям, або в'язкістю.

Сила внутрішнього тертя визначається законом Ньютона:

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} S, \quad (1)$$

де η - коефіцієнт в'язкості, S - площа дотику шарів; $\Delta v/\Delta x$ - градієнт швидкості шарів (зміна відносної швидкості шарів на одиницю довжини в напрямку найбільшого її зростання - вздовж нормалі до S). Наявність в'язкості є причиною того, що швидкість течії рідини всередині труби в різних точках поперечного перерізу виявляється різною і змінюється від $v=0$ поблизу стінок труби до деякого максимального значення на осі труби.

Для труби або капіляра кругового перерізу Пуазейль одержав співвідношення для "секундного" об'єму рідини, що перетинає їх поперечний переріз (об'ємного розходу) Q :

$$Q = dV / dt = \pi R^4 \Delta p / 8\eta l \quad (2)$$

де R – радіус капіляра, Δp - перепад тисків на кінцях капіляра, l - довжина капіляра, η – коефіцієнт в'язкості рідини.

В даній роботі рідина витікає із віскозиметра під дією власної ваги, тому перепад тисків Δp можна подати співвідношенням

$$\Delta p = \rho gh \quad (3)$$

де ρ - густина рідини, h - висота рівня рідини над вихідним отвором. Якщо вихідний рівень h_0 відповідає об'єму рідини V_0 у віскозиметрі, то рівень h відповідає об'єму $V_0 - V$, де V - об'єм рідини, що вибігла з віскозиметра. Позначаючи площу перерізу циліндричного резервуара віскозиметра через S і враховуючи, що $h = (V_0 - V)/S$, одержимо з (3)

$$\Delta p = \eta g (V_0 - V) / S \quad (4)$$

Підставляючи (4) в (2) і інтегруючи одержану рівність, приходимо до співвідношення:

$$\ln(V_0 / (V_0 - V)) = \pi R^4 \rho g t / 8 \eta l S, \quad (5)$$

де відношення $V_0 / (V_0 - V) = h_0 / h$; h_0 - вихідний рівень рідини у віскозиметрі над випускним отвором капіляра, h - кінцевий рівень, t - час витікання рідини. Звідси можна знайти коефіцієнт в'язкості:

$$\eta = \pi R^4 \rho g t / 8 l S \ln(h_0 / h) \quad (6)$$

Часто розрахунки за формулою (6) призводять до незадовільних результатів через значний вплив похибок вимірювань величин, що входять до формули. В зв'язку з цим застосовують так званий метод порівняння з еталонною рідиною. Віскозиметр наповнюють еталонною рідиною з густиною ρ_0 до рівня h_0 і випускають їх під дією власної ваги, доки рівень не досягне значення h . Відмічають час витікання t_0 . При таких же значеннях h_0 і h для досліджуваної рідини з густиною ρ відмічають час її витікання t . Записуючи двічі співвідношення (6) для цих двох випадків і беручи відношення другого до першого, одержимо

$$\eta / \eta_0 = (\rho t) / (\rho_0 t_0), \quad (7)$$

тому що всі величини, які характеризують установку, сталі і скорочуються. За співвідношенням (7) і відомою в'язкістю еталонної рідини знаходять в'язкість досліджуваної рідини.

Порядок виконання роботи:

1. Наповніть капілярний віскозиметр, що складається з скляного мірного циліндра з краником, з'єднаним з капіляром, еталонною рідиною – водою – до заданого рівня h_0 .

2. Тричі виміряти час витікання t_0 еталонної рідини з капіляра від рівня h_0 до іншого заданого рівня h .
3. Звільнити віскозиметр від води, наповнити його досліджуваною рідиною до того ж рівня h_0 і виміряти час t витікання рідини до рівня h . Повторити процедуру вимірювання ще двічі.
4. Виміряйте радіус R та довжину капіляра l .
5. Виміряйте діаметр циліндричного резервуара віскозиметра та обчисліть площу його поперечного перерізу S .
6. Обчисліть коефіцієнт в'язкості води за формулою (6) та знайдіть середнє його значення за трьома вимірами. Порівняйте одержаний результат з табличним значенням $\eta_0 = 1,05 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·с).
7. За допомогою терезів та мірного циліндра визначте густину досліджуваної рідини ρ .
8. Обчисліть за формулою (6) коефіцієнт в'язкості досліджуваної рідини і знайдіть середнє його значення за трьома вимірами.
9. Знайдіть коефіцієнт в'язкості η' досліджуваної рідини за формулою (7), використовуючи табличне значення коефіцієнта в'язкості η_0 еталонної рідини та її густини ρ_0 .
10. Порівняйте одержані результати і зробіть висновок про надійність прямого і непрямого методів вимірювання коефіцієнта в'язкості.

Дані вимірювань та розрахунків внести в таблицю:

№	R	l	S	h_0	h	ρ_0	ρ	t_0	η_0	t	η	$\Delta\eta$	η'	$\Delta\eta'$
Середні значення:														

Дайте відповіді на запитання:

1. Як зміниться об'ємний розхід рідини при збільшенні діаметра труби в 3 рази при незмінних інших параметрах?
2. Які переваги має метод порівняння перед прямим методом?

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ КОНТРАКЦІЇ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН

Мета роботи: дослідити розвиток контракції желатину у воді при різних температурах.

Прилади та матеріали: посудинка з пробкою-капіляром, годинник, вимірювальний мікроскоп, термостат, штатив, желатин у гранулах.

Теоретичні відомості

Більшість біологічних тканин - гелі або драглисті речовини. Вони мають багато пор і у рідині збільшують свій об'єм і вагу. Поглинання рідини гелем називають **набуханням**. Різні види гелів вибірково набухають у рідинах, кожен з них має певний розчинник, у якому набухання максимальне. Хоча об'єм гелів при набуханні збільшується, він завжди менший, ніж сумарний об'єм гелю і розчинника до набухання. А це означає, що при набуханні відбувається стискування системи, так звана **контракція** або стрикція. Як і у випадку поверхневого натягу рідин, контракцію забезпечують сили молекулярного зчеплення.

Зменшення об'єму набухаючого гелю, в порівнянні з сумою його початкового об'єму та об'єму поглинутого розчинника, пояснюється упорядкуванням молекул розчинника навколо міцели гелю, утворенням навколо міцели оболонки із більш щільним розміщенням молекул. Крім того, згідно з сучасними положеннями колоїдної хімії, розчинник не тільки адсорбується міцелою, а й проникає всередину її. Обидва процеси можуть відбуватися одночасно і обумовити зменшення об'єму системи.

Явище контракції властиве також і білкам живих тканин. Залежно від фізико-хімічної структури тканин і патологічного стану характер контракції може змінюватися.

Для вивчення контракції користуються спеціальною посудинкою з притертою пробкою, крізь яку проходить капіляр (рис.1):

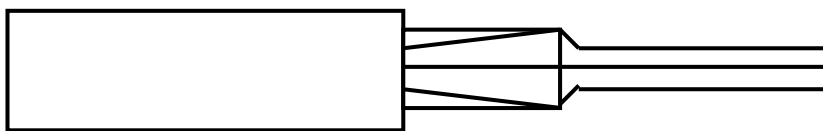


Рис. 1.

У посудинку поміщують біологічну тканину, наливають розчин тих речовин, вплив яких на контракцію досліджується. Зміну сумарного об'єму системи "тканина-рідина" контролюють за положенням меніска в капілярі посудинки. Посування меніска спостерігають за допомогою вимірювального мікроскопа, обладнаного окуляр-мікрометром.

Вивчення кінетики контракції можливе тільки при постійній температурі, інакше термічне розширення скла посудинки і речовин в ній зіпсують виміри. Тому посудинку вміщують у водяний термостат.

У даній роботі контракцію досліджують на желатині – гелі тваринного походження, та воді – кращому розчиннику для желатину.

Порядок виконання роботи:

1. Помістіть гранули желатину у посудинку для вимірювання контракції, залийте посудинку до краю водою і закрийте пробкою з капіляром.

2. Відсмоктуючи воду капіляра, установіть меніск на його середині.

3. Помістіть посудинку у термостат і встановіть температуру, вказану викладачем. Наведіть на меніск об'єктив мікроскопа і визначайте положення меніска на шкалі окуляр-мікрометра через кожні 5 хвилин (досліди припинить тоді, коли положення меніска залишається незмінним 5-10 хв.).

4. Встановіть на термостаті температуру на 5-10°C вище початкової і повторіть п.п. 1-3.

Результати вимірювань занесіть у таблицю:

T, °C	Час від початку досліду, хв.	Зміщення меніска у поділках окуляра

Остаточний результат подайте у вигляді графіка, де на осі абсцис відкладено час у хвиликах, а на осі ординат - зміщення меніска для обох значень температури. Порівняйте обидві криві і поясніть різницю.

Дайте відповіді на запитання:

1. У чому полягає явище контракції тканин, який його механізм?
2. Чому при дослідженні контракції посудинку з тканиною треба поміщати у термостат?
3. Чи зміниться форма графіка, якщо стан контракції желатину фіксувати кожні 3 хвилини?

Лабораторна робота № 7

ВИЗНАЧЕННЯ МОЛЯРНОЇ МАСИ ГЛЮКОЗИ МЕТОДОМ ОСМОМЕТРІЇ

Прилади та матеріали: термометр, посудина з водою, осмометрична трубка, терези з набором різноваг, штангенциркуль, порошок глюкози.

Мета роботи: вивчення явища осмосу і оволодіння одним із методів вивчення молярних мас складних біологічних сполук.

Теоретичні відомості

Фізично однорідні (гомогенні) суміші двох або декількох речовин називають розчинами. Фізична однорідність досягається рівномірним

перемішуванням молекул в наслідок їх теплового руху. В цьому відношенні розчини відрізняються від механічних сумішей, в яких перемішується не молекули, а макроскопічні частинки речовини. Від хімічних сполук розчини відрізняються тим, що в хімічні сполуки речовини вступають в строго визначених масових пропорціях, тоді як в розчинах відносні кількості речовин можуть змінюватися у більш-менш широких межах. Але розчини не є і суто механічними сумішами молекул - за рахунок взаємодії молекул по деяким ознакам розчини наближаються до хімічних сполук.

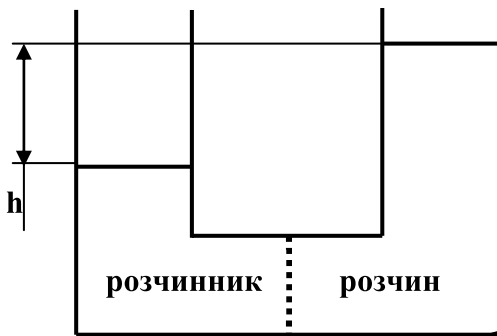
Сукупність всіх речовин у складі розчину утворює групу компонентів розчину. Якщо однієї речовини в розчині більше, ніж інших, то вона називається розчинником, а решта речовин – розчиненими речовинами. Найбільш часто застосовуються рідкі розчини, що складаються з двох речовин.

Кількісно розчини характеризуються концентрацією, яка визначає відносний вміст компонентів в розчині. Розрізняють вагові (масові), молярні та об'ємні концентрації. Вагова концентрація – це відношення ваги даного компонента до загальної ваги розчину. Як правило вагова концентрація виражається в процентах. У теоретичних дослідженнях більш зручна молярна концентрація, яка визначається відношенням числа молів фіксованого компонента до загального числа молів розчину. Об'ємною концентрацією компонента розчину називається його кількість в кілограмах (грамах) чи молях в одиниці об'єму розчину.

Якщо два однотипні двокомпонентні розчини різної концентрації відокремити один від одного пористою перегородкою, через яку можуть проходити молекули і розчинника, і розчиненої речовини, то, завдяки явищу дифузії, буде відбуватися вирівнювання концентрації обох розчинів до однакової величини. Існують перегородки, які проникні для молекул розчинника, але непроникні для молекул розчиненої речовини. Такі перегородки або мембрани називають напівпроникними. До них відносяться різні оболонки і тканини рослинного і тваринного походження. Для водного розчину цукру такою напівпроникною мембраною є, наприклад, бичачій міхур, кишкова тканина та деякі штучні полімерні плівки. Пори в таких мембранах досить широкі для проходження через них молекул води, але не достатньо великі для більших за розміром молекул цукрози. При умові що два розчини різної концентрації відокремлені один від одного напівпроникною мембраною, вирівнювання концентрації розчину не буде відбуватись, точніше воно буде відбуватись до певного моменту. Наприклад, коли розчин відокремлено від чистого розчинника напівпроникною мембраною, то спочатку молекули розчинника переходять в область, зайняту розчином, але згодом цей процес припиняється. При цьому в зоні розчину рідина знаходиться в умовах збільшеного тиску, порівняно з зоною розчинника, що проявляється у зміщенні рівнів розчину і розчинника на величину h (рис. 1,2).

Явище проникнення молекул розчинника крізь напівпроникну мембрану в зону розчину називається осмосом. Різниця тисків між розчином

і розчинником по різні сторони напівпроникної мембрани, при якій осмос припиняється, називається осмотичним тиском. Осмос відбувається також і в тих випадках, коли напівпроникна перегородка відокремлює два розчини різної концентрації.



Напівпроникна мембрана

Рис. 1

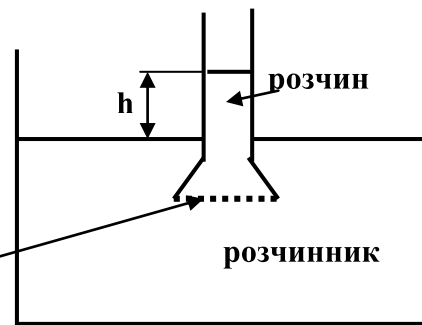


Рис. 2

Якщо, наприклад, тваринний міхур, наповнений спиртом, міцно зав'язати і опустити у воду, то він почне роздуватись і навіть може лопнути під дією сил осмотичного тиску. Якщо ж міхур заповнити водою і опустити в спирт, то, навпаки, він буде стискуватись. Справа в тому, що стінки міхура проникні для води, але непроникні для спирту. Аналогічні явища набухання і розриву оболонок спостерігаються при зануренні у воду насіння рослин, фруктів та овочів. Ними пояснюються "оживлення" пониклих квітів, опущених у воду.

Слід підкреслити, що причиною осмосу є розчинена речовина, яка ніби "всмоктує" розчинник крізь напівпроникну мембрану. З точки зору термодинаміки виникнення додаткового (осмотичного) тиску в розчині зумовлено необхідністю підвищення хімічного потенціалу молекул розчинника в зоні розчину, оскільки він знижується в присутності розчиненої речовини. А рівність хімічного потенціалу в різних частинах системи (розчинник – напівпроникна мембрана - розчин) є необхідною умовою досягнення системою термодинамічної рівноваги.

Як показує дослід, для слабких (розбавлених) розчинів величина осмотичного тиску для даної температури не залежить від природи розчинника і розчиненої речовини, а залежить тільки від молярної об'ємної концентрації останньої. Тим більше, залежність осмотичного тиску від абсолютної температури T , об'єму V , який займає розчин, маси m і молярної маси μ розчиненої речовини еквівалентна рівнянню Клапейрона-Менделєєва:

$$P_{осм} = \frac{m}{\mu} RT \frac{1}{V}, \quad (1)$$

де $R=8,31$ Дж/(моль·К) - універсальна газова стала, що вказує на ідентичність поведінки молекул розчиненої речовини в слабкому розчині з поведінкою

молекул ідеального газу. Іншими словами, осмотичний тиск відіграє роль парціального тиску розчиненої речовини в об'ємі розчину. Співвідношення (1) для осмотичного тиску розчиненої речовини носить назву закону Вант-Гоффа (1887).

При дисоціації розчиненої речовини за рахунок збільшення числа частинок, відбувається збільшення осмотичного тиску і навпаки - при групуванні молекул розчиненої речовини в певні комплекси (асоціації), осмотичний тиск зменшується.

Осмо́с відіграє важливу роль в житті рослин і тварин. Ним у значній мірі визначається розподіл води і розчинених в ній речовин у тканинах, завдяки властивості напівпроникності мембран рослинних і тваринних клітин. Величина осмотичного тиску в рослинних клітинах може досягати 2-4 атм, а інколи і 20 атм. Тільки завдяки цьому вода з ґрунту може поступати по стовбурах дерев на значну висоту. Наявність осмотичного тиску в клітинах живого організму робить їх більш пружними, здатними відновлювати свою форму і протидіяти зовнішньому тиску. В біології це, зумовлене осмосом явище, відоме як тургор клітин.

Величина осмотичного тиску крові людини складає 7-8 атм. Однак різниця осмотичних тисків крові і лімфи, а лише вона визначає перерозподіл води між лімфою і кров'ю, складає всього 0,03-0,04 атм. Взагалі, завдяки наявності складних механізмів регулювання, клітини мають лише незначно підвищений або рівний осмотичний тиск, по відношенню до внутрішніх рідин організму, що їх омивають.

Падіння осмотичного тиску в клітинах, наприклад при обезводненні організму, приводить до їх сплюснення (колапс клітин). Обезсолювання організму може привести до набухання і розриву клітин (осмотичний шок клітин). Різні кровозамінники і фізіологічні розчини підбирають таким чином, щоб вони зумовлювали осмотичний тиск, відповідний внутрішнім рідинам організму, як кажуть, були б ізотонічними або ізоосмотичними по відношенню до них.

Так званий онкотичний тиск складає частку загального осмотичного тиску і зумовлюється високомолекулярними компонентами розчину. Онкотичний тиск відіграє найважливішу роль в утворенні міжклітинної рідини, а також в фільтраційних процесах в клітинних мембранах або в стінках капілярів, наприклад при утворенні первинною сечі в ниркових нефронах та фільтрації в них крові.

Метод вимірювання

Осмотичний тиск вимірюють за допомогою осмометрів. Принцип їх дії пояснюється на рис. 2. У посудину з розчинником занурюється менша за розмірами посудина з досліджуваним розчином (осмометрична трубка), контактна поверхня якої з розчином має напівпроникну мембрану. Осмотичний тиск $P_{осм}$ розчиненої речовини викликає підвищення рівня

рідини в розчині до такої величини h , доки додатковий гідростатичний тиск в осмометричній трубці

$$\Delta P = \rho gh, \quad (2)$$

(ρ - густина розчину, $g=9,81 \text{ м}^2/\text{с}$ - прискорення вільного падіння) не компенсує осмотичний тиск

$$\Delta P = P_{осм} \quad (3)$$

Розрізняють статичний та динамічний методи вимірювань осмотичного тиску. Перший базується на вимірюванні устаткованого значення величини h , що потребує досить тривалого проміжку часу, доки перепад рівнів поверхонь розчину і розчинника встановиться остаточно. Другий метод зводиться до вимірювання швидкостей v всмоктування і видавлювання розчинника в розчин чи з нього при різних значеннях величини надлишкового гідростатичного тиску ΔP з наступною інтерполяцією одержаних даних до $v=0$ при $\Delta P = P_{осм}$. В роботі використовується статичний метод.

Головне практичне застосування осмометрії - визначення молярних мас таких хімічних сполук, які не можуть бути одержані в газоподібному стані, наприклад білків та полімерів. Застосуємо закон Вант-Гоффа для визначення молярної маси μ глюкози.

З рівності надлишкового гідростатичного (2) і осмотичного (1) тисків одержимо:

$$\rho gh = \frac{m}{\mu} RT \frac{1}{V}, \text{ звідки } \mu = \frac{m}{V} RT \frac{1}{\rho gh} \quad (4)$$

Таким чином, визначення молярної маси μ , глюкози зводиться до вимірів розчиненої маси m глюкози, об'єму V і густини ρ та температури T розчину, різниці рівнів поверхонь розчину і розчинника h .

Реальні розчини внаслідок дисоціації молекул розчиненої речовини, при відсутності зворотного процесу асоціації молекул, завжди мають осмотичний тиск $P'_{осм}$ більший, ніж осмотичний $P_{осм}$ ідеального розчину. Відношення

$$P'_{осм}/P_{осм} = r \quad (5)$$

називається осмотичним коефіцієнтом. Осмотичний коефіцієнт зростає із підвищенням концентрації розчину. Порівнюючи вирази (1) і (5), можна задати осмотичний коефіцієнт r як відношення теоретичної молярної маси μ_m до експериментальною молярної маси μ_e розчиненої речовини

$$r = \mu_m / \mu_e \quad (6)$$

Порядок виконання роботи:

1. Уважно ознайомтесь з лабораторною установкою.
2. Зважте задану викладачем масу глюкози m і розчиніть її в трубці осмометра.
3. Виміряйте різницю h рівній після того, як вона перестане змінюватись.
4. Виміряйте штангенциркулем внутрішній діаметр осмотичної трубки d і за формулою

$$V' = \frac{\pi d^2}{4} h$$

визначте додатковий об'єм V' , на який збільшиться розчин, після осмотичного всмоктування розчинника через напівпроникну мембрану. Початковий об'єм води в трубці осмометра V_0 визначається в залежності від типорозміру трубки осмометра. За формулою $V = V_0 + V'$ визначте повний об'єм розчину V .

5. За формулою

$$\rho = \frac{m}{V}$$

визначте масову концентрацію (парціальну густину) розчиненої глюкози.

6. Виміряйте за допомогою термометра температуру розчину t і перерахуйте її в температуру T за шкалою Кельвіна: $T = t + 273$.
7. За формулою (4) обчисліть молярну масу μ глюкози.
8. Порівняйте одержану молярну масу глюкози з її значенням згідно хімічній формулі ($C_6H_{12}O_6$) і, використовуючи формулу (6), визначте осмотичний коефіцієнт r .

Результати вимірювань і розрахунків занесіть до таблиці:

№	m	h	V	ρ	t	T	μ	r

Дайте відповіді на запитання:

1. Дайте визначення явища осмосу. Що таке осмотичний тиск?
2. Сформулюйте закон Вант-Гоффа.
3. Який тиск більший для даного розчину - онкотичний чи осмотичний?

Лабораторна робота № 8

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ РІДИН.

Прилади та обладнання: калориметр, вимірювальний блок, терези.

Мета роботи: вивчення законів Дюлонга-Пті та Джоуля-Коппа і застосування їх до рідин, засвоєння одного з методів визначення теплоємності рідин.

Коротка теорія і метод вимірювань

Теплоємністю тіла називається кількість теплоти, що необхідна для нагрівання його на одиницю температури. Теплоємності різних тіл, навіть якщо вони з однієї і тієї ж речовини, не однакові і залежать від мас тіл. Тому зручно користуватись питомою теплоємністю речовини, яка визначається як кількість теплоти, що необхідна для підвищення температури одиниці маси речовини на один градус (в системі SI - на 1 К). Кількість теплоти Q , що йде на нагрівання речовини масою m від температури t_1 до температури t_2 , виражається через питому теплоємність c наступним чином:

$$Q = cm(t_2 - t_1) \quad (1)$$

В системі SI питома теплоємність вимірюється в Дж/(кг·К).

У теоретичних дослідженнях частіше використовують молярну теплоємність речовини - кількість теплоти, яку потрібно для нагрівання на одиницю температури одного моля (або одного кіломоля) речовини. Таким чином, розглядаються теплоємності таких мас різних речовин, які містять однакову кількість молекул - число Авогадро. Тоді відмінності у теплоємностях будуть відбивати відмінності в будові молекул і в характері міжмолекулярної взаємодії, тобто будуть відображати відмінності в самій природі речовин, Розмірність молярної теплоємності така ж, як і розмірність універсальної газової сталої R , - $R = 8,31$ Дж/моль·К. Молярна теплоємність C пов'язана з питомою теплоємністю c через молярну масу речовини μ

$$C = \mu c \quad (2)$$

При переході системи з одного стану в інший теплоємність її змінюється. Існують процеси, які називаються політропічними, теплоємність системи в яких залишається сталою. До них відносяться, наприклад, ізобаричні, ізохорні, ізотермічні та адіабатичні процеси. Найбільше поширення здобули теплоємності при сталому тиску (C_p і c_p) та при сталому об'ємі (C_v і c_v). Слід зазначити, що при нагріванні системи в умовах $p = \text{const}$, на відміну від нагрівання в умовах $V = \text{const}$, відбувається не тільки

збільшення температури і внутрішньої енергії системи, але й здійснюється робота A на розширення системи

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (3)$$

тому завжди $C_p > C_v$ ($c_p > c_v$). Зокрема для молярних теплоємностей C_p і C_v ідеального газу $C_p = C_v + R$. Для твердих тіл або рідин, об'єм яких при нагріванні змінюється на незначну величину, приймають

$$C_p \approx C_v = C \quad (4)$$

і говорять просто про молярну теплоємність твердого тіла або рідини.

Виконаємо розрахунок молярної теплоємності кристалічних тіл для випадку, коли у вузлах кристалічної решітки тіла знаходяться одноатомні молекули, тобто для випадку хімічно простих твердих тіл, в структурі яких реалізується атомний або металічний тип зв'язку.

Атоми, що знаходяться у вузлах кристалічної решітки, здійснюють незалежні коливання у трьох взаємно-перпендикулярних напрямках. Вони мають три коливальні ступені свободи - три координати, які відповідають цим коливальним рухам. Згідно закону рівнорозподілу Больцмана, на кожен ступінь свободи системи в стані термодинамічної рівноваги припадає в середньому кінетична енергія, рівна $\frac{1}{2} \cdot kT$, де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К- стала Больцмана, T - абсолютна температура. Оскільки коливальний рух пов'язаний з постійним перерозподілом енергії в кінетичну і потенціальну її форми, і має на кожен ступінь свободи вдвічі більшу енергетичну ємність, порівняно з поступальним або обертальним рухами, то на кожен коливальний ступінь свободи приходиться і енергія вдвічі більша, тобто kT . В цілому на кожний атом кристалічної решітки припадатиме енергія $\bar{\varepsilon} = 3kT$. Внутрішня енергія U маси m кристалу становитиме

$$U = \frac{m}{\mu} N_A \bar{\varepsilon} = \frac{m}{\mu} N_A \cdot 3kT, \quad (5)$$

де $N_A = \frac{R}{k}$ число Авогадро ($N_A = 6,05 \cdot 10^{23}$ 1/моль).

Використовуючи перше начало термодинаміки

$$Q = \Delta U + A, \quad (6)$$

де Q - кількість теплоти підведена до системи, A - робота системи проти зовнішніх сил при розширенні, $\Delta U = U_2 - U_1$ - зміна внутрішньої енергії системи, а також рівняння (1)-(5) з врахуванням незначної зміни об'єму системи, а значить і можливістю знехтувати величиною A , одержимо

$$C = \mu c = \frac{\mu Q}{m(t_2 - t_1)} = \frac{\mu m(T_2 - T_1) R}{m\mu(t_2 - t_1) k} 3k = 3R \quad (7)$$

- молярна теплоємність всіх хімічно простих тіл в кристалічному стані однакова, незмінна і дорівнює трьом універсальним газовим сталим. Це твердження і є встановлений дослідним шляхом закон Дюлонга-Пті (1819).

В більш загальному випадку, коли тверде тіло є хімічною сполукою, і у вузлах кристалічної решітки знаходяться або молекули, що складаються з кількох атомів (молекулярні кристали), або полярні іони різних хімічних елементів (іонні кристали), справедливий закон Джоуля-Коппа (1864), згідно якому молярна теплоємність твердої сполуки дорівнює сумі молярних (атомних) теплоємностей елементів, з яких вона складається

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n = 3R n, \quad (8)$$

де n - число атомів в молекулі твердої сполуки.

Тепловий рух у рідинах і твердих тілах має загальний характер - він зводиться до коливального руху молекул поблизу деякого положення рівноваги. Тому закони Дюлонга-Пті і Джоуля-Коппа можуть бути застосовані і для розрахунку молярних теплоємностей рідин. Так, наприклад, молярна теплоємність води точно співпадає з розрахунковою.

Між рідкими і кристалічними тілами є багато спільного. Так в структурі рідин, хоча й не на великих відстанях, спостерігається певна періодичність у розташуванні молекул ("ближній порядок"), рідини, як і тверді тіла, зберігають свій об'єм, при кристалізації рідин їх об'єм практично не змінюється, переохолоджені рідини - аморфні тверді тіла - мають значну твердість та міцність. Теплофізичні і електричні властивості рідин близькі до їх кристалічної фази. Не даремно твердий і рідкий агрегатні стани об'єднують у єдиний термін - конденсований стан речовини.

У ветеринарії та медицині для місцевого нагрівання або охолодження застосовують нагріті чи охолоджені тіла, часто рідини. Для цієї мети вибирають порівняно доступні та ефективні речовини. Щоб протягом тривалого часу бажана дія не згасала, матеріали, що використовуються, повинні мати велику питому теплоємність. До них належать вода, парафін, грязі та ін.

Теплоємності деяких продовольчих продуктів можуть бути використані для оцінки їх якості, наприклад свіжості або жирності.

Питання про теплоємність біологічних об'єктів особливо їх вищих форм, таких як цілісний організм людини чи тварини, надзвичайно складне. Воно пов'язане з здатністю біооб'єктів до саморегуляції, зокрема терморегуляції. Крім того, біологічні об'єкти активно взаємодіють з оточуючим середовищем, що вносить значні ускладнення для визначення теплоємності об'єкта в цілому. Визначення теплоємностей окремих рідин, які є одними з основних структурних модулів організму, не викликає складнощів. Теплоємність біологічних рідин, наприклад крові, корелює з

електрофізіологічними властивостями, теплопровідністю, в'язкістю і може бути використана для експресаналізу стану організму.

Теплоємність досліджуваної рідини в даній роботі визначається шляхом порівняння кількості теплоти (енергії), яка витрачається на нагрівання фіксованої маси рідини, і виразу цієї теплоти через теплоємність.

За допомогою електронагрівача температура калориметра підвищується від вихідного початкового її значення t_1 до заданого кінцевого значення t_2 . При достатньо повільному нагріванні температура по всьому об'єму калориметра, а також по всьому об'єму досліджуваної рідини, що заповнює калориметр, однакова. Таке нагрівання здійснюють двічі: спочатку нагрівають порожній калориметр, потім - калориметр з досліджуваною рідиною. Вимірюється час нагрівання τ_1 в першому і τ_2 в другому випадку.

Рівняння теплового балансу в кожному випадку можна записати відповідно:

$$Q_1 = Q_k + q_1; Q_2 = Q_k + Q_p + q_2, \quad (9)$$

де Q_1 і Q_2 кількості теплоти, передані нагрівачем в обох випадках; Q_k - кількість теплоти, затрачена на нагрівання калориметра; Q_p - кількість теплоти, затрачена на нагрівання досліджуваної рідини; q_1 і q_2 - втрати теплоти в оточуюче середовище та теплоізоляцію в процесі нагрівання калориметра.

Враховуючи, що нагрівання в обох випадках зручно проводити при однакових потужностях струму в нагрівачу, то за законом Джоуля-Ленца можна записати:

$$Q_1 = I U \tau_1; Q_2 = I U \tau_2, \quad (10)$$

де I - сила струму та U - напруга на нагрівальній спіралі. Температура захисного кожуха калориметра під час роботи практично не відрізняється від кімнатної, внаслідок чого можна знехтувати втратами теплоти в оточуюче середовище, тобто вважати q_1 і q_2 , а тим більше їх різницю $(q_2 - q_1)$, малими порівняно з кількістю теплоти, затраченої на нагрівання досліджуваної рідини та калориметра. Тоді з (9), (10) та (1) одержимо:

$$Q_p = Q_2 - Q_1 = I U (\tau_2 - \tau_1) = cm (t_2 - t_1) \quad (11)$$

Вважаючи величину питомої теплоємності досліджуваної рідини c сталою, одержимо лінійну залежність часу нагрівання досліджуваної рідини τ_2 від різниці температур $(t_2 - t_1)$:

$$\tau_2 - \tau_1 = c \frac{m}{IU} (t_2 - t_1) \quad (12)$$

Вказана залежність може бути перевірена експериментально, якщо задати декілька послідовних значень t_2 : $(t_2)_1$, $(t_2)_2$, $(t_2)_3$, ... і виміряти відповідні їм значення τ_2 : $(\tau_2)_1$, $(\tau_2)_2$, $(\tau_2)_3$, ... питома теплоємність

досліджуваної рідини c визначається з формули (12) з врахуванням графічного усереднення вказаної залежності.

Таким чином, визначення теплоємностей досліджуваних рідин даним методом зводиться до вимірювання часів нагрівання порожнього τ_1 і заповненого τ_2 калориметра від початкової температури t_1 до заданої t_2 при фіксованій потужності нагрівання.

Установка для визначення теплоємності рідин складається з калориметра і електронно-вимірювального блока.

Калориметр призначений для нагрівання фіксованого об'єму досліджуваної рідини і являє собою латунний конічний корпус з отвором, куди за допомогою спеціального тонкостінного латунного стакана розміщується досліджувана рідина. Отвір калориметра закривається теплоізолюючою кришкою. На зовнішній поверхні латунного корпусу розміщена нагрівальна спіраль. Корпус калориметра також теплоізолюваний ззовні.

Для вимірювання температури калориметра в його корпус вмонтований напівпровідниковий датчик. Значення температури реєструються за допомогою цифрового індикатора на електронно-вимірювальному блоці.

Нагрівання спіралі калориметра здійснюється пропусканням через неї постійного струму низької напруги ($U \leq 50$ В) від джерела струму живлення, розташованого в електронному блоці. Потужність джерела живлення регулюється в межах 0-50 В ручками "Грубо" і "Точно", а також тумблером "Нагрев". Значення напруги і сила струму в колі вимірюється відповідним натисканням клавіш електронно-вимірювального блока і відображаються на цифровому індикаторі.

Час нагрівання калориметра реєструється на цифровому індикаторі, розміщеному на лицьовій панелі електронно-вимірювального блока ліворуч. Секундомір приводиться в дію клавішою "Пуск" (подвійним натисканням) Закінчення відліку часу проводиться натисканням клавіші "Сброс". Подальший пуск секундоміра здійснюється відтисканням клавіші "Сброс".

Конструкція секундоміра передбачає фіксацію значень часу на індикаторі клавішою "Стоп" без зупинки відліку часу. Стирання фіксованих значень часу здійснюється повторним натисканням клавіші "Пуск", після чого на індикаторі продовжується відлік з врахуванням часу на зупинку.

Увага!

Не вмикати електронний блок без підключення кабеля калориметра!

Порядок виконання роботи:

1. Прочитайте інструкцію до лабораторної роботи і уважно ознайомтесь з установкою.

2. Переконайтесь, що тумблери "Сеть" і "Нагрев" вимкнуті, резистори "Грубо" і "Точно" знаходяться в крайньому лівому положенні.

3. З'єднайте кабель, що йде від калориметра, з електронно-вимірювальним блоком, після чого підключіть електронно-вимірювальний блок до мережі, тумблер "Сеть" переведіть в положення "Вкл".

4. Вивчіть методику роботи з секундоміром.

5. Щільно закрийте кришку калориметра разом із порожнім стаканом для досліджуваної рідини і включіть тумблер нагріву. Ручками "Грубо" і "Точно" виставте задану викладачем напругу на нагрівальній спіралі (наближено 20-30 В). Зафіксуйте струм нагріву.

6. Виберіть значення температури t_1 (порядка 30°C) і при досягненні цієї температури калориметром включіть секундомір.

7. Проведіть серію вимірювань часу нагрівання порожнього калориметра від вихідної температури t_1 до заданої температури t_2 , причому в якості t_2 візьміть декілька (3-6) послідовних значень температури з інтервалом 2-4°C.

8. Після закінчення вимірювань виключіть нагрів, відкрийте кришку калориметра і охолодіть калориметр з стаканом нижче вихідної температури t_1 .

9. Зваживши латунний тонкостінний стакан калориметра, заповніть його досліджуваною рідиною до граничної позначки і знову зважте на терезах. Визначте масу m досліджуваної рідини в стакані.

10. Помістіть заповнений стакан в калориметр. Щільно закрийте кришку калориметра і зачекайте декілька хвилин до вирівнювання температури калориметра і досліджуваної рідини в стакані.

11. Увімкніть нагрів калориметра при тих же параметрах I і U , як і в випадку порожнього калориметра.

12. При досягненні калориметром температури t_1 увімкніть секундомір і проведіть виміри часу нагрівання до тих же значень температури t_2 , як і в пункті 7.

13. Після закінчення вимірювань приведіть установку до початкового стану. Результати вимірювань занесіть в таблицю.

14. Побудуйте графік залежності $\tau_2 - \tau_1 = f(t_2 - t_1)$ і за середнім нахилом одержаної прямої визначте згідно з формулою (12) коефіцієнт $c = \frac{IU}{m} \frac{\tau_2 - \tau_1}{t_2 - t_1}$,

а з нього і середнє значення питомої теплоємності досліджуваної рідини.

15. Виходячи з заданої викладачем молярної маси досліджуваної рідини, обчисліть молярну теплоємність і порівняйте її з законом Дюлонга-Пті або Джоуля-Копфа.

Таблиця

m	U	I	t_1	t_2	$t_2 - t_1$	τ_1	τ_2	$\tau_2 - \tau_1$

Дайте відповіді на запитання:

1. Чи може бути питома теплоємність речовини більшою за молярну теплоємність?
2. Чому теплоємності речовин при сталому тиску завжди більші за відповідні теплоємності при сталому об'ємі?
3. Сформулюйте закони Дюлонга-Пті і Джоуля-Коппа.

Лабораторна робота № 9

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

Прилади та обладнання: прилад Христіансена, комплект термометрів з перемикачем, мікроамперметр, пароутворювач, лійка і склянка для заливання води в пароутворювач, набір дисків з гуми, ебоніту та досліджуваних матеріалів.

Мета роботи: вивчення закону Фур'є та засвоєння одного з методів визначення коефіцієнта теплопровідності.

Коротка теорія і метод вимірювань

Теплопровідністю називається явище переносу енергії від більш нагрітих частин системи до менш нагрітих її частин, при умові відсутності переносу маси речовини або теплопередачі у вигляді випромінювання. Теплопровідність зумовлена безпосередньою взаємодією сусідніх мікрочастинок системи: молекули, атоми, вільні електрони, що мають більшу кінетичну енергію, передають її під час зіткнень менш швидким частинкам. Рушійною силою теплопровідності є тепловий рух, який, згідно з законами термодинаміки, призводить до вирівнювання температури в системі при її переході в рівноважний стан. Таким чином, теплопровідність завжди має місце, коли між деякими частинами виникає різниця температур.

Теплопровідність, як і всі інші потокові явища, не є рівноважним процесом, температура в різних точках системи і теплові потоки в ній весь час змінюються. Проте, якщо між будь-якими частинами однорідної системи підтримувати незмінну різницю температур ΔT , то в системі встановляться постійні (стаціонарні) потоки енергії. При цьому кількість теплоти Q , що переноситься в системі за час t через поверхню S , перпендикулярну до напрямку поширення теплового потоку, визначається законом Фур'є:

$$Q = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} S t, \quad (1)$$

де $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ - градієнт температури (різниця температур, що припадає на одиницю довжини в напрямку поширення теплового потоку); k - коефіцієнт теплопровідності речовини системи. Величина k знаходиться експериментально. Коефіцієнт теплопровідності в системі SI чисельно дорівнює кількості теплоти, що переноситься через перпендикулярну до напрямку поширення потоку поверхню площею 1 м^2 за 1 с при значенні $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ в 1 К/м . Знак "-" в рівнянні (1) показує, що теплота переноситься проти напрямку зростання температури.

Теплопровідні властивості різних речовин і матеріалів залежать від величини коефіцієнта теплопровідності, чим більший коефіцієнт теплопровідності, тим краще тіло проводить тепло. Теплопровідність твердих і рідких тіл значно більша, ніж у газів, це пояснюється більш високою інтенсивністю взаємодії між молекулами в конденсованому стані порівняно з газовим станом. Найвищу теплопровідність мають метали, зокрема срібло і мідь, - в них поряд з високою густиною речовини і відповідною інтенсивністю взаємодії між атомами, виникають додаткові теплові потоки, зумовлені переміщенням вільних електронів, свого роду "електронною конвекцією" в металічному кристалі. Найнижчою теплопровідністю характеризуються пористі тіла та вакуумовані порожнечі, які технічно реалізуються в посудині Дюара (термосі).

Життя може підтримуватись в порівняно вузькому інтервалі температур, що зумовлює, з одного боку, формування теплоізолюючої системи біологічного об'єкта, щоб енергія теплопродукції організму не розсіювалась в оточуюче середовище, з другого боку, в біоб'єкті формується тепловивідна система, для того щоб позбутися надлишку теплопродукції. Шкірний покрив тварин, до складу якого входить власне шкіра, волосяний покрив і деякі похідні шкіри, наприклад копита, поряд з іншими функціями відіграють роль термоізоляції. Складові шкіри: епідерміс, дерма і шкірна клітковина мають низький коефіцієнт теплопровідності ($0,17-0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), що зумовлює тепловий захист тварин.

Процес терморегуляції, як процес рефлекторної зміни теплопродукції і тепловіддачі організму, достатньо складний, він включає механізми хімічного і фізичного регулювання, зокрема тепло конвективно переноситься кров'ю від внутрішніх органів до легень та шкіри, при цьому коефіцієнт теплопровідності крові і м'язів у 2-3 рази перевищує коефіцієнт теплопровідності жирової клітковини. Значна кількість теплоти виводиться з організму в процесі випаровування вологи з поверхні дихальних органів або поверхні шкіри в результаті потовиділення.

Оскільки шкіра бере основну участь в теплообміні і на її частку припадає більша 70% всієї тепловіддачі, то дією на неї теплом або холодом можна впливати на теплообмін і на загальний обмін речовин, що призводить до істотного терапевтичного ефекту. Так під дією тепла посилюється потовиділення, що сприяє посиленню тепловіддачі, а також виведенню з

організму шкідливих продуктів метаболізму. Місцевий нагрів в області серця збільшує число серцевих скорочень, що тонізує серцевий м'яз. Добре відома знеболююча дія холоду, до якого вдаються при запальовальних процесах. Встановлено, що при загальних холододових подразненнях збільшується число формених елементів крові та кількість гемоглобіну, підвищується густина і в'язкість крові. В цих та деяких інших теплових методах лікування теплота передається організму шляхом теплопровідності.

Для підсилення теплового ефекту використовують речовини із значною теплоємністю і відносно невисокою теплопровідністю. Так, з врахуванням больового порогу, воду, яка має високу теплопровідність, значно підсилену конвективною складовою, використовують нагріту лише до 45°C , грязі і торф, теплопровідність яких нижча, ніж у води, нагрівають до 50°C ; парафін, церезин і озокерит, теплопровідність яких значно менша, ніж у води, - до $60-70^{\circ}\text{C}$ і навіть до 85°C . Парафін і озокерит дозволяють застосовувати досить високу температуру без ризику опіку шкіри. Крім низької теплопровідності цих речовин, такий ефект пояснюється фазовим переходом (кристалізацією) у них при температурі $36-56^{\circ}\text{C}$, який, з одного боку, підвищує час теплової дії речовини при виділенні в ній теплоти в процесі кристалізації шарів, контактуючих з шкірою, з іншого боку, збільшуючи в'язкість, гальмує перенос тепла конвекцією.

Врахування коефіцієнтів теплопровідності матеріалів активно використовується в криогенній (низькотемпературній) медицині та ветеринарії, наприклад при консервації окремих органів і тканин з метою подальшої трансплантації або при криоконсервації сперми та ембріонів. Теплопровідні властивості медичних інструментів і живих тканин узгоджуються між собою в криотерапевтичних та криохірургічних методах лікування.

Теплопровідність твердих тіл в даній роботі визначається за допомогою приладу Христіансена (рис. 1)

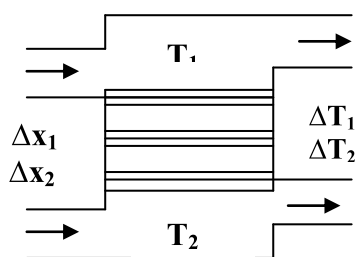


Рис. 1

Прилад складається з двох ізотермічних камер з різними температурами T_1 і T_2 , між якими розміщуються дві пластини: одна - з досліджуваного матеріалу теплопровідністю k_2 , друга - еталонна, виготовлена з матеріалу з відомим коефіцієнтом теплопровідності k_1 . Пластини щільно затискуються між камерами за допомогою спеціального гвинта. Для забезпечення кращого теплового контакту між пластинами і камерами вкладають тонкі прокладки з м'якої гуми. Температури в камерах T_1 і T_2 підтримують пропусканням через них пари від пароутворювача та водопровідної води. Різниці температур ΔT_1 та ΔT_2 вимірюються термопарами.

При невеликих товщинах еталонної та досліджуваної пластин - Δx_1 та Δx_2 , втратами теплоти через бокові поверхні пластин можна знехтувати, і, при умові сталості ΔT_1 та ΔT_2 , через обидві пластини в напрямку від

нагрівальної до холодильної камери пройде однакова кількість теплоти Q . З урахуванням, що $Q_1 = Q$ і $Q_2 = Q$, згідно з рівнянням (1), одержимо

$$Q = -k_1 \frac{\Delta T_1}{\Delta x_1} St = -k_2 \frac{\Delta T_2}{\Delta x_2} St \quad (2)$$

Звідки:

$$k_2 = k_1 \left[\frac{\Delta T_1}{\Delta x_1} \right] / \left[\frac{\Delta T_2}{\Delta x_2} \right] \quad (3)$$

Поскільки ЕРС і сили струму в термопарах пропорційні різницям температур в спаях, то замінивши відношення $\Delta T_1 / \Delta T_2$ на I_1 / I_2 , де I_2 - сила струму в термопарі, спаї якої контактують з вхідною і вихідною поверхнями досліджуваної пластини; I_1 - сила струму в термопарі, спаї якої розміщені на поверхнях еталонної пластини, одержимо остаточно:

$$k_2 = \frac{I_1}{I_2} \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} k_1 \quad (4)$$

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтесь з установкою.
2. Наповніть пароутворювач водою і загвинтіть кришку. Перевірте щільність з'єднання патрубків нагрівальної камери з вхідним і вихідним шлангами.
3. Перевірте надійність з'єднань охолоджувальної камери та міцність кріплення зливного шлангу.
4. Підготуйте установку до вимірювань, для чого на нижню, охолоджувальну камеру поверх гумової прокладки накладіть спочатку еталонну ебонітову пластинку, а потім після нової гумової прокладки, накладіть пластинку з досліджуваного матеріалу і, знову після прокладки, встановіть нагрівальну камеру. На верхній і нижній поверхні досліджуваної і еталонної пластин розмістіть спаї термопар. Затисніть пластинки між камерами гвинтом. Перевірте нульове положення стрілки мікроамперметра на обох термопарах.
5. Злегка відкрийте кран подачі води в охолоджувальну камеру, так щоб із зливного шлангу вода витікала тонким струменем.
6. Ввімкніть в мережу пароутворювач і, дочекавшись закіпання, зробіть витримку 3-6 хвилин, доки не встановиться стаціонарний тепловий потік в системі, при цьому сили струмів в кожній термопарі перестануть змінюватись і набудуть фіксованих значень.
7. Запишіть показання мікроамперметра в колі термопар на пластині з досліджуваного матеріалу I_2 та показання мікроамперметра в колі термопар на еталонній (ебонітовій) пластині I_1 .

б. Вимкніть пароутворювач, закрийте кран подачі води в охолоджувальну камеру. Відпустіть затискний гвинт і розберіть "теплопровідну лінію". Виміряйте мікрометром товщину досліджуваної та еталонної пластин - Δx_2 і Δx_1 .

9. Враховуючи, що коефіцієнт теплопровідності ебоніту $k_1=0.174$ Вт/(м·К), обчисліть за формулою (4) коефіцієнт теплопровідності матеріалу досліджуваної пластини k_2 .

Результати вимірювань та розрахунків занесіть до таблиці:

Δx_1	Δx_2	I_1	I_2	k_1	k_2

Дайте відповіді на запитання:

1. Який основний закон покладено в основу роботи?
2. Чому в даному методі вимірювань діаметри пластин мають бути значно більшими за їх товщину?
3. Чому нагрівальна камера знаходиться зверху?

Лабораторна робота № 10

ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Прилади та обладнання: тангенс-гальванометр, міліамперметр на 25 мА, джерело постійного струму, двополюсний перемикач, масштабна лінійка, реостат на 200 Ом.

Мета роботи: засвоїти один з методів вимірювання напруженості магнітного поля.

Коротка теорія і метод вимірювань

Земля являє собою величезний магніт, полюси якого розміщені біля географічних полюсів: південний магнітний полюс S - біля північного географічного, північний магнітний полюс N - біля південного географічного. Силкові лінії магнітного поля Землі поблизу екватора спрямовані горизонтально, а біля магнітних полюсів їх напрямок майже вертикальний. В інших точках земної поверхні вони йдуть під деяким кутом до горизонту. Вектор напруженості магнітного поля \mathbf{H} в довільній точці спрямований по дотичній до силової лінії. Величину проекції напруженості земного магнітного поля \mathbf{H}_z на горизонтальну площину називають горизонтальною складовою магнітного поля Землі H_T .

Ще зовсім недавно вважали, що точне значення величин, які характеризують магнітне поле Землі, необхідне тільки в практиці водіння кораблів. Проте дослідження останніх років довели, що магнітне поле Землі впливає і на живі організми. Тому вміння визначати характеристики магнітного поля Землі стає необхідним і при розв'язанні практичних задач.

В даній роботі проводиться вимірювання тільки горизонтальної складової напруженості поля Землі із застосуванням тангенс-гальванометра.

Тангенс-гальванометр являє собою плоску вертикальну котушку радіусом r з відомим числом витків n (90-180 витків). В центрі котушки в горизонтальній площині розташований компас. Магнітна стрілка компасу у відсутність струму в котушці встановлюється уздовж магнітного меридіана. Поворотом котушки навколо вертикальної осі можна досягти суміщення площин котушки і магнітного меридіана. Якщо в цьому положенні котушки пропускати через неї постійний струм, то її магнітне поле, яке направлене перпендикулярно до площини котушки, складеться з магнітним полем Землі, і стрілка повернеться на деякий кут α . На магнітну стрілку діють два взаємно перпендикулярних поля, а отже, і дві сили, що відповідні горизонтальній складовій напруженості поля Землі H_G та магнітному полю котушки зі струмом H_T , як це показано на рис. 1. Під дією цих полів магнітна стрілка встановиться за напрямком їх рівнодіючої.

Напрямок вектора напруженості магнітного поля котушки зі струмом визначається за правилом правого буравчика. Із рис. 1 випливає, що

$$\operatorname{tg}(\alpha) = H_T / H_G \rightarrow H_G = H_T / \operatorname{tg}(\alpha) \quad (1)$$

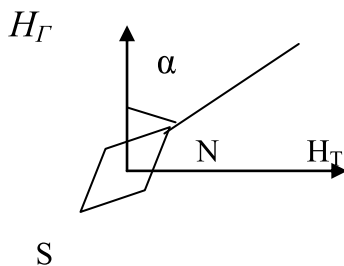


Рис. 1

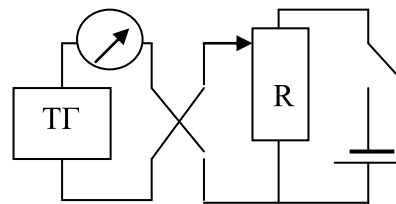


Рис. 2

Величина напруженості магнітного поля в центрі кругового витка з струмом, обчислюється за формулою, яке випливає із закону Біо-Савара-Лапласа:

$$H'_T = I / (2r), \quad (2)$$

де I - сила струму у виткові (А); r - радіус витка (м). Котушка має n витків, тому напруженість її поля в n разів більша

$$H_T = nH'_T = I n / (2r) \quad (3)$$

Підставивши значення H_T із (3) в (1), одержимо робочу формулу:

$$H_T = I n / (2r \operatorname{tg} \alpha) \quad (4)$$

Напруженість магнітного поля в системі SI вимірюється в амперах на метр (А/м).

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть електричне коло за схемою (рис.2). При цьому тангенс-гальванометр встановлюйте якомога далі від інших приладів та феромагнітних матеріалів, щоб уникнути їх впливу на магнітну стрілку.

2. Повертаючи тангенс-гальванометр, встановіть площину котушки в площині магнітного меридіана так, щоб кінець стрілки співпадав з нульовою поділкою шкали компасу.

3. Встановіть повзунок потенціометра в положення, що відповідає мінімальній напрузі, яка знімається з нього. Переміщуючи повзунок потенціометра в бік збільшення напруги, підберіть такий струм у котушці, щоб відхилення магнітної стрілки було не менше $10-20^\circ$. Коли стрілка компасу прийде в рівновагу, відрахуйте за шкалою кут відхилення стрілки α_1 і запишіть силу струму I .

4. Зберігаючи силу струму I , змініть перемикачем його напрямок на протилежний і виміряйте величину відхилення стрілки в протилежний бік - кут α_2 . За кутами α_1 і α_2 знайдіть середнє значення кута відхилення a .

5. Двічі змініть положення повзунка на потенціометрі в бік збільшення напруги і виміряйте відхилення стрілки при двох збільшених значеннях струму у котушці.

6. Виміряйте міліметровою лінійкою середній радіус витків котушки r .

7. Підставляючи послідовно середні значення a і I в формулу (4), знайдіть три значення H_T .

Результати вимірювань і розрахунків подайте в таблиці, знайдіть похибки вимірювань.

№	I	α_1	α_2	a	$\operatorname{tg} (a)$	H_i	ΔH_i
Середні значення:							

Дайте відповіді на запитання:

1. Які властивості магнітного поля Землі?
2. Які Вам відомі гіпотези про походження магнітного поля Землі?
3. Чому магнітна стрілка тангенс-гальванометра має малі розміри ?
4. Чому вимірювання краще проводити при кутах відхилення, близьких до 45° ?

Лабораторна робота № 11

ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОЕЛЕМЕНТА

Прилади та обладнання: термопари, гальванометр, дві посудини з водою, два термометри, електронагрівач.

Мета роботи: засвоїти метод вимірювання температури за допомогою термопари.

Коротка теорія та метод вимірювань

Вільні електрони, що знаходяться у металі в стані хаотичного руху, утримуються всередині металу електромагнітними силами. Для виходу електрона із металу треба затратити енергію і виконати за її рахунок роботу A , що зветься роботою виходу електрона з металу. Її величина визначається природою даного хімічного елемента і, як наслідок, структурою кристалу. При контакті двох різних металів електрони в результаті теплового руху переходять із одного металу в інший і зворотно в різних кількостях. Кількість електронів, що перетинають межу розділу в одиницю часу, залежить від роботи виходу і концентрації електронів в одиниці об'єму n кожного з контактуючих металів.

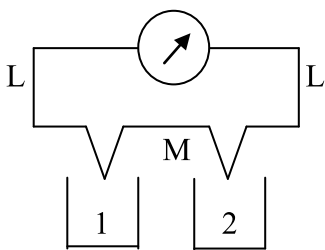


Рис.1

У різних металів величини A і n різні, тому перехід електронів через контактний шар відбувається в більшій кількості від металу з меншою роботою виходу та з більшою концентрацією вільних електронів. При цьому провідник з надлишком електронів набуває негативного потенціалу, а інший, що втратив частину електронів, - позитивного. Електричне поле, що виникає при цьому, сповільнює процес переходу електронів від одного металу до іншого і призводить до рівноважного стану, при якому потоки електронів в обох напрямках вирівнюються. Різниця потенціалів, що з'являється між металами,

називається контактною різницею потенціалів. Величина її залежить від температури контакту.

Якщо скласти замкнуте коло із двох спаяних кінцями (рис.1) різнорідних металів L і M, яке називають термопарою, то в місцях спаїв 1 і 2 виникають протилежні за знаком контактні різниці потенціалів, відповідно U_1 і U_2 . При однакових температурах спаїв $T_1 = T_2$ контактна різниця потенціалів у спаях 1 і 2, однакова за величиною і сумарна різниця потенціалів $U_1 - U_2$ дорівнює нулю. А при наявності різниці температур в спаях, коли один спай витримується при температурі T_1 , а другий - при температурі T_2 , контактні різниці потенціалів в спаях відрізняються за величиною і в колі виникає ЕРС (термоелектрорушійна сила) E

$$E=U_1-U_2 \quad (1)$$

Термоелектрорушійна сила E залежить від роду контактуючих металів та температури. В першому наближенні величина E пропорційна різниці температур в спаях

$$E=a(T_1-T_2) \quad (2)$$

де a - так званий коефіцієнт термоелектрорушійної сили (величина термоЕРС, що виникає при різниці температур в спаях рівній одиниці температури).

Співвідношення (2) справедливе для деяких термоелементів тільки у вузькому інтервалі температур, тому що величина a взагалі залежить від температури. В даному інтервалі температур коефіцієнт a називають сталою термопарою.

При наявності термоЕРС в замкнутому колі виникає термоелектричний струм I , величина якого визначається за законом Ома:

$$I=E/(R+r), \quad (3)$$

де R - зовнішній опір кола; r - опір термопарою.

Як бачимо з (3), сила струму в гальванометрі пропорційна термоЕРС, а остання пропорційна різниці температур її спаїв. На цій залежності ґрунтується термоелектричний метод вимірювання температури, який полягає у вимірюванні сили струму I в термопарі, визначенні термоЕРС в колі E і розрахунку невідомої температури, наприклад T_1 , в одному з спаїв, коли температура іншого спаю (T_2), а також стала термопарою a відомі.

Для цього термоелемент має бути заздалегідь проградуєований – мати відоме значення a . Результати градуєвання часто зображають у вигляді графіка залежності термоЕРС, як функції різниці температур ΔT в спаях:

$$E = f(\Delta T) \quad (4)$$

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть установку за схемою (рис.1). Перевірте рівність температур в спаюх термопари (води в посудинах) термометрами. При рівності температур стрілка гальванометра має бути на нульовій позначці.

2. Увімкніть електронагрівач, розміщений в одній з посудин, при цьому температура води в посудині (і даного спаю термопари) буде зростати, температура води в іншій посудині (і спаю в ній практично не змінюється. Температури в посудинах контролюються термометрами.

3. Через кожні 2°C нагрівання спаю термопари за відхиленням стрілки гальванометра виміряйте струм у колі (ціна поділки вказана на приладі). Максимальна температура нагрівання (близько 60-70°C) визначається межами шкали гальванометра.

4. Вимкніть електронагрівач і за формулою (3) визначте термоЕРС E для одержаних значень струму I . Опір термопари $r=1,5$ Ом. Величина опору R позначена на гальванометрі.

На основі дослідних даних побудуйте графік залежності $E = f(\Delta T)$. За нахилом графіка визначте величину a згідно з (2) як кутовий коефіцієнт нахилу графіка до осі температур.

Результати вимірювань і розрахунків подайте в таблиці:

№	T_1	T_2	ΔT	I	E	a
1						
2						
...						
10						

Дайте відповіді на запитання:

1. Назвіть причини появи контактної різниці потенціалів.
2. Які переваги і недоліки мають термоелементи в порівнянні зі звичайними термометрами?

Лабораторна робота № 12

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОКІНЕТИЧНИХ ЯВИЩ В РОЗЧИНАХ ЕЛЕКТРОЛІТІВ

Мета роботи: вивчити фізичні процеси при протіканні електрокінетична явищ в розчинах електролітів; ознайомитись з методикою визначення рухливості іонів.

Прилади та обладнання: джерело сталої напруги 150-200 В, електролітичні кювети, стрічки фільтрувального паперу, водні розчини NaCl і $KMnO_4$, масштабна лінійка, секундомір, вольтметр.

Коротка теорія і метод вимірювань

Електрокінетичними називаються явища, що відбуваються в гетерогенних (неоднорідних) дисперсних системах. Суть цих явищ полягає в рухові одного компонента рідини відносно другого під дією зовнішнього електричного поля або у виникненні різниці потенціалів між різними шарами розчину в результаті переміщення компонентів розчину під дією зовнішніх пондеромоторних (діючих на кожен частинку компонента) сил.

До електрокінетичних явищ відносяться: електрофорез - рух в рідині завислих твердих частинок, крапель рідини іншої природи або газових пухирців під дією зовнішнього електричного поля; електроосмос - рух рідини через капіляри, або мембрани під дією зовнішнього електричного поля; ефект Дорна - виникнення в розчині різниці потенціалів між шарами рідини за напрямком осідання в ній завислих твердих частинок в полі тяжіння або в центрифугах; виникнення різниці потенціалів між кінцями капілярів або між поверхнями мембран при проштовхуванні розчину через них зовнішнім тиском.

В даній роботі вивчається електрофорез.

В розчині електроліту за допомогою джерела струму утворюється однорідне електричне поле. Якщо розчин має малу концентрацію, то швидкість руху іонів v в цьому полі пропорційна величині напруженості поля E ,

$$v = bE, \quad (1)$$

де b - коефіцієнт пропорційності, який називається рухливістю носіїв електрики. Рухливість іонів чисельно дорівнює швидкості, що її надає іонові напруженість поля в 1 В/м:

$$b = v/E \quad (2)$$

Для визначення рухливості іонів краплю насиченого розчину марганцевокислого калію - $KMnO_4$ наносять на стрічку фільтрувального паперу, змочену розчином солі NaCl малої концентрації. Стрічка фіксується на підставці П, а її кінці занурюються в кювети K_1 і K_2 з розчином NaCl. Електроди E_1 і E_2 з'єднуються з джерелом сталої напруги 150-200 В. Під дією електричного поля іони K^+ і MnO_4^- переміщуються в розчині, що змочує стрічку.

Вважаючи рух іонів рівномірним, знайдемо їх швидкість:

$$v = l/t, \quad (3)$$

де l - відстань, пройдена іоном протягом часу t .

Напруженість однорідного електричного поля E в стрічці становить

$$E=U/d, \quad (4)$$

де U - різниця потенціалів, а d - відстань між електродами.

Підставляючи вирази (2), (3), (4) в (1), одержимо розрахункову формулу для визначання рухливості іонів:

$$b= l \cdot d / (U \cdot t) \quad (5)$$

Електрофорез використовується для розділу білкових фракцій сироватки крові, які мають різну електрофоретичну рухливість. Електрофоретичні дослідження складу білкових фракцій сироватки крові великої рогатої худоби допомагають при діагностиці ряду захворювань, а також застосовується в практичній ветеринарії та медицині як терапевтичний засіб.

Порядок виконання роботи:

1. Зібрати коло за схемою рис. 1.

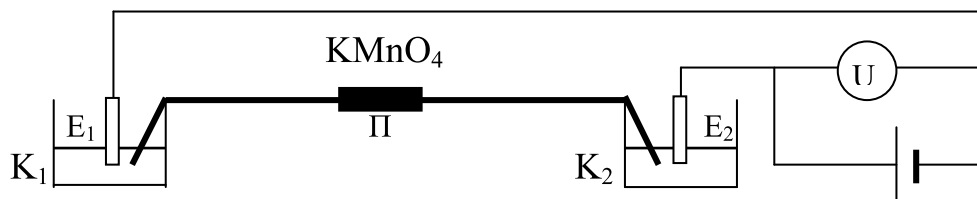


Рис.1

2. Налити в кювети K_1 і K_2 електроліт (розчин NaCl).
3. Виміряти відстань між електродами d .
4. Змочити стрічки фільтрувального паперу (розміром 1 см X 20 см) в електроліті та покласти на підставку П. Нанести краплю досліджуваної рідини (розчин KMnO_4) діаметром 3-5 мм на фільтрувальний папір, та накрити стрічку прозорою кришкою, для запобігання висиханню електроліта.
5. Ввімкнути струм і секундомір.
6. Через 10 хвилин вимкнути струм, зняти кришку. На фільтрувальному папері виміряти відстань, на яку перемістилась границя краплі досліджуваного розчину в напрямку позитивного полюса джерела напруги.
7. Повторити дослід, змінивши полярність накладеної напруги, і визначити рухливість іонів за формулою (5).

Результати вимірювань та розрахунків занести до таблиці:

№	d	l	t	U	E	b	Δb
Середні значення:							

Дайте відповіді на запитання:

1. Як зміниться швидкість та рухливість іонів, якщо різницю потенціалів U між електродами збільшити у 2 рази?
2. Як зміниться швидкість та рухливість іонів, якщо відстань між електродами d збільшити у 2 рази ?
3. Як зміниться швидкість та рухливість іонів, якщо їх заряд збільшився б у 2 рази?

Лабораторна робота № 13

ВИЗНАЧЕННЯ ІМПЕДАНСУ ЖИВОЇ ТКАНИНИ

Прилади та обладнання: електронний осцилограф, набір еквівалентних схем.

Мета роботи: вивчення залежності імпедансу живої тканини від частоти змінного струму за допомогою еквівалентних схем.

Коротка теорія і метод вимірювань

При проходженні змінного струму через активний опір - електричний опір, в якому під дією струму виділяється тепло - зміна напруги на ньому відбувається синхронно з зміною струму, кажуть, що напруга U і струм I змінюються в однаковій фазі. Причому за законом Ома $U = I \cdot R$. При проходженні змінного струму через індуктивність L , або ємність C спостерігається не співпадання характеру зміни напруги і сили струму в них: на індуктивності напруга випереджає силу струму на чверть періоду, що відповідає зсуву фаз між ними на $\pi/2$ рад (90°); на ємності напруга відстає від сили струму на чверть періоду (зсув фаз $-\pi/2$ рад). Причому між амплітудними значеннями напруги і сили струму справедливі співвідношення: для індуктивності - $U = \omega L \cdot I$; для ємності - $U = I / \omega C$. де ω - циклічна частота струму. Тобто величини $X_L = \omega L$ і $X_C = 1 / \omega C$ виступають відповідно як індуктивний та ємнісний опори. Величини X_L та X_C називають реактивними опорами - на них не виділяється тепло при проходженні струму.

При одночасному існуванні в провіднику або на ділянці кола активної і реактивних складових опору, вводять поняття комплексного опору або

імпедансу Z , який знаходиться за правилом векторного додавання опорів R , X_L , X_C з врахуванням зсуву фаз між ними:

$$Z = (R^2 + X^2)^{1/2} = (R^2 + (X_L - X_C)^2)^{1/2} = (R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2)^{1/2} \quad (1)$$

Відношення реактивного опору $X = X_L - X_C$ до активного опору R задає зсув фаз φ сили струму по відношенню до напруги на провіднику чи ділянці кола

$$\operatorname{tg} \varphi = X/R \quad (2)$$

Живі тканини складаються з клітин, що омиваються міжклітинною рідиною. Цитоплазма клітин і міжклітинна рідина являють собою електроліти, відокремлені клітинною оболонкою, яка має досить слабку електропровідність. Така система зумовлює електроємності властивості як статичного, так і поляризаційного характеру. Поляризаційна ємність - результат електрохімічної поляризації, що виникає при проходженні постійного електричного струму через електроліт. Вона залежить від сили струму і часу його протікання. За сучасними уявленнями живі тканини не мають індуктивності, і їх опір зумовлюється лише активною та ємною складовими.

При проходженні змінного струму через живі тканини спостерігається дисперсія електропровідності: опір зростає із зменшенням частоти струму до деякої максимальної величини Z_{max} і наближається до деякого мінімального значення Z_{min} при зростанні частоти, рис.1.. Дисперсія електропровідності живої тканини є результатом залежності ємного опору від частоти змінного струму, а також впливу поляризаційної ємності, яка при низьких частотах проявляється сильніше і зменшується із зростанням частоти. Дисперсія електропровідності характерна тільки для живих тканин. З відмиранням тканини крутизна кривої зменшується. На рис.2 наведена залежність опору ділянки живої тканини від частоти при відмиранні: 1 - жива тканина; 2 - ушкоджена тканина; 3 - мертва тканина. Сьогодні у зв'язку з розвитком трансплантаційної хірургії та пошуками методів визначення якості

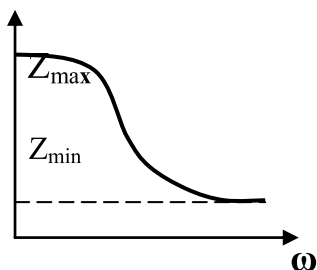


Рис. 1

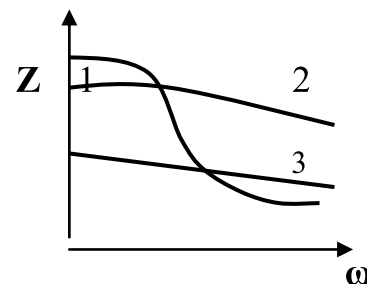


Рис. 2

консервованих тканин електропровідність використовується як один із тестів життєздатності консервованої шкіри, кістки, рогиці і т.і.

Іншим проявом реактивних властивостей опору живої тканини є наявність зсуву фаз між силою струму та напругою. У ділянці кола, що містить активний R та ємносний X_C опори, кут зсуву фаз знаходиться в інтервалі від 0 до 90° . Для біологічних об'єктів характерний великий кут зсуву фаз, що вказує на значну частку ємносного опору в повному опорі (імпедансі). Для шкіри людини при частоті 1000Гц кут зсуву фаз дорівнює 55° .

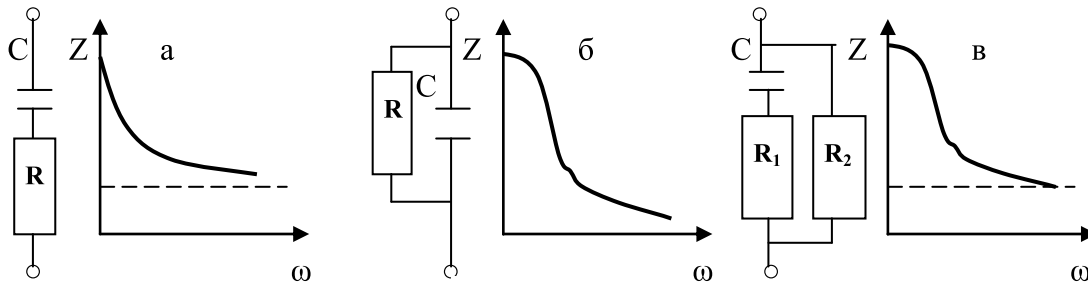


Рис. 3

Імпеданс живої тканини можна моделювати зеквівалентних схем.

Імпеданс живої тканини можна моделювати за допомогою еквівалентних схем. На рис.3 наведені три такі схеми /а-в/ і вказані графіки залежності імпедансу $Z(\omega)$ від циклічної частоти ω для даних схем. Найбільш близька до живої тканини є залежність для схеми “в”.

З одержаного на екрані осцилографа еліпса можна визначити зсув фаз між силою струму і напругою для об'єкта вимірювання. Як відомо, еліпс

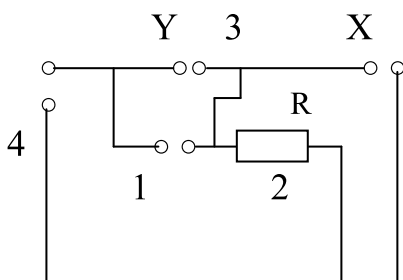


Рис. 4

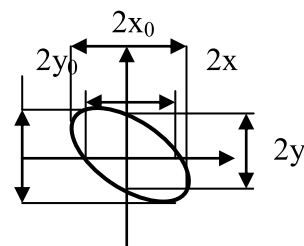


Рис. 5

одержується в результаті складання двох взаємно перпендикулярних гармонійних коливань однакової частоти, що точно відповідає схемі даної роботи.

Структурна схема установки, що використовується для вимірювання імпедансу, зображена на рис.4. До клем 1 підключають по чергово кожну з еквівалентних схем або біологічний об'єкт, імпеданс Z , яких необхідно визначити. В даній роботі частотна характеристика знімається з ділянки шкіри передпліччя людини, на яке накладаються електроди. Послідовно з об'єктом вимірювання Z підключається додатковий резистор 2 - R_0 , опір

якого має тільки активну складову R . Напряга з вимірюваного об'єкта U_Z подається на Y -пластини осцилографа 3. Напряга з додаткового резистора U_R подається на X -пластини осцилографа. Так як Z і R з'єднані послідовно, то сила струму I в них однакова.

За законом Ома $U_Z=IZ$ і $U_R=IR$, звідки

$$Z = RU_Z/U_R \quad (1)$$

В якості джерела живлення береться звуковий генератор 4, який дозволяє змінювати частоту ν вихідної напруги. При подачі напруги заданої частоти в коло на екрані осцилографа одержуються зображення еліпса (рис. 5), що є результатом складання двох ортогональних коливань U_Z і U_R однакової частоти і певного зсуву фаз φ між ними.

Рівняння еліпса при довільній його орієнтації відносно координатних осей має вигляд:

$$\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} - 2 \frac{xy}{x_0 y_0} \cos \varphi = \sin^2 \varphi, \quad (2)$$

де x_0 і y_0 - амплітуди коливань світлової плями на екрані осцилографа за відповідними осями координат, φ - зсув за фазою коливання по осі "y" відносно коливання по осі "x". Легко визначити, що при $x=0$ та $y=0$:

$$\sin \varphi = x/x_0|_{y=0} = y/y_0|_{x=0} \quad (3)$$

Вираз (1) для імпеданса об'єкта можна подати наступним чином:

$$Z = R(y_0 S_y) / (x_0 S_x), \quad (4)$$

де амплітуди напруг U_Z і U_R виражені через амплітуди y_0 і x_0 та через чутливості осцилографа по осям S_y і S_x . Чутливість осцилографа по відповідній осі визнається зміною напруги (на відповідних пластинах розгортки конденсаторів — вертикальних або горизонтальних), що зумовлює зміщення світлової плями на екрані осцилографа на одиницю довжини шкали екрана.

Порядок виконання роботи:

1. Підключіть до клем 1 еквівалентну схему "а".
2. Увімкніть звуковий генератор і осцилограф
3. Визначте чутливості S_y і S_x електронного осцилографа.
4. Встановіть на звуковому генераторі частоту 50 Гц і добийтесь на екрані осцилографа зображення еліпса.
5. Проведіть 6-12 вимірів величин $2x_0$ і $2y_0$ на різних частотах в межах 50-5000 Гц.

6. Використовуючи відомий опір R , за формулою (4) обчисліть імпеданс схеми.

7. Результати вимірювань і обчислень занесіть до таблиці (скласти самостійно).

8. Повторіть вимірювання для схем “б” і “в” .

9. За одержаними даними побудуйте графіки залежності імпедансу від частоти для всіх трьох схем.

10. Накладіть електроди на передпліччя. Під електроди підкладіть марлеві серветки, змочені фізіологічним розчином.

11. Встановіть вихідну напругу генератора 4 В і проведіть виміри, вказані в пп. 4-7,9.

12. Порівняйте одержані графіки і виберіть еквівалентну схему, що найбільш точно моделює живу тканину.

13. Для двох частот в межах від 100 до 1000 Гц виміряйте x і y і за формулою (3) обчисліть два значення зсуву фаз між силою струму та напругою для живої тканини.

№	S_x	S_y	ν	x_0	y_0	x	y	R	Z	$\sin\varphi$

Дайте відповіді на запитання:

1. Що таке дисперсія електропровідності і чим вона зумовлена?
2. Що означає незалежність імпедансу від частоти струму?
3. При зменшенні частоти струму в два рази імпеданс провідника зріс вдвічі. Як змінився ємнісний опір провідника?

Лабораторна робота № 14

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗЧИНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕФРАКТОМЕТРА

Прилади та обладнання: рефрактометр, розчини цукру у воді невідомої концентрації, піпетка, фільтрувальний папір, таблиця для визначення концентрації цукру за показником заломлення розчину.

Мета роботи: засвоїти один із методів визначення концентрації розчинів.

Коротка теорія і метод вимірювань

При переході променя світла із одного середовища в інше справедливий закон заломлення світла: відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величина стала для двох даних середовищ і називається показником заломлення другого середовища відносно першого:

$$n_{21} = \sin \alpha / \sin \beta \quad (1)$$

Відносний показник заломлення n_{21} може бути виражений через абсолютні показники заломлення n_2 та n_1 , які визначають заломлення світла в даному середовищі відносно вакууму:

$$n_{21} = n_2 / n_1 \quad (2)$$

Показники заломлення n_{21} , n_2 , n_1 зв'язані з швидкостями світла у вакуумі (c) та в даних середовищах (v_2 та v_1):

$$n_{21} = v_2 / v_1; \quad n_2 = c / v_2; \quad n_1 = c / v_1 \quad (3)$$

Показник заломлення n є важливою характеристикою рідини, пов'язаною з хімічною структурою її молекул і концентрацією досліджуваного розчину.

Для швидкого і зручного визначення показника заломлення рідин і для визначення концентрації розчинів за їх показником заломлення використовуються спеціальні прилади - рефрактометри. Принцип дії одного із типів рефрактометрів базується на явищі повного внутрішнього відбивання, яке має місце при переході світла із середовища оптично більш густого (з більшим абсолютним показником заломлення) в середовище оптично менш густе (з меншим абсолютним показником заломлення) – $n_1 > n_2$.

При використанні формули (1) і співвідношень (2) та (3) для цього

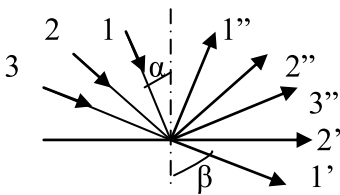


Рис. 1

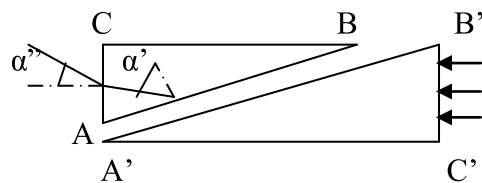


Рис. 2

випадку $n_{21} < 1$, а тому кут заломлення β більший за кут падіння α . При малих кутах падіння (промінь 1 на рис.1.) на межі двох середовищ формуються два промені - заломлений $1'$ і відбитий $1''$. При збільшенні кута падіння завжди знайдеться такий кут падіння (промінь 2), при якому заломлений промінь $2'$ ковзає по межі розділу середовищ. При збільшенні кута падіння (промінь 3) заломленого променя $3'$ взагалі немає, а інтенсивність відбитого променя (промінь $3''$) дорівнює інтенсивності падаючого променя - виникає повне внутрішнє відбиття. Промінь 2 і відповідний йому кут падіння α_{cp} визначають межу між звичайним ходом променя (із виникненням заломленого і відбитого променів) і повним

внутрішнім відбиванням – вони так і називаються граничним променем і граничним кутом повного внутрішнього відбивання. При відомому показнику заломлення n_{21} з формули (1) можна обчислити α_{cp} , якщо в (1) підставити $\beta=90^\circ$. Тоді:

$$\sin \alpha_{cp} = n_{21} \quad (4)$$

При пропусканні променя із другого середовища в перше можна застосувати принцип зворотності променів: променю з кутом падіння 90° відповідає в більш густому середовищі заломлений промінь з кутом заломлення, що дорівнює α_{cp} .

Основними частинами рефрактометра є дві призми (рис. 2), виготовлені з скла флінтглас з великим показником заломлення $n = 1,72$. Між призмами вводять 2-3 краплі досліджуваної рідини, яка розпливається в тонкий шар при з'єднанні призм. Пучок світлових променів від дзеркальця, пройшовши через грань $B'C'$ освітлювальної призми, падає на грань $A'B'$, що торкається рідини. Грань $A'B'$ - матова, тому вона розсіює світло в рідині за всіма напрямками, і промені падають на грань AB вимірювальної призми ABC під різними кутами. Найбільший можливий кут падіння цих променів не перевершує 90° , а тому всередині призми ABC не може бути променів з кутами заломлення більше, ніж граничний кут α' , а на виході із призми немає променів з кутами заломлення більше, ніж α'' . При розгляданні грані під кутом $a > \alpha''$ вона темна, а при $a < \alpha''$ світла. Підбираючи положення окуляра, при якому частину грані AC видно під кутом $a > \alpha''$, а другу - під кутом $a < \alpha''$, одержуємо границю світла і тіні в центрі поля зору. Для цього треба повертати трубу на певний кут по секторній шкалі, на якій нанесені значення показника заломлення. Для зручності відліку за цією шкалою над нею розміщений окуляр-лупа.

Промені, що пройшли в трубу через об'єктив за допомогою дзеркальця, спрямовуються вздовж осі зорової труби в око спостерігача. Для променів із різною довжиною хвилі показники заломлення різні, тому границя світла і тіні різнокольорові. Для одержання різкої границі світла і тіні в нижній частині зорової труби встановлена призма прямого зору /компенсатор/, з'єднана з накотним кільцем і гвинтом.

Рефрактометри цього типу можуть мати різні конструктивні виконання, але принцип їх дії має одну і ту ж основу.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтесь з будовою приладу.
2. Звільніть затискач, що кріпить призми, опустіть нижню призму, протріть їх поверхню фільтрувальним папером, змоченим дистильованою водою. Підійміть нижню частину камери з призмою, закріпіть затискач і, користуючись дзеркалом, спрямуйте пучок світла через віконце на грань нижньої призми.

3. Спостерігаючи за полем зору в трубу, переміщенням дзеркальця добийтесь різкого зображення перетину ниток. Усуньте різнокольоровість світла і тіні, повертаючи гвинт компенсатора (праворуч від об'єктиву). .

4. Опустіть нижню призму, нанесіть на неї піпеткою 2-3 краплі дистильованої води і підійміть призму. Зніміть контрольний відлік показника заломлення води ($n = 1.33299$).

5. Опустіть нижню призму, протерши її досуха, нанесіть піпеткою кілька крапель одного з досліджуваних розчинів цукру на грань призми, щільно зачиніть камеру і, повертаючи лівою рукою гвинт на секторній шкалі, змінюйте кут повороту доти, доки границя світла і тіні не стане на перетині ниток у полі зору. Після цього зніміть відлік показань приладу, користуючись окуляром на секторній шкалі.

6. Знайдіть показники заломлення для інших розчинів. Для цього виконайте три вимірювання, кожний раз промиваючи призми дистильованою водою і витираючи їх досуха.

7. Результати вимірювань запишіть у табл.1, визначте середнє значення показника заломлення і за ним знайдіть в табл.2 відповідну концентрацію розчину c .

Таблиця 1

Розчин	n_1	n_2	n_3	n_{cp}	c
1					
2					

Таблиця 2

Співвідношення між показником заломлення n та концентрацію розчину цукру c .

n	$c, \%$	n	$c, \%$	n	$c, \%$
1,33299	0,00	1,33599	2,07	1,33894	4,10
1,33349	0,34	1,33649	2,42	1,33944	4,42
1,33399	0,90	1,33698	2,76	1,33993	4,76
1,33449	1,04	1,33747	3,09	1,34042	5,10
1,33499	1,39	1,33796	3,42	1,34091	5,43
1,33549	1,73	1,33845	3,76	1,34140	5,76
1,34190	6,09	1,34726	9,63	1,35254	13,03
1,34239	6,42	1,34774	9,94	1,35302	13,33
1,34288	6,75	1,34822	10,25	1,35350	13,65
1,34337	7,07	1,34870	10,57	1,35398	13,94
1,34385	7,39	1,34918	10,88	1,35446	14,24
1,34434	7,71	1,34966	11,19	1,35494	14,55
1,34483	8,04	1,35014	11,50	1,35541	14,84
1,34532	8,36	1,35062	11,80	1,35589	15,14
1,34581	8,68	1,35111	12,11	1,35636	15,43
1,34630	9,01	1,35158	12,41	1,35683	15,72
1,34678	9,32	1,35206	12,72	1,35730	16,01

Дайте відповіді на запитання:

1. Що таке показник заломлення речовини?
2. В чому полягає явище повного внутрішнього відбивання?
3. Для яких розчинів можна застосувати даний метод дослідження?

Лабораторна робота № 15

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНОЇ АКТИВНОСТІ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ЦУКРУ

Прилади та обладнання: поляриметр, набір кювет з водними розчинами цукру різної концентрації.

Мета роботи: вивчення на прикладі водних розчинів цукру явища повороту площини коливань поляризованого світла оптично активними речовинами і визначення концентрації досліджуваних розчинів.

Коротка теорія і метод вимірювань

Світло являє собою сукупність електромагнітних хвиль. Електромагнітна хвиля, як процес поширення в просторі зв'язаних між собою змінного електричного і магнітного полів, носить поперечний характер, тобто напруженості електричного E та магнітного H полів в хвилі направлені перпендикулярно до швидкості її поширення v . Крім того вектори E і H взаємно перпендикулярні і їх зміна в хвильовому процесі відбувається синфазно. Хімічна та біологічна дія світла в основному пов'язана з електричною складовою поля електромагнітної хвилі. Тому вектор напруженості електричного поля E називають світловим вектором.

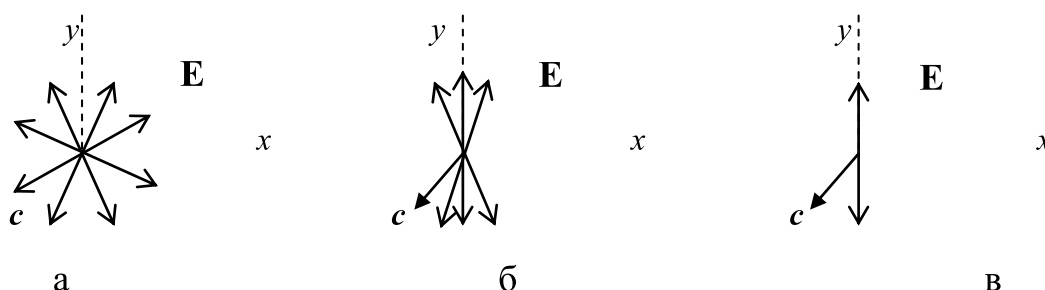


Рис. 1

Природне світло випромінюється сукупністю багатьох окремих атомів джерела світла. Цей процес відбувається неузгоджено, як кажуть, некогерентно, тому коливання світлових векторів окремих хвиль для будь-

якого променя світла здійснюються в різних, довільно орієнтованих площинах. Таким чином, для природного світла характерний рівномірний розподіл напрямків векторів E відносно осі променя. Якщо один із напрямків такого розподілу стає переважаючим, то говорять про частково поляризований світловий промінь. Зокрема, коли коливання вектора відбувається тільки в одній площині, то такий промінь називають плоскополяризованим. На рис. 1. схематично зображені а/ - природний промінь світла: б/ - частково і в/ - плоскополяризований світлові промені (напрямок поширення променя s перпендикулярний до площини рисунка xy , вектори на рисунку відповідають амплітудним значенням).

Поляризоване світло можна одержати з природного за допомогою спеціальних пристроїв - поляризаторів (призма Ніколя, поляроїд і ін.). Вони пропускають коливання світлового вектора E повністю лише в одній площині, паралельній до так званої головної площини поляризатора, і повністю затримують перпендикулярні коливання.

Око не відрізняє поляризоване світло від природного, але існує цілий ряд явищ, властивих тільки поляризованому світлу, завдяки яким воно і виявляється. Зокрема, якщо на шляху поляризованого променя, одержаного, наприклад, за допомогою поляризатора, помістити ще один поляризатор, головна площина якого може регульовано змінюватись по відношенню до головної площини першого поляризатора на певний кут, то варіюючи цим кутом, можна змінювати інтенсивність вихідного променя від нуля (повне затемнення), при взаємній перпендикулярності головних площин обох поляризаторів, до вихідної інтенсивності поляризованого променя, при співпаданні головних площин поляризаторів. Таким чином, другий, рухомий поляризатор, використовується для аналізу поляризованого світла і називається аналізатором. Взагалі інтенсивність світла на виході аналізатора I пов'язана а інтенсивністю світла, падаючого на аналізатор I_0 , законом Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

де φ - кут між головними площинами поляризатора і аналізатора або, що рівнозначно, кут між площинами коливань світлового вектора до і після аналізатора.

При проходженні поляризованого світла через деякі речовини спостерігається явище повороту (обертання) площини коливань світлового вектора. Такі речовини називаються оптично активними. Це можуть бути тверді тіла, наприклад кварц, кіновар і ін., чисті рідини, наприклад скипидар, нікотин і ін., зокрема розчини деяких речовин, наприклад, водні розчини цукру, винної кислоти та ін. В оптично активних розчинах кут повороту площини коливань світлового вектора пропорціональний шляху променя в розчині l і концентрації розчину c :

$$\Delta\varphi = a \cdot c \cdot l, \quad (2)$$

де a - питома стала обертання, вона задає кут повороту площини коливань світлового вектора на одиниці шляху розчину одиничної концентрації. Найчастіше концентрацію розчину вимірюють в г / л, що відповідає кількості грамів розчиненої речовини в одному літрі розчину. В цьому випадку a виражають в $\frac{\text{град} \cdot \text{л}}{\text{см} \cdot \text{г}}$ (порівняйте з одиницею a системи СІ - $\frac{\text{рад} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}}$). Крім природи оптично активної речовини a залежить від довжини світлової хвилі і температури розчину. Звичайно, для вимірювань оптичної активності речовин використовують жовте світло ($\lambda = 589$ нм) і дослідження проводять при кімнатній температурі ($t = 20$ °С).

Обертання площини коливань вектора E поляризованого світла оптично активними речовинами зумовлюється асиметричною структурою їх молекул. В залежності від порядку чергування структурних ланок в молекулах оптично активних речовин, для однієї і тієї ж речовини може спостерігатись обертання площини коливань вектора E поляризованого світла за годинниковою стрілкою і проти неї. Відповідні різновидності речовини називаються право- і лівообертаючими, їх молекули дзеркально відображують одна одну - вони тотожні за своїм хімічним складом, але дзеркально симетричні за своєю просторовою формою. Ця асиметрія молекул і проявляється в явищі оптичної активності речовин.

Кутове переміщення площини коливань світлового вектора фіксується за зміною екстремальної інтенсивності світла на виході аналізатора. Враховуючи підвищення чутливості ока із зниженням інтенсивності світла, дослідження оптичної активності проводять при взаємно перпендикулярній орієнтації головних площин аналізатора і поляризатора, тобто за максимальним затемненням поля зору.

Якщо між схрещеними поляризатором і аналізатором помістити кювету з розчином оптично активної речовини, то поле зору просвітлюється. Щоб знову одержати повністю затемнене поле зору, необхідно аналізатор повернути на кут $\Delta\varphi$, еквівалентний куту повороту площини коливань світлового вектора поляризованого променя при проходженні його через кювету з розчином. Знаючи питому сталу обертання розчину a і довжину кювети l , згідно з формулою (2), можна визначити концентрацію розчину:

$$c = \frac{\Delta\varphi}{al} \quad (3)$$

Такий спосіб визначення концентрації розчинів оптично активних речовин називається поляриметричним, а відповідні прилади - поляриметрами. Метод поляриметрії широко використовується у виробництві, в біології та медицині, наприклад для визначення оптичної активності сироваткових білків з метою діагностики ракових захворювань, для кількісного визначення вмісту цукру в сечі і ін.

Установка аналізатора на темноту не може бути здійснена достатньо точно. Тому замість звичайного аналізатора застосовуються так звані

напівтіньові пристрої, за допомогою яких проводиться установка не на максимальну темноту, а на рівність достатньо малих освітленостей двох половин поля зору. Найпростіші напівтіньові пристрої являють собою сполучення двох розташованих поруч поляризаторів, головні площини яких утворюють невеликий, порядку 5° , кут. Якщо площина коливань падаючого світла перпендикулярна до бісектриси цього кута, то обидві половини поля зору будуть освітлені однаково. При найменшому повороті площини коливань рівність освітленостей одразу порушиться. Око дуже чутливе до порушення рівності освітленостей двох сусідніх полів. Тому за допомогою напівтіньового пристрою площини коливань світлового вектора може бути встановлено із значно більшою точністю, ніж установкою аналізатора на темноту.

При вимірюванні оптичної активності розчину напівтіньовий пристрій встановлюється на рівність освітленостей обох половин поля зору двічі - до і після заливки розчину в кювету. Кут між обома положеннями пристрою дає кут повороту площини коливань світлового вектора розчином. Часто на оправі напівтіньового пристрою наноситься шкала, проти поділок якої відмічаються безпосередньо значення концентрації. В медичних цукриметрах відлік кута повороту аналізатора в градусах безпосередньо дає концентрацію розчину цукру (в грамах на 100 см^3). Це досягається відповідним підбором довжини кювети.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтеся з поляриметром. Виділіть в ньому такі структурні елементи: освітлювач, поляризатор з напівтіньовим пристроєм із скомпонованими з ним в одному блоці світлофільтром та об'єктивом, трубку для кювет з досліджувальними розчинами, аналізатор і зорову трубу з об'єктивом та окуляром.

2. Ввімкніть освітлювач поляриметра в мережу.

3. Закрийте шторку трубки для кювет і, переміщуючи муфту окуляра зорової труби, встановіть чітке зображення поля зору.

4. Обертанням маховичка аналізатора добийтесь рівномірно затемненого поля зору і зафіксуйте по лімбу і ноніусу градусної шкали аналізатора початковий відлік φ_0 площини коливань поляризованого променя, падаючого на аналізатор.

5. Помістіть в трубку поляриметра кювету з розчином цукру відомої концентрації c_1 . Обертаючи маховичок аналізатора, знову добийтесь рівномірного затемнення поля зору. Зніміть новий відлік φ_1 площини коливань променя на вході аналізатора.

6. За різницею показань φ_1 і φ_0 визначте кут повороту площини коливань світлового вектора поляризованого променя $\Delta\varphi_1$.

7. За формулою (2) визначте питому сталу обертання розчину цукру α , попередньо вимірявши довжину кювети l_1 .

8. Помістіть в поляриметр одну з кювет з розчином цукру невідомої концентрації і повторить дії пунктів 4-6.

9. Виміряйте довжину кювети з досліджуваним розчином l_2 і за формулою (3), користуючись знайденим значенням a , визначте концентрацію досліджуваного розчину цукру c_2 .

Повторіть виміри для іншого розчину невідомої концентрації. Результати вимірювань та розрахунків занесіть до таблиці:

№	Розчин цукру заданої концентрації						Розчин цукру невідомої концентрації					
	φ_0	φ_1	$\Delta\varphi_1$	l_1	c_1	a	φ_0	φ_2	$\Delta\varphi_2$	l_2	a	c_2

Дайте відповіді на запитання:

1. Яка відмінність між природним та плоскополяризованим світлом?
2. Чи можна провести вимірювання оптичної активності розчину, помінявши місцями поляризатор і аналізатор?
3. Чи може освітленість поля зору поляриметра не змінитись при заповненні кювети оптично активним розчином?

Лабораторна робота № 16

ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНОГО ФОНУ В УМОВАХ ЛАБОРАТОРІЇ

Прилади та обладнання: дозиметр-радіометр АНРІ-01-02, кювета для радіоактивних проб, електронно-променева трубка, проби досліджуваних речовин, водопровідна вода.

Мета роботи; ознайомлення з методами вимірювання потужності дози радіоактивного випромінювання, густини потоку бета-випромінювання та об'ємної активності радіонуклідів в речовинах.

Коротка теорія і метод вимірювань

Одним із основних факторів впливу на навколишнє середовище є радіоактивне випромінювання. Явище радіоактивності полягає у самодовільному перетворенні (переважно розпаді) ядер певних хімічних елементів в ядра інших елементів. Вказаний процес супроводжується особливого роду випромінюванням - радіоактивним випромінюванням,

здатним іонізувати гази, спричиняти хімічну і біологічну дію. Особливість радіоактивного випромінювання полягає в тому, що воно невидиме. Його можна виявити за допомогою різних явищ при взаємодії з речовиною, наприклад іонізації чи фотохімічної дії.

Радіоактивність є виключно властивістю атомного ядра і залежить тільки від його внутрішнього стану. Неможливо вплинути на хід радіоактивного процесу, змінюючи температуру, тиск, електричне і магнітне поля, вид хімічної сполуки даного радіоактивного елементу і його агрегатний стан.

Дослід показує, що кількість ядер радіоактивного ізотопу, яка розпадається за одиницю часу, пропорційна вихідній кількості радіоактивних ядер - тобто, за один і той же час завжди розпадається одна й та сама частка радіоактивних ядер. Вказана закономірність носить назву закону радіоактивного розпаду, в інтегральному вигляді її можна подати, як

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де N - кількість радіоактивних ядер, які залишилися після розпаду; N_0 – кількість ядер на початку розпаду; t - час розпаду; λ - стала радіоактивного розпаду, характерна для даної радіоактивної речовини константа, яка визначає швидкість розпаду.

На практиці замість λ часто використовують період напіврозпаду T - час, протягом якого розпадається половина початкової кількості ядер. Із (1) випливає, що

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2)$$

Період напіврозпаду різних радіоактивних ізотопів хімічних елементів змінюється у широких межах: від часток секунд до мільярдів років.

У складі радіоактивного випромінювання розрізняють три види випромінювання - альфа-, бета- і гама- промені, на які воно розподіляється в поперечному електричному або магнітному полях.

1. Альфа-промені являють собою потік високошвидкісних ядер гелію ${}^4_2\text{He}$. Вони мають високу іонізаційну здатність (в повітрі можуть утворювати до $0,5 \cdot 10^6$ іонів на частинку) і незначну проникну здатність (для біологічних тканин - близько декількох десятків мкм).

2. Бета-промені - це потік надшвидкісних (0,3-0,99 швидкості світла) електронів або позитронів. Бета-випромінювання має значно меншу іонізаційну здатність, ніж альфа-промені, але більшу проникну здатність (в біологічних тканинах - до 1 см).

3. Гама-промені являють собою електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі порядку часток ангстрема ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$). Енергія гама-квантів природних радіоактивних елементів значно нижча від енергії α – та β - частинок і не перевищує 2-6 МеВ. Гама-кванти, не мають заряду і маси

спокою і, тому, викликають слабку іонізуючу дію, але мають значну проникну здатність. Шлях пробігу їх у повітрі досягає 100-150 м.

Радіоактивні елементи поширені в природі в дуже малих кількостях. Вони містяться в твердих породах земної кори, у воді, в повітрі, а також у рослинних і тваринних організмах, в які вони попадають із оточуючого середовища.

В земній корі радіоактивні елементи знаходяться переважно в уранових рудах та торієвих пісках, і майже всі вони є ізотопами важких елементів з атомним номером, більшим від 83. Ядра важких елементів нестійкі. Вони зазнають багатократних послідовних ядерних перетворень. В результаті виникає певний ланцюг радіоактивних розпадів, в яких ізотопи, що розпадаються, генетичне пов'язані між собою. Така сукупність радіоактивних елементів від вихідного (материнського) до кінцевого (стабільного) ізотопу називається радіоактивним сімейством або рядом. Назва сімейства береться від материнського елемента. На сьогодні відомі три природні радіоактивні ряди: ряд урана U-238, ряд актиноурана U-235 і ряд торія Th-232. Кінцевими продуктами розпаду у всіх випадках є ізотопи свинцю.

До основних природних радіоактивних елементів, крім урана і торія, відносяться також K-40 та Rb-87. Найбільш поширеним радіоактивним ізотопом земної кори є Rb-87. Але загальна радіоактивність K-40 перевищує загальну радіоактивність всіх інших природних радіоізотопів. Калій-40 широко розсіяний в ґрунтах, особливо в глиноземах, які завдяки сорбційним процесам завжди багатші радіоактивними елементами, ніж піщані ґрунти та вапняки. Важкі радіоактивні елементи (уран, торій, радій) містяться переважно в гірських гранітних породах. Оскільки земні породи використовуються в будівництві, то вони можуть впливати на радіаційний фон всередині будівель. Найвищий рівень фону спостерігається в будинках із залізобетону та глинозему.

Радіоактивність атмосфери зумовлюється надходженням до неї радіоактивних речовин із земної кори у вигляді газів (радон, торон) чи аерозолей (калій-40, уран, радій і ін.), а також в результаті дії на компоненти атмосфери космічного випромінювання - таким шляхом утворюються радіоактивні ізотопи вуглець-14 та тритій (водень-3).

Слід відмітити, що на організм людини і тварин діють не тільки джерела зовнішнього природного радіоактивного фону, але й внутрішнє випромінювання природних радіонуклідів, в першу чергу K-40, Ra-226, C-14, H-3, що надходять і накопичуються (інкорпорується) в організмі через їжу, воду, повітря.

Крім природних джерел радіації, на рослинний та тваринний світ можуть впливати штучні джерела іонізуючого випромінювання, особливо такі потужні, як ядерний та термоядерний вибухи, а також можливий радіоактивний фон від атомних електричних станцій (АЕС). Під час ядерних вибухів в результаті безпосереднього поділу важких ядер, продуктів їх розпаду та наведеної радіоактивності утворюється понад 200 радіоактивних

елементів. Найбільш важливими за своїми фізичними та радіотоксикологічними характеристиками є такі радіонукліди: Sr-89, Sr-90, Zn-95, Nb-95, Ru-103, Ru-106, J-131, Cs-137, Ba-140, Ce-144. Відповідно до свого періоду напіврозпаду, виду та інтенсивності випромінювання, здатності до інкорпорування в склад біологічних тканин, особливостей накопичення та виведення із організму, найбільшу небезпеку становлять J-131, Ba-140, Sr-89 - в перший час після вибуху, Sr-90, Cs-137 - в подальшому. Стронцій-90 і цезій-137 крім значного періоду напіврозпаду (біля 30 років) мають надзвичайну здатність включатись в біологічний кругообіг речовин і затримуватись в організмі.

Крім сталої розпаду та періоду напіврозпаду швидкість радіоактивного розпаду характеризується ще однією величиною - активністю радіоактивного препарату A , яка визначається кількістю розпадів за одиницю часу:

$$A = \frac{N_0 - N}{t} \quad (3)$$

Одиницею активності в SI є один розпад за секунду (1/с) - беккерель (Бк). Допускається застосування позасистемних одиниць - розпад за хвилину та кюрі. Кюрі (Ки) визначається як активність такого препарату, в якому відбувається $3,7 \cdot 10^{10}$ розпадів в секунду. 1 Ки відповідає активності 1 г радію.

Оскільки активність в даний момент часу пропорційна вихідній кількості радіоактивних ядер, то нею можна вимірювати загальну кількість радіоактивного ізотопу замість маси, що значно простіше.

Для даного радіоактивного препарату або радіоактивної речовини використовують питому масову A_m або об'ємну A_v активності, відповідно за формулами:

$$A_m = \frac{A}{m}, A_v = \frac{A}{V} \quad (4)$$

Для характеристики дії іонізуючого випромінювання на речовини введено поняття дози випромінювання D_0 — як величини енергії, поглинутої одиницею маси опроміненої речовини. Вимірювання D_0 безпосередньо в глибині тканин живих організмів ускладнено, тому визначають так звану експозиційну дозу D_i , яка характеризує іонізаційну здатність рентгенівських та гама-променів в повітрі, а від неї переходять за допомогою відповідних коефіцієнтів до D_0 .

За одиницю експозиційної дози в Міжнародній системі одиниць прийнятий кулон на кілограм (Кл/кг) - така експозиційна доза рентгенівського та гама-випромінювання, при якій споріднена емісія іонів кожного знаку в 1 кг сухого повітря становить 1 Кл. На практиці застосовується позасистемна одиниця експозиційної дози - рентген (Р), яка еквівалентна іонізаційній здатності випромінювання в одну електростатичну одиницю заряду на мілілітр повітря ($1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$), ($1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$).

Одиницею дози іонізуючого випромінювання незалежно від виду випромінювання в СІ виступає - грей (Гр). Широкого поширення набула

позасистемна одиниця дози довільного виду іонізуючого випромінювання - **рад** (1 рад = 0,01 Гр).

Між поглинутою дозою D_0 та експозиційною дозою D_i , випромінювання дослідним шляхом для різних речовин встановлено співвідношення:

$$D_0 = f \cdot D_i, \quad (5)$$

в якому перехідний коефіцієнт f відбиває здатність речовини поглинати даний вид випромінювання — для повітря - 34,1 (В); - для води - 36,0 (В); - для кісткової тканини – 136 (В); - для м'яких тканин тварин - 38,8 (В).

Біологічна дія однакових доз різних видів випромінювання неоднакова. Величина Q , яка показує у скільки разів ефективність біологічної дії даного виду випромінювання більша, ніж ефективність дії рентгенівського чи гама-випромінювання при однакових поглинутих дозах в живих тканинах називається відносною біологічною ефективністю (ВБЕ) або коефіцієнтом якості (КЯ) випромінювання.

Для оцінки біологічної дії випромінювання вводиться еквівалентна доза іонізуючого випромінювання:

$$D_e = Q \cdot D_0, \quad (6)$$

в якій враховується і поглинута доза, і якість іонізуючого випромінювання. Одиниці вимірювання еквівалентної дози: зіверт (Зв) - в СІ, а також біологічний еквівалент рада – берад (1Зв = 100 берад).

ВБЕ (КЯ) РІЗНИХ ВИДІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Вид випромінювання	Величина ВБЕ (КЯ)
Рентгенівське і гама-випромінювання	1
Бета-випромінювання	1
Протони	10
Нейтрони повільні	5
Нейтрони швидкі	10
Альфа-випромінювання	20
Важкі ядра	20

У біологічному відношенні важливо знати не просто дозу, одержану об'єктом, а також протягом якого часу t вона була поглинута. Для цього вводять поняття потужності дози:

$$P_0 = D_0 / t \quad (7)$$

Відповідно розрізняють потужності експозиційної та еквівалентної доз.

Торкаючись біологічної дії випромінювання, слід відмітити його високу біологічну активність. Іонізуюче випромінювання викликає іонізацію біологічних молекул, утворює активні радикали інших речовин і

цим збуджує довготривалі хімічні реакції в живих організмах, внаслідок чого порушується хід біохімічних процесів з наступними функціональними і морфологічними змінами в клітинах і тканинах організму.

Детальний механізм біологічної дії іонізуючих випромінювань на організм досить складний і до кінця не в'яснений. Відомий ряд загальних закономірностей цієї дії:

1/ глибинні порушення життєдіяльності викликаються дуже малою кількістю поглинутої енергії, основна парадигма сучасної радіаційної гігієни ґрунтується на безпороговій концепції біологічної дії іонізуючого випромінювання;

2/ для біологічної дії іонізуючих випромінювань характерний латентний період, тобто променеве ураження відбувається не відразу, а через деякий час (декілька тижнів – місяців);

3/ біологічна дія іонізуючих випромінювань не обмежується організмом, який зазнав опромінювання, а може поширюватись і на наступні покоління (генетичний ефект).

Ступінь радіочутливості органів та тканин живого організму неоднакова. Вважається, що найбільший радіобіологічний ефект викликає загальне рівномірне опромінення організму. Смертельною для більшості ссавців є експозиційна доза гама-випромінювання величиною 1000 Р (для людини – 600 Р). Одноразова доза відповідає опроміненню за час, що не перевищує 4 доби.

Флора і фауна Землі безперервно опромінюється в полі природних джерел іонізуючого випромінювання (космічні промені та радіонукліди ґрунту, води і повітря). Природний радіаційний фон (ПРФ) коливається поблизу середнього показника 0,1 ... 1,0 мЗв/рік, може багатократно підвищуватись (до 100 ... 600 раз) в місцях залягання уранових руд, торієвих пісків, виходу на поверхню радонових джерел. Багаторічні спостереження не відмічають суттєвого відхилення у стані здоров'я населення, що проживає в районах з підвищеним радіаційним фоном, що доводить можливість адаптації і значної пристосованості людини і тварин до природного рівня радіації та його коливань у певних межах. Значення малих доз, близьких до ПРФ, продовжує залишатись неясним – в багатьох випадках такі дози діють стимулююче, стерилізуюче, терапевтичне.

Значні дози опромінення справляють пошкоджувальну дію на організм. При цьому передбачається, що високий рівень радіації однозначно пов'язаний з частотою патологічних відхилень у людини, особливо злоякісних новоутворень, а також з частотою генетичних змін.

Порядок виконання роботи:

Завдання 1: Дозиметрія фонового випромінювання

1. Ознайомтесь з приладом радіаційного контролю об'єктів АНРИ-01-02 "Сосна".

Дозиметр-радіометр АНРИ-01-02 призначений для виміру дози гама-випромінювання, виміру густини потоку бета-випромінювання із забруднених поверхонь, оцінки об'ємної активності радіонуклідів в речовинах. Прилад відноситься до іонізаційних детекторів випромінювання типу "іонізаційна камера" з інтегральним режимом відліку, в яких фіксується зумовлений іонізуючою дією випромінювання струм насичення несамостійного газового розряду. В. радіометрі використовується розрахунковий і порівняльний методи вимірювання радіоактивності.

На передній панелі приладу розташовані органи управління та цифрове табло (індикатор) на рідких кристалах. На задній стороні радіометра міститься відкидна кришка - екрануючий фільтр детектора. До приладу додається спеціальна кювета для вимірів об'ємної активності радіонуклідів в пробах рідких та сипучих речовин.

2. Проведіть виміри (3-6 разів) потужності експозиційної дози фонового радіоактивного випромінювання в лабораторії:

- переведіть перемикач режиму роботи в положення "МД";
- увімкніть живлення (перемикач живлення переведіть в положення "ВКЛ");
- натисніть кнопку "ПУСК" і після того, як відлік на індикаторі припиниться внутрішнім таймером приладу, зафіксуйте показання потужності експозиційної дози в мкР/год.

3. Визначте потужність поглинутої дози людиною в умовах фонового випромінювання (коефіцієнт поглинання прийняти рівним 38,8 Дж/Кл).

4. Обчисліть за середніми значеннями потужностей доз річні дози (експозиційну, поглинуту та еквівалентну) фонового випромінювання в умовах лабораторії.

5. Порівняйте одержані результати з граничною дозою за календарний рік - РД (допустимий середньорічний рівень опромінення для населення категорії "Б" — окремі особи населення, які можуть зазнати опромінення): 5 мЗв. Зробіть висновок відносно радіаційної безпечності лабораторії.

6. Знайдіть потужність еквівалентної дози нейтронного (брати швидкі нейтрони) випромінювання P_E в рад/с при тотожній до п. 4 річній поглинутій дозі.

Результати вимірювань та розрахунків занесіть до таблиці 1.

Таблиця 1

Потужність дози		Доза за рік			P_E
Експозиц., (мкР/год)	Поглинута, (Гр/с)	Експозиц., (Кл/кг)	Поглинута, (Гр)	Еквівал., (Зв)	Нейтрони (рад/с)

Завдання 2: Оцінка об'ємної активності радіонуклідів

1. Заповніть кювету радіометра досліджуваною речовиною (рідиною або твердим подрібненим матеріалом) до відмітки "РІВЕНЬ" і встановіть на неї прилад (екрануюча кришка під час вимірювань повинна бути відкритою).

2. Переведіть перемикач режиму роботи в положення "Т" і увімкніть живлення приладу.

3. Натисніть кнопку "ПУСК" і через заданий проміжок часу t від 5 до 10 хв. (в залежності від активності проби) припиніть відлік імпульсів, натиснувши кнопку "СТОП". Зафіксуйте число відрахованих імпульсів $N_{\phi n}$ на індикаторі радіометра.

4. Перед визначенням об'ємної фонові активності на контрольних пробах чистої питної води кювету радіометра ретельно промийте розчином прального порошку або пасти і витріть насухо.

5. Наповніть кювету до відмітки "РІВЕНЬ" чистою питною водою і проведіть вимірювання фонові об'ємної активності аналогічно п.п. 2-3 при часі відліку $t_0 = 10$ хв. Зафіксуйте число відрахованих фонових імпульсів N_{ϕ} на індикаторі.

6. Оцініть величину об'ємної активності радіонуклідів досліджуваної речовини за формулою:

$$A_v = k_n \left(\frac{N_{\phi n}}{t} - \frac{N_{\phi}}{t_0} \right)$$

де k_n - стала приладу. Величина коефіцієнта k_n і залежить від характеристики досліджуваної речовини. Орієнтовно для проб, які містять ізотопи Cs-137, $k_n = 8 \cdot 10^{-9}$ Кі·хв/(л·імпульс). Подайте об'ємну активність в Міжнародній системі одиниць СІ.

Результати дослідження оформіть у вигляді таблиці 2:

Таблиця 2

t	$N_{\phi n}$	t_0	N_{ϕ}	A_v , Кі/л	A_v , СІ

Лабораторна робота № 17

БІОЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА У ТКАНИНАХ, ЩО ЗБУДЖУЮТЬСЯ /ДОСЛІДИ ГАЛЬВАНІ І МАТТЕУЧІ/

Мета роботи: спостереження дії електричного потенціалу на нервово-м'язовий препарат жаби.

Прилади та обладнання: біметалічний пінцет з мідною і залізною браншами, препарувальний набір, пінетка, скляні гачки, скляна пластинка, розчин Зінгера, нервово-м'язові препарати жаби.

Коротка теорія і метод вимірювань

Біоелектричні явища у збуджених тканинах можливо спостерігати як біологічним, так і фізичним методом за допомогою приладів. Хоча

біологічний метод вже втратив своє значення у сучасних дослідженнях, він зіграв виняткову роль в історії відкриття „твариної електрики”.

При дослідженні біоелектричних явищ найчастіше використовують нервово-м'язовий препарат жаби. Для цього обезводжують жабу. Ножицями перерізають хребетний стовп приблизно посередині тулуба і відділяють верхню частину тулуба. Пінцетом і ножицями видаляють нутрощі. Захвачуючи однією рукою крізь серветку залишок хребетного стовпа, а другою – край шкіри зі спини, знімають шкіру з обох лапок, отримуючи препарат двох задніх лапок жаби.

Для препаровування сідничного нерва стегно розташовують задньою поверхнею вгору, розводять м'язи скляними гачками і відпрепаровують сідничний нерв по усій довжині.

Завдання 1. Перший дослід Гальвані

Суть досліду полягає в тому, що при торканні препарату лапок біметалічним пінцетом під дією різниці потенціалів між браншами пінцету відбувається скорочення м'язів.

Порядок виконання:

1. зафіксуйте препарат задніх лапок за хрестцово-нервове сплетіння на мідній бранші пінцета.
2. Декілька разів торкніться препарату залізною траншею пінцета. При підсиханні зволожуйте препарат розчином Зінгера.
3. Опишіть спостереження.

Завдання 2. Другий дослід Гальвані

Суть цього досліду полягає у тому, що скорочення м'яза відбувається без участі металу, шляхом дотику сідничного нерву до пошкодженого м'яза голені. Різниця потенціалів між зовнішньою поверхнею м'язу і його внутрішньою частиною, присутня у спокою і чітко проявляється у випадку, коли м'яз пошкоджено. Ця різниця отримала назву „потенціалу пошкодження”. При торканні нервом пошкодженої електронегативної частини коло, у якому позитивним полюсом є непошкоджена частина, скорочується. Таким чином, у II досліді Гальвані збудження викликається струмом, що виникає у тканинах.

Порядок виконання:

1. Пошкодьте м'яз, що прилягає до колінного суглоба.
2. Покладіть препарат на скляну пластинку і за допомогою скляного гачка торкніться нервом пошкодженої частини м'яза так, щоб середня частина нерва торкалась непошкодженої поверхні м'яза.
3. Запишіть спостереження, поясніть принципову різницю між I і II дослідом Гальвані.

Завдання 3. Дослід Маттеучі

Маттеучі показав, що скорочення м'язів відбувається, якщо торкатися нервом одного препарату до м'язу, що скорочується, другого препарату. Цей дослід свідчить, що у діючому м'язі виникає струм, який можливо використати для подразнення нерва препарату у спокою. Цей струм отримав назву „струму дії”.

Порядок виконання:

1. Приготуйте 2 препарата задніх лапок жаби, м'язи стегна видаліть, а обидві лапки зафіксуйте за кістку стегна. Нерв одного препарату помістіть на електроді, а нерв другого розташуйте вздовж ікроножного м'язу першого.

2. Ритмічно подразнюючи електродом нерв I препарату, спостерігайте поведінку м'язу I і II препаратів.

3. Запишіть і поясніть спостереження.

Дайте відповідь на питання:

1. Чи зміниться поведінка препарату, якщо його зафіксувати на залізній бранші пінцету, а торкатися мідною траншею?
2. Як відреагує пошкоджений м'яз, якщо нервом його з'єднати з другим пошкодженим м'язом?
3. Яка буде поведінка препаратів у досліді Маттеучі, якщо для збудження замість електродів використати бранші біметалічного пінцету?

Лабораторна робота № 18

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АЕРОІНІЗАЦІЇ НА МІКРОФЛОРУ ПОВІТРЯ

Мета роботи: ознайомлення з дією аеронів.

Прилади та обладнання: електростатичний генератор аеронів, прилад для вимірювання концентрації аеронів, термостат, набір бактеріологічних чашок із звичайним живильним середовищем твердої консистенції (м'ясо-пептонний агар – МПА), лупа чи мікроскоп з незначним збільшенням (об'єктив х8).

Коротка теорія і метод вимірювань

Із всіх компонентів оточуючого середовища повітря, завдяки наявності в ньому кисню, займає особливе місце для рослинного та тваринного світу. Крім хімічного складу, запиленості, бактеріальної забрудненості важливим показником якості повітря є його електричний стан. Численні біофізичні дослідження підтверджують сприятливий вплив підвищеної концентрації легких іонів повітря, головним чином, від'ємно заряджених молекул і атомів

кисню, на організм людини і тварин. Наприклад, сеансами аероіонотерапії прискорюються відновлювальні процеси при загоюванні обпечених поверхонь шкіри, лікуються захворювання дихальних шляхів, крові, нервової системи та інш. Таким чином, аероіонний склад повітря, поряд з температурою, виступає важливим фактором при оцінці мікроклімату житлових, а також тваринницьких приміщень. Потік аеронів, подразнюючи нервові закінчення в шкірних покривах зовнішніх та внутрішніх дихальних шляхів та проникаючи в кров, виступає в ролі сильного стимулятора біохімічних процесів в організмі.

Ступінь насичення повітря мікроорганізмами зумовлюється його запиленістю. На частинках пилу і краплинках вологи зберігаються різноманітні мікроби: палочки, коки, вібріони, спори бацил, кластридій, актиноміцетів, плісневих і дріжджових грибів. Санітарний стан повітря оцінюється за кількістю мікроорганізмів, виявлених в 1 м³ повітря і наявністю серед них санітарно-показникових мікробів (гемолітичних стафілококів та стрептококів, визначених на глюкозо-кров'яному агарі). Бактеріологічне дослідження повітря здійснюють з використанням седиментаційних, аспіраційно-фільтраційних (сорбційних) методів, що базуються на осадженні з повітря на поверхні твердих живильних середовищ або затримці їх в рідкому середовищі шляхом сифонування і барботажу. Найбільш простим є метод самодовільного осідання мікроорганізмів з повітря на чашки Петрі з м'ясо-пептонним агаром (метод Коха). Бактеріологічні чашки з МПА залишають відкритими протягом 5 – 10 хвилин, потім їх закривають і переносять в термостат з температурою 37 – 38⁰ С на 24-годинну або 48-годинну експозицію для одержання і подальшого дослідження колоній. Прийнято вважати, що на площу 100 см² агару осідає наближено стільки мікробів за 5 хвилин, скільки їх міститься в 10 л повітря. Допустимі санітарно-бактеріологічні показники для повітря тваринницьких приміщень не повинні перевищувати 500 – 1000 бактерій в 1 м³.

За допомогою фізичних, хімічних, біологічних методів впливу можна ефективно діяти на мікрофлору повітря. До числа основних фізичних факторів, що призводять до пригнічення життєдіяльності мікроорганізмів, відносяться такі: підвищення температури, висушування, дія ультразвуком, дія випромінюванням (природним світлом, ультрафіолетовим випромінюванням, лазером, іонізуючою радіацією), аероіонізація.

В роботі досліджується вплив від'ємної та позитивної іонізації повітря приміщення на мікрофлору повітря.

Аероіонізаційний стан повітря приміщення задається за допомогою генератора аероіонів. До складу генератора аероіонів входить задаючий генератор, блок живлення, помножувач напруги та електрофлювіальна люстра. Задаючий генератор формує імпульси напругою до 1 кВ, які в подальшому у помножувачі випрямляються і підвищуються до напруги порядку 30 кВ, і такий потенціал подається на електрофлювіальну люстру, яка являє собою модульно-виконану систему вістер. Принцип дії генератора аероіонів базується на явищі електричного вітру – явище стікання

електричного заряду із провідника загостреної форми. При достатньому потенціалі на електрофлювіальній люстрі електричний вітер може переходити в коронний розряд.

Концентрація аероіонів n , їх знак та рухливість μ вимірюється за допомогою лічильника аероіонів УТ-8401. Принцип дії лічильника зводиться до визначення величини заряду, який міститься в заданому об'єму повітря, пропущеного через вимірювальний конденсатор.

Бактеріологічний стан повітря приміщення вимірюється до та після сеансу аероіонізації методом осідання Коха.

Порядок виконання роботи:

1. За допомогою лічильника аероіонів вимірюйте фонову концентрацію позитивних n_o^+ та негативних n_o^- аероіонів у приміщенні, їх рухливість μ_o^+ і μ_o^- .

2. Для визначення вихідного стану мікрофлори в повітрі приміщення на контрольній чашці Петрі з м'ясо-пептоним агаром /МПА/ в режимі 5-хвилинної експозиції дослідіть самодовільне осідання мікроорганізмів з повітря. Після досліду закрити чашку перенесіть у термостат з температурою 37-38⁰ С на 24-години для одержання колоній.

3. Увімкніть генератор аероіонів. Підберіть режим його роботи таким, щоб він відповідав незначній генеруючій здатності (напряга V на виході помножувача 12-13 кВ). Задайте від'ємну полярність потенціалу електрофлювіальної люстри. Після 3-6 хвилин витримки проведіть виміри заданої генератором концентрації від'ємних аероіонів n^- та їх рухливості μ^- .

4. Візьміть нову чашку Петрі з МПА і залиште її відкритою протягом 5 хв. у насиченому аероріонами приміщенні. Потім чашку знову закрийте та помістіть у термостат на 24-годинну витримку.

5. Переведіть генератор на середню потужність генерації (19-20 кВ на виході помножувача), залишаючи від'ємну полярність люстри, і проведіть операції відповідно пунктам 3 і 4.

6. Переведіть генератор аероіонів на високу потужність генерації (26-27кВ на виході помножувача), при від'ємній полярності люстри, і знов проведіть операції відповідно пунктам 3 і 4.

7. Аналогічно пп. 3-6 дослідіть вплив позитивної іонізації повітря на його мікрофлору.

8. Після 24-годинної витримки в термостаті підрахуйте число колоній N в кожній дослідній бактеріологічній чашці. (Вважають, що одна бактерія породжує одну колонію). Обчисліть концентрацію мікроорганізмів c в повітрі приміщення в кожному випадку.

9. При потребі, використовуючи лупу чи мікроскоп, проведіть дослідження культуральних властивостей мікроорганізмів на 24-годинних культурах, відмічаючи характер росту (по числу колоній), розмір колоній,

форму колоній, краї та поверхні колоній, а також рельєф, прозорість, колір, консистенцію і структуру колоній.

Відповідно до результатів дослідження заповніть таблицю. Зробіть письмовий висновок по аналізу культуральних властивостей організму.

n_o^-	μ_0^-	n_o^+	μ_0^+	V	n^-	μ^-	N^-	c^-	n^+	μ^+	N^+	c^+

Дайте відповіді на запитання:

1. Назвіть показники якості повітря. Які допустимі санітарно-бактеріологічні показники для повітря тваринницьких приміщень?
2. В чому полягає метод Коха – метод бактеріологічного дослідження повітря?
3. Назвіть основні блоки генератора аероіонів. На якому фізичному явищі ґрунтується принцип його дії?

Лабораторна робота №19

КРОВ'ЯНИЙ ТИСК. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ КРОВІ

Прилади та обладнання: вимірювач артеріального тиску мембранний загального застосування модернізований ІАДМ-ОПММ.

Вимірювач артеріального тиску (далі – прилад) призначений для вимірювання систолічного та діастолічного артеріального тиску непрямим методом Короткова. Він складається із манометра МММ-3, наповнювача пневматичного НП-02, камери-манжети пневматичної КМП-6, фонендоскопа ФТК-02, трубки медичної 4,0×1,5, штуцера. Діапазон вимірювань від 20 до 300 мм рт. ст. (від 26,7 до 400 гПа). Ціна поділки шкали манометра 2 мм рт.ст. (2,67 гПа). Межа допустимої основної похибки манометра на ділянці шкали від 60 до 240 мм рт. ст. (від 60 до 320 гПа) ± 3 мм рт. ст. (± 4гПа), а в іншому діапазоні шкали ± 4 мм рт. ст. (± 5,33 гПа).

Мета роботи: засвоїти один із методів (непрямий метод Короткова) вимірювання артеріального тиску.

Коротка теорія і метод вимірювань

СЕРЦЕВИЙ ЦИКЛ. Послідовність скорочень камер серця називають серцевим циклом. За час циклу кожна з чотирьох камер проходить не тільки фазу скорочення (систоли), а й фазу розслаблення (діастоли). Першими скорочуються передсердя: спочатку праве, майже зразу ж за ним ліве. Ці скорочення забезпечують швидке заповнення кров'ю розслаблених шлуночків. Потім скорочуються шлуночки, які з силою виштовхують

вміщену в них кров. У цей час передсердя розслаблюються і заповнюються кров'ю з вен. Кожен такий цикл продовжується в середньому 6/7 с.

При кожному скороченні правий і лівий шлуночки виштовхують однакову кількість крові - систолічний об'єм. Систолічний об'єм $V(\text{см}^3)$ виражається згідно спрощеній залежності Старра:

$$V = 90,97 + 0,54P_n - 0,57P_d - 0,61B, \quad (1)$$

де $P_n = P_c - P_d$ - пульсовий тиск, P_c - систолічний тиск, P_d - діастолічний тиск (всі тиски - в мм рт. ст), B - кількість років людини.

Об'єм крові, який виштовхується серцем за одну хвилину, називається хвилиним об'ємом кровотоку, який дорівнює систолічному об'єму, помноженому на число серцевих скорочень за хвилину.

КРОВ'ЯНИЙ ТИСК. У різних ділянках серця і великих судин тиск, який створюється скороченнями серця, неоднаковий. Кров, яка повертається в праве передсердя по венах, знаходиться під відносно малим тиском - близько 1-2 мм рт. ст. Правий шлуночок, надсилаючи кров у легені, під час систоли доводить цей тиск приблизно до 20 мм рт. ст. Кров, яка повертається в ліве передсердя знов-таки знаходиться під малим тиском, який при скороченні передсердя підвищується до 3-4 мм рт. ст. Лівий шлуночок виштовхує кров з великою силою. При його скороченні тиск досягає приблизно 120 мм рт. ст., і даний рівень підтримується в артеріях усього тіла. Відтікання крові в капіляри в проміжку між скороченнями серця знижує артеріальний тиск приблизно до 80 мм рт. ст. Ці два різні тиски, а конкретно систолічний і діастолічний тиски, разом узяті, і називають кров'яним або, точніше, артеріальним тиском. Таким чином, типовий "нормальний" тиск - 120/80 мм рт. ст.

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ КРОВІ. Для безпосереднього вимірювання артеріального тиску у тварин артерію оголюють, надрізають і в розріз вводять зігнуту трубку-канюлю, яка являє собою трубку Піто. Канюля з'єднана з манометром або із самописцем, який відображає криву зміни тиску крові в артерії. При операціях іноді проводять безпосереднє вимірювання тиску крові в порожнинах серця введенням через аорту або через порожнисту вену тонкого зонду з прикріпленим до нього мініатюрним датчиком, у якому зміни тиску створюють електричні імпульси, що підсилюються та реєструються електронною апаратурою.

Вперше виміри артеріального тиску було зроблено С. Галеном у 1733 р. шляхом з'єднання стегнової артерії коня з латунною трубкою висотою 2 м (на таку висоту піднімається кров під дією систолічного тиску 150 мм рт. ст.). Для зменшення висоти підняття крові Пуазейль використав U-подібний ртутний манометр, який з'єднувався з канюлею гумовим шлангом, заповненим для перешкоджання звертання крові розчином соди. Відтоді і до сьогодні кров'яний тиск прийнято вимірювати в мм рт. ст.

Метод безпосереднього вимірювання тиску пов'язаний із втратою крові і больовими відчуттями. Більш досконалий манжетний спосіб, був

запропонований у 1896 р. італійським лікарем Ріва Роччі і удосконалений у 1905 р. російським лікарем Н. С. Коротковим. Метод оснований на прослуховуванні шумів, створених пульсовими хвилями. При вимірюванні тиску у людини між плечем та ліктем накладають порожнисту гумову манжету і накачують у неї повітря до того часу, поки в променевої артерії не припиняється потік крові і не зникає пульс. Потім повітря із манжети за допомогою вентиля потроху випускають, і тиск на артерію слабшає. Коли тиск на артерію стане рівним систолічному, кров починає проштовхуватись через стиснуту артерію і в ній створюється турбулентний потік, який супроводжується шумами (тони Короткова). Ці шуми добре прослуховуються через фонендоскоп, і за манометром реєструється відповідний цьому моменту систолічний тиск. При подальшому зниженні тиску в манжеті просвіт артерії поступово поновлюється до нормального, потік крові стає ламінарним, і шуми, пов'язані з вихрами в турбулентному потоці, завершуються. Показання манометра в момент зникнення шумів відповідає мінімальному, тобто діастолічному, тиску. Зазначимо, що при вимірюванні тиску у тварин манжету можна накладати на плечову, стегнову, скроневу артерії, а також на основу хвоста.

Найбільш удосконалений спосіб вимірювання тиску оснований на ефекті Доплера. Під манжету на поверхню тіла накладають випромінювач та приймач ультразвуку. На артерію направляють ультразвукову хвилю. Коли тиск у манжеті стає меншим систолічного, артерія розтискується, її стінки починають рухатись, і при відбиванні ультразвукової хвилі від рухомої стінки виникає ефект Доплера, тобто зміна частоти ультразвуку, який сприймається реєструючим пристроєм. Тиск у манжеті, коли ефект Доплера припиняється, відповідає діастолічному тиску.

Існують також електронні вимірювачі тиску ЕВТ, принцип дії яких ми не розглядаємо. Перевага двох останніх методів полягає в тому, що вони дозволяють реєструвати тиск протягом тривалого часу із графічним записом, що дає можливість досліджувати зміни тиску при фізичних навантаженнях, під час операцій і т. ін.

РЕГУЛЯЦІЯ СЕРЦЕВИХ СКОРОЧЕНЬ. Серце дорослої людини звичайно скорочується з частотою 60-80 разів за хвилину. При тахікардії – серце людини скорочується з частотою більше 80 скорочень за хвилину. При брадикардії – серце дорослої людини скорочується менше ніж 60 разів за хвилину. У дітей частота серцебиття вища: у немовлят приблизно 120, а у дітей до 12 років – 100 скорочень за хвилину. Частота серцевих скорочень звичайно тим більша, чим менша маса живого організму, тому що, чим менша маса, тим більше відношення площі поверхні до об'єму даного тіла і тим більші тепловтрати в навколишнє середовище, значить, тим більший обмін речовин і більше поглинання організмом кисню. Вказані величини є середніми і, залежно від умов, можуть дуже швидко змінюватись.

Фізичні навантаження також підсилюють симпатичні впливи на серце і підвищують частоту серцевих скорочень аж до 170 разів за хвилину і більше,

але цей ефект, очевидно, реалізується не через вазомоторний центр, а напряму через спинний мозок.

Ряд факторів впливає на роботу серця безпосередньо, без участі нервової системи. Наприклад, підвищення температури серця прискорює ритм серцевих скорочень, а зниження – сповільнює його. Деякі гормони, такі, як адреналін і тіроксин, теж спричиняють прямий ефект і, надходячи в серце з кров'ю, підвищують частоту серцебиття.

Порядок виконання роботи:

1. Принцип роботи приладу заснований на виділенні та фіксації тонів Короткова в момент їх появи та зникнення при повільному зниженні тиску в манжеті.

2. Перед вимірюванням артеріального тиску присядьте до столу. Покладіть руку на стіл. Надіньте манжету, при цьому середина її пневмокамери повинна знаходитись над проекцією передавлюваної артерії.

При правильно накладеній манжеті між нею та рукою можна ввести один палець.

Кінці фонендоскопа вставте у вушні раковини, а головку помістіть в область ліктьового згину, де пульс відчувається найбільш виразно.

3. Ритмічно стискаючи балон наповнювача, створіть тиск у манжеті на 30-40 мм рт. ст. (40-60 гПа) вище передбачуваного артеріального тиску.

При комплектуванні приладу наповнювачем із обертаючим декомпресійним пристроєм (НП-02) його необхідно закрити, повернувши декомпресійний пристрій за годинниковою стрілкою до упора. Зниження тиску здійснюється легким плавним повертанням декомпресійного пристрою проти годинникової стрілки.

Якщо прилад укомплектований наповнювачем із кнопочним декомпресійним пристроєм, то він автоматично закритий у його вихідному положенні. Зниження тиску здійснюється плавним натискуванням кнопки.

Прискорене скидання тиску проводять повертанням декомпресійного пристрою проти годинникової стрілки до упора або натискуванням на кнопку до упора.

4. Повільно знижуйте тиск у манжеті, відмічаючи показання манометра в момент появи першого із прослуховуваних тонів Короткова, що відповідає систолічному (верхньому) артеріальному тиску, і в момент зникнення прослуховуваних тонів, що відповідає діастолічному (нижньому) артеріальному тиску.

Примітки:

а) перед початком вимірювання тиску необхідно стрілку манометра сумістити з нульовою позначкою шкали. Установку стрілки здійснюють коректором нуля або поворотом самої шкали;

б) повторне вимірювання можна проводити не раніше ніж через 5 хвилин. За цей час поновлюється венозне відтікання крові в кінцівки, що виключає отримання неправильних результатів;

в) не рекомендується створювати в системі приладу тиск вище 300 мм рт. ст. (400 гПа). Це може привести до виходу з ладу манометра.

УВАГА! Зберігайте прилад у футлярі. При укладанні приладу в футляр старайтесь уникати різких згинів і зломів з'єднувальних трубок. Це збільшить довготривалість приладу. Декомпресійний пристрій наповнювача під час зберігання приладу повинен бути відкритим.

Заповніть таблицю: Зробіть висновок щодо Вашого артеріального тиску.

Типи артеріального тиску	Нормальний	Гіпотонічний	Гіпертонічний	Особистий
Систолічний				
Діастолічний				

Завдання:

1. Визначіть кількість пульсових хвиль за хвилину. Місце дослідження частоти пульсу виберіть самостійно: а) на променевій артерії в нижній частині передпліччя; б) на скроневій артерії.

2. За формулою Старра розрахуйте особистий систолічний об'єм V.

3. Використовуючи приклад розв'язання нижче наведеної задачі, обчисліть за значеннями Ваших особистих артеріального тиску, систолічного об'єму та частоти пульсу роботу серця за 5 хвилин.

Задача. Оцінити роботу, яку виконує серцевий м'яз дорослої людини за одну хвилину.

Дано:

$$\begin{aligned} \rho &= 1050 \text{ кг/м}^3 \\ p_c &= 120 \text{ мм рт.ст.} \\ p_d &= 80 \text{ мм рт.ст.} \\ p_s &= 2 \text{ мм рт.ст.} \\ v_a &\sim 0,5 \text{ м/с} \\ v_s &\sim 0,1 \text{ м/с} \\ v &= 70 \text{ хв}^{-1} \\ t &= 1 \text{ хв} \\ V &= 60 \text{ см}^3 \end{aligned}$$

$A' = ?$

$$\begin{aligned} A &= V[(p_a - p_s) + \rho g(h_a - h_s) + \frac{\rho}{2}(v_a^2 - v_s^2)] \\ V &= 60 \text{ см}^3 = 60 \cdot (0,01\text{м})^3 = 60 \cdot 0,000001\text{м}^3 = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \\ p_a &\sim \frac{1}{2}(120 + 80) \text{ мм рт.ст.} \times 133 \frac{\text{Па}}{\text{мм рт.ст.}} = 13300 \text{ Па} \\ p_s &\sim 2 \text{ мм рт.ст.} \times 133 \text{ Па/мм рт.ст.} = 266 \text{ Па} \\ h_a &\approx h_s \quad \rho g(h_a - h_s) \approx 0 \quad A' = A \cdot N \quad N = v \cdot t \\ A' &= Vvt[(p_a - p_s) + \frac{\rho}{2}(v_a^2 - v_s^2)] \quad A \sim 0,8 \text{ Дж} \\ A' &= 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot 70 \text{ хв}^{-1} \cdot 1 \text{ хв} [(13300 \text{ Па} - 266 \text{ Па}) + \\ &+ \frac{1050 \text{ кг/м}^3}{2} ((0,5 \text{ м/с})^2 - (0,1 \text{ м/с})^2)] \sim 55,5 \text{ Дж} \end{aligned}$$

Відповідь: робота, яку виконує серцевий м'яз дорослої людини за одну хвилину дорівнює 55,5 Дж.

Дайте відповіді на запитання:

1. Чому тиск крові в капілярах менший, ніж в артеріях?
2. Чи може діастолічний тиск перевищувати систолічний? Відповідь поясніть.
3. Виправте помилки в реченні:
“Об’єм води, який виштовхується серцем за годину, називають хвилиним об’ємом кровотоку – він дорівнює діастолічному об’єму, помноженому на число серцевих скорочень за секунду”.
4. Вкажіть послідовність та недоліки методу безпосереднього вимірювання тиску крові.
5. Розкрийте принцип та послідовність методу Короткова. Зазначте момент фіксації систолічного та діастолічного тиску. Вкажіть переваги використання електронних вимірювачів тиску.
6. Установіть залежність між систолічним об’ємом та частотою серцевих скорочень.
7. Як зміниться артеріальний тиск людини після 20 присідань?

Лабораторна робота № 20

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ЖИВОЇ ТКАНИНИ

Прилади та обладнання: електровимірювач комбінований типу 43101 - електровимірювальний комбінований прилад призначений для вимірювання напруги і сили постійного струму, середньоквадратичного значення напруги і сили змінного струму синусоїдної форми, опору постійному струму, електричної ємності, абсолютного рівня сигналу за напругою змінного струму у виробничих та лабораторних умовах.

До приладу додається: 4 шнури, 2 контактні затискачі.

Мета роботи: засвоїти метод вимірювання опору живої тканини; встановити особливості протікання електричного струму різного роду вздовж різних шляхів у живому організмі.

Коротка теорія та метод вимірювань

Електричний опір тіла людини

Тіло людини є провідником електричного струму. Воно складається, перш за все, з клітин, цитоплазма яких разом з міжклітинною рідиною являють собою електроліти, відокремлені напівпроникними мембранами. При цьому різні тканини тіла спричиняють струму різний опір. Найбільший опір має шкіра: її питомий опір досягає $3 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$ Ом·см. Інші тканини, в тому числі м’язова тканина, кров і особливо спинний і головний мозок мають незначний електричний опір. Опір тіла людини визначається головним чином опором шкіри.

Шкіра складається із двох основних шарів: зовнішнього - епідермісу і внутрішнього - дерми.

Епідерміс має декілька підшарів, із яких верхній (роговий) складається із багатьох рядів омертвілих (ороговівших) клітин, що не мають кровоносних судин і нервів - це шар неживої тканини, яка покриває зовні все тіло людини. Роговий шар має товщину на різних ділянках тіла від 0,05 до 0,2 мм; на долонях і підшвах, потовщуючись він може утворювати мозолі значної товщини. Роговий шар погано проводить тепло і електрику. У сухому і незабрудненому стані роговий шар можна розглядати як діелектрик: його питомий опір досягає 10^7 - 10^8 Ом·см.

Інші шари епідерміса, які лежать під роговим шаром і утворені в основному із живих клітин, можна умовно об'єднати в один так званий ростковий шар. Звичайно він в декілька разів тонший, ніж роговий шар, і має значно менший опір.

Дерма є живою тканиною. У ній знаходяться кровоносні судини, нерви, корені волосся, а також потові і сальні залози, вивідні протоки яких виходять на поверхню шкіри, пронизуючи епідерміс. Електричний опір дерми незначний.

Опір тіла людини при сухій чистій і неушкодженій шкірі, вимірний при напрузі 15-20 В, коливається в межах наближено від 3000 до 1000000 Ом, а іноді і більше. Якщо на ділянках шкіри, де прикладаються електроди, зішкребти роговий шар, то опір тіла спаде до 1000–5000 Ом, а при видаленні всього верхнього шару шкіри (епідерміса) – до 500–700 Ом. Якщо ж під електродами повністю видалити шкіру, то опір складе всього лише 300–500 Ом.

Опір тіла людини Z , тобто опір між двома електродами, накладеними на поверхню тіла, можна умовно вважати (спрощена схема) складеним із двох послідовно з'єднаних опорів: опору зовнішнього шару шкіри (епідерміса) Z_E , і внутрішнього опору тіла Z_I , що включає в себе опір внутрішнього шару шкіри (дерми) і опір внутрішніх тканин тіла.

Зовнішній опір тіла має не тільки активну R_E , але і реактивну (ємнісну) складову X_E , яка обумовлена тим, що на ділянці опору електричному струму на тілі людини утворюються додаткові конденсатори з деякою ємністю C , обкладками яких виступають провідники з струмом і добре провідні тканини тіла, які лежать під зовнішнім шаром шкіри (епідермісом) - діелектриком, що відокремлює провідні обкладки.

Внутрішній опір тіла вважається чисто активним $Z_I = R_I$. Його значення залежить від довжини і поперечного перерізу ділянки тіла, по якому проходить струм, і складає наближено 500–700 Ом.

Повний опір тіла людини згідно спрощеної схеми виражається наступною формулою:

$$Z = \frac{R}{\sqrt{1 + (2\pi\nu CR)^2}}, \quad (1)$$

де R – результуючий активний опір тіла людини, C - електрична ємність людини, ν - частота струму (Гц).

На практиці звичайно нехтують ємністю C , яка, як правило, незначна, і в розрахунках вважають опір тіла людини чисто активним і незмінним, рівним $R = 1000 \text{ Ом}$.

Основні фактори, які впливають на результат ураження струмом

В реальних умовах опір тіла людини не є постійною величиною; він залежить від стану шкіри, параметрів електричного струму, фізіологічних факторів, стану оточуючого середовища та ін.

Із збільшенням струму і часу його проходження опір падає, оскільки при цьому підсилюється місцеве нагрівання шкіри, що призводить до розширення її судин, а значить, до підсилення постачання цієї ділянки кров'ю і підвищення потовиділення.

Із зростанням напруги (рис. 1), прикладеної до тіла людини, відбувається зменшення в десятки разів опору шкіри, а значить, і опору тіла в цілому до свого найменшого значення – 300-500 Ом. Це можна пояснити пробоем рогового шару шкіри, що виникає при напрузі 50–200 В, збільшенням струму через шкіру, зростанням концентрації носіїв електричного заряду.

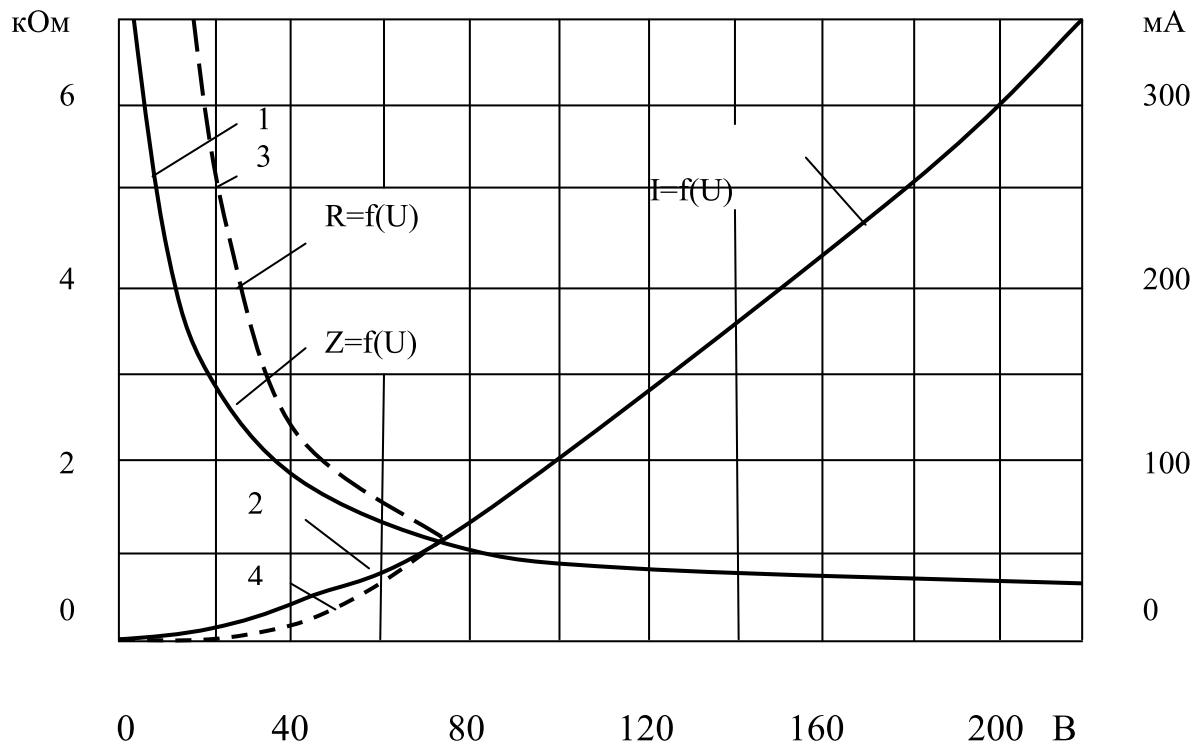


Рис. 1. Залежність опору тіла людини і струму, який проходить через нього, від прикладеної напруги (1 і 2 – змінний струм 50 Гц; 3 і 4 – постійний струм)

Опір тіла людини залежить від роду і частоти струму (1).

Практика експлуатації електроустановок показує що, постійний струм безпечніший змінного. Порівнюючи порогові значення відчутного постійного струму (5-7 мА) і відчутного змінного струму з частотою 50 Гц (0,6–1,5 мА), можна вважати, що постійний струм в 4–5 разів безпечніший змінного. Але це справедливо лише для напруг до 250–300 В. При більш високих напругах небезпека постійного струму зростає.

Із збільшенням частоти змінного струму повний опір тіла людини Z_h зменшується (1), що призводить до зростання струму через тіло людини. Але значна біологічна дія змінного струму зберігається лише для невеликих частот – до 100-1000 Гц, подальше зростання частоти струму не веде до серйозного ураження організму, зберігається небезпека лише виникнення опіків. На частотах вище 100 кГц дія струму переходить в чисто теплову. Небезпеки ураження повністю зникає при частоті 450–500 кГц.

Фізична дія електричного струму на організм зводиться до теплового і електролізного ефектів. Біологічна дія проявляється в спотворенні біопотенціалів мембран, порушенні обміну речовин, функцій саморегуляції та подразливості, розбалансуванні узгодженої взаємодії між усіма рівнями організму під впливом фізичних факторів. Зростання частоти зовнішнього електричного подразнення блокується інерційністю компонентів організму.

Порядок виконання роботи:

1. Для отримання правильних результатів вимірювань і попереджень можливих ушкоджень прилад необхідно притримуватись наступних правил:

- витримати прилад не менше 4 год в робочих кліматичних умовах, якщо прилад тривалий час знаходився в кліматичних умовах, відмінних від робочих;
- встановити електрохімічне джерело струму в камеру, відповідно до полярності підключення;
- встановити прилад в горизонтальне положення;
- натисненням на кнопку “1” ввімкнути автоматичний захист або ж переконатись, що вона ввімкнена.

2. Схеми підключення прилада при різних вимірюваннях вказані на зворотній стороні корпусу прилада на кришці камери електрохімічного джерела струму.

3. Ввімкнути одну із кнопок перемикача роду роботи “ – “, “ ~ “ або обидві одночасно при вимірюванні опору постійному струму і електричної ємності.

4. Встановіть перемикач діапазонів вимірювань в одне із фіксованих положень, відповідне передбачуваному значенню вимірюваної величини.

5. При одночасно натиснених кнопках “V, mA” та “ – “ або “ ~ “ кінцеві значення діапазонів вимірювань сили і напруги постійного і змінного струму подвоюються.

6. Перед вимірюванням опорів в діапазоні вимірювань “Ω” ручкою установки нуля омметра встановіть стрілку на відмітку “∞” шкали “Ω”, а в діапазоні вимірювань “кΩ, пF” ручкою встановіть стрілку на відмітку “0” шкали “кΩ, пF”, передбачливо закорочуючи гнізда для приєднання опору при вимірюванні опорів, та подавши на відповідні гнізда напругу живлення фарадметра при вимірюванні ємності.

7. Підключити прилад до досліджуваного елемента і визначити значення вимірюваної величини по відповідній шкалі відрахункового пристрою і по положенню перемикача діапазонів кнопки “V, mA”.

УВАГА! Після закінчення вимірювань перемикач кінцевих значень діапазонів вимірювань установіть у положення “0”. Кнопки перемикача роду робіт повинні бути у виключеному положенні.

Шлях протікання струму	Рука – рука		Рука - нога	Нога – нога
	сухі	вологі		
Опір				

Зазначте найнебезпечніший шлях протікання електричного струму. Зробіть висновок про стан Вашої шкіри (тіла).

Дайте відповіді на запитання:

1. Який вид електричного струму є безпечнішим для живого організму при значеннях прикладеної напруги менших (помірно більших) промислової? Відповідь поясніть.

2. Чому в побуті та промисловості використовують змінний електричний струм частотою 50 Гц, а в медичних закладах в лікувальних цілях терміново застосовують електроустановки, періодичність змін електричного струму в яких перевищує 1000 Гц?

3. Як впливає відносна вологість навколишнього середовища на ймовірність ураження електричним струмом живого організму? Відповідь поясніть.

Лабораторна робота № 21

ДОСЛІДЖЕННЯ СВІТЛА ТА КОЛЬОРОВОГО ЗОРУ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНОЇ ГРАТКИ.

Прилади та обладнання: дифракційна ґратка, гоніометр з колімаційною та зоровою трубою, джерело світла.

Мета роботи: засвоїти метод визначення довжини світлових хвиль.

Коротка теорія і метод вимірювань

Через світло людина сприймає 90% інформації. У кольоровому сприйнятті зображень особливу роль відіграють колбочки. Три типи колбочок забезпечують сприйняття синього, зеленого і червоного світла, а також всіх інших кольорів як їх комбінацію. У людей порушення сприйняття кольору (дальтонізм) пов'язане з недостатньою активністю будь-яких груп колбочок.

Світло є одним з найважливіших факторів, які впливають на тварин. Крім енергетичних, часових параметрів освітлення особливу роль відіграють спектральні характеристики світла. Світло червоної ділянки спектра зумовлює підвищення подразливості тварин, фіолетової - сприяє підвищенню продуктивності, синьої - впливає на процеси відкладання сала у свиней, зеленої - підвищує вміст гемоглобіну у крові.

Біле світло розкладається на спектр за допомогою дифракційної ґратки. Цією властивістю дифракційних ґраток користуються при спектральних дослідженнях.

Дифракцією світла називається відхилення світлових хвиль від прямолінійного поширення, не викликане відбиванням або заломленням променів світла. Дифракція світла присутня завжди там і тоді, коли відбувається обмеження світлового фронту хвилі. Спостерігати її найлегше при проходженні світла через малі отвори або біля малих непрозорих перепон. Для одержання дифракційних спектрів виготовляють так звані дифракційні решітки (ґратки), які являють собою сукупність паралельних, близько розміщених одна від одної щілин або відбиваючих смужок. Існує кілька способів виготовлення дифракційних ґраток. В одному з них скляну пластинку покривають тонким непрозорим шаром м'якого металу (Al, Ag) і надтонким кістяним різцем за допомогою ділильної машини подряпують в шарі вузькі шпарини (50-1200 шпарин на 1 мм довжини). В іншому способі подряпини наносять на поверхню прозорої тонкої плівки, а проміжки між подряпинами служать щілинами. Існують відбивальні ґратки у вигляді металічних дзеркал з нанесеними на них штрихами.

Розрахунок дифракційної картини робиться згідно з принципом Гюйгенса-Френеля та принципом Юнга для інтерференції світлових променів. Згідно з вказаними принципами, кожен точку хвильового фронту можна розглядати як точкове джерело вторинних сферичних хвиль, між

якими відбувається накладання – інтерференція. Визначаючи результат інтерференції хвиль від усіх точок фронту, вдається пояснити всі закономірності дифракції світла.

При падінні паралельного пучка променів (рис. 1) на дифракційну ґратку плоский фронт світлової хвилі АВ проходить через всі щілини в одній

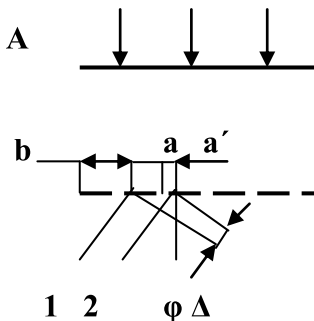


Рис. 1

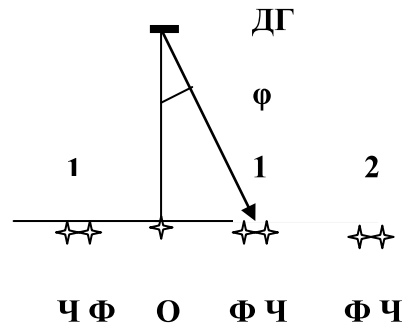


Рис. 2

фазі. В деяку точку екрана під кутом φ до початкового напрямку йдуть промені, що інтерферують. Між двома променями (1 і 2) від сусідніх щілин в даному напрямку виникає різниця ходу променів Δ

$$\Delta = b \sin(\varphi), \quad (1)$$

де $b = a + a'$ - називається сталою ґратки і визначається числом щілин n на одиницю довжини ґратки

$$b = 1/n \quad (2)$$

Промені від сусідніх щілин (отже і від усіх щілин) дають максимум інтерференції при різниці ходу у ціле число довжин хвиль λ

$$\Delta = k \lambda, \quad k = 0, 1, 2 \dots \quad (3)$$

Поєднуючи формули (1) та (3), виведемо:

$$\lambda = \frac{b \sin \varphi}{k}, \quad (4)$$

Умову мінімуму інтерференції одержуємо при різниці ходу у напівціле число довжин хвиль

$$\Delta = (k + 1/2) \lambda \quad (5)$$

При падінні на ґратку монохроматичного (однокольорового) світла на екрані виникають однокольорові смуги. Біле світло утворює на екрані

різнокольорові смуги (рис. 2), тому що умови максимуму для різних довжин хвиль задовольняються при різних кутах φ : на екрані біле світло розкладається на спектр першого ($k=1$), другого ($k=2$), третього і т.д. порядків. Цією властивістю дифракційних ґраток користуються при спектральних дослідженнях.

Дифракційні спектри одержують не гірші за дисперсійні, а прилади з добрими дифракційними ґратками мають переваги перед призматичними.

В даній роботі дифракційна ґратка застосовується для визначення довжин хвиль червоного, зеленого та фіолетового променів при використанні співвідношення (1) для максимуму інтерференції (3). Для визначення довжини хвилі використовуються чітко видимі спектри першого та другого порядків. При цьому вимірюються кути φ і за (4), при відомому b обчислюється довжини хвиль λ . При вимірюванні світло від джерела пропускається через коліматор – пристрій для одержання вузького пучка паралельних променів. Пучок променів падає на дифракційну ґратку і зазнає дифракції. Повертаючи зорову трубу праворуч-ліворуч, відшуковують напрямки, у яких досліджувані промені утворюють інтерференційні максимуми. Для точного відліку кутів застосовується градусна шкала з ноніусом, що дає можливість вимірювати кути з точністю до 6 кутових хвилин.

Порядок виконання роботи:

1. Перевірте установку щілин коліматорної труби проти лампи (джерело світла). Ввімкніть світло та, повертаючи зорову трубу лімбом гоніометра, впевніться в наявності спектрів першого та другого порядків.

2. Виконайте вимірювання для червоних променів. Для цього лімбом гоніометра встановіть нитку зорової труби на праву межу червоного світла в правому спектрі першого порядку та зніміть відлік кута φ' за лімбом та ноніусом. Знайдіть кут φ'' , що відповідає максимуму червоного світла в лівому спектрі першого порядку. Усереднене значення кута φ знайдіть за формулою:

$$\varphi = (\varphi' - \varphi'')/2 \quad (6)$$

3. За формулою (4), при $k = 1$ та $b = 10^{-5}$ м (100 щілин на 1 мм) визначте, використовуючи таблицю синусів (таблиця 1) довжину хвилі червоного світла.

4. Повторіть дії пунктів 2 та 3 для червоного світла спектрів другого порядку, приймаючи $k=2$.

5. Виконайте дії пунктів 2, 3, 4 для максимуму зеленого та лівої границі фіолетового світла.

6. Дані вимірювань та розрахунків занесіть до таблиці 2.

7. Зробіть висновок відносно особистого кольорового зору, якщо у нормі людина бачить електромагнітне випромінювання у межах 400-700 нм.

Таблиця синусів малих кутів

Кут φ	0′	10′	20′	30′	40′	50′
0°	0,0000	0,0029	0,0058	0,0087	0,0116	0,0175
1°	0,0175	0,0204	0,0233	0,0262	0,0291	0,0320
2°	0,0349	0,0378	0,0407	0,0436	0,0465	0,0494
3°	0,0523	0,0552	0,0581	0,0610	0,0640	0,0669
4°	0,0698	0,0727	0,0756	0,0785	0,0814	0,0843
5°	0,0872	0,0901	0,0929	0,0958	0,0987	0,1016
6°	0,1045	0,1074	0,1103	0,1132	0,1161	0,1190
7°	0,1219	0,1248	0,1276	0,1305	0,1334	0,1363
8°	0,1392	0,1421	0,1449	0,1478	0,1507	0,1708
9°	0,1564	0,1593	0,1622	0,1650	0,1679	0,1708
10°	0,1736	0,1765	0,1794	0,1822	0,1851	0,1880
11°	0,1908	0,1937	0,1965	0,1994	0,2022	0,2051
12°	0,2079	0,2108	0,2136	0,2164	0,2193	0,2221

Таблиця 2

k	Ділянка спектру	φ'	φ''	φ	λ , нм	$\lambda_{\text{сер}}$	$\Delta\lambda$
1	Червоний						
	Зелений						
	Фіолетовий						
2	Червоний						
	Зелений						
	Фіолетовий						

Дайте відповіді на запитання:

1. Що називається дифракційною ґраткою?
2. Для чого застосовується дифракційна ґратка?
3. Чому дифракційна ґратка дає дисперсію світла?
4. Чому довжину хвилі електромагнітного випромінювання у світловому діапазоні зручно вимірювати не в метрах, а в нанометрах або ангстремах?

Лабораторна робота № 22.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛАЗЕРА ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНОЇ ГРАТКИ.

Прилади та обладнання: оптичний квантовий генератор (лазер) ЛГ 209, дифракційна ґратка.

Мета роботи: засвоєння принципу дії лазерів та визначення довжини хвилі лазера за допомогою дифракційної ґратки.

Коротка теорія і метод вимірювань

Лазер або оптичний квантовий генератор – штучне джерело світла, принцип дії якого базується на уявленні про дискретність енергетичних станів в атомі (квантування енергії). Термін “лазер” утворений початковими буквами слів англійської фрази “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, що означає "підсилення світла за допомогою індукованого випромінювання".

В основі роботи квантових генераторів лежить явище індукованого (вимушеного) випромінювання, суть якого полягає в наступному. Нехай електрон в атомі знаходиться у двох станах 1 та 2 (рис.1), які характеризуються енергіями W_1 та W_2 . Щоб перевести електрон з рівня 1 на більш високий енергетичний рівень 2, йому треба надати енергію, що має бути не менша за різницю $W_2 - W_1$. Енергія надається квантами (порціями) електромагнітного випромінювання (для світла - фотонами), причому, згідно гіпотезі Планка, енергія кванта ε пропорційна частоті випромінювання ν

$$\varepsilon = h \cdot \nu, \quad (1)$$

де h – стала Планка, квант дії ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с), ν – частота випромінювання, що поглинається.

Зі стану 2 до стану 1 електрон може повернутися двома способами. Перший — спонтанний (самодовільний) перехід, який супроводжується випромінюванням фотона з енергією ε , що дорівнює поглинутій енергії. Оскільки різні атоми випромінюють незалежно один від одного, то спонтанне випромінювання є некогерентним (неузгодженим).

Другий спосіб повернення електрона в стан W_1 – індукований перехід, який стимулюється дією зовнішнього випромінювання з енергією фотонів ε , рівною різниці енергій $W_2 - W_1$. Супроводжує індуковані переходи випромінювання (вимушене випромінювання) має ту ж саму частоту, спрямованість поширення, поляризацію та фазу, що і вимушуюче випромінювання. Однаковість фаз вимушуючого та індукованого

випромінювань зумовлює когерентність (фазову синхронність) індукованого випромінювання.

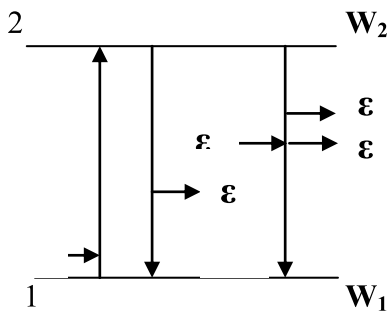


Рис.1

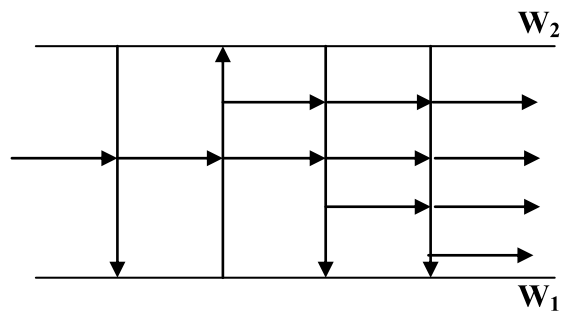


Рис.2

Звичайно під дією випромінювання з енергією ϵ відбуваються одночасно як переходи електронів до збудженого стану, так і індуковані переходи до нормального стану. В системах, що знаходяться в стані термодинамічної рівноваги, найбільше число електронів знаходиться в стані 1, тому під дією зовнішнього випромінювання переважно йдуть процеси поглинання випромінювання з переходом в стан 2. Якщо ж створити таку систему, в якій число електронів у збудженому стані (верхній рівень) більше, ніж в основному стані (нижній рівень), то дія випромінювання з енергією ϵ викличе переважно індуковані переходи. Схема цього процесу подана на рис.2.

Системи, у яких число електронів у збудженому стані більше ніж в основному, називають системами з інверсною заселеністю рівнів. В залежності від способу створення інверсної населеності (способу накачки) розрізняють попереднє опромінення робочого середовища світлом (оптична накачка), збудження середовища електричним струмом (наприклад, газовий розряд), хімічна накачка і т. і.

Лазери можуть відрізнитись режимом роботи (неперервний та імпульсний), робочим середовищем (газові, рідинні, твердотільні, зокрема напівпровідникові, кристалічні, аморфні і т. д.), конструкцією резонатора.

Характерні особливості лазерного випромінювання:

1. Висока монохроматичність випромінювання (відхилення від основної частоти випромінювання лазера в 10^4 - 10^8 разів нижча, ніж у самих вузьких спектральних ліній спонтанного випромінювання, що спостерігаються у природі - природні джерела електромагнітного випромінювання генерують хвилі в значно ширшому інтервалі частот).

2. Поляризованість випромінювання – коливання електричного або магнітного поля випромінювання відбувається строго вздовж однієї прямої, перпендикулярної до напрямку поширення хвилі. Повністю поляризовані світлові пучки невисокої інтенсивності від інших джерел можна одержати тільки за допомогою додаткових приладів.

3. Висока спрямованість випромінювання. Світловий потік лазерного випромінювання може бути зосереджений в межах малого тілесного кута з

розходженням променів на рівні кутових секунд (у прожекторів кут розходження променів 2-3° - в тисячі разів більший).

4. Висока інтенсивність випромінювання – досягнення значних середніх потужностей лазерів (100-1000 Вт) у вузьких світлових пучках дає можливість формувати енергетичні потоки надвисокої інтенсивності – в імпульсних лазерах та лазерних системах $\sim 10^{14}$ - 10^{20} Вт/м², (для порівняння – середня інтенсивність сонячного випромінювання поблизу земної поверхні становить 10^3 Вт/м²).

5. Висока ефективна температура лазерного випромінювання – якщо розрахувати температуру тіла, що генерує лазерне випромінювання, то навіть при невеликих середніх потужностях випромінювання, вказана температура повинна бути порядків десятків мільйонів градусів!

6. Гранична напруженість електричного і магнітного полів в лазерному випромінюванні – при вказаних інтенсивностях випромінювання в електромагнітних хвилях розвивається напруженість $\sim 10^{10}$ В/м, які перевищують навіть напруженості полів в атомах (напруженості електричного поля в світлових хвилях $< 10^4$ В/м), що веде до екстраординарних явищ нелінійної оптики та квантової електродинаміки, зокрема пробою вакууму та ін.

Вказані особливості лазерного випромінювання є похідними від основної властивості – когерентності, узгодженості випромінювання. Інші джерела когерентного світла невідомі. В принципі, лазери (оптичні квантові генератори) можна назвати штучними когерентними ліхтарями.

Унікальні характеристики лазерного випромінювання знаходять своє застосування у ветеринарній хірургії, терапії та діагностиці, зокрема при проведенні безкровних і стерильних операцій (наприклад, з такою метою застосовують СО₂-лазер, який має потужне випромінювання). У зооінженерній практиці лазерна техніка (як правило, випромінювання низькоенергетичного гелій-неонового лазера) використовується при вимірюванні росту тварин, для оцінки рухливості сперміїв, для підрізки крил домашньої птиці з метою підвищення їх продуктивності.

В даній роботі вивчається гелій-неоновий лазер, в якому інверсна заселеність створюється газовим розрядом. Робоча речовина в даному типі лазерів – гелій-неонова суміш газів під тиском близько 1 мм. рт. ст. – міститься в кварцевій трубці, на кінцях якої розміщені два дзеркала: одне – з високою відбиваючою здатністю, друге – напівпрозоре. Газовий розряд в трубці підтримується високочастотним генератором. Напівпрозоре дзеркало пропускає до кількох відсотків падаючого на нього світла, а решту випромінювання відбиває у випромінююче (робоче) середовище. В результаті кожний фотон, перш ніж вийти через напівпрозоре дзеркало, багаторазово пронизує активну речовину лазера, викликаючи індуковане випромінювання багатьох збуджених атомів. Цим досягається велика густина випромінювання. Багаторазово можуть відбитися від дзеркала тільки ті промені, що падають на дзеркало перпендикулярно до його поверхні, тому випромінювання зосереджено в межах вузького тілесного кута. Цим

визначається можливість одержання в лазерах променів малої розбіжності та великої яскравості.

Визначення довжини хвилі випромінювання лазера в данній роботі проводиться за допомогою установки, схема якої приведена на рис. 3.

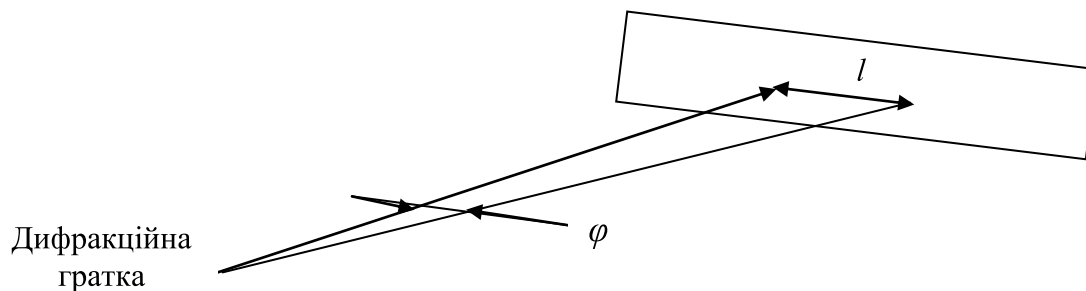


Рис. 3.

Світло від лазера падає на дифракційну ґратку, при цьому на екрані спостерігається дифракційна картина. Умова спостереження максимумів освітленості на екрані визначається рівнянням:

$$b \sin(\varphi) = k\lambda, \quad (2)$$

де:

λ – довжина хвилі випромінювання лазера;

$k = 0, 1, 2, \dots$ - порядок дифракційного максимуму;

b – стала дифракційної ґратки, яка дорівнює відстані між сусідніми щілинами;

φ – дифракційний кут, утворений напрямом первинного пучка та напрямом від дифракційної ґратки на максимум k -го порядку.

З формули (2) випливає, що

$$\lambda = \frac{b \sin(\varphi)}{k}, \quad (3)$$

Згідно з рис. 3 синус кута φ може бути визначений за співвідношенням

$$\sin(\varphi) = \frac{l}{\sqrt{L^2 + l^2}}, \quad (4)$$

Відстань L від дифракційної ґратки до екрана змінюється переміщенням екрана вздовж оптичної лави і вимірюється масштабною лінійкою. Відстань l визначається за шкалою на екрані.

Порядок виконання роботи:

1. З дозволу викладача ввімкніть лазер в мережу та вивчіть дифракційну картину на екрані.

2. Установіть екран на вказаній викладачем відстані L від дифракційної ґратки перпендикулярно до напрямку первинного пучка лазера.

3. Знайдіть положення трьох максимумів: l'_1, l'_2, l'_3 - праворуч від нульового (центрального) максимуму та l''_1, l''_2, l''_3 - ліворуч від нульового максимуму.

4. Знайдіть положення максимумів на екрані як середнє між вимірами праворуч та ліворуч:

$$l_1 = (l'_1 + l''_1) / 2; \quad l_2 = (l'_2 + l''_2) / 2; \quad l_3 = (l'_3 + l''_3) / 2.$$

5. Користуючись формулою (4) за даними l_1, l_2, l_3 визначте величину $\sin \varphi$.

6. Визначте довжину хвилі лазера за формулою (3). За трьома одержаними значеннями λ обчисліть $\lambda_{\text{сер}}$. Оцініть похибки вимірювань та наведіть остаточний результат.

Дані вимірювань та розрахунків подайте в таблиці:

k	l'	l''	l	$\sin \varphi$	λ	$\Delta \lambda$
1						
2						
3						
Середнє значення:						

Дайте відповіді на запитання:

1. Що означає англійська фраза “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”?
2. Що становить принципову основу дії лазера? Які речовини можуть бути робочими в лазерах?
3. Які характерні особливості лазерного випромінювання?
4. Де можна використати характерні властивості лазерів?

ЗБІРНИК ЗАДАЧ

1. Гемодинаміка. Властивості біологічних рідин

Закон (рівняння) **нерозривності** потоку:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

або $Sv = const$, де v_1 і v_2 – швидкості нестисливої рідини у перерізах S_1 і S_2 гнґре. Об'ємний розхід $Q = Sv$ є об'єм рідини, що протікає крізь трубку течії з перерізом S в одиницю часу, тобто $Q = V/t$, де V – об'єм, t – час. При розгалуженні потоку, наприклад, артерії на капіляри, згідно закону нерозривності сумарний розхід крізь усі розгалуження не змінюється.

Закон (рівняння) **Бернуллі**:

$$p_1 + \rho v_1^2 / 2 + \rho g h_1 = p_2 + \rho v_2^2 / 2 + \rho g h_2 \text{ або } p + \rho v^2 / 2 + \rho g h.$$

де p_1 і p_2 – тиск, v_1 і v_2 – швидкість, h_1 і h_2 висота рідини на ділянках 1 і 2, ρ – густина рідини, g – прискорення вільного падіння. Роботу A , що витрачається на переміщення об'єму V нестисливої рідини з ділянки 1 до ділянки 2 потоку в умовах тертя, визначають за формулою: $A = V [(p_1 - p_2) + \rho(v_1^2 - v_2^2)/2 + \rho g(h_1 - h_2)]$. Якщо робота в потоці не виконується, тобто $A=0$, прийдемо до закону Бернуллі. Величину $\rho v^2/2$ називають (гідро)динамічним тиском – це додатковий тиск, що виникає, якщо зупинити потік. Величину $\rho g h$ називають ваговим тиском – це додатковий тиск внаслідок ваги стовба рідини висотою h .

Між шарами рідини або газу при різниці їх швидкостей виникає сила внутрішнього тертя, яку визначають за законом **Ньютона** для в'язкої рідини:

$$F = - \eta (\Delta v / \Delta z) S,$$

де S – площа контакту шарів, $\Delta v / \Delta z$ – градієнт швидкості шарів (відношення зміни їх швидкості Δv до відстані Δz перпендикулярної шарам), η – динамічний коефіцієнт в'язкості (коефіцієнт внутрішнього тертя) рідини або газу.

Об'ємний розхід в'язкої рідини крізь циліндричні трубки визначають за формулою **Гагена-Пуазейля**:

$$Q = \pi r^4 (p_1 - p_2) / 8 \eta l$$

де r і l – радіус і довжина труби, p_1 і p_2 – тиски на кінцях труби, η – коефіцієнт вязкості рідини. За допомогою формули визначають коефіцієнт вязкості рідини на капілярних віскозиметрах. Величину $Z = 8 \eta l / \pi r^4$ називають гідравлічним опором труби. Як і електричний опір, повний гідравлічний опір при послідовному з'єднанні труб та при паралельному їх з'єднанні знаходиться за формулами: $Z = Z_1 + Z_2 + \dots$ та $1/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2 + \dots$

Силу опору, що діє на сферичне тіло у рідині (газі) визначають за законом **Стокса**:

$$F = 6 \pi \eta r v,$$

де r і v – радіус тіла та його швидкість відносно середовища. Іноді цю формулу застосовують до несферичних тіл, користуючись так званим гідродинамічним (стоксівським) радіусом або діаметром. Прикладом є розрахунки швидкості осідання еритроцитів (ШОЕ), або спливання кульок жиру у молоці. При коагуляції (злипанні) частинок користуються гідродинамічним діаметром конгломератів (згустків) частинок.

Гематокрит крові Φ є відношення об'єму формених елементів V_ϕ до об'єму крові V , у відсотках: $\Phi = (V_\phi / V) \cdot 100\%$. Існує зв'язок в'язкості крові η_k і в'язкості плазми η_n з гематокритом: $\eta_k = \eta_n (1 - \sqrt{\Phi})$ – емпірична формула **Хатчека**.

Швидкість **пульсової хвилі** вздовж артерії визначають за формулою:

$$v_n = \sqrt{\frac{E}{3\rho} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]}$$

де E – модуль Юнга, d і D – внутрішній і зовнішній діаметри судини, ρ – густина судини.

Перенос маси m при дифузії через поверхню площею S , за час t визначають за законом **Фіка**:

$$m = -D(\Delta\rho/\Delta z) \cdot S \cdot t,$$

де D – коефіцієнт дифузії, $\Delta\rho/\Delta z$ – градієнт густини ρ . Робота при дифузії: $A = \nu RT \ln(C_1/C_2)$, де $\nu = m/\mu$ – кількість молей речовини, що перенесена від ділянки 1 до ділянки 2 з різними концентраціями речовини C .

Дифузія розчинника через напівпроникну мембрану (явище осмосу) створює додатковий осмотичний тиск, який для малих молярних концентрацій C визначають за законом **Вант-Гоффа**:

$$p_{сн} = (\alpha + I) CRT,$$

де R) – газова стала, T – абсолютна температура, α – ступінь дисоціації розчиненої речовини. Онкотичний тиск є складовою осмотичного тиску і виникає, якщо у розчині присутні білки.

Сила **поверхневого натягу** рідини визначається за формулою: $F = \sigma l$, де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, l – довжина лінії розриву рідини. Робота A , що витрачається на збільшення площі поверхні рідини на величину ΔS , визначається як: $A = \sigma \Delta S$. Висота рідини у капілярі: $h = 2\sigma \cos\theta / \rho gr$, де θ – кут змочування, r – радіус капіляра, ρ – густина рідини. Для більшості біологічних рідин змочування скла повне – $\theta = 0$.

Характер течії рідини визначають за числом **Рейнольдса**: $Re = d\rho v/\eta$, де d – діаметр потоку, ρ – густина рідини, v – її швидкість, η – її в'язкість. Якщо $Re < Re_{кр}$, течія ламінарна, при $Re > Re_{кр}$, – турбулентна.

- 1.1. Швидкість течії крові у артерії 16 см/с, діаметр артерії 3 мм. Знайти швидкість течії цієї крові у капілярах, якщо їх середній діаметр 10 мкм, а кількість $6 \cdot 10^7$.
- 1.2. Як змінилась швидкість течії крові у аорті, якщо внаслідок аневризми її діаметр збільшився у 2 рази?
- 1.3. Знайти додатковий тиск крові на рівні стопи людини, зріст якої 170 см.
- 1.4. Швидкість руху крові у променевої артерії 0,6 м/с, діаметр артерії 4 мм. Чи буде рух ламінарним?
- 1.5. Знайти густину еритроцитів, якщо швидкість їх осідання у крові 10 мм/год. Гідродинамічний діаметр конгломератів еритроцитів 10 мкм, в'язкість і густина плазми – $1,7 \cdot 10^{-3}$ Па·с і 1025 кг/м^3 .
- 1.6. У молоці містяться мікроскопічні кульки жиру, з яких утворюються вершки. За допомогою закону Стокса визначити в'язкість молочних відвійок, якщо діаметр кульок 3 мкм і за 10 годин вони пройшли шлях 7 мм. Густина жиру 940 кг/м^3 , відвійок 1029 кг/м^3 .
- 1.7. Осмотичний тиск вторинної сечі для вищих тварин лежить у межах 1,35–2,8 МПа. Які молярні концентрації солей відповідають цьому, якщо середня ступінь дисоціації 0,8, температура тіла 37°C ?

- 1.8. Вода надходить з лімфи у кров під дією різниці онкотичних тисків. У скільки разів зміниться інтенсивність потоку води, якщо спочатку онкотичний тиск крові і лімфи відповідно дорівнював 32 і 9 мм рт.ст., а потім 29 і 11 мм рт.ст.?
- 1.9. При захворюванні діабетом летальний результат настає, коли концентрація цукру у крові досягає 0,25 вагових відсотків. Яким буде осмотичний тиск цукру? Температура тіла 37°C , дисоціація молекул цукру $(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6)_2$ відсутня.
- 1.10. Онкотичний тиск крові у людини 29 мм рт.ст., а лімфи – 9,5 мм рт.ст. Під дією онкотичних тисків вода надходить з лімфи у кров. Визначити роботу переміщення 25 г води при температурі 37°C .
- 1.11. У нирках з крові у сечу надходить 50 мл води при температурі 37°C . Визначити, у скільки разів осмотичний тиск вторинної сечі більше тиску плазми крові, якщо осмотична робота нирок 6,7 кДж.
- 1.12. Осмотичний тиск плазми крові 0,73 МПа. Визначити молярну концентрацію протеїнів у плазмі, якщо відомо, що онкотична складова тиску у 220 разів менше тиску розчинених у плазмі солей. Ступінь дисоціації молекул 0,75, температура крові 37°C .
- 1.13. У клітинах солончакових рослин осмотичний тиск досягає 10 МПа. Визначити молярну концентрацію розчинених речовин, якщо температура 27°C , дисоціація молекул відсутня.
- 1.14. Швидкість осідання еритроцитів у людини за нормою 8 мм/год. У запальному процесі еритроцити злипаються у грудочки, середній діаметр яких на 30% більше діаметру еритроциту, а в'язкість плазми зменшується на 15%. Якою стане швидкість осідання еритроцитів?
- 1.15. Яка різниця тиску встановиться на ділянці артерії з внутрішнім діаметром 3 мм і довжиною 10 см, якщо об'ємний потік крові крізь артерію дорівнює $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, а її в'язкість $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.
- 1.16. У аорті бика діаметром 3,2 см швидкість руху крові досягає 60 см/с. В цих умовах течія ламінарна чи турбулентна ?
- 1.17. Який максимальний об'єм крові за секунду може протікати крізь артерію з внутрішнім діаметром 4 мм, щоб течія була ламінарною? В'язкість крові прийняти $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, густину - $1050 \text{ кг}/\text{м}^3$.
- 1.18. Визначити час проходження крові крізь капіляр віскозиметру, якщо той же об'єм води протікає крізь нього за 10 с. Густина крові $1050 \text{ кг}/\text{м}^3$, в'язкість відносно води 5.
- 1.19. Діаметр поршня шприца 2 см, хід поршня 8 см. Яку силу треба прикласти до поршня, щоб час ін'єкції складав 10 с ? В'язкість рідини $2 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.
- 1.20. У широкій частині горизонтальної труби молоко рухається під тиском 2 атм з швидкістю 8,5 км/год. Визначити тиск у вузькій частині труби, де швидкість течії 20 км/год. Густина молока $994 \text{ кг}/\text{м}^3$.
- 1.21. Діаметр молокопроводу 30 мм, швидкість молока 10 км/год, його густина $994 \text{ кг}/\text{м}^3$. Яка маса молока витече за хвилину ?

- 1.22. Швидкість осідання еритроцитів у плазмі крові з добавкою антикоагулятору 0,7 мм/год. Визначити діаметр еритроциту, враховуючи їх сферичними і застосовуючи для розрахунку закон Стокса. Густина плазми 1030 кг/м^3 , еритроцитів – 1090 кг/м^3 .
- 1.23.3 якою швидкістю рухається кров в артерії, якщо різниця висот крові у трубці Піто та зондовій трубці, занурених в артерію, складає 5 мм ?
- 1.24. Знайти гідродинамічний тиск крові у судині, якщо швидкість руху крові 0,1 м/с, густина 1050 кг/м^3 .
- 1.25. Яку роботу виконує серце за 1 скорочення, якщо систолічний тиск 100 мм рт. ст. , діастолічний – 70 мм рт.ст., систолічний об'єм 60 мл, швидкість крові у аорті 0,5 м/с, у порожистій вені – 0,1 м/с ?
- 1.26. Знайти об'ємну витрату крові у судині діаметром 5 мм, якщо різниця тисків на ділянці судини довжиною 10 см складає 15 мм рт.ст., а в'язкість крові $4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.
- 1.27. Знайти гідравлічний опір судини діаметром 3 мм і довжиною 80 мм. В'язкість крові $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.
- 1.28. У капілярному віскозиметрі вода витікає за 1,5 хвилини, а той же об'єм молочних відвійок – за 105 с. Визначити коефіцієнт в'язкості відвійок. Різницею гутини відвійок і води знехтувати.
- 1.29. Знайти діаметр судини, якщо об'ємна витрата крові $15 \text{ см}^3/\text{с}$, в'язкість $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, градієнт тиску 15 мм рт.ст./см.
- 1.30. Знайти гематокрит, якщо форменні елементи складають чверть ваги крові. Густина елементів прийняти 1090 кг/м^3 , крові – 1050 кг/м^3 .
- 1.31. Знайти гематокрит, якщо в'язкість крові у 3 рази більша ніж плазми.
- 1.32. Тиск крові на рівні серця собаки 110 мм рт.ст. Знайти тиск крові на рівні лап, якщо різниця рівнів 40 см, густина крові 1050 кг/м^3 .
- 1.33. Судина діаметром 1,5 мм і довжиною 30 мм поділяється на 8 судин з середнім діаметром 0,5 мм і довжиною 40 мм. Знайти гідравлічний опір наведеної системи, якщо в'язкість крові $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.
- 1.34. Як зміниться гідравлічний опір судинної системи, якщо в'язкість крові після прийому аспірину зменшиться на 3% ?
- 1.35. Визначити гідродинамічний тиск крові у аорті, якщо швидкість її проходження 0,5 м/с, густина 1050 кг/м^3 .
- 1.36. Визначити потужність серця, якщо систолічний тиск 100 мм рт. ст., діастолічний – 70 мм рт.ст., систолічний об'єм 600 мл, час скорочення шлунків 0,25 с. Тиск на вході в передсердя прийняти 0, кінетичною енергією крові знехтувати.
- 1.37. Швидкість осідання еритроцитів 0,8 мм/год, густина – 1094 кг/м^3 , в'язкість плазми $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, густина - 1027 кг/м^3 . Визначити гідродинамічний діаметр еритроцитів.
- 1.38. Визначити молярну концентрацію солей у розчині, якщо осмотичний тиск 20 мм рт.ст., температура 27°C , ступень дисоціації 0,8.
- 1.39. Як зміниться швидкість руху крові, якщо діаметр судини збільшиться на 10% ? Об'ємну витрату крові розглядати як незмінну.

- 1.40. Як швидко наповниться 80-літрова ємність молоком, якщо діаметр молокопроводу 30 мм, швидкість течії молока 10 км/год.?
- 1.41. Внутрішній діаметр артерії 3 мм, зовнішній – 3,5 мм, модуль Юнга для стінок судини 10^6 Н/м², густина крові 1060 кг/м³. Знайти швидкість пульсової хвилі вздовж артерії.
- 1.42. Внаслідок атеросклерозу модуль Юнга для стінок артерій і швидкість пульсової хвилі збільшились на 20%. Знайти патологічне співвідношення внутрішнього і зовнішнього діаметрів артерії, якщо у нормі воно дорівнює 0,9.
- 1.43. Як зміниться артеріальний тиск крові і потужність серця, щоб забезпечити сталий хвилинний об'єм, якщо внаслідок атеросклерозу внутрішній діаметр судин зменшився на 10% ?
- 1.44. Діаметр молокопроводу 3 см. При якій критичній швидкості молока течія із ламінарної перетворюється на турбулентну ? Прийняти густину і в'язкість молока відповідно 10^3 кг/м³ і 10^{-3} Па·с.
- 1.45. Знайти швидкість осідання крапель оксигумату натрію діаметром 30 мкм у повітрі. Коефіцієнт внутрішнього тертя повітря $1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с, густина повітря – 1,29 кг/м³, оксигумату – 1200 кг/м³.
- 1.46. Порівняйте час осідання з висоти 100 м крапель туману діаметром 0,01 мм і крапель дощу діаметром 1 мм. Коефіцієнт внутрішнього тертя повітря $1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с, густина – 1,29 кг/м³.
- 1.47. Лікар приписав хворому прийняти 60 крапель ліків. Скільки крапель необхідно прийняти, якщо температура у кімнаті знизилась і коефіцієнт поверхневого натягу збільшився з 71,9 до 74,3 мН/м ?
- 1.48. Яка робота виконується при подрібненні сферичної краплі ліків на 10^6 аерозольних частинок діаметром 10 мкм. Коефіцієнт поверхневого натягу ліків прийняти 72 мН/м.
- 1.49. При взятті крові на аналіз на шкірі роблять розріз і до нього підводять кінчик капілярної трубки. Знайти коефіцієнт поверхневого натягу крові, якщо кров у капілярі піднялась на висоту 38 мм. Діаметр капіляра 0,3 мм, змочування повне.
- 1.50. Визначити коефіцієнт поверхневого натягу сечі, якщо при витіканні однакового об'єму дистильованої води і сечі утворюється відповідно 150 і 158 крапель. Коефіцієнт поверхневого натягу води 73 мН/м.
- 1.51. Знайти кількість газу, що продифундує за 24 години крізь 1 м² ґрунту, якщо коефіцієнт дифузії $0,05$ м²/с, градієнт густини $4 \cdot 10^{-5}$ кг/м⁴.
- 1.52. Визначити градієнт густини вуглекислого газу у ґрунті, якщо крізь площу 1 см² за 1 добу в атмосферу пройшов газ масою 10^{-8} кг. Коефіцієнт дифузії $0,04$ м²/с.
- 1.53. Капіляр радіусом 1,5 мм занурений у рідину. Знайти коефіцієнт поверхневого натягу рідини, якщо вага стовбчика рідини у капілярі 10^{-5} кГ, кут змочування 60° .
- 1.54. Визначити висоту, на яку підіймається сироватка крові у капілярі діаметром 0,5 мм. Коефіцієнт поверхневого натягу сироватки прийняти 40 мН/м, густина сироватки 1 г/см³. Змочування повне.

- 1.55. Визначити висоту, на яку підіймається вода у стеблинах рослин, що мають капіляри діаметром 3 мкм. Коефіцієнт поверхневого натягу води 72 мН/м, змочування повне.
- 1.56. Враховуючи діаметри капілярів в ґрунті в середньому рівними 0,2 мм, знайти висоту, на яку підійметься вода у ґрунті. Прийняти коефіцієнт поверхневого натягу води 73 мН/м, змочування повне.
- 1.57. Середній діаметр жирових кульок у свіжому молоці 3 мкм. Визначити швидкість спливання кульок. Густина жиру 900 кг/м³, в'язкість відвіток 1,1 мПа·с.
- 1.58. У посудину, яка напівпроникною мембраною поділена на 2 частини, налитий розчин кухонної солі, ступінь дисоціації якої 0,9. Концентрація розчину у одній частині вдвічі більша і дорівнює 1 моль/м³. Знайти різницю рівня розчинів при температурі 27°C.
- 1.59. Градієнт швидкості крові біля стінки аорти 50 с⁻¹, коефіцієнт в'язкості 5·10⁻³ Па·с. Яка сила діє вздовж 1 см² стінки?
- 1.60. Завдяки прийому аспірину коефіцієнт в'язкості крові зменшився на 10%. Як зміниться різниця артеріального і венозного тисків, якщо серце забезпечує сталий хвилинний об'єм?

2. Біоакустика

Період T і частота ν **коливань** співвідносяться як $T=1/\nu$. Кутова (циклічна) частота $\omega=2\pi\nu$. Рівняння гармонічних коливань $x=A\cos(\omega t+\varphi)$, або $x=A\cos(\omega t+\varphi)$, де A - амплітуда і φ - (початкова) фаза коливань. Акустичним спектром складних коливань називають суму Фур'є: $x(t)=\sum A_i\cos(\omega_i t+\varphi_i)$, де складову $A_i\cos(\omega_i t+\varphi_i)$ з найменшою частотою називають основним тоном, а решту доданків – обертонами.

Швидкість **хвилі** c , її довжина λ і частота ν співвідносяться як $c=\nu\lambda$. Швидкість повздовжних хвиль більша від поперечних - $c_{\parallel}=\sqrt{2}c_{\perp}$. Швидкість звуку у газах $c=\sqrt{\gamma RT/\mu}$, де $\gamma=C_p/C_v$ – відношення теплоємностей газу при сталому тиску і об'ємі ($\gamma=1,4$ для повітря і інших двоатомних газів), R – газова стала, T – абсолютна температура газу, μ -молярна маса.

Інтенсивність акустичних хвиль визначають як: $I=W/S_{\perp}t$, де W - енергія, що переноситься за час t через площу S_{\perp} перпендикулярну до напрямку розповсюдження хвилі. Акустичний тиск пов'язаний з параметрами хвилі і середовища: $p_a = A\omega\rho c$, де величину ρc називають (питомим) акустичним опором середовища. Існує зв'язок між p_a та I : $I=p_a^2/2\rho c$.

Коефіцієнт **відбиття** r є відношення інтенсивностей відбитої та падаючої хвилі: $r = I_1/I_0$. При нормальному падінні хвиль справедлива формула Релея:

$$r = \left[\frac{c_1\rho_1 - c_2\rho_2}{c_1\rho_1 + c_2\rho_2} \right]^2.$$

Коефіцієнт **пропускання** (проникнення) визначається, як: $\beta = I_2/I_0$, де I_2 - інтенсивність хвилі, що пройшла у друге середовище. Згідно закону збереження енергії $I_2=I_0-I_1$, звідки $\beta=1-r$, тому формула Релея може мати вигляд:

$$\beta = \frac{4c_1\rho_1c_2\rho_2}{(c_1\rho_1 + c_2\rho_2)^2}$$

Акустичний **резонатор**, відкритий з одного кінця, підсилює хвилю, якщо його довжина дорівнює чверті довжини хвилі.

Інтенсивність хвилі зменшується при її розсіюванні і поглинанні середовищем відповідно: $I=I_0 e^{-\delta l}$ - для плоскої хвилі та $I = \frac{N}{4\pi l^2} e^{-\delta l}$ - для сферичної хвилі, де $\delta = 16\pi^2 \eta / 3\rho c\lambda^2$ – коефіцієнт **затухання** (поглинання), l – відстань, N – потужність джерела хвилі.

Ефект **Доплера** полягає в тому, що внаслідок руху приймача відносно джерела хвилі частота ν , що реєструється приймачем, не співпадає з частотою ν_0 , що випромінює джерело:

$$\nu = \nu_0 \frac{c - u \cos \theta}{c + v \cos \varphi},$$

де u і v – швидкості приймача і джерела, θ і φ - кути векторів u і v з напрямком джерело-приймач. При відбитті хвилі під кутом φ від поверхні, що рухається із швидкістю u , доплерівський зсув частот становить: $\nu_D = \nu - \nu_0 = 2\nu_0 u \cos \varphi / (c - u \cos \varphi)$. У біології $u \ll c$, тому $\nu_D = 2\nu_0 u \cos \varphi / c$.

Рівень інтенсивності звуку L визначається як: $L = \lg(I/I_0)$, якщо її вимірюють в белах (Б), та $L = 10 \lg(I/I_0)$, якщо її вимірюють в децибелах (дБ), де I_0 – поріг чутності звуку.

- 2.1. Визначити товщину жирового шару у свині, якщо ультразвукова хвиля, відбита від переходу жирова-м'язова тканина, реєструється через 80 мкс після входу у жирову тканину.
- 2.2. Визначити швидкість пульсації стінок аорти, якщо доплеровська частота 2 кГц, частота ультразвуку 6 МГц, кут його падіння 60° , швидкість ультразвуку 1500 м/с.
- 2.3. Частота ультразвуку 50 МГц, інтенсивність $6 \cdot 10^4$ Вт/м². Знайти інтенсивність ультразвуку у мозковій тканині на глибині 6 мкм.
- 2.4. Визначити акустичний тиск ультразвуку. Амплітуда коливань 0,05 мкм, частота 6 МГц, швидкість хвилі 1480 м/с, густина крові 1060 кг/м³.
- 2.5. Поріг кавітації для чистої води дорівнює $1,5 \cdot 10^8$ Па. Яка повинна бути частота ультразвуку з амплітудою 1 мкм для утворення каверн?
- 2.6. Ультразвукові коливання випромінюються з поверхні площиною 8 см² з інтенсивністю 10^2 Вт/м². Як зміниться інтенсивність випромінювання, якщо його сфокусувати на площі 2 мм².
- 2.7. Чому дорівнює довжина хвилі ультразвуку у жировій тканині, якщо частота коливань 30 МГц, швидкість хвилі 1460 м/с?
- 2.8. Як зміниться інтенсивність ультразвуку з частотою 870 кГц, якщо він пройде шар м'язової тканини товщиною 5 см?
- 2.9. У лабораторії, яка знаходиться у приміщенні пташника, рівень інтенсивності шуму досягає 60 дБ. З метою зменшення шуму стінки обшили звукопоглинаючим матеріалом, який зменшує інтенсивність у 100 разів. Який рівень інтенсивності шуму буде у лабораторії?

- 2.10. Для зменшення відбивання ультразвуку при переході його від випромінювача у м'язову тканину між ними розміщують контакту речовину. Яким повинен бути акустичний опір цієї речовини, щоб коефіцієнт відбиття між нею і м'язом був 0,01?
- 2.11. Для лікування маститу користуються ультразвуком з інтенсивністю $8 \cdot 10^3$ Вт/м². Яка кількість енергії пройде у тканину, якщо час процедури 10 хвилин, площа випромінювача 4 см², коефіцієнт проникнення ультразвуку у тканину 0,7 ?
- 2.12. Кудкудакання курки створює рівень інтенсивності шуму 60 дБ. Який максимальний рівень інтенсивності буде у пташнику, де знаходяться 1000 курок?
- 2.13. Відповідно до санітарних норм у приміщенні з рівнем інтенсивності шумів 100 дБ людина не повинна перебувати більше 30 хвилин. Яка енергія надходить за цей час крізь барабанну перетинку ?
- 2.14. На межу розділу вода – повітря падає плоска звукова хвиля з інтенсивністю 0,6 Вт/м². Яка інтенсивність звуку, що пройде у повітря ?
- 2.15. Інтенсивність звуку, що створюється муканням бика, 10^{-4} Вт/м². Який акустичний тиск створює цей звук у повітрі ?
- 2.16. При ультразвуковій терапії суглобу ультразвук доходить до кісткової тканини, проходячи крізь шкіру товщиною 1 мм і м'язову тканину товщиною 5 см. У скільки разів інтенсивність звуку, що надходить до суглобу, менше інтенсивності на поверхні шкіри ?
- 2.17. Визначити коефіцієнт відбиття ультразвуку на межі кісткова тканина - мозок.
- 2.18. Визначити швидкість еритроциту, який рухається з потоком крові у артерії, якщо доплерівська частота при відбитті ультразвуку частотою 6 МГц від еритроциту досягає 1,8 кГц.
- 2.19. Інтенсивність звукової хвилі 10^{-4} Вт/м². Яку енергію переносить хвиля за 2 хв. крізь поверхню площею 0,6 м² при падінні під кутом 30° до нормалі поверхні?
- 2.20. Випромінювач надсилає звукову хвилю спочатку у повітря, а потім у воду. Знайти відношення акустичних тисків у повітрі і воді ?
- 2.21. Визначити коефіцієнт відбиття звукових хвиль на межі "повітря-вода".
- 2.22. Як зміниться коефіцієнт поглинання ультразвукових хвиль, якщо частота коливань стане вдвічі більша ?
- 2.23. Джерело звуку потужністю 3 Вт випромінює сферичні хвилі. Якою буде інтенсивність звуку на відстані 2 м ? Поглинанням звуку знехтувати.
- 2.24. Роль звукових резонаторів у ВРХ виконують ротові, носові порожнини, легені. Який найнижчий за частотою звук може видавати теля, якщо довжина резонатору 0,8 м ?
- 2.25. З якою швидкістю рухаються стінки аорти, якщо ультразвуковий промінь падає під кутом 30° до поверхні судини, частота ультразвуку 6 МГц, доплерівська частота при його відбитті стінкою 1,2 кГц.
- 2.26. Поріг чутливості вуха до хвиль частотою 80 Гц складає 10^{-4} Вт/м². Визначити рівень інтенсивності звуку 10^{-2} Вт/м² для цієї частоти.

- 2.27. Користуючись кривою чутливості вуха (таблиця 2 Додатку), визначити рівень інтенсивності звуку 10^{-6} Вт/м² для хвиль частотою 100 Гц, 4000 Гц та 10 кГц.
- 2.28. Яка максимальна сила діє на барабанну перетинку, якщо акустичний тиск у зовнішньому вусі 10^{-4} Па ?
- 2.29. Визначити максимальне прискорення води в ультразвуковій хвилі з інтенсивністю 10^{-2} Вт/м² і частотою 10^5 Гц. Порівняйте його з прискоренням вільного падіння на Землі.
- 2.30. Чому дорівнює довжина хвилі у м'язах і жировій тканині, якщо частота коливань 1 МГц ? Швидкість хвилі у м'язах 1550 м/с, у жирі – 1460 м/с.
- 2.31. Амплітуда гармонічних коливань ультразвукового випромінювача 5 мкм, частота 5 МГц. Визначити максимальну швидкість і максимальне прискорення частинок середовища.
- 2.32. Визначити доплерівську частоту ультразвукового вимірювача пульсу, якщо кут падіння ультразвуку 30° , його частота 500 кГц, швидкість поширення пульсової хвилі 12 м/с.
- 2.33. Визначити період коливань ультразвукової хвилі довжиною 5 мм, що поширюється у кістковій тканині.
- 2.34. Як зміниться довжина ультразвукової хвилі при переході з м'язової тканини до кісткової ?
- 2.35. Визначити акустичний опір м'язової і кісткової тканини.
- 2.36. Яка доля енергії ультразвукової хвилі перейде з м'язової тканини у кісткову ?
- 2.37. Визначити коефіцієнт поглинання ультразвуку з частотою 5 МГц у м'язовій тканині.
- 2.38. Визначити амплітуду коливань ультразвуку у воді, якщо його інтенсивність 10^3 Вт/м², частота 1 МГц.
- 2.39. Визначити акустичний тиск у повітрі, що утворює ультразвукова хвиля інтенсивністю 10^4 Вт/м².
- 2.40. Визначити кількість енергії, що падає на вим'я корови за 120 хвилин, якщо інтенсивність ультразвуку 10 Вт/м², площа, що опромінюється, 400 см².
- 2.41. Довжина ультразвукової хвилі у м'язах 4 мм, швидкість хвилі 1550 м/с. Висначити період коливань.
- 2.42. Поперечна хвиля землетрусу зареєстрована після поздовжної хвилі із запізненням 10 с. Яка відстань від епіцентру землетрусу? Швидкість поздовжної хвилі 4 км/с.
- 2.43. Рівняння складних звукових коливань $x(t) = 2 \cos^2 200t + 2 \cos 100t - 1$. Знайти основний тон і обертони звуку.
- 2.44. У скільки разів швидкість звуку у водні більш ніж у кисні ?
- 2.45. Знайти швидкість звуку у повітря взимку при -20°C і влітку при $+30^\circ\text{C}$. Середня молярна маса повітря 29 г/моль.
- 2.46. Голосові зв'язки гортані людини нагадують струни музичного інструменту. В який момент періоду T (0, $T/4$, $T/2$, $3T/4$, T) прискорення

- зв'язок максимальне? Вважати, що коливання зв'язок відбувається за законом синуса.
- 2.47.Голосові зв'язки гортані людини нагадують струни музичного інструменту. В який момент періоду T (0, $T/4$, $T/2$, $3T/4$, T) швидкість зв'язок максимальна? Вважати, що коливання зв'язок відбувається за законом косинуса.
- 2.48.В приміщенні знаходяться шестеро людей, які розмовляють з середньою інтенсивністю 10^{-8} од. SI. Чому дорівнює середній рівень інтенсивності звуку, якщо спектр розмовляючих відноситься до різних смуг слуху?
- 2.49.В приміщенні знаходяться 10 людей, які розмовляють з середньою інтенсивністю 10^{-7} од. SI. Чому дорівнює середній рівень інтенсивності звуку, якщо спектр розмовляючих відноситься до однієї смуги слуху?
- 2.50.В явищі биття відбувається накладання двох тонів з незначною розбіжністю частот: 10 Гц. Який період другого коливання, якщо циклічна частота першого становить 12560 од. SI?
- 2.51.В спектрі складного звуку містяться наступні періодичні інтервали: 0,001 с; 10 мс; 100 мкс; 1 мкс. Яка частота основного тону звуку?
- 2.52.В спектрі складного звуку містяться наступні частоти: 314 Гц; 3140 рад/с; 628 Гц; 628 рад/с; 200 Гц. Який період основного тону звуку?
- 2.53.Швидкість пульсової хвилі у тварин може досягати 1000 см/с. В акустиці використовують число Маха, яке показує перевищення швидкості руху тіла над швидкістю звуку (333 м/с). Яке “число Маха” буде відповідати систолічному викиду крові?
- 2.54.Обчисліть відношення середньої густини енергії звукової хвилі до середньої її інтенсивності.
- 2.55.Визначте максимально можливе значення доплерівського зсуву частоти звукових хвиль.
- 2.56.Визначте теоретичний зсув фази між максимумами приросту хижаків та здобичі в класичній автоколивальній моделі Вольтерра-Лотка..
- 2.57.У скільки разів відрізняються інтенсивності двох звуків при різниці їх рівнів інтенсивності на 2 дБ?
- 2.58.Музичний інтервал напівтон визначається співвідношенням частот як 15 до 16. Якому зсуву частот відповідає вказана розбіжність в зоні найкращої чутливості слуху?
- 2.59.Рівняння збурення (хвилі) на морській поверхні має вид: $\xi = a \cos(bt - cz)$ - де z - координата та t - час поширення збурення, a , b , c – числові параметри хвилі. Визначіть довжину хвилі та її період, якщо значення всіх параметрів в SI тотожно рівні одиниці.
- 2.60.Шумові норми для сну не перевищують рівень інтенсивності 30 дБ. Середній вуличний шум близький до рівня 70 дБ. На скільки відсотків зростає поглинута інтенсивність звукової енергії при вказаних трансформаціях?

3. Термодинаміка біологічних систем

Тиск p , об'єм V , абсолютна температура T та маса газу m зв'язані рівнянням Менделєєва-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT,$$

де μ - маса моля газу, R - газова стала. При нормальних умовах (тиск 101325 Па, температура 0°C) 1 моль газу займає об'єм 22,4 л.

Кількість теплоти, потрібна для нагрівання або охолодження речовини:

$$Q = cm(T_2 - T_1),$$

де c - питома теплоємність речовини (для води $c=1$ ккал/кг=4,19 кДж/кг), m - її маса, T_2 і T_1 - кінцева і початкова температури. При пароутворенні рідини масою m при температурі кипіння витрачається прихована теплота Q :

$$Q = rm,$$

де r - питома теплота пароутворення (для води при 100°C $r=539$ ккал/кг=2260 кДж/кг).

Кількість тепла внаслідок **теплопровідності**, визначають за законом Фур'є:

$$Q = -\chi \frac{\Delta T}{\Delta x} St$$

де χ - коефіцієнт теплопровідності, $\Delta T/\Delta x$ - градієнт температури, S - площа поверхні, t - час.

Кількість теплоти Q , що випромінює абсолютно чорне тіло за час t з площі поверхні S , визначається за законом **Стефана-Больцмана**:

$$Q = \sigma T^4 St,$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ - стала Стефана-Больцмана, T - абсолютна температура тіла. Частина тепла може повертатись внаслідок випромінювання оточуючим середовищем, тому у загальному випадку:

$$Q = a\sigma(T^4 - T_0^4)St$$

де a - поглинальна здатність поверхні тіла ($a=1$ для абсолютно чорного тіла і $a=0$ для абсолютно білого), T_0 - абсолютна температура середовища. Максимум енергії, що випромінює абсолютно чорне або сіре тіло, згідно закону зміщення **Віна** припадає на довжину електромагнітної хвилі λ^* :

$$\lambda^* = C/T,$$

де $C = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К - стала Віна.

Перше начало термодинаміки: тепло, підведене до системи, витрачається на зміну її внутрішньої енергії і на виконання системою роботи - $Q = \Delta U + A$.

Друге начало термодинаміки: ентропія ізольованої системи збільшується або залишається сталою: $\Delta S \geq 0$. Зміну ентропії визначають як $\Delta S = \Delta Q/T$. Рівняння стаціонарності: збільшення ентропії в одиницю часу всередині організму компенсується вживанням негативної ентропії зовні -

$$\Delta S/\Delta t = (\Delta S/\Delta t)_{\text{внутр.}} + (\Delta S/\Delta t)_{\text{зовні.}} = 0.$$

3.1. Який час змогла б існувати людина без їжі, за рахунок власної жирової клітковини масою 10 кг? Прийняти втрати тепла у стані спокою 200 кДж/м²·год, площу поверхні людини 1 м², питому калорійність клітковини 20 МДж/кг.*

3.2. Як зміниться час у попередній задачі, якщо людина додатково вимушена виконувати 7 годин на добу фізичну роботу середньої інтенсивності 600 кДж/год ?

- 3.3. Свиня збільшує вагу на 0,3 кг жирової клітковини на добу, а без корму втрачає 0,3 кг клітковини на добу. Яка добова калорійність корму, якщо калорійність клітковини 20 МДж/кг ?
- 3.4. За який час крізь м'яз пройде 12,3 кДж теплоти, якщо його площа 10 см², товщина 10 мм, температура поверхонь 38°C і 15°C ?
- 3.5. Тепло внутрішніх органів свині проходить крізь м'язову тканину товщиною 3 см, потім крізь жирову тканину товщиною 6 см. Температура зовні жирової тканини 37°C, на межі з м'язом – 37,6°C. Яка температура на внутрішній поверхні м'яза ? Теплопровідність жиру 0,2 Вт/мК, м'язу – 0,5 Вт/мК.
- 3.6. Крізь зразок сухожилля площею 3 см² і товщиною 5 мм за 2 години надходить 16 кДж теплоти. Визначити різницю температури між внутрішньою і зовнішньою поверхнями сухожилля, якщо його теплопровідність 0,46 Вт/мК.
- 3.7. Маса повітря, яке вдихає теля, 10 г, об'єм та температура повітря в легенях становлять відповідно 8 л та 37°C. Визначити тиск повітря в легенях. Маса моля повітря 29 г/моль.
- 3.8. Скільки молей повітря у приміщенні розміром 20 м х 2 м х 5 м при нормальних умовах ?
- 3.9. Визначити кількість тепла, що пройде крізь 1 м² бетонної стіни товщиною 10 см за добу, якщо температура всередині приміщення 17°C, а на дворі – 0°C. Коефіцієнт теплопровідності бетону 1,5 Вт/мК.
- 3.10. Скільки молей у 1 см³ води ?
- 3.11. Знайти масу однієї молекули глюкози C₆H₁₂O₆.
- 3.12. Скільки молекул у 1 г кухонної солі ?
- 3.13. Приміщення втрачає за добу 24000 ккал теплоти. Яка потужність нагрівного елемента забезпечить сталу температуру ?
- 3.14. Мастит лікують парафіновою аплікацією при температурі 75°C. Яка потрібна маса парафіну, якщо для проведення процедури необхідно 165 кДж теплоти. Температура вимені 38°C.
- 3.15. Яка кількість теплоти потрібна для пароутворення, якщо за добу тварина втрачає 0,8 кг поту ?
- 3.16. Яка кількість теплоти виділяється твариною за добу, якщо її маса 430 кг, а питома теплопродукція 1,6 Вт/кг ?
- 3.17. У хірургії для місцевого обезболювання застосовується ефір. Яка кількість теплоти надходить від тварини при випаруванні 20 г ефіру при 20°C ? Питома теплота пароутворення ефіру 2,34 МДж/кг, температура кипіння 34,8°C, питома теплоємність 351 Дж/кгК, температура поверхні тіла 37°C.
- 3.18. Визначити товщину суглинкового ґрунту, якщо за 5 годин крізь поверхню ґрунту у 10 см² надходить теплота 250 Дж. Температура на поверхні ґрунту 23°C, а на межі суглинку 12°C, коефіцієнт теплопровідності ґрунту 0,1 Вт/мК.

- 3.19. Знайти масу кисню у кисневій подушці, що має об'єм $0,5\text{ м}^3$. Тиск кисню $1,1$ атм, температура 20°С .
- 3.20. Яка маса озокериту потрібна для аплікації при лікуванні маститу, якщо необхідно передати вимені 3600 Дж теплоти? Температура озокериту 70°С , температура шкіри 37°С .
- 3.21. Яку кількість теплоти втрачає приміщення за добу через бокові стінки – бетонні плити товщиною 30 см? Розміри приміщення 6 м х 8 м, висота 4 м, температура всередині приміщення 17°С , зовні 12°С , коефіцієнт теплопровідності бетону $1,2$ Вт/мК.
- 3.22. Скільки теплоти пройде крізь 1 м² поверхні піску за 1 годину, якщо температура на поверхні 37°С , а на глибині $0,5$ м 10°С ? Як зміниться температура на поверхні піску, якщо на пісок покласти дошку товщиною 40 мм? Коефіцієнт теплопровідності піску 1 Вт/мК, дошки $0,2$ Вт/мК.
- 3.23. Скільки парафіну потрібно для проведення лікувальної процедури, якщо необхідно передати 800 кДж теплоти? Температура парафіну 80°С , температура шкіри 38°С .
- 3.24. Яку кількість теплоти випромінює тіло корови за добу? Температура тіла 37°С , площа поверхні $1,8$ м², температура у коровнику 12°С .
- 3.25. Визначити кількість теплоти, що передається внаслідок теплопровідності крізь жирову клітковину площею $0,2$ м² за 10 хвилин. Градієнт температури 10 К/см.
- 3.26. При розриві макроергічного зв'язку у молекулах АТФ виділяється 30 кДж/моль теплоти. Скільки молекул повинні гідролізуватись для виділення 10^{-12} Дж теплоти?
- 3.27. Яка кількість теплоти виділиться при згоранні 100 г білку, 100 г вуглеводів, 100 г жирів? (Калорійність білків, жирів та вуглеводів становить $24,3$ МДж/кг, $38,9$ МДж/кг та $16,7$ МДж/кг відповідно).
- 3.28. Яка кількість теплоти пройде крізь бетонну стелю підсобного приміщення площею 10 м² і товщиною 16 см за добу? Температура приміщення 18°С , температура зовні 5°С . Коефіцієнт теплопровідності бетону 2 Вт/мК.
- 3.29. За умовами попередньої задачі знайти кількість теплоти, що проходить крізь бетонну стелю, засипану ущільненим снігом товщиною 5 см. Коефіцієнт теплопровідності ущільненого снігу $0,05$ Вт/мК.
- 3.30. При термодинамічних засобах лікування інколи використовують парафін, нагрітий до температура 85°С . Чому при такій високій температурі не виникає опік шкіри?
- 3.31. Яка кількість теплоти необхідна для пастеризації 100 л молока? Температура пастеризації 70°С , початкова температура молока 20°С . Теплоємність молока складає 94 % від теплоємності води.
- 3.32. Визначити градієнт температури поверхневого шару чорнозему у безхмарну осінню ніч, якщо температура на поверхні ґрунту 0°С , а коефіцієнт теплопровідності його $0,5$ Вт/мК. Температура неба 3К .

- 3.33. Як зміниться градієнт у попередній задачі взимку, коли поверхня покрита двадцятисантиметровим шаром снігу, а температура повітря мінус 10°C . Коефіцієнт теплопровідності снігу прийняти $0,1 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.
- 3.34. Як зміниться градієнт у попередній задачі навесні, коли сніг розтав, ніч хмарна і температура хмар $+10^{\circ}\text{C}$?
- 3.35. Швидкість збільшення ентропії внаслідок незворотних процесів у людини в середньому $0,6 \text{ Вт/К}$. Скільки білків (калорійність $24,3 \text{ кДж/г}$), жирів ($38,9 \text{ кДж/г}$) та вуглеводів ($16,7 \text{ кДж/г}$) в рівних масових частках потрібно щодобово для підтримувати сталості ентропії організму ?
- 3.36. Теплопродукція людини складає 4 ГДж за рік. Який потік ентропії повинен надійти до людини ззовні за цей час для підтримки гомеостазу ? Прийняти середню температуру тіла 37°C .
- 3.37. Скільки енергії випромінює Сонце за 1с ? Яка енергія припадає на 1 м^2 поверхні Землі в середині дня у тропіках? Розглядати Сонце як абсолютно чорне тіло з температурою 6000 К та діаметром $1,4 \cdot 10^6 \text{ км}$. Відстань від Сонця до Землі (астрономічна одиниця): $150 \cdot 10^6 \text{ км}$.
- 3.38. За умовами попередньої задачі визначити найвищу температуру поверхні Землі, яку забезпечує випромінювання Сонця.
- 3.39. Врахувати у попередній задачі відбиття Землею у космос 28% випромінювання Сонця (переважно хмарами, снігом, льодом – альbedo Землі), а також поглинання вуглекислим газом і водяною парою атмосфери Землі до 22% падаючого випромінювання.
- 3.40. До якої довжини електромагнітної хвилі пристосовують прилади нічного бачення для спостереження за людиною або теплокровними тваринами ?
- 3.41. Яку кількість теплоти випромінює тіло коня за годину, якщо температура конюшні 15°C , а температура тіла худоби 37°C ? Площа поверхні коня $1,8 \text{ м}^2$, поглинальна здатність поверхні $0,8$. Порівняйте результат з загальною тепловіддачею коня у повітря, яка складає 1700 кДж .
- 3.42. Визначити температуру поверхні Сонця, якщо максимум його випромінювання припадає на довжину хвилі 480 нм . Чи треба враховувати розсіювання голубої складової випромінювання атмосферою, яке зміщує цю довжину до 555 нм ?
- 3.43. Інтенсивність опромінення Сонцем на межі земної сфери складає $1,37 \text{ кВт/м}^2$ (сонячна стала). Визначити потужність випромінювання Сонця, якщо середня відстань до нього $150 \cdot 10^6 \text{ км}$.
- 3.44. У скільки разів зміниться тепловіддача випромінюванням тіла корови (температура тіла 37°C), якщо температура у корівнику знизилась з 24°C вдвічі ?
- 3.45. У реакції фотосинтезу утворення 1 молю кисню потребує $1,72 \text{ МДж}$ світлової енергії. Яку масу кисню здатне утворити Сонце на Землі за 1 с , якщо випромінювання на межі земної сфери становить $1,37 \text{ кВт/м}^2$, а радіус Землі 6400 км ? (В середньому зелені рослини використовують 2% світлової енергії).

- 3.46. Що спільного у англійського ботаніка Броуна та французького фізика Перрена ?
- 3.47. Яку величину можна обчислити, якщо відомий об'єм моля визначеної речовини? Наприклад 2,5 моля води займають об'єм 45 мл.
- 3.48. Що мав на увазі Е. Шрьодінгер, коли говорив, що організм споживає від'ємну ентропію ?
- 3.49. В непрямій калориметрії використовують енергетичний еквівалент процесу окислення даної речовини q_e – це така кількість теплоти, що виділяється в процесі окислення при поглинанні даною речовиною 1 л кисню. Визначте енергетичний еквівалент глюкози, якщо відомо, що при поглинанні глюкозою 6 молів кисню виділяється 2870 кДж теплоти.
- 3.50. В непрямій калориметрії використовують дихальний коефіцієнт поживних речовин при харчуванні δ – це відношення кількості виділеного вуглекислого газу до кількості спожитого кисню при окисленні поживних речовин. Визначте дихальний коефіцієнт при окисленні білків, якщо при поглинанні в нормальних умовах 0,5 моль кисню виділяється 9 л вуглекислого газу.
- 3.51. На скільки зросла ентропія системи, якщо в умовах сталого тиску (100 000 Па) внутрішня енергія системи та її об'єм зросли відповідно на 200 Дж та 1 л. Температура системи незмінна і становить 300 К ?
- 3.52. На скільки зменшився хімічний потенціал системи: 0,5 моль глюкози та 3 моль кисню при повному окисленні глюкози в нормальних умовах, якщо відомо, що $6,02 \cdot 10^{20}$ молекул глюкози виділяють 2870 Дж енергії (вільної енергії Гіббса) при повному їх окисленні? (Хімічним потенціалом називається приріст вільної енергії Гіббса при зростанні системи на 1 моль в нормальних умовах).
- 3.53. На скільки зросте ентропія системи, якщо статистична вага системи зросла в 2,72 рази ? (Статистична вага W системи зв'язана з ентропією S формулою Больцмана: $S = k \ln W$, де k - стала Больцмана).
- 3.54. Перерахунок температури із шкали Фаренгейта F до шкали Цельсія t проводиться за рівнянням: $t = 5/9(F - 32)$. Яка температура за Фаренгейтом буде відповідати тілу людини?
- 3.55. Перерахунок температури із шкали Фаренгейта F до шкали Цельсія t проводиться за рівнянням: $t = 5/9(F - 32)$. Яка температура за Фаренгейтом буде відповідати точці кипіння води?
- 3.56. Перерахунок температури із шкали Фаренгейта F до шкали Цельсія t проводиться за рівнянням: $t = 5/9(F - 32)$. Яка температура за Фаренгейтом буде відповідати точці замерзання води?
- 3.57. Перерахунок температури із шкали Фаренгейта F до шкали Цельсія t проводиться за рівнянням: $t = 5/9(F - 32)$. Складіть рівняння, в якому температура за шкалою фарентгейта буде виражена через температуру в кельвінах.

- 3.58. Калоричне та термічне рівняння стану для ідеального газу записуються відповідно: $U = \frac{m}{\mu} C_v T$; $p = \frac{1}{V} \frac{m}{\mu} RT$. Знайдіть з цих двох рівнянь співвідношення між внутрішньою енергією (U) та добутком тиску на об'єм (pV). Чому дорівнюватиме коефіцієнт пропорційності між ними? (m - маса газу, μ - молярна маса, C_v - молярна теплоємність при сталому об'ємі, R - газова стала).
- 3.59. На скільки градусів потрібно збільшити температуру тіла людини з світлою шкірою (коефіцієнт поглинальної здатності шкіри 0,55), щоб вона випромінювала таку саму кількість енергії, як і людина з темною шкірою (коефіцієнт поглинальної здатності шкіри 0,85)?
- 3.60. Випромінювальна складова теплопродукції з одиниці площі поверхні у місячного поросся становить 30 ккал/(м²-год). Яка питома теплопродукція тварини? (Площа поверхні та маса поросся становлять відповідно 0,25 м² та 8 кг).

4. Електричні явища у біологічних тканинах

Напруженість електричного поля E визначають як: $E = F/q$, де F - сила, що діє на заряд q в електричному полі. Для однорідного поля, поля плоского конденсатора: $E = U/d$, де U - різниця потенціалів між пластинами конденсатора, d - відстань між ними.

Електроємність конденсатора визначають як: $C = q/U$, де q - заряд, U - різниця потенціалів між обкладинками. Для плоского конденсатора $C = \epsilon \epsilon_0 S/d$, де ϵ - діелектрична проникність середовища, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - електрична стала, S - площа кожної пластини конденсатора, d - відстань між ними. Енергія конденсатора визначається за формулою: $W = CU^2/2$.

Густина електричного струму визначають як: $j = I/S$, де I - сила струму, S - площа поперечного перерізу провідника з струмом. В електролітах і інших середовищах, де є вільні заряди $j = (q_+ n_+ b_+ + q_- n_- b_-) E$, де q_+ і q_- - величини позитивного і негативного зарядів, n_+ і n_- - їх об'ємні концентрації, b_+ і b_- - рухливості зарядів, E - напруженість електричного поля. До основних законів постійного електричного струму відносяться: **закон Ома** ($I = U/R$) та **закон Джоуля-Ленца** ($Q = I^2 R t$), де U - напруга, I - сила струму, t - час, R - електричний опір провідника. $R = \rho l/S$, де ρ - питомий опір, l і S - довжина і площа перерізу провідника. Питомий опір ρ зв'язаний з питомою провідністю σ : $\sigma = 1/\rho$.

Порогові значення струму і напруги, що викликають подразнення, знаходять за формулами **Вейса**: $I = a/t + b$, $U = A/t + B$, де a , b , A , B - сталі, t - тривалість дії струму. Мінімальні порогові значення струму b і напруги B , що викликають подразнення при їх довготривалій дії ($t \rightarrow \infty$), називають реобазою. Тривалість дії струму, необхідна для подразнення при струмі або напрузі, що дорівнює двом реобазам, називається хронаксією.

Мембранну різницю потенціалів (**мембранний потенціал**) знаходять за формулою Нернста:

$$E_M = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_1}{C_2},$$

де $R = 8,31$ Дж/моль·К - газова стала, T - абсолютна температура, Z - валентність іона, $F = 96485$ Кл/моль - число Фарадея, C_1 і C_2 - концентрації іонів по обидві сторони мембрани. Для знаходження потенціалів спокою клітини знаходять відношення

концентрацій іонів K^+ або Cl^- всередині (i) та зовні (e) клітини – $C_i/C_e = K^+_i/K^+_e$. Коли $K^+_e/K^+_i = Cl^-_i/Cl^-_e$ – досягається рівновага Доннана.

На заряд, що рухається в магнітному полі діє сила **Лоренца**: $F = qvB\sin\alpha$, де v – швидкість заряду, B – індукція магнітного поля, α – кут між векторами v і B . Кількість теплоти при індукційному нагріванні тіла у змінному магнітному полі пропорційна квадрату частоти і квадрату індукції поля: $Q \sim \omega^2 B^2 / \rho$, де ρ – питомий електричний опір тіла.

Електричний опір кола змінному струму Z називають **імпедансом**. При послідовному з'єднанні активного (омічного) опору R та ємності C , що реалізується у біологічних тканинах, імпеданс дорівнює: $Z = \sqrt{R^2 + 1/(\omega C)^2}$, де ω – циклічна частота струму, $1/\omega C$ – ємнісний опір. Кут зсуву фаз φ між напругою і силою струму при послідовному з'єднанні активного та ємнісного опорів знаходять із відношення $\tan\varphi = 1/\omega RC$, причому напруга відстає від сили струму (кут зсуву фаз від'ємний). Коефіцієнт поляризації тканини визначають як $K = Z_1/Z_2$, де Z_1 і Z_2 – імпеданси на частотах ν ($\nu = \omega/2\pi$): $\nu_1 = 10$ кГц і $\nu_2 = 1$ МГц. Для тканин савців $K = 7-10$, для мертвої тканини $K \rightarrow 1$. Циклічну частоту коливального контуру визначають за формулою **Томсона**: $\omega = 1/(\sqrt{LC})$, де L – індуктивність і C – ємність контуру.

- 4.1. При подразненні плечового суглобу корови імпульсом струму тривалістю 17 мс і амплітудою 2 мА виникає потенціал дії. При тривалості імпульсу 2 мс поріг подразнення став рівним 14,5 мА. Яка реобазисна тканини ?
- 4.2. При лікуванні невралгії на плечовий суглоб коня накладають електроди. Густина струму $0,4$ мА/см², сила струму 20 мА. Визначити площу активного електроду.
- 4.3. При лікуванні деяких хвороб ВРХ використовують електрофорез двозарядних іонів кальцію. Який час триває процедура, якщо крізь електрод площею 350 см² необхідно ввести 7 мг кальцію ? Максимальна густина струму $0,2$ мА/см².
- 4.4. На частоті 10 кГц імпеданс тканини 120 Ом, на частоті 4 МГц – 105 Ом. Який її стан ?
- 4.5. Опір тканини 6 Ом, імпеданс на частоті 10 кГц 110 Ом. Яка її ємність ?
- 4.6. Яка тривалість імпульсу електричного струму, якщо при накладанні електродів поріг подразнення нервової тканини 12 мА ? Реобазисна 4,2 мА, стала Вейса 2,3 мА·мс.
- 4.7. Діаметр нерва 1,6 мкм, довжина 5 мм. Яка електроємність його мієлінової оболонки товщиною 1,4 мкм ? Діелектрична проникність мієліну 4,5.
- 4.8. При гальванізації крізь шкіру коня за 10 хвилин треба пропустити електричний заряд 90 Кл. Визначити густину струму, якщо площа електроду 350 см².
- 4.9. При контакті з дротом електроогорожі на корову діє імпульс напругою 60 В. Яку потужність повинно мати джерело струму ? Активний опір тварини 1200 Ом.
- 4.10. При діотермії ВРХ один електрод розміром 12 см \times 20 см накладають спереду на ділянку печінки, а другий заряд ззаду, напроти першого.

- Скільки теплоти виділиться за 15 хв. у об'ємі тканини товщиною 5 см ?
 Питомий опір 10 Ом·м, густина струму 40 А/м².
- 4.11. Апарат для індуктотермії створює змінну напругу частотою 14 МГц. У скільки разів зміниться тепловий ефект, якщо частота стане 6 МГц ?
- 4.12. Яка кількість теплоти виділиться за 10 хвилин у 0,5 дм³ об'єму вимені при УВЧ терапії маститу, якщо ефективна напруженність електричного поля між електродами 350 В/м ? Питомий опір тканини 8 Ом·м.
- 4.13. Шар м'язової тканини, яка підлягає УВЧ терапії, має площу 8 см² і товщину 3 см. Який її активний опір ? Питомий опір 35 Ом·м.
- 4.14. На якій частоті імпеданс тканини у 3 рази більше його активного опору ? Ємність тканини 0,01 мкФ, активний опір 850 Ом.
- 4.15. Коливальний контур апарата УВЧ складається із індуктивності 2 мкГн і ємності. Якою повинна бути ємність для випромінювання електромагнітних хвиль довжиною 10 м ?
- 4.16. Ємність клітинної мембрани 1 мкФ/см², площа 50 мкм², мембранна різниця потенціалів 70 мВ. Визначити заряд на поверхні мембрани.
- 4.17. Мембранний потенціал спокою для клітини 60 мВ. Яка напруженність електричного поля у мембрані, якщо її товщина 6 нм ?
- 4.18. Яка енергія електричного поля зосереджена у мембрані, якщо її площа 5 мкм², товщина 10 нм, мембранна різниця потенціалів 80 мВ, діелектрична проникність 2,1 ?
- 4.19. Для лікування хвороби методом гальванізації на тіло накладають електроди і пропускають струм. Опір ділянки тіла 2 кОм, опір обмеження 6 кОм, напруга джерела струму 160 В. Визначити силу струму крізь тіло.
- 4.20. Визначити потенціал спокою клітин аксону кальмара у верхніх шарах океану, де температура 25°C, і на глибині, де температура 6°C. Концентрація іонів калію у аксоні 420 мг іон/кг, у воді 28 мг іон/кг.
- 4.21. Під дією сигнальної молекули лікувального препарату у мембрані клітини утворюється канал, крізь який за 30 мс у середину надходить 10⁶ одновалентних іонів. Визначити силу струму у каналі.
- 4.22. Визначити рухливість двозарядних іонів кальцію при електрофорезі. Напруженність електричного поля 100 В/м, концентрація іонів 10¹⁰ м⁻³, густина струму 0,5 А/м².
- 4.23. Концентрація іонів хлору у м'язовому волокні жаби 120 ммоль/л, ззовні – 10 ммоль/л. Яка робота дифузії при переносі крізь мембрану 1 мг іонів ? Чому дорівнює мембранний потенціал ? Температура 15°C.
- 4.24. При дифузії 5 мкг калію з аксонів кальмара у зовнішнє середовище виконується робота 1,16 мДж. Визначити відношення концентрації іонів у внутрішньому і зовнішньому середовищі. Температура води 17°C.
- 4.25. Мембранний потенціал клітини 60 мВ. Енергія електричного поля мембрани 10⁻¹¹ Дж. Визначити електроємність мембрани.
- 4.26. Середня потужність розряду електричного ската 8 Вт, напруга 360 В, час 0,13 с. Визначити електроємність електричних органів ската.

- 4.27. Мембранний потенціал клітин м'яза жаби 60 мВ. Яка напруженість електричного поля у мембрані товщиною 10 нм? Яка сила діє на іон Na^+ у каналі мембрани?
- 4.28. Визначити кут зсуву фаз між струмом і напругою для шкіри жаби при частоті змінного струму 2 кГц, якщо її активний опір 2,5 кОм, електроємність 0,22 мкФ.
- 4.29. Визначити кут зсуву фаз між струмом і напругою для шкіри жаби при частоті змінного струму 2 кГц, якщо її активний опір 2,5 кОм, електроємність 0,22 мкФ.
- 4.30. Кут зсуву фаз між струмом і напругою у ламінарії 78° , частота змінного струму 1 кГц. Яка електроємність тканини, якщо її активний опір 850 Ом?
- 4.31. Знайти тривалість абсолютної рефракторної фази нервового волокна, якщо максимальна частота, яку воно передає, 200 Гц.
- 4.32. Визначити сталу Вейса нервового волокна. Хронаксія складає 0,8 мс, потенціал дії виникає при струмі 10 мА.
- 4.33. Визначити концентрацію іонів хлору всередині мотонейрона кішки, якщо їх концентрація у зовнішньому середовищі 126 ммоль/л, мембранний потенціал клітини 60 мВ, температура 37°C .
- 4.34. Концентрація іонів калію всередині і зовні для гігантського аксону кальмара 360 і 10 ммоль/л, для мотонейрона кишки – 150 і 5,5 ммоль/л. У скільки разів мембранний потенціал аксону більше ніж мотонейрону?
- 4.35. Який період коливань α -ритму головного мозку, якщо енцефалографічна частота складає 7,8 Гц?
- 4.36. Сила струму при електрохірургічних операціях досягає 1 А, а густина струму - 10^5 А/м². Яка площа перерізу ріжучої кромки електро-скальпеля?
- 4.37. Для припинення шлункової фібриляції серця використовують електричний імпульс з амплітудними значеннями сили струму і напруги відповідно 10 А і 1,5 кВ. Знайти максимальну потужність імпульсу.
- 4.38. Визначити максимальну силу, що діє на одновалентний іон, який рухається із швидкістю 0,5 м/с у магнітному полі з індукцією 10^{-4} Тл.
- 4.39. Яка сила діє на двозарядний іон кальцію, що дифундує крізь мембрану клітини, якщо мембранний потенціал 60 мВ, товщина мембрани 8 нм?
- 4.40. Для електрообезболювання використовують змінний струм частотою 1 кГц і ефективною силою струму 80 мА. Активний опір між електродами 800 Ом. Знайти потужність імпульсів, що викликають обезболювання.
- 4.41. Як відносяться густини струму в геометрично однакових зразках хребетномозкової рідини і мозку, якщо ці зразки приєднані до джерела струму паралельно, послідовно?
- 4.42. При ураженні блискавкою пошкоджуються дужче кістки чи судини?
- 4.43. Чому електрична напруга 1,5 В не відчувається при торканні контактів руками, але відчувається при торканні їх губами або язиком?
- 4.44. Середня напруженість електричного поля у поверхні Землі 150 В/м. Чому це поле не пошкоджує тварин і рослини?

- 4.45. При якій швидкості руху відносно магнітного поля Землі з індукцією $0,7 \cdot 10^{-4}$ Тл сила магнітної дії на іон була б еквівалентна кулонівській силі в мембранах клітин, де формується електричне поле напруженістю 10^7 В/м ?
- 4.46. По біологічному волокну змінного перерізу протікає постійний струм. На якій ділянці волокна (вузькій чи широкій) напруженість електричного поля буде більша ? Чи вона буде однаковою ?
- 4.47. Питомий опір цитоплазми становить 2 Ом·м. Який діаметр цитоплазматичного каналу, якщо при довжині його 0,1 мм відношення напруги до сили струму в каналі становить 10^5 одиниць SI?
- 4.48. Для мікрохвильової терапії м'яких тканин тварин та людини використовують електромагнітні хвилі довжиною 12,6 см. Який імпеданс фрагмента тканини, якщо активний опір її вдвічі нижчий від ємнісного, а поляризаційна ємність тканини становить 10 мкФ?
- 4.49. Тангенс зсуву фаз між силою струму і напругою тканини становить $\sqrt{3}$. Що можна сказати про дану тканину ?
- 4.50. Коефіцієнт поляризації фрагменту шкіри, що готують для пересадки становить $\sqrt{2}$. Що можна сказати про відповідність донорського матеріалу стандартам якості ?
- 4.51. Синус зсуву фаз між силою струму і напругою тканини становить $\sqrt{3}/3$. Чи відповідає дана тканина критеріям біооб'єктів ?
- 4.52. Чому дорівнює відношення коефіцієнтів Вейса ?
- 4.53. Питомий опір спинномозкової рідини в тричі нижчий від крові. До якої тканини потрібно прикласти вищу напругу і у скільки разів, щоб тепловий ефект електричної дії був однаковий ?
- 4.54. Величина поляризаційної ємності клітинних мембран становить $2,65 \cdot 10^{-6}$ Ф на 1 см^2 поверхні. Яка товщина мембрани, якщо відносна діелектрична проникність її дорівнює 30 ?
- 4.55. У скільки разів зміниться мембранний потенціал, якщо відношення концентрацій іонів по різні сторони мембрани зросло в 7,4 рази? Натуральний логарифм початкового відношення концентрацій складав 2.
- 4.56. Людина починає відчувати електричний струм силою 1-1,5 мА. Дані умови можна змодельовувати при замиканні полюсів звичайної батарейки вологою ділянкою шкіри. Що можна сказати про електричний опір тканини ?
- 4.57. Постійний струм, що протікає через організм людини, силою 100 мА викликає параліч дихання. Що можна сказати про величину небезпечної напруги, якщо електричний опір тіла людини в цих умовах 100-кратно зменшується від початкового стандартного значення 1 кОм ?
- 4.58. Стандартні пари точок для контролю електричного опору людини наступні: від долоні однієї руки - до долоні другої руки; від тильної частини руки - до ноги; від долоні - до тильної частини руки. Як ви думаєте, в якому випадку опір найбільший?

- 4.59. Електрозапобіжник, розрахований на 20 А має певну контрольну потужність, яка веде або до розплавлення мідного провідника, або до лінійного видовження розмикаючого контакту. Що можна сказати про величину даної потужності ?
- 4.60. Середній діаметр каналу блискавки становить 16 см Сила струму блискавки 20 кА. Середня тривалість розряду 0,2 с. Відстань, на яку чути грім 15 км. Яка густина струму розряду ?

5. Оптичне випромінювання у біології і ветеринарії

До **оптичного** випромінювання у вузьких межах відносять електромагнітні хвилі довжиною λ від 0,4 мкм до 0,7 мкм (в широких межах - від 10 нм до 400 мкм). Оптичні хвилі утворюються при зміні енергетичного стану зовнішніх електронів у атомах та молекулах. Швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі c становить $3 \cdot 10^8$ м/с. Енергія кванта ε світлового випромінювання (фотона) зв'язана з частотою ν або довжиною хвилі λ випромінювання: $\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$, де $h=6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка.

Енергетичний потік випромінювання Φ через задану поверхню визначають як енергію E , що пройшла крізь цю поверхню за одиницю часу t : $\Phi = E/t$, $[\Phi] = \text{Вт}$. **Світловий потік** F (потік електромагнітного випромінювання, що безпосередньо сприймається очима), вимірюють у люменах (лм). Зв'язок між енергетичним та світловим потоками встановлюється експериментально.

Силу світла точкового джерела I визначають як світловий потік, що випромінюється точковим джерелом і припадає на тілесний кут $\Delta\Omega = 1$ ср (стерадіан): $I = \Delta F / \Delta\Omega$. $[I] = \text{кд}$ (кандела). Якщо світловий потік F однаковий в усіх напрямках (ізотропне джерело), то сила світла визначається, як: $I = F/4\pi$.

Світлимість випромінюючої поверхні R визначають як світловий потік ΔF , що випромінюється з одиниці поверхні в усіх напрямках: $R = \Delta F / \Delta S$. **Опроміненість та освітленість** поверхні E визначають як потік, що падає на одиницю площі поверхні: $E = \Delta F / \Delta S$. Одиниці R і E – лк (люкс).

Яскравість випромінюючої поверхні B визначають як силу випромінювання у заданому напрямку з одиниці площі поверхні ΔS_n , нормальної до цього напрямку: $B = I / \Delta S_n$. Для світла $[B] = \text{лм}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср}) = \text{кд}/\text{м}^2 = \text{лк}/\text{ср} = \text{нт}$ (нит). У тіл, яскравість яких не залежить від напрямку, $R = \pi B$ (закон Ламберта).

Інтенсивністю хвильової енергії називається середня енергія, що проходить через одиницю поверхні, перпендикулярної до напрямку поширення хвилі за одиницю часу. Зменшення інтенсивності світла I після проходження його крізь шар речовини товщиною l знаходять за **законом Бугера**: $I = I_0 e^{-\delta l}$, де δ - коефіцієнт поглинання речовини; або за **законом Бугера-Бера**: $I = I_0 e^{-\alpha C l}$, де α - питомий коефіцієнт поглинання та C – концентрація поглинаючої речовини.

Кут обертання площини **поляризації** світла оптично активною речовиною з товщиною шару l знаходять за співвідношенням: $\varphi = kl = \beta C l$, де k – коефіцієнт обертання, β - питомий коефіцієнт обертання, C – концентрація активної речовини.

Роздільна здатність мікроскопу $R = l/\Delta x$ обернено зв'язана з найменшою відстанню Δx між двома точками, які сприймаються роздільно. Встановлено, що

$$R = \frac{n \sin(\phi/2)}{0,61\lambda},$$

де n – показник заломлення середовища між об'єктивом і об'єктом, ϕ - апертурний кут об'єктива, λ - довжина хвилі випромінювання.

- 5.1. На вікно у віварню 2,5 м X 3 м падає нормально світловий потік 900 лм. Коефіцієнт відбивання світла від кожної поверхні скла 5 %. Визначити освітленість вікна ззовні і освітленість у віварні. Поглинанням скла знехтувати.
- 5.2. Врахувати у попередній задачі поглинання 50 % світла забрудненим склом.
- 5.3. Клітка з тваринами стоїть на підлозі під лампою, що знаходиться на висоті 5 м. Потужність лампи 250 Вт, світловіддача 12,7 лм/Вт. Клітка накрита склом 60 см x 40 см, що відбиває 10 % світла. Знайти світловий потік і освітленість всередині клітки. Поглинанням скла знехтувати.
- 5.4. При проходженні крізь 10-сантиметрову кювету з розчином ліків інтенсивність світла зменшилась на 20 %. Визначити коефіцієнт поглинання світла.
- 5.5. Інтенсивність світла при проходженні кювети з розчином знизилась на 20%. У скільки зменшиться інтенсивність, якщо концентрація розчину збільшиться у 5 разів?
- 5.6. Визначити найменшу довжину хвилі рентгенівського випромінювання, якщо анодна напруга на рентгенівській трубці 500 кВ. Напруга U зв'язана з енергією виходу A електронів, як $A = Ue$, де e – заряд електрона.
- 5.7. Короткохвильове ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 200 нм викликає бактеріцидну дію, що зумовлена зміною структури білків. Визначити енергію фотонів випромінювання.
- 5.8. Яка кількість фотонів ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі 320 нм падає на вікно кювети діаметром 6 см за 5 хвилин при інтенсивності опромінення $0,5 \text{ мВт/см}^2$?
- 5.9. Фотоактивація розчину проводиться випромінюванням гелій-неонового лазера потужністю 20 мВт. Яка кількість фотонів падає на розчин за 1 хвилину? Довжина хвилі випромінювання 638,2 нм.
- 5.10. Лазерний промінь потужністю 2 мВт з довжиною хвилі 630 нм сфокусовано на площі $0,4 \text{ мм}^2$. Які інтенсивність опромінення та кількість фотонів, що падає на мішень за 1 с.
- 5.11. У реакції фотосинтезу для утворення 1 молекули кисню треба 8 фотонів. Скільки світлової енергії необхідно для утворення 1 молу кисню? Довжина хвилі 555 нм, коефіцієнт використання світлової енергії 0,2.
- 5.12.3 лікувально-профілактичною метою проводять ультрафіолетове опромінювання молодняку сільськогосподарських тварин. Довжина хвилі 315 нм, інтенсивність опромінення 15 мВт/см^2 . Яка кількість фотонів падає на тіло тварини за 10 хвилин, якщо поверхня тіла $0,7 \text{ м}^2$?
- 5.13. Поріг візуального відчуття ока людини $3 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$. Яка кількість фотонів падає у око за 1 с? Довжина хвилі 555 нм.
- 5.14. Інтенсивність світла, що пройшла крізь стовбчик сироватки, зменшилась на 14%. При проходженні крізь такий же шар води інтенсивність світла

- зменшується на 4%. Визначити коефіцієнт поглинання сироватки. Коефіцієнт поглинання води $0,2 \text{ м}^{-1}$.
- 5.15. Визначити коефіцієнт поглинання живої тканини, якщо при проходженні світла крізь шар тканини товщиною 3 см інтенсивність світла зменшується у 5 разів.
- 5.16. Для кровонаповнювальної дії електромагнітного випромінювання замість потоку енергії та енергетичної опроміненості використовують еритемний потік (F_e) та еритемну опроміненість (E_e). Вони визначаються аналогічно світловому потоку та освітленості, але мають свої коефіцієнти зв'язку з енергетичними величинами та свої одиниці вимірювання: $[F_e] = \text{ер}$, $[E_e] = \text{ер}/\text{м}^2$. Ультрафіолетова лампа утворює на відстані 3 м від неї при нормальному падінні променів еритемне опромінювання $30 \text{ мер}/\text{м}^2$. Визначити еритемний потік і еритемну віддачу (відношення еритемного потоку до потоку енергії). Лампа споживає потужність 44 Вт і розглядається як точкове джерело.
- 5.17. Для бактерицидної дії електромагнітного випромінювання замість потоку енергії та енергетичної опроміненості використовують бактерицидний потік (F_b) та бактерицидну опроміненість (E_b). Вони визначаються аналогічно світловому потоку та освітленості, але мають свої коефіцієнти зв'язку з енергетичними величинами та свої одиниці вимірювання: $[F_b] = \text{бакт}$, $[E_b] = \text{бакт}/\text{м}^2$. Для дезинфекції необхідно створити бактерицидне опромінення $156 \text{ бакт}/\text{м}^2$. Потік випромінювання дорівнює 465 бакт. На якій відстані від чашки Петрі треба розмістити випромінювач? Останній розглядати як точковий.
- 5.18. У центрі кімнати розміром 4 м x 4 м на висоті 3 м висить еритемна лампа, яка забезпечує силу еритемного опромінювання $19,9 \text{ мер}/\text{ср}$. Визначити еритемну опроміненість у центрі і в кутках кімнати на рівні підлоги. (Див. задачу 5.17. Сила еритемного опромінювання визначається аналогічно силі світла, при заміщенні світлового потоку еритемним).
- 5.19. Вертикальна поверхня клітки з твариною знаходиться на відстані 6 м від ультрафіолетового джерела, яке складається з 3 ламп. Одна з ламп перегоріла. На якій відстані треба розташувати джерело, щоб опромінення залишилось незмінним?
- 5.20. Розчин глюкози з концентрацією $0,28 \text{ г}/\text{см}^3$ у скляній трубці довжиною 15 см повертає площину поляризації світла на 32° . Визначити коефіцієнт питомого обертання глюкози.
- 5.21. Визначити концентрацію цукру в сечі людини, хворою діабетом, якщо у кюветі цукрометра довжиною 20 см площина поляризації світла повернулася на 4° . Коефіцієнт питомого обертання цукру $6,6 \text{ см}^2 \cdot \text{град}/\text{г}$.
- 5.22. Апертурний кут об'єктива мікроскопа 70° . Яка роздільна здатність мікроскопа для червоного світла з довжиною хвилі 630 нм?
- 5.23. Як зміниться роздільна здатність мікроскопа, якщо між об'єктивом і об'єктом помістити гліцерин з показником заломлення світла 1,48?

- 5.24. В ультрафіолетовому мікроскопі використовують промені з довжиною хвилі 0,2 мкм. Чи можна побачити в мікроскопі рибосоми, якщо їх розмір 30 нм? Апертурний кут об'єктиву 70° .
- 5.25. Чи можна побачити рибосоми у попередній задачі, якщо використати електронний мікроскоп, роздільна здатність якого у 100 разів більша ніж ультрафіолетового?
- 5.26. Джерелом світла виступає матова куля діаметром 10 см з силою світла 60 кд. Визначити світловий потік, світимість і яскравість джерела.
- 5.27. Опромінення Сонцем на межі земної сфери складає $1,38 \text{ кВт/м}^2$ (сонячна стала). Яка потужність цього випромінювання, якщо відстань до Сонця $150 \cdot 10^6 \text{ км}$?
- 5.28. Знайти відношення максимальних сонячних освітленостей земної поверхні у день весняного рівнодення на екваторі та в помірній широті на рівні 60° .
- 5.29. На робочих столах пункту ветообслуговування повинно бути освітлення 30 лк. Яку мінімальну силу світла повинна мати лампа, що висить на висоті 3 м над поверхнею столу? Який світловий потік буде давати лампа? Якою повинна бути потужність лампи, якщо її світловіддача $12,6 \text{ лм/Вт}$?
- 5.30. При дослідженні гістологічних зразків тканин використовують мікроскопи з імерсійною рідиною. Зразок освітлюють монохроматичним світлом з довжиною хвилі 500 нм. Яким повинен бути апертурний кут мікроскопа, якщо діаметр досліджуваного об'єкту $3 \cdot 10^{-4} \text{ мм}$, а імерсійна рідина – кедрова олія з показником заломлення 1,52?
- 5.31. Визначити концентрацію розчину цукру, якщо при проходженні світла крізь кювету довжиною 15 см площина поляризації світла повернулась на 24° ? Коефіцієнт питомого обертання цукру $6,6 \text{ см}^2 \cdot \text{град/г}$.
- 5.32. Нікотин, що знаходиться у трубці довжиною 10 см, повертає площину поляризації жовтого світла на $136,6^\circ$. Визначити коефіцієнт питомого обертання нікотину.
- 5.33. Денне освітлення у приміщенні для птиці повинно бути не менш 20 лк. На якій відстані від лампи потужністю 60 Вт і силою світла 50 кд забезпечується таке освітлення?
- 5.34. Сила світла для Сонця складає $3 \cdot 10^{27} \text{ кд}$. Знайти максимальну освітленість поверхні Землі на екваторі та на широті 60° наприкінці березня. Поглинанням атмосфери знехтувати.
- 5.35. Яскравість Сонця досягає $5 \cdot 10^6 \text{ нт}$, Місяця – $2,5 \cdot 10^3 \text{ нт}$, їх кутові діаметри майже співпадають. Знайти відношення максимальних освітленостей на Землі від Сонця та Місяця.
- 5.36. Користуючись відповідями задач 5.34, 5.35, визначити, чи достатньою буде освітленість від Місяця для доїння, якщо воно повинно бути згідно нормам не менше 75 лк.
- 5.37. На ядра тваринних і рослинних клітин можна безпосередньо діяти ультрафіолетом з довжиною хвилі 254 нм, яка не поглинається

- цитоплазмою клітин. Визначить частоту та енергію фотонів даного випромінювання ?
- 5.38. На фермах для дезинфекції повітря застосовують ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 254 нм. Скільки фотонів падають на поверхню тіла тварин площею $0,5 \text{ м}^2$ за 1 с, якщо середнє опромінення поверхні 6 Вт/м^2 ?
- 5.39. Поріг чутливості ока людини до зеленого світла (довжина хвилі 555 нм). 80 фотонів за 1 с. Знайти енергію, що сприймає око за цей час.
- 5.40. Деякі змії мають термолокатор, чутливість якого налаштована на максимум випромінювання теплових тварин (інфрачервоних променів з довжиною хвилі 10 мкм) і досягає 1 мкВт. Дія скількох фотонів за 1 с відповідає цієї чутливості ?
- 5.41. На якій максимальній відстані змія може виявити мишу у попередній задачі, якщо температура тіла миші 37° C , її поверхня 1 дм^2 ? Площу термолокатора змії прийняти 1 см^2 , температуру середовища 17° C .
- 5.42. Згідно рекомендаціям Міжнародного конгресу з фізіотерапії і біології ультрафіолетове випромінювання поділено на 3 ділянки: УФЛ-А (довжина хвилі 400 - 315 нм), УФЛ-В (315 - 280 нм), УФЛ-С (280 - 100 нм). Знайдіть середню частоту ділянки УФЛ-В та її відношення до середніх частот ділянок УФЛ-А та УФЛ-С.
- 5.43. Для знищення вірусу мінімальна доза опромінення складає 10^6 ультрафіолетових фотонів з довжиною хвилі 250 нм. Якій енергії відповідає вказана доза ?
- 5.44. Яка енергія і скільки фотонів потрібно для знищення вірусу в попередньої задачі, якщо довжина хвилі випромінювання 300 нм ?
- 5.45. При біоломінесценції молекула люциферину за допомогою каталізатора люциферази реагує з молекулою кисню, в результаті чого на довжині хвилі 562 нм випромінюється енергія 167-334 кДж на 1 моль люциферину. Знайти мінімальний квантовий вихід (відношення кількості фотонів до кількості молекул що прореагували) люциферазних реакцій.
- 5.46. Визначте частотні межі оптичного діапазону у вузьких межах.
- 5.47. Визначте частотні межі оптичного діапазону у широких межах.
- 5.48. Визначте відношення мінімальних частот оптичного діапазону в широких і вузьких межах (інфрачервоний діапазон).
- 5.49. Визначте відношення максимальних частот оптичного діапазону в широких і вузьких межах (ультрафіолетовий діапазон).
- 5.50. Які електромагнітні хвилі на частотній осі знаходяться нижче від оптичного діапазону?
- 5.51. Які електромагнітні хвилі на частотній осі знаходяться вище від оптичного діапазону?
- 5.52. Фотоефектом називається явище утворення вільних електронів під дією світлового випромінювання. Фотоефект відповідає рівнянню Ейнштейна:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

де h – стала Планка, ν - частота випромінювання, A - робота виходу електронів, $\frac{mv^2}{2}$ - кінетична енергія вільних електронів. Згідно цьому рівнянню фотоефект починається для даного матеріалу з певної граничної частоти, яка називається “червоною межею” фотоефекту. Чому вона так називається?

- 5.53. Освітленість поверхні від точкового джерела складає 120 лк. Сила світла джерела 240 кд. На якій відстані від джерела розташована дана поверхня, якщо вона орієнтована перпендикулярно до випромінювання?
- 5.54. Який найбільший енергетичний потік може дати точкове джерело з силою енергетичного випромінювання 200 Вт/ср? (Сила енергетичного випромінювання визначається аналогічно силі світла, при заміщенні світлового потоку на потік енергії).
- 5.55. Повна світимість ламбертівського джерела світла складає 900 лк. Яка яскравість джерела?
- 5.56. Сила світла ламбертівського джерела в заданому напрямі з одиниці поверхні складає 240 нт. Яка світимість джерела?
- 5.57. На відстані 10 см розчину інтенсивність світла зменшилась в 2,72 рази. Який коефіцієнт поглинання світла розчином?
- 5.58. Синтез коферменут (вітаміну) D, який необхідний організму для засвоєння кальцію, відбувається при ультрафіолетовому опроміненні тіла в діапазоні довжин хвиль: від 2800 до 3150 Å. Яка середня частота опромінення?
- 5.59. Імпульсний неодимовий лазер генерує імпульси випромінювання тривалістю близько 3 пс. Яка енергія кожного імпульса, якщо його потужність досягає 25 ТВт?
- 5.60. Основна ознака лазерного випромінювання – когерентність світлових хвиль. Випромінювання когерентної хвилі охоплює фрагмент простору близько 3 м. Який час відбувається випромінювання кванта світла?

6. Аерозолі. Аероіони

Кількість частинок ΔN , що дифундують через поверхню площею S протягом часу t , визначають за **законом Фіка**:

$$\Delta N = -D \frac{\Delta c}{\Delta \delta} S t,$$

де $\frac{\Delta c}{\Delta \delta}$ - градієнт концентрації частинок.

Сила F , що діє на заряд q в електричному полі з **напруженістю E** :

$$F = qE.$$

Сила взаємодії точкових зарядів q_1 і q_2 визначають за **законом Кулона**:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

де $k=9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$, r – відстань між зарядами. **Енергія** взаємодії точкових зарядів q_1 і q_2 визначають як: $W = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$

Рухливість іонів в електричному полі з напруженістю E визначають як $b=v/E$, де v - швидкість іонів. **Густина струму** іонів $j = (q_+ n_+ b_+ + q_- n_- b_-)E$, де q_+ і q_- - заряди позитивних і негативних іонів, n_+ і n_- - їх об'ємні концентрації, b_+ і b_- - їх рухливості.

Середній діаметр частинок визначають як $d = \Sigma d_i / n$. **Медіанний діаметр** визначають як такий, що кількість частинок більшого діаметру дорівнює кількості частинок меншого діаметру.

Середні арифметична і квадратична теплові швидкості руху частинок:

$$v_{ар} = \sqrt{8kT / \pi m}, \quad v_{кв} = \sqrt{3kT / m}$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – стала Больцмана, T – абсолютна температура середовища, m – маса частинки.

При розсіюванні і поглинанні аерозолем світла інтенсивність променя I визначається за **законом Бугера**:

$$I = I_0 e^{-\delta l},$$

де I_0 – початкова інтенсивність світлового променя, δ - коефіцієнт екстинції, l - товщина шару аерозолію.

- 6.1. Скільки аерозольних частинок діаметром 0,1 мм можна одержати при подрібненні краплі діаметром 3 мм ?
- 6.2. Аерозольні частинки дифундують крізь поверхню щілини шириною 2 см і довжиною 20 см. Градієнт концентрації частинок у щілині 10^{10} м^{-4} . За 1 с 100 частинок проходять крізь щілину. Визначити коефіцієнт дифузії.
- 6.3. Частинки густиною 1 г/см^3 і діаметром 10 мкм мають надлишковий заряд 10^{-12} Кл . Визначити силу, що діє на частинки у електричному полі з напруженістю 3000 В/м.
- 6.4. Якої швидкості набудуть частинки попередньої задачі у повітрі з коефіцієнтом в'язкості $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$? Яка рухливість цих частинок ?
- 6.5. Сферичні частинки знаходяться на відстані 10 мкм і мають однакові надлишкові заряди 10^{-10} Кл . Визначити силу взаємодії між ними.
- 6.6. Виверження вулкану Святої Єлени у травні 1980 р. привело до того, що верхня частина гори об'ємом 3 км^3 перейшла в аерозольний стан. Визначити кількість частинок, що утворилася, якщо вони мають форму сфери діаметром 0,1 мкм.
- 6.7. Визначити вагову концентрацію аерозольних частинок, якщо у 1 м^3 знаходяться 10^8 частинок, їх діаметр 20 мкм, густина 1260 кг/м^3 .
- 6.8. Яка маса аерозольних частинок у приміщенні розміром 20 м x 15 м x 4 м, якщо їх діаметр 3 мкм, густина 1160 кг/м^3 , концентрація 10^4 м^{-3} ?
- 6.9. Три аерозольні частинки діаметром 10 мкм зливаються в одну. Яким буде діаметр краплі ?
- 6.10. Яку масу оксигумату натрію треба розпилити у приміщенні 15 м x 5 м x 4 м для одержання у повітрі аерозольних частинок діаметром 30 мкм з концентрацією 10^8 м^{-3} ? Густина оксигумату натрію 1160 кг/м^3 .

- 6.11.Визначити рухливість легких негативних аеріонів кисню у повітрі, якщо в електричному полі з напруженістю 20 кВ/м при концентрації частинок 10^5 см^{-3} утворюється струм густиною 10^{-8} А/м^2 .
- 6.12.Яка густина струму, що утворюється потоком одновалентних аеріонів із швидкістю 10^{-2} см/с ? Концентрація аеріонів 10^{12} м^{-3} .
- 6.13.В 1 м^3 повітря зосереджено 10^{-12} Кл електрики у вигляді негативних легких аеріонів, що мають подвійний елементарний заряд. Яка концентрація іонів у повітрі ?
- 6.14.Яка кількість одновалентних аеріонів осідає на поверхню тіла за 1 с, якщо крізь неї проходить струм 10^{-6} А ?
- 6.15.До пилінки масою 2 мг прилипли 10 однозарядних іонів кисню. Яка сила буде діяти на пилінку у електричному полі з напруженістю 10^4 В/м ? З яким прискоренням вона буде рухатись ?
- 6.16.Визначити швидкість руху іонів у електричному полі з напруженістю 10^5 В/м . Рухливість іонів $10^{-5} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.
- 6.17.Яка робота здійснюється електричним полем напруженістю 10^4 В/м при переміщенні елементарного заряду на відстань 2 м ?
- 6.18.Визначити енергію взаємодії двох аеріонів із зарядами по -10^{-12} Кл кожний, розташованих на відстані 0,1 мкм ?
- 6.19.Визначити аеродинамічний діаметр аерозольної частинки, якщо її густина 1260 кг/м^3 , а швидкість осідання у повітрі 0,1 мм/с. В'язкість повітря прийняти $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$.
- 6.20.Визначити масу аерозольної частинки оксигумату натрію (густина 1160 кг/м^3) діаметром 30 мкм.
- 6.21.При коалесценції (злипання) 10 однакових аерозольних частинок в одну утворюється частинка діаметром 50 мкм. Визначити діаметр маленьких частинок.
- 6.22.Циліндричне азбестове волокно має довжину 10 мкм і діаметр 0,5 мкм. Визначити діаметр кулі, що має такий об'єм.
- 6.23.Кубічний кристал масою 20 нг осідає з швидкістю 3 см/с у повітрі, в'язкість якого $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Визначити аеродинамічний діаметр кристалу.
- 6.24.Визначити стоксівський діаметр частинки, що осідає у повітрі з швидкістю 5 мм/с. Вага частинки 3 нН. В'язкість повітря $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$.
- 6.25.Визначити площу поверхні монодисперсного аерозоллю води в 1 м^3 повітря. Діаметр частинок 10 мкм, концентрація 10^5 м^{-3} .
- 6.26.З наведеного у таблиці розподілу частинок за діаметром визначити середній і медіанний діаметри аерозоллю.
- | інтервал, мкм | кількість | інтервал, мкм | кількість |
|---------------|-----------|---------------|-----------|
| 1-2 | 30 | 5-10 | 20 |
| 2-3 | 90 | 10-20 | 10 |
| 3-5 | 50 | 20-30 | 5 |
- 6.27.За умовами попередньої задачі визначити відносну вагу частинок, що мають діаметри 3-5 мкм.

- 6.28. За умовами задачі 26 визначити відносний об'єм частинок, що мають діаметри 10-20 мкм.
- 6.29. За умовами задачі 26 визначити відносну масу частинок, що мають діаметри 5-10 мкм.
- 6.30. За умовами задачі 26 побудуйте гістограму розподілу аерозольних частинок (залежність кількості часток від інтервалів їх розміру).
- 6.31. Діаметр краплі розчину NaCl 1 мкм. Вміст NaCl у краплі складає 25% розчинності (35,7 г на 100 см³). Густина NaCl 2,13 г/см³. Визначити діаметр частинки, що залишиться після випаровування води з краплі.
- 6.32. Припускаючи, що аерозольні частинки рівномірно розподіляються у повітрі, визначити відстань між ними, якщо їх концентрація 10⁵ м⁻³.
- 6.33. Визначити середню арифметичну і середню квадратичну швидкості теплового руху частинки діаметром 0,1 мкм і густиною 1 г/см³ у повітрі з температурою 27° С.
- 6.34. При 20° С тиск насиченої водяної пари 17,5 мм рт.ст. Скільки молекул води знаходиться у 1 см³ повітря при відносній вологості 50% ?
- 6.35. При якому діаметрі частинки з густиною 10³ кг/м³ швидкість її осідання у повітрі зрівняється з середньою квадратичною швидкістю теплового руху ? Температура повітря 27°С, його в'язкість 1,8·10⁻⁵ Па·с.
- 6.36. При перебуванні 30 студентів в аудиторії об'ємом 200 м³ повітря забруднюється шкідливими аерозолями і потребує оновлення кожну годину. Через який час необхідно оновити повітря, якщо замість студентів в аудиторії знаходиться особа, що палить? Швидкість забруднення повітря при палінні збільшується у 100 разів.
- 6.37. Концентрація ядер конденсації водяної пари складає 4·10⁴ см⁻³. Визначити середню відстань між ядрами.
- 6.38. Визначити електрофоретичну рухливість частинок діаметром 10 мкм, що мають 100 надлишкових елементарних зарядів. В'язкість повітря прийняти 1,8·10⁻⁵ Па·с.
- 6.39. Визначити швидкість аерозольних частинок діаметром 10 мкм і густиною 2,65 г/см³, якщо вони мають 200 надлишкових елементарних зарядів і знаходяться у електричному полі з напруженістю 70 кВ/м. В'язкість повітря 1,8·10⁻⁵ Па·с, напрямок дії сил тяжіння і електричного поля протилежний.
- 6.40. Знайти швидкість у попередній задачі, якщо напрямок сил тяжіння і поля співпадає.
- 6.41. При проходженні світла крізь аерозольну хмару товщиною 100 м інтенсивність світла зменшилась до 0,368 початкової величини. Визначити коефіцієнт екстинції хмари.
- 6.42. Яку потужність повинно мати джерело струму з наругою 30 кВ для забезпечення руху аерозольних частинок концентрацію 10⁶ м⁻³ на відстань 10 м за 3 хвилини? Частинки мають 200 елементарних надлишкових зарядів.

- 6.43. Для знищення шкідників у приміщенні пташника об'ємом 1000 м^3 необхідна концентрація аерозолу 10^8 м^{-3} . Скільки речовини треба розпилити, якщо діаметр частинок 5 мкм ? 10 мкм ?
- 6.44. Який час осідання частинок задачі 6.43, якщо висота приміщення 3 м , густина речовини $1,2 \text{ г/см}^3$, в'язкість повітря $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$.
- 6.45. Природне електростатичне поле Землі спрямоване до її поверхні і складає у середньому 150 В/м . За яких умов частинки з зарядом q і масою m не будуть осідати?
- 6.46. Середній об'єм повітря, що вдихає та видихає людина за один раз, становить 1 л , частота дихання $0,5 \text{ с}^{-1}$. Концентрація пилових частинок у повітрі 10^8 м^{-3} , їх діаметр 1 мкм , густина 10^3 кг/м^3 . Яка маса пилу осідає у легенях за добу ?
- 6.47. У курортних місцевостях концентрація негативних іонів кисню O_2 досягає 10^4 м^{-3} . Якої сили струм виникає при диханні таким повітрям, якщо усі іони осідають у легенях ? (Використати дані попередньої задачі).

Для вирішення наступних задач використайте матеріали лабораторної роботи 16.

- 6.48. Протягом $2\frac{1}{3}$ год розпаду радіоактивного препарату залишилось $0,78 \%$ його початкової кількості. Який період напіврозпаду препарату ?
- 6.49. Чому дорівнює стала радіоактивного розпаду, якщо період напіврозпаду становить 693 с ?
- 6.50. Частка радіоактивних ядер, що зазнали розпаду протягом $0,5 \text{ с}$ становить $0,2 \text{ 1/с}$. Визначте сталу розпаду.
- 6.51. В проміжній ділянці радіоактивного ряду нептунію ядро торію (Th-229) зазнає послідовно альфа- та бета-розпадів. Яке радіоактивне ядро утворюється при цьому ?
- 6.52. В проміжній ділянці радіоактивного ряду торію ядро радону (Rn-220) зазнає послідовно двох альфа- та одного бета-розпадів. Яке радіоактивне ядро утворюється при цьому ?
- 6.53. В проміжній ділянці радіоактивного ряду актиноурану ядро протактинію (Pa-231) зазнає послідовно альфа- та бета-розпадів. Яке радіоактивне ядро утворюється при цьому ?
- 6.54. В проміжній ділянці радіоактивного ряду урану ядро свинцю (Pb-210) зазнає послідовно двох бета- та одного альфа-розпадів. Яке радіоактивне ядро утворюється при цьому ?
- 6.55. В досліджуваному радіоактивному препараті відбувається 37 мільйонів розпадів за секунду. Визначте активність даного препарату в кюрі та беккерелях.
- 6.56. Маса радіоактивної речовини становить $18,5 \text{ мг}$. За результатом попередньої задачі визначте питому активність речовини.
- 6.57. Під час радіоактивного опромінення тварина отримала експозиційну дозу 258 мР . Яка поглинута доза м'якими тканинами тварини ?

- 6.58. Під час радіоактивного опромінення тварина отримала еквівалентну дозу 300 мЗв. Яку поглинуту дозу отримала тварина, якщо іонізуюче випромінювання зумовлюється повільними нейтронами ?
- 6.59. Під час рентгенівського опромінення тварина отримала еквівалентну дозу 600 мЗв. Яка експозиційна доза випромінювання, отримана м'якими тканинами тварини ?
- 6.60. Нормальний природний радіаційний фон не перевищує 1 мЗв/рік. Яка потужність експозиційної дози в мкР/год відповідає даному фону ?

ДОВІДКОВИЙ МАТЕРІАЛ

1. Основні фізичні сталі (округлені значення)

<i>Фізична стала</i>	<i>Позначення</i>	<i>Числове значення</i>
Швидкість світла у вакуумі	c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала	γ	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м ² /кг ²
Електрична стала	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Стала Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Стала Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Число Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Механічний еквівалент світла	A	683 лм/Вт
Елементарний заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Маса спокою електрона	m_e	$9,12 \cdot 10^{-31}$ кг
Атомна одиниця маси	<i>a. o. m.</i>	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Число Фарадея	F	$9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль
Універсальна газова стала	R	8,31 Дж/(моль·К)
Стала Стефана-Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² ·К ⁴)
Стала Віна	b	$2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К
Нормальний атмосферний тиск	p_0	101325 Па
Прискорення вільного падіння	g	$9,81$ м/с ²

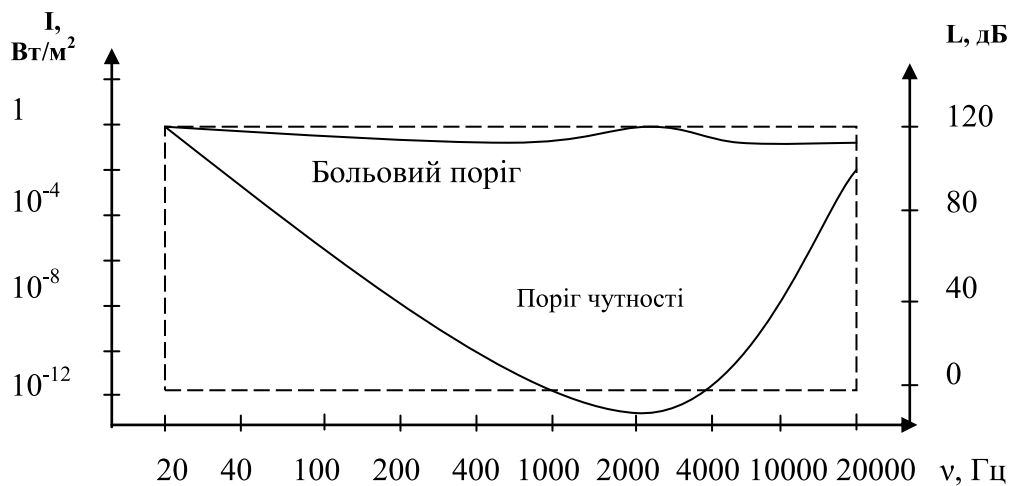
2. Динамічний коефіцієнт в'язкості η (Па·с) деяких рідин при 20° С

Етиловий ефір	0,00023
Ацетон	0,00033
Вода	0,001
Етиловий спирт	0,0012
Плазма крові	0,0017
Цільна кров	0,004-0,005
Мозкова тканина	0,008
Касторове масло	0,9
Гліцерин	1,5

3. Густина ρ (кг/м³) і швидкість звуку c (м/с) для деяких речовин і біологічних тканин

	ρ (кг/м ³)	c (м/с)
Повітря	1,29	331
Вода	1000	1497
Молоко	994	1500
М'язи	994	1550
Жирова тканина	904	1460
Мозок	1053	1520
Печінка	1083	1570
Кров	1050	1480
Кістка	1695	3660

4. Діапазон слухового відчуття людини



5. Коефіцієнт затухання ультразвуку δ (м⁻¹) на частоті вимірювання ν (МГц)

	$\nu = 1,0$ МГц	$\delta = 0,01$ м ⁻¹
Вода		
Плазма крові	0,87	2,0
Цільна кров	1,0	2,5
Жирова тканина	0,87	4,5
Мозок	0,87	14
М'язи	0,87	16
Шкіра	1,0	40
Кістка	0,88	71

6. Питома теплоємність c (Дж/кг·К) та коефіцієнт теплопровідності різних твердих речовин λ (Вт/м·К)

Асфальт	$c=920$ Дж/кг·К	$\lambda=0,744$ Вт/м·К
Бетон	880	0,11-2,33
Віск	2930	0,101
Гіпс	840-920	1,30
Граніт	800	3,42
Дерево	2390-2720	0,15-0,43
Земля волога	-	0,67
Земля суха	-	0,14
Цегла червона	880	0,77
Цегла силікатна	840	0,67
Пісок сухий	790	0,326
Пісок вологий	-	1,128
Пробка	2050	0,042

7. Питома теплоємність c (Дж/кг·К) і коефіцієнт теплопровідності λ (Вт/м·К) речовин для теплових процедур та біологічних тканин

Вода	4190	0,58
Парафін	3230	0,23
Озокерит	3350	0,15
Церезин	3270	0,20
Мулова грязюка	2090	0,70
Торф	3850	0,42
Глина	2100	0,72
Жирова клітковина		0,17-0,21
М'яз при нормальному кровострумі		0,50
М'яз при сильному кровострумі		0,58

8. Питомий опір деяких тканин ρ (Ом·м) постійному струму при 20°С

Спиномозкова рідина	0,55	Сироватка крові	0,71
Кров	1,7	М'язи	2,0
Печінка	3,3	Мозок	14
Жирова тканина	33	Шкіра суха	10^5
Кістка без надкістниці	10^7	Вода хімічно чиста	10^6
Срібло	$1,6 \cdot 10^{-8}$		

9. Залежність відносної спектральної світлової ефективності ν від довжини хвилі λ

ν	λ , нм
0,004	400
0,116	430
0,060	460
0,208	490
0,710	520
0,995	550
1,000	555
0,995	560
0,757	590
0,381	620
0,107	680
0,017	710
0,0006	760

10. Залежність відносної спектральної еритемої чутливості V_E від довжини хвилі λ випромінювання

V_E	λ , нм
0,008	240
0,142	250
0,254	260
0,425	270
0,650	280
0,852	290
1,000	296,7
0,833	300
0,115	310
0,003	315

11. Залежність відносної спектральної бактерицидної дії V_B від довжини хвилі λ випромінювання

V_B	λ , нм
0,250	220
0,395	230
0,627	240
0,912	250
1,000	254
0,992	260
0,869	270
0,582	280
0,253	290
0,059	300
0,015	310
0,004	315

12. Період піврозпаду радіоактивних ізотопів

<i>Ізотоп</i>	<i>Період піврозпаду</i>	<i>Ізотоп</i>	<i>Період піврозпаду</i>
Йод-131	8 діб	Стронцій-90	28 років
Кобальт-60	5,3 року	Уран-235	$7,1 \cdot 10^8$ років
Радій-226	$1,6 \cdot 10^3$ років	Уран-238	$4,5 \cdot 10^9$ років
Радон-222	3,8 доби	Фосфор-32	14,3 доби

Є.Г. Попов, В.І. Цоцко

Б І О Ф І З И К А

Лабораторний практикум і збірник задач

Підписано до друку 14.07.2017. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний
Умовн. друк. арк. 8,14. Обл.-вид. арк. 7,95. Зам. № 617.
Наклад 30 прим.

Віддруковано на базі поліграфічно-видавничого центру «Арбуз»
49000, Дніпро, Короленко 3 / 308
тел. (073)-444-88-54, (096)-308-00-38
E-mail: 7984722@gmail.com,
www.arbuz.in.ua
www.facebook.com/arbuz.in.ua