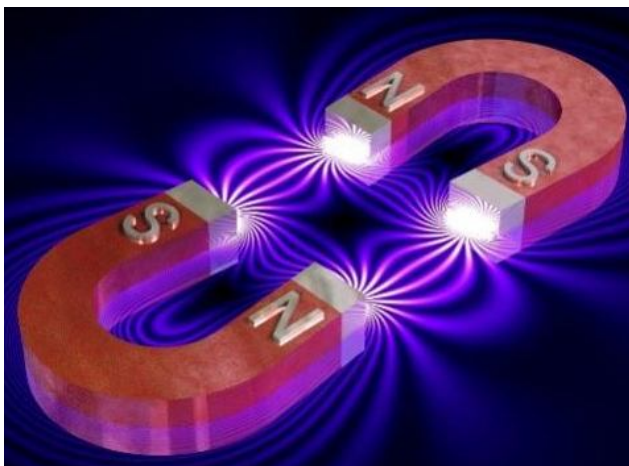


**Боровий М.О., Лисов В.І., Козаченко В.В.,  
Цареградська Т.Л., Овсієнко І.В., Жабітенко О.М.**

## **ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ. ЧАСТИНА І.**

### **МЕХАНІКА, МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА, ЕЛЕКТРИКА ТА МАГНЕТИЗМ.**

**Навчальний посібник**



*Рекомендовано Міністерством  
освіти і науки, молоді та спорту України  
як навчальний посібник для нефізичних  
спеціальностей університетів*

**Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка**

**Боровий М.О., Лисов В.І., Козаченко В.В.,  
Цареградська Т.Л., Овсієнко І.В., Жабітенко О.М.**

**ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ. ЧАСТИНА І.  
МЕХАНІКА, МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА,  
ЕЛЕКТРИКА ТА МАГНЕТИЗМ.**

**Навчальний посібник**

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки,  
молоді та спорту України  
як навчальний посібник для нефізичних  
спеціальностей університетів*

**Київ-2012**

УДК  
ББК

**Рецензенти:**

д. фіз-мат. наук, зав.каф. заг. та прикл. фіз. НПУ           Шут М.І.  
д. фіз-мат. наук, проф.каф. обч. мат. КНУ                   Рублев Б.В.  
д. фіз-мат. наук, проф.каф. фіз. НТУ                       Гололобов Ю.П.

*Рекомендовано до друку вченою радою фізичного факультету  
(протокол 9 від 18 квітня 2011)*

**ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ. ЧАСТИНА І. Механіка, молекулярна фізика, електрика та магнетизм.** Навчальний посібник / Боровий М.О., Лисов В.І., Козаченко В.В., Цареградська Т.Л., Овсієнко І.В., Жабітенко О.М. – К., 2012. – 289 с.

ISBN

Подано опис 28 лабораторних робіт, розглянуто принципи дії, основні характеристики, похибки та класи точності електровимірювальних приладів, наведено теоретичні відомості, які необхідні студентам для виконання лабораторних робіт, схеми установок для виконання експериментів. Для студентів природничих факультетів університетів.

**Гриф надано Міністерством освіти і науки,  
молоді та спорту України  
(лист 1/11 –12140 від 22.12.11)**

## ПЕРЕДМОВА

Лабораторний практикум є важливою складовою частиною навчального процесу, найефективнішою формою пізнавальної діяльності студентів, оскільки він дає можливість особисто відтворювати і спостерігати більшість явищ, що вивчаються у фізиці, самостійно перевіряти на досліді фізичні закономірності та наслідки з них, а також знайомитися з принципом дії та будовою основних електровимірювальних приладів і найважливішими методами фізичного експерименту. Лабораторний практикум прищеплює навички самостійної дослідницької роботи і технічно грамотного вимірювання фізичних величин, а також унаочнює, поглиблює, розширює і обґрунтовує теоретичний курс предмета. Унаслідок цього здійснюється один з важливих етапів навчання – поєднання теорії з практикою.

У цьому навчальному посібнику подано опис лабораторних робіт з механіки, молекулярної фізики, електрики і магнетизму. Опис кожної лабораторної роботи включає мету, перелік обладнання, теоретичні відомості, схему установки для проведення експерименту і порядок його виконання, контрольні запитання та список рекомендованої літератури. Приступаючи до виконання кожного завдання, студент має ознайомитися з метою і порядком виконання лабораторної роботи за матеріалами посібника, вивчити відповідні розділи рекомендованої навчальної літератури та записи на лекціях.

## ВСТУП

В основі точних природничих наук, до яких відноситься і фізика, лежать вимірювання. Отримані в результаті вимірювань числові значення різних величин можуть залежати одна від одної. Електричні методи вимірювання широко використовуються в науці і техніці. Це пояснюється тим, що вони мають низку переваг перед іншими методами. Головні з цих переваг такі:

- поширеність електричних явищ у природі, завдяки чому електричні вимірювання відкривають широкі можливості для

вивчення різноманітних властивостей речовини і явищ, контролювання різних процесів;

- відносна легкість взаємного перетворення електричної енергії в інші види енергії – механічну, теплову, хімічну, світлову;

- зручність управління і трансформації електричного струму за допомогою трансформаторів, реостатів, випрямлячів тощо;

- надзвичайно висока чутливість і велика точність електричних методів вимірювання;

- забезпечення безперервного контролю за протіканням процесів, що дає можливість їх автоматизації;

- можливість вивчати швидкозмінні процеси (катодний осцилограф) та ін.

Вивчення електричних методів вимірювання є дуже важливим і необхідним при оволодінні фізичними методами дослідження. У сучасній фізиці електричні вимірювання є невід'ємною частиною практично всіх досліджень. Студенти мають вивчити роботу основних електричних приладів і ознайомитися з особливостями електричних методів вимірювання.

Вимірювальні прилади добираються відповідно до методу дослідження та тієї точності, з якою необхідно виконати експеримент. Про кожний вимірювальний прилад, який використовується при дослідженнях, необхідно з'ясувати таке: його призначення, принцип дії і будову, основні характеристики (межі вимірювання, ціну поділки шкали, клас точності, правила користування приладом і вимоги техніки безпеки).

Математична обробка результатів вимірювань як елемент експерименту вимагає від студента вмінь і навичок виконання наближених обчислень. Інтерпретація одержаних результатів здійснюється за допомогою теорії, яка була покладена в основу дослідження. Якщо результати досліджень не узгоджуються з теорією, то експеримент треба повторити, проаналізувавши перед цим усі його елементи і послідовність етапів з метою виявлення можливих помилок.

## 1. ПРАВИЛА З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

Тіло людини є провідником, опір якого змінюється в широких межах залежно від ряду факторів. Вологість, забруднення шкіри та інші фактори зменшують його опір.

Якщо сила струму більша за 0,05 А, то його дія на тіло людини протягом 0,1 с може спричинити небезпечне ураження. Оскільки сила струму залежить від напруги і опору, то за правилами техніки безпеки напруга, більша за 24 В, вважається небезпечною.

Неправильні з'єднання в схемі можуть призводити до виведення з ладу приладів, травматизму й ураження струмом. Тільки за дотримання вимог правил техніки безпеки можна запобігти цим неприємним явищам.

Наведемо основні правила техніки безпеки.

1. До роботи в лабораторії допускаються лише студенти, які ознайомились із правилами техніки безпеки. Студенти розписуються в журналі обліку проведення інструктажу і несуть відповідальність за їх виконання.

2. Не можна самостійно робити будь-які вмикання або вимикання на головному щиті.

3. Складати коло за схемою можна тільки при вимкненій напрузі.

4. Вмикати струм у складене коло можна тільки після перевірки схеми викладачем або інженером практикуму та отримання їхнього дозволу.

5. Не можна доторкатися до неізольованих частин електричної схеми, які перебувають під напругою (проводи, вимикачі, затискачі, повзунки тощо).

6. Забороняється виконувати будь-які перемикання в схемі під напругою.

7. Не можна залишати без нагляду схему, що знаходиться під напругою.

8. Забороняється закорочувати блокувальні пристрої.

9. Не дозволяється без потреби ходити по лабораторії та виконувати інші лабораторні роботи.

10. Якщо з вами або з вашим товаришем трапився нещасний випадок, слід негайно вимкнути джерело струму, повідомити викладача, подати потерпілому першу допомогу, одночасно викликавши швидку медичну допомогу.

## **2. ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ РОБІТ**

На початку кожного заняття викладач перевіряє теоретичну підготовку, наявність конспекту опрацьованого матеріалу і ставить декілька контрольних запитань студенту відповідно до теми роботи, яка буде виконуватись. Якщо відповіді на контрольні запитання задовільні, то студенту дозволяється виконувати лабораторну роботу.

Усі роботи практикуму студент виконує самостійно, консультуючись з викладачем. Приступаючи до роботи насамперед треба ознайомитись з обладнанням, з'ясувати призначення кожного його елемента. Після цього приступають до складання електричного кола за схемою. При цьому необхідно стежити за надійністю контактів між затискачем приладів і кінцями провідників. У складеній схемі слід встановити стрілки вимірювальних приладів на нуль, визначити ціну їх поділок, багатограничні прилади перемкнути на найбільші номінали. Приладами регулювання режиму електричного кола встановити максимальний опір і мінімальну напругу.

Вмикати живлення до складеної схеми і приступати до виконання експерименту можна тільки після перевірки схеми викладачем і одержання на це його дозволу.

Як правило, в кожній лабораторній роботі досліди необхідно повторювати декілька разів і результати вимірювань записати у таблицю.

Джерело струму слід вмикати лише на час проведення вимірювань. Якщо при виконанні роботи окремі частини кола чи прилади сильно нагріваються, необхідно негайно вимкнути струм і попередити викладача.

Експериментальна частина роботи вважається виконаною, якщо одержаний результат або графік розгляне викладач. Після

цього необхідно привести в порядок робоче місце, повідомити про це викладача та тільки після його дозволу залишити лабораторію.

По кожній виконаній роботі слід скласти письмовий звіт і захистити його. Для зарахування роботи студент має дати вичерпну відповідь на поставлені запитання.

**Кожен протокол письмового звіту повинен містити такі елементи:**

- 1) повна назва роботи;
- 2) мета роботи;
- 3) обладнання з зазначенням технічних даних приладів;
- 4) короткі теоретичні відомості про досліджуване явище;
- 5) порядок виконання роботи;
- 6) схему електричного кола;
- 7) результати експерименту у вигляді таблиць і графіків на міліметровому папері;
- 8) розрахунок похибок;
- 9) запис відповіді для визначуваних величин (кінцеві результати) з урахуванням похибок та одиниць вимірювання;
- 10) інтерпретація одержаних результатів і висновки.

### **3. ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН**

Виміряти якусь фізичну величину – означає порівняти її з іншою однорідною величиною, яку умовно прийнято за одиницю вимірювання. Розрізняють прямі й непрямі вимірювання фізичних величин.

**Прямі вимірювання** – це такі, коли шукана величина визначається безпосередньо за допомогою технічного пристрою. Наприклад, вимірювання маси тіла зважуванням на аналітичних терезах, часу – секундоміром, температури – термометром, сили струму – амперметром тощо.

**Непрямі вимірювання** – це такі, коли результат знаходять з прямих вимірювань інших величин, що пов'язані з шуканою величиною відомою функціональною залежністю. Наприклад, вимірювання густини речовини – за вимірюванням маси тіла і його геометричних розмірів, опору провідника – за



вимірюванням напруги на його кінцях та сили струму, що тече по ньому.

Через недосконалість органів чуття людини та технічних засобів при проведенні фізичних вимірювань дістають лише наближені значення шуканих величин. Слід пам'ятати, що немає жодної величини, яку можна було б виміряти абсолютно точно. Тому завдання полягає не лише у визначенні числового значення фізичної величини, але й в оцінці точності та надійності вимірювання.

Точність вимірювань визначається тією найменшою часткою одиниці вимірювання, до якої в упевненістю у правильності результату можна проводити вимірювання. Наприклад, твердження, що діаметр кульки виміряно з точністю до 0,005 мм, означає, що величина вимірюного діаметра відрізняється від істинної не більше ніж на 0,005 мм. Точність вимірювань визначається точністю приладів, що їх для цього використовують, а також точністю методу вимірювання. Надійність вимірювань (довірча ймовірність) характеризує ймовірність того, що істинне значення перебуває у певних границях, які визначаються довірчим інтервалом, її визначення вимагає знайомства з методами математичної статистики.

Точність вимірювання тієї чи іншої фізичної величини пов'язана з похибками вимірювань. Похибки вимірювань прийнято поділяти на систематичні, випадкові та промахи.

До систематичних похибок належать такі, що залишаються однаковими за фіксованих умов досліду, тобто коли вимірювання проводять тим самим методом і тими самими приладами. Причини їх виникнення можуть бути найрізноманітнішими.

**Систематичні похибки** можна поділити на чотири групи:

1. похибки відомого походження, які можна визначити експериментально або шляхом обчислень. їх називають поправками. До таких похибок належить, наприклад, урахування архімедової сили при визначенні маси тіла шляхом зважування, урахування

- впливу температури при визначенні лінійних розмірів досліджуваного тіла;
2. похибки відомого походження, але невідомої величини. До них належать похибки приладів, їх поява пов'язана з недосконалістю виготовлення приладів, залежністю їхніх показників від зовнішніх умов. Похибки цього виду визначаються класом точності приладу. Якщо клас точності приладу 1.0, то це означає, що покази приладу відрізняються від істинного значення не більше ніж на 1% від діючої шкали приладу;
  3. похибки невідомого походження та невідомої величини. Це найнебезпечніша група систематичних похибок, оскільки про їхнє існування ми можемо навіть не здогадуватися, а вони можуть бути вагомими. Найчастіше такі похибки виникають через непередбачливість експериментатора, який не виявив усіх факторів, що заважають вимірюванням;
  4. похибки, обумовлені наближеним характером методу вимірювань або обчислень. До таких похибок призводить, наприклад, нехтування опором з'єднувальних провідників, силами тертя тощо.

При виконанні лабораторних робіт припускатимемо, що систематичні похибки визначаються лише похибкою приладу, а вона не перевищує деяке максимальне значення  $\delta_{\max}$ . Якщо відсутні спеціальні вказівки у паспорті приладу, то за  $\delta_{\max}$  беруть половину ціни найменшої поділки шкали приладу.

Крім систематичних, існують випадкові похибки, які мають несистематичний, ймовірнісний характер. Вони відрізняються від перших насамперед тим, що набувають різних значень в окремих вимірюваннях, які проводяться за однакових умов. Ці похибки викривляють результатів одних випадках, завищуючи його, а в інших – занижуючи.

Як це не парадоксально, але саме ймовірнісний характер випадкових похибок дозволяє, якщо не виключити їх, то помітно послабити дію на результат вимірювань.

Виконавши ряд вимірювань, можна, користуючись теорією випадкових похибок, яка побудована за законами теорії ймовірностей, визначити найбільш ймовірне значення вимірюваної величини, провести кількісну оцінку випадкової похибки, вказати її ймовірність. Нижче ми покажемо, як це робиться в найпростіших випадках.

Нехай дійсне значення вимірюваної фізичної величини  $X$ , а результати окремих вимірювань за шкалою приладу  $x_1, x_2, \dots, x_i$ . Величина  $\delta_{x_i} = x_i - X$  є похибкою  $i$ -того вимірювання. Оскільки нам невідомо значення  $X$ , то залишаються невідомими і значення  $\delta_{x_i}$ . Проте можна стверджувати, що

- 1) похибки  $\delta_{x_i}$  можуть набувати неперервний ряд значень;
- 2) похибка  $\delta_{x_i}$  може бути представлена як сума систематичної похибки  $\delta_c$ , яка є однаковою для всіх вимірювань, та випадкової похибки  $\delta_i$ , яка для різних вимірювань різна;
- 3) великі (за абсолютною величиною) випадкові похибки зустрічаються рідше, ніж малі;
- 4) при великому числі вимірювань випадкові похибки однакової величини, але різні за знаком, зустрічаються однаково часто.

У силу останнього твердження при досить великому числі вимірювань  $n$  (точно кажучи,  $n \rightarrow \infty$ ) середня випадкова

похибка  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$  прямує до нуля при необмеженому зростанні числа вимірювань:

Як впливає з математичної статистики, за цих умов найкращою числовою оцінкою величини  $X$  є середнє арифметичне з вимірювань:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.1)$$

яку називають вибіркоvim середнім. Величина  $X$  сама є випадковою – в різних вибірках з  $n$  вимірювань вона може

набувати різних значень. Але, незважаючи на це, вибіркове середнє ближче до  $X$ , ніж одиничне вимірювання  $x_i$ , оскільки відхилення вибіркового середнього  $\bar{x}$  від істинного значення  $X$  менше за більшість похибок окремих одиничних вимірювань  $\delta_{x_i} = x_i - X$ . Дійсно, підставивши  $x_i = X + \delta_{x_i}$  в (3.1), дістанемо:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X + \delta_{x_i}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X + \delta_c + \delta_i) = \\ &= X + \delta_c + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i,\end{aligned}\quad (3.2)$$

а при  $n \rightarrow \infty$ ,  $\bar{x}$  прямує до  $X + \delta_c$ . Отже, виконавши достатньо велику кількість вимірювань, можна практично виключити вплив випадкової похибки (але не систематичної). На практиці неможливо виконати дуже велику кількість вимірювань. Тому, виконавши серію з  $n$  вимірювань, можна визначити відхилення окремих вимірювань  $x_i$  від вибіркового середнього  $\bar{x}$ , а саме:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}.\quad (3.3)$$

Величини  $\Delta x_i$ , як і  $\delta_{x_i}$  – випадкові, і якщо виконуються зроблені вище припущення, описуються законом нормального розподілу Гаусса

$$y(\Delta x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta x_i)^2}{2\sigma^2}},\quad (3.4)$$

де  $e$  – основа натуральних логарифмів, а  $\sigma^2$  – стала величина, яку називають дисперсією розподілу.

Нормальний розподіл характеризується двома параметрами: генеральним середнім значенням величини, по відношенню до якої відбувається розкид випадкових величин, та дисперсією. При великій кількості вимірювань ( $n \rightarrow \infty$ ) величина дисперсії  $\sigma^2$  (її називають вибірковою) дорівнює середньому квадрату похибки вимірювання  $\Delta S_n^2$ :

$$\Delta S_n^2 = \frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}. \quad (3.5)$$

При обмеженій кількості вимірювань за величиною  $\Delta S_n^2$  можна лише оцінити  $\sigma^2$ , але  $\Delta S_n^2 \neq \sigma^2$ .

Оскільки  $\bar{x}$  – випадкова величина, то різниця між нею та істинним значенням шуканої величини  $X$  є також випадковою величиною, для якої так само виконується **закон нормального розподілу Гауса**

$$y(\delta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\bar{x}}}} \cdot e^{-\frac{(\delta_i)^2}{2\sigma_{\bar{x}}^2}}, \quad (3.6)$$

але з іншим значенням дисперсії. Можна довести, що

$$\sigma_x^2 = \frac{\sigma^2}{n}. \quad (3.7)$$

Очевидно,  $\sigma_{\bar{x}}^2$  прямує до квадрата середньоквадратичної похибки результату серії вимірювань  $S_{\bar{x}}^2$ , при цьому

$$\Delta S_{\bar{x}} = \sqrt{\Delta S_{\bar{x}}^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (3.8)$$

Надійність визначення істинного значення величини  $x$  характеризують довірчою ймовірністю  $\alpha$  та довірчим інтервалом  $\Delta x$ .

**Довірчий інтервал**  $\Delta x$  обмежує простір  $\bar{x} \pm \Delta x$ , куди з певною ймовірністю  $\alpha$  попадає істинне значення величини  $X$ . У теорії оцінки випадкових похибок доведено, що при  $n \rightarrow \infty$  довірчому інтервалові відповідає  $\alpha = 0,68$  (68%), Це означає, що при такому значенні  $\Delta x$  існує досить значна (32%) ймовірність, що  $X$  перебуває за межами інтервалу  $\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}$ . Але вже для  $\Delta x = 2\sigma_{\bar{x}}$ ,  $\alpha = 0,95$ , а при  $\Delta x = 3\sigma_{\bar{x}}$   $\alpha = 0,997$ , тобто ймовірність виходу  $X$  за межі інтервалу  $\bar{x} \pm 3\sigma_{\bar{x}}$  складає лише 0,3%.

У випадку обмеженої кількості вимірювань  $n$  для оцінки довірчого інтервалу, що відповідає заданому значенню  $\alpha$ , вводять коефіцієнт  $t_{\alpha,n}$ , який називають коефіцієнтом Стьюдента (запропонований у 1908 р. англійським математиком та хіміком В.С.Госсетом, який друкував свої роботи під псевдонімом “Стьюдент” – студент). При цьому  $\Delta x = t_{\alpha,n} \cdot \Delta S_{\bar{x}}$ . Значення коефіцієнтів Стьюдента залежать від числа вимірювань  $n$  та від заданої величини довірчої імовірності  $\alpha$ . Для їх визначення користуються спеціальними таблицями.

У наведеній нижче таблиці містяться деякі значення  $t_{\alpha,n}$ , якими ми користуємося при оформленні лабораторних робіт.

*Таблиця 1.*

**Значення коефіцієнтів Стьюдента для різних значень імовірності**

$n \setminus \alpha$	<b>0,9</b>	<b>0,95</b>	<b>0,99</b>
2	6,31	12,71	63,66
3	2,92	4,30	9,92
4	2,35	3,18	5,84
5	2,13	2,78	4,60
6	2,02	2,57	4,03
7	1,94	2,45	3,71
8	1,90	2,36	3,50
9	1,86	2,31	3,36
10	1,83	2,26	3,25
11	1,64	2,00	2,58

I, нарешті, остання група похибок – промахи. Промахи – це результат недогляду експериментатора. Вони виникають через неуважність експериментатора, через випадкові тимчасові перешкоди, внаслідок помилок у записах або обчисленнях тощо.

У теорії похибок існують критерії, що дозволяють визначити, чи є певний результат промахом, чи його треба враховувати при розрахунках. При виконанні лабораторних робіт достатньо виключити з розгляду результати, для яких  $|\Delta x| > 3\Delta S_{\bar{x}}$ . Підставою для цього є той факт, що у випадку нормального закону розподілу ймовірність знаходження  $\Delta x$  за межами інтервалу  $\Delta x > 3\Delta S_{\bar{x}}$  величина  $1 - \alpha$ , складає лише 0,3%.

### 3.1. Порядок обробки експериментальних результатів для випадку прямих вимірювань

1. Скласти таблицю, до якої записати результати вимірювань величини  $x$ .
2. Обчислити середнє значення вимірювань за формулою

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (3.1.1)$$

3. Знайти похибки окремих вимірювань  $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$
4. Обчислити квадрати похибок окремих вимірювань  $(\Delta x_i)^2$
5. Визначити середню квадратичну похибку результату серії вимірювань за формулою

$$\Delta S_{\bar{x}} = \sqrt{\Delta S_{\bar{x}}^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}} . \quad (3.1.2)$$

6. Якщо серед обчислених значень  $\Delta x_i$  будуть такі, що перевищують величину  $3\Delta S_{\bar{x}}$ , то відповідні їм значення  $x_i$  відкинути і вже без них знову визначити  $\Delta S_{\bar{x}}$ .
7. Задати значення довірчої ймовірності  $\alpha$  і за таблицею 1 визначити коефіцієнт Стюдента  $t_{\alpha,n}$  для цього значення  $\alpha$  і числа вимірювань  $n$ .
8. Визначити межі довірчого інтервалу

$$\Delta x = t_{\alpha,n} \cdot \Delta S_{\bar{x}}. \quad (3.1.3)$$

9. Якщо величина  $\Delta x$ , що визначається за п.8, виявиться порівнянню з величиною похибки приладу  $\delta_c$ , то  $\Delta x$  визначити за формулою:

$$\Delta x = \sqrt{t_{\alpha,n}^2 \Delta S_{\bar{x}}^2 + \left(\frac{t_{\alpha,n}}{3}\right)^2 \delta_c^2}. \quad (3.1.4)$$

10. Остаточний результат записати у вигляді:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad (3.1.5)$$

11. Оцінити відносну похибку

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (3.1.6)$$

### 3.2. Порядок обробки експериментальних результатів у випадку непрямих вимірювань

Якщо при визначенні деякої фізичної величини  $y = f(a, b, c)$  умови вимірювань відтворені, то:

1. Для кожної серії вимірювань величин  $a, b, c$ , що входять до формули, за якою визначають шукану величину, провести обробку так само, як у випадку прямих вимірювань. При цьому для всіх вимірюваних величин обирають одне і те саме значення довірчої ймовірності  $\alpha$ .

2. Довірчий інтервал  $\Delta y$  при непрямих вимірюваннях оцінити за формулою

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\delta y}{\delta a}\right)^2 (\Delta a)^2 + \left(\frac{\delta y}{\delta b}\right)^2 (\Delta b)^2 + \left(\frac{\delta y}{\delta c}\right)^2 (\Delta c)^2}, \quad (3.2.1)$$



де частинні похідні  $\frac{\delta y}{\delta a}, \frac{\delta y}{\delta b}, \frac{\delta y}{\delta c}$  обчислюються при

$$a = \bar{a}, b = \bar{b}, c = \bar{c}.$$

3. Остаточні результати записати у вигляді

$$y = \bar{y} \pm \Delta y,$$

де  $\bar{y} = f(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c})$ .

4. Визначити відносну похибку

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (3.2.2)$$

Якщо ж непрямі вимірювання відбуваються за невідтворюваних умов, то значення шуканої величини  $\bar{y} = f(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c})$  обчислюють для кожного окремого вимірювання, а межі довірчого інтервалу визначають, обробляючи обчислені величини  $y_i$ , так само, як це робиться у випадку прямих вимірювань.

Якщо непрямі вимірювання відбуваються за невідтворюваних умов, то значення невідомої величини обчислюють для кожного окремого вимірювання, а межі довірчого інтервалу визначають так само, як у випадку прямих вимірювань.

#### 4. ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

**Електричним струмом** називають будь-який упорядкований рух електричних зарядів. Електричний струм, який виникає в провіднику внаслідок того, що в ньому створюється електричне поле, називають струмом провідності. Щоб струм був тривалим, енергія електричного поля має весь час поповнюватися, тобто потрібен такий пристрій, в якому б певний вид енергії перетворювався в енергію електричного поля. Такий пристрій називають **джерелом електрорушійної сили** або джерелом струму. Електрорушійна сила – це величина, що дорівнює роботі сторонніх сил при переміщенні одиничного позитивного заряду вздовж замкнутого контуру.

Слід розглянути, який характер має електричне поле в провіднику. У провіднику є електростатичне поле, створене електронами і позитивними іонами (поле кулонівських сил). Кулонівські сили взаємодії між зарядами завжди приводять до такого перерозподілу зарядів, при якому електричне поле в провіднику зникає, а потенціали в усіх точках вирівнюються. Тому поле кулонівських сил не може бути причиною виникнення постійного електричного струму.

Очевидно, щоб підтримувати постійний струм у колі, на вільні заряди мають діяти, крім кулонівських сил, ще якісь інші неелектростатичні сили. Ці сили називають сторонніми. Якщо кулонівські сили викликають з'єднання різнойменних зарядів, що приводить до вирівнювання потенціалів і зникнення електричного поля в провіднику, то сторонні сили викликають розділення різнойменних зарядів і підтримують різницю потенціалів на кінцях провідника. Додаткове поле сторонніх сил у колі створюють джерела струму.

Джерело сторонніх сил у колі постійного струму так само потрібне, як необхідний насос для створення постійної циркуляції рідини в будь-якій замкненій гідравлічній системі. Так, наприклад, у замкненій гідравлічній системі, наведеній на рис. 1, від точки  $A$  до точки  $B$  вода рухається в напрямку проти сил тяжіння під дією сторонніх сил, створених насосом  $H$ ; від  $B$  до  $A$  вода рухається під дією сил тяжіння. Роль насоса в електричному колі відіграє джерело струму. За рахунок створеного ним поля сторонніх сил електричні заряди рухаються всередині джерела струму проти сил електричного поля. Завдяки цьому на кінцях зовнішнього кола підтримується різниця потенціалів і в колі протікає постійний електричний струм.

Переміщуючи електричні заряди, сторонні сили виконують роботу за рахунок енергії, яку витрачає джерело струму. Так, наприклад, в електромагнітному генераторі робота сторонніх сил виконується за рахунок механічної роботи, яка витрачається на обертання ротора генератора. У гальванічних елементах ця робота виконується за рахунок енергії, яка виділяється при хімічних процесах розчинення електродів у

електроліті. Таким чином, можна сказати, що джерелом струму називається всякий пристрій, в якому виникають сторонні сили. Джерелом змінного струму є електромагнітні генератори змінного струму, принцип дії яких ґрунтується на явищі електромагнітної індукції.

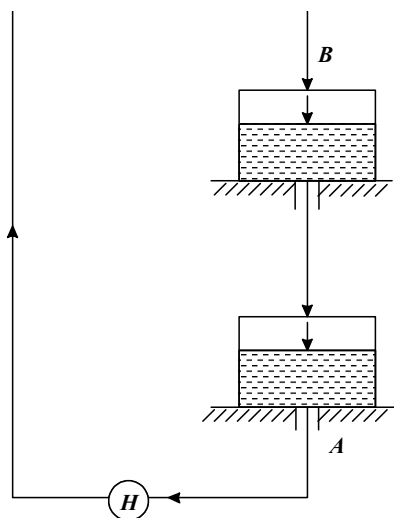


Рис. 1. Схема замкненої гідравлічної системи

У лабораторіях напругу підводять до розподільних щитків, від яких вона відгалужується до робочих столів, на яких монтуються електричні схеми.

Джерелами постійного струму можуть бути: гальванічні елементи, акумулятори, електромашини постійного струму, термоелектрогенератори, різного роду випрямлячі змінного струму.

**Гальванічні елементи.** Гальванічним елементом називають пристрій, що складається з двох різних за своїми властивостями електродів, занурених в електроліт. При взаємодії матеріалу електродів з електролітом на металі та в електроліті з'являються заряди протилежного знака. При цьому

метал набуває відносно електроліту певного електричного потенціалу, який отримав назву електрохімічного потенціалу.

Розглянемо для простоти метал, занурений у водний розчин власної солі, наприклад, цинк у розчині сірчаноокислого цинку  $ZnSO_4$ . Молекули води, що мають великі дипольні моменти, намагаються оточити позитивні іони  $Zn^{++}$  і відщепити їх від електрода. Через це іони  $Zn^{++}$  безперервно переходять з електрода в розчин, тобто цинк розчиняється.

Поряд із процесом розчинення цинку відбувається і зворотний йому процес, а саме: іони цинку, що знаходяться в розчині і беруть участь у тепловому русі, зустрічають цинковий електрод і на ньому відкладаються. У перший момент після занурення обидва потоки іонів не однакові. Оскільки кожний іон цинку переносить позитивний заряд ( $+2e$ ), то цинковий електрод при цьому заряджається негативно, а тонкий шар електроліту, що прилягає до електрода, – позитивно, і між ними виникає електричне поле. Це поле протидіє переходу іонів цинку в розчин і сприяє зворотному переходу іонів із розчину на електрод. При деякому потенціалі металу відносно електроліту обидва потоки іонів стають рівними один одному і між електродом і електролітом встановлюється динамічна рівновага. Цей рівноважний потенціал і є електрохімічним потенціалом металу (у нашому випадку – цинку) відносно цього електроліту. Але кожний гальванічний елемент має завжди два електроди і кожний електрод характеризується своїм електрохімічним потенціалом відносно даного електроліту. Різниця електрохімічних потенціалів електродів (при розімкненому колі) і є електрорушійною силою гальванічного елемента.

Електроди з різними фізико-хімічними властивостями, вміщені в електроліт, мають різні потенціали відносно електроліту, і отже, між ними існує певна різниця потенціалів. Якщо ці електроди замкнуті провідниками, то електрони від електрода з меншим потенціалом почнуть рухатись до електрода з більшим потенціалом, а всередині електроліту почнуть рухатись іони. Унаслідок цього рівновага порушується

і відбувається подальше розчинення електродів, яке підтримує постійною різницю потенціалів. Отже, у гальванічних елементах електричний струм підтримується за рахунок енергії, яка виділяється при хімічних реакціях розчинення електродів у електроліті, тобто ця енергія безпосередньо перетворюється в енергію електричного струму.

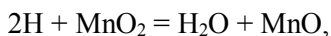
Найпоширенішими гальванічними елементами є елементи Вольта, Даніеля, Лекланше. Найпростішим є елемент Вольта. Він складається з мідного і цинкового електродів, занурених у слабкий водний розчин сірчаної кислоти. Якщо такий елемент замкнути на зовнішнє коло, то сила струму в колі не буде постійною, а буде з часом зменшуватись. Причина цього явища полягає в тому, що при роботі елемента позитивні іони водню рухаються всередині елемента від цинку до міді і виділяються на мідному електроді. Водень у вигляді пухирців утворює мовби ізолюючий шар навколо мідного електрода. Це значно погіршує роботу елемента з *двох причин*. По-перше, водень, що виділяється, подібно до металів має властивість посилати свої іони знову в розчин, від чого виникає додаткова ЕРС, яка направлена протилежно ЕРС елемента. Можна сказати так: якщо до замикання елемента ми мали електроди з міді і цинку, то після тривалої його роботи електродами є тали цинк і водень. Але електрохімічний потенціал водню на 0,34 В нижчий потенціалу міді. Через це ЕРС елемента в міру його роботи знижується від початкового значення близько 1,1 В приблизно до 0,8 В. По-друге, плівка водню, що обволікає позитивний електрод, збільшує внутрішній опір елемента, що веде до зменшення сили струму. Зазначене явище називається поляризацією елементів, а ЕРС, що виникає при цьому, – поляризаційною ЕРС.

Зрозуміло, що для усунення шкідливого явища поляризації елементів (для їх деполяризації) необхідно запобігти накопиченню водню на позитивному електроді. У сучасних умовах застосовують *два основні способи деполяризації*. Один із них полягає у використанні двох рідин, які підібрані так, щоб не відбувалося зміни складу електродів. Такий випадок ми маємо в елементі Даніеля, який складається з цинкового і

мідного електродів, розміщених у водний розчин цинкового і мідного купоросів. Обидва розчини відділені один від одного пористим циліндром із необпаленої глини, який не заважає рухові іонів, але запобігає швидкому перемішуванню розчинів. У результаті цього при роботі елемента має місце лише розчинення цинкового електрода і осідання міді – на мідному, що не веде до зміни складу самих електродів. Другий спосіб полягає в застосуванні хімічних деполяризаторів, тобто речовин, що є сильними окиснювачами, які переводять водень, що виділяється, у воду.

Прикладом елемента з хімічною деполяризацією може слугувати елемент Лекланше (рис. 2). Його негативним електродом є цинк. Цинковий електрод виготовляють у вигляді коробочки, в яку вміщують позитивний електрод і наповнюють електролітом. Позитивний електрод складається з графітового стрижня, оточеного спресованою сумішшю перекису марганцю  $MnO_2$  і графітового порошку (для збільшення електропровідності). Електролітом є 20-відсотковий водний розчин хлористого амонію  $NH_4Cl$ . Перекис марганцю є сильним окиснювачем і через це водночас править за деполяризатор.

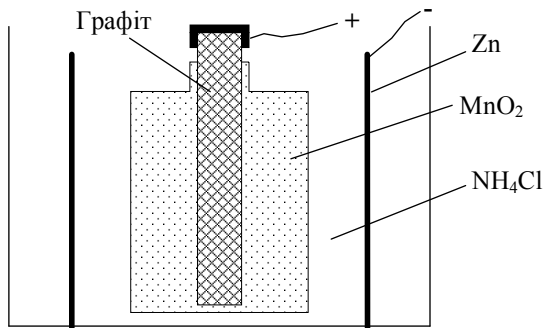
Водень, що виділяється, вступає в хімічну реакцію, унаслідок якої утворюються молекули води:



а водень у вільному стані не виділяється.

**Акумулятори.** Акумуляторами є хімічні джерела струму багаторазової (оборотної) дії. Це гальванічні елементи, в яких речовини, що витрачаються при відборі струму, попередньо накопичуються на електродах за допомогою електролізу; їх називають ще вторинними або поляризованими елементами.

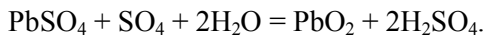
У загальному випадку акумулятор є системою з двох однакових металевих провідників, занурених в електроліт. Така система здатна накопичувати електричну енергію.



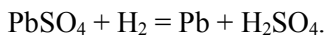
**Рис. 2. Елемент з хімічною деполаризацією (елемент Лекланше)**

Але щоб акумулятор мав практичну цінність, він має задовольняти дві умови: 1) поляризація електродів повинна бути стійкою; б) процеси, що протікають в акумуляторі, мають бути оборотними. Перша умова необхідна, щоб акумулятор не розряджався сам по собі, коли від нього не беруть струм; друга – щоб у ньому не відбувалися зміни, які роблять його непридатним для подальшої роботи.

Перший технічний акумулятор було виготовлено з двох свинцевих пластин, занурених у водний розчин сірчаної кислоти  $H_2SO_4$ . Свинцеві пластини вступають у хімічну реакцію із сірчаною кислотою та утворюють сірчаноокислий свинець  $PbSO_4$ , що покриває поверхню останніх. При пропусканні через акумулятор постійного струму (зарядження акумулятора) негативні іони  $SO_4^{2-}$  переміщуються до анода і перетворюють сульфат свинцю в перекис свинцю за формулою



Позитивні іони водню  $H^+$  переміщуються до катода і відновлюють сульфат у металічний свинець за формулою



Таким чином, утворюються різка несиметрія електродів: один із них свинцевий, другий – із перекису свинцю  $PbO_2$ . Акумулятор зарядився і готовий служити джерелом струму.

При розряджанні в акумуляторі протікають процеси у зворотному напрямі за формулою



У кінці розрядження обидві пластини покриваються однаковими шарами сульфату свинцю.

Кількість електрики (в ампер-годинах), яку може віддати акумулятор при розряджанні у проміжку спаду його ЕРС від 2,7 В до 1,85 В, називається *ємністю акумулятора*. Для збільшення поверхні електродів їх виготовляють у вигляді пластинок із великою кількістю клітин, подібних до бджолиних стільників: у ці клітини запресовують окис свинцю.

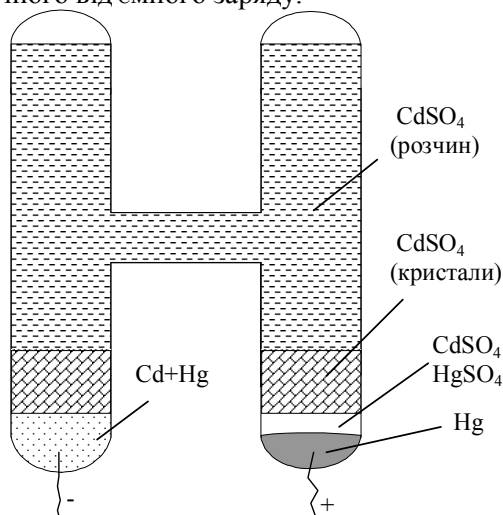
Коефіцієнтом корисної дії акумулятора називається відношення енергії, яку він віддає при розряджанні, до енергії, яка витрачається при заряджанні. Коефіцієнт корисної дії сучасних свинцевих акумуляторів досягає 80 %. Окрім свинцевих акумуляторів застосовуються лужні залізонікелеві акумулятори. Катодом у них служать пластини заліза. Анод складається з гідрату окису нікелю  $Ni(OH)_3$ . Електролітом є водний розчин їдкою калію. Електроорушійна сила таких акумуляторів = 1,45 В, ККД не перевищує 60 %. Але залізонікелеві акумулятори легші за свинцеві, простіші в експлуатації і здатні короткочасно витримувати сильні струми.

**Нормальний елемент Вестона.** Нормальний елемент застосовується як еталон ЕРС. Він є ртутно-кадмієвим гальванічним елементом, ЕРС якого практично не змінюється з часом. Електроди елемента розташовано в герметично закритій скляній посудині *H*-подібної форми (рис. 3).

У дно кожного із плечей посудини впаяні платинові дротини, які з'єднують електроди із зовнішніми клемми. Позитивним електродом є ртуть, негативним – амальгама кадмію (10 % кадмію розчинені в 90 % ртуті). Зверху над ртуттю покладено пасту із суміші сірчанокислого кадмію і



сірчаноокислої ртуті. Ця суміш є деполяризатором. Над кожним електродом, окрім вказаних компонент, знаходиться надлишок нерозчиненого сірчаноокислого кадмію (кристали). Посудина наповнюється насиченим розчином сірчаноокислого кадмію, який є електролітом. Елемент працює так: частина іонів кадмію переходить із амальгами у водний розчин, при цьому кожний залишає після себе два електрони, і амальгамовий електрод набуває значного від'ємного заряду.



**Рис. 3. Нормальний елемент Вестона**

Однак цей струм припиняється, як тільки в електроді виявиться стільки надлишкових електронів, що створюване ними притягання перешкоджатиме подальшому виходу іонів кадмію. Якщо тепер створити зовнішній провідний контур, з'єднавши кінці елемента з опором, то електрони потечуть від негативного електрода до позитивного. Це дозволить новій порції іонів кадмію перейти в розчин, а залишені ними електрони просто поповнять негативний заряд цього електрода. У колі протікатиме стаціонарний струм, що супроводжується міграцією іонів, яка замикає коло всередині водного розчину.

Тим часом на другому електроді відбувається таке. При проходженні струму на кожній із двох поверхонь розділу між електродами та електролітом іони ртуті з деполяризатора покидають розчин, зустрічаються з електронами, що прийшли ззовні, і стають нейтральними атомами. У розчині нові іони виникають при розчиненні сірчаної кислоти ртуті, причому одночасно в електроліт додаються нові сульфатні іони. Окрім цього, іони кадмію, які підходять до позитивного електрода, витісняють із сірчаної кислоти ртуті ртуть і остання осідає на ртутному електроді. У результаті відбувається, по суті, вилучення електронів із атомів кадмію і приєднання їх до іонів ртуті, тобто кадмій окиснюється, а ртуть відновлюється. Елемент працює тому, що цей обмін енергетично вигідний. Відносна сила зв'язку електронів у структурі атома ртуті така, що "прагнення атомів ртуті приєднати електрони перевершує бажання атомів кадмію утримати їх". Відзначимо, що на кожній із поверхонь розділу іони рухаються проти напрямку електричного поля, що зосереджене в шарі завтовшки у декілька ангстрем.

Електрорушійна сила елемента Вестона при температурі  $20^{\circ}\text{C}$  дорівнює  $\varepsilon_N(20^0) = (1,0183 \div 1,0187) \text{ В}$ .

Залежність ЕРС від температури можна розрахувати за емпіричною формулою

$$\begin{aligned} \varepsilon_N(t) &= \varepsilon_N(20^0) = \\ &= 4,075 \cdot 10^{-5}(t - 20^0\text{C}) - 9,444 \cdot 10^{-7}(t - 20^0\text{C})^2 + 9,8 \cdot 10^{-9}(t - 20^0\text{C})^3 \end{aligned}$$

де  $t$  – температура елемента.

Внутрішній опір елемента (0,5–1,0) кОм. При тривалому навантаженні сила струму елемента не повинна перевищувати  $10^{-6} \text{ А}$ , через це він підключається до схеми через великий опір.

Нормальний елемент треба оберігати від короткого замикання, його не можна перевертати або струшувати, він має бути захищеним від сонячного випромінювання.

## 5. ПРИЛАДИ РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ ТА НАПРУГИ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА

Приладами, за допомогою яких змінюють режим електричного кола, є реостати, подільники напруги, магазини опорів, автотрансформатори тощо.

### 5.1. Реостати

*Реостатом* називається пристрій, за допомогою якого можна змінювати омичний опір електричного кола і тим самим регулювати силу струму в ньому. Реостати бувають дротяні і недротяні. У перших провідником струму є дріт, у других – шар металу, нанесений на ізоляційну підкладку, електроліт і т. ін. Дротяні реостати у свою чергу поділяють на реостати з ковзним контактом і ступеневі.

Реостати з ковзним контактом дають можливість плавно змінювати силу струму. Такий реостат складається з керамічної труби, на яку намотано ізольований дріт. Останній повинен мати великий питомий опір, малий температурний коефіцієнт, витримувати тривалий нагрів струмом до кількох десятків градусів за Цельсієм.

Реостат має три (або чотири) затискачі. До двох нижніх затискачів приєднуються кінці реостатного дроту. До верхнього затискача під'єднується спрямовуючий металевий стрижень, по якому рухається контактор-повзунок. За допомогою пружинних контактів повзунок тісно притискається до витків дроту, чим забезпечується надійний контакт між дротом і повзунком.

Схему підключення реостата в електричне коло наведено на рис.4.

Струм  $I$ , що протікає в колі, згідно із законом Ома (якщо нехтувати внутрішнім опором джерела ЕРС):

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} . \quad (5.1.1)$$

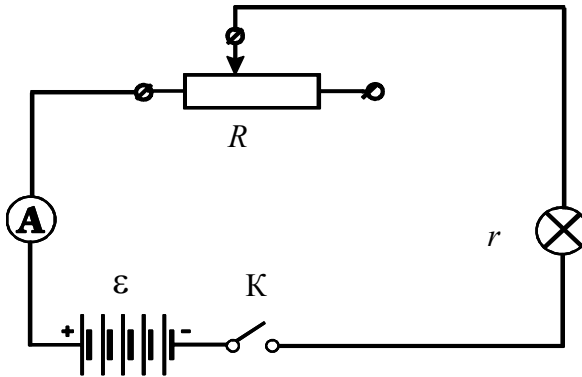


Рис. 4. Схема підключення реостата в електричне коло

Якщо опір реостата  $R$  можна змінювати від  $0$  до  $R_{\max}$ , то сила струму  $I$  відповідно змінюватиметься від  $I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r}$  до

$$I_{\min} = \frac{\varepsilon}{R_{\max} + r}.$$

ЕРС джерела  $\varepsilon$  розподіляється між споживачем  $r$  і реостатом  $R$ . Спад напруги на опорі-споживачі дорівнює

$$U_r = Ir = \varepsilon \frac{r}{R+r}, \quad (5.2.2)$$

а на опорі-реостаті:

$$U_R = IR = \varepsilon \frac{R}{R+r}. \quad (5.2.3)$$

При зміні  $R$  від  $0$  до  $R_{\max}$ , напруга на опорі-споживачеві змінюватиметься від  $U_{\max} = \varepsilon$  до  $U_{\min} = \varepsilon \frac{r}{R_{\max} + r}$ .

Звідси видно, що за допомогою реостата можна значно змінювати силу струму  $I$  та напругу  $U$  і дістати  $\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \gg 1$ ,

$\frac{U_{r_{\max}}}{U_{r_{\min}}} \gg 1$ , лише у тому випадку, якщо опір споживача значно менший повного опору реостата  $R$  ( $r \ll R_{\max}$ ).

## 5.2. Подільники напруги

Часто виникає необхідність плавно змінювати напругу, яка підводиться до електричного кола. Окрім цього, інколи напруга джерела струму занадто велика, щоб її прямо підвести до кола. У таких випадках користуються подільниками напруги. Як подільник напруги може бути використаний реостат (схему його вмикання як подільника напруги зображено на рис. 5) або магазин опорів з додатковими клемми.

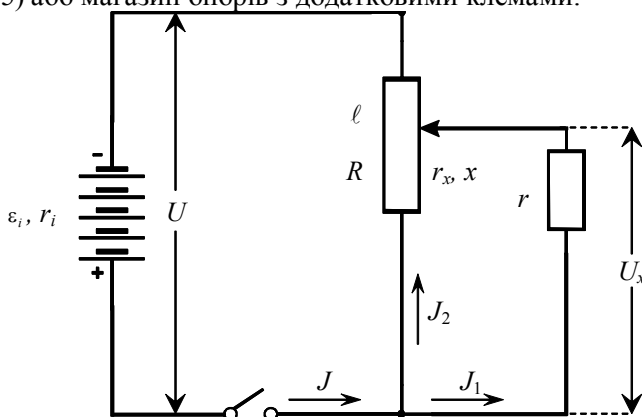


Рис. 5. Схема вмикання реостата як подільника напруги

Джерело струму приєднується до нижніх клем реостата. Коло навантаження приєднується до однієї з нижніх клем і клемми ковзного контакту. Пересуваючи ковзний контакт уздовж реостата, вихідну напругу можна змінювати від 0 до напруги між нижніми затискачами реостата. Позначимо через  $r_x$  опір тієї частини реостата, з якої береться напруга на навантаження, через  $\ell$  – усю довжину подільника напруги, через  $x$ -ту частину його, з якої беруть напругу.

Знайдемо вираз, який показує залежність напруги від параметрів кола. Виходячи із законів Кірхгофа, запишемо

$$\varepsilon = Ir_1 + I(R - r_x) + U_x; \quad (5.2.1)$$

$$I = I_1 + I_2; \quad (5.2.2)$$

$$I(R - r_x) + U_x = U. \quad (5.2.3)$$

Із виразів (5.2.2) і (5.2.3.) маємо

$$(I_1 + I_2)(R - r_x) + U_x = U.$$

Оскільки

$$I_1 = \frac{U_x}{r}; \quad I_2 = \frac{U_x}{r_x},$$

$$\text{то } U_x \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r_x} \right) (R - r_x) + U_x = U.$$

звідки

$$U_x = \frac{U}{\left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r_x} \right) (R - r_x) + 1} \quad \text{або} \quad U_x = \frac{U}{\frac{R}{r} + \frac{R}{r_x} - \frac{r_x}{r}}. \quad (5.2.4.)$$

Із формули (5.2.4) видно, що залежність  $U_x$  від  $r_x$ ,  $r$  і  $R$  є складною. У випадку, коли  $r \gg R$ , що практично дуже часто зустрічається, величинами  $\frac{R}{r}$  і  $\frac{r_x}{r}$  можна знехтувати

порівняно з величиною  $\frac{R}{r_x}$ .

$$\text{Тоді матимемо } U_x = \frac{U}{l} x.$$

Якщо обмотка подільника напруги однорідна, тобто кількість витків на одиницю довжини в усіх місцях одна й та сама, то відношення  $\frac{r_x}{R}$  можна замінити відношенням  $\frac{x}{l}$ .

Тоді

$$U_x = \frac{U}{l} x. \quad (5.2.5)$$

Якщо до того ж внутрішній опір джерела струму  $r_i \ll R$ , тоді  $U = \varepsilon$ . Отже,

$$U_x = \frac{\varepsilon}{l} x. \quad (5.2.6)$$

Як видно з останнього виразу, змінюючи  $x$  від 0 до  $l$ ,  $U_x$  можна змінювати від 0 до  $\varepsilon$ .

### 5.3. Магазили опорів

Для стрибкоподібної зміни сили струму чи напруги застосовують магазини опорів. Ці пристрої мають вигляд набору еталонних опорів, комбiнуванням яких можна одержувати всі значення опорів у деяких межах з інтервалом у 0,01; 0,1 та 1,0 Ом. Для намотування еталонних котушок беруть дріт із високим питомим опором і такий, опір якого мало змінюється з часом і мало змінюється при зміні температури, наприклад, манганін або константан. Для зменшення індуктивності котушок дріт намотують *біфілярно* (тобто у вигляді двох близько розташованих, паралельних обмоток). Магазили, в яких окремі еталонні опори згруповані секціями по десять штук (декадами), називаються декадними.

Для прикладу розглянемо схему так званого штепсельного магазину (рис. 6). Він складається з набору котушок різних опорів. Кінці дроту приєднані до відповідних колодочок, які змонтовано на кришці приладу. Якщо в гніздо між двома сусідніми колодочками вставити штепсель, то опір між ними буде близьким до нуля. Якщо штепсель вийняти з гнізда, то між колодочками встановиться опір тієї котушки, кінці якої приєднані до цих колодочок.

Декадні магазини опорів складаються з послідовно сполучених декад. Від кожної декади зроблено відводи до відповідних затискачів. За допомогою затискачів можна включати в схему як весь магазин, так і окремі декади. В

окремих декадах можна змінювати опір через 0,1 Ом – у першій; 1,0 Ом – у другій; 10 Ом – у третій тощо

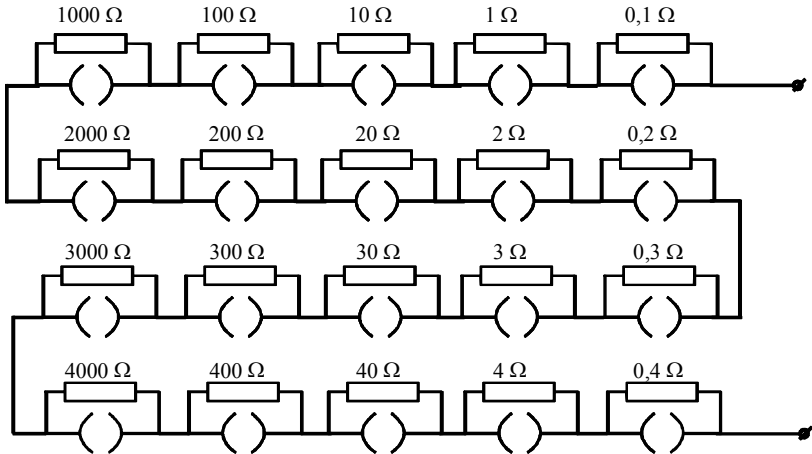


Рис. 6. Схема штепсельного магазину опорів

Опір магазину змінюють переставлянням штепселів у відповідні гнізда декад. При цьому електричне коло не розривається.

#### 5.4. Трансформатори

Трансформатором називається електромагнітний пристрій, призначений для перетворення змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої напруги при тій самій частоті. На відміну від подільників напруги трансформатори бувають як знижувальні, так і підвищувальні. Трансформатор складається з замкненого сталюого осердя – проводу, на якому розташовуються дві або декілька обмоток, що не мають між собою електричного контакту. Кінці первинної обмотки ввімкнені до мережі, а кінці вторинної – до споживача енергії.

Теорія показує, що для ненавантаженого трансформатора (режим холостого ходу) між вхідною і вихідною напругами існує зв'язок:



$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}, \quad (5.4.1)$$

де  $N_1$  і  $N_2$  – кількість витків у первинній і вторинній обмотках.

Відношення  $K = \frac{N_2}{N_1}$  називається коефіцієнтом трансформації. Він показує у скільки разів вторинна напруга більша первинної в режимі холостого ходу. Змінюючи при намотуванні співвідношення між кількістю витків первинної і вторинної обмоток, можна діставати на виході вторинної обмотки наперед задану напругу, тобто регулювати її.

Трансформатор, у котрого вторинною обмоткою є частина первинної обмотки, називається автотрансформатором (рис. 7).

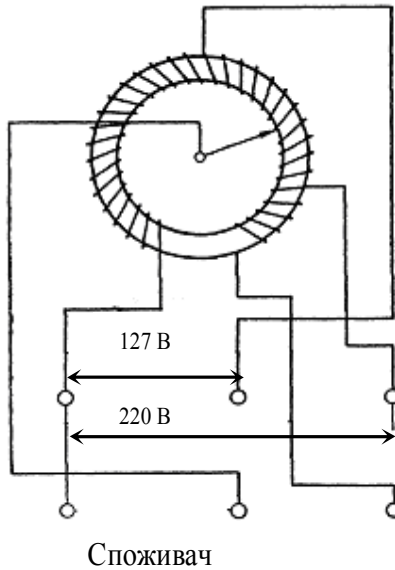


Рис. 7. Схема автотрансформатора

Один із контактів автотрансформатора часто роблять рухомим, що дає можливість плавно змінювати вихідну напругу від 0 до значення напруги, яка підводиться (лабораторні автотрансформатори –ЛАТри).

Автотрансформатором часто користуються для підтримання на виході постійної напруги, якщо вона з різних технічних причин змінюється на вході. За тим аби значення напруги підтримувалось постійним, стежать за допомогою вольтметра, котрий підключається паралельно вихідним клемам. Якщо до вихідних клем приєднати первинну мережу, то на затискачах всієї обмотки отримаємо збільшену напругу.

## **6. ПРИНЦИП ДІЇ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ**

Прилади, які застосовуються для визначення фізичних величин, що характеризують електричні або магнітні кола, називаються електровимірювальними. Електровимірювальні прилади, як правило, мають рухома і нерухома частини. Рухома частина приладу переміщується під дією сил, розмір яких залежить від вимірюваної електричної (магнітної) величини. Переміщення рухомої частини можуть бути обертальними або лінійними.

Найпоширенішими електровимірювальними приладами є такі, що працюють за принципом перетворення електромагнітної енергії, яка залежить від вимірюваної електричної величини, в механічну енергію. У процесі цього перетворення виникають механічні сили, які найчастіше викликають обертальний рух рухомої частини приладу. У таких приладах дія механічних сил, які виникають при взаємодії магнітних чи електричних полів, що створюються струмом, напругою, намагніченими або наелектризованими тілами, однозначно характеризується обертальним моментом цих сил.

Вимірювана величина в електровимірювальних приладах визначається стрілковим чи цифровим способом, або з допомогою світлового "зайчика" на градуйованій шкалі. До електровимірювальних приладів належать амперметри, вольтметри, ватметри, омметри, гальванометри та ін.

За принципом створення обертального моменту електровимірювальні прилади поділяються на кілька типів

(систем): магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні, феродинамічні, індукційні, електростатичні, теплові, цифрові та ін. Прилади різних систем реагують на різні значення вимірюваної величини (середні, діючі, амплітудні та ін.).

**Магнітоелектрична система.** Дія приладів цієї системи ґрунтується на взаємодії магнітного поля постійного магніту і вимірюваного струму, що проходить через обмотку рухомої котушки (рамки), яка рухається між полюсами магніту.

На рис.8 наведено схему приладів магнітоелектричної системи. Магнітне коло приладу складається з постійного магніту 4, що виготовляється з висококоерцитивної сталі, магнітопроводу 3, полюсних наконечників 5 і нерухомого осердя 6. Магнітопровід, полюсні наконечники та осердя виготовляються з м'яких магнітних матеріалів. У зазорі між полюсними наконечниками і осердям створюється радіальне магнітне поле. Рухлива рамка 7, що складається з алюмінієвого каркаса прямокутної форми з обмоткою мідного дроту діаметром (0,03–0,1) мм, може повертатися навколо осердя в магнітному полі зазору. Із рамкою з обох боків скріплені півосі 8. Для відліку показів використовують стрілку 1, яка скріплена з рамкою. Струм до рамки підводиться через дві спіральні пружини 2, які створюють протидіючий момент. У гальванометрах високої чутливості рамку роблять без каркаса і підвішують на пружній нитці.

При проходженні вимірюваного струму по котушці рамки на її витки діють сили, перпендикулярні до вектора індукції в зазорі. Ці сили створюють обертальний момент

$$M = nBSI, \quad (6.1)$$

де  $n$  – число витків у рамці,  $B$  – магнітна індукція в зазорі,  $S$  – площа рамки,  $I$  – сила струму.

Під дією обертального моменту рамка повертається навколо своєї осі на кут  $\alpha$ . На такий самий кут закручуються пружини 2, створюючи протидіючий момент

$$M_{np} = k\alpha, \quad (6.2)$$

де  $k$  – коефіцієнт пружності.

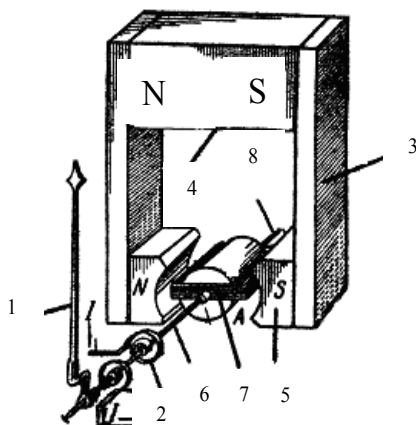


Рис. 8. Схема приладів магнітоелектричної системи

При  $M = M_{np}$  стрілка приладу фіксується на певній поділці шкали. Із виразів (6.1) і (6.2) маємо

$$\alpha = \frac{nBS}{k} I = k_1 I. \quad (6.3)$$

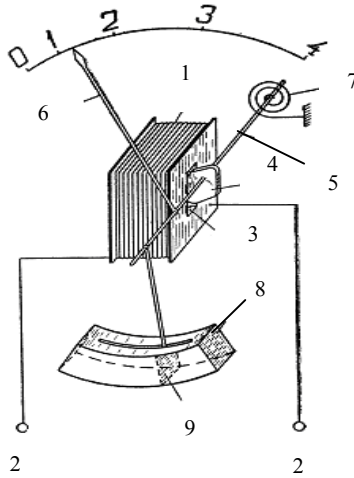
Із останнього виразу видно, що кут відхилення прямо пропорційний силі струму в колі рамки, тобто цей зв'язок є лінійним, а це означає, що шкала приладів магнітоелектричної системи рівномірна.

Заспокоєння коливань рамки забезпечується струмами Фуко, що індукуються в алюмінієвому каркасі, а також струмами від ЕРС, що індукуються в обмотці рамки, якщо вона замкнена на який-небудь зовнішній опір.

Прилади магнітоелектричної системи використовуються для вимірювання сили струму і напруги в колах постійного струму. *Позитивними якостями* цих приладів є велика чутливість, рівномірність шкали, висока точність, незначне споживання електричної енергії, мала чутливість до зовнішнього магнітного поля. До *недоліків* відносяться:

можливість вимірювання тільки в колах постійного струму та чутливість до перевантажень.

**Електромагнітна система.** Принцип дії приладів цієї системи ґрунтується на взаємодії магнітного поля нерухомої котушки, по якій протікає вимірюваний струм, і рухомого феромагнітного осердя, з яким з'єднаний показчик. На рис. 9 наведено схему будови електромагнітного приладу.



**Рис. 9.** Схема будови електромагнітного приладу

Він складається з плоскої або круглої нерухомої котушки 1 та рухомого осереддя у вигляді пластини 4, виготовленої з м'яких магнітних матеріалів (електротехнічна сталь, пермалой) і ексцентрично закріпленої на осі 5. На вісь 5 насаджено також стрілку 6. Для швидкого заспокоєння рухомої частини приладу і стрілки застосовують повітряні демпфери (заспокоювачі). Демпфер – це камера 8, в якій рухається алюмінієвий поршень 9, жорстко скріплений з віссю 5. При повороті осереддя поршень випробовує опір повітря. Вимірювальне коло приєднується до клем 2 – 2. При проходженні струму через котушку в її щілину 3 втягується осердя, з яким скріплена стрілка 6. Намагніченість осереддя і саме магнітне поле котушки пропорційні силі струму.

Отже, обертальний момент пропорційний квадрату сили струму:

$$M = k_2 I^2, \quad (6.4)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструкції приладу. Протидіючий момент створюється пружиною 7, яка одним кінцем закріплена на осі 5, а другим – на корпусі приладу. Протидіючий момент пропорційний куту відхилення рухомої частини приладу:

$$M_{np} = k_3 \varphi, \quad (6.5)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт пропорційності, що залежить від пружних властивостей пружини. Рівновага рухомої частини приладу визначається рівністю протилежно направлених моментів  $M = M_{np}$ . Звідки

$$\varphi = k I^2, \quad \text{де} \quad k = \frac{k_2}{k_3}. \quad (6.6)$$

Аналізуючи вираз (6.6), доходимо до таких висновків:

1) стрілка незалежно від полярності струму відхиляється в одному напрямку, тому що  $I^2$  незалежно від знака струму є величиною додатною, тобто прилади електромагнітної системи придатні для вимірювань у колах постійного і змінного струмів;

2) кут відхилення стрілки пропорційний квадрату сили струму, тому шкала приладу квадратична, нерівномірна.

*Позитивними якостями* приладів електромагнітної системи є такі:

1) простота і надійність конструкції; 2) стійкість проти перевантажень (бо до рухомої частини струм не підводиться; 3) придатність для роботи з постійними та змінними струмами; 4) можливість вимірювати відносно великі струми.

*Недоліком* цих приладів є: 1) нерівномірність шкали; 2) мала чутливість і точність вимірювань порівняно з приладами магнітоелектричної системи (клас точності 1,0–2,5); 3) велике власне споживання електричної енергії; 4) чутливість

до зовнішнього магнітного поля; 5) необхідність застосовувати заспокоювачі.

**Електродинамічна система.** Принцип дії приладів цієї системи ґрунтується на взаємодії двох котушок із струмами. Одна з котушок *A* нерухома (рис. 10) і має невелику кількість витків із товстого дроту, а друга *B*, яка має незначну вагу і велику кількість витків із тонкого дроту, рухома.

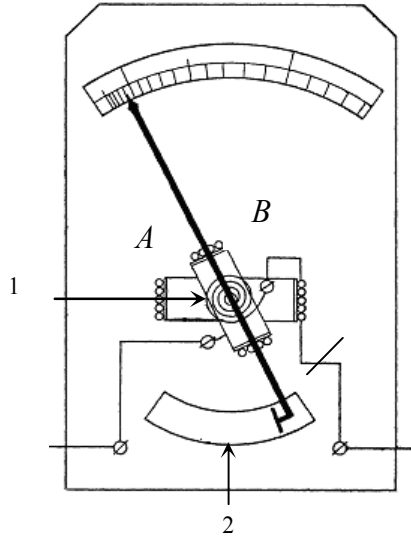


Рис. 10. Схема приладу електродинамічної системи

При проходженні струму  $I_1$  по нерухомій котушці виникає магнітне поле, від взаємодії якого зі струмом  $I_2$  рухомої котушки створюється пара сил  $FF \approx I_1 I_2$ . Обертальний момент цієї пари сил повертає рухома котушку на кут  $\varphi$ , при якому він зрівноважується протидіючим моментом. Протидіючий момент у приладах цієї системи створюється за допомогою двох спіральних пружин *I* із фосфористої бронзи. Ці пружини використовуються також і для підведення струму до рухомої котушки. Один кінець кожної з пружин жорстко скріплений із віссю обертання рухомої котушки, а другий – із корпусом приладу.

Залежно від призначення приладу котушки з'єднуються паралельно (амперметр), якщо сила струму більше 0,5 А. Якщо сила струму не перевищує 0,5 А, то котушки в таких амперметрах з'єднуються послідовно. У вольтметрах котушки, як правило, мають послідовне з'єднання. У ватметрах нерухома котушка вмикається в коло струму послідовно, а рухома – паралельно споживачам енергії.

Електродинамічні прилади обладнуються повітряними заспокоювачами 2 і мають нерівномірну шкалу (окрім ватметра). Прилади електродинамічної системи застосовуються для вимірювання в колах постійного і змінного струмів, мають високу точність і малу чутливість, споживають порівняно велику кількість електроенергії, чутливі до перевантажень, складні у виготовленні.

**Феродинамічна система.** Принцип дії ґрунтується на взаємодії магнітного поля, що створюється електромагнітом, і рухомого контуру зі струмом.

**Індукційна система.** Це система, де використовується кілька (найчастіше два) нерухомих контури зі змінним струмом, що створює змінне магнітне поле, яке індукує струм у диску. Взаємодія індукційних струмів із магнітними потоками нерухомих контурів і створює обертальний момент, який спричиняє рух диска, що закріплений на одній осі зі стрілкою. До приладів цієї системи належать лічильники і ватметри.

**Електростатична система.** Принцип дії ґрунтується на взаємодії рухомих і нерухомих електрично заряджених пластин, закріплених на осі зі стрілкою і протидіючою спіральною пружиною та заспокоювачем. Вимірювальну напругу підводять до нерухомих і рухомих пластин. Унаслідок взаємодії зарядів на пластинах рухомі пластини втягуються між нерухомими. Прилади цієї системи використовуються для вимірювання напруги в колах постійного і змінного струмів у широкому діапазоні частот. До цієї системи належать, наприклад, електростатичні вольтметри С95 класу 1,5, що мають межі вимірювання від 30 В до 3 кВ.



**Теплова система.** Принцип дії ґрунтується на зміні розмірів, форми і пружних властивостей певних частин (ділянок) приладу при проходженні по них електричного струму внаслідок виділення в останніх теплоти згідно із законом Джоуля – Ленца. Прилади теплової системи застосовуються рідко, наприклад для вимірювання сили високочастотних струмів.

У сучасній електровимірювальній техніці широкого поширення набули цифрові прилади. Ці прилади не мають рухомих частин. Вимірювану величину ці прилади визначають в дискретно-цифровій формі за допомогою цифрових індикаторів. Цифрові прилади застосовуються для автоматичного вимірювання постійних і змінних напруг, струмів і активних опорів.

*Позитивними якостями* цифрових приладів є: 1) висока точність і швидкість вимірювання; 2) об'єктивність і повна автоматизація процесу вимірювання; 3) можливість передачі результатів на відстань.

*Недоліками* цих приладів є 1) менша надійність у роботі; 2) складність схеми; 3) порівняно великі габарити.

## **7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ**

**Межа вимірювання.** Межею вимірювання приладу називають те значення вимірюваної величини, при якому стрілка приладу відхиляється до кінця шкали. На практиці широко використовуються прилади, що мають декілька меж вимірювань. Застосування таких приладів обумовлено необхідністю вимірювати електричні величини в широких межах з достатньою точністю в кожному інтервалі.

**Чутливість приладу.** Чутливістю електровимірювального приладу називається відношення лінійного або кутового переміщення покажчика (стрілки)  $da$  до зміни вимірюваної величини  $dx$ , що викликала це переміщення:

$$S = \frac{da}{dx}. \quad (7.1)$$

Розмірність чутливості залежить від найменування вимірюваної величини, наприклад:

$$[S] = \frac{\text{поділка}}{A}; \frac{\text{поділка}}{B}; \frac{\text{поділка}}{\text{Ом}}; \frac{\text{поділка}}{K} \text{ і т. д.}$$

Чутливість електровимірювального приладу показує, скільком поділкам шкали приладу відповідає одна одиниця вимірюваної величини.

Нехай при силі струму  $I = 2\text{А}$  стрілка амперметра перемістилась на 20 поділок. Тоді чутливість цього приладу до струму  $S = \frac{20}{2} = 10 \frac{\text{поділок}}{A}$ .

**Ціна поділки приладу.** Величина, обернена до чутливості, називається ціною поділки приладу:  $C = \frac{1}{S}$ .

Ціна поділки приладу дорівнює значенню вимірюваної величини, що викликає відхилення покажчика на одну поділку шкали. У загальному випадку, ціна поділки є різницею значень вимірюваної величини для двох сусідніх міток. Ціна поділки залежить від верхньої й нижньої меж вимірювання приладу і від кількості поділок шкали. Нехай, наприклад, вольтметр має дві межі вимірювання: 100 В і 150 В. Шкала приладу мала 100 поділок. Тоді ціна поділки для межі 100 В дорівнює 1,0 В/поділку; для межі 150 В – 1,5 В/поділку. Іншими характеристиками електровимірювальних приладів є: внутрішній опір, період власних коливань рухомої системи тощо.

## **8. ПОХИБКИ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ. КЛАСИ ТОЧНОСТІ**

Найважливішою характеристикою кожного вимірювального приладу є його похибка. За істинне значення вимірюваної величини беруть таке, що вимірюється зразковим приладом або середнє арифметичне із великої кількості вимірювань:

$$a_c = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}. \quad (8.1)$$

Різниця між показом приладу  $a$  і  $a_c$  називається *абсолютною похибкою приладу*  $\Delta a$ :

$$\Delta a = a_c - a. \quad (8.2)$$

*Середньою абсолютною похибкою* називається середнє арифметичне абсолютних значень похибок окремих вимірювань.

$$\Delta a_c = \pm \frac{|\Delta a_1| + |\Delta a_2| + \dots + |\Delta a_n|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_i}{n}. \quad (8.3)$$

Точність вимірювання характеризується *середньою відносною похибкою*  $\varepsilon$ , що визначається відношенням середньої абсолютної похибки до середнього значення шуканої величини, вираженого в процентах, тобто

$$\varepsilon = \frac{\Delta a_c}{a_c} \cdot 100\%. \quad (8.4)$$

*Ступінь точності* електровимірювальних приладів характеризується зведеною  $\varepsilon_3$  похибкою, яка дорівнює відношенню абсолютної похибки приладу  $\Delta a$  до граничного значення вимірюваної величини  $a_{cp}$ , тобто до максимального її значення, яке можна виміряти даним приладом при відхиленні його показчика на всю шкалу:

:

$$\varepsilon_3 = \pm \frac{\Delta a}{a_{cp}} \cdot 100\%. \quad (8.5)$$








Необхідність уведення зведеної похибки пояснюється тим, що навіть за сталої абсолютної похибки по всій шкалі приладу, відносна похибка в міру зменшення значень вимірюваної величини не залишається сталою, а збільшується. Тому точність вимірювання буде тим вищою, чим ближче значення вимірюваної величини до верхньої межі вимірювання приладу.

Зведена похибка є основною характеристикою приладу та основою принципу поділу приладів на класи точності. Згідно з нормативними даними прилади поділяють на такі класи точності: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4. Цифра, якою позначено клас, визначає найбільшу допустиму зведену похибку приладу, виражену у відсотках, і позначається на шкалі приладу в кружку.

## 9. УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ НА ПРИЛАДАХ

Для швидкого розпізнавання електровимірювальних приладів, відображення характеристик і особливостей умов їхньої роботи на шкалу наносять умовні позначення (таблиці 2 і 3).

Таблиця 2

Система приладів	Умове позначення
Магнітоелектрична	
Електромагнітна	
Електродинамічна	
Феродинамічна	
Індукційна	
Електростатична	
Теплова	

Таблиця 3

Умовне позначення	Пояснення умовного позначення
0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0	Клас точності приладу
I, II, III	Категорія захисту від зовнішніх магнітних полів
	Прилад для вимірювань у колах постійного струму
	Прилад для вимірювань у колах однофазного змінного струму
	Прилад для вимірювань у колах постійного й однофазного змінного струмів
	Прилад для вимірювань у колах трифазного струму
	Горизонтальне положення шкали
	Похиłe положення шкали (під кутом 60°)
	Перпендикулярне положення шкали
	Ізоляція приладу відносно корпусу, випробувана напругою 2000 В
	Вольтметр
	Амперметр
	Ватметр
	Фазометр
	Частотомір
	Омметр

## 10. МІЖНАРОДНА СИСТЕМА ОДИНИЦЬ

Міжнародна система одиниць (СІ) (міжнародна абрєвіатура SI з французької . *Système International d'Unités*) - це метрична система, побудована на базі семи основних одиниць. В 1960 11-а Генеральна конференція з мір та ваг рекомендувала Міжнародну систему одиниць СІ як практичну систему одиниць для вимірювань фізичних величин. Головна мета впровадження такої системи – об'єднання великої кількості систем одиниць (СГС, МКГСС, МКС тощо) з різних галузей науки та техніки та усунення труднощів, пов'язаних з використанням значної кількості коефіцієнтів при перерахунках між ними та створенням великої кількості еталонів для забезпечення необхідної точності.

Міжнародна система одиниць СІ складається з набору одиниць вимірювання та набору кратних і часткових префіксів до них. Система також визначає стандартні скорочені позначення для одиниць та правила запису похідних одиниць. СІ не є незмінною, вона є набором стандартів, в якому створюються одиниці виміру та коригуються їхні визначення згідно з міжнародними угодами в залежності від рівня сучасного розвитку вимірювальних технологій.

### 10.1. Одиниці виміру

В основі СІ лежать незалежні одна від одної основні одиниці, а інші, похідні одиниці, встановлюються за допомогою основних та визначальних рівнянь, що виражають функціональні зв'язки між фізичними величинами. При побудові СІ були вибрані основні одиниці, які забезпечують всебічне охоплення галузей науки та техніки, причому в якості більшості похідних одиниць використано одиниці, що застосовувалися раніше та мають зручні розміри.

На даний момент в СІ визначено сім основних фізичних величин – довжина, маса, час, електричний струм, термодинамічна температура, кількість речовини та сила світла. Ці величини вважаються незалежними. Відповідними

до них основними одиницями виміру є метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, моль та кандела.

В СІ розмірності основних одиниць вимірювання, на базі яких будуються похідні одиниці, також вважаються незалежними. Але треба зазначити, що визначення основних одиниць пов'язані між собою. Так визначення метра містить в собі секунду; визначення ампера – містить метр, кілограм та секунду; визначення молу – кілограм; кандели – метр, кілограм та секунду. Основні одиниці СІ представлено в таблиці 4

*Таблиця. 4*

Назва	Позначення		Фізична величина	Визначення
	Укр.	Міжн.		
Метр	м	m	Довжина	Метр дорівнює довжині шляху, який світло проходить у вакуумі за 1/299 792 458 секунди
Кілограм	Кг	kg	Маса	Кілограм точно дорівнює масі міжнародного прототипу кілограму

Секунда	с	s	Час	Секунда дорівнює часу за який відбуваються точно 9 192 631 770 періодів випромінювання, що відповідають переходу між двома надтонки-ми рівнями незбудженого атому цезію-133 при температурі нуль Кельвінів
ампер	А	A	Сила електричного струму	Ампер – це сила постійного електричного струму, що, протікаючи по двох прямих паралельних провідниках нескінченної довжини, розташованих на відстані 1 метр один від одного у вакуумі, створює між цими провідниками силу, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ ньютон на метр довжини
кельвін	К	K	Термодинамічна температура	Кельвін точно дорівнює $1/273,16$ термодинамічної температури потрійної точки



				води
моль	моль	mol	Кількість речовини	Моль є кількість речовини, що містить рівно $6,022141 \cdot 10^{23}$ структурних елементів (атомів, молекул, електронів тощо)
кандела	кд	cd	Сила світла	Кандела – це сила світла у визначеному напрямку від джерела, що випромінює монохроматичне випромінювання з частотою $540 \cdot 10^{12}$ герц та має інтенсивність випромінювання в цьому напрямку $1/683$ ват на стерадіан

## 10.2 Похідні одиниці, що мають власні назви

Похідні одиниці СІ є добутками цілих ступенів основних одиниць (таблиця 5). Математичний вираз для розмірності похідної одиниці виходить з фізичного закону або визначення відповідної фізичної величини. Деякі з похідних одиниць

виміру мають власні назви, які також можна використовувати при визначенні інших похідних одиниць.

Таблиця 5.

Назва	Позначення		Фізична величина	Вираз	
	Укр.	Міжн.		Через інші од. СІ	Через основні од. Сі
Радіан	рад.	rad	Плоский кут	1	м/м
Стерадіан	ср.	sr	Просторовий кут	1	м <sup>2</sup> /м <sup>2</sup>
Герц	Гц.	Hz	частота		с <sup>-1</sup>
Ньютон	Н	N	Сила		м·кг·с <sup>-2</sup>
Паскаль	Па	Pa	Тиск	Н/м <sup>2</sup>	м <sup>-1</sup> ·кг·с <sup>-2</sup>
Джоуль	Дж	J	Енергія, робота	Н·м	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-2</sup>
Ват	Вт	W	Потужність, потік енергії	Дж/с	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-3</sup>
Кулон	К	C	Електричний заряд	А·с	с·А
Вольт	В	V	Напруга, електричний потенціал	Вт/А	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-3</sup> ·А <sup>-1</sup>
Фарад	Ф	F	Електрична ємність	Кл/В	м <sup>2</sup> ·кг <sup>-1</sup> ·с <sup>4</sup> ·А <sup>2</sup>
Ом	Ом	Ω	Електричний опір	В/А	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-3</sup> ·А <sup>-2</sup>
Сіменс	См	S	Електрична провідність	А/В	м <sup>-2</sup> ·кг <sup>-1</sup> ·с <sup>3</sup> ·А <sup>2</sup>
Вебер	В	Wb	Потік магнітної індукції	В·с	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-2</sup> ·А <sup>-1</sup>
Тесла	Тл	T	Магнітна індукція	Вб/м <sup>2</sup>	кг·с <sup>-2</sup> ·А <sup>-1</sup>
Генрі	Гн	H	Індуктивність	Вб/А	м <sup>2</sup> ·кг·с <sup>-2</sup> ·А <sup>-2</sup>
Люмен	лм	lm	Світловий потік	кд·ср	кд
Люкс	лк	lx	Освітленість	Лм/м <sup>2</sup>	кд·м <sup>-2</sup>

Бекерель	Бк	Bq	Радіоактивність		$\text{с}^{-1}$
Грей	Гр.	Gy	поглинута доза іонізуючого випромінювання	Дж/кг	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$
Зіверт	Зв	Sv	ефективна доза іонізуючого випромінювання	Дж/кг	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$

За допомогою вищезазначених основних та похідних одиниць можна побудувати одиницю виміру будь-якої відомої на даний час фізичної величини. Але через те, що загальна кількість фізичних величин в науці необмежена, тому навести повний перелік похідних одиниць вимірювання неможливо.

Якщо при визначенні похідної одиниці виявляється, що вона може бути виражена за допомогою основних та похідних одиниць різними способами, на практиці використовують вирази, що найкраще відображають фізичний сенс цієї величини. Так, наприклад, одиниця виміру моменту сили є Н·м, а не м·Н або Дж.

### 10.3. Множники та префікси для утворення кратних та частинних одиниць

В СІ існують десяткові множники, за допомогою яких можна утворювати кратні та частинні одиниці. В СІ забороняється використовувати префікси, що складаються з двох або більше основних. Так величина  $10^{-9}$  м завжди позначається нм (нанометр), а не, наприклад, ммкм (мілімікрометр). Згідно з цим правилом для утворення кратних та часткових одиниць кілограма, єдиної одиниці, що з історичних причин вже має в своєму імені префікс, використовується частинна одиниця грам. Тобто величина  $10^{-3}$

<sup>6</sup> кг позначається як 1 мг (міліграм), а не 1 мкг (мікрокілограм). В таблиці 6 подано префікси, що використовуються в СІ.

В дужках позначені префікси, які припускається використовувати тільки в назвах одиниць, що вже мають широке розповсюдження, наприклад, гектар, декалітр, дециметр, сантиметр.

Таблиця 6.

Префікси СІ					
Кратні			Кратні		
$10^1$	(дека)	дк	$10^{-1}$	(деци)	д
$10^2$	(гекто)	г	$10^{-2}$	(санти)	с
$10^3$	кіло	к	$10^{-3}$	мілі	м
$10^6$	мега	М	$10^{-6}$	мікро	мк
$10^9$	гіга	Г	$10^{-9}$	нано	н
$10^{12}$	тера	Т	$10^{-12}$	піко	п
$10^{15}$	пета	П	$10^{-15}$	фемто	ф
$10^{18}$	екса	Е	$10^{-18}$	ато	а
$10^{21}$	зета	З	$10^{-21}$	зепто	з
$10^{24}$	йота	Й	$10^{-24}$	йокто	Й
$10^1$	(дека)	дк	$10^{-1}$	(деци)	д

На сьогоднішній день СІ офіційно затверджена основною або єдиною системою одиниць у всіх країнах світу за винятком США, Ліберії та М'янми. Сполучене Королівство прийняло систему СІ, але без наміру витіснення традиційних одиниць.

## МЕХАНІКА ТА МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

### Лабораторна робота N 1

#### ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ТІЛА ПРАВИЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

**Мета роботи:** визначити густину тіла правильної геометричної форми, навчитися користуватися найпростішими вимірювальними приладами (штангенциркулем та мікрометром).

**Обладнання:** масштабна лінійка, штангенциркуль, мікрометр, набір вимірюваних тіл, технічні терези, набір гир.

#### Теоретичні відомості

Різні речовини, які при однаковій температурі мають однакові об'єми, можуть мати різну масу, і навпаки, речовини з однаковою масою можуть займати різні об'єми. Відношення маси однорідної речовини до її об'єму є сталою величиною і називається густиною

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

де  $m$ ,  $V$  – відповідно маса та об'єм тіла.

Отже, густина однорідної речовини – це фізична величина, що визначається масою речовини в одиниці об'єму. В СІ маса тіла визначається в кг, об'єм – у м<sup>3</sup>. Масу тіла визначають зважуванням на технічних терезах. Після того, як тіло зважене, визначаються його геометричні розміри за допомогою лінійки, штангенциркуля або мікрометра. Для більш точного вимірювання використовують прилади з ноніусом, який побудовано за принципом методу збігів.

#### Методика виконання роботи

Маса тіла визначається зважуванням на технічних терезах з точністю до 0,1 г. Ці терези коромислового типу з аретиром, за допомогою якого піднімається коромисло і

запобігає тертю та псуванню призми терезів, тоді коли терези не використовуються. Рукояткою, що знаходиться на передньому боці терезів, можна звільнити коромисло від опори, і, навпаки, покласти на опори (тобто аретирувати).

**При зважуванні потрібно знати наступне.**

1. Навантажувати терези тілом, що зважується або гирками, а також знімати тіло або гирі з чашки терезів можна тільки при аретированих терезах.
2. Тіло, що зважується, кладеться на ліву чашку терезів, а гирки – на праву.
3. Гирі потрібно брати пінцетом, а не пальцями, поступово переходячи від великих до більш дрібних.
4. Гирі повинні знаходитися в ящику або на чашці терезів, але ні в якому разі не розкидані на столі або в іншому місці.
5. Перед зважуванням на технічних терезах необхідно знати, чи знаходяться вони в робочому стані. Після звільнення їх від аретиру потрібно подивитись, чи не перетягує якась чашка і чи не чіпляє стрілка шкалу поділок при погойдуванні коромисла.

Після того, як тіло зважене, визначити його геометричні розміри за допомогою лінійки, штангенциркуля або мікрометра. Для вимірювання розмірів тіла можна використати масштабну лінійку. Ціна поділки масштабної лінійки 1 мм. Отже, точність вимірювання масштабної лінійки не перевищує половини ціни поділки і дорівнює 0,5 мм. Для більш точного вимірювання використовують прилади з ноніусом, який побудовано за принципом методу збігів.

**Ноніусом** називається невелика додаткова шкала до звичайного масштабу, яка дає змогу підвищити точність вимірювання в 10-20 разів. Ноніус розміщується на додатковій шкалі, яка переміщується по основній. Розглянемо лінійний ноніус штангенциркуля. Ноніус для вимірювання з точністю до 0,1 мм – це шкала довжиною, як правило, 19 мм, поділена на десять рівних частин (рис.1.а). Тому одна поділка ноніуса дорівнює 1,9 мм, тобто менша від двох поділок основної шкали масштабної лінійки на 0,1 мм.

Будова ноніуса ґрунтується на тому, що людське око легко розрізняє, чи є два штрихи продовженням один одного, чи вони зсунуті. Коли нульова мітка (штрих) шкали ноніуса буде знаходитись між певними мітками основної шкали штангенциркуля, то це означатиме, що до цілого числа міліметрів треба додати певне число десятих часток міліметра.

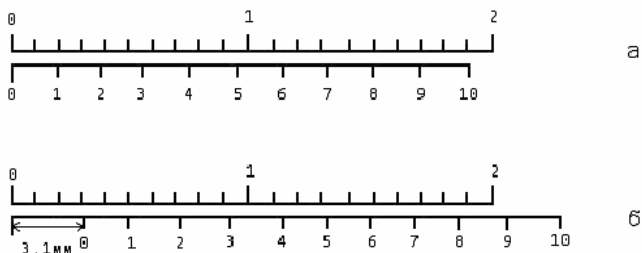


Рис.1. Шкала з ноніусом

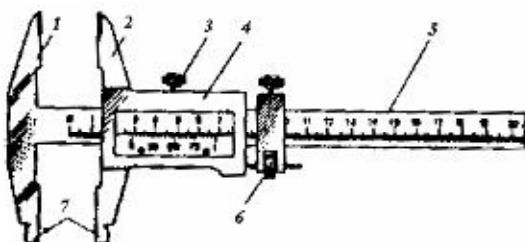


Рис.2. Штангенциркуль

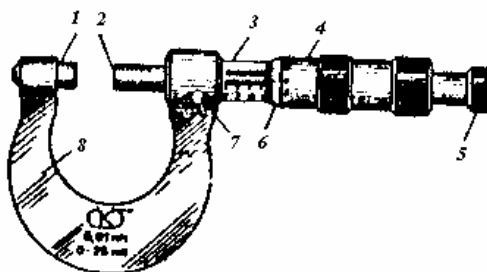


Рис.3. Мікрометр

Для визначення десятих часток міліметра знаходимо мітку шкали ноніуса, яка збігається а якоюсь міткою основної шкали. Порядковий номер шкали ноніуса показує кількість десятих часток міліметра.

Пояснимо це більш детально. Нехай вимірювана відстань більша на 0,1 мм від цілого числа мм (наприклад 3,1 мм, див. рис.1.б). Тоді нульова мітка ноніусу стоятиме правіше відповідної поділки основної шкали (у даному випадку 3 мм), а точно збігаються з однією із поділок основної шкали буде мітка 1 додаткової шкали (у даному випадку поділка 1 додаткової шкали збігається з поділкою 5 мм основної шкали). Якщо вимірювана відстань більша від цілого числа міліметрів на 0,2 мм, то точно збігатиметься з однією з поділок основної шкали поділка 2 ноніуса і т.д. Отже, порядковий номер збіжної мітки ноніуса безпосередньо дає число десятих часток міліметра. Шкала ноніуса для вимірювання з точністю до 0,06 мм має 20 однакових поділок на довжині 39 мм (рис.2). Номер мітки цього ноніуса, яка збігається з штрихом основної шкали показує відповідно кількість  $n$  одиничних відрізків по 0,05 мм.

Отже, поділки на основній шкалі 1 шкалі ноніуса наносять так, що  $n$  поділок ноніуса за довжиною дорівнює  $2n - 1$  поділок основної шкали. Якщо  $\Delta X_n$  і  $\Delta X_{ш}$  відповідно ціни поділок ноніуса та основної шкали, то маємо:

$$n\Delta X_n = (2n - 1)\Delta X_{ш}. \quad (2)$$

Точність  $\Delta d$ , з якою можна вимірювати довжину (точність ноніуса), дорівнює:

$$\Delta \alpha = 2\Delta X_{ш} - \Delta X_n. \quad (3)$$

Із виразу (3), враховуючи (2), знаходимо:

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta X_{ш}}{n}. \quad (4)$$

Точністю ноніуса називають величину  $\frac{\Delta X_{ш}}{n}$ , яка дорівнює відношенню ціни найменшої поділки основної шкали до числа поділок ноніуса. Під точністю відліку за ноніусом розуміють ціну його поділки.



Штангенциркуль (рис.2) – це прилад для вимірювання лінійних розмірів з точністю, частіше за все, 0,1 та 0,05 мм. Штангенциркуль складається зі сталюї лінійки (штанги) 5 з міліметровими поділками, відносно якої переміщується рамка 4 з ноніусом, і двох пар губок (ніжок) – нерухомих 1 і рухомих 2. При зімкнутих губках відлік за ноніусом дорівнює нулю. Між губками затискають вимірювану деталь (тіло) і фіксують положення гвинтом 8. Щоб точно визначити розмір тіла рухомих губку штангенциркуля переміщують доки вона торкнеться тіла за допомогою мікрометричного пристрою 6, щоб запобігти надмірному натисканню губок на тіло. Закріплюють рухомих губку на штанзі стопорним гвинтом 3 і роблять відлік за ноніусом.

Для вимірювання внутрішніх розмірів тіла є калібровані губки 7. Їхня загальна ширина при зведених губках указана на них; цей розмір треба додавати до відліку за шкалою. Наведений на рис.2 штангенциркуль забезпечує точність вимірювання 0,05 мм.

Мікрометр (рис.3) – це інструмент для вимірювання лінійних розмірів з точністю, як правило, 0,01 мм. Він складається з сталюї скоби 8, що має нерухомих опору п'яту 1, стебла 3, мікрометричного гвинта 2 і стопорного гвинта 7.

Мікрометричний гвинт переміщується всередині спеціальної гільзи з різьбою, закріпленою в стеблі 3. Крок гвинта (0,5-1,0) мм. На зовнішній поверхні стебла нанесено дві повздовжні шкали, зсунуті одна відносно одної на 0,5 мм. Зовні стебло охоплює барабан 4, з'єднаний з мікрометричним гвинтом. Таким чином, при обертанні барабана обертається і гвинт: при цьому переміщується його вимірювальна поверхня 2.

Дія мікрометра ґрунтується на властивості гвинта здійснювати при повороті його поступальне переміщення, пропорційне куту повороту. Скошений обід барабана поділено на 50 (або 100) однакових поділок. На правому кінці барабана є особливий фрикційний пристрій – тріскачка 5. При вимірюванні слід обертати барабан тільки за головку тріскачки. Деталь (тіло) при вимірюванні затискається між

п'ятою і мікрометричним гвинтом. Після того, як буде досягнуто певного ступеня натиску на тіло (5-6) Н фрикційна головка починає проковзувати, даючи характерний тріск. Завдяки цьому затиснуте тіло деформується порівняно мало (розміри не спотворюються) і, крім того, це запобігає псуванню мікрометричного гвинта.

Для відлічування показів мікрометра за шкалою стебла визначають ціле число (нижня шкала) і половини (верхня шкала) міліметрів. Для відлічування сотих часток міліметра користуються поділками на барабані (крок мікрометричного гвинта визначається заздалегідь).

Підставляючи знайдені значення лінійних розмірів тіла, виражених у  $m$ , у відповідну формулу, обчислюємо об'єм тіла у  $m^3$ . Наприкінці, підставивши у формулу (1) знайдені значення  $m$  та  $V$ , знаходимо густину тіла.

### **Порядок виконання роботи**

1. Зважити тіло на технічних терезах з точністю до 0,1 г.
2. Визначити геометричні розміри за допомогою лінійки, штангенциркуля або мікрометра.
3. Вимірювання лінійних розмірів потрібно провести 5 разів, вказавши точність вимірювання, і обчислити відносну похибку.
4. Обчислити за відповідною формулою об'єм тіла. Привести розрахункову формулу для визначення відносної похибки та абсолютної похибки.
5. Обчислити густину тіла. Привести розрахункову формулу для визначення відносної похибки та абсолютної похибки.
6. Записати результати і вказати абсолютну похибку та одиниці виміру.

### **Контрольні запитання**

- 1) Дати означення маси та густини речовини.
- 2) Які з виконаних вимірювань дають найбільшу похибку при визначенні густини тіла правильної геометричної форми

- 3) Яка будова та правила користування штангенциркулями та мікрометричними інструментами?
- 4) Як сконструювати ноніус для підвищення точності вимірювання в  $n$  разів?

### **Список літератури**

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За заг. ред. І.Т.Горбачука. - К., 1992.
2. Фізичний практикум /За ред. В.П.Дущенка. - К., 1981. - Ч.1.

## Лабораторна робота N 2

### ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ТВЕРДИХ ТІЛ ДОВІЛЬНОЇ ФОРМИ МЕТОДОМ ГІДРОСТАТИЧНОГО ЗВАЖУВАННЯ

**Мета роботи:** вивчити методику визначення густини твердих тіл методом гідростатичного зважування; визначити густину твердих тіл довільної геометричної форми.

**Обладнання:** терези, набори гир та важків, досліджувані тіла, підставка, стакан, вода.

#### Теоретичні відомості

Густина речовини – це фізична величина, що визначається масою речовини в одиниці об'єму. Якщо тіло є однорідним, тобто властивості його в усіх точках є однаковими, то густина може бути визначена, як відношення маси речовини до її об'єму. В СІ маса тіла визначається в кг, об'єм – у  $\text{м}^3$ .

В основу методу визначення густини твердих тіл методом гідростатичного зважування покладений **закон Архімеда:** на занурене у рідину чи газ тіло діє виштовхуюча сила, спрямована вгору і рівна вазі рідини чи газу в об'ємі цього тіла.

Вага тіла – це сила, з якою тіло внаслідок притягання до Землі діє на горизонтальну опору або вертикальний підвіс. Внаслідок дії виштовхуючої сили вага тіла залежить від густини середовища, куди занурене тіло. Метод визначення густини твердих тіл складається з двох зважувань: у повітрі та у воді.

#### Методика виконання роботи

При зважуванні тіла у повітрі у момент рівноваги рівноплечих терезів вага тіла у повітрі менша ваги цього тіла у вакуумі на величину ваги повітря  $P$  в об'ємі тіла. Нехай вага

тіла у вакуумі  $P_0$ , тоді вага тіла у повітрі  $P_0 - P$ . Міркуючи аналогічним чином, знайдемо, що вага гир та важків у повітрі  $P'_0 - P'$ , де  $P'_0$  – вага гир та важків у вакуумі,  $P'$  – вага повітря в об'ємі гир та важків. При рівновазі

$$P_0 - P = P'_0 - P' . \quad (1)$$

Записавши у (1) кожную вагу через густину та об'єм, отримаємо:

$$V_T \rho_T g - V_T \rho_{II} g = V_G \rho_G g - V_G \rho_{II} g , \quad (2)$$

де  $\rho_T, \rho_G$  та  $\rho_{II}$  – відповідно густина твердого тіла, гир та повітря,  $V_T$  та  $V_G$  – відповідно об'єм твердого тіла та гир,  $g$  – прискорення вільного падіння.

Винесемо в (2) за дужки у лівій частині  $V_T$ , а в правій частині  $V_G \rho_G$ . Замінивши  $V_G \rho_G$  на  $m_0$  та скоротивши на  $g$ , одержимо:

$$V_T (\rho_T - \rho_{II}) = m_0 \left( 1 - \frac{\rho_{II}}{\rho_G} \right), \quad (3)$$

$m_0$  – маса гир, які зрівноважують тіло у повітрі.

У випадку рівноваги при зважуванні у воді матиме місце рівність, аналогічна рівності (3)

$$V_T (\rho_T - \rho_B) = m_1 \left( 1 - \frac{\rho_{II}}{\rho_G} \right), \quad (4)$$

де  $\rho_B$  – густина води, а  $m_1$  – маса гир, які зрівноважують тіло при його зануренні у воду.

Розділивши (3) на (4), отримаємо:

$$\frac{\rho_T - \rho_{II}}{\rho_T - \rho_B} = \frac{m_0}{m_1} . \quad (5)$$

Звідси визначається густина твердого тіла:

$$\rho_T = (\rho_B - \rho_{II}) \frac{m_0}{(m_0 - m_1)} + \rho_{II} . \quad (6)$$

Слід відзначити, що при вимірюваннях тіло зважується разом з ниткою, на якій воно підвішується. При проведенні точних досліджень це можна врахувати, якщо при розрахунках від маси тіла з ниткою  $m_0$  у чисельнику формули (6) відняти масу нитки  $m_n$ .

### **Порядок виконання роботи**

1. Перевірити правильність встановлення терезів.
2. Підвісити за допомогою нитки тіло до крюка лівого плеча терезів та зважити його у повітрі та у воді. Перед тим, як зважити тіло у воді, необхідно над чашею терезів встановити стакан з водою, використовуючи для цього штатив або підставку. Тіло при зважуванні у воді не повинно дотикатися до дна або стінок стакана.
3. Виміряти термометром температуру води та повітря у кімнаті. Густина повітря та води при визначеній температурі беруться з таблиць 1 та 2.
4. Результати вимірів, густину води та повітря занести до таблиці 3.
5. За формулою (6) визначити густину твердого тіла.
6. Обчислити абсолютну та відносну похибки.

### **Контрольні запитання**

- 1) Що називають густиною речовини?
- 2) У чому полягає метод гідростатичного зважування?
- 3) Які основні джерела похибок при вимірюванні густини методом гідростатичного зважування?

### **Список літератури**

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За заг. ред. І.Т.Горбачука. - К., 1992.

Таблиця 1.

Густина дистильованої води

$t_B, ^\circ C$	$\rho_B, \text{кг}/\text{м}^3$	$t_B, ^\circ C$	$\rho_B, \text{кг}/\text{м}^3$
4	999,973	18	998,596
5	999,965	19	998,406
6	999,941	20	998,205
7	999,902	21	997,994
8	999,849	22	997,772
9	999,782	23	997,540
10	999,701	24	997,299
11	999,606	25	997,047
12	999,498	26	996,785
13	999,377	27	996,515
14	999,244	28	996,235
15	999,099	29	995,946
16	998,943	30	995,649

Таблиця 2.

$t_{II}, ^\circ C$	$P, \text{кПа}$			
	<b>96</b>	<b>98</b>	<b>100</b>	<b>102</b>
<b>4</b>	1,207	1,232	1,257	1,282
<b>6</b>	1,198	1,223	1,248	1,273
<b>8</b>	1,190	1,214	1,239	1,264
<b>10</b>	1,181	1,206	1,230	1,255
<b>12</b>	1,173	1,197	1,222	1,246
<b>14</b>	1,165	1,189	1,213	1,238
<b>16</b>	1,157	1,181	1,205	1,229
<b>18</b>	1,149	1,173	1,200	1,221
<b>20</b>	1,141	1,165	1,188	1,212
<b>22</b>	1,133	1,157	1,180	1,204
<b>24</b>	1,126	1,149	1,172	1,196
<b>26</b>	1,118	1,141	1,172	1,188
<b>28</b>	1,111	1,134	1,157	1,180

Таблиця 3.

<b>Маса гир при зважуванні тіла</b>		<b>Температура</b>		<b>Густина</b>	
у повітрі $m_0, \text{кг}$	у воді $m_1, \text{кг}$	води $t_B, ^\circ C$	повітря $t_{II}, ^\circ C$	води $\rho_B, \text{кг/м}^3$	повітря $\rho_{II}, \text{кг/м}^3$



## ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЛІНІЙНОГО РОЗШИРЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

**Мета роботи:** визначити коефіцієнт лінійного розширення для сталевого, алюмінієвого та скляного стрижня.

**Обладнання:** прилад для визначення коефіцієнта лінійного розширення твердих тіл, досліджувані зразки.

### Теоретичні відомості

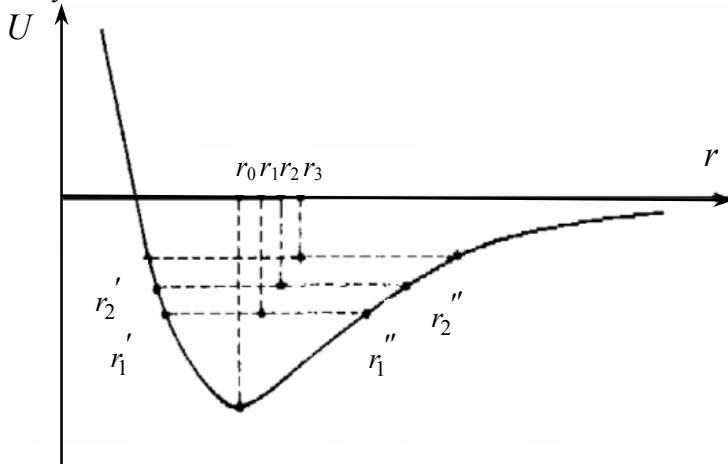
Тепловим розширенням називається збільшення лінійних розмірів і об'єму тіл, що відбувається при підвищенні їхньої температури. Теплове розширення відіграє важливу роль у природі та техніці. Деталі різних конструкцій, машин і приладів при їх експлуатації працюють у режимах змінних температур. Тому з'являється необхідність теоретичного розрахунку можливих змін розмірів тіл і механічних деформацій, які в них можуть виникати при варіації температури.

На основі молекулярно-кінетичної теорії будови речовини теплове розширення пояснюється змінами середніх відстаней між частинками (атомами, молекулами, іонами) при зміні температури. Сили взаємодії між цими частинками мають переважно електромагнітну природу. Між частинками речовини існують як сили притягання, так і сили відштовхування, зумовлені наявністю і рухом зарядів, які входять до складу цих частинок. Результируюча потенціальна енергія  $U$  взаємодії двох часток дорівнює алгебраїчній сумі потенціальних енергій, притягання  $U_1$  і відштовхування  $U_2$ :

$$U = U_1 + U_2, \text{ або } U = -(\alpha / rm) + (b / rn),$$

де  $a$  і  $b$ ,  $m$  і  $n$  – константи, які відображають властивості будови і взаємодії частинок речовини;  $r$  – відстань між частинками.

Характерний графік залежності потенціальної енергії  $U(r)$  взаємодії двох молекул від відстані  $r$  між ними показаний на рис.1. Відомо, що такий характер кривої пов'язаний з різною залежністю від відстані сил притягання і відштовхування між молекулами.



**Рис.1. Графік залежності потенціальної енергії взаємодії двох молекул від відстані  $r$  між ними**

При абсолютному нулі температур тепловий рух відсутній і дві частинки знаходяться в положенні рівноваги на відстані  $r_0$ , що відповідає мінімуму потенціальної енергії взаємодії. З підвищенням температури частинки починають коливатися з усе зростаючою амплітудою. При температурі  $T_1$  частинка відхиляється вліво до точки  $r'_1$  і вправо до точки  $r''_1$ . Внаслідок асиметричності потенціальної кривої середнє положення частинки переміститься вправо до величини  $r_1$ . При температурі  $T_2$  середнє положення частинки уже визначатиметься відстанню  $r_2$  і т.д. Як видно з рис.1,  $r_0 < r_1 < r_2$ . Таким чином, з підвищенням температури нові центри рівноваги, відносно яких частинки коливаються, віддаляються один від одного, тобто відстань між частинками

збільшується. Це і є причиною теплового розширення тіл. Лінійне теплове розширення характерне для твердих тіл. Об'ємне теплове розширення відбувається як у твердих тілах, так і в рідинах при їх нагріванні.

Лінійне теплове розширення характеризується коефіцієнтом лінійного розширення (середнім коефіцієнтом лінійного розширення)  $\alpha$ , в даному інтервалі температур.

Якщо  $L$  – початкова довжина тіла при температурі  $T$ , а  $\Delta L = L - L_0$  – збільшення довжини тіла при нагріванні його на  $\Delta T = T - T_0$  градусів, то  $\alpha$  характеризує відносне видовження  $\frac{\Delta L}{L_0}$ , що відбувається при нагріванні його на один градус:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T \cdot L_0}. \quad (1)$$

Довжина  $L$  тіла при температурі  $T$  визначається формулою:

$$L = L_0(1 + \alpha(T - T_0)), \quad (2)$$

де  $T_0$  – початкова температура.

Для більшості твердих тіл  $\alpha = (10^{-5} - 10^{-6}) \text{ град}^{-1}$  і можна вважати, що практично не залежить від температури (для умов цієї лабораторної роботи).

### **Методика виконання роботи**

Прилад складається з корпусу 1, до якого прикріплений захисний кожух 2 (рис.2).

Усередині кожуха встановлений нагрівач 3. Опора – 4, кришка – 5. При проведенні дослідів у нагрівач через прокладку 6 розмішують скляну пробірку 7 із досліджуваним зразком у вигляді стрижня 8. На корпусі приладу встановлена стійка 9 з кронштейном 10, на якому розміщений індикатор малих зміщень 11. Кронштейн 10 може повертатися навколо осі стійки на  $90^\circ$ . На панелі корпусу знаходяться сигнальна індикаторна лампа 12 та кнопковий вимикач 13, а на задній стінці – гвинт заземлення 14, 15 – електричний запобіжник.

Штепсельна вилка 10 служить для вмикання приладу в електричну мережу 220 В.

### Порядок виконання роботи

Для проведення дослідів по визначенню коефіцієнта лінійного розширення необхідно:

- 1) пробірки з комплекту для приладу наповнити на 0,5 об'єму водою кімнатної температури, помістивши в кожну з них по досліджуваному зразку у вигляді стрижня сферичним кінцем вниз та помістити на штатив;
- 2) у кронштейн вставити індикатор та відвести його на чверть оберту в бік;

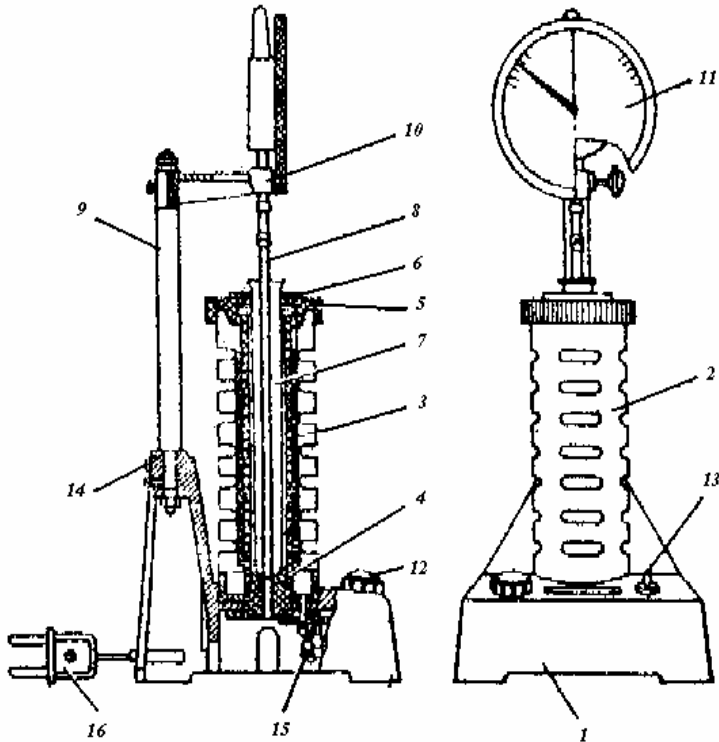


Рис.2. Прилад для визначення коефіцієнта лінійного розширення тіл

- 3) лабораторним термометром заміряти температуру води в одній із пробірок;
- 4) пробірку з досліджуваним зразком через гумову прокладку та отвір у кришці приладу ввести в нагрівач;
- 5) перемістити шток індикатора вгору, встановити індикатор над пробіркою та опустити шток у торець стрижня, кронштейн зафіксувати гвинтом;
- 6) зафіксувати положення стрілки на шкалі індикатора;
- 7) увімкнути в мережу прилад.

При кипінні води у пробірці досліджуваний зразок набуває температури, рівної температурі кипіння води. Збільшення довжини зразка визначається за відхиленням стрілки індикатора від початкового положення. Відлік ведуть з точністю до половини поділки індикатора, тобто з точністю 5 мікрон.

Коефіцієнт лінійного розширення визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L(T_1 - T_0)}, \quad [\text{град}^{-1}] \quad (3)$$

де  $T_0$  – початкова температура у пробірці,  $T_1$  – кінцева температура у пробірці.

Для продовження роботи та проведення дослідів з іншими зразками необхідно:

- відключити прилад від мережі;
- індикатор на кронштейні відвести в бік;
- вийняти пробірку та закріпити її у штативі;
- повторити всі операції (1-7) для іншого зразка.

Для більш точного визначення коефіцієнта лінійного розширення потрібно провести декілька вимірів та при обчисленні брати середнє арифметичне значення приросту довжини зразка. Точність визначення коефіцієнта лінійного розширення характеризується середньою квадратичною похибкою.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\alpha_i - \alpha_{cp})^2}{n - 1}}, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість вимірів, ( $n \geq 5$ ),  $\alpha_i$  – виміряне значення коефіцієнта,  $\alpha_{cp}$  – середнє арифметичне значення коефіцієнта.

Ступінь точності обчислення коефіцієнта лінійного розширення у відсотках характеризується середньою відносною квадратичною похибкою вимірів:

$$\sigma_{від} = \frac{\sigma}{\alpha_{cp}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Результати п'ятикратного повторення досліду занести до таблиці (для кожного зразка).

За формулами (4) та (5) розрахувати середньоквадратичну похибку та середню відносну квадратичну похибку.

*Таблиця*

№	Показання індикатора (у поділках) при		$\Delta L_i$	$\alpha_i \times 10^{-6}$	$(\alpha_i - \alpha_{cp})$ $\times 10^{-6}$	$(\alpha_i - \alpha_{cp})^2$ $\times 10^{-12}$
	$T_0$	$T_1$				
1						
2						
...						
Середн. знач.						

### **Контрольні запитання**

- 1) Пояснити лінійне розширення твердих тіл з точки зору молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.
- 2) Де має велике практичне значення знання коефіцієнта лінійного розширення?
- 3) Який коефіцієнт лінійного розширення (малий чи великий) повинно мати тіло, щоб при різкій зміні температури зовнішнього середовища воно не тріснуло?
- 4) В яких одиницях вимірюється коефіцієнт лінійного розширення?

### **Список літератури**

1. Савельєв Й.В. Курс общей физики. – М., 1982.- т. I.
2. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За заг. ред. І.Т. Горбачука. – К., 1992.

## Лабораторна робота № 4

### ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ЮНГА НА ПРИЛАДІ ЛЕРМАНТОВА

**Мета роботи:** експериментально визначити модуль Юнга матеріалу дроту.

**Обладнання:** прилад Лермантова, набір важків, мікрометр.

#### Теоретичні відомості

Під дією зовнішніх сил тверді тіла деформуються, тобто змінюють свою форму або лінійні розміри. Якщо після припинення дії сили тіло приймає початкову форму і розміри, деформація називається пружною. Таке "повернення" тіла до початкового стану проходить під дією пружних сил, які виникають у тілі при його деформації і мають електромагнітну природу.

У 1675 р. англійський фізик Р. Гук встановив закон, згідно з яким при малих пружних деформаціях величина деформації прямо пропорційна прикладеній до тіла силі  $F$ . Якщо під дією сили дріт довжиною  $l$  став довшим на величину  $\Delta l$ , то

$$\Delta l = k'F, \quad (1)$$

де  $k'$  – постійна величина, яка залежить від виду деформації і властивостей деформованого тіла.

У найпростішій формі закон Гука записується для деформації довгого тонкого стрижня або пружини так:

$$F = k\Delta l,$$

де  $k = 1/k'$  – коефіцієнт жорсткості.

Закон Гука можна записати дещо інакше, а саме

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \frac{F}{S}, \quad (2)$$

де  $\Delta l/l$  – відносне видовження,  $F/S$  – напруження, яке визначається силою, що діє на одиницю площі  $S$ ,  $\alpha$  – коефіцієнт пружності деформованого тіла.



Величину  $E = 1/\alpha$  (3) називають модулем пружності, або **модулем Юнга**. Підставивши (3) в (2), одержимо

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \frac{F}{S}, \quad \text{або} \quad (4)$$

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}. \quad (5)$$

Із співвідношення (5) випливає, що модуль Юнга дорівнює тому напруженню, при якому абсолютне подовження деформованого тіла  $\Delta l$  було б рівне початковій довжині, якщо б настільки великі пружні деформації були б можливі. У дійсності при значно менших напруженнях відбувається руйнування більшості матеріалів, ще раніше досягається межа пружності.

Під впливом прикладеної сили дріт, розтягуючись, відчуває поперечне стиснення. Якщо діаметр дроту  $d$  при цьому зменшується на величину  $\Delta d$ , то

$$\frac{\Delta d}{d} = \beta \frac{F}{S}, \quad (6)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт поперечного стиснення.

Співвідношення  $\beta/\alpha = \mu$  називають **коефіцієнтом Пуассона**. Для більшості металів  $\mu \approx 0,25$ .

### Методика виконання роботи

Схематично прилад Лермантова показаний на рис. 1

Він складається із двох кронштейнів А і В, які розміщені один над другим і служать для кріплення дроту з досліджуваного матеріалу. При цьому верхній кінець дроту затискується гвинтом в отворі стрижня К, закріпленого у втулці верхнього кронштейна А. Нижній кінець дроту гвинтом закріплюється в отвір циліндра W до якого підвішена платформа Н. На неї кладуть тягарі у процесі виконання роботи. Вона ж одночасно служить для випрямлення досліджуваного дроту.

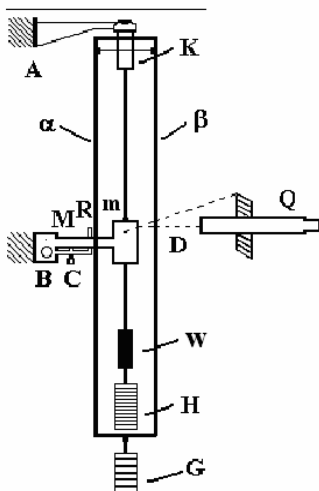


Рис.1. Прилад Лермантова

Нижній кронштейн В має аретир С. Прилад повинен бути аретирований у моменти навантаження дроту тягарями, а також для вивільнення дроту від дії тягарів. Це оберігає дріт від ривків, а також від можливого виривання дроту із місць кріплення у момент навантаження.

Якщо на платформу Н покласти тягар Р, то він викличе не тільки подовження дроту, яке необхідно виміряти, але і прогин кронштейна А. Для виключення впливу прогину кронштейна прилад має два масивні дроти  $\alpha$  і  $\beta$ , які з'єднані зверху і знизу горизонтальними стрижнями. Нижній стрижень оснащений платформою Г, на якій розміщується увесь набір тягарів, що використовуються для навантаження дроту. У ході виконання лабораторної роботи набір тягарців Р може лежати або на платформі Г, або на платформі Н, що дає однакову величину прогину.

Для вивчення подовження дроту  $\Delta l$ , яке дуже мале, у даній роботі використовується метод дзеркала і шкали.

У верхній частині кронштейна В вільно обертається навколо горизонтальної осі С, що перпендикулярна до площини креслення, дзеркальце  $m$ , яке розміщене вертикально. Із дзеркальцем з'єднаний вигнутий важіль Р, який спирається на торець циліндра М. При

навантаженні дроту циліндр зміщується у вертикальному напрямку, разом з ним зміщується і важіль R. Перед дзеркальцем  $m$  встановлений освітлювач D і шкала Q з поділками.

Якщо на платформу H перенести тягар з платформи G, то дріт подовжиться на  $\Delta l$ . При цьому важіль R і дзеркальце  $m$  повернуться на кут  $Y$ , а промінь, який відіб'ється від дзеркальця, – на кут  $2Y$ . Це призведе до того, що "зайчик" зміститься по шкалі з положення  $h_0$  у положення  $h$ . Якщо позначити радіус важеля R – величиною  $b$ , яка задана, а відстань від дзеркальця до екрана –  $L$ , то з геометричних міркувань можна записати

$$\operatorname{tg} Y = \frac{\Delta l}{b}, \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} 2Y = \frac{\Delta h}{L}, \quad (9)$$

де  $\Delta h = h - h_0$  – різниця між поділками шкали,  $\Delta h$  – зміщення "зайчика" за шкалою при перенесенні тягаря **P** з однієї платформи на другу. Оскільки  $\Delta l$  дуже мале, то малий і кут  $Y$ .

Тому можна записати

$$\operatorname{tg} Y \approx Y \quad \text{і} \quad \operatorname{tg} 2Y \approx 2Y. \quad (10)$$

Із співвідношення (8)-(10) отримаємо

$$\Delta l = \frac{\Delta h}{2L} b. \quad (11)$$

Підставляючи (11) в (5), і, враховуючи, що  $F=P$ , а  $S = \frac{\pi d^2}{4}$  ( $d$  – діаметр дроту), одержимо формулу для розрахунку модуля Юнга

$$E = \frac{8PIL}{\pi d^2 b \Delta h}, \quad (12)$$

де  $l$  – довжина дроту,  $L$  – відстань від дзеркальця до екрана.

### Порядок виконання роботи

1. Мікрометром виміряти діаметр  $d$  дроту в 10 місцях, розміщених рівномірно по довжині дроту. З одержаних даних знайти середнє арифметичне.
2. Повністю звільнити від тягарів платформу **H** і, опустивши аретир, визначити нульове положення "зайчика" на шкалі.

3. Послідовно навантажуючи дріт тягарями один за другим (на кожному з них зазначена його вага) , кожен раз записувати відповідні видовження  $\Delta l'_1, \Delta l'_2$  і т.д. Потім дріт послідовно розвантажують і знову записують відповідні видовження (наприклад,  $\Delta l''_3, \Delta l''_2, \Delta l''_1$  ). При цьому слід пам'ятати, що при перенесенні тягарів з платформи **Г** на платформу **Н**, і назад, прилад повинен бути аретирований. Якщо у кінці розвантаження дроту нульове показання "зайчика" за шкалою не збігається з тим, яке було на початку, то треба взяти середнє арифметичне в двох показників за формулами:

$$\Delta l_1 = \frac{\Delta l'_1 + \Delta l''_1}{2}, \quad \Delta l_2 = \frac{\Delta l'_2 + \Delta l''_2}{2} \quad \text{і т.д.}$$

4. За одержаними даними визначити і модуль Юнга  $E$  для кожного навантаження.
5. Побудувати графік залежності  $\frac{P}{S} = f\left(\frac{\Delta l}{l}\right)$  і переконатися у пружному характері деформації.
6. Опрацювати одержані результати, проаналізувати їх і зробити висновки.

**Примітка:** використати наступні параметри установки:

$l = (90,0 \pm 0,1)$  см;  $L = (6,2 \pm 0,1)$  см;  $b = 1,5$  см.

### Контрольні запитання

- 1) Які деформації називають пружними, пластичними?
- 2) Які типи деформацій вам відомі?
- 3) Дайте визначення відносного видовження, напруженості.
- 4) Який фізичний зміст модуля Юнга?
- 5) Нарисуйте діаграму розтягу. Покажіть на ній ділянку, для якої виконується закон Гука.
- 6) Поясніть будову вимірювальної частини установки.
- 7) Отримайте робочу формулу.
- 8) Що таке коефіцієнт Пуассона?

### Список літератури

1. Зисман Г.А. , Годес О.М. Курс общей физики. - М. , 1964. - Т.1.
2. Дущенко В.П. Фізичний практикум. - К., 1965.

## Лабораторна робота N 5

### МОДУЛЬ ЮНГА ТА МОДУЛЬ ЗСУВУ

**Мета роботи:** вивчення різних типів деформації та визначення модулів Юнга та зсуву.

**Обладнання:** прилад ФМ-19, набір пластин, пружин та тягарців.

#### Теоретичні відомості

Під впливом прикладених сил тверді тіла в тій чи іншій мірі, змінюють свою форму і об'єм. Явище зміни форми і об'єму твердих тіл під дією прикладених сил отримало назву деформації.

У недеформованому тілі розташування всіх молекул відповідає стану теплової рівноваги, сили міжмолекулярної взаємодії врівноважені. Це означає, якщо виділити всередині твердого тіла який-небудь об'єм, то сума всіх діючих на цей об'єм сил збоку інших частин тіла дорівнює нулю. При деформації тіла розташування молекул змінюється і стан рівноваги, в якому знаходилось тверде тіло, порушується. Внаслідок цього, у тілі виникають сили, які намагаються повернути тіло у попередній стан рівноваги. Ці внутрішні сили, які виникають при деформації, отримали назву сил внутрішніх напруг. Внутрішні напруги зумовлені силами міжмолекулярної взаємодії. У недеформованому тілі внутрішні напруги відсутні.

Якщо деформація тіла досить мала, то після припинення дії зовнішніх сил, що викликали деформацію, тіло під впливом сил внутрішніх напруг повертається у попередній недеформований стан, деформації повністю зникають. Такі деформації отримали назву пружних деформацій. При великих деформаціях, після припинення дії зовнішніх сил, деформації повністю не зникають, спостерігається деяка залишкова деформація.

Стан тіла відрізняється від того, в якому воно знаходилось до прикладення до нього зовнішніх сил. Такі деформації отримали назву **пластичних**. Зв'язок між пружними деформаціями і силами, які їх створюють, встановлюється законом Гука, а саме: при малих деформаціях величина деформації прямо пропорційна прикладеним до тіла зовнішнім силам. Кількісний зв'язок між деформацією і

зовнішніми силами (коефіцієнт пропорційності) для даної речовини залежить від самої деформації.

Пружні деформації бувають різні як за зміною об'єму, так і форми.

Деформації, при яких об'єм тіла залишається незмінним, а змінюється тільки форма тіла, називаються деформаціями зсуву.

Деформації, при яких змінюється об'єм, але не змінюється форма, називаються деформаціями всебічного стиснення (розтягу). Кожен елемент об'єму при деформації всебічного стиснення (розтягу) залишається подібним сам до себе.

Довільну пружну деформацію можна звести до суми деформацій чистого зсуву і всебічного стиснення. Тому для опису пружних деформацій досить двох незалежних параметрів (коефіцієнтів).

На практиці найбільше поширення знайшли такі параметри, як модуль Юнга та модуль зсуву  $\mu$ , за допомогою яких описують, відповідно, деформації розтягу (стиснення) і деформації зсуву.

Познайомимось більш детально з модулем Юнга. Розглянемо простий випадок деформації розтягу (стиснення) стрижня. Нехай на однорідний стрижень з площею поперечного перерізу і довжиною діють сили у напрямку його довжини у протилежні сторони, тобто розтягують його (рис.1).

Напругу, тобто силу, яка діє на одиницю поверхні, позначимо через  $\left(P = \frac{F}{S}\right)$ . Нехай під дією цих зовнішніх напруг довжина стрижня збільшується на величину  $\Delta l$ . Відносна деформація дорівнюватиме величині  $\frac{\Delta l}{l}$ .

Відповідно до закону Гука відносна деформація пропорційна напрузі, тобто

$$\left(\frac{\Delta l}{L} = \frac{P}{E}\right). \quad (1)$$

Коефіцієнт отримав назву модуля Юнга (модуля розтягу). Із формули (1) видно, що модуль Юнга твердого тіла можна визначити за величиною розтягу стрижня під дією сили, прикладеної вздовж його осі. Але величина розтягу у цьому випадку (за умов, що

ми не заходимо в область пластичних деформацій) дуже мала, тому похибка визначення модуля Юнга досягає значної величини.

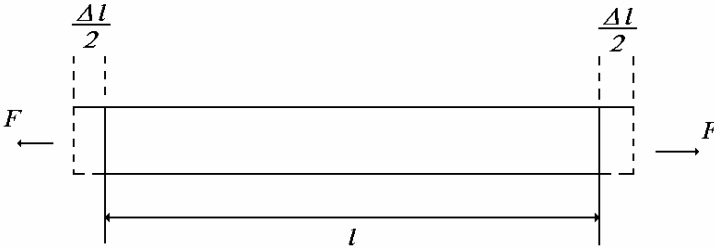


Рис.1. Деформація розтягу стрижня

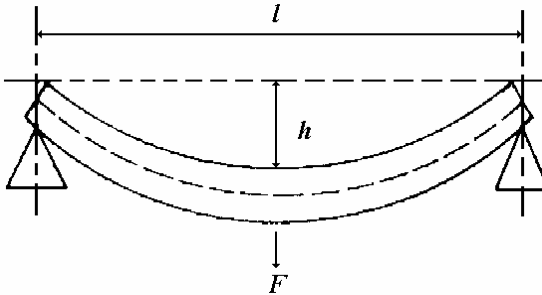


Рис.2. Деформація прогину стрижня

У зв'язку з цим, на практиці модуль Юнга визначають по стрілці прогину стрижня, який закріплено на одному кінці або лежить на двох опорах. Стрілка прогину характеризує величину деформації. На рис.2 показана деформація прогину стрижня, який лежить на двох опорних призмах, а до його середини прикладена сила, направлена вниз. Під дією цієї сили середина стрижня зміщується на величину  $h$ , яка і є стрілкою прогину.

Точний аналіз деформації пружної балки або стрижня досить складний. Дослідження деформації спрощуються, якщо скористатися гіпотезою Бернуллі, за якою при прогині стрижня або балки всі їхні поперечні перерізи залишаються плоскими. Коли умовно поділити стрижень на тонкі шари, то на випуклій стороні стрижня шари розтягуюватимуться, а на ввігнутій – стискуватимуться. Інакше кажучи, деформація прогину тонкого стрижня зводиться до деформації простого розтягу і стиснення.

Пружні сили, які при цьому виникають, намагаються

скоротити розтягнуті шари і подовжити стиснуті. Найбільшу деформацію розтягу і стиснення відчувають поверхневі шари стрижня. Усередині стрижня існує так званий нейтральний шар, який не відчуває ні розтягу, ні стиснення, а тому він не чинить ніякої протидії деформуючій силі. У шарах, які знаходяться поблизу нейтрального, виникають незначні пружні сили. У зв'язку з цим нейтральний шар разом із шарами, які до нього прилягають, можна видалити, залишивши тільки перемичку для з'єднання верхніх і нижніх шарів. Міцність стрижня при цьому практично не зміниться. Так, у техніці застосовують таврові і двотаврові балки.

Тієї ж мети можна досягти, застосовуючи трубку замість суцільних стрижнів. Дійсно, маючи однаковий діаметр і довжину, трубка з такого ж матеріалу майже не поступається за міцністю суцільному стрижню. Саме тому деякі кістки птахів і людини мають трубчасту форму. Особливо велику міцність на прогин мають склеписті будови (череп, шкарлупа горіха, яйця тощо). Для рівномірного розподілу тиску у деяких кістках, наприклад у стегнових, губчаста речовина розташовується стовпчиками так, що ці стовпчики, перетинаючись під прямим кутом, утворюють склепіння. При такій будові сили тиску, які діють на голівку кістки, розкладаються на складові вздовж стовпчиків губчастої речовини так, що вони рівномірно передаються на трубчасту частину кістки, збільшуючи цим її міцність.

При одній і тій самій деформаційній силі стріла прогину зменшується при зменшенні довжини і збільшенні товщини стрижня. Тому коротке волосся або коротка трава вдаються більш жорсткими, ніж довгі.

## **Порядок виконання роботи**

### **Визначення модуля Юнга методом вигину**

1. Встановити одну із досліджуваних пластин на призматичні опори.
2. Встановити часовий індикатор таким чином, щоб його наконечник торкнувся пластини. Повісити скобу пристрою навантаження зразка посередині пластини.
3. Повісити на скобу вантаж масою  $m_1=0,1$  кг. По шкалі індикатора визначити значення прогину пластини  $y_1$ . Зняти



вантаж.

4. Повісити на скобу вантаж масою  $m_2 = 0,15$  кг. По шкалі індикатора визначити значення прогину  $y_2$ .
5. Визначити модуль Юнга за формулою:

$$E = \frac{FL^3}{4ab^3y}, \quad (2)$$

де  $F$  – навантаження, яке призводить до прогину пластини, Н;

$L = 0,114$  м – відстань між призмами;

$a = 0,012$  м – ширина січення пластини;

$b = 0,0008$  м – товщина пластини;

$y$  – значення прогину, м.

Навантаження  $F$  визначається за формулою:

$$F = (m_1 - m_2)g. \quad (3)$$

Значення прогину визначається за формулою:

$$y = y_2 - y_1. \quad (4)$$

### **Визначення модуля зсуву за допомогою пружинного маятника**

1. Підключити фотодатчик до блоку за допомогою кабелю.
2. Повісити одну із досліджуваних пружин на кронштейн. Повісити на пружину набірний вантаж.
3. Кронштейн з вертикально підвішеною пружиною закріпити на вертикальній стійці таким чином, щоб набірний вантаж, підвішений до пружини, своєю нижньою площиною співпадав з оптичною віссю фотодатчика, закріпленого в нижній частині стійки (оптична вісь фотодатчика співпадає з поділками на фотодатчику).
4. Натиснути кнопку “СЕТЬ” блоку. При цьому повинно ввімкнутися табло індикації.
5. Підняти вантаж трохи вгору і відпустити. При цьому вантаж починає здійснювати коливальні рухи на пружині. Натиснути кнопку “ПУСК”, визначити значення часу 20 коливань вантажу по таймеру (натиснути кнопку “СТОП”).
6. Визначити період коливань вантажу за формулою:

$$T = t/n, \quad (5)$$

де  $t$  – час коливань, с;  $n$  – число коливань.

7. Визначити модуль зсуву за формулою:

$$G = \frac{32\pi^2 NmD^3}{T^2 d^4}, \quad (6)$$

де  $m$  – маса вантажу, кг;

$D$  – середній діаметр пружини (виміряти за допомогою штангенциркуля);

$d$  – діаметр проводу ( $d_1 = 0,0008$  м,  $d_2 = 0,001$  м);

$N$  – число витків пружини.

### Визначення модуля зсуву методом розтягнення пружини

1. Зняти кронштейн з фотодатчиком. Повісити на пружину вантаж масою  $m_1 = 0,05$  кг. За допомогою лінійки заміряти розташування нижньої площини вантажу  $y_1$ .
2. Повісити на пружину вантаж масою  $m_2 = 0,15$  кг. За допомогою лінійки заміряти розташування нижньої площини вантажу  $y_2$ .
3. Визначити видовження пружини за формулою

$$y = y_2 - y_1. \quad (7)$$

4. Визначити модуль зсуву за формулою:

$$G = \frac{64FR^3N}{yd^4}, \quad (8)$$

де  $F = mg$  – сила, яка розтягує пружину, Н;  $m = m_2 - m_1 = 0,1$  кг;

$R = D/2$  – середній радіус пружини, м.

### Контрольні запитання

- 1) Які існують типи пружних деформацій?
- 2) Чим характерний нейтральний шар балки?
- 3) Який характер має деформація шарів, що лежать вище (нижче) від нейтрального?
- 4) Від чого залежить деформація кожного шару балки при сталій зовнішній силі?

### Список літератури

1. Зисман Г.А. Годес О.М, Курс общей физики. – М, 1964. –Т.1.
2. Дущенко В.П. Физический практикум. –Киев, 1965.
3. Чулановская М.В. Курс физики для биологов. – Л., 1972.
4. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За заг. ред. І.Т.Горбачука.– К., 1992.

## Лабораторна робота № 6

### ВИВЧЕННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ТВЕРДОГО ТІЛА МЕТОДОМ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

**Мета роботи:** експериментально перевірити основний закон динаміки обертального руху твердого тіла.

**Обладнання:** лабораторна установка «маятник Обербека», штангенциркуль, лінійка, технічні терези.

#### Теоретичні відомості

Для опису динаміки обертального руху твердого тіла виявляється недостатнім знати тільки масу тіла і силу, яка на нього діє. Це пов'язане з тим, що параметри обертального руху (наприклад, кутове прискорення  $\varepsilon$ ) залежить від того, яким чином маса тіла і діючі на нього сили розподілені відносно осі обертання тіла.

**Моментом інерції твердого тіла  $I$**  відносно нерухомої осі називають суму добутків мас усіх матеріальних точок тіла на квадрати їх відстаней до цієї осі:

$$I = \sum m_i R_i^2. \quad (1)$$

Обертальний рух твердого тіла відносно нерухомої осі описується співвідношенням, яке називають **основним рівнянням обертального руху твердого тіла:**

$$I \vec{\varepsilon} = \vec{M}, \quad (2)$$

де  $\vec{M}$  – момент зовнішніх сил відносно тієї ж осі,  $\vec{\varepsilon}$  – кутове прискорення.

Із рівності (2) випливає два наслідки:

1) при постійному моменті інерції кутове прискорення тіла  $\varepsilon$  прямо пропорційне моменту сили, тобто

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{M_1}{M_2}, \quad (3)$$

2) один і той самий момент сил надає тілу кутове прискорення, обернено пропорційне його моменту інерції,

тобто

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (4)$$

У даній роботі перевіряється справедливість співвідношення (3), а отже і основного рівняння динаміки обертального руху твердого тіла (2). Перевірка виконується на приладі, який носить назву маятника Обербека.

### Методика виконання роботи

Маятник Обербека (рис.1) представляє собою хрестоподібний маховик, який вільно обертається навколо горизонтальної осі. Маховик складається із розміщених по осі хреста декількох шківів різного радіуса (у нашому приладі двох) і двох стрижнів, розміщених хрестоподібно під прямим кутом один відносно іншого. По стрижнях можуть переміщатися чотири важки однакової маси  $m_0$ . Важки на стрижнях кріпляться симетрично за допомогою гвинтів. При цьому сумарний момент сил рівний нулю.

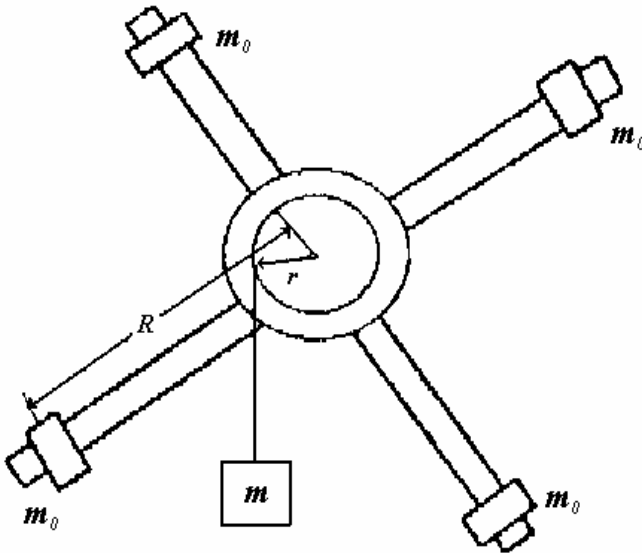


Рис.1. Схема маятника Обербека

Для того, аби маятник обертався, треба на один з його шківів намотати нитку, до вільного кінця якої прив'язати важок масою  $m$ . При падінні цей важок створює силу натягу нитки:

$$F_H = m(g - a), \quad (5)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $a$  – прискорення падаючого важка.

За третім законом Ньютона така ж сила діє на шків радіусом  $r$ , надаючи обертальний момент:

$$M = F_H r = m(g - a)r. \quad (6)$$

Прискорення важка  $a$  визначається шляхом вимірювання часу  $t$ , за який він опуститься з висоти  $h$ , за відомою формулою, а саме:

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (7)$$

Якщо важок опускається з прискоренням  $a$ , то тангенційне прискорення точок на поверхні шківа також дорівнює  $a$ , якщо нитка розмотується без тертя і проковзування. Тоді кутове прискорення системи дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{2h}{rt^2}. \quad (8)$$

Підставляючи у співвідношення (2) значення величин  $\varepsilon$  із (6) і (8) і, враховуючи (7), одержимо вираз для визначення моменту інерції маятника:

$$I = mr^2 \left( \frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (9)$$

### Порядок виконання роботи

#### I. Перевірка справедливості співвідношення (2)

1. Звільнити маятник від важків на стрижнях.
2. Виміряти штангенциркулем діаметр шківів  $r$ , на які в

- процесі виконання роботи намотується нитка.
3. Встановити кронштейн з фотодатчиком в нижній частині шкали вертикальної стійки так, щоб площа кронштейна, пофарбована в червоний колір, співпадала з однією із поділок шкали, а важок масою 50 г при русі вниз проходив по центру робочого вікна фотодатчика; за нижнє положення важка береться відмітка шкали, яка відповідає поділці на корпусі фотодатчика і ніби є продовженням оптичної вісі фотодатчика, яку перетинає важок, що рухається.
  4. Обертаючи маятник, намотати нитку на шків меншого радіусу, встановити важок в крайньому верхньому положенні таким чином, щоб нижня площа важка (візир вертикальної стійки дотикається до нижньої площини важка) співпала з однією із поділок шкали вертикальної стійки; зафіксувати важок в цьому положенні; для цього натиснути кнопку “СЕТЬ” блоку, при цьому повинен спрацювати фрикціон електромагнітного гальма; записати це значення.
  5. За допомогою візира по шкалі вертикальної стійки визначити пройдений важком шлях  $h$ , як відстань від нижньої площини важка у верхньому положенні важка до оптичної вісі фото датчика.
  6. Натиснути кнопку “ПУСК” блоку, при цьому відбувається розгальмування електромагнітного гальма, важок починає опускатися і таймер блока починає відлік часу; при перетині важком оптичної осі фотодатчика відлік часу зупиниться; записати показники таймера, тобто час руху важка  $t$ ; дослід повторити 3-5 разів.
  7. Намотати нитку на шків більшого радіуса; повторити пп. 4 і 5, при цьому на шківі більшого радіуса дослід проводять при двох значеннях маси падаючого тягаря (у нашому практикумі ці значення складають 50 г та 100 г).
  8. За отриманими даними розрахувати у кожному випадку обертальний момент  $M$  і кутове прискорення  $\varepsilon$ .

9. Для кожного випадку знайти співвідношення  $\frac{M}{\varepsilon}$  і порівняти їх між собою; переконатися, що з урахуванням похибок ці співвідношення рівні між собою, тобто

$$\frac{M_1}{\varepsilon_1} = \frac{M_2}{\varepsilon_2} = \frac{M_3}{\varepsilon_3} = const . \quad (10)$$

10. Результати вимірювань і обчислень занести до таблиці 1.

Таблиця 1

№ пп	$m$ , кг	$r$ , м	$R$ , м	$h$ , м	$t$ , с	$d$ , м/с <sup>2</sup>	$M$ , н·м	$\varepsilon$ , $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$	$I_0$ , кг·м <sup>2</sup>
1.									
2.									
...									

## II. Визначення моменту інерції

1. Використовуючи дані, які були отримані при виконанні попереднього завдання, розрахувати момент інерції  $I_0$  маятника без важків на стрижнях.
2. Закріпити важки на стрижнях, максимально віддаляючи їх від осі обертання; звернути увагу, щоб гвинти, якими кріпляться важки до стрижнів, були добре прикручені; при цьому всі важки повинні знаходитись на однаковій відстані  $R$  від осі обертання; виміряти цю відстань та записати.
3. Описаним у першій частині роботи методом виконати вимірювання, за даними яких знайти обертальний момент  $M$ , кутове прискорення  $\varepsilon$ , момент інерції навантаженої системи; результати занести до таблиці, яка має вигляд,

аналогічний табл. 1.

4. Момент інерції важків на стрижнях  $I'$  знайти, як різницю моментів інерції навантаженої і ненавантаженої системи, тобто

$$I' = I - I_0 \quad (11)$$

5. Визначити масу важків  $4m_0$ , закріплених на стрижнях, і відстань  $R$  від центра мас важків до осі обертання.
6. За отриманими даними знайти теоретичне значення моменту інерції важків за формулою

$$I' = 4m_0 R^2 \quad (12)$$

7. Змінити відстань  $R$  і повторити пп. 2-6.
8. Порівняти значення моментів інерції важків на стрижнях, які отримані експериментально і теоретично з врахуванням похибки вимірювання.
9. Зробити висновки за одержаними в лабораторній роботі результатами.

### Контрольні запитання

- 1) Чому для опису динаміки обертального руху твердого тіла виникає необхідність ввести нові фізичні величини? Які це величини? Які величини є їхніми аналогами в динаміці поступального руху?
- 2) Який фізичний зміст величини, що називається моментом інерції? Як визначити момент інерції відносно заданої осі матеріальної точки, твердого тіла? Як можна змінити значення моментів інерції системи в умовах даної лабораторної роботи?
- 3) Що таке плече сили, момент сили? Як можна змінити величину моменту діючої на систему сили в умовах даної лабораторної роботи? Як при цьому направлений вектор моменту сил?
- 4) Отримати рівняння, яке зв'язує момент зовнішніх сил, що діють на систему, а моментом інерції системи. Як називається це співвідношення?
- 5) Яка будова маятника Обербека? Чому важки на його



- стрижнях повинні розмішуватися симетрично?
- 6) Які фізичні задачі розв'язувались у першій частині лабораторної роботи, а які – у другій? Яким чином розв'язувалися ці задачі?
  - 7) Отримайте співвідношення, яке зв'язує тангенційне та кутове прискорення.
  - 8) Для якого випадку справедлива формула  $I' = 4m_0 R^2$  ?

### Список літератури

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / Под ред. В.И.Ивероной. –М., 1967.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. -М., 1982. – Т.1.

## Лабораторна робота N 7

### ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ФІЗИЧНОГО ТА МАТЕМАТИЧНОГО МАЯТНИКІВ

**Мета роботи:** вивчення роботи фізичного та математичного маятників та визначення з їх допомогою прискорення вільного падіння.

**Обладнання:** установка «Маятник універсальний».

#### Теоретичні відомості

Гравітація (тяжіння) – один з видів матеріальної взаємодії в природі. Це притягання тіл будь-якої природи, що залежить від їх мас та розташування. Згідно із **законом всесвітнього тяжіння** між двома точковими масами  $m_1$  і  $m_2$ , розташованими на віддалі  $r$  одна від одної, діють сили тяжіння, абсолютне значення кожної з них дорівнює

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1)$$

де  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$  – гравітаційна стала.

У векторній формі закон всесвітнього тяжіння приймає вигляд

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r}, \quad (2)$$

де  $\vec{r}_{12}$  – радіус-вектор, спрямований від першого тіла до другого.

Гравітаційні сили  $\vec{F}_{12}, \vec{F}_{21}$  прикладені до кожної із взаємодіючих точок і спрямовані вздовж прямої, яка їх сполучає, у напрямку взаємного зближення.

Усі тіла, що перебувають поблизу Землі, зазнають дії сили тяжіння, завдяки якій вони падають на її поверхню. Статично ця дія проявляється у вазі тіла, а динамічно – в однаковому для всіх тіл прискоренні  $g$ , якого тіла набувають у даній точці поблизу поверхні Землі під дією лише сили

тяжіння. Це прискорення називають прискоренням вільного падіння. Таке прискорення мав би центр тяжіння якого-небудь тіла поблизу поверхні Землі  $H \ll R_3$  ( $R_3$  – радіус Землі,  $H$  – висота тіла над поверхнею Землі) при падінні у безповітряному просторі.

Прискорення вільного падіння залежить від висоти над рівнем моря та географічної широти місцевості  $Y$ . Наближено величина  $g$  для даної точки над поверхнею Землі може бути обчислена за такою формулою:

$$g = 978,049 \left( 1 + 0,005288 \sin Y - 0,00000 \sin^2 2Y - 0,0003086 H \right)$$

Прискорення вільного падіння  $g$  при переході від полюса до екватора зменшується внаслідок впливів форми Землі (Земля сплюснута біля полюсів, а тому екваторіальний радіус більший за полярний) та добового обертання Землі (завдяки цьому рухові з'являється відцентрова сила інерції, що діє на тіло і зменшує його вагу, а отже, і  $g$ ).

На величину  $g$  у кожній точці Землі впливає також густина порід, що залягають у земній корі. Цю залежність використовують у гравіметричній розвідці корисних копалин.

Для широти Києва на рівні моря  $g = 9,8408 \text{ м/с}^2$ . У даній роботі для визначення прискорення вільного падіння використовується математичний та фізичний маятники, період коливань яких залежить від прискорення вільного падіння  $g$ .

**Математичний маятник** – це теоретична модель маятника, в якій матеріальна точка масою  $m$  підвішена на невагомому нерозтяжному стрижні довжини  $l$  та здійснює рух в вертикальній площині під впливом сил тяжіння з прискоренням вільного падіння  $g$ .

В моделі математичного маятника нехтують розмірами тіла, деформацією підвісу та тертям в точці підвісу стрижня. Звичайно розглядаються коливання маятника в одній площині. В загальному випадку, якщо відхилити маятник від положення рівноваги та штовхнути його вбік, рух маятника буде складатися з коливань в вертикальних площинах та руху в горизонтальних. При малому відхиленні математичний маятник

здійснює гармонічні коливання. Якщо відхилення велике, то коливання маятника періодичні, але не гармонічні.

Математичний маятник має два положення рівноваги: стійке та нестійке. В стійкому положенні рівноваги маятник висить непорушно строго вертикально, сила тяжіння зрівноважується силою пружності стрижня. Якщо відвести маятник від положення рівноваги, або надати йому початкової швидкості, виникають коливання.

Сили тертя, що діють на реальний маятник, але не враховані в даній моделі, приводять до загасання коливань та знов повертають маятник в початкове положення. Саме тому це положення має назву стійкого.

Інше положення рівноваги математичного маятника знаходиться в точці  $\theta = \pi$ , тобто коли стрижень орієнтований вертикально вгору. В цьому положенні сили тяжіння та пружності стрижня, як і в точці стійкої рівноваги, зрівноважені, проте дана рівновага є нестійкою. При найменшому відхиленні від вертикального положення рівнодіюча сила, що діє на маятник, виводить його з рівноваги. Реальний маятник вже ніколи не повернеться в це положення. Підтримати маятник у вертикальному положенні можна за допомогою балансування, яке зводиться до особливих рухів точки опори.

При малих кутах відхилення від положення рівноваги математичний маятник здійснює гармонічні коливання з періодом, який дорівнює:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (3)$$

де  $l$  – довжина підвісу маятника.

**Фізичним маятником** називають довільне тіло, що здатне здійснювати коливання навколо нерухомої горизонтальної осі, яка не проходить через його центр мас. При малих кутах відхилення від положення рівноваги фізичний маятник здійснює гармонічні коливання з періодом, який дорівнює:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mga}} = 2\pi\sqrt{\frac{l_{ze}}{g}}, \quad (4)$$

де  $I$  – момент інерції маятника відносно горизонтальної осі, яка проходить через точку підвісу,  $m$  – маса маятника,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $a$  – відстань від точки підвісу до центра мас маятника.

Величину

$$l_{ze} = \frac{I}{ma} \quad (5)$$

називають **зведеною довжиною фізичного маятника**.

Якщо порівняти формулу (4) з формулою для періоду коливань математичного маятника (3), то легко побачити, що зведена довжина фізичного маятника дорівнює довжині такого математичного маятника, у якого період коливань збігається з періодом коливань даного фізичного маятника.

Для знаходження прискорення вільного падіння за допомогою фізичного маятника слід визначити його зведену довжину. Цю задачу можна розв'язати графічно із залежності періоду коливань фізичного маятника, що досліджується, від положення точки підвісу. Така крива може бути побудована експериментально.

За теоремою Штейнера момент інерції фізичного маятника можна записати, як

$$I = I_0 + ma^2, \quad (6)$$

де  $I_0$  – момент інерції маятника відносно горизонтальної осі, що проходить через центр мас маятника.

$I_0$  визначається співвідношенням

$$I_0 = ma_0^2, \quad (7)$$

де  $a_0$  – радіус інерції тіла.

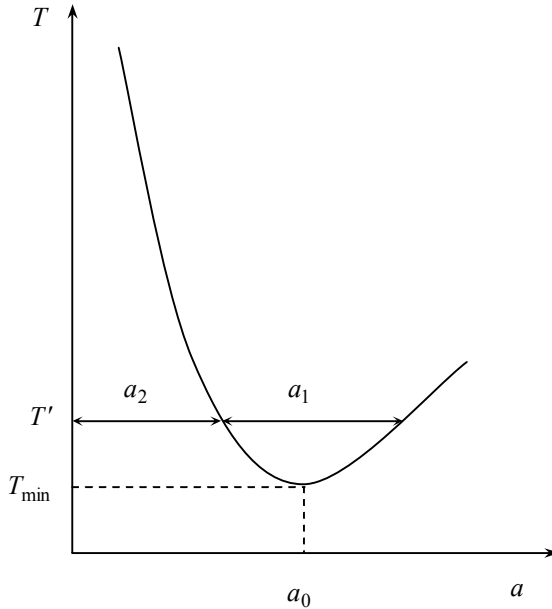
Зведена довжина дорівнюватиме

$$L = \frac{ma_0^2 + ma^2}{ma} = \frac{a_0^2 + a^2}{a}, \quad (8)$$

а період коливань

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{a_0^2 + a^2}{ag}}. \quad (9)$$

З формули (9) випливає, що період коливань фізичного маятника буде нескінченно великим при  $a=0$  та при  $a=\infty$ . Графік залежності  $T=f(a)$  являє собою криву з мінімумом, якому відповідає значення  $a=a_0$  (рис.1).



**Рис.1** Графік залежності періоду коливань фізичного маятника від відстані від точки підвісу до центра мас маятника  $T = f(a)$

Як випливає з рисунку, коливання маятника характеризуються однаковим значенням періоду коливань при двох різних значеннях  $a$ , одне з яких ( $a_1$ ) більше за  $a_0$ , а інше ( $a_2$ ) — менше за  $a_0$  (див. рис. 1). Тоді можна записати:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{a_0^2 + a_1^2}{a_1g}} = 2\pi\sqrt{\frac{a_0^2 + a_2^2}{a_2g}}. \quad (10)$$

З (10) після нескладних математичних перетворень можна отримати вираз:

$$a_0^2 = a_1 \cdot a_2. \quad (11)$$

Підставляючи (11) в (8) та враховуючи, що  $a = a_1$  або  $a = a_2$ , отримаємо вираз для зведеної довжини:

$$L = a_1 + a_2 \quad (12)$$

Зведену довжину  $L$  можна визначити з графіку залежності  $T = f(a)$ , для цього треба визначити довжини  $a_1$  та  $a_2$ , що відповідають одному значенню періоду коливань  $T$ .

### **Порядок виконання роботи Визначання прискорення вільного падіння.**

#### **Математичний маятник**

1. Підключити фотодатчик до блоку за допомогою кабелю.
2. Виконати регулювання положення основи за допомогою регулюючих основ, використовуючи для візуального спостереження рівень.
3. Зняти фізичний (обертальний) маятник з верхнього кронштейна. Встановити нижній кронштейн з фотодатчиком в крайнє нижнє положення шкали так, щоб площа кронштейна, пофарбована в синій колір, співпала з однією із поділок шкали.
4. Встановити верхній кронштейн таким чином, щоб кулька математичного маятника опинилася в робочій зоні фотодатчика. За допомогою пристрою досягти такого положення кульки, при якому його центральна поділка буде співпадати з поділкою на фотодатчику.
5. По шкалі вертикальної стійки визначити довжину математичного маятника  $l_1$ .
6. Натиснути кнопку “СЕТЬ” блоку. При цьому повинно ввімкнутися табло індикації.
7. Відвести рукою кульку математичного маятника на кут приблизно 5-6 градусів і відпустити її.

8. Натиснути кнопку “ПУСК” на блоці і переконатися, що він реєструє число і час коливань маятника. Натиснути кнопку “СТОП” на блоці і переконатися, що відлік часу і кількості періодів коливань зупиняється в момент закінчення чергового періоду коливань. Натиснути кнопку “СБРОС” на блоці.
9. Привести математичний маятник в коливальний рух, відхиливши металеву кульку на кут приблизно 5-6 градусів, після чого натиснути кнопку “ПУСК” на блоці.
10. За показниками таймера визначити значення часу 60–70 коливань маятника, натиснувши кнопку “СТОП”. Визначити середнє значення періоду коливань маятника за формулою

$$T_1 = \frac{t_1}{n}, \quad (6)$$

де  $t_1$  – час коливань,  $n$  – число коливань.

11. Пересунути вгору кронштейн з фотодатчиком на 20 мм.
12. За допомогою пристрою досягти такого положення кульки, при якому його центральна поділка буде співпадати по висоті з поділкою на фотодатчику.
13. По шкалі вертикальної стійки визначити довжину математичного маятника  $l_2$ .
14. Повторити експеримент (див. вище)
15. Визначити  $T_2$  за формулою

$$T_2 = \frac{t_2}{n}. \quad (7)$$

16. Обчислити прискорення вільного падіння за формулою:

$$g = 4\pi^2(l_1 - l_2)/(T_1^2 - T_2^2). \quad (8)$$

### Фізичний маятник

1. Закріпити призматичну опору на відстані близько 20 мм від кінця стрижня (фізичного маятника).
2. Підвісити обертальний маятник на одній із призматичних опор. Повернути верхній кронштейн на 180 градусів так, щоб стрижень маятника знаходився в робочій зоні фотодатчика.
3. Натиснути кнопку “СБРОС” на блоці. Відхиливши



маятник на кут приблизно 4 градуса, натиснути кнопку “ПУСК” на блоці і без поштовху відпустити маятник. За показниками таймера визначити значення часу 20 коливань маятника. Визначити середнє значення періоду коливань маятника за формулою (6).

4. Визначити періоди коливань для інших положень опорної призми. Для цього опорну призму переміщують кожного разу на 20 мм донизу та визначають описаним вище методом час 20 коливань. Слід виконати вимірювання часу  $t$  і визначити період коливань  $T$  для 9 положень опорної призми. При цьому кожного разу необхідно записувати відстань  $a$  від точки підвісу маятнику до його центру мас (центру стрижня). Результати вимірювань занести до таблиці 1.

5. За одержаними даними побудувати графік залежності  $T = f(a)$ .

6. За графіком визначити довжини фізичного маятника  $a_1$  та  $a_2$  (для п’яти значень періоду  $T$  і, використовуючи одержані значення  $a_1$  та  $a_2$ , обчислити зведену довжину фізичного маятника за формулою (12))

7. Визначити величину прискорення вільного падіння  $g$  за формулою  $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$ .

8. Результати обчислень занести до таблиці 2.

9. Обчислити похибки визначення  $g$  та записати остаточний результат.

*Таблиця 1*

№	$a$ , см	$g$ , час 20 коливань	$T$ , с
1.			
2.			
...			

Таблиця 2

№	$T$ , с	$a_1$ , м	$a_2$ , м	$L$ , м	$g$ , м/с <sup>2</sup>	$\langle g \rangle$ , м/с <sup>2</sup>
1.						
2.						
...						

### Контрольні запитання

1. Що називають фізичним маятником? Виведіть формулу для періоду коливань фізичного маятника,
2. Що називають зведеною довжиною фізичного маятника? Як її визначають у лабораторній роботі?
3. Сформулювати теорему Штейнера.
4. За якої відстані між центром мас та точкою підвісу маятника період коливань буде найменшим? Доведіть це.
5. Чому дорівнюватиме період коливання маятника, якщо стрижень закріпити посередині? Поясніть.
6. Чому амплітуда коливань маятника при вимірюваннях мас бути невеликою?
7. Що називають прискоренням вільного падіння? Як його визначають у роботі?
8. Як залежить прискорення вільного падіння від широти місцевості? Відповідь поясніть.
9. Чому дорівнюватиме період коливань маятника, якщо його перенести з полюса на екватор?
10. На горі чи під горою буде більшим період коливання того самого маятника?
11. Від чого залежить величина прискорення вільного падіння?
12. На чому базується гравіметрична розвідка корисних копалин?

### Список літератури

1. Сивухин Д.В. Механика, 3-е изд. М.: Наука, 1989. – 576 с. (Общий курс физики; Т.1).
2. Винниченко В.Є. Фізичний практикум. – К., 1954.

## Лабораторна робота №8

### МАЯТНИК МАКСВЕЛЛА

**Мета роботи:** вивчити закони динаміки поступального та обертального руху на прикладі маятника Максвелла.

**Обладнання:** установка «маятник Максвелла», комплект змінних кілець.

#### Теоретичні відомості

**Маятник Максвелла** представляє собою тверде тіло, що насажене на вісь. Вісь підвішена на двох нитках, що накручуються на неї (рис. 1).

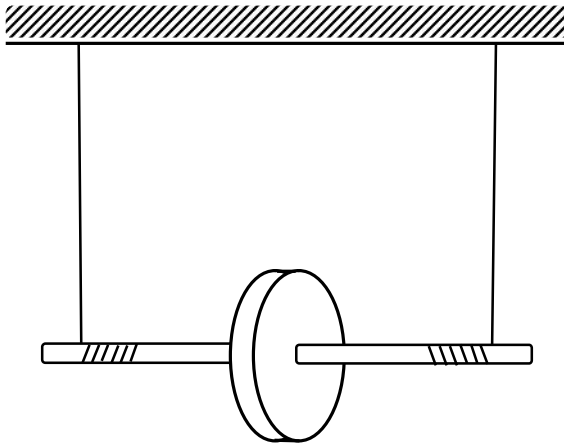


Рис.1. Маятник Максвелла

Дія приладу основана на одному з основних законів механіки – законі збереження механічної енергії.

Енергія – це фізична величина, яка є загальною мірою різних видів руху матерії та взаємодій, а також мірою переходу руху матерії з одних форм в інші. Основні види енергії: механічна, теплова, електромагнітна, ядерна та ін.

**Механічна енергія**  $E$  характеризує рух і взаємодію тіл і є функцією стану механічної системи, яка

залежить від швидкостей і взаємного розташування тіл (або їх частин). Механічну енергію поділяють на кінетичну і потенціальну.

**Кінетична енергія** матеріальної точки – енергія руху, яка пов'язана з масою та швидкістю їх руху в даній інерціальній системі відліку

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}, \quad (1)$$

де  $p = mv$  – імпульс матеріальної точки.

**Потенціальна енергія** – енергія консервативної системи, яка залежить від розташування та взаємодії частинок цієї системи (як між собою, так і з зовнішнім силовим полем). Потенціальна енергія – однозначна функція координат точок системи. Наприклад:

1) Потенціальна енергія гравітаційної взаємодії системи двох матеріальних точок з масами  $m$  і  $M$ , що знаходяться на відстані  $r$  одна від одної

$$E_n = -\gamma \frac{mM}{r}, \quad (2)$$

де  $\gamma$  – гравітаційна стала, а нуль відліку потенціальної енергії ( $E_n = 0$ ) приймають при  $r = \infty$ ;

2) Потенціальна енергія пружних взаємодій

$$E_n = \frac{k(\Delta x)^2}{2}, \quad (3)$$

де  $k$  – коефіцієнт квазіпружної сили;  $\Delta x$  – модуль вектора подовження або стиснення.

Закон збереження механічної енергії в консервативній системі формулюється так: механічна енергія консервативної системи зберігається постійною в процесі руху системи

$$E = E_k + E_n = const. \quad (4)$$

Цей закон виконується як для замкнених, так і для незамкнених систем.

Система тіл називається **консервативною**, якщо

внутрішні й зовнішні сили, що діють на систему, є потенціальними.

**Потенціальними** називають сили, робота яких залежить тільки від початкового та кінцевого положення точки, що рухається, і не залежить від форми траєкторії. По замкненій траєкторії робота потенціальної сили завжди дорівнює нулю. До потенціальних сил відносять гравітаційні сили, сили пружності, електростатичні. Сили, робота яких залежить від форми траєкторії, називають **непотенціальними** силами (сили тертя, сили опору тощо). Робота непотенціальних сил по замкненій траєкторії не дорівнює нулю.

Маятник Максвелла під дією сили тяжіння здійснює коливання у вертикальному напрямку та разом з тим крутильні коливання навколо своєї осі. Нехтуючи силами тертя, систему можна вважати консервативною.

Закрутивши нитки, ми піднімаємо маятник на висоту  $h$ , надавши йому запас потенціальної енергії. При звільненні маятника він розпочинає рух під дією сили тяжіння: поступальний донизу і обертальний навколо своєї осі. При цьому потенціальна енергія переходить в кінетичну. Опустившись в крайнє нижнє положення, маятник буде по інерції обертатися в тому ж напрямку, нитки намотаються на вісь і маятник підніметься. Так відбуваються коливання маятника.

Запишемо рівняння руху маятника. При поступальному русі маятника, за другим законом Ньютона, з врахуванням діючих на маятник сил, можна записати:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + 2\vec{T}, \quad (5)$$

де  $m$  – маса маятника,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $a$  – прискорення поступального руху центру мас маятника,  $T$  – сила натягу однієї нитки.

В проекції на напрям поступального руху (вертикаль), отримаємо:

$$ma = mg - 2T. \quad (6)$$

Для обертального руху маятника запишемо основний закон динаміки обертального руху для абсолютно твердого тіла:

$$I\varepsilon = M, \quad (7)$$

де  $I$  – момент інерції маятника відносно його осі обертання,  $\varepsilon$  – кутове прискорення маятника,  $M$  – результуючий момент зовнішніх сил відносно осі обертання.

Оскільки момент сили тяжіння відносно осі обертання рівний нулю,

$$I\varepsilon = 2Tr, \quad (8)$$

де  $r$  – радіус осі.

Оскільки  $a = \varepsilon r$  і з (6)  $2T = m(g - a)$ , можемо записати:

$$I = \frac{m(g - a)r^2}{a}, \quad (9)$$

а після перетворень

$$I = m\left(\frac{g}{a} - 1\right)r^2. \quad (5)$$

Прискорення  $a$  може бути отримано за виміряним часом руху та відстанню, що проходить маятник  $h$  з рівняння рівноприскореного руху без початкової швидкості:

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (10)$$

тоді

$$I = m\left(\frac{gt^2}{2h} - 1\right)r^2 \quad (11)$$

і, якщо виразити радіус через діаметр осі  $D$ , отримаємо основну розрахункову формулу:

$$I = \frac{mD^2}{4}\left(\frac{gt^2}{2h} - 1\right). \quad (12)$$

### Порядок виконання роботи

1. Встановити нижній кронштейн з фотодатчиком в крайнє нижнє положення шкали так, щоб площа кронштейна, яка пофарбована в синій колір, співпала з однією із поділок шкали.
2. Виконати регулювання положення основи за допомогою

- регулюючих опор так, щоб диск на біфілярному підвісі знаходився в центрі вікна фотодатчика.
3. Встановити за допомогою вузла регулювання необхідну довжину біфілярного підвісу таким чином, щоб нижній край зрізу змінного кільця маятника знаходився на 4–5 мм нижче оптичної осі фотодатчика; при цьому вісь маятника повинна займати горизонтальне положення.
  4. Підключити фотодатчик і електромагніти установки до електронного блоку за допомогою кабелю.
  5. Натиснути кнопку "СЕТЬ". При цьому повинне ввімкнутися табло індикації і повинні ввімкнутися електромагніти.
  6. Обертаючи маятник за годинниковою стрілкою, зафіксувати його у верхньому положенні з допомогою лівого (ближнього до стійки) електромагніту, при цьому необхідно стежити за тим, щоб нитка намотувалась на вісь виток до витку. При обертанні маятника проти годинникової стрілки фіксувати маятник необхідно за допомогою правого (дальнього від стійки) електромагніту.
  7. Натиснути кнопку "СБРОС" для того, щоб переконатися, що на табло встановилися нулі.
  8. При натисненні кнопки "ПУСК" на блоці електромагніти повинні знеструмитися, маятник повинен почати розкручуватися, таймер повинен провести відлік часу, а в момент перетину маятника оптичної осі фотодатчика відлік часу повинен припинитися.
  9. За допомогою візира по шкалі вертикальної стійки визначити хід маятника  $h$ .
  10. Натиснути кнопку "СБРОС". Привести маятник у початкове положення (зафіксувати у верхньому положенні за допомогою електромагніту).
  11. Натиснути кнопку "ПУСК" на блоці.
  12. Визначити час руху маятника за таймером.
  13. Внести отримані данні до табл.1.
  14. Повторити пункти 10-13 п'ять разів.
  15. Визначити для кожного кільця значення середнього часу падіння маятника.
  16. Визначити діаметр осі разом з намотаною на неї ниткою за

формулою  $D = D_0 + 2D_N$ , де  $D_N$  – діаметр нитки,  $D_N = 0,5$  мм;  $D_0$  – діаметр зовнішньої осі маятника,  $D_0 = 6$  мм.

17. Визначити масу маятника разом з накладеним кільцем за формулою  $m = m_0 + m_d + m_k$ , де  $m_0 = 0.015$  кг – маса осі,  $m_d = 0.12$  кг – маса диска,  $m_k$  – маса кільця. Значення мас кільця нанесена на них.
18. Визначити момент інерції маятника за формулою (12).
19. Визначити теоретичне значення моменту інерції маятника за формулою

$$I_M = I_O + I_d + I_k.$$

Момент інерції осі маятника  $I_O$  визначається за формулою:

$$I_O = \frac{m_0 R_0^2}{2},$$

де  $R_0 = 0,05$  м – радіус осі,  $m_0 = 0.015$  кг – маса осі.

Момент інерції диска маятника  $I_d$  визначається за формулою:

$$I_d = \frac{2m_d R_d^2}{2},$$

де  $R_d = 0.05$  м – середній радіус диска,  $m_d = 0.12$  кг – маса диска.

Момент інерції кільця маятника  $I_k$  визначається за формулою:

$$I_k = m_k \left( \frac{R_k^2 + b^2}{4} \right),$$

де  $R_k = 0,056$  м – середній радіус кільця,  $m_k$  – маса кільця, кг,  $b$  – ширина кільця, м.

Таблиця 1

№ кільця	$t, c$					$t_{cp}, c$	$h, m$
	№ дослідів						
	1	2	3	4	5		
1							



### **Контрольні запитання**

- 1) Сформулюйте закон збереження механічної енергії та умови його виконання.
- 2) Напишіть основний закон динаміки обертального руху.
- 3) Дайте визначення моменту інерції твердого тіла.
- 4) Проведіть аналогію між основними характеристиками поступального та обертального руху?
- 5) Опишіть будову та принцип дії маятника Максвелла.

### **Список літератури**

1. Савельев И.В. Курс общей физики, – М., 1982. – т. I.
2. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За заг. ред. І.Т.Горбачука. – К., 1992.

## Лабораторна робота N 9

### ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ЗВУКОВОЇ ХВИЛІ І ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В ПОВІТРІ ТА ТВЕРДИХ ТІЛАХ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСУ

**Мета роботи:** визначити довжину звукової хвилі і швидкості звуку у повітрі та твердих тілах при кімнатній температурі.

**Обладнання:** об'єкт досліджень, вимірювальний пристрій.

#### Теоретичні відомості

Звуковими хвилями або звуком називають пружні хвилі, які характеризуються частотою від 20 Гц до 20000 Гц і розповсюджуються в газах, рідинах і твердих тілах. Досягнувши людського вуха, такі хвилі викликають відчуття звуку.

У твердих тілах звукові хвилі можуть бути поздовжніми і поперечними. При цьому у поперечній хвилі частинки середовища здійснюють коливання біля положення своєї рівноваги у напрямку, перпендикулярному до поширення хвилі. У поздовжній хвилі напрямок коливання частинок середовища збігається з напрямком поширення хвилі. У рідинах та газах поширюються лише поздовжні хвилі.

Вимірювання довжини звукової хвилі  $\lambda$  і швидкості поширення звуку в повітрі  $v$  у даній роботі ґрунтується на використанні особливостей стоячих хвиль.

**Стояча хвиля** утворюється при накладанні двох хвиль однакової амплітуди і частоти, що поширюються у протилежних напрямках, наприклад, падаючої і відбитої від границі розділу середовищ. Нехай у додатному напрямку осі  $OY$  поширюється плоска хвиля (назвемо її падаючою або прямою), яка описується рівнянням

$$x_1 = a \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda}\right), \quad (1)$$

де  $x_1$  – зміщення точки, яка знаходиться на відстані  $y$  від

джерела, у момент часу  $t$ ;  $a$  – амплітуда коливань;  $T$  – період коливань,  $\lambda$  – довжина хвилі.

Відбиту хвилю, яка поширюється у від'ємному напрямку осі  $OY$ . можна описати рівнянням

$$x_2 = a \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{y}{\lambda}\right). \quad (2)$$

Інтерферуючи, ці хвилі утворюють стоячу хвилю, рівняння якої має вигляд:

$$x = x_1 + x_2 = 2a \cos\left(2\pi \frac{y}{\lambda}\right) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right), \quad (3)$$

у цьому виразі величину

$$2a \cos 2\pi \frac{y}{\lambda} = A, \quad (4)$$

можна розглядати як амплітуду стоячої хвилі.

Оскільки

$$0 \leq \left| \cos 2\pi \frac{y}{\lambda} \right| \leq 1, \quad (5)$$

то амплітуда стоячої хвилі змінюється в межах від 0 до  $2a$ .

Точки, для яких амплітуда коливань максимальна, тобто  $A = 2a$ , називаються **пучностями стоячої хвилі**, а точки з нульовою амплітудою – її **вузлами**.

Аналізуючи вираз (4), можна показати, що координати пучностей визначаються співвідношенням

$$y = n \frac{\lambda}{2}, \quad (n=0,1,2,\dots), \quad (6)$$

а координати вузлів

$$y = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}, \quad (n=0,1,2,\dots), \quad (7)$$

Із співвідношення (6–7) випливає, що відстань між сусідніми вузлами (пучностями) складає  $\lambda/2$ .

Відстань же між сусідніми пучністю і вузлом складає чверть довжини хвилі –  $\lambda/4$ .

Якщо врахувати, що довжина хвилі дорівнює відстані, на яку поширюється хвиля за час, що дорівнює періоду коливань, то можна записати:

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}, \quad (8)$$

де  $v$  – швидкість поширення хвилі у даному середовищі,  $\nu$  – частота коливань.

Щоб одержати стоячі звукові хвилі, треба примусити хвилю, що біжить відбитися від границі розділу середовищ. Слід звернути увагу на те, що на границі відбиття при цьому утворюється вузол або пучність. Це залежить від співвідношення густин середовищ, на границі розділу яких відбувається відбиття. Вузол на границі розділу виникає, якщо середовище, від якого хвиля відбивається, має більшу густину, ніж те, в якому хвиля поширюється. У протилежному випадку на границі розділу виникає пучність.

### Методика виконання роботи

Визначення швидкості звукових хвиль ґрунтується на вимірюванні довжини стоячої хвилі, яка встановлюється у хвилеводі, шляхом вимірювання відстані між джерелом звуку (гучномовець) і приймачем звуку (мікрофон) при вимірюванні різниці фаз останніх  $\varphi = n\pi$ , де  $n = 0, 2, 4$  і т.д.

$$v = \lambda \nu = L \nu, \quad (9)$$

де  $v$  – швидкість звуку в повітрі;  $\lambda$  – довжина звукової хвилі;  $\nu$  – частота генератора;  $L$  – відстань між гучномовцем і мікрофоном, яка відповідає різниці фаз коливань при  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = 2\pi$ ,  $\varphi = 4\pi$  і т.д.

Різниця фаз при вимірюванні відстані між джерелом і приймачем звуку вимірюється за допомогою двоканального осцилографа.

Визначення швидкості звукових хвиль в твердих тілах ґрунтується на резонансному методі. На кінцях стрижня із алюмінію і латуні запресовані шайби із феромагнітного матеріалу (на стрижні із сталі шайби немає). Стрижень жорстко закріплений в площині геометричного місця тяжіння. З одного боку стрижня на відстані (0,1 – 0,3) мм знаходиться датчик.

Змінюючи частоту генератора, змінюють частоту

струму, що протікає через датчик. Кінець стрижня при цьому починає коливатися з частотою струму і в стрижні виникають поздовжні хвилі, які детектуються приймачем, який знаходиться на відстані (0,1 – 0,3) мм від другого кінця стрижня і перетворюються ним в електричний сигнал, амплітуда якого пропорційна амплітуді поздовжніх коливань стрижня.

При певному значенні частоти можна отримати в стрижні стоячу хвилю, яка супроводжується резонансом, тобто власна резонансна частота стрижня кратна збуджуваній частоті, що супроводжується максимальним збільшенням амплітуди приймального кінця стрижня і, відповідно, сигналу приймача. При першій резонансній частоті на стрижні вкладаються дві чверті стоячої хвилі.

Знаючи довжину стрижня, можна визначити довжину звукової хвилі і розрахувати швидкість її поширення в стрижні по формулі:

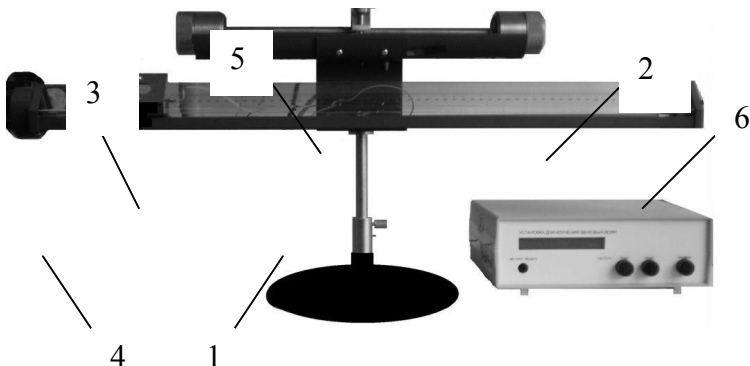
$$v = 2Lv, \quad (10)$$

де  $L$  – довжина стрижня;  $v$  – частота генератора.

Установка зроблена в настільному виконанні і складається із об'єкта досліджень і вимірювального пристрою (рис.1).

Об'єкт досліджень складається з хвилеводу і резонатора. Хвилевод являє собою повітряний канал, на одному кінці якого закріплений гучномовець, а на іншому мікрофон, який може рухатись. Для вимірювання відстані між мікрофоном і гучномовцем використовується міліметрова шкала. Резонатор зроблений в формі жолоба, в середній частині якого закріплюється металічний стрижень (змінний), а на кінцях встановлені датчик і приймач.

Повітряні проміжки між кінцями стрижня і датчиком (приймачем) можуть регулюватися з допомогою ручок і встановлюються за допомогою щупа, який розташовується при регулюванні між кінцем стрижня і датчиком (приймачем). Об'єкт дослідження за допомогою стійки встановлюється на штативі.



**Рис.1. Установка для визначення довжини звукової хвилі і швидкості звуку в повітрі та твердих тілах методом резонансу.**

1 – хвилевод, 2 – резонатор, 3 – мікрофон,  
4 – гучномовець, 5 – металевий стрижень,  
6 – міліметрова шкала, 7 – вимірювальний пристрій

Вимірювальний пристрій (рис.2) складається із генератора синусоїдальних коливань з підсилювачем потужності для збудження коливань в гучномовці і датчику та частотоміру для вимірювання частоти генератора.



**Рис.2. Вимірювальний пристрій.**

1 – кнопка "МЕТАЛ – ВОЗДУХ"; 2 – ручка "ЧАСТОТА ГРУБО"; 3 – ручка "ЧАСТОТА ТОЧНО"; 4 – ручка "УРОВЕНЬ"; 5 – рідкокристалічний дисплей.

На задній стінці знаходиться гніздо для підключення

об'єкта досліджень, гніздо для підключення осцилографа, клемма заземлення, мережевий шнур з вилкою, мережеві запобіжники і мережевий вимикач.

На передній панелі розміщено:

- кнопка "МЕТАЛ-ВОЗДУХ" для встановлення режиму роботи установки;

- ручки "ЧАСТОТА ГРУБО" і "ЧАСТОТА ТОЧНО" – для встановлення частоти генератора (частоти збуджуваної хвилі);

- ручка "УРОВЕНЬ" – для встановлення необхідної амплітуди вихідної напруги генератора (рівень збудження);

- рідкокристалічний дисплей, на якому відображається поточний режим роботи ("METAL" або "AIR") та значення вимірної частоти в герцах.

### **Порядок виконання роботи**

1. Встановити в резонатор необхідний для виконання лабораторної роботи стрижень. Виставити за допомогою щупа і відповідних регуляторів на об'єкті дослідження проміжки між датчиком (приймачем) і Стрижнем близько 0,1 мм.
2. Підключити мережевий шнур вимірювального пристрою в мережу і ввімкнути установку вимикачем "СЕТЬ" на задній панелі вимірювального пристрою. На рідкокристалічному дисплеї вимірювального пристрою з'явиться вимірне значення частоти і поточний режим роботи (після ввімкнення живлення – "METAL"). Ввімкнути осцилограф згідно його експлуатаційній документації. Прогріти установку на протязі 5 хвилин.
3. Визначення швидкості розповсюдження поздовжніх звукових хвиль звукової частоти в повітрі.
  - 3.1. Натиснути кнопку "МЕТАЛ – ВОЗДУХ". На дисплеї повинен відобразитися поточний режим роботи "AIR".
  - 3.2. Ручками "ЧАСТОТА ГРУБО" і "ЧАСТОТА ТОЧНО" встановити необхідну частоту збудження гучномовця.

Значення частоти відображається на рідкокристалічному дисплеї вимірювального пристрою (значення частот повинні бути визначені в методиці проведення лабораторної роботи).

3.3. Регулюючи ручкою "УРОВЕНЬ" установки і ручками підсилення каналу (каналів) осцилографа, переконатися в тому, що амплітуда сигналів, які потрапляють на осцилограф з генератора і мікрофона, при русі мікрофона вздовж хвилеводу, достатня для проведення вимірювань згідно умов лабораторної роботи.

3.4. Переміщуючи мікрофон відносно гучномовця, починаючи з мінімальної відстані і вимірюючи різницю фаз сигналів (накладанням сигналів на осцилографі), знайти відстань при , , і т.д.

4. Визначення швидкості розповсюдження поздовжніх звукових хвиль звукової частоти в твердих тілах.

4.1. Натиснути кнопку "МЕТАЛ – ВОЗДУХ". На дисплеї повинен відобразитися поточний режим роботи "METAL". Ручку "УРОВЕНЬ" встановити в крайнє праве положення.

4.2. Плавно змінюючи ручками "ЧАСТОТА ГРУБО" і "ЧАСТОТА ТОЧНО" частоту збудження датчика і спостерігаючи по осцилографу за сигналом приймача, отримати різке збільшення амплітуди сигналу, що відповідає утворенню стоячої хвилі і резонансу. При цьому для отримання більш гострого резонансу можливе додаткове регулювання проміжку між стрижнем і датчиком (приймачем). Значення частоти відображається на рідкокристалічному дисплеї вимірювального пристрою.

Примітка: *Допускається спостереження інших резонансів значно менших амплітуд на більш низьких частотах, що не пов'язано з резонансом системи датчик – стрижень – приймач. Тому рекомендується не встановлювати підсилення осцилографа менше ніж 0,2 вольт/поділку.*

4.3. Повторити вищевказані дії, попередньо встановивши стрижень з іншого матеріалу і відрегулювавши проміжки.



5. Вимкнути живлення установки вимикачем "СЕТЬ" на задній панелі вимірювального пристрою. Вимкнути осцилограф, відповідно до його експлуатаційної документації.
6. За одержаними даними знайти довжину звукової хвилі і швидкості поширення звуку у повітрі та металі за формулами (8), (9) та (10), відповідно.
7. Оцінити похибку вимірювання цих величин.
8. Проаналізувати отримані результати.

#### **Контрольні запитання**

- 1) Які хвилі називають поздовжніми? В яких середовищах вони поширюються?
- 2) Які хвилі називаються поперечними? В яких середовищах вони поширюються?
- 3) Отримайте рівняння стоячої хвилі. Як вона утворюється?
- 4) Які характерні точки можна спостерігати в стоячій хвилі? Отримайте їхні координати.
- 5) Чим відрізняються стоячі хвилі від біжучих?
- 6) Яка залежність швидкості поширення звуку в газах від температури, молекулярної маси, тиску?
- 7) У чому полягає явище дисперсії звуку? Чи спостерігається воно у Ваших дослідах?
- 8) Що таке довжина хвилі? Як вона визначається у даній роботі?
- 9) Як визначається у даній роботі швидкість поширення звуку?
- 10) Які одиниці виміру швидкості поширення звуку?
- 11) Які методи вимірювання швидкості поширення звуку Ви знаєте?

#### **Список літератури**

1. Зисман Г.А., Тодес О.М.. Курс общей физики, – М., 1964. – Т.1.
2. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / Под ред. В.И.Ивероной. – М., 1967.

## Лабораторна робота № 10

### ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

**Мета роботи:** познайомитися з методом Стокса визначення коефіцієнта внутрішнього тертя (в'язкості) рідин; користуючись цим методом, визначити коефіцієнт внутрішнього тертя гліцерину.

**Обладнання:** скляна посудина з досліджуваною рідиною, металеві кульки, пінцет, масштабна лінійка, мікрометр, електричний секундомір.

#### Теоретичні відомості

При русі рідини або газу між їх шарами, які переміщуються з різними швидкостями, виникають сили внутрішнього тертя (в'язкості), що забезпечують прискорення повільних шарів і сповільнення швидких шарів. При цьому модуль сили внутрішнього тертя  $F$  між шарами прямо пропорційний модулю градієнта швидкості  $\frac{dv}{dz}$  і площі їх дотику  $S$ :

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

де  $\eta$  – коефіцієнт внутрішнього тертя (коефіцієнт внутрішньої динамічної в'язкості). Співвідношення (1) носить назву **закону Ньютона**.

Із закону Ньютона випливає фізичний зміст коефіцієнта в'язкості: коефіцієнт в'язкості чисельно дорівнює напруженню ( $F/S$ ), при якому градієнт швидкості дорівнює одиниці.

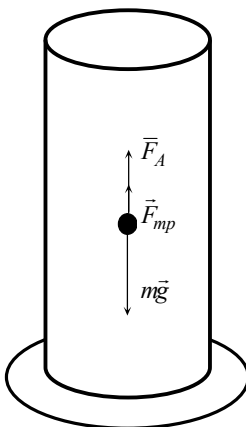
В'язкість рідини залежить від природи рідини (хімічного складу, наявності домішок) і зовнішніх умов (температури, тиску). Із ростом температури в'язкість рідин зменшується.

Існує декілька методів визначення в'язкості. Один з них – метод Стокса, оснований на вимірюванні швидкості падіння кульки у досліджуваній рідині.

На кульку радіусом  $r$ , яка падає у рідині з швидкістю  $v$ , діє сила тертя  $F_{mp}$ , величина якої визначається за формулою Стокса:

$$F_{mp} = 6\pi\eta rv. \quad (2)$$

Виведення цієї формули виходить за межі загального курсу фізики. Формула (2) справедлива, якщо кулька падає у безмежному середовищі.



**Рис.1. Прилад для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя.**

Окрім сили тертя, на падаючу в рідині кульку діють сила тяжіння і виштовхувальна сила (або сила Архімеда)  $F_a$ . Напрямок сил  $F_{mp}$ ,  $F_a$ ,  $P = mg$  показаний на рис. 1. Рівняння руху кульки в рідині може бути записане так:

$$m \frac{dv}{dt} = P - F_a - F_{mp}. \quad (3)$$

Якщо густина матеріалу кульки –  $\rho$ , а густина досліджуваної рідини –  $\rho_0$ , то можна записати

$$P = mg = V\rho g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g, \quad (4)$$

$$\text{а} \quad F_a = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g. \quad (5)$$

Підставивши співвідношення (2), (4) та (5) в (3), отримаємо рівняння руху кульки в такому вигляді:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho - \rho_0) g - 6\pi\eta r v. \quad (6)$$

Кулька, занурена в рідину, спочатку рухається з прискоренням, але з ростом швидкості зростає і сила тертя  $F_{mp}$ , яка діє на неї. Це зростання спостерігатиметься до тих пір, поки результуюча сила  $F_{pez}$ , що діє на кульку, не стане дорівнювати нулю. Починаючи з цього моменту, кулька падає з деякою постійною швидкістю  $v$ .

$$\text{Дійсно, при } F_{pez} = 0 \quad \frac{dv}{dt} = 0 \quad \text{і} \quad v = \text{const}.$$

Для цього випадку рівняння (6) можна привести до такого вигляду:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 (\rho - \rho_0) g - 6\pi\eta r v = 0, \quad (7)$$

звідки

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho_0}{v} g r^2. \quad (8)$$

Якщо кулька падає вдовж осі циліндричної посудини радіусом  $R$ , то необхідно внести поправку, яка б враховувала наявність стінок трубки. Біля стінок досліджувана рідина знаходиться в стані спокою, а граничний шар рідини біля кульки рухається разом з нею. Це приводить до збільшення градієнта швидкості і до зменшення швидкості руху кульки в рідині порівняно з випадком безмежного середовища.

Врахування таких обставин приводить до наступної розрахункової формули для коефіцієнта внутрішнього тертя:

$$\eta = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho - \rho_0}{v \left( 1 + 2,4 \frac{r}{R} \right)}. \quad (9)$$

### Методика виконання роботи

Прилад (рис.1) для визначення коефіцієнта в'язкості методом Стокса є широка циліндрична скляна посудина радіусом  $R$ , що закріплена на підставці з регулюючими гвинтами, та набір кульок різного діаметра. За допомогою гвинтів посудина встановлюється вертикально. На її бічній поверхні нанесені горизонтальні мітки (верхня і нижня). Мітки розміщені так, щоб при падінні кульки рух її на рівні верхньої мітки був рівномірним. Нижня мітка має знаходитись на такій відстані від дна посудини, на якій гальмівний вплив дна незначний. Оскільки в'язкість рідин у значній мірі залежить від температури, для більш точних вимірювань циліндр з досліджуваною рідиною розміщуються у посудину більших розмірів, заповнену водою чи іншою рідиною, температуру якої можна підтримувати постійною за допомогою термостата.

### Порядок виконання роботи

1. За допомогою мікрометра визначити діаметри 5-7 кульок. Для кожної кульки діаметр визначити не менше 5 разів і знайти його середнє значення.
2. Послідовно кульки опустити в досліджувану рідину і виміряти секундоміром час їхнього руху між мітками.
3. Виміряти відстань між мітками  $l$  і визначити швидкість руху кожної кульки за формулою  $v = \frac{l}{t}$
4. Виміряти радіус циліндричної посудини  $R$ .
5. За формулою (9) обчислити коефіцієнт внутрішнього тертя досліджуваної рідини  $\eta$ .
6. Досліди повторити 3 - 5 разів.
7. Розрахувати похибки вимірювань, проаналізувати одержані результати, зробити висновки.

### **Контрольні запитання**

- 1) Який фізичний зміст коефіцієнта динамічної в'язкості?
- 2) Які сили діють на кульку, що падає в рідині? Запишіть рівняння її руху.
- 3) Чому у процесі виконання роботи починають спостерігати за рухом кульки через деякий час після початку її руху?
- 4) Який характер руху кульки на початковому етапі?
- 5) Як залежить в'язкість рідини від температури?
- 6) Від чого залежить величина сили внутрішнього тертя? Що таке градієнт швидкості?

### **Список літератури**

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики.– М, 1964.– Т.1
2. Яворский Б.М. Курс физики.– Киев, 1970,– Т.1

## Лабораторна робота № 11

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ ПОВІТРЯ

**Мета роботи:** визначити коефіцієнт внутрішнього тертя молекул повітря при їхньому русі через капіляр.

**Обладнання:** установка ФПГ1-1н.

#### Теоретичні відомості

Сили тертя, які виникають при відносному переміщенні у середовищі різних тіл, називають силами зовнішнього тертя. **Внутрішнє тертя (в'язкість)** – це властивість рідини і газів чинити опір при переміщенні однієї частини рідини (газу) відносно іншої.

Виникнення сил внутрішнього тертя в газах можна досить наочно пояснити за допомогою такого прямого досліду. Нехай маємо два легких пустотілих циліндри з різними діаметрами основ. Менший із них закріпимо на осі, яка швидко обертається, а більший підвісимо на пружній нитці коаксіально з першим. Приведемо в обертання внутрішній циліндр. Через деякий час почне обертатися і зовнішній циліндр. Причина цього полягає в тому, що внутрішній циліндр приведе в рух шар повітря, який завдяки силам молекулярного зчеплення прилипає до нього. Цей шар захоплюватиме наступний, нерухомий, і т.д., що приведе до обертання зовнішнього циліндра разом із шаром газу, який безпосередньо до нього прилягає. Коли суміжні шари газу переміщуються один відносно одного, то молекули в процесі хаотичного теплового руху неперервно проникають із одного шару в інший. Відбувається обмін кількістю руху між молекулами шарів. У результаті цього більш повільні шари прискорюються, а більш швидкі – сповільнюються.

Ньютон уперше (1687 р.) припустив, що сила внутрішнього тертя між двома шарами рідини (газу) прямо пропорційна різниці швидкостей шарів  $\Delta v$ , площі їх дотику і обернено пропорційна віддалі між шарами :

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

де  $\eta$  – коефіцієнт, який носить назву коефіцієнта внутрішнього тертя (в'язкості).

Для двох нескінченно близьких шарів

$$F_B = \eta S \frac{dv}{dx}, \quad (2)$$

Величина  $\frac{dv}{dx}$  носить назву градієнта швидкості і характеризує швидкість зміни величини  $v$  у напрямку нормалі до поверхні шарів, між якими відбувається тертя.

Поклавши у формулі (2)  $S=1 \text{ м}^2$ ,  $\frac{dv}{dx}=1 \text{ (м/с)/м}$ , одержимо

$F = \eta$ , тобто коефіцієнт в'язкості чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя (у ньютонах), яка діє на  $1 \text{ м}^2$  площі дотичних між собою паралельних шарів, що рухаються, при градієнті швидкості  $1 \text{ с}^{-1}$ .

В'язкість газів збільшується зі збільшенням температури в силу того, що з підвищенням температури збільшується рухливість молекул, а значить збільшується обмін кількістю руху молекул між шарами газу.

### Методика виконання роботи

Коефіцієнт внутрішнього тертя  $\eta$  входить до співвідношень, які описують ламінарний рух рідини або газу по трубах. Зокрема  $\eta$  входить у **формулу Пуазейля**

$$V = \frac{1}{8} \frac{\pi r^4 \Delta P t}{\eta l}, \quad (3)$$

де  $V$  – об'єм рідини або газу, який витікає;  $r$  – радіус трубки, по якій, тече рідина або газ;  $l$  – довжина трубки;  $\Delta P$  – різниця тисків на кінцях трубки;  $t$  – час витікання рідини.

Для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя повітря скористаємося формулою Пуазейля

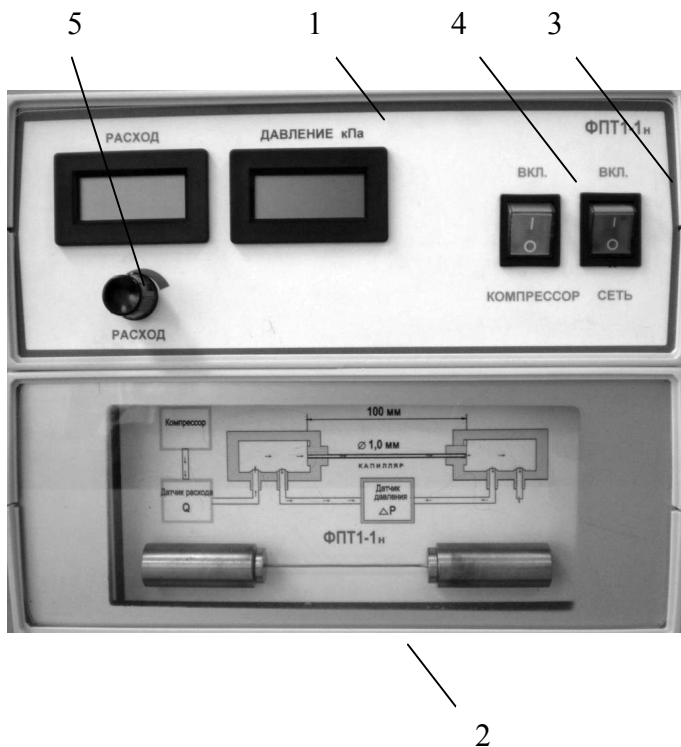
$$\eta = \frac{1}{8} \frac{\pi r^4 \Delta P}{Ql}, \quad (4)$$



де  $Q = \frac{V}{t}$  – значення витрати рідини.

Установка ФПТ1-1н для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя повітря (рис.1) представляє собою конструкцію настільного типу, яка складається з двох з'єднаних корпусів:

- 1) блоку приладу БП-1;
- 2) блоку робочого елемента РЭ-1.



**Рис.1 Установка ФПТ1-1н**  
1 – блок БП-1,  
2 – блок РЭ-1,  
3 – перемикач "СЕТЬ",  
4 – перемикач "КОМПРЕССОР",  
5 – регулятор витрат повітря "РАСХОД"

На лицевій панелі блоку приладу БП-1 знаходяться органи керування і регулювання, а також цифрові прилади для вимірювання тиску і витрат.

До складу блоку РЭ-1 входить робочий елемент, який представляє собою металічний капіляр, закріплений між відбірними камерами. Через капіляр прокачується повітря із мікрокомпресора, який встановлений в блоці приладу. Витрати повітря вимірюються датчиком витрат. Вихідна напруга датчика, пропорційна витратам вимірюється цифровим вольтметром. Оскільки характеристика датчика “витрати-напруга” нелінійна, реальне значення витрат  $Q$  визначається по градуйованій таблиці 1.

Перепад тиску в капілярі вимірюється спеціальним датчиком тиску диференціального типу. Вихідна напруга датчика, пропорційна падінню тиску на капілярі, вимірюється цифровим вольтметром. Характеристика датчика тиску лінійна і детектор тиску проградуйований в кПа.

Регулювання витрат повітря через робочий елемент здійснюється шляхом зміни напруги, що живить мікрокомпресор. Регулятор “РАСХОД” знаходиться на передній панелі блоку приладу.

### **Порядок виконання роботи**

1. Подати на установку живлення, ввімкнувши в модулі приладу перемикач “СЕТЬ”. При цьому в модулі робочого елемента запалюється постійна підсвітка відсіку (зелене свічення), яка вказує на подачу живлення.
2. Ввімкнути в модулі приладу перемикач “КОМПРЕССОР”. При цьому відсік в модулі робочого елемента підсвічується мигаючим червоним світлом, яке вказує на те, що мікропроцесор почав прокачування капіляра з мінімально можливими витратами повітря.
3. Плавню обертаючи регулятор витрат повітря “РАСХОД” в приладовому модулі встановити витрати у відповідності із завданням по шкалі витратоміра на блоці приладу.
4. Зняти відповідні покази з детектора тиску.
5. За результатами вимірювань обчислити коефіцієнт в’язкості повітря при декількох значеннях витрат повітря за формулою (4).
6. Дослід повторити 5 разів.

Таблиця 1.

Таблиця переводу показів приладу “Расход Q” у витрати в Л/хв

№	Покази приладу “Расход Q”, В	Витрати Л/хв.	№	Покази приладу “Расход Q”, В	Витрати Л/хв
1	1.00	0.00	19	4.06	0.450
2	1.39	0.025	20	4.17	0.475
3	1.71	0.050	21	4.25	0.500
4	2.01	0.075	22	4.31	0.525
5	2.29	0.100	23	4.35	0.550
6	2.54	0.125	24	4.39	0.575
7	2.69	0.150	25	4.43	0.600
8	2.85	0.175	26	4.48	0.625
9	2.99	0.200	27	4.53	0.650
10	3.11	0.225	28	4.58	0.675
11	3.21	0.250	29	4.63	0.700
12	3.33	0.275	30	4.70	0.750
13	3.47	0.300	31	4.75	0.800
14	3.56	0.325	32	4.79	0.850
15	3.65	0.350	33	4.86	0.900
16	3.75	0.375	34	4.90	0.950
17	3.89	0.400	35	5.00	1.00
18	3.98	0.425			

### Контрольні запитання

- 1) Яка природа внутрішнього тертя у газах?
- 2) Як залежить коефіцієнт внутрішнього тертя газів від тиску і температури?
- 3) Як можна виміряти внутрішнє тертя?

### Список літератури

1. Чулановская М.В. Курс физики для биологов. - Л., 1972.- Ч. 1.
2. Загальна фізика. Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- К., 1992.

## Лабораторна робота № 12

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН МЕТОДОМ КРАПЛІН

**Мета роботи:** визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідини методом краплін.

**Обладнання:** бюретка з рідиною, мікроскоп “МИР-1м”, терези, хімічні склянки.

#### Теоретичні відомості

Поверхня рідини, що межує з її власною парою, перебуває в особливих умовах порівняно з усією іншою масою рідини.

Молекули граничного шару рідини, на відміну від молекул на її глибині, оточені молекулами цієї самої рідини не з усіх боків. Частина "сусідів" поверхневих молекул – це частинки іншого середовища, з яким рідина межує. Тому сили, що діють на кожен молекулу в цьому шарі, будуть незрівноважені: є якась рівнодіюча сила, спрямована або в бік об'єму рідини, або в бік середовища, що межує з нею. Внаслідок цього переміщення молекул з поверхневого шару вглиб рідини, або середовища, з яким вона межує, супроводжується виконанням роботи. Величина і знак цієї роботи залежить від співвідношення між силами взаємодії молекул поверхневого шару зі “своїми” молекулами і з молекулами іншого середовища.

Коли рідина межує зі своєю власною парою, сила, якої зазнають молекули, поверхневого шару, спрямована всередину рідини.

Отже, перемішуючись з поверхневого шару всередину рідини, молекула виконує позитивну роботу. Навпаки, перехід молекул з об'єму рідини до поверхневого шару супроводжується негативною роботою, тобто потребує затрати зовнішньої роботи. Таким чином, молекули у поверхневому шарі рідини мають певну потенціальну енергію.

Щоб збільшити площу поверхні рідини, необхідно вивести на поверхню додаткову кількість молекул. Відповідно зростає потенціальна енергія поверхневого шару. Для цього треба витратити зовнішню роботу.

Якщо при сталій температурі змінити поверхню рідини на нескінченно малу величину  $dS$ , то необхідна для цього робота дорівнює:

$$dA = -\alpha ds, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поверхневого натягу рідини. Коефіцієнт  $\alpha$  є основною величиною, що характеризує властивості поверхні рідини.

Знак мінус вказує на те, що збільшення поверхні ( $dS > 0$ ) потребує витрати зовнішньої роботи (негативна робота).

Отже, коефіцієнт поверхневого натягу вимірюється роботою, необхідною для збільшення поверхні рідини при сталій температурі на  $1 \text{ м}^2$ .

У системі СІ  $\alpha$  має розмірність Дж/м<sup>2</sup>. Як було вже зазначено, зміна поверхні викликає зміну потенціальної енергії  $U_s$  молекул поверхневого шару, тобто

$$dU_s = \alpha ds. \quad (2)$$

але згідно з (1) зміна потенціальної енергії супроводжується роботою

$$-dU_s = dA. \quad (3)$$

Оскільки поверхня  $S$  змінюється при сталій температурі (ізотермічно), то необхідна для цього робота дорівнює зміні вільної енергії поверхні:

$$dA = -dF. \quad (4)$$

Отже, надмірна потенціальна енергія  $-dU_s$  є вільною енергією поверхні, а коефіцієнт поверхневого натягу рідини можна визначити як вільну енергію одиниці площі цієї поверхні:

$$\alpha = \frac{F}{S}. \quad (5)$$

Таким чином, поверхня рідини має надмірну, порівняно з рештою маси, потенціальну (вільну) енергію.

### Методика виконання роботи

Відомо, що будь-яка система, що знаходиться в рівновазі, перебуває в тому з можливих для неї станів, в якому її енергія має мінімальне значення.

Стосовно випадку, який ми розглядаємо, це означає, що

рідина в рівновазі повинна мати мінімальну з можливих поверхню. Тобто це означає, що повинні існувати сили, які перешкоджатимуть збільшенню поверхні рідини, тобто намагатимуться зменшити цю поверхню. Ці сили спрямовані вздовж самої поверхні, по дотичній до неї, так, ніби по дотичній до її поверхні зменшують (стягують) цю поверхню. Ці сили називають силами поверхневого натягу. Під дією сил поверхневого натягу рідина завжди скорочує свою поверхню. Краплина рідини приймає сферичну форму, навіть коли немає штучної компенсації сили ваги. При виході із трубки розмір краплин поступово зростає, але відривається вона тільки тоді, коли досягає цілком певного розміру. Це відбувається тому, що доки краплина не досить велика, сили поверхневого натягу достатні для того, щоб протистояти силі ваги і запобігти відриву. Відрив же відбувається тоді, коли вага краплини зрівноважить силу поверхневого натягу.

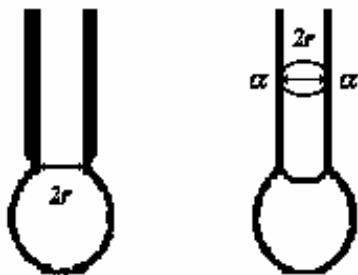


Рис.1. Схема утворення шийки краплини

Зрозуміло, що зі спостережень по відриву краплин можна визначити числове значення коефіцієнта поверхневого натягу. Перед відривом утворюється шийка, радіус якої трохи менший від радіуса трубки.

Уздовж цієї шийки і діє сила поверхневого натягу, яка в момент відриву повинна дорівнювати вазі краплини:

$$P = mg = 2\pi r\alpha, \quad (6)$$

де  $r$  – радіус шийки у момент відривання.  
Звідси

$$\alpha = \frac{mg}{2\pi r}. \quad (7)$$

## Порядок виконання роботи

1. Наповнити бюретку рідиною.
2. Визначити масу сухої кювети ( $m_0$ ).
3. Відкрити кран так, щоб краплі поволі відривалися від трубки.
4. Відрахувати 100 краплин у суху кювету.
5. Визначити масу кювети з рідиною ( $m_p$ ).
6. Визначити масу однієї краплини ( $m$ ).
7. Виміряти за допомогою мікроскопа радіус шийки краплини. Для цього необхідно одержати чітке зображення шийки і підрахувати кількість маленьких поділок, що вкладаються у зображення. Ціна поділки залежить від довжини тубуса (див. табл.1). Радіус шийки краплі виміряти 7 разів, змінюючи ціну поділки (довжину тубуса).
8. За формулою (7) обчислити  $\alpha$ .
9. Дослід повторити 3-5 разів, знайти середнє значення  $\alpha$ .
10. Результати вимірів занести до табл.2, оцінити точність вимірювання.

Таблиця 1

Довжина тубуса, мм	Ціна поділки, мм
130	0,058
140	0,053
150	0,049
160	0,045
170	0,041
180	0,038
190	0,036

Таблиця 2

№	Маса кювети, $m_0$ , кг	Маса кювети з рідиною, $m_p$ , кг	Маса однієї краплини, $m$ , кг	Радіус шийки, $r$ , м	Коефіцієнт поверх. натягу $\alpha$ , $\frac{H}{m}$	$\alpha_{сер.}$ , $\frac{H}{m}$
1.						
2.						
...						

### Контрольні запитання

1. Яка існує залежність між величиною поверхневого натягу і температурою? Дати пояснення.
2. Коли величина поверхневого натягу рідин дорівнюватиме нулю?
3. В якому напрямку діє сила поверхневого натягу?
4. Однаковими чи різними будуть радіуси краплин різних рідин (різна густина), які витікають з однакових трубок?

### Список літератури

1. Чулановская М.В. Курс физики для биологов. - Л., 1972, - Ч.1.
2. Физический практикум / Под ред. В.И.Ивероновой, - М., 1967.
3. Ремизов А.Н. Курс физики, электроники и кибернетики для медицинских институтов. - М., 1982.



## Лабораторна робота № 13

### ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ РЕЧОВИНИ

**Мета роботи:** ознайомитися з критичним станом речовини і визначити критичну температуру ефіру.

**Обладнання:** прилад Авенаріуса, мультиметр з термопарою.

#### Теоретичні відомості

**Критичний стан речовини** у випадку чистої (однокомпонентної) речовини – це термодинамічний стан двофазної системи, при якому співіснуючі зрівноважені фази стають тотожними за всіма своїми властивостями. Такий стан, наприклад, буде в чистой воді при тиску  $2,2 \cdot 10^7$  Па і температурі 651 К, коли рідина і парова фаза матимуть однакову густину, в'язкість, стисливість. На діаграмі станів  $P-T$  – це кінцева точка рідинного стану речовини з боку високих температур (рис.1).

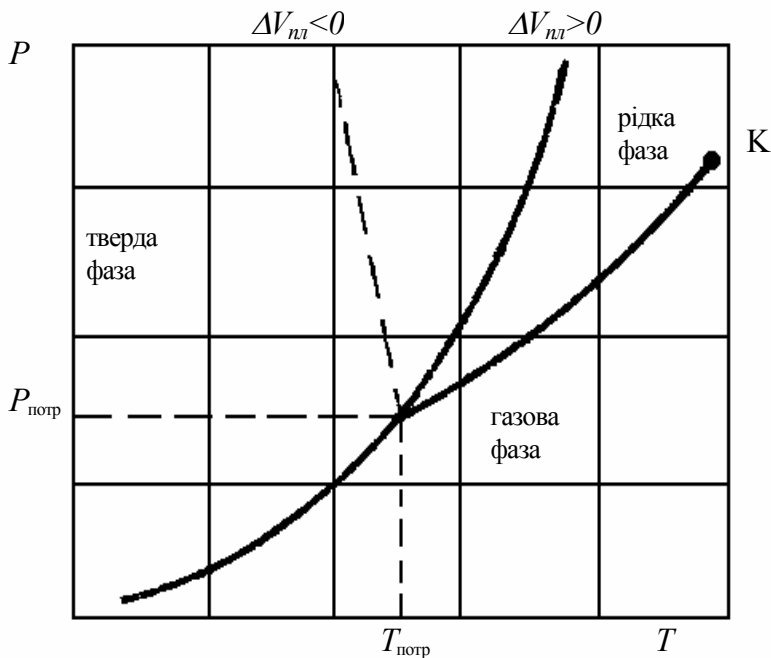


Рис.1. Діаграма стану однокомпонентної системи в координатах  $P, T$

Експериментальні ізотерми речовини (ізотерми Ван дер Ваальса) мають горизонтальну ділянку кривої, паралельну осі об'ємів (рис.2)

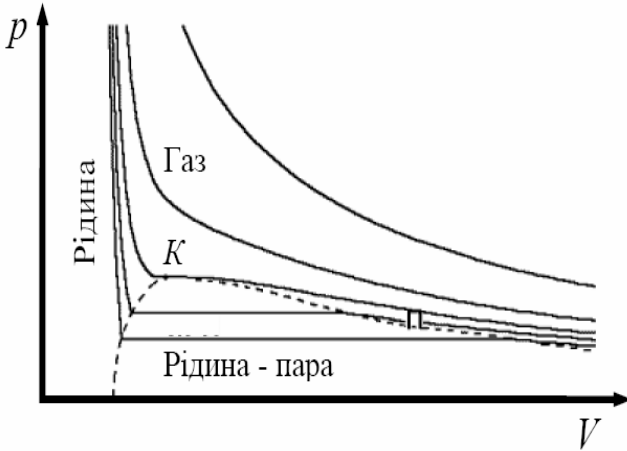


Рис 2. Ізотерми реального газу

Ця горизонтальна ділянка відповідає конденсації газу в рідину. Це такий стан, у якому частина об'єму занята рідиною, а інша частина – паром, яка знаходиться в термодинамічній рівновазі з рідиною. Це зумовлено тим, що питомий об'єм рідини стає рівним питомому об'єму пари. Вирівнюються при цьому і густина пари і густина рідини. Така пара називається **насиченою**. Тиск насиченої пари залежить тільки від температури і не залежить від об'єму. Різке підвищення тиску при подальшому зменшенні об'єму пов'язане уже з стисканням рідини.

Видно, що довжина горизонтальної ділянки ізотерми, тобто інтервал значень об'єму, в якому рідина і пара можуть знаходитися в рівновазі, зменшується із збільшенням температури, і при певній температурі стає рівною нулю. Тут ізотерма має точку перегину. При цьому похідні від тиску за об'ємом дорівнюють нулю:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{T_k} = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_{T_k} = 0. \quad (1)$$

Ця ізотерма називається **критичною**, а температура, якій вона відповідає є **критичною температурою**. Об'єм і тиск точки перегину називають критичним об'ємом і критичним тиском. Стан речовини при критичних температурі, об'ємі і тиску називається **критичним станом речовини**. У кожної чистої речовини існує однозначний набір критичних параметрів.

З рівнянь (1) та рівняння стану (наприклад, рівняння Ван дер Ваальса) можна розрахувати критичні параметри речовини.

Рівняння стану реального газу було отримано Ван дер Ваальсом шляхом уведення в рівняння стану ідеального газу (Менделєєва-Клапейрона:  $PV = \frac{m}{M}RT$ ) поправок, які враховують «неідеальність» реального газу.

Модель ідеального газу припускає, що молекули не мають власного об'єму і сили притягання між ними відсутні. Внаслідок притягання між молекулами газ стискується немов більшим тиском, ніж тиск  $P$ , з яким газ тисне на стінки посудини, в якій він знаходиться. Внаслідок того факту, що молекули мають кінцевий об'єм, простір, доступний для руху молекул, виявляється меншим за об'єм посудини.

Рівняння Ван де Ваальса для одного моля має вигляд

$$\left( P + \frac{a}{V_0^2} \right) (V_0 - b) = RT, \quad (2)$$

де  $V_0$  – об'єм одного моля газу.

Сталі Ван де Ваальса  $a$  і  $b$  для різних газів визначаються експериментально.

Для довільної маси  $m$  газу рівняння Ван дер Ваальса записують так

$$\left( P + \frac{m^2 a}{M^2 V^2} \right) \left( V - \frac{m}{M} b \right) = \frac{m}{M} RT, \quad (3)$$

де  $V$  – об'єм газу,  $M$  – молярна маса газу.

Рівняння Ван дер Ваальса є наближеним та кількісно описує властивості реальних газів лише в області високих температур та

низьких тисків. Але воно дає змогу якісно описати поведінку газу при високому тиску, конденсацію газу в рідину та критичний стан речовини

Співвідношення між сталими Ван дер Ваальса  $a$ ,  $b$  і параметрами критичного стану  $T_k, P_k, V_{0k}$  – відповідно критичні температура, тиск та об'єм 1 моля газу мають вигляд

$$T_k = \frac{8a}{27bR}, \quad (3)$$

$$P_k = \frac{a}{27b^2}, \quad (4)$$

$$V_{0k} = 3b, \quad (5)$$

звідки 
$$\frac{P_k V_{0k}}{T_k} = \frac{3R}{8}. \quad (6)$$

При температурі, більшій за критичну, неможливо розділити речовину на рідку і газоподібну фази, тобто не можна перевести газ у рідкий стан ні при жодному тиску.

При критичній температурі зникає будь-яка різниця між рідиною та її насиченою парою, а тому при критичній температурі прихована теплота пароутворення і поверхнева енергія на межі рідини з її насиченою парою стає рівною нулю. Сама межа, яка розділяла до критичної температури рідину та її насичену пару, при досягненні критичного стану зникає, що є однією з основних ознак встановлення критичного стану.

В останній час поняття критичного стану речовини було уточнено, а саме: температура критичного стану може в дійсності не зовсім збігатися з температурою зникнення видимої межі (меніска) між рідиною та її парою, але може виявитися вищою. Потрібно припустити, що поблизу критичного стану, після зникнення меніска, але раніше ніж наступить тотожність рідини та її пари, повинна виникнути своєрідна дисперсійна суміш рідини і газу. В об'ємі ампули утворюються і знову розпадаються місцеві центри згущення. Завдяки цьому речовина поблизу критичної температури дає помутніння, відоме під назвою опалесценції.

Таким чином, температуру критичного стану можна

фіксувати за зникненням меніска і за явищем опалесценції.

### **Методика виконання роботи**

Для візуального спостереження критичного стану рідини і визначення її критичної температури можна скористатися приладом Авенаріуса.

Прилад Авенаріуса представляє собою скляну запаяну ампулу з етиловим ефіром, розміщену в металевій коробці із скляними вікнами, через які і проводяться спостереження. Ця металева коробка в свою чергу поміщена в металевий кожух, вікна якого закриті прозорими пластинками із скла, що не б'ється. У коробку, де знаходиться ампула з ефіром, вводиться термopар, кінці якої приєднані до мультиметра, ввімкненого в режимі вимірювання температури. При нагріванні ампули з ефіром, а значить і термopари (спай повинен знаходитись під ампулою), в ній виникає терморушійна сила, величина якої пропорційна різниці температури нагрітого і холодного спаїв термopари.

### **Порядок виконання роботи**

1. Увімкнути лампу, розміщену за захисним кожухом. Коробку з ампулою встановити так, щоб її було добре видно через обидва заклені вікна. Необхідно прослідкувати за тим, щоб спай термopари знаходився точно під ампулою.
2. Увімкнути нагрівальний прилад в електромережу 220 В і водночас слідкувати за станом меніска і за показами мультиметра. При критичному стані спостерігається швидке підймання меніска і його розмивання, зміщення потоків речовини вгору і вниз, а також явище опалесценції (різке потемніння речовини в ампулі, немов би там з'являються струмені диму).
3. Як тільки температура досягне критичної, вимкнути нагрівальний прилад, тому що при температурі вище критичної в ампулі різко зростає тиск, піднімаючись до 35 атмосфер, і ампула з ефіром може вибухнути. Температура в коробці, де знаходиться ампула, після того, як нагрівач вимкнено, ще підвищуватиметься внаслідок інерції нагрівача, а потім почне знижуватись, і встановлення критичного стану можна спостерігати також при зниженні температури

(поява опалесценції, поширення струменів і поява меніска).  
Записати температуру.

4. Дослід повторити 4-6 разів і одержані дані занести до таблиці.
5. Визначити похибки вимірювання.
6. За формулою (3) обчислити критичну температуру для ефіру та порівняти з виміряною. (сталі Ван дер Ваальса для ефіру:  $a = 1,75 \text{ (Н}\cdot\text{м}^4)/\text{моль}^2$ ;  $b = 1,34 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{моль}$ ).

### **Контрольні запитання**

- 1) Що таке критичний стан речовини та критична температура?
- 2) Назвіть методи вимірювання критичної температури, у тому числі і для непрозорих рідин.
- 3) Як пов'язані критичні параметри речовини зі сталими рівняннями Ван дер Ваальса?

### **Список літератури**

1. Чулановская М.В. Курс физики для биологов. - Л., 1973.
2. Физический практикум. Механика й молекулярная физика / Под ред. В.И.Ивероновой. - М., 1967.

## Лабораторна робота № 14

### ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ ПРИ ПОСТІЙНОМУ ТИСКУ І ПОСТІЙНОМУ ОБ'ЄМІ

**Мета роботи:** визначити відношення теплоємностей при постійному тиску і при постійному об'ємі ( $\gamma = C_p / C_V$ ) для повітря.

**Обладнання:** установка ФПТ1-6н.

#### Теоретичні відомості

Під теплоємністю речовини розуміють кількість теплоти, необхідної для зміни її температури на один градус. Розрізняють питому і молярну теплоємність. Питома теплоємність ( $c$ ) – кількість теплоти, необхідна для зміни температури на один градус одиниці маси речовини, а молярна ( $C$ ) – одного моля речовини.

Очевидно, що  $C = \mu c$ , де  $\mu$  – молярна маса даної речовини.

Теплоємність газів залежить від умов, при яких проходить зміна їхньої внутрішньої енергії. Остання може проходити при постійному об'ємі ( $V=const$ ), або при постійному тиску ( $P=const$ ).

Розглянемо зміну внутрішньої енергії одного моля газу (шляхом його нагрівання) при сталому об'ємі. Молярна теплоємність газу при  $V=const$  ( $C_V$ ) у даному випадку дорівнюватиме зміні його внутрішньої енергії при нагріванні на один градус.

Оскільки внутрішня енергія ( $U_0$ ) може бути обчислена як

$$U_0 = \left(\frac{i}{2}\right)RT, \quad (1)$$

де  $i$  – число степенів вільності молекул даного газу;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – температура газу в Кельвінах, тоді

$$C_V = \left(\frac{i}{2}\right)R. \quad (2)$$

При  $P=const$  теплота, яка підводиться до моля газу, витрачається не тільки на збільшення його внутрішньої енергії, але і на виконання роботи. Для прикладу розглянемо нагрівання на один градус одного моля газу, який знаходиться під поршнем вагою

$P' = mg$  з площею основи  $S$ . При нагріванні поршень підніметься на деяку висоту  $h$ . В даному випадку виконуватиметься робота ( $A$ ) для піднімання поршня на цю висоту.

Отже, теплоємність газу при сталому тиску ( $C_p$ ) буде більша за теплоємність газу при сталому об'ємі ( $C_V$ ) на величину  $A$ :

$$C_p = C_V + A. \quad (3)$$

Робота може бути обчислена, як

$$A = mgh = PSh = P\Delta V, \quad (4)$$

де  $\Delta V = Sh$  – збільшення об'єму газу.

Якщо газ до нагрівання займав об'єм  $V_0$ , який згідно з рівнянням стану можна обчислити, як  $V_0 = RT/P$ , а після нагрівання на один градус:  $V = R(T+1)/P$ , то

$$\Delta V = V - V_0 = R(T+1)/P - RT/P = R/P. \quad (5)$$

Тоді (4), з урахуванням (5), набуде вигляду  $A = R$ . Отже,

$$C_p = C_V + R, \quad (6)$$

або, використовуючи (2),

$$C_p = \left(\frac{i}{2}\right)R + R = (i+2)R/2. \quad (7)$$

Тоді  $\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{(i+2)R/2}{iR/2} = \frac{i+2}{i}$  залежить лише від числа ступенів

вільності молекул, з яких складається газ.

При  $i=3$   $\gamma=1,67$

$i=5$   $\gamma=1,40$

$i=6$   $\gamma=1,33$

Відношення теплоємності при сталому тиску до теплоємності при сталому об'ємі  $\gamma$  відіграє в термодинаміці значну роль при адіабатичних (і близьких до них) процесах.

Зокрема, воно входить до рівняння Пуассона:



$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma; \quad (8)$$

$$\left\{ T_2 / T_1 = (V_1 / V_2)^{\gamma-1}; T_2 / T_1 = (P_2 / P_1)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\},$$

яке описує зв'язок між двома із параметрів  $P$ ,  $V$  і  $T$  при адіабатичному переході газу із стану 1 ( $P_1, V_1, T_1$ ) у стан 2 ( $P_2, V_2, T_2$ ). Величина  $\gamma$  входить також у співвідношення, які описують швидкість поширення звуку в газах і рух газів по трубах із звуковими швидкостями.

### Методика виконання роботи

Відношення теплоємкостей при постійному тиску і постійному об'ємі  $\gamma = C_p / C_v$  можна визначити на основі досліду Клемана-Дезорма.

Скляний балон місткістю декілька літрів наповнюється газом при атмосферному тиску. За допомогою насосу в балон накачується невелика додаткова кількість того же газу, після чого кран  $K_1$  закривається. Через деякий час температура газу в балоні урівнюється з температурою оточуючого повітря. Після цього водяним манометром вимірюють тиск газу в балоні. Позначимо цей тиск через  $P_1$ , а температуру газу через  $T_1$ . Потім на короткий час відкривають кран  $K_2$ . При відкритому крані  $K_2$  частина газу вийде з балону, і його тиск зрівняється з атмосферним. При цьому газ, що залишився в балоні, адіабатично розшириться, виконуючи роботи проти сил тиску оточуючого повітря. Внаслідок цього температура газу в балоні знизиться до деякого значення  $T$ . Протягом цього короткоплинного процесу кран  $K_2$  залишається відкритим. Далі кран  $K_2$  швидко закривається, і газ повільно нагрівається, поки його температура не досягає значення  $T_0$  оточуючого повітря. Нехай тиск газу в цей момент часу дорівнює  $P_2$ . За вимірними тисками  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_0$  можна розрахувати відношення теплоємкостей  $\gamma = C_p / C_v$ .

Для цього виділимо уявно всередині балону довільну кількість газу, обмежену замкненою поверхнею. Ця поверхня (на рисунку зображена пунктиром) виконує роль оболонки, в яку поміщена певна кількість газу. В різних процесах газ, обмежений даною оболонкою, буде розширюватися та стискатися, виконуючи при

цьому роботу проти тиску оточуючого газу та обмінюючись з ним теплотою. Оскільки кінетична енергія макроскопічного руху порції газу в межах оболонки невелика, дані процеси можуть розглядатися як квазістатичні. В моменти відліку тиску параметри, що характеризують стан газу всередині оболонки, мають наступні значення:

$$1 \text{ стан: } P_1, T_0, V_1$$

$$2 \text{ стан: } P_0, T, V_2$$

$$3 \text{ стан: } P_2, T_0, V_2.$$

Різниця тисків  $P_1 - P_0$  та  $P_2 - P_1$  в сотні і тисячі разів менші, ніж атмосферний тиск  $P_0$ . тому для спрощення розрахунків дані різниці можна розглядати як нескінченно малі диференціали.

Це відноситься і до відповідної зміни об'єму виділеної порції газу. Перехід газу із стану 1 в стан 2 відбувається адіабатично, тому відповідні зміни тиску і об'єму зв'язані рівнянням адіабати:

$$\gamma PdV + VdP = 0.$$

Розглядаючи в даному рівнянні  $dV = V_2 - V_1$  та  $dP = P_0 - P_1$ , можна записати:

$$\gamma P(V_2 - V_1) + V(P_0 - P_1) = 0. \quad (9)$$

В станах 1 та 3 температури газів однакові, тому в цих станах добуток  $PV$  один і той же. Таким чином, відповідні зміни тиску і об'єму пов'язані співвідношенням  $PdV + VdP = 0$ , або

$$P(V_2 - V_1) + V(P_0 - P_1) = 0. \quad (10)$$

З даного співвідношення разом з попереднім отримуємо:

$$\gamma = \frac{P - P_0}{P_0 - P_1}. \quad (11)$$

В дану формулу входить відношення різниць тисків, а тому не є принциповим, в яких одиницях вимірювати зміну тиску. Простіше за все різниці тисків вимірювати в міліметрах водяного стовпа за допомогою манометру.

Отже,  $\gamma = C_p/C_v$  розраховуємо за формулою:

$$\gamma = \frac{P_1}{P_1 - P_2} \quad (12)$$

Величини  $P_1$  і  $P_2$  можна визначити наступним чином. Після накачування повітря в якийсь постійний об'єм через деякий час в ньому встановлюється тиск  $P_1$ . Після короткочасного контакту з атмосферою відбувається адіабатичне розширення повітря, температура його знижується, а потім, в результаті теплообміну підвищується до кімнатної (ізохоричний процес). Тиск при цьому змінюється до величини  $P_2$ .

Установка ФПТ1-6н (рис.1) являє собою конструкцію настільного типу, яка складається з двох модулів із ударостійкого полістиролу (типу Z39) жорстко з'єднаних між собою.

На лицевій панелі верхнього модуля розташований вимикач "СЕТЬ" для підключення мережі живлення, вимикач "КОМПРЕСОР" для подачі живлення на компресор, датчик тиску в посудині "ДАВЛЕНИЕ", вимірювач температури двоканальний "ТЕМПЕРАТУРА", який дозволяє вимірювати температуру навколишнього середовища і температуру всередині посудини.

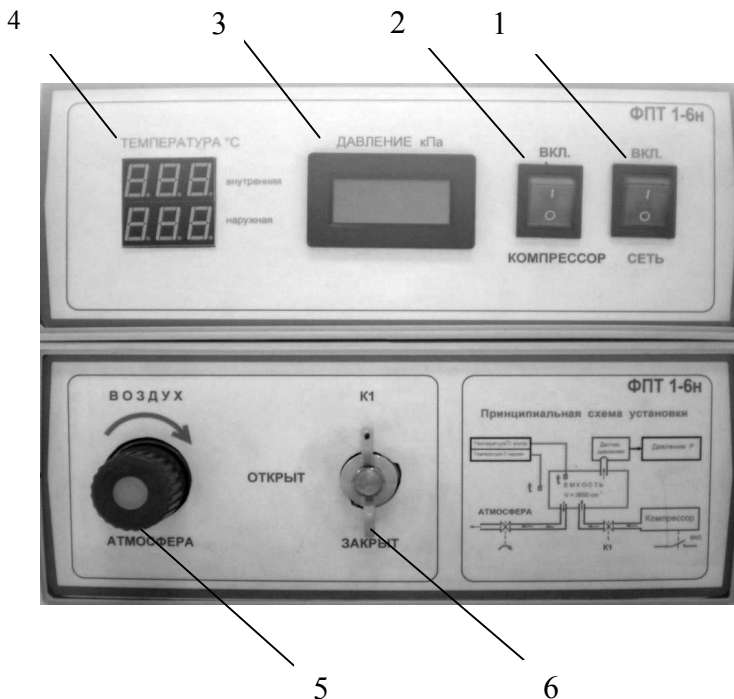
Всередині модуля встановленні мікрокомпресор для подачі повітря в робочу посудину і датчик тиску.

На лицевій панелі нижнього модуля розташований пневмоклапан "АТМОСФЕРА" для викиду повітря в атмосферу, вентиль "К1" для подачі і перекриття подачі повітря в посудину. Також на передній панелі зображена принципова схема установки. Всередині модуля знаходиться робоча посудина об'ємом 3500 см<sup>3</sup>.

### **Порядок виконання роботи**

1. Подати на установку живлення, ввімкнувши перемикач "СЕТЬ". При цьому перемикач підсвічений.
2. Ввімкнути подачу повітря в робочу посудину перемикачем "КОМПРЕССОР". При цьому можна почути шум працюючого компресора і підсвічується корпус перемикача. Відкрити кран "К1".

3. За датчиком тиску контролювати зростання тиску в робочій посудині. Після досягнення необхідного рівня робочого тиску закрити кран “К1” і вимкнути компресор.



**Рис.1 Установка ФПТ1-1н**

- 1 – переключач “СЕТЬ”,  
 2 – переключач “КОМПРЕССОР”,  
 3 – датчик тиску в посудині “ДАВЛЕНИЕ”,  
 4 – вимірювач температури двоканальний “ТЕМПЕРАТУРА”,  
 5 – пневмоклапан “АТМОСФЕРА”, 6 – вентиль “К1”

4. Після стабілізації тиску і температури в посудині зняти показання датчика тиску ( $P_1$ ).
5. На короткий час з’єднати посудину з атмосферою, повернувши пневмоклапан “АТМОСФЕРА” за годинниковою стрілкою до тріску.

6. Після стабілізації процесу зняти покази датчика тиску ( $P_2$ ).
7. Повторити експеримент п.3-6 кілька разів при різному початковому тиску повітря в посудині ( $P_1$ ).
8. За формулою (9) обчислити  $\gamma$ .
9. Результати обчислень занести до таблиці.

№	$P_1$	$P_2$	$\gamma$	$\bar{\gamma}$
1.				
2.				
...				

10. Визначити похибки методу.

### Контрольні запитання

- 1) Наведіть приклади ізотермічного, ізобарного, ізохорного та адіабатного процесів у газах. Як вони реалізуються?
- 2) Чому  $c_p > c_v$  ?
- 3) Чому посудина з'єднується з атмосферою на короткий час?

### Список літератури

1. Чулановская М.В. Курс фізики для біологів. – Л., 1973.– Ч.І.
2. Кікоїн І.К. Молекулярна фізика. – К., 1968.