**МІНІСТЕРСТВО УКРАЇНИ З ПИТАНЬ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ТА У СПРАВАХ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ
ВІД НАСЛІДКІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

ФІЗИКА

Практикум. Лабораторні роботи

Розділи:
МЕХАНІКА.
МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА.
ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

Харків 2010

УДК 53(075.4)
ББК 22.3
Б XX

Рецензенти: докт.фіз-мат. наук, професор О.В. Прокопов
докт.техн. наук, професор О.І. Стрелков

Борисенко В. Г.
ФІЗИКА. Практикум. Лабораторні роботи. Розділи: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електрика і магнетизм. – Х .: НУЦЗУ, 2010, 85с.

ISBN XXX-XXX-XXX-XXX-X

Фізичний практикумі містить матеріал для самостійної підготовки виконання лабораторних робіт з дисципліни „Фізика”. Він охоплює лабораторні роботи з розділів: „Механіка”, „Термодинаміка і статистична фізика”, „Електрика та магнетизм”. В практикумі поєднані лабораторні роботи з застосуванням сучасних комп’ютерних вимірювальних комплексів і роботи з використанням традиційної вимірювальної техніки.

Фізичний практикум призначений для слухачів початкових курсів вищих навчальних закладів.

УДК 53(075.4)
ББК 22.3

ISBN XXX-XXX-XXX-XXX-X

© В. Г. Борисенко
© НУЦЗУ, 2010

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА 4
ВСТУП. ФІЗИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА ЇХ РЕЗУЛЬТАТІВ 5
Основні типи вимірювань 5
Обчислення похибок при прямих вимірюваннях 5
Обчислення похибок при непрямих вимірюваннях 9
Промахи 10
Відносна похибка 10
Клас точності приладу 11
Округлення чисел при наближених обчисленнях 11
Побудова графіків 112
Особливості запису результатів вимірів та їх похибок 13
РОЗДІЛ І. МЕХАНІКА 14
Лабораторна робота 1 ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТІВ ІНЕРЦІЇ ТІЛ 14
Лабораторна робота 2 ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ ЗБЕРЕЖЕННЯ МОМЕНТУ ІМПУЛЬСУ 22
Лабораторна робота 3 ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ТІЛА ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА 30
РОЗДІЛ ІІ. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА 37
Лабораторна робота 4 ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА АДІАБАТИ ПОВІТРЯ 37
Лабораторна робота 5 ВИМІРЮВАННЯ В’ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА 44
Лабораторна робота 6 ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОВІТРЯ 52
РОЗДІЛ ІІІ. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ 59
Лабораторна робота 7 ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ 59
Лабораторна робота 8 ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖЕННЯ ТА РОЗРЯДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРА 66
Лабораторна робота 9 ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ 74
ДОДАТОК 82

ПЕРЕДМОВА

Лабораторний фізичний практикум відіграє важливу роль у процесі вивчення інженерно-технічних дисциплін і вирішує кілька завдань, а саме:

– дозволяє застосувати і закріпити теоретичні знання в процесі експериментального вивчення основних фізичних явищ;

– виробляє практичні навички роботи з вимірювальною апаратурою і приладами, методами їх використання для вимірювання основних фізичних величин, оцінювання їх абсолютних значень, достовірності та точності їх вимірювань;

– надає вміння статистичної обробки експериментальних результатів та уявлення їх у вигляді графіків, таблиць і діаграм.

Практикум має кілька особливостей. Оскільки в останній час зростає питома вага самостійної підготовки і фізична суть лабораторної роботи може не підкріплюватись лекційним матеріалом, зміст як теоретичної, так і експериментальної складової практикуму викладається якомога повніше для забезпечення найбільш ефективної самостійної роботи. Ядро кожної лабораторної роботи складається з п'яти обов'язкових частин: короткі теоретичні відомості; опис лабораторної роботи; завдання; порядок виконання роботи та контрольні питання. Це дозволяє в процесі самостійної підготовки до лабораторної роботи повністю оформити в зошиті для лабораторного практикуму ту частину роботи, яка передує вимірюванням, і підготуватись до її виконання та захисту.

Іншою особливістю практикуму є поєднання лабораторних робіт з використанням комп'ютерного програмного забезпечення і „класичних" лабораторних робіт без використання вимірювальної комп'ютерної техніки. У результаті виконавцями робіт не втрачається так звана кінестетична складова лабораторної роботи і набувається досвід роботи з сучасною вимірювальною технікою. В роботах використовуються комп'ютерні вимірювальні комплекси навчальних лабораторій „L-микро©" м. Москва та „ІТМ©" м. Харків.

Практикум містить лабораторні роботи до трьох розділів дисципліни „Фізика" – „Механіка", „Молекулярна фізика і термодинаміка" та „Електрика і магнетизм".

В обговоренні змісту лабораторних робіт і їх практичній реалізації активну участь брали завідувач кафедрою фізико-математичних дисциплін НУЦЗУ доцент В.К. Мунтян, професор В.І. Кривцова, канд. техн. наук О.В.Єфімова і К.Р. Умеренкова, доцент С. Є. Солдатенко, завідувачі лабораторіями Н.О. Степанова та Г. О. Тихонова, за що автор їм щиро вдячний. Окрема подяка директору фірми „ІТМ©" Ю.В. Литвинову за безпосередню участь в обговоренні фізичного змісту робіт, організації їх налаштування та плідну і доброзичливу співпрацю.

Автор

ВСТУП. ФІЗИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА ЇХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Основні типи вимірювань

Під вимірюванням розуміють порівняння величини, що вимірюється, з іншою величиною, що прийнята за одиницю вимірювання

Усі вимірювання можна поділити на два типи: *прямі та непрямі*.

До *прямих вимірювань відносяться виміри фізичної величини, що полягають у порівнянні з еталоном, зокрема зі шкалою вимірювального приладу*. Наприклад, лінійка, секундомір, амперметр – це еталони виміру довжини, часу, сили струму; відповідно і виміри за їх допомогою є прямими вимірами.

Непрямими (посередніми) вимірюваннями називаються вимірювання, за яких шукана величина знаходиться на основі відомої залежності між нею і величинами, які знаходяться на основі прямих вимірювань.

Наприклад, якщо з допомогою прямих вимірів визначити масу m та об'єм V тіла, то визначення густини $\rho = m/V$ тіла – це непряме вимірювання.

Обчислення похибок при прямих вимірюваннях

На результати вимірів можуть впливати різні фактори. Цей вплив проявляється у вигляді похибок вимірювань. Наприклад, похибки можуть бути обумовлені недосконалістю методики вимірювань, тоді їх відносять до *методичних*; або недосконалістю самих приладів, тоді їх відносять до *інструментальних або похибок приладу*.

Всі похибки можуть бути поділені за їх характерними ознаками на три групи: *систематичні, випадкові та промахи*.

Систематичні похибки. *Систематичною похибкою* $\Delta x_{\text{сист}}$ *величини x називається похибка, яка в процесі вимірювань залишається сталою за величиною та знаком або змінюється за відомим законом при повторенні вимірів*.

Зокрема *методична систематична похибка* виникає, коли в процесі вимірів вибирають методику вимірювань, у якій враховуються основні фактори, що впливають на вимір, а не враховуються другорядні. Наприклад, якщо при вимірі опору не враховують опір з'єднувального дроту; при вимірюванні прискорення вільного падіння не враховують опір повітря і т.п.

Систематична похибка приладу, як правило, вказується в паспорті на прилад або на шкалі приладу позначається клас точності приладу. За відсутності цих даних систематичною похибкою приладу вважається половина найменшої поділки δx приладу, тобто $\Delta x_{\text{сист}} = \delta x / 2$. Наприклад, систематична поділка міліметрової лінійки – 0,5 мм.

Важлива риса стабільності систематичної похибки в процесі вимірювань дозволяє, в багатьох випадках, виключити її з результатів вимірювань введенням поправок.

Випадкові похибки. *Випадковою похибкою* $\Delta x_{\text{вип}}$ *величини x називається похибка, яка в процесі вимірювань змінюється як за величиною, так і за знаком.*

Випадкова похибка виникає в результаті сумісного впливу різних випадкових факторів і може бути зумовлена як випадковою зміною умов експерименту (наприклад, коливань стуму в джерелах напруги, вібрацій установки, тощо), так і недосконалістю органів чуття експериментатора (реакції, зору, тощо). Як правило, в конкретному досліді природа їх виникнення невідома (тому вони і мають назву випадкових) і якщо вимірювання проведено один раз, то про значення випадкової похибки нічого не відомо. Для її визначення необхідно зробити якомога більше вимірів, у результаті яких можливо виявлення статистичних закономірностей. Ці закономірності вивчає теорія імовірності, тому випадкові похибки визначаються за законами цієї теорії.

Поняття імовірності пояснимо на уявному досліді. Якщо підкидати монету і спостерігати, на який бік упаде монета, ми можемо одержати два результати: “орел” або “решка”. Для характеристики того, як часто ми будемо мати той чи інший результат (подію), будемо брати відношення числа подій “випав орел” (позначимо $n_{\text{о}}$) до загального числа випробовувань (подій) N і, відповідно, числа подій “випала решка” (позначимо $n_{\text{р}}$) до N. Це відношення для довільної i-ої події в серії з N випробовувань, тобто величина n_i/N називається *частотою* i-ої події.

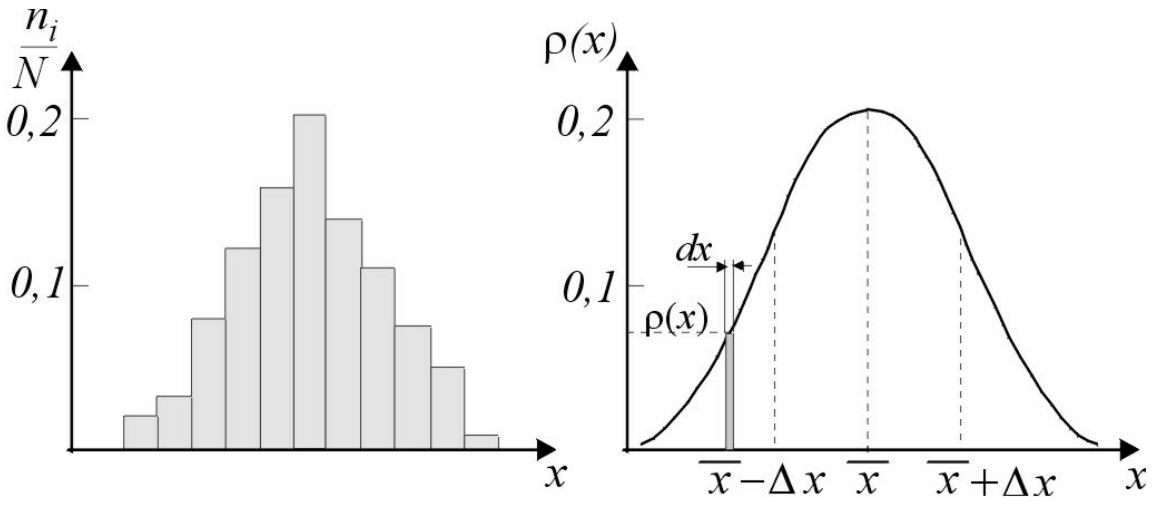
Тоді, якщо число випробовувань $N \to \infty$, то імовірністю P_i i-ої події буде називатись границя

$$\lim_{N\to\infty} \frac{n_i}{N} = P_i .$$

Так, очевидно, що у випадку з монетою імовірність випадання “орла” дорівнюватиме ½ , “решки” – також ½. Сума цих імовірностей дорівнює одиниці. Це означає, що достовірною є подія ”випадає або “орел” або “решка” (інших подій немає).

Ці поняття можна розповсюдити на вимірювання фізичних величин. Нехай, наприклад, у досліді з вимірювання довжини ℓ дротини ми одержали результати: в 20-ти вимірах із 100 вимірів (випробовувань) довжина дротини $\ell = 80$мм, в 16-ти $\ell = 79{,}95$мм, в 14-ти $\ell = 80{,}05$мм, в 13-ти $\ell = 79{,}90$мм, в 11-ти $\ell = 80{,}10$мм і т. п. Результати цих вимірів можна наглядно уявити, побудувавши діаграму (рис.1а), яка показує частоти відповідних результатів вимірів і має назву *гістограми*. На ній результату даного виміру x_i (в нашому прикладі конкретній довжині ℓ_i) буде відповідати стовпчик діаграми висотою, що відповідає частоті n_i/N (наприклад, для $\ell = 80$мм – 0,2;

$\ell = 79{,}95$мм – 0.16 і т.д.). Ширину стовпчика можна взяти рівною ціні найменшої поділки шкали приладу. Зрозуміло, що сума всіх частот буде дорівнювати одиниці.



а б

Рис.1 — Схематичний приклад зображення гістограми та розподілу Гауса

Якщо число випробовувань (вимірів) збільшувати до $N \to \infty$, а ширину стовпчика зменшувати, збільшивши чутливість приладу, то замість гістограми ми одержимо неперервну криву (рис. 1б). Аналогічно гістограмі, ця крива за змістом повинна відображати ту долю результатів із загального числа випробовувань (вимірів), які попадають у вибраний інтервал *dx* значень величини *x*. Очевидно, що чим більший інтервал *dx*, тим більша імовірність *dP* попадання даного виміру в цей інтервал, тобто $dP \square dx$. Щоб записати рівність, позначимо коефіцієнт пропорціональності $\rho(x)$, тоді $dP = \rho(x)dx$. За змістом $\rho(x) = dP/dx$ є *густина імовірності*, а добуток $\rho(x)dx$ є імовірність того, що окреме, випадково вибране значення виміру *x* опиниться в інтервалі *x, x+dx*. За геометричним змістом імовірність *dP* є площа шириною *dx* під кривою $\rho(x)$ – заштрихована ділянка на рис.1б. Тоді повна площа під кривою залежності $\rho(x)$ дорівнює

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x)dx = 1$$

Функція $\rho(x)$ називається *нормальним розподілом або розподілом Гауса,* який використовується для визначення випадкових похибок за методами теорії імовірності, на якій базується теорія похибок.

Базуючись на результатах розподілу Гауса, *за значення вимірюваної величини береться значення, що реалізується у вимірах з найбільшою імовірністю*. Воно відповідає *середньому арифметичному значенню* $\overline{x}$ (рис.1б), яке дорівнює

$$\overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_N}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N},$$

де x_i – результат *i*-го виміру, а N – число вимірів.

Абсолютною похибкою Δx_i *i-го виміру називається різниця між результатом i-го виміру і середнім значенням* $\overline{x}$ *вимірюваної величини*, тобто

$$\Delta x_i = x_i - \overline{x} \ .$$

Оскільки в експерименті проводиться не один, а декілька вимірів, то щоб оцінити середнє відхилення від $\overline{x}$ для серії вимірів логічно, за аналогією з попереднім, знайти середнє арифметичне абсолютних похибок всіх вимірів, тобто величину $\sum_i \Delta x_i / N$ і вважати її випадковою похибкою. Обчисливши цю величину, маємо

$$\frac{\sum_i \Delta x_i}{N} = \frac{\sum_i (x_i - \overline{x})}{N} = \frac{\sum_i x_i}{N} - \frac{\sum_i \overline{x}}{N} = \overline{x} - \overline{x} = 0 \, .$$

Цей результат ми одержали тому, що додатні і від'ємні значення Δx_i компенсують одне одного при $N \to \infty$ (наприклад, у процесі вимірів одержимо як $\Delta x_i = 0{,}1$, так і $\Delta x_i = -0{,}1$, $\Delta x_i = 0{,}2$ і $\Delta x_i = -0{,}2$ і т.п.) Отже, таке визначення випадкової похибки не може бути характеристикою відхилення $\Delta x_{\text{вип}}$ від $\overline{x}$ під впливом випадкових факторів. Тому, для оцінки цієї похибки, в сумі $\sum_i \Delta x_i$ додають або модулі абсолютних похибок $|\Delta x_i|$ або їх квадрати Δx_i^2. У теорії похибок доводиться, що найкраще враховує вплив випадкових факторів величина $\Delta x_{\text{вип}}$, що дорівнює

$$\Delta x_{\text{вип}} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{i}} \Delta x_{\text{i}}^2}{N(N-1)}} \, .$$

Величина $\Delta x_{\text{вип}}$ має назву *середньоквадратичної похибки* і вона зменшується при зміні числа вимірів пропорційно $1/\sqrt{N}$, тому її можна зменшувати до необхідного значення, збільшуючи число вимірів.

Якщо відомі систематична та випадкова похибки , то *повна похибка* вимірювань дорівнює

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сист}}^2 + \Delta x_{\text{вип}}^2} \, .$$

Наприклад, для випадку, коли систематична похибка обумовлена похибкою шкали приладу δx, маємо:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\delta x}{2}\right)^2 + \frac{\sum_i \Delta x_i^2}{N(N-1)}} \ .$$

Після обчислення повної похибки *результат вимірювання записується у вигляді*

$$x = \bar{x} \pm \Delta x.$$

Як показує теорія похибок, імовірність в даному вимірі попасти в інтервал $\left[\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x\right]$дорівнює 0,683 (тобто з тисячі вимірів 683 виміри попадуть в цей інтервал). При записі результату в вигляді $x = \bar{x} \pm 2\Delta x$, тобто при збільшенні інтервалу до $\left[\bar{x} - 2\Delta x, \bar{x} + 2\Delta x\right]$, імовірність довільному виміру попасти в нього складає 0,954.

Обчислення похибок при непрямих вимірюваннях

При непрямих вимірюваннях величина *f*, що визначається, знаходиться за результатами прямого вимірювання інших величин *x, y, z,* …, тобто є функцією цих величин

$$f = f(x, y, z, \ldots).$$

Щоб спростити наступні міркування, надалі будемо вважати, що величина *f* залежить від двох змінних *x* і *y*. Наприклад, для визначення площі *S* (непряме вимірювання величини *f*) прямокутного аркуша необхідно провести виміри його ширини *a* (відповідає *x*) та довжини *b* (відповідає *y*), тоді *S* = *ab* (*f*=*xy*). Очевидно, що найкраще значення для оцінки величини *f* є

$$\bar{f} = f(\bar{x}, \bar{y}).$$

Зокрема, для аркуша $\bar{S} = \bar{a}\,\bar{b}$. Але визначення величин *x* і *y* при прямих вимірах супроводжується похибками Δx, Δy, що приведе до похибки Δf непрямого вимірювання величини *f*.

Відмітимо, що оскільки $\Delta f = f - \bar{f}$, то найпростішою оцінкою для Δf є різниця

$$\Delta f = f(\bar{x} + \Delta x, \bar{y} + \Delta y) - f(\bar{x}, \bar{y}).$$

Для малих Δf , Δx, Δy можна приблизно записати

$$\Delta f \approx \frac{\partial f}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial f}{\partial y}\Delta y \ .$$

Це означає, що похибка непрямого вимірювання знаходиться через похибки прямих вимірювань за правилом диференціювання. Хоча такої оцінки в більшості випадків достатньо, похибки непрямого вимірювання визначаються за більш точним виразом

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2} \ .$$

Для прикладу визначимо похибку непрямого вимірювання площі за цим виразом. Враховуючи, що $\partial S / \partial a = b, \partial S / \partial b = a$, одержимо

$$\Delta S = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial a}\right)^2 (\Delta a)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial b}\right)^2 (\Delta b)^2} = \sqrt{b^2 (\Delta a)^2 + a^2 (\Delta b)^2} = ab\sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2} \ .$$

Оскільки найкраще значення для оцінки площі аркуша є $\bar{S} = \bar{a}\,\bar{b}$, то маємо

$$\Delta S = \bar{a}\bar{b}\sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2} = \bar{S}\sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2} \ .$$

Отже, абсолютна похибка непрямого вимірювання може бути виражена через відносні похибки прямих вимірювань, що і використовується при виконанні лабораторних робіт.

Промахи

Промахи – це грубі похибки, які є наслідком невмілого використання приладу, неправильних записів, використання несправного приладу, арифметичних похибок в обчисленнях, тощо. Такі похибки або виправляються при більш ретельних вимірах, або вилучаються з результатів вимірів.

Відносна похибка

Щоб порівняти точність виміру величин різної фізичної природи, використовується поняття відносної похибки. За визначенням *відносна похибка – це відношення абсолютної похибки* Δx *величини, що вимірюється, до її середнього значення* $\bar{x}$, *яке виражене в процентах*, тобто

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} 100\ \% .$$

Наприклад, якщо результати вимірів діаметра і довжини дроту мають вигляд

$$d = \bar{d} \pm \Delta d = (0{,}5 \pm 0{,}01)\,\text{мм} \;\text{ і }\; \ell = \bar{\ell} \pm \Delta\ell = (500 \pm 1)\,\text{мм},$$

то відносні похибки вимірів діаметра ε_d і довжини ε_ℓ дорівнюють відповідно $\varepsilon_d = \dfrac{\Delta d}{\bar{d}} 100\,\% = 2\%$ і $\varepsilon_\ell = \dfrac{\Delta\ell}{\bar{\ell}} 100\,\% = 0{,}2\,\%$, тобто вимірювання довжини проведено точніше.

Клас точності приладу

Клас точності приладу – це відношення абсолютної похибки Δx до граничного значення $x_{\text{гр}}$ величини, що вимірюється (тобто найбільшого її значення, яке може бути виміряне приладом). Це поняття в основному використовується для електровимірювальних приладів. Клас точності є по суті відносною похибкою і виражається також в процентах

$$E = \left| \frac{\Delta x}{x_{\text{гр}}} \right| 100\,\%.$$

За класом точності прилади поділяються на сім класів: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4. Прилади з класом точності 0,1; 0,2; 0,5 використовують для точних лабораторних вимірювань, прилади класу 1,0; 1,5; 2,5; 4 використовуються в техніці. Клас точності вказується на шкалі приладу. Встановивши за шкалою клас точності і граничне значення, легко обчислити абсолютну похибку $\Delta x = \pm\left(E/100\right)x_{\text{гр}}$, яка приймається однаковою для всієї шкали приладу.

Округлення чисел при наближених обчисленнях

Будь-яка фізична величина завжди вимірюється з обмеженою точністю. Тому точність обчислень повинна знаходитися у відповідності з точністю прямих вимірювань. У наближених обчисленнях всі цифри результату, починаючи з першої ліворуч, яка відрізняється від нуля, і до останньої, за вірність якої можна бути впевненим, мають назву значущих. Наприклад, у числі 0,0708 – три значущі цифри, у числі 6100 – чотири. Запис $6{,}1 \cdot 10^3$ означає, що значущих цифр тільки дві (шестірка та одиниця). Остаточні результати часто записуються у вигляді десяткового дробу, з цілими, що лежать в інтервалі 0 ÷ 9 включно, помноженого на необхідний степінь числа 10. Такий запис іноді називають стандартним виглядом числа. Наприклад, $7{,}08 \cdot 10^{-2}$; $6{,}100 \cdot 10^3$, тощо.

Заокруглення чисел досягається відкиданням незначущих цифр, якщо перша з них менша ніж 5. Якщо перша з цифр, які треба відкинути, більше або дорівнює 5, то остання цифра, яку залишають у записі числа, збільшується на одиницю.

При додаванні та відніманні результат заокруглень залишають у такому вигляді, щоб він не мав значущих цифр у розрядах, котрі відсутні принаймні у одному з доданків. Наприклад, 1,1728 + 2,38 = 3,55.

При множенні та діленні результат повинен мати стільки значущих цифр, скільки їх має множник з найменшим числом таких цифр. Наприклад, 20,3418·1,92 = 39,0563 = 39,1. Наведене вище правило відноситься і до піднесення у степінь, і до добування кореня.

При обчисленні проміжних результатів доцільно залишати на одну цифру більше, ніж це вимагають наведені правила.

Побудова графіків

Зведені у таблицю виміряні величини спочатку записуються у стандартному вигляді чисел.

Масштаб на осях координат може бути різним і обирається так, щоб крива, яка проведена за даними експерименту, займала всю площину графіка, а відстань між окремими точками перевищувала похибки їх визначення. Початок координат не обов'язково повинен збігатися із нулем як уздовж осі *x*, так і *y*. На осях координат наносяться мітки, що відповідають не виміряним значенням фізичної величини, а її кратним цифровим значенням, які охоплюють весь інтервал вимірювань. Біля осей координат (ліворуч і внизу) необхідно записати позначення фізичної величини і одиниці виміру. Якщо виміряні величини виражені у стандартному вигляді числа, то на осях координат відкладаються одиниці цього числа, а множник 10^n виносять до одиниць вимірювання у кінець осі. Експериментальні точки наносяться на графік у вигляді знаків невеликого розміру (кружки, квадрати, хрестики і т.п.). Нанесені за даними таблиці точки об'єднують плавною лінією (рис.2), котра може проходити не через них, а поблизу. При цьому лінію розташовують таким чином, щоб ці точки знаходилися обабіч кривої так, що сумарні відхилення точок у той чи інший бік повинні бути приблизно однакові. Приклади вірної та невірної побудов наведені на рис. 2.

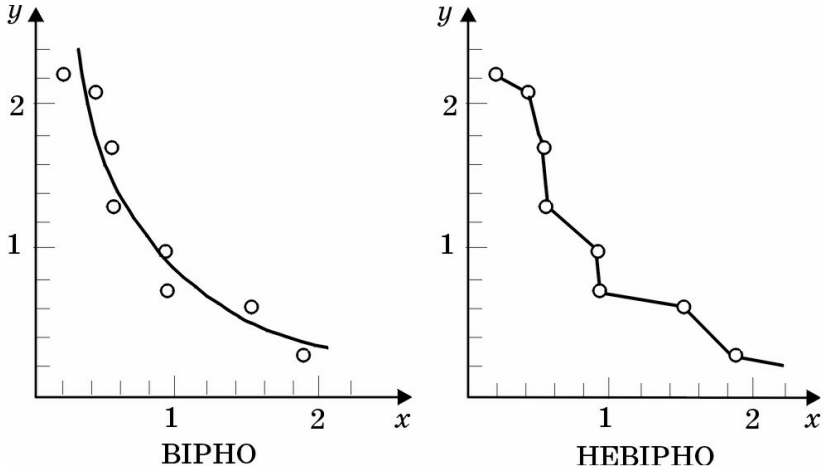


Рис 2 — Приклади побудови графіків

Якщо виміряні величини пов’язані прямо пропорційною залежністю, тобто графіком такої залежності буде пряма лінія, то її треба провести так (рис.3) , щоб найбільше експериментальних точок розмістилось на прямій, а зліва та справа обабіч прямої була однакова кількість точок.

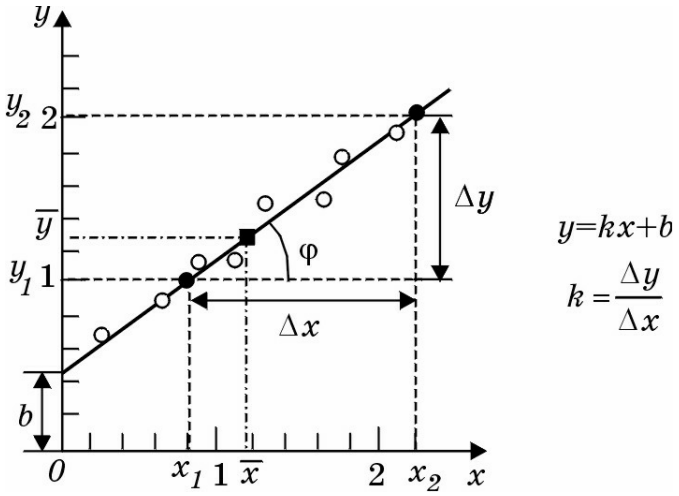


Рис.3 ─ Приклад побудови лінійної залежності за даними вимірів

Особливості запису результатів вимірів та їх похибок

При заокругленні абсолютної похибки результату треба залишити тільки одну значущу цифру. Якщо перша значуща цифра – одиниця, то можна залишити дві значущі цифри. Наприклад, замість 0,36 слід писати 0,4; замість 0,981 – 1; замість 0,117 – 0,12.

Результат виміру (середнє значення) заокруглюється до того розряду, який має остання цифра абсолютної похибки. Наприклад, t = 4,928 с, Δt = 0,2 с слід записати як t = (4,9 ± 0,2) с; d = 3,998 м, Δd = 0,12 м слід записати як d = (4,00±0,12) м.

РОЗДІЛ І. МЕХАНІКА

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1
ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТІВ ІНЕРЦІЇ ТІЛ

Прилади і матеріали: 1) хрестоподібний маятник Обербека; 2) набір тягарців; 3) вантаж; 4) нитка; 5) датчик кутової швидкості; 6) штангенциркуль.

Мета роботи: експериментальна перевірка основного рівняння обертального руху та залежності параметрів останнього від геометрії системи та зовнішніх сил. Визначення моментів інерції твердих тіл.

Короткі теоретичні відомості

Як відомо, довільний рух твердого тіла можна описати як сукупність двох рухів: *поступального* та *обертального*. За поступального руху всі точки рухаються так, що довільна пряма, яка зв'язана з тілом, залишається паралельною самій собі. Це означає, що всі точки тіла одержують однакові переміщення і для опису руху не обовязково слідкувати за всіма точками тіла, а достатньо описати рух однієї точки (наприклад, центру інерції). У свою чергу рух матеріальної точки описує другий закон Ньютона, який має вигляд

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}, \qquad (1.1)$$

де $\vec{F}$ – сума всіх зовнішніх сил, що діють на тіло (точку), $\vec{p}$ – імпульс тіла (точки).

За обертального руху точки тіла рухаються по колах, центри яких лежать на прямій, що має назву осі обертання. Результати дослідів і жит-тєвий досвід показують, що за обертального руху результат дії сили залежить не тільки від її величини та напрямку, але і від положення точки прикладання вектора сили $\vec{F}$ відносно осі (точки) обертання. Наприклад, у побуті, відкриваючи або закриваючи двері, ми розуміємо, що результат дії сили, якою ми діємо на двері, буде тим кращим, чим далі від осі обертання ми діємо. Оскільки положення точки прикладання сили характеризується радіус-вектором $\vec{r}$, то очевидно, що цей вектор повинен входити в рівняння обертального руху. Тому при обертальному русі роль, аналогічну до ролі сили, грає векторний добуток $\vec{M} = \left[\vec{r}, \vec{F}\right]$, що має назву *моменту сили відносно нерухомої точки*, а роль, аналогічну ролі імпульсу, грає інший векторний добуток $\vec{L} = \left[\vec{r}, \vec{p}\right]$, що має назву *моменту імпульсу відносно нерухомої точки*. Тобто, помноживши обидві частини рівняння (1.1) векторно на $\vec{r}$, одержимо

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \qquad (1.2)$$

Це рівняння структурно ідентичне до рівняння (1.1), має назву *рівняння моментів* і справедливе не тільки для обертального руху.

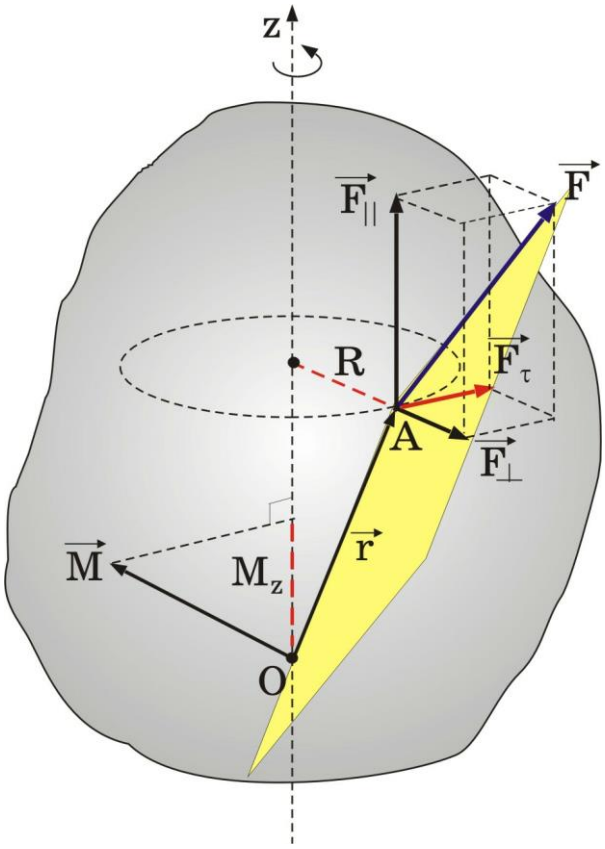


Рис. 1.1 – Сили і моменти, що діють на тверде тіло при обертальному русі

Практично важливим є випадок *обертання навколо нерухомої осі* z. Для довільної сили $\vec{F}$, що діє на тіло (рис.1.1), єдиною її складовою, яка приводить тіло в обертальний рух, є її складова $\vec{F}_\tau$, що дотична до кола обертання точки А прикладання сили. Дійсно, момент сили $\vec{F}_{\square}$ (рис.1.1) не створює обертання, він призводить тільки до вигинання осі. Сила $\vec{F}_\perp$ також до обертання не приводить, оскільки проходить через вісь обертання і її момент дорівнює нулю. Тому до обертання приводить тільки момент складової $\vec{F}_\tau$, який дорівнює за величиною

$$M_z = F_\tau R, \tag{1.3}$$

де R – плече сили $\vec{F}_\tau$. Величина M_z є проекцією моменту $\vec{M}$ на вісь обертання (рис.1.1) і має назву *моменту сили відносно осі* z. Можна показати, що момент імпульсу L_z відносно цієї ж осі дорівнює $L_z = I_z \omega_z$, де

$I_z = \sum_i m_i R_i^2$ – *момент інерції* системи відносно осі z, а ω_z – кутова швидкість обертання тіла. Тоді рівняння (1.2) записується у вигляді

$$\frac{d\left(I_z \omega_z\right)}{dt} = M_z. \tag{1.4}$$

Якщо ж система являє собою тверде тіло або незмінну систему матеріальних точок, що обертаються навколо нерухомої осі z, то для цього випадку $I_z = \text{const}$. Тоді з (1.4) одержимо

$$I_z \varepsilon_z = M_z, \tag{1.5}$$

де ε_z – кутове прискорення обертального руху навколо осі z. Це – *рівняння динаміки обертального руху твердого тіла навколо нерухомої осі*.

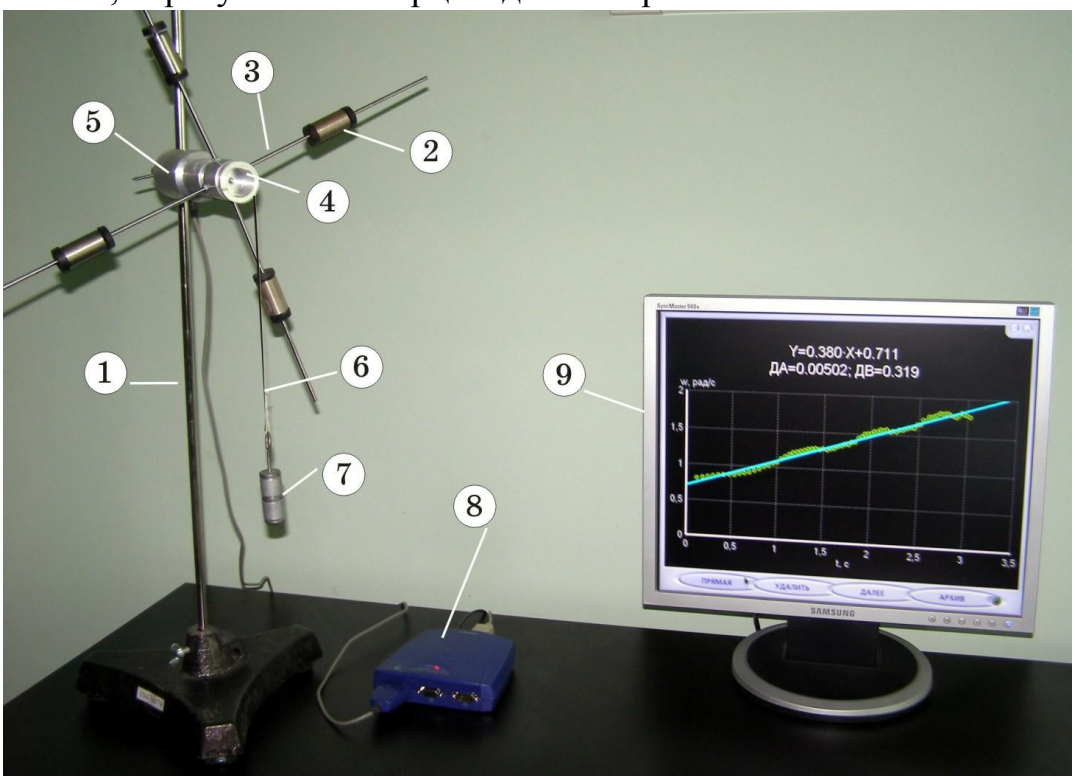
Порівнюючи його з другим законом Ньютона, легко зробити висновок, що момент інерції грає в обертальному русі таку ж роль, як і маса в рівнянні (1.1). Отже момент інерції відповідає за інертні властивості тіл, що обертаються, і при однаковому моменті сил, що діє на два різних тіла, більше кутове прискорення одержує те тіло, у якого момент інерції відносно даної осі обертання менший.

Рівняння динаміки обертального руху дозволяє експериментально визначити момент інерції тіла, якщо всі інші параметри в рівнянні відомі. Це особливо доцільно тоді, коли тіло має складну, несиметричну форму або ж неоднорідне за складом речовини.

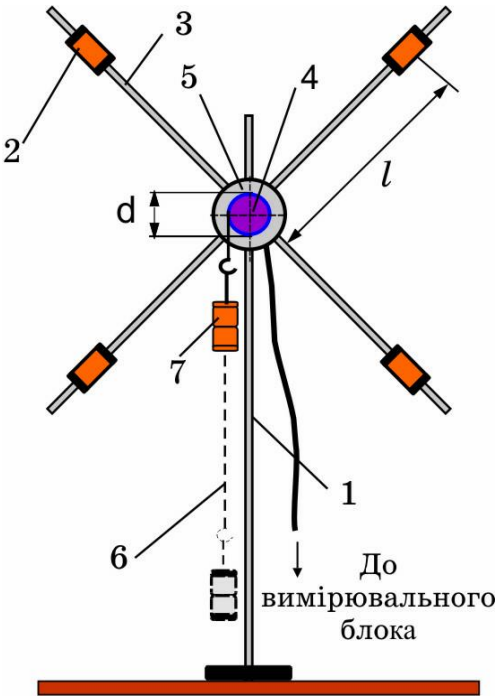
Опис лабораторної роботи

В даній роботі для перевірки законів та співвідношень обертального руху та визначення моменту інерції тіл використовується хрестоподібний маятник (маятник Обербека) – прилад, зовнішній вигляд якого наведений на рис. 1.2а, а схематичне зображення – на рис. 1.2б. Він складається з чотирьох стержнів 3 з рухомими тягарцями 2 на кожному з них, муфти 5 з датчиком кутової швидкості всередині і шківа 4, що закріплені на штативі 1. Датчик кутової швидкості з'єднаний через вимірювальний блок 8 з комп'ютером. Шків у з'єднанні зі стержнями може обертатися навколо нерухомої осі, яка спрямована перпендикулярно до площини рисунка (рис. 1.2б) і проходить крізь центр шківа. На шків намотано нитку 6, яка одним кінцем закріплена на ободі шківа. До другого її кінця приєднується набірний вантаж 7, масу якого можна регулювати. Якщо маятник знаходиться в нерівноважному стані, то виникає обертальний момент, під дією якого відбувається *обертальний рух шківа* зі стержнями і, одночасно, *поступальний*

рух вантажу. Обертальний момент можна змінювати, маніпулюючи сумарною масою вантажу. Величину моменту інерції маятника Обербека можна регулювати, пересуваючи тягарці вздовж стержнів.



а



б

Рис. 1.2 — Зовнішній вигляд лабораторної роботи (а) та схематичне зображення (б) маятника Обербека:

Позначення: 1 – штатив; 2 – тягарці; 3 – стержень; 4 – шків; 5 – муфта з датчиком кутової швидкості; 6 – нитка; 7 – збірний вантаж; 8 – вимірювальний блок; 9 – монітор.

Сили, що діють на маятник за наявності вантажу, зображені на рис. 1.3. Це сила тяжіння $m\vec{g}$, де m – маса вантажу, а g – прискорення вільного падіння; сила натягу нитки $\vec{T}$, яка створює обертальний момент $M_0 = TR$, де R – радіус шківа та сила тертя $\vec{F}_{тр}$, що створює обертальний момент $\vec{M}_{тр}$, спрямований протилежно до $\vec{M}_0$. В процесі руху вантажу на маятник діє також сила опору повітря, якою ми нехтуємо. Під дією цих сил вантаж рухається поступально з прискоренням $\vec{a}$, а шків обертається з

кутовим прискоренням $\vec{\varepsilon}$ (рис. 1.3).

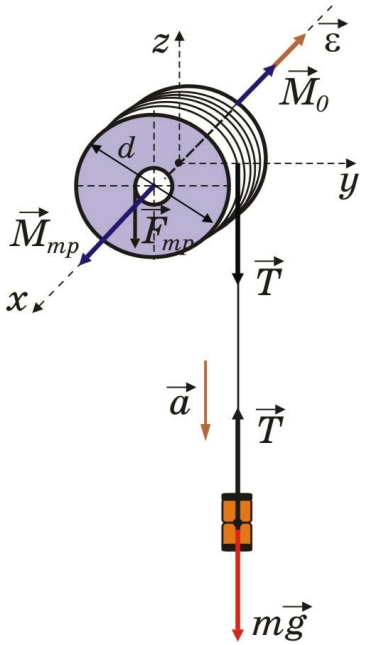


Рис.1.3 ─ Схема сил та та моментів сил, що діють на шків маятника Обербека

Рівняння динаміки поступального руху вантажу в проекціях на вісь *z* має вигляд

$$-ma = T - mg\,, \tag{1.6}$$

а рівняння динаміки обертального руху в проекціях на вісь *x*

$$-I\varepsilon = -M_0 + M_{\text{тр}}\,, \tag{1.7}$$

де I – момент інерції маятника відносно нерухомої осі обертання (x).

Із рівняння поступального руху знайдемо силу натягу нитки, яка дорівнює

$$T = mg - ma = m(g - a)\,. \tag{1.8}$$

Якщо вважати, що ковзання між поверхнею шківа та ниткою відсутнє, то величина тангенціального прискорення зовнішніх точок шківа дорівнює величині прискорення a поступального руху вантажу. Тоді можна використати зв'язок між a і ε, який має вигляд $a = \varepsilon R$, і записати величину обертального моменту M_0 в рівнянні (1.7) у формі

$$M_0 = TR = m(g - \varepsilon R)R\,. \tag{1.9}$$

Тоді рівняння обертального руху (1.7) набуде вигляду

$$I\varepsilon = m\left(g - \varepsilon R\right)R - M_{\text{тр}}. \qquad (1.10)$$

Для виключення невідомого моменту сил тертя можна виконати експеримент двічі з різними вантажами масами m_1 і m_2 відповідно. Тоді рівняння обертального руху (1.10) в двох експериментах запишуться в формі

$$I\varepsilon_1 = m_1\left(g - \varepsilon_1 R\right)R - M_{\text{тр}}, \qquad (1.11)$$

$$I\varepsilon_2 = m_2\left(g - \varepsilon_2 R\right)R - M_{\text{тр}}. \qquad (1.12)$$

Прискорення ε_1, ε_2, маси m_1, m_2 та радіус $R = d/2$, де d – діаметр шківа, вимірюються в процесі експерименту. Тоді рівняння (1.11) і (1.12) є системою рівнянь з двома невідомими I і $\vec{M}_{\text{тр}}$, одне з яких ($\vec{M}_{\text{тр}}$) можна виключити, якщо відняти перше рівняння від другого. Одержимо рівняння з одним невідомим I

$$I\varepsilon_1 - I\varepsilon_2 = m_1\left(g - \varepsilon_1 R\right)R - m_2\left(g - \varepsilon_2 R\right)R, \qquad (1.13)$$

з якого одержимо розрахункову формулу для моменту інерції тіла

$$I = \frac{g\left(m_1 - m_2\right) - R\left(m_1\varepsilon_1 - m_2\varepsilon_2\right)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}R. \qquad (1.14)$$

Зауважимо, що у чисельнику цієї формули складова $g\left(m_1 - m_2\right)$ в більшості випадків значно більша за складову $R\left(m_1\varepsilon_1 - m_2\varepsilon_2\right)$, і тоді розрахункова формула (1.14) набуває більш простого вигляду

$$I = \frac{g\left(m_1 - m_2\right)R}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}. \qquad (1.15)$$

Завдання:

а) дослідити залежність кутової швидкості обертального руху маятника від часу для двох різних вантажів і за цими залежностями визначити кутові прискорення диску та момент інерції маятника;

б) повторити вимірювання, змінивши момент інерції маятника;

в) зробити висновки щодо результатів експерименту.

Порядок виконання роботи

Підготовка до вимірювань

1. Підготувати збірний вантаж до досліду, зібравши його з елементів, маси яких занести до таблиці 1.

2. Виміряти за допомогою штангенциркуля діаметр котушки муфти, обчислити значення її радіуса і занести результат до таблиці 2.

Таблиця 1

***m*, кг**	**Тип елементів вантажу**	**Кількість**
	Легкий	
	Тяжкий	
	Крюк з лощиною	

Таблиця 2

***R*, м**	***l*, м**	***m*, кг**	ε_i, рад/с^2	$\bar{\varepsilon}$, рад/с^2	$\Delta\varepsilon_i$, рад/с^2	I, кг·м^2
		m_1				
		m_2				
		m_1				
		m_2				

3. Відрегулювати положення тягарців на плечах (стержнях) маятника Обербека, помістивши їх приблизно посередині стержня так, щоб за відсутності зовнішньої дії маятник залишався нерухомим, тобто перебував в стані рівноваги.

4. Виміряти відстань l від центра мас тягарців до осі маятника і занести результат в таблицю 2.

5. Закріпити вантаж на нитці і намотати нитку на шків муфти одним шаром, виток до витка так, щоб вантаж піднявся майже до рівня шківа. Після цього зафіксувати маятник рукою так, щоб він не міг обертатись.

6. У вікні монітора відкрити програму „L-физика практикум”, в меню програми натиснути пункт „Вибор работы” і у вікні, що відкриється, в наведеному переліку лабораторних робіт натиснути назву „Определение моментов инерции тел”. Після цього, для переходу до вимірів натиснути кнопку «Проведение измерений», що приведе до відкриття вікна виконання лабораторної роботи.

Проведення вимірювань

7. Натиснути кнопку „Пуск” в меню програми вимірювань і відпустити маятник, який буде розкручуватись з прискоренням, а вантаж буде прискорено рухатись донизу. В процесі розкручування через рівні проміжки часу відбувається вимірювання кутової швидкості обертання шківа (і маятника Обербека) за допомогою датчика кутової швидкості.

8. Зупинити обертання маятника після розмотування всієї нитки і натиснути кнопку ”Стоп” меню. Дані вимірювання будуть зображені на екрані монітора у вигляді точок на площині в координатах: вісь абсцис X (час t) – вісь ординат Y (кутова швидкість ω).

9. Унаслідок неточності балансування тягарців на стержнях маятника, випадкових невеликих поштовхів, зсувів нитки, руху вантажу після розмотування нитки, загалом рух вантажу не є строго рівноприскореним, тому не-

обхідно провести попередню обробку результатів вимірювань. Для цього необхідно, утримуючи ліву кнопку миші натиснутою, виділити рамкою ділянку графіка, яка більш за все відповідає рівноприскореному руху вантажу. Потім натиснути кнопку меню «Обработка».

10. Натиснення кнопки „Обработка" приведе до появи вікна з вибраною сукупністю точок. Після цього натиснути кнопку „Прямая" і в вікні буде побудована пряма, що апроксимує експериментальні дані. Окрім того, у верхній частині вікна з'явиться рівняння виду $\omega = At + B$ та середньоквадратичні відхилення ΔA і ΔB коефіцієнтів A і B відповідно. Значення коефіцієнта A є числове значення кутового прискорення ε_1, а ΔA є його середньоквадратичні відхилення $\Delta\varepsilon_1$. Виміряні значення занести до таблиці 2.

11. Для визначення випадкових похибок дію пунктів 7-10 повторити 3-5 разів і занести дані до таблиці 2.

12. Змінити масу вантажу приблизно вдвічі, знявши частину елементів набірного вантажу і результуючу масу позначити m_2. Виконати дії пунктів 3-11.

13. Розрахувати момент інерції за формулою (1.15) і результат занести до таблиці 2.

14. Зсунувши тягарці майже до муфти, змінити момент інерції маятника і виконати дії пунктів 3-13. Результати занести до таблиці 2. Зробити висновки щодо експериментального визначення моменту інерції і співвідношень обертального руху, що підлягали перевірці.

Контрольні питання

1. Дайте визначення обертального руху.
2. Чому для опису обертального руху використовують не силу і імпульс, а їх моменти?
3. Дайте визначення моменту сили відносно точки та відносно осі.
4. Дайте визначення моменту інерції матеріальної точки та тіла відносно осі обертання.
5. Яку властивість тіла характеризує момент інерції?
6. Наведіть вирази для моментів інерції найпростіших симетричних тіл (стержня, диска, кулі) відносно їх осі симетрії.
7. Дайте визначення моменту імпульсу відносно точки та осі.
8. Запишіть основне рівняння обертального руху.
9. Як визначається момент сили, який приводить до обертання маятник Обербека?
10. Як залежить момент інерції маятника Обербека від розташування вантажів на стержнях?
11. Який хід виконання лабораторної роботи?

Література

1. И.В. Савельев. Курс общей физики. т.1. – М.: Наука, 1986, §§ 36-39.

2. Физический практикум. / Под ред. В.И. Ивероновой. – М: Гос.изд-во физ.- мат. л-ры, 1962.– 956с.

3. Опис комплекту лабораторних робіт від виробника „L-микро©”.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2
ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ ЗБЕРЕЖЕННЯ МОМЕНТУ ІМПУЛЬСУ

Прилади і матеріали: 1) штатив; 2) датчик кутової швидкості з муфтою; 3) стержні; 4) тягарці; 5) шайби для обмеження руху; 6) рукоятка для розкручування.

Мета роботи: вивчення закону збереження моменту імпульсу та його експериментальна перевірка.

Короткі теоретичні відомості

Як відомо, обертальний рух системи матеріальних точок описується *рівнянням моментів,* яке має вигляд (2.1) і означає, що *похідна за часом від моменту імпульсу* $\vec{L}$ *системи матеріальних точок відносно нерухомого початку дорівнює векторній сумі моментів зовнішніх сил* $\vec{M}_{\text{зовн}}$ *відносно того ж початку*. Із (2.1) випливає, що *якщо момент зовнішніх сил* $\vec{M}_{\text{зовн}} = 0$*, то момент імпульсу системи відносно нерухомого початку буде залишатись сталим у часі, тобто зберігається*. Це твердження і є *закон збереження моменту імпульсу* для системи матеріальних точок, зокрема і для замкнутої (ізольованої) системи.

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}_{\text{зовн}} \qquad (2.1)$$

В окремому випадку обертання системи матеріальних точок навколо нерухомої осі z з кутовою швидкістю ω, момент імпульсу L_z системи відносно цієї осі можна записати в вигляді

$$L_z = I_z\,\omega, \qquad (2.2)$$

де I_z – момент інерції системи відносно осі z. Тоді рівняння (2.1) набуде вигляду

$$\frac{d\left(I_z\,\omega\right)}{dt} = M_{z,\text{зовн}}, \qquad (2.3)$$

де $M_{z,\text{зовн}}$ – проекція повного моменту зовнішніх сил на вісь z. З (2.3) випливає, що коли $M_{z,\text{зовн}} = 0$, то добуток

$$I_z \omega = const. \qquad (2.4)$$

Отже, якщо в замкнутій системі, що обертається навколо нерухомої осі, змінюється момент інерції внаслідок зміни положення тіл системи, а добуток $I_z \omega$ залишається сталим, то зміна моменту інерції приведе до відповідної зміни кутової швидкості ω. Так, якщо позначити в початковому стані (до зміни положення тіл) момент імпульсу відносно осі обертання I_{z1} і кутову швидкість ω_1, а в кінцевому стані (після зміни положення тіл) I_{z2} і ω_2, то закон збереження імпульсу буде мати вигляд

$$I_{z1} \omega_1 = I_{z2} \omega_2. \qquad (2.5)$$

Наприклад, фігурист на льоду, що обертається навколо власної осі, притискає руки до тулуба (зменшує власний момент інерції) для того, щоб збільшити кутову швидкість обертання; стрибун у воду для збільшення кутової швидкості обертання групується в польоті і т.п.

Виконання закону збереження моменту імпульсу в формі (2.5) підлягає перевірці в процесі виконання лабораторної роботи.

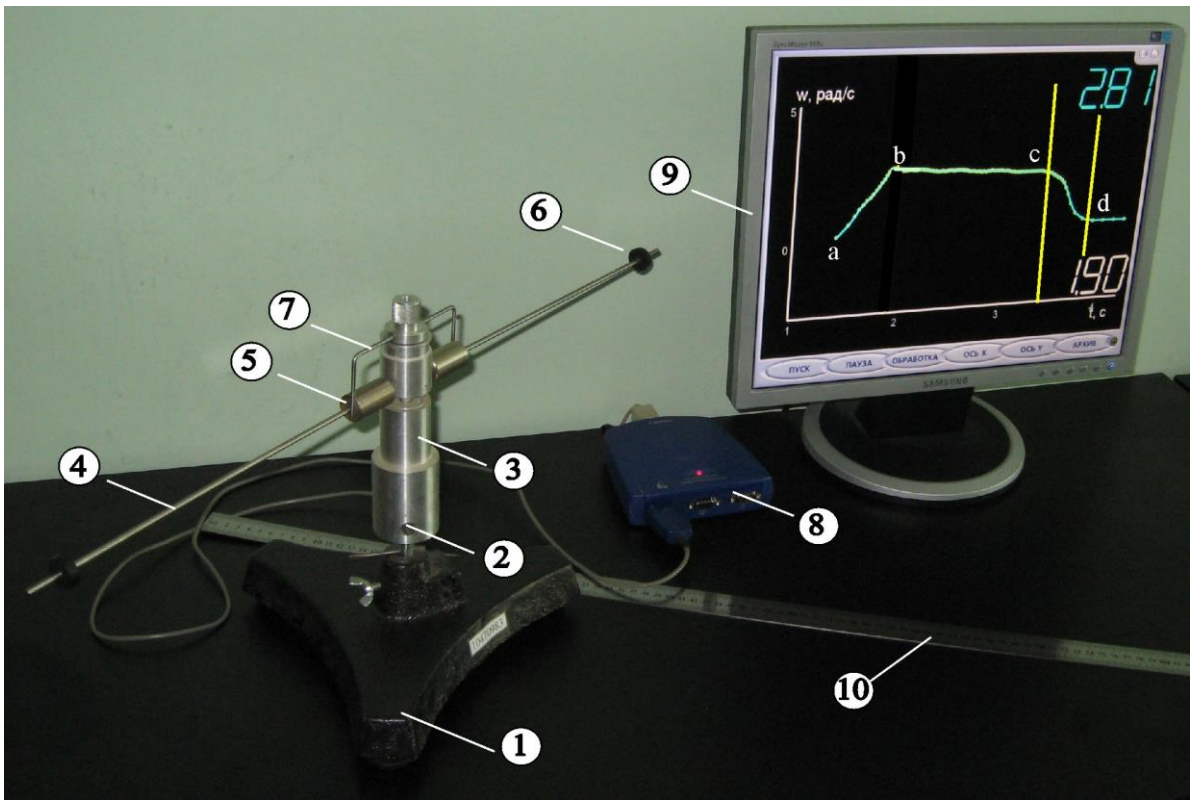
Опис лабораторної роботи

Зовнішній вигляд лабораторної роботи наведений на рис. 2.1а, а її схематичне зображення – на рис. 2.1б. Вона складається з розміщеної на штативі 1 муфти 3, яка може обертатись навколо вертикальної осі симетрії OO' і з'єднаних з нею стержнів 4, що можуть обертатись в горизонтальній площині навколо вказаної осі. Кутова швидкість обертання визначається датчиком кутової швидкості 2. На кожному стержні 4 розміщено тягарець 5, що може вільно переміщуватись по стержню. Для фіксації тягарців на найменшій відстані до осі обертання і їх вивільнення для переміщення вздовж стержня служить рукоятка 7, а для обмеження їх руху вздовж стержня служать гумові шайби 6. Результати вимірювання кутової швидкості з датчика 2 передаються через вимірювальний блок 8 на монітор комп'ютера 9. Значення мас тіл та їх геометричних розмірів знаходяться шляхом прямих вимірювань, а значення моментів інерції та моментів імпульсу – у результаті непрямих вимірювань. Суть роботи полягає в тому, щоб знайти величини моменту імпульсу системи в початковому стані L_1 (тягарці знаходяться найближче до осі обертання) і моменту імпульсу системи в кінцевому стані L_2 (після розльоту тягарців до положення фіксуючих шайб) та порівняти їх.

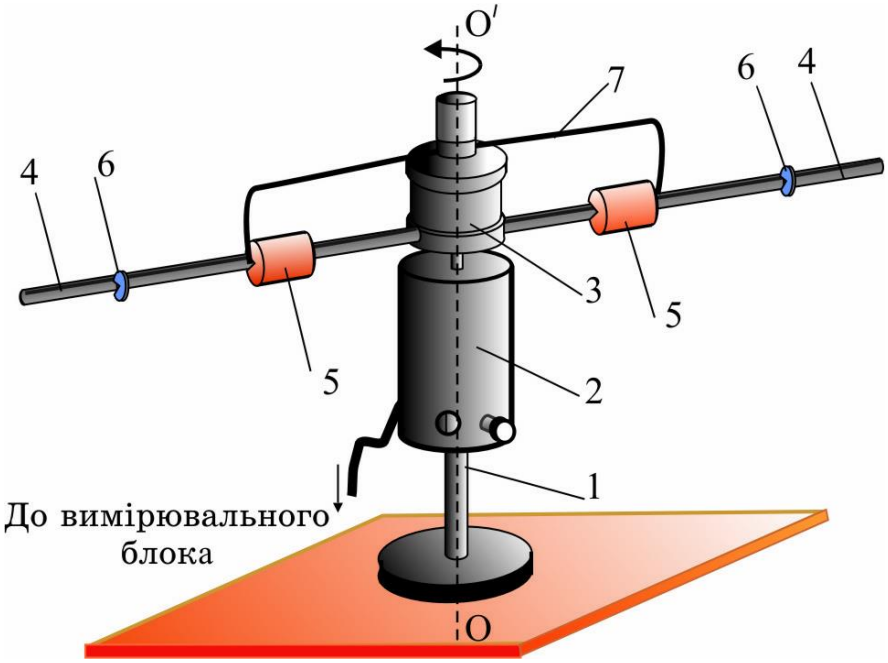
Визначимо вираз для моменту інерції рухомої частини системи I_0 без тягарців, оскільки ця складова має місце як в початковому, так і в кінцевому станах. Він дорівнює

$$I_0 = I_м + 2I_с, \qquad (2.6)$$

де $I_м$ - момент інерції муфти, а $I_с$ – момент інерції стержня.



а



б

Рис. 2.1 ─ Зовнішній вигляд лабораторної роботи (а) та її схематичне зображення (б):

1 – штатив; 2 – датчик кутової швидкості; 3 – муфта; 4 – стержні; 5 – тягарці; 6 – щайби для обмеження руху; 7 – рукоятка для розкручування системи; 8 – вимірювальний блок; 9 – монітор; 10 – лінійка

Зокрема, оскільки муфта масою m_1 має форму циліндра радіусом R, то її момент інерції дорівнює

$$I_{\text{м}} = \frac{1}{2} m_1 R^2. \tag{2.7}$$

Момент інерції стержня масою m_2 і довжиною ℓ відносно вертикальної осі обертання OO' системи знаходиться за формулою Штейнера

$$I_{\text{с}} = m_2\left(R + \frac{\ell}{2}\right)^2 + m_2\frac{\ell^2}{12} = m_2\left(R^2 + R\ell + \frac{\ell^2}{4} + \frac{\ell^2}{12}\right) = m_2\left(R^2 + R\ell + \frac{\ell^2}{3}\right), \tag{2.8}$$

де $R + \frac{\ell}{2}$ – відстань від центра мас стержня до осі обертання, а $\frac{m_2\ell^2}{12}$ – момент інерції тонкого стержня при обертанні відносно осі, що перпендикулярна до нього і проходить через його центр мас.

Підставивши (2.7) і (2.8) в (2.6), одержимо, що момент інерції рухомої частини системи без тягарців I_0 обчислюється за виразом

$$I_0 = \frac{1}{2} m_1 R^2 + 2m_2\left(R^2 + R\ell + \frac{\ell^2}{3}\right). \tag{2.9}$$

Врахуємо моменти інерції тягарців. Момент інерції циліндричного тягарця відносно осі, що проходить перпендикулярно осі симетрії циліндра через його центр мас, дорівнює

$$I_m = \frac{m}{12}\left(3R_1^2 + 3R_2^2 + H^2\right), \tag{2.10}$$

де R_1 – зовнішній радіус циліндра; R_2 – радіус отвору циліндра; H – довжина циліндричного тягарця. Тоді, згідно з теоремою Штейнера, момент інерції тягарців відносно осі симетрії системи OO' в початковому стані (тягарці знаходяться найближче до осі обертання), дорівнює

$$I_1 = 2\left(mr^2 + I_{\text{т}}\right), \tag{2.11}$$

де r – відстань від осі симетрії OO' до центра мас тягарця. Отже, величина повного моменту імпульсу L_1 системи в початковому стані визначається за виразом

$$L_1 = \left(I_0 + I_1\right)\omega_1, \tag{2.12}$$

де ω_1 – кутова швидкість системи в початковому стані.

Якщо в кінцевому стані центри мас тягарців розмістились на відстанях r_1 і r_2 від осі обертання OO', то момент інерції системи в кінцевому стані I_2 обчислюється аналогічно попередньому і дорівнює

$$I_2 = mr_1^2 + mr_2^2 + 2I_m, \tag{2.13}$$

а повний момент імпульсу в кінцевому стані L_2 визначається за виразом

$$L_2 = \left(I_0 + I_2\right)\omega_2, \tag{2.14}$$

де ω_2 – кутова швидкість системи в кінцевому стані.

Оскільки протягом часу розльоту тягарців моменти зовнішніх сил на систему не діють, а моментом сил тертя в датчику кутової швидкості можна знехтувати, то на цьому проміжку часу повинен виконуватись закон збереження моменту імпульсу. Тому, порівнявши за величиною моменти імпульсів L_1 і L_2, можна зробити висновки про виконання закону збереження моменту імпульсу.

Завдання:

а) визначити моменти інерції і кутові швидкості системи в початковому і кінцевому станах;

б) обчислити моменти імпульсів L_1 і L_2 в цих станах;

в) зробити висновки щодо виконання закону збереження моменту імпульсу в експерименті.

Порядок виконання роботи

1. Провести прямі виміри мас (m_1 і m_2) та геометричних розмірів (R, ℓ) муфти і стержнів відповідно. Всі дані вимірювань занести до таблиці 1.

Таблиця 1

m_1, **кг**	m_2, **кг**	R, **м**	ℓ, **м**	$I_м$, кг · м^2	$I_с$, кг · м^2	$I_0 = I_м + 2I_с$, кг · м^2

2. Обчислити моменти інерції $I_м$, $I_с$ за формулами (2.7) і (2.8) відповідно та знайти момент інерції I_0 рухомої частини системи без тягарців за формулою (2.9). Результати занести до таблиці 1.

3. Виміряти масу тягарців *m*. Зафіксувати найближче до осі обертання-положення тягарців за допомогою рукоятки та виміряти відстань *r* від осі обертання *OO'* до центру мас тягарця. Занести значення *m* та *r* до таблиці 2.

Таблиця 2

№	m, кг	r, м	r_1, м	r_2, м	ω_1, c^{-1}	ω_2, c^{-1}	I_1, $кг \cdot м^2$	I_2 $кг \cdot м^2$	L_1 $кг \cdot м^2/с$	L_2 $кг \cdot м^2/с$

4. Встановити гумові шайби, що обмежують рух тягарців на деяких відстанях від осі обертання.

5. У вікні монітора відкрити програму „L□-физика практикум”, натиснути в меню програми пункт „Вибор работы” і у вікні, що відкриється, у наведеному переліку лабораторних робіт натиснути назву „Изучение закона сохранения импульса”. Після цього для переходу до вимірів натиснути кнопку «Проведение измерений», що приведе до відкриття вікна виконання лабораторної роботи.

6. Для проведення вимірювань в меню вікна виконання роботи натиснути кнопку «ПУСК» (запис даних вимірів кутової швидкості здійснюється протягом 5 секунд з моменту натиску на кнопку «ПУСК»).

7. За допомогою рукоятки розкрутити систему з тягарцями і різко підняти рукоятку вверх, що приведе до зсуву тягарців уздовж стержнів. Виміряти відстані r_1 та r_2 центрів мас тягарців від осі обертання OO' та занести їх до таблиці 2. Зауважимо, що тягарці можуть і не дійти до шайб або відштовхнутись від них в процесі руху, тому відстані r_1 та r_2 можуть бути різними.

8. Після завершення запису даних на екрані монітора буде зображено графік залежності кутової швидкості обертання системи від часу. На графіку (рис. 2.1а) можна виділити три ділянки: ділянка зростання кутової швидкості до максимальної (*ab* відповідає часу розкручення системи), ділянка повільного зменшення кутової швидкості (*bc* □ відповідає часу обертання до зняття рукоятки) та ділянка більш різкого зменшення кутової швидкості (*cd* відповідає часу розльоту тягарців). Визначити початкове значення кутової швидкості ω_1(точка с) і кінцеве ω_2(точка *d*). З цією метою необхідно перемістити маркер, що являє жовту вертикальну пряму (рис. 2.1а), у відповідну точку на залежності і натиснути ліву кнопку миші. У результаті в правому верхньому кутку екрана монітора буде зображене миттєве значення кутової швидкості у даний момент часу в цифровій формі. У правому нижньому кутку екрана монітора буде зображене значення часу. Значення кутових швидкостей ω_1 і ω_2 занести до таблиці 2.

9. За формулами (2.11) та (2.13) знайти моменти інерції I_1 та I_2 тягарців у початковому та кінцевому стані відповідно, і обчислити моменти

імпульсу системи в цих станах за формулами (2.12) та (2.14) відповідно. Результати обчислень занести до таблиці 2.

10. Проаналізувати виконання закону збереження моменту імпульсу системи і у випадку різниці в результатах вказати причини, які приводять до цих відмінностей.

Контрольні питання

1. Дайте визначення обертального руху.
2. Чому для опису обертального руху використовують не силу і імпульс, а їх моменти?
3. Дайте визначення моменту інерції матеріальної точки відносно осі обертання.
4. Як визначається момент інерції тягарця, стержнів, муфти в лабораторній роботі?
5. Яку властивість тіла характеризує момент інерції?
6. Дайте визначення моменту імпульсу відносно точки та осі.
7. Запишіть основне рівняння обертального руху.
8. Як визначаються моменти імпульсу системи в лабораторній роботі?
9. Як залежить момент інерції системи від розташування вантажів на стержнях?
10. Який хід виконання лабораторної роботи?

Література

1. И.В. Савельев. Курс общей физики. т.1. – М.: Наука, 1986, §29, §§ 38,39.
2. Опис комплекту лабораторних робіт від виробника „L-микро©”.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3
ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ТІЛА ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА

Прилади і матеріали: 1) балістичний маятник; 2) метальний пружинний пристрій; 3) кулька; 4) датчик кута повороту 5) вимірювальний блок.

Мета роботи: вивчення і використання законів збереження імпульсу, моменту імпульсу та закону збереження енергії для визначення швидкості тіла.

Короткі теоретичні відомості

Повний опис фізичної системи можливий, якщо відомі динамічні закони, що описують зміну стану системи з часом. Це означає, що, знаючи закони дії сил на матеріальні точки системи, можна за допомогою рівнянь руху знайти стан системи в довільний момент часу. Але для багатьох систем динамічні закони можуть бути досить складні або невідомі. Тоді важливу роль грають закони збереження – фізичні закономірності, згідно з якими існують фізичні величини, значення яких за певних умов або в певних процесах залишається сталим, тобто не змінюється з часом. Найбільш загальними є закони збереження імпульсу, моменту імпульсу та енергії. Хоча спочатку вони були застосовані в механіці, досліди показали, що закони збереження не залежать від характеру взаємодії і можуть бути використані навіть тоді, коли характер взаємодії взагалі невідомий. Тому закони збереження стали важливим інструментом дослідження не тільки в механіці, а і в фізиці твердого тіла, атома, елементарних частинок та ін..

Закон збереження імпульсу. За визначенням і*мпульс* $\vec{p}$ *матеріальної точки* є вектор, що дорівнює добутку маси матеріальної точки m і вектора швидкості $\vec{v}$, тобто $\vec{p} = m\vec{v}$. Згідно з другим законом Ньютона *похідна від імпульсу матеріальної точки за часом дорівнює векторній сумі сил, що діють на матеріальну точку*

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i , \qquad (3.1)$$

де i — індекс, що нумерує сили.

Імпульсом $\vec{P}$ *системи матеріальних точок* називають векторну суму імпульсів матеріальних точок, що складають систему, тобто $\vec{P} = \sum_i \vec{p}_i$, де $\vec{p}_i$ – імпульс i - ої матеріальної точки. Матеріальні точки системи можуть взаємодіяти як між собою (ці сили взаємодії називають *внутрішніми),* так на них можуть діяти сили з боку матеріальних точок, що системі не належать (ці сили називають *зовнішніми*). Оскільки наслідком виконання третього закону Ньютона є те, що сума всіх внутрішніх сил системи дорівнює нулю, то для системи матеріальних точок рівняння руху (3.1) має вигляд

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum_i \vec{F}_{i,\text{зовн.}} . \qquad (3.2)$$

Зокрема, якщо зовнішні сили на систему не діють або $\sum_i \vec{F}_{i,\text{зовн.}} = 0$, то така система має назву *замкнутої*. Для замкнутої системи права частина рівняння (3.2) дорівнює нулю, тобто імпульс не змінюється з часом.. Тоді очевидно, що *повний імпульс замкнутої системи зберігається в часі, тобто залишається сталим*. Це твердження є *закон збереження імпульсу для замкнутої* системи, який аналітично записується у вигляді

$$\vec{P} = \sum_i \vec{p}_i = \text{const} . \qquad (3.3)$$

З рівняння (3.3) випливає, що імпульси матеріальних точок або окремих частин системи можуть змінюватись із часом, але їх векторна сума (повний імпульс системи) залишається сталою в процесі руху.

Закон збереження моменту імпульсу. За визначенням *момент* і*мпульсу* $\vec{l}$ *матеріальної точки* відносно нерухомого початку О є вектор, що дорівнює векторному добутку радіус-вектора $\vec{r}$, що з'єднує початок О з матеріальною точкою і вектора імпульсу $\vec{p}$ цієї точки, тобто

$$\vec{l} = [\vec{r}, \vec{p}]. \qquad (3.4)$$

Моментом імпульсу $\vec{L}$ *системи матеріальних точок* відносно нерухомого початку О називають векторну суму моментів імпульсів матеріальних точок, що складають систему відносно точки О, тобто $\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i$, де $\vec{l}_i$ – момент імпульсу *i* - ої матеріальної точки.

Для моменту імпульсу справедливе рівняння аналогічне рівнянню (3.2) для імпульсу, яке має назву *рівняння моментів* і записується у вигляді

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum_i \vec{M}_{i,\text{зовн.}} , \qquad (3.5)$$

де $\vec{M}_{i,\text{зовн}} = \left[\vec{r}_i, \vec{F}_{i,\text{зовн}}\right]$ – момент зовнішньої сили, що діє на *i* - ту матеріальну точку відносно нерухомого початку О. Отже, *похідна за часом від моменту імпульсу системи матеріальних точок відносно нерухомого початку дорівнює векторній сумі моментів усіх зовнішніх сил, відносно того ж початку*. Зокрема, для замкнутої системи права частина рівняння (3.5) дорівнює нулю. Отже, *повний момент імпульсу замкнутої системи зберігається в часі, тобто залишається сталим*. Це твердження *є закон збереження моменту імпульсу* для замкнутої системи, який аналітично записується у вигляді

$$\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i = \text{const} . \qquad (3.6)$$

Закон збереження енергії. У механіці розрізняють *потенціальні (консервативні) і непотенціальні (неконсервативні)* сили. До потенціальних відносяться сили, робота яких залежить від початкового і кінцевого положення системи і не залежить від траєкторії переходу з початкового положення в кінцеве. Наслідком цього є те, що робота потенціальних сил по замкнутій траєкторії дорівнює нулю. Прикладом таких сил є сили тяжіння. Непотенціальними є сили, робота яких залежить від траєкторії переходу. Прикладом таких сил є сили тертя та сили опору.

Сили і їх дія пов'язані з загальною мірою руху і взаємодії всіх матеріальних точок, (тіл) системи, яка має назву *енергії системи*. У механіці розрізняють *кінетичну* і *потенціальну* енергії системи. Частина *енергії системи, що залежить від швидкостей матеріальних точок (тіл) системи, має назву кінетичної енергії*. Кінетична енергія однієї матеріальної точки масою m, що рухається з швидкістю v, дорівнює

$$E_к = \frac{mv^2}{2}. \tag{3.7}$$

Як випливає з (3.7), кінетична енергія є скалярна величина, тому кінетична енергія системи є алгебраїчною сумою кінетичних енергій її частин.

Потенціальною енергією системи називається скалярна величина, що дорівнює роботі потенціальних сил над матеріальними точками системи при переході її з даного положення в положення, де ця величина вважається рівною нулю. Вираз для потенціальної енергії залежить від характеру взаємодії. Наприклад, якщо потенціальна енергія тіла масою m на поверхні Землі приймається рівною нулю, то на висоті h вона дорівнює $E_п = mgh$, де g – прискорення вільного падіння, а потенціальна енергія стисненої (розтягненої) пружини дорівнює $E_п = kx^2/2$, де x – зміщення з положення рівноваги, а k – жорсткість пружини.

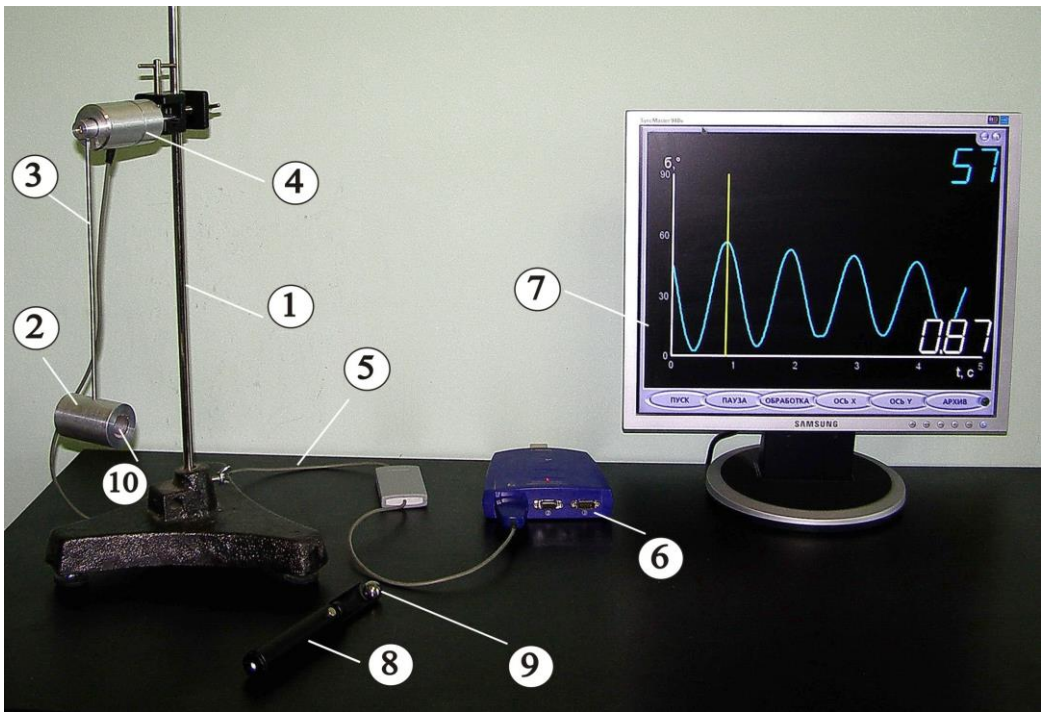
Сума кінетичної та потенціальної енергій системи має назву *механічної енергії* системи, тобто

$$E = E_к + E_п. \tag{3.8}$$

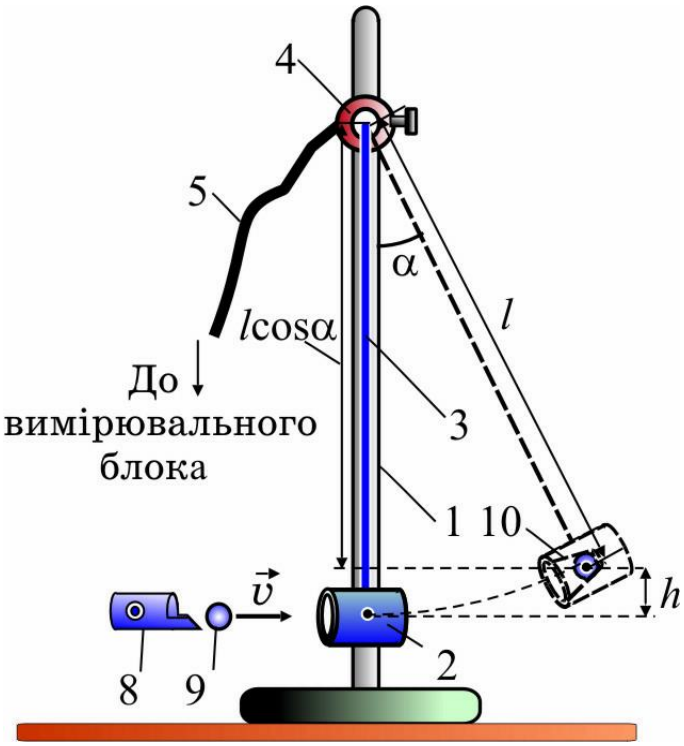
Якщо в системі діють тільки потенціальні сили, то механічна енергія системи зберігається в часі, тобто залишається сталою. Це твердження має назву *закону збереження енергії*. Воно означає, що в такій системі зміна потенціальної енергії буде супроводжуватись її перетворенням у кінетичну і навпаки, а їх сума буде залишатись сталою. Якщо в системі діють і непотенціальні сили, то енергія системи не зберігається, а витрачається на роботу цих сил.

Опис лабораторної роботи

У даній роботі закони збереження використовуються для визначення швидкості тіла. Зовнішній вигляд роботи наведений на рис. 3.1а, а її схематичне зображення – на рис. 3.1б.



а



б

Рис.3.1 — Зовнішній вигляд лабораторної роботи (а) та її схематичне зображення (б):

1 – штатив; 2 – циліндр-пастка; 3 – тонка спиця; 4 – муфта з датчиком кута повороту; 5 – з’єднувальний кабель; 6 – вимірювальний блок; 7 – монітор; 8 – пружинний метальний пристрій; 9 – кулька; 10 – пластиковий конус.

Основною частиною роботи є балістичний маятник, що закріплений на штативі 1. Він являє масивне тіло, роль якого грає циліндр-пастка 2, що закріплений на довгій тонкій спиці 3. У рівновазі циліндр-пастка знаходиться в найнижчому положенні, а спиця розміщена вертикально. При виведенні маятника з положення рівноваги спиця відхиляється на кут α від вертикалі (рис. 3.1б), величина якого вимірюється датчиком кута повороту, розміщеним всередині муфти 4 на її осі. Датчик з'єднано кабелем 5 з вимірювальним блоком 6, який сполучений з комп'ютером. Результати вимірювання відображаються на дисплеї монітора 7. Виведення маятника з положення рівноваги відбувається за допомогою метального пружинного пристрою 8, з якого виконується постріл металевою кулькою 9 в циліндр-пастку (рис. 3.1б). Після пострілу кулька застрягає в пластиковому конусі 10, що кріпиться в отворі циліндра-пастки і далі рухається разом з циліндром-пасткою. Тому доцільно розділити розгляд руху маятника на два етапи: процес зіткнення і процес підйому кульки разом з маятником до деякої висоти h.

Процес зіткнення кульки з маятником досить складний, оскільки система не є консервативною – при гальмуванні кульки в циліндрі-пастці частина кінетичної енергії кульки витрачається на роботу сил тертя. Але, якщо час зіткнення кульки з маятником малий в порівнянні з періодом коливань маятника, то маятник не встигає відхилитись настільки, щоб виникла зовнішня сила (складова сили тяжіння), яка повертає маятник до положення рівноваги. Тоді можна вважати, що в системі діють тільки внутрішні сили, і розглядати систему „куля-маятник" як замкнуту і використовувати для неї закони збереження імпульсу і моменту імпульсу. Зокрема, закон збереження імпульсу в проекціях на напрямок зіткнення можна записати у вигляді[1)]

$$mv = (M + m)u, \tag{3.9}$$

де m, M – маси кулі і маятника відповідно; v – швидкість кулі до зіткнення; u – швидкість системи „куля-маятник" після зіткнення. Це рівняння відображає той факт, що проекція імпульсу системи до зіткнення mv дорівнює проекції імпульсу системи після зіткнення $(M + m)u$. Із (3.9) маємо

$$v = \frac{(M + m)u}{m}. \tag{3.10}$$

З рівняння (3.10) випливає, що можна знайти швидкість кулі v, якщо визначити величини m, M і u з досліду. Якщо маси кулі і циліндра-пастки

[1)] Легко довести, що у випадку, коли маятник можна вважати математичним (розміри тіла малі в порівнянні з довжиною спиці), рівняння, що відповідає закону збереження моменту імпульсу переходить в рівняння, що виражає закон збереження імпульсу. В загальному випадку, при зіткненні кулі з маятником, який не може вважатись математичним, необхідно користуватись законом збереження моменту імпульсу.

визначаються простим зважуванням, то швидкість u можна знайти, використавши закон збереження енергії.

Дійсно, на другому етапі – процесі підйому до деякої висоти h, на систему „кулька-маятник” діють зовнішні сили: сила тяжіння величиною $(M+m)g$, та сили пружності взаємодії спиці з циліндром-пасткою. Одначе ці сили є консервативними, що дозволяє використати закон збереження енергії. Окрім того, в системі діє неконсервативна сила – сила тертя в датчику кута повороту. Але вона досить мала і нею можна знехтувати. Тому можна вважати, що в системі діють лише консервативні сили і в процесі підйому виконується закон збереження енергії: кінетична енергія маятника перетворюється в його потенціальну енергію. Кінетична енергія системи після зіткнення дорівнює $E_к = (M+m)u^2/2$, а потенціальна в кінці підйому на висоті h рівна $E_п = (M+m)gh$. Тоді закон збереження має вигляд

$$\frac{(M+m)u^2}{2} = (M+m)gh, \tag{3.11}$$

звідки невідома в рівнянні (3.10) швидкість дорівнює

$$u = \sqrt{2gh}\ . \tag{3.12}$$

Із побудови на рис. 3.1б видно, що висота h виражається через довжину ℓ маятника, а саме

$$h = \ell - \ell\cos\alpha = \ell(1-\cos\alpha), \tag{3.13}$$

де кут відхилення α вимірюється датчиком кута повороту. Підставивши вирази (3.12) і (3.13) в (3.10), одержимо робочу формулу для визначення швидкості кульки

$$v = \frac{M+m}{m}\sqrt{2g(1-\cos\alpha)}\ . \tag{3.14}$$

Завдання:

а) визначити максимальні кути відхилення $\alpha_{i,\max}$ балістичного маятника в декількох (5–6) дослідах;

б) за результатами дослідів розрахувати середнє значення швидкості $\bar{v}$ кулі і похибки;

в) зробити висновки про коректність проведених вимірювань.

Порядок виконання роботи

Підготовка до вимірювань:

1. Підготуватись до роботи. Для цього необхідно зібрати установку і з'єднати вимірювальні кабелі. У вікні монітора відкрити програму „L-физика практикум", в меню програми натиснути пункт „Выбор работы" і у вікні, що відкриється, в наведеному переліку лабораторних робіт натиснути назву „Измерение скорости баллистическим маятником". Після цього, для переходу до вимірів натиснути кнопку «Проведение измерений», що приведе до відкриття вікна виконання роботи.

Зауваження. Одним з основних етапів підготовки лабораторної роботи є налаштування датчика кута повороту. Для переведення маятника в початковий стан треба до початку вимірювань натиснути кнопку «Настройка» в меню. На екрані з'явиться показ датчика в градусах. Необхідно встановити з клавіатури такий показ датчика, щоб при відхиленні маятника від положення рівноваги на 90° вимірювальний кут не виходив за межі діапазону від -410° до $+410^o$ градусів. Після цього привести маятник в стан рівноваги і натиснути кнопку „Далее". Показ датчика на екрані буде прийнятий за початок відліку. Якщо покази датчика лежать на межі діапазону і не змінюються під час руху маятника, то необхідно зробити декілька обертів маятника в той чи інший бік, доки покази датчика не почнуть змінюватись.

Проведення вимірювань:

2. Визначити масу кульки, масу маятника і довжину підвісу. Занести дані вимірів до таблиці 1.

3. Зарядити метальний пристрій, стиснувши пружину разом із штоком ліворуч до фіксації штока. Встановити в жолоб кульку, так, щоб вона дотикалась до поршня штока.

4. Натиснути в меню кнопку „Пуск". Розташувати метальний пристрій щільно до отвору циліндра-пастки так, щоб вісь пристрою була горизонтальною, а маятник знаходився в положенні рівноваги. Натиснувши кнопку на корпусі пристрою, зробити постріл кулькою.

5. Після пострілу, в процесі коливального руху, відбувається вимірювання кута відхилення маятника через малі проміжки часу. На екрані монітора відображається (рис. 3.1а) графік залежності кута відхилення маятника від часу $\alpha(t)$. Після кількох повних коливань натиснути кнопку „Стоп".

6. Визначити кут максимального відхилення маятника $\alpha_{\max}$. Для цього за допомогою миші підвести курсор до необхідної точки на графіку залежності $\alpha(t)$ і натиснути ліву кнопку миші. На екрані через вказану точку пройде вертикальна жовта пряма (рис. 3.1а), а в верхньому куті екрана праворуч буде вказаний результат виміру $\alpha_{\max}$ в градусах.

7. Аналогічно до дій попереднього пункту, провести вимірювання відхилення маятника $\alpha'_{\max}$ в протилежний бік і занести результати виміру $\alpha_{\max}$ і $\alpha'_{\max}$ до таблиці 1.

Таблиця 1

№	M, кг	m, кг	ℓ, м	$\alpha_{i,\max}$, град	$\alpha'_{i,\max}$, град	$\bar{\alpha}_{i,\max}$, град	v_i, м/с	Δv_i^2, м^2/с^2
1.								
2.								
...								
5.								
							$\bar{v}$ =	$\sum_i \Delta v_i^2$ =

8. Визначити середнє значення $\bar{\alpha}_{i,\max}$ і занести до таблиці 1.

9. Визначити швидкість v_i польоту кульки за робочою формулою (3.14).

10. Виконати дії пп. 3-9 п'ять разів і результати занести до таблиці 1.

11. Визначити середнє значення швидкості $\bar{v}$ і визначити похибку Δv.

12. Зробити висновки щодо вірності визначення швидкості кульки.

Контрольні питання

1. Дати визначення імпульсу матеріальної точки, системи матеріальних точок.
2. Дати визначення моменту імпульсу матеріальної точки, системи матеріальних точок.
3. Дати визначення замкнутої системи матеріальних точок.
4. Які сили мають назву консервативних, неконсервативних?
5. Указати, які сили діють на балістичний маятник, які з них потенціальні.
6. Сформулювати закон збереження імпульсу.
7. Сформулювати закон збереження моменту імпульсу.
8. Сформулювати закон збереження енергії.
9. На якій стадії руху балістичного маятника використовується закон збереження імпульсу, а на якій закон збереження енергії?
10. Описати порядок виконання лабораторної роботи.

Література

1. И.В. Савельев. Курс общей физики. т.1. – М.: Наука, 1986, §§ 24, 27, 29.

2. Физический практикум. / Под ред. В.И. Ивероновой. – М: Гос. изд-во физ.- мат. л-ры, 1962.– 956с.

3. Опис комплекту лабораторних робіт від виробника „L-микро©".

РОЗДІЛ ІІ. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4
ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА АДІАБАТИ ПОВІТРЯ

Прилади і матеріали: а) скляний балон з сухим повітрям; б) рідинний манометр; в) ручний насос.

Мета роботи: вивчення ізопроцесів, першого закону термодинаміки і використання їх для знаходження показника адіабати повітря.

Короткі теоретичні відомості

Енергетичний баланс в термодинамічній системі визначається *першим законом термодинаміки*, який стверджує, що кількість теплоти Q, яка надана системі, витрачається на приріст внутрішньої енергії ΔU та на виконання системою роботи A над зовнішніми тілами, тобто

$$Q = \Delta U + A\,. \tag{4.1}$$

Для елементарного процесу, що протікає в молі ($m/\mu = 1$) ідеального газу, цей закон має вигляд

$$\delta Q = dU + \delta A = \frac{i}{2} R\, dT + P\, dV\,, \tag{4.2}$$

де m – маса газу; μ – молярна маса; i – число ступенів вільності; R – газова стала; T– температура; P – тиск; V – об’єм.

З (4.2) можна визначити, куди і в якій кількості витрачається тепло в різних процесах. Наприклад, в *ізотермічному* процесі ($T = const,\ dT = 0$) вся кількість теплоти витрачається на виконання механічної роботи, тобто $\delta Q = P\, dV$; в *ізохорному* ($V = const,\ dV = 0$) надане тепло витрачається на зростання внутрішньої енергії системи, оскільки $\delta Q = dU$; в *ізобарному* процесі ($P = const,\ dP = 0$) тепло витрачається як на зростання внутрішньої енергії системи, так і на виконання механічної роботи. У процесі, який відбувається без обміну теплом з навколишнім середовищем, тобто в *адіабатному* процесі $\delta Q = 0$, тому з (4.2) випливає, що $\delta U = -PdV$. Це означає, що внутрішня енергія адіабатно ізольованої системи збільшується при виконанні над нею роботи і зменшується , якщо робота виконується самою системою.

Оскільки *теплоємністю* C тіла називається кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання тіла на $1K$, тобто для елементарного процесу

$$C = \frac{\delta Q}{dT}\,, \tag{4.3}$$

то очевидно, що теплоємність залежить від характеру термодинамічного процесу, тобто в різних процесах її величина різна. Так, наприклад, в ізохорному процесі при $V = const$ молярна теплоємність дорівнює

$$C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT}\right)_V = \frac{i}{2}\frac{RdT}{dT} = \frac{i}{2}R\,, \tag{4.4}$$

В ізобарному процесі $P = const$, тому з рівняння Клапейрона $PV = RT$ випливає, що в елементарному процесі $PdV = RdT$. Отже, молярна теплоємність в цьому процесі дорівнює

$$C_P = \left(\frac{\delta Q}{dT}\right)_P = \frac{dU + PdV}{dT} = \frac{iRdT/2 + RdT}{dT} = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R\,. \tag{4.5}$$

З (4.4) і (4.5) випливає, що знайдені молярні теплоємності зв'язані співвідношенням

$$C_P = C_V + R\,. \tag{4.6}$$

Отже, теплоємність в ізобарному процесі більша, ніж теплоємність в ізохорному процесі, тобто $C_P > C_V$. Їх відношення дорівнює

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}\,. \tag{4.7}$$

Для ідеальних газів це відношення практично не залежить від температури і визначає функціональні залежності параметрів стану *P*, *V* і *T*. В адіабатному процесі, вони мають вигляд

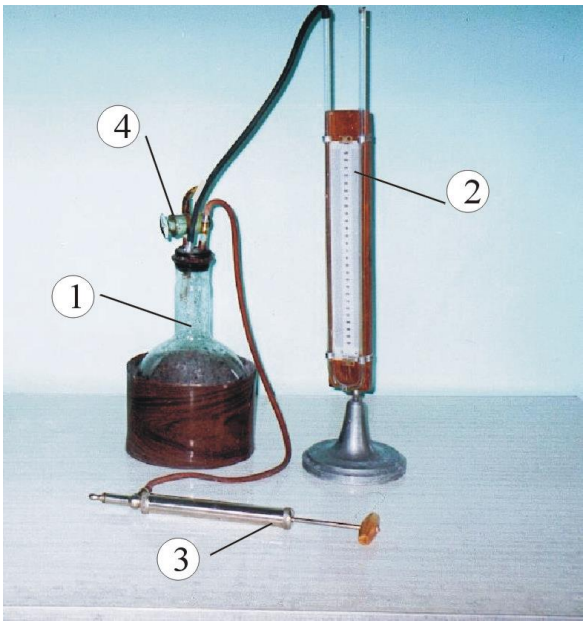
$$PV^{\gamma} = const\,, \tag{4.8}$$

$$TV^{\gamma-1} = const\,, \tag{4.9}$$

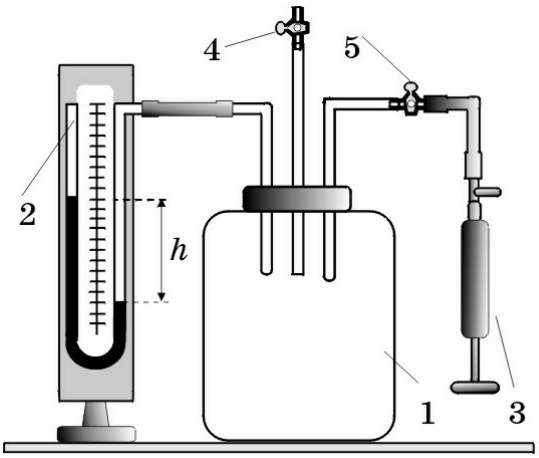
$$TP^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = const\,, \tag{4.10}$$

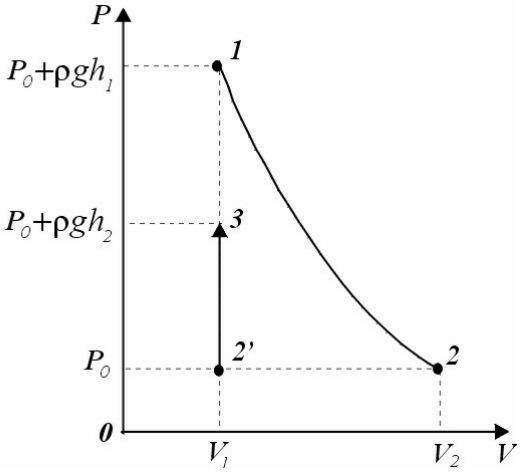
де величина $\gamma = C_P/C_V$ має назву *показника адіабати*. Оскільки $\gamma > 1$, то із рівняння (4.8) випливає, що при адіабатному стисненні газ нагрівається, а при адіабатному розширенні – охолоджується.

Опис лабораторної роботи



а)





б) в)

Рис. 4.1 — Загальний вигляд (а) лабораторної установки, її схема (б) та графічне зображення процесів (в) на P-V діаграмі:

1 – балон; 2 – рідинний манометр; 3 – ручний насос; 4, 5 – крани

Для визначення показника адіабати використовується лабораторна установка, зовнішній вигляд якої показаний на рис. 4.1а, а її схема на рис. 4.1б. Основними її елементами є: балон 1 з сухим повітрям, рідинний манометр 2 (гасовий, спиртовий або водяний) та ручний насос 3. Для регулювання величини тиску повітря в балоні призначений крани 4,5 . Для визначенняпоказника адіабати треба, щоб на деякій стадії досліду відбувався адіаба-

тичний процес. У вихідному стані кран 4 установки відкритий, тому температура T_1 дорівнює кімнатній, а тиск P_0 в балоні атмосферний .

Зауважимо, що оскільки тиск вимірюється рідинним манометром, то коли тиск як зовні так і в балоні атмосферний (P_0), стовпчики рідини в манометрі знаходяться на однаковій висоті. Якщо ж тиск у балоні більший за атмосферний, то його надлишок над атмосферним буде пропорційний різниці рівнів h (див.рис. 4.1б), а саме – рівний ρgh, де ρ – густина рідини, а g – прискорення вільного падіння.. Тоді очевидно, що величина тиску в балоні дорівнює $P_0 + \rho gh$.

Закриємо кран 4, що з'єднує балон з атмосферою, і відкриємо кран 5, що з'єднує балон з насосом 3. За допомогою насоса будемо нагнітати повітря в балон, доки різниця висот стовпчиків рідини в манометрі не досягне приблизно 80-150 мм. У результаті нагнітання повітря його тиск і температура в балоні зростуть. Закриємо кран 5 і зачекаємо кілька хвилин, доки в результаті теплообміну з навколишнім середовищем температура в балоні не стане кімнатною T_1. Зафіксувати цей момент можна за рідинним манометром, в якому рівень рідини під час встановлення рівноваги буде змінюватись (h буде зменшуватись), а при досягненні рівноваги різниця рівнів стабілізується і досягне деякого значення h_1. Цей стан (стан 1) повітря у балоні приймемо за початковий і запишемо його параметри в вигляді

Стан 1	**Об'єм**	**Тиск**	**Температура**
(до розширення)	V_1	$P_1 = P_0 + \rho gh_1$	T_1

На рис. 4.1в цьому стану відповідає точка 1.

Реалізуємо адіабатний процес, відкривши кран 4 на короткий час, доки рівні рідини в манометрі не вирівняються, і, зразу ж після цього, закриємо його. Оскільки в цьому випадку відбувається розширення повітря з балона за короткий час, то можна вважати, що за цей час теплообмін з навколишнім середовищем дуже малий, тому процес розширення можна вважати адіабатним. В умовах відсутності теплообміну, робота розширення виконується за рахунок внутрішньої енергії газу (повітря), тому температура повітря в балоні понизиться до деякої температури $T_2 < T_1$, а тиск впаде до атмосферного P_0. Цей стан (стан 2) повітря у балоні буде характеризуватись наступними параметрами:

Стан 2	**Об'єм**	**Тиск**	**Температура**
(після розширення)	V_2	$P_2 = P_0$	T_2

На рис. 4.1в цьому стану відповідає точка 2.

В адіабатному процесі стани 1 і 2 зв'язує рівняння

$$P_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_1 = P_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_2 \qquad (4.11)$$

або

$$\left(P_0 + \rho g h_1\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_1 = P_0^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_2 . \qquad (4.12)$$

На графіку (рис. 4.1в) цей процес можна зобразити адіабатою 1-2 в координатах *P,V*.

Оскільки температура T_2 в закритому балоні після адіабатного розширення нижча за кімнатну T_1, газ в ньому буде нагріватись унаслідок теплообміну з навколишнім середовищем, а тиск буде підвищуватись. Процес нагрівання відбувається при незмінному об'ємі, тобто є ізохорним. Оскільки після адіабатичного розширення газу до деякого об'єму V_2 (точка 2 на рис. 4.1в) балон закрили, то ізохорне нагрівання відбувається з об'ємом V_1 газу (з точки $2'$ на рис. 4.1в). Цей процес буде супроводжуватись рухом рідини в манометрі, який припиниться, досягши деякої різниці рівнів h_2, коли температура в балоні досягне кімнатної T_1. Цей стан (стан 3) буде описуватись параметрами

Стан 3	**Об'єм**	**Тиск**	**Температура**
(після ізохорного нагрівання)	V_1	$P_2 = P_0 + \rho g h_2$	T_1

На рис. 4.1в цьому стану відповідає точка 3, а перехід із стану $2'$ в стан 3 описується рівнянням ізохорного процесу у вигляді

$$\frac{P_0}{T_2} = \frac{P_0 + \rho g h_2}{T_1} . \qquad (4.13)$$

Підстановка (4.12) в (4.13) дає

$$\left(\frac{P_0 + \rho g h_1}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{P_0 + \rho g h_2}{P_0} . \qquad (4.14)$$

Логарифмуючи цей вираз, одержимо

$$\frac{\gamma-1}{\gamma} \ln\left(1 + \frac{\rho g h_1}{P_0}\right) = \ln\left(1 + \frac{\rho g h_2}{P_0}\right). \qquad (4.15)$$

Враховуючи, що $\rho g h_1 / P_0 \ll 1$ і $\rho g h_2 / P_0 \ll 1$, використаємо наближену формулу для визначення логарифма $\ln(1+x) \approx x$. Тоді, із (4.15) маємо

$$\frac{\gamma-1}{\gamma}\frac{\rho g h_1}{P_0}=\frac{\rho g h_2}{P_0}. \qquad (4.16)$$

Остаточно, з останнього рівняння знаходимо

$$\gamma=\frac{h_1}{h_1-h_2}. \qquad (4.17)$$

У результаті показник адіабати можна визначити, вимірюючи різницю рівнів h_1 в манометрі до адіабатичного розширення і різницю рівнів h_2, яка буде досягнута після ізохорного нагрівання повітря.

Завдання:

а) виміряти початкове (h_1) значення різниці рівнів у рідинному манометрі перед адіабатним розширенням та кінцеве (h_2) значення різниці рівнів після ізохорного нагрівання;

б) розрахувати за формулою (4.17) показник адіабати повітря та оцінити похибки;

в) порівняти теоретичне та експериментально знайдене значення показника адіабати, зробити висновок щодо їх збіжності.

Порядок виконання роботи

1. Відкривши кран 4, що з'єднує балон з навколишнім середовищем, впевнитись за рідинним манометром, що тиски зовні і всередині балона однакові.

2. Закривши кран 4, відкрити кран 5, що з'єднує балон з насосом, і обережно, запобігаючи витісненню рідини з манометра, нагнітати повітря в балон, доки різниця рівнів в манометрі не досягне 10-20 см.

3. Після цього закрити кран 5 і дочекатись, поки рух рідини в манометрі не припиниться, що відповідає досягненню в балоні кімнатної температури. Виміряти і записати досягнуту різницю рівнів h_1.

4. Відкривши на короткий час (до вирівнювання рівнів рідини в манометрі) кран 4, зразу ж закрити його.

5. Після цього дочекатись, коли рух рідини в манометрі припиниться, що відповідає досягненню в балоні кімнатної температури. Виміряти і записати досягнуту різницю рівнів h_2.

6. Визначити показник адіабати γ за формулою (4.17).

7. Повторити дослід 5-7 разів.

8. Одержані експериментальні дані занести до таблиці.

9. Обчислити середнє значення показника адіабати $\overline{\gamma}$ та абсолютну похибку $\Delta\gamma$.

10. Результат вимірювань записати у вигляді $\gamma=\overline{\gamma}\pm\Delta\gamma$.

Таблиця

№	h_1, мм	h_2, мм	$h_1 - h_2$, мм	γ_i	$(\Delta\gamma_i)^2 10^{-6}$	$\Delta\gamma_{вип}$	$\Delta\gamma_{сист}$	$\Delta\gamma$
1								
2								
. . .								
				$\bar{\gamma} =$	$\sum(\Delta\gamma_i)^2 =$			

Контрольні питання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Дайте формулювання першого закону термодинаміки.
3. Які процеси реалізуються в лабораторній роботі?
4. Який процес має назву ізохорного? Яка залежність між параметрами стану в цьому процесі?
5. Який процес має назву адіабатного? Яка залежність між параметрами стану в цьому процесі?
6. Запишіть перший закон термодинаміки для адіабатного та ізохорного процесів.
7. Дайте визначення теплоємності тіла, питомої та молярної теплоємностей.
8. Як визначити теоретичне значення показника адіабати?
9. Запишіть вираз для молярної теплоємності C_V в ізохорному процесі.
10. Запишіть вираз для молярної теплоємності C_p в ізобарному процесі.
11. Який зв'язок між теплоємностями в ізобарному та ізохорному процесі?
12. Чому для розріджених газів $C_p > C_V$?
13. Який фізичний зміст універсальної газової сталої R?
14. Який хід виконання лабораторної роботи?

Література.

1. И.В. Савельев. Курс общей физики. т.1.– М.: Наука, 1977. – 416с. §§ 82-89.

2. Физический практикум. / Под ред. В.И.Ивероновой. – М: Гос. изд-во физ.- мат. л-ры, 1962.- 956с.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5
ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

Прилади і матеріали: а) трубка з рідиною і сталевою кулькою; б) електромагніт; в) основа з датчиками; г) пластина для установки датчиків; д) вимірювальний блок; г) блок живлення.

Мета роботи: вивчення явищ переносу і експериментальне визначення коефіцієнта в'язкості рідини.

Короткі теоретичні відомості

Важливою особливістю довільної макросистеми (газоподібні, рідкі та тверді тіла) є те, що при виведенні системи зі стану рівноваги вона буде намагатись знову перейти до стану рівноваги. Виникнення нерівноважного стану часто проявляється в наявності градієнтів параметрів системи, тому сам перехід до стану рівноваги супроводжується виникненням потоків, характер яких залежить від природи нерівноважного стану і полягає в перенесенні частинок, імпульсу, тепла, електричного заряду та інших величин. Такі нерівноважні процеси називають *явищами перенесення*. До них відносяться, наприклад, *теплопровідність, дифузія та внутрішнє тертя.*

Зокрема, явище внутрішнього тертя (в'язкість) спостерігається, коли в рідині або газі швидкість течії в різних місцях середовища різна. В цьому випадку перехід до рівноважного стану буде полягати в процесі вирівнювання швидкості, який має назву внутрішнього тертя або в'язкості. Коротко опишемо механізм цього процесу.

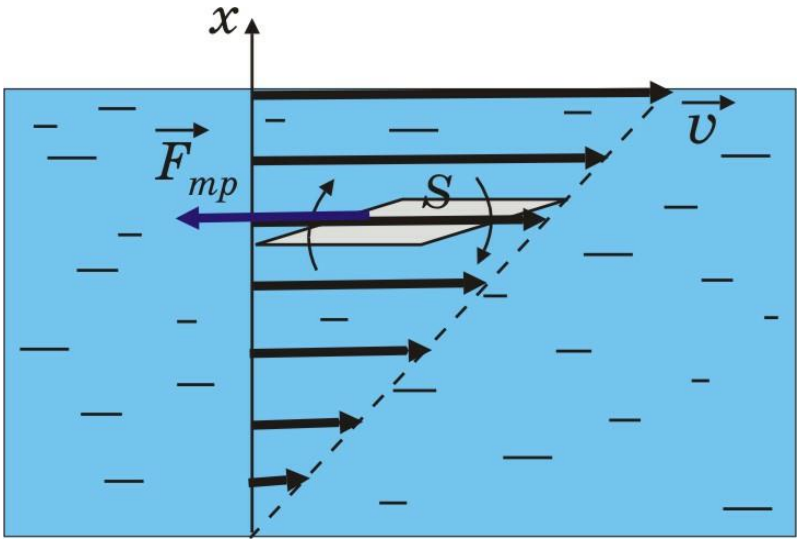


Рис. 5.1 — Розподіл швидкості в течії

Для спрощення будемо вважати, що вектор швидкості рідини (газу) буде мати однаковий напрямок у всіх перерізах течії (рис. 5.1), але модуль вектора швидкості змінюється лише в одному напрямі (вісь x), перпендикулярному до напрямку течії, тобто $v = v(x)$. Тоді через довільний переріз S

(рис. 5.1), перпендикулярний до площини рисунка, за рахунок теплового руху із шару, який рухається з більшою поступальною швидкістю, молекули переходять до шару, що рухається з меншою швидкістю і навпаки. В результаті шари течії обмінюються імпульсами, передача яких відбувається в напрямку осі *x*, за рахунок чого і відбувається вирівнювання швидкостей шарів, оскільки верхній шар буде прискорювати нижній, а нижній буде гальмувати верхній. Тоді можна підрахувати імпульс, що переноситься за одиницю часу в напрямку осі *x* через одиничну площу. Але, згідно з другим законом Ньютона, зміна імпульсу за одиницю часу – це є сила. Ця сила є *сила тертя*, що виникає між шарами рідини, що рухаються з різними швидкостями. Цим і обумовлена назва явища – внутрішнє тертя.

Підрахунки і дослід показують, що *сила внутрішнього тертя*, яка діє на одиницю площі поверхні, що розділяє сусідні шари, пропорційна градієнту швидкості dv/dx і дорівнює

$$f = -\eta \frac{dv}{dx}, \tag{5.1}$$

де коефіцієнт η має назву *коефіцієнта внутрішнього тертя або коефіцієнта динамічної в'язкості*. За фізичним змістом коефіцієнт внутрішнього тертя показує, як швидко передається імпульс із шару в шар, а кількісно він дорівнює величині імпульсу, що передається за одиницю часу через одиничну площадку при одиничному градієнті швидкості. З другого боку, коефіцієнт в'язкості чисельно дорівнює силі, що діє на одиницю площі поверхні, що розділяє сусідні шари при одиничному градієнті швидкості. Тому, за одиницю в'язкості в системі СІ приймається коефіцієнт в'язкості такої речовини (рідини або газу), в якій за градієнта швидкості, рівного одиниці (1с^{-1}), через площу в 1м^2 за час 1с переноситься імпульс в 1кгм/с. Отже, коефіцієнт в'язкості в СІ вимірюється в одиницях $\text{кг/м}\cdot\text{с} = \text{Па}\cdot\text{с}$.

Коефіцієнт в'язкості в газах і рідинах має різну природу. Так, згідно з елементарною кінетичною теорією для ідеального газу

$$\eta = \frac{1}{3}\rho \bar{v} \bar{\ell}, \tag{5.2}$$

де ρ – густина газу; $\bar{v}$ – середня швидкість теплового руху молекул; $\bar{\ell}$ – середня довжина вільного пробігу молекул. В (5.2) $\rho = nm$, де n – концентрація молекули, а m – її маса; $\bar{v} \square \sqrt{T}$, $\bar{\ell} \square 1/n$. Тому очевидно, що коефіцієнт ідеального газу не залежить від тиску і пропорційний $\sqrt{T}$. Цей висновок підтверджується експериментально для розріджених газів. Зокрема, (див. табл. 4 додатку II) коефіцієнт в'язкості газів за температури $20^\circ C$ і атмосферних

умов (101,3 кПа) має порядок $10^{-5}\,\text{Па}\cdot\text{с}$. Наприклад, в'язкість повітря – $1{,}82\cdot10^{-5}\,\text{Па}\cdot\text{с}$, кисню – $2{,}02\cdot10^{-5}\,\text{Па}\cdot\text{с}$, а водню – $0{,}88\cdot10^{-5}\,\text{Па}\cdot\text{с}$.

В'язкість реальних газів може залежати від тиску та температури і визначається відхиленням стану газу від ідеального. У рідинах в'язкість визначається також міжмолекулярною взаємодією. В загальному випадку в'язкість рідин падає з ростом температури і росте при збільшенні тиску. В деяких органічних рідинах (наприклад, гліцерин) при підвищенні температури в'язкість може падати дуже швидко. Зокрема, в'язкість води при температурі $20^\circ C$ складає $1{,}002\pm0{,}001\,\text{мПа}\cdot\text{с}$ і це значення приймається за еталон. При зниженні температури густина в'язкої рідини зростає і вона перетворюється в аморфне тіло (наприклад, каніфоль).

Якщо у в'язкій рідині або газі рухається тіло, то на нього діє сила опору. В загальному випадку вона залежить від різних факторів: в'язкості рідини, форми тіла, швидкості руху тіла та ін., тому гідродинамічний розрахунок величини сили опору досить складний. Але для тіл, що рухаються досить повільно, можна вважати, що сила опору пропорційна першому степеню швидкості v і із міркувань розмірності можна знайти вираз для неї, який має вигляд

$$F_{\text{оп}} = A\eta L v, \tag{5.3}$$

де L – характерний розмір тіла, A – безрозмірний множник, що залежить від форми тіла, його орієнтації відносно потоку рідини і одержується за більш строгими розрахунками. Так, для найпростішого випадку тіла сферичної форми Стокс обчислив, що множник $A = 6\pi$, якщо за характерний розмір взяти радіус R кульки. Тоді сила опору буде визначатись за *формулою Стокса*, яка має вигляд

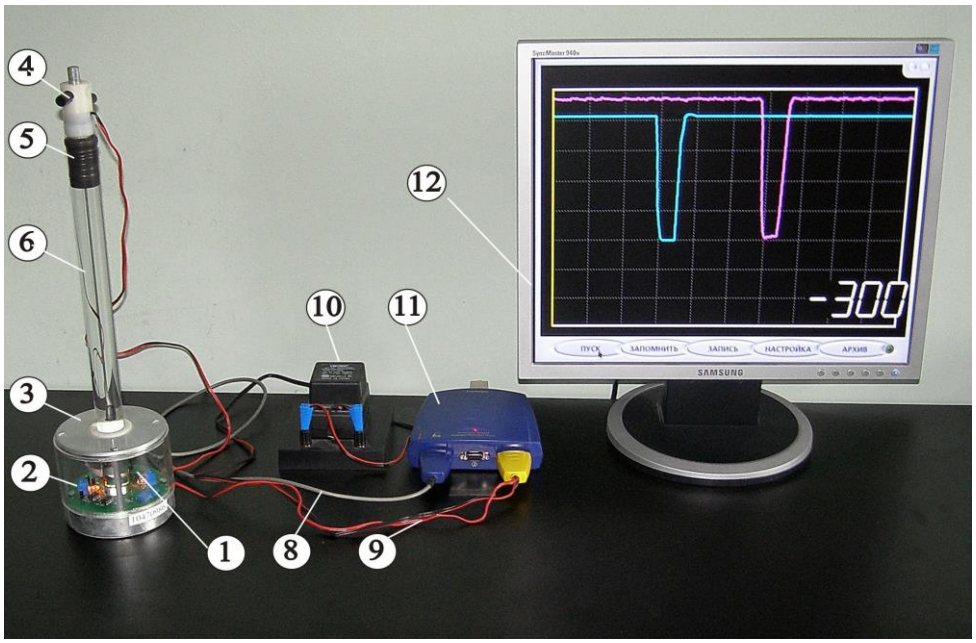
$$F_{\text{оп}} = 6\pi\eta R v. \tag{5.4}$$

Те, що сила опору залежить від коефіцієнта в'язкості, дає можливість визначити його за результатами досліду.

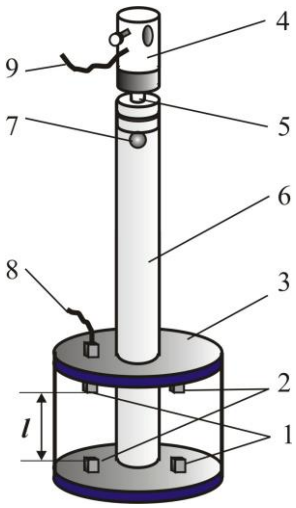
Опис лабораторної роботи

Вимірювання коефіцієнта в'язкості рідини виконується на лабораторній установці, зовнішній вигляд якої показано на рис. 5.2а, а її схематичне зображення – на рис. 5.2б. Основним елементом установки є прозора трубка 6 з рідиною, в якій може рухатись сталева кулька 7. Фіксація кульки в верхньому положенні трубки (рис. 5.2б) здійснюється за допомогою пускового пристрою: електромагніту 4 та магнітопроводу 5. Якщо після фіксації кульки встановити трубку вертикально і вимкнути електромагніт, то кулька буде падати в рідині. Для виміру швидкості кульки трубка поміщена в корпус 3, що має два оптоелектричних датчики (верхній і нижній), які розміщені на фіксованій відстані l один від одного. Кожний складається з світлодіода (джерело світла) та фотодіода (приймач світла). Якщо кулька при падінні

перетинає промінь світлодіода, то відбувається падіння сигналу фотодіода, що фіксується на дисплеї монітора (рис. 5.2а). Оскільки на дисплеї монітора зображена залежність інтенсивності сигналу верхнього і нижнього фотодіодів від часу, то це дозволяє виміряти проміжок часу, протягом якого кулька рухалась від верхнього датчика до нижнього.



а



б

Рис. 5.2 ─ Зовнішній вигляд (а) лабораторної роботи та її схематичне зображення (б):

1 – світлодіод; 2 – фотодіод; 3 – корпус; 4 – електромагніт; 5 – магнітопровід; 6 – трубка з рідиною; 7 – сталева кулька; 8 – кабель датчиків; 9 – кабель електромагніту; 10 – джерело живлення нагрівача; 11 – вимірювальний блок: 12 – монітор

Метод вимірювання коефіцієнта в'язкості базується на розгляді руху кульки при її падінні в рідині (газі). У цьому випадку на кульку діють (рис. 5.3) три сили: вертикально донизу – сила тяжіння

$$\vec{P} = m\vec{g},$$

де m – маса кульки, а $\vec{g}$ – прискорення вільного падіння; вертикально догори – сила Архімеда $\vec{F}_A$ та сила опору $\vec{F}_{оп}$. Рівняння руху кульки має вигляд

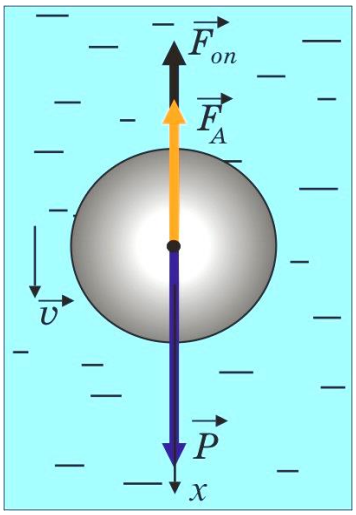


Рис. 5.3 – Схема дії сил на кульку, що падає в рідині

$$m\vec{a} = \vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_{оп}, \tag{5.5}$$

де $\vec{a}$ – прискорення кульки. В цьому рівняння сила тяжіння за величиною дорівнює

$$P = mg = \rho_м Vg = \rho_м \frac{4}{3}\pi R^3 g, \tag{5.6}$$

де $\rho_м$ – густина матеріалу кульки; V – її об'єм; R – радіус кульки. Вираз для величини сили Архімеда записується аналогічно

$$F_A = \rho Vg = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g, \tag{5.7}$$

де ρ – густина рідини.

Якщо кулька рухається досить повільно, то величина сили опору $F_{оп}$, що діє з боку рідини на тіло, яке має форму кулі, визначається за формулою Стокса (5.4). Тоді рівняння (5.5) в проекціях на напрямок руху буде мати вигляд

$$ma = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_м g - \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g - 6\pi\eta R v. \qquad (5.8)$$

Зауважимо, що на початку руху кульки сила тяжіння за величиною більша за суму сил Архімеда та опору ($P > F_A + F_{оп}$), тому рух кульки прискорений. Але, згідно з (5.4), сила опору при зростанні швидкості також зростає і досить швидко наступає момент, коли наступить рівновага сил $P - F_A - F_{оп} = 0$. З цього моменту рух кульки буде рівномірним ($a = 0$) і рівняння руху (5.8) запишеться у вигляді

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_м g = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g + 6\pi\eta R v. \qquad (5.9)$$

З (5.9) одержимо вираз для коефіцієнта в'язкості

$$\eta = \frac{2R^2 g\left(\rho_м - \rho\right)}{9v}. \qquad (5.10)$$

Якщо експериментально визначити швидкість кульки v, то всі інші величини в рівнянні (5.10) легко знайти: геометричний розмір кульки (R) вимірюється безпосередньо, табличні ($\rho_м$, ρ) чи метрологічні (g) дані відомі до досліду.

Швидкість кульки v у формулі (5.10) визначається експериментально. Оскільки верхній і нижній датчики розміщені в кінцевій частині трубки з рідиною, то рух кульки між ними буде рівномірний, тому її швидкість визначається за формулою

$$v = \frac{l}{\Delta t}, \qquad (5.11)$$

де l – фіксована відстань між верхнім та нижнім датчиками; Δt – проміжок часу, протягом якого кулька рухалась від верхнього датчика до нижнього. Підставивши (5.11) в (5.10) одержимо робочу формулу

$$\eta = \frac{2R^2 g\left(\rho_м - \rho\right)}{9l}\,\Delta t \qquad (5.12)$$

для експериментального визначення коефіцієнта в'язкості.

Завдання:

а) визначити час проходження кульки між верхнім і нижнім датчиками декілька разів;

б) визначити експериментальне значення коефіцієнта в'язкості;

в) порівняти метрологічне та експериментально визначене значення коефіцієнтів в'язкості.

Порядок виконання роботи

1. Підготуватись до роботи. Для цього необхідно зібрати установку і під'єднати вимірювальні кабелі. У вікні монітора відкрити програму „L-физика практикум", в меню програми натиснути пункт „Вибор работы" і у вікні, що відкриється, в наведеному переліку лабораторних робіт натиснути назву „Измерение вязкости жидкости методом Стокса". Після цього, для переходу до вимірів натиснути кнопку «Проведение измерений», що приведе до відкриття вікна виконання лабораторної роботи і вмикання електромагніту пускового пристрою.

2. Занести до таблиці даних радіус кульки R, відстань l між датчиками, густину матеріалу кульки $\rho_м$ та густину рідини ρ відповідно.

3. Витягнути трубку з корпусу і перевернути трубку так, щоб кулька, падаючи вертикально донизу, торкнулась до магнітопроводу пускового пристрою. Після цього помістити трубку в корпус.

4. Натиснути кнопку „Пуск" в меню роботи для початку реєстрації даних і спостерігати за падінням кульки.

5. Після проходження кулькою верхнього і нижнього датчиків на екрані монітора буде зафіксоване зображення (рис. 5.2а) залежності фотоструму від часу для верхнього і нижнього датчиків відповідно. Кожна з них має характерний мінімум, що свідчить про проходження кульки повз відповідний датчик. Користуючись курсором, визначте час руху кульки між датчиками. Для цього підведіть курсор до точки, що відповідає середині мінімуму сигналу від верхнього датчика, і натисніть ліву кнопку миші. На екрані виникне вертикальна жовта лінія, що проходить через вибрану точку, а в нижньому правому кутку буде вказаний час, що відповідає цій точці. Занести це значення часу t_1 до таблиці. Після цього аналогічно визначити і занести в таблицю час t_2, що відповідає середині мінімуму сигналу від нижнього датчика.

Таблиця

№	R, м	l, м	ρ, кг/м^3	ρ_M, кг/м^3	t_1, с	t_2, с	Δt, с	η_i, $\frac{кг}{м \cdot с}$	$\Delta\eta_i$, $\frac{кг}{м \cdot с}$
1. 2. . .									
								$\bar{\eta} =$	$\sum_i \Delta\eta_i^2 =$

6. За даними таблиці розрахувати за формулою (5.12), коефіцієнт в'язкості рідини і занести результат до таблиці.

7. Провести дослід п'ять разів, повторюючи дії пунктів 3-6. Живлення електромагніта вмикається автоматично після завершення чергового запису даних.

8. За даними таблиці розрахувати середній коефіцієнт в'язкості $\bar{\eta}$ рідини та похибку вимірювання $\Delta\eta$.

9. Порівняти експериментально знайдене значення $\bar{\eta}$ з метрологічним для даної рідини і зробити висновки.

Контрольні питання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Які явища мають назву явищ перенесення?
3. В чому полягає явище в'язкості і за яких умов воно виникає?
4. Яка фізична величина переноситься при в'язкості ?
5. Чи є явище в'язкості рівноважним процесом?
6. Від яких параметрів залежить сила внутрішнього тертя?
7. Який фізичний сенс коефіцієнта в'язкості?
8. Як залежить коефіцієнт в'язкості різних речовин від тиску та температури?
9. Вказати хід виконання лабораторної роботи.
10. Як впевнитись у вірності проведених вимірів коефіцієнта в'язкості?

Рекомендована література

1. И.В. Савельев. Курс общей физики. т.1.– М.: Наука, 1977. – 416с., §§ 128-130.

2. А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. Молекулярная физика. .– М.: Наука, 1976. – 480с., §§ 48,49.

3. Физический практикум. / Под ред. В.И.Ивероновой. – М: Гос.изд-во физ.- мат. л-ры, 1962.– 956с.

4. Опис комплекту лабораторних робіт від виробника „L-микро©".

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6
ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОВІТРЯ

Прилади і матеріали: а) штатив; б) прилад для вимірювання теплопровідності повітря; в) вимірювальний блок; г) блок живлення; д) сталева пластина; е) резистор 20 Ом.

Мета роботи: вивчення явищ переносу і експериментальне визначення коефіцієнта теплопровідності повітря.

Короткі теоретичні відомості

Важливою особливістю довільної макросистеми (газоподібні, рідкі та тверді тіла) є те, що при виведенні системи зі стану рівноваги вона буде намагатись знову перейти до стану рівноваги. Виникнення нерівноважного стану приводить до наявності градієнтів параметрів системи, а сам перехід супроводжується виникненням потоків, характер яких залежить від природи нерівноважного стану і проявляється в перенесенні частинок, імпульсу, тепла, електричного заряду та інших величин. Такі нерівноважні процеси називають *явищами перенесення*. До них відносяться, наприклад, *теплопровідність, дифузія та внутрішнє тертя.*

Зокрема, явище теплопровідності полягає у виникненні перенесення теплоти від більш нагрітих частин макросистеми до менш нагрітих, яке продовжується, доки температура не стане однаковою. Механізм цього процесу обумовлений хаотичним тепловим рухом частинок (молекул, атомів, електронів) системи: частинки з більш нагрітих частин системи, стикаючись в процесі теплового руху з частинками сусідніх, менш нагрітих частин системи, передають їм частину своєї енергії.

Якщо температура не змінюється на відстанях порівняних з середньою довжиною пробігу частинки і перенесення тепла відбувається в одному напрямку (вісь *x*), то кількість теплоти ΔQ, що переноситься через площу ΔS, перпендикулярну до вісі *x*, за час Δt дорівнює

$$\Delta Q = -k\frac{dT}{dx}\Delta S\Delta t, \qquad (6.1)$$

де k – коефіцієнт теплопровідності; $\frac{dT}{dx}$ – градієнт температури. Знак мінус показує, що тепло переноситься в напрямку зменшення температури.

Із (6.1) випливає, що *коефіцієнт теплопровідності* k *чисельно дорівнює кількості теплоти, що переноситься через перпендикулярну до напрямку перенесення одиницю поверхні, за одиницю часу, при одиничному градієнті температур*. Поряд з кількістю теплоти може визначатись *тепловий потік:*

$$\Phi = -k\frac{dT}{dx}\Delta S, \qquad (6.2)$$

тобто кількість теплоти, що переноситься через площу ΔS, перпендикулярну до напрямку перенесення за одиницю часу, або *питомий тепловий потік*

$$q = -k\frac{dT}{dx}, \qquad (6.3)$$

тобто кількість теплоти, що переноситься через одиничну площу, перпендикулярну до напрямку перенесення за одиницю часу. Останнє рівняння має назву *рівняння Фур'є*.

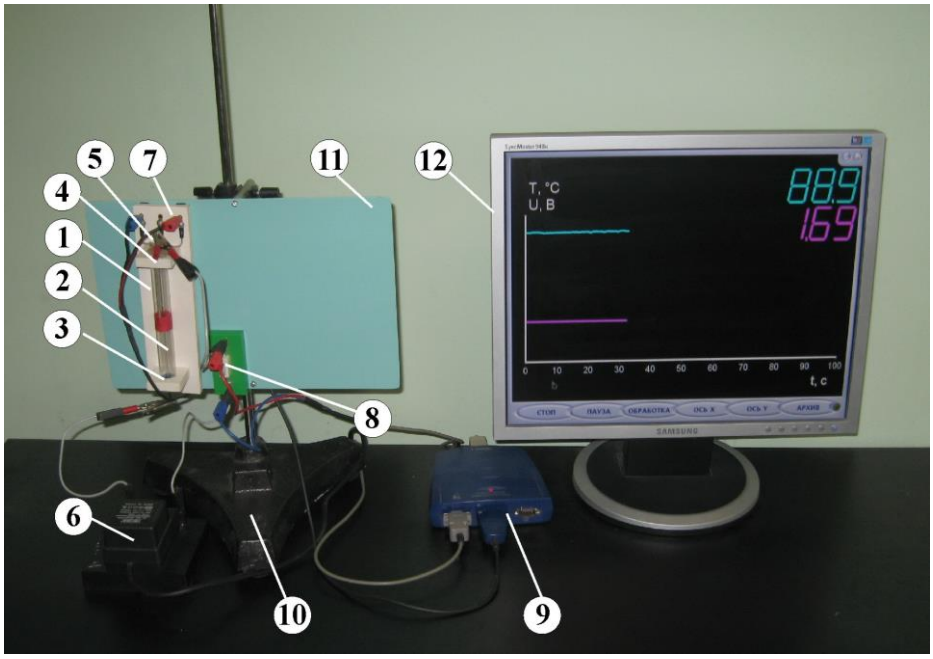
Коефіцієнт теплопровідності характеризує спроможність речовин передавати теплоту і в СІ він вимірюється в $\text{Дж}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{К})$ або $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Для різних речовин механізм теплопровідності має різну природу і тому в них коефіцієнт теплопровідності має різну залежність від тиску і температури. Так, згідно з елементарною кінетичною теорією для ідеального газу

$$k = \frac{1}{3}\bar{v}\bar{\ell}\rho c_V, \qquad (6.4)$$

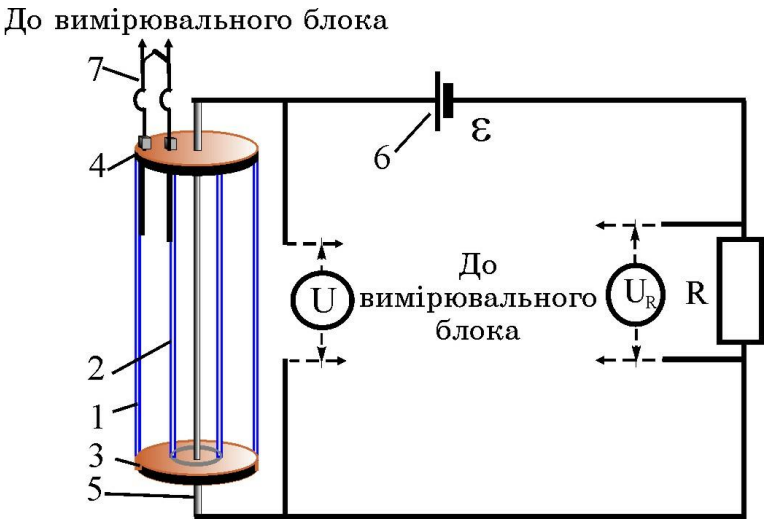
де $\bar{v}$ – середня швидкість теплового руху молекул; $\bar{\ell}$ – середня довжина вільного пробігу молекул; ρ – густина газу; c_V – питома теплоємність газу за сталого об'єму *V*. Оскільки $\bar{v} \sim \sqrt{T}$, $\bar{\ell} \sim 1/n$, де n – концентрація молекул і $\rho \sim n$, то з (6.4) очевидно, що коефіцієнт теплопровідності ідеального газу не залежить від тиску і пропорційний $\sqrt{T}$. В реальних газах він є складною функцією температури і тиску і, загалом, з їх зростом також зростає. Але при низьких тисках, коли середня довжина вільного пробігу молекули перевищує розмір посудини, k пропорційний тиску і зменшується при зменшенні тиску. Цю властивість використовують в різновидах термосів, що мають порожнисті стінки, в яких тиск повітря в порожнинах досить низький. В рідинах коефіцієнт теплопровідності слабо зменшується з ростом температури і слабо збільшується з ростом тиску. В твердих тілах він визначається типом твердого тіла (діелектрик, метал, напівпровідник), оскільки від цього залежить механізм теплопровідності. Наприклад (див. табл. 5 додатку II) , коефіцієнт теплопровідності азоту, кисню і повітря за $0^\circ C$ і тиску 101325 Па дорівнює $0{,}024\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. За кімнатної температури коефіцієнт теплопровідності дерева складає $0{,}13-0{,}42\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, скла — $0{,}59-0{,}75\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, цегли — $0{,}6-0{,}8\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, сталі — $46\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

Опис лабораторної роботи

Вимірювання коефіцієнта теплопровідності повітря виконується на лабораторній установці, зовнішній вигляд якої наведений на рис. 6.1.а.



а



б

Рис. 6.1 ─ Зовнішній вигляд (а) лабораторної роботи та схема електричного кола (б) роботи:

1, 2 – коаксиальні циліндри; 3, 4 – пробки; 5 – дротина; 6 – блок живлення; 7 – диференціальна термопара; 8 – резистор; 9 – вимірювальний блок; 10 – штатив; 11 –сталева пластина; 12 – монітор.

Основним елементом її є прилад, схема якого наведена на рис. 6.1б. Прилад складається з двох коаксіальних скляних циліндрів 1 і 2 однакової висоти, які з торців закриті тепло- та електроізолюючими пробками 3 і 4. Уздовж осі циліндрів крізь внутрішній циліндр і пробки протягнута дротина 5, що може нагріватись електричним струмом від блока живлення 6. Якщо ввімкнути джерело, то тепловий потік буде спрямований від нитки в навколишній простір через обидва циліндри. Загалом передача енергії може відбуватись за рахунок трьох процесів – теплопровідності, конвекції та випромінювання. Щоб передача теплоти відбувалась без вкладу конвекції, циліндри розміщують вертикально і закривають пробками 3 і 4. На зовнішній поверхні внутрішнього циліндра 2, що нагрівається до температури T_2, та внутрішній поверхні зовнішнього циліндра 1, що нагрівається до температури T_1, знаходяться контакти диференціальної термопари 7, яка вимірює різницю температур $\Delta T = T_2 - T_1$. Дослід показує, що температура внутрішнього циліндра не перевищує 100° С, тому процесом передачі енергії через випромінювання можна знехтувати.

Спочатку тепловий потік через циліндри буде зростати (відповідно буде зростати ΔT. Але з часом встановиться стаціонарний тепловий потік за якого $\Delta T = \text{const}$. Використаємо цю обставину для визначення коефіцієнта теплопровідності повітря. Будемо вважати, що між циліндрами 1 і 2 встановився стаціонарний (незмінний в часі) тепловий потік, в якому передача теплоти від однієї циліндричної поверхні до іншої за всіма напрямками відбувається однаково, тобто вздовж кожного радіального напрямку (вісь r) згідно з рівнянням Фур'є (6.3) маємо

$$q = -k\frac{dT}{dr}. \tag{6.5}$$

Кількість теплоти, що надходить за одиницю часу від внутрішнього циліндра r_1 до зовнішнього циліндра радіусом r_2, повністю пройде через будь-яку циліндричну поверхню радіусом r і висотою, рівною висоті циліндрів h. Це означає, що повний тепловий потік не залежить від радіуса циліндричної поверхні і його можна обчислити за виразом (6.2), врахувавши, що площа циліндра дорівнює $\Delta S = 2\pi rh$. Тоді одержимо

$$\Phi = q\,2\pi rh. \tag{6.6}$$

Помноживши ліву та праву частини рівняння (6.5) на $2\pi rh$, маємо

$$2\pi rhq = -2\pi rh \cdot k\frac{dT}{dr} \tag{6.7}$$

або

$$\Phi = -2\pi rh \cdot k\frac{dT}{dr}. \tag{6.8}$$

Це диференціальне рівняння можна розв'язати методом розділення змінних. Для цього запишемо рівняння (6.8) у вигляді

$$\Phi \frac{dr}{r} = -2\pi hk \cdot dT . \qquad (6.9)$$

У лівій частині рівняння (6.9) – тільки змінна r, а у правій – тільки змінна T, тому, інтегруючи в лівій частині від r_1 до r_2, а у правій – від T_1 до T_2, маємо

$$\Phi \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi hk \int_{T_1}^{T_2} dT , \qquad (6.10)$$

звідки знаходимо

$$\Phi \left(\ln r_2 - \ln r_1 \right) = -2\pi hk \left(T_2 - T_1 \right). \qquad (6.11)$$

Враховуючи, що $\ln r_2 - \ln r_1 = \ln\left(r_2 / r_1 \right)$, і зважаючи, що $\Delta T = T_2 - T_1$, одержимо

$$\Phi = -\frac{2\pi hk \cdot \Delta T}{\ln\left(r_2 / r_1 \right)} . \qquad (6.12)$$

Ця формула визначає тепловий потік від першого циліндра до другого за рахунок теплопровідності. Він буде дорівнювати тепловій потужності P, що виділяється у внутрішньому циліндрі внаслідок нагрівання дротяної нитки електричним струмом, тобто

$$\Phi = P = IU , \qquad (6.13)$$

де U – напруга на дротині, а I – сила струму у колі. Сила струму визначається за законом Ома після вимірювання напруги U_R на відомому опорі R (рис. 6.1б).

Тоді, з (6.12) і (6.13), маємо

$$IU = \frac{2\pi hk \cdot \Delta T}{\ln\left(r_2 / r_1 \right)} . \qquad (6.14)$$

З цього рівняння, що відображає баланс енергії, коефіцієнт теплопровідності повітря дорівнює

$$k = \frac{IU \ln\left(r_2 / r_1 \right)}{2\pi h \cdot \Delta T} . \qquad (6.15)$$

Формула (6.15) є розрахунковою для визначення коефіцієнта теплопровідності повітря в лабораторній роботі. Значення I, U та ΔT вимірюються комп'ютерною вимірювальною системою, а величини r_1, r_2 і h вимірюються до проведення експерименту.

Завдання:

а) добитися стаціонарного режиму теплопередачі в лабораторній установці та виміряти ΔT, U та I;

б) визначити експериментальне значення коефіцієнта теплопровідності;

в) порівняти метрологічне та експериментально визначене значення коефіцієнтів теплопровідності повітря.

Порядок виконання роботи

1. Підготуватись до роботи. Для цього необхідно зібрати установку і під'єднати вимірювальні кабелі. У вікні монітора відкрити програму „L-физика практикум", в меню програми натиснути пункт „Выбор работы" і у вікні, що відкриється, в наведеному переліку лабораторних робіт натиснути назву „Измерение теплопроводности воздуха" . Після цього, для переходу до вимірів, натиснути кнопку «Проведение измерений», що приведе до відкриття вікна виконання лабораторної роботи.

2. В цьому вікні натиснути кнопку «Пуск» меню для початку реєстрації даних.

3. Увімкнути блок живлення в мережу. На екрані монітора комп'ютера буде спостерігатись (рис. 6.1а) залежність різниці температур ΔT поверхонь циліндрів від часу та залежність напруги U_R від часу (вимір величин ΔT і U_R виконується блоком 9). Окрім того, числові значення ΔT і U_R висвітлюються в правому верхньому куті екрана монітора (рис. 6.1а).

4. Занести до таблиці геометричні розміри r_1, r_2, h та значення опору R.

Таблиця

r_1, м	r_2, м	h, м	R, Ом	ΔT, град	U_R, B	U, B	η, Вт/(м·град)

5. Як тільки значення ΔT перестає змінюватись (що відповідає досягненню стаціонарного режиму теплопередавання) різницю температур ΔT і значення напруги U_R необхідно внести до таблиці вимірів.

6. Відімкнути роз'єми вимірювального кабелю від виводів резистора R та підключити їх до нагрівального елемента (джерела струму). Виміряти напругу U на нагрівачі і занести до таблиці одержані дані.

7. Розрахувати силу струму в колі нагрівача за законом Ома для ділянки кола $I = U_R / R$.

8. Розрахувати значення коефіцієнта теплопровідності повітря за виразом (6.15), використовуючи параметри установки і одержані дані, та визначити похибки вимірювань.

9. Порівняти експериментально одержане значення коефіцієнта теплопровідності повітря з метрологічним значенням.

Контрольні питання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Які явища мають назву явищ перенесення?
3. В чому полягає явище теплопровідності і за яких умов воно виникає?
4. Яка фізична величина переноситься при теплопровідності?
5. Чи є явище теплопровідності рівноважним процесом?
6. Навести вираз рівняння Фур'є та пояснити його зміст.
7. Дати визначення коефіцієнта теплопровідності.
8. Як залежить коефіцієнт теплопровідності різних речовин від тиску та температури?
9. Вказати хід виконання лабораторної роботи.
10. Як впевнитись у вірності проведених вимірів коефіцієнта теплопровідності?

Рекомендована література.

[1]. И.В. Савельев. Курс общей физики. т.1.– М.: Наука, 1977. – 416с. §§ 128, 129, 131.

[2]. Физический практикум. / Под ред. В.И.Ивероновой. – М: Гос.изд-во физ.- мат. л-ры, 1962.– 956с.

[3]. Опис комплекту лабораторних робіт від виробника „L-микро©".

РОЗДІЛ III. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7
ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Прилади і матеріали: 1) металевий лист на ізоляційній основі; 2) джерело струму; 3) датчики сили струму та напруги; 4) зонд; 5) вимірювальний блок.

Мета роботи: вивчення законів електростатичної взаємодії та вимірювання характеристик електричного поля стаціонарного струму.

Короткі теоретичні відомості

Відомо, що нерухомий електричний заряд змінює навколишній простір так, що на внесений в цей простір інший електричний заряд діє сила. В цьому випадку кажуть, що електричний заряд створює в навколишньому просторі *електричне поле, яке є посередником, через який і відбувається взаємодія електричних зарядів*. Разом з речовиною, електричне поле є одним із видів матерії і реально існує в кожній точці простору навколо зарядженого тіла незалежно від того, чи є в цій точці інші тіла. Воно має енергію, імпульс та інші властивості.

Так, електричне поле нерухомих зарядів (електростатичне поле) можна охарактеризувати розподілом у просторі двох величин: силової характеристики – *напруженості* $\vec{E}(x,y,z)$ *електростатичного поля* та енергетичної характеристики – *потенціалу* $\varphi(x,y,z)$ *електростатичного поля*, що мають фіксовану величину в кожної точці (x,y,z) простору.

Зокрема, напруженість $\vec{E}$ електростатичного поля в даній точці – це сила, яка діє на одиничний позитивний точковий заряд, що поміщений в дану точку простору. Згідно з визначенням, вона дорівнює

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \tag{7.1}$$

де $\vec{F}$ – сила, що діє на нерухомий заряд величиною q. Наприклад, якщо поле створюється точковим зарядом q, напруженість на відстані r від заряду дорівнює за величиною

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}, \tag{7.2}$$

де ε_0 – електрична стала, ε – діелектрична проникність середовища, що оточує заряд q. Для графічного опису поля напруженості використовуються лінії напруженості (силові лінії). *Силова лінія* – це лінія, дотична до якої в

кожній точці співпадає за напрямком з вектором напруженості поля в даній точці. Силові лінії починаються на позитивних і закінчуються на негативних зарядах, а їх густина пропорційна величині напруженості поля.

Потенціал φ електростатичного поля в даній точці визначається роботою, яка виконується при переміщенні одиничного додатного заряду з даної точки на нескінченність. Згідно з визначенням він дорівнює

$$\varphi = \frac{A}{q}, \tag{7.3}$$

де A – робота переміщення заряду q з даної точки на нескінченність. Так, наприклад, якщо поле створюється точковим зарядом q, потенціал на відстані r від заряду дорівнює за величиною

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}. \tag{7.4}$$

Для графічного опису поля потенціалу використовуються *еквіпотенціальні поверхні або лінії* – тобто геометричне місце точок, які мають однаковий потенціал.

Оскільки напруженість і потенціал описують одне і те ж поле – електростатичне, то між ними існує зв'язок. Аналітично він виражається співвідношенням

$$E_l = -\frac{\partial\varphi}{\partial l}, \tag{7.5}$$

де E_l – проекція напруженості на довільний напрямок (заданий вектором $d\vec{l}$), що дорівнює похідній потенціалу вздовж цього напрямку, взятій з протилежним знаком. Отже, якщо потенціал вздовж деякого напрямку (наприклад, вздовж еквіпотенціальної поверхні) не змінюється, тобто $\partial\varphi/\partial l = 0$, то складова напруженості E_l вздовж цього напрямку дорівнює нулю. Це означає, що вектор напруженості $\vec{E}$ і, відповідно, силова лінія нормальні до еквіпотенціальної поверхні (лінії) в кожній її точці.

Реальні електростатичні поля в електронних приладах значно складніші, ніж поля точкових зарядів, тому теоретичне визначення розподілу напруженості і потенціалу в них ускладнюється. В цьому випадку дослідження електростатичного поля проводиться експериментально.

Зручним способом дослідження розподілу потенціалу електростатичного поля в просторі є поміщення в досліджувану точку поля електрода-зонда, з'єднаного з приладом, який вимірює одержаний зондом потенціал відносно деякої точки, що вибрана за початок відліку потенціалу (або за

нуль потенціалу). Але для такого способу вимірювання необхідно створити належні умови. По-перше, електрод-зонд не повинен збурювати електростатичне поле в точці, що досліджується. По-друге, якщо електростатичне поле створюється в непровідному середовищі, то передача зонда потенціалу не може відбуватись*), оскільки в такому середовищі немає умов для натікання (стікання) електричних зарядів на зонд (із зонда). Тому на практиці дослідження електростатичного поля заміняють дослідженням електричного поля стаціонарного (сталого в часі) струму в провідному середовищі, де існують умови для натікання (стікання) заряду.

В основі цього методу лежить той факт, що електричне поле стаціонарного струму в однорідному провідному середовищі є потенціальним. Якщо при проходженні постійного струму розподіл зарядів на поверхні провідника не змінюється, а об'ємні заряди відсутні, то електричне поле таких зарядів є електростатичним, тобто потенціальним.

Дійсно, в провідній речовині густина струму $\vec{j}$ зв'язана з напруженістю електричного поля $\vec{E}$ законом Ома в диференціальній формі

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \tag{7.6}$$

де σ – питома електропровідність провідного середовища. Таким чином, вектор напруженості $\vec{E}$ і вектор густини струму $\vec{j}$ співпадають за напрямком. Оскільки поле струму характеризується лініями струму, до яких вектор $\vec{j}$ дотичний, а електричне поле характеризується силовими лініями, до яких дотичний вектор $\vec{E}$, то в цьому випадку лінії струму і силові лінії співпадають. Отже, поле постійного струму в провідному середовищі моделює електростатичне поле.

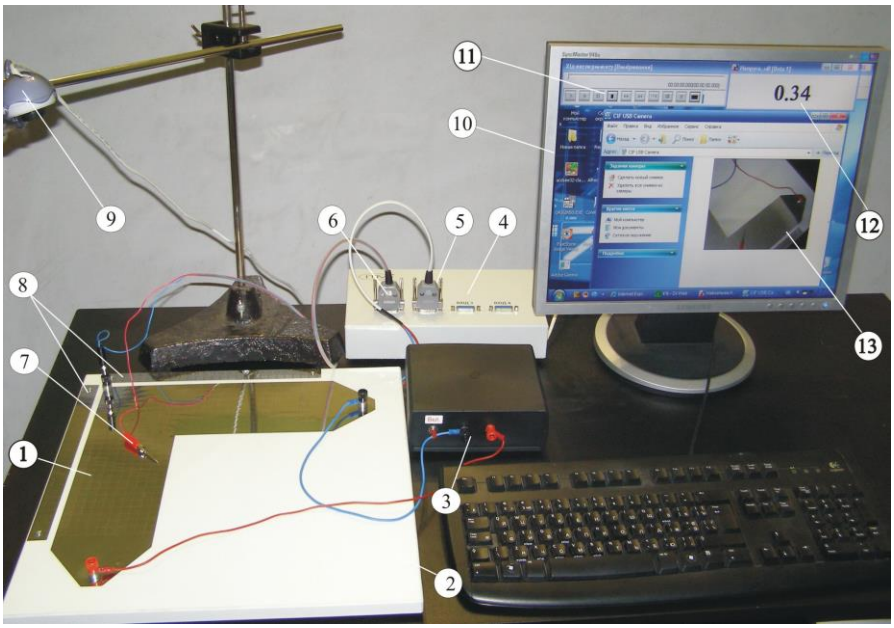
На практиці провідне середовище поміщають між двома електродами, зміною форми і розміщення яких можна добитись необхідного розподілу стаціонарного електричного поля. Електродом-зондом служить металевий стержень, на який натікають (стікають) заряди. За його допомогою можна дослідити розподіл потенціалу в провідному середовищі і побудувати графічно еквіпотенціальні лінії. Потім, використавши той факт, що силові лінії нормальні до еквіпотенціальних ліній, можна побудувати їх розподіл в середовищі, визначити напрям вектора $\vec{E}$, а за виразом (7.5) його модуль у вибраних точках середовища. Після цього за виразом (7.6) легко знайти величину та напрямок густини струму $\vec{j}$ в цих точках.

*) В цьому випадку використовують спеціальні зонди, що створюють місцеву іонізацію середовища, наприклад, за допомогою полум'я.

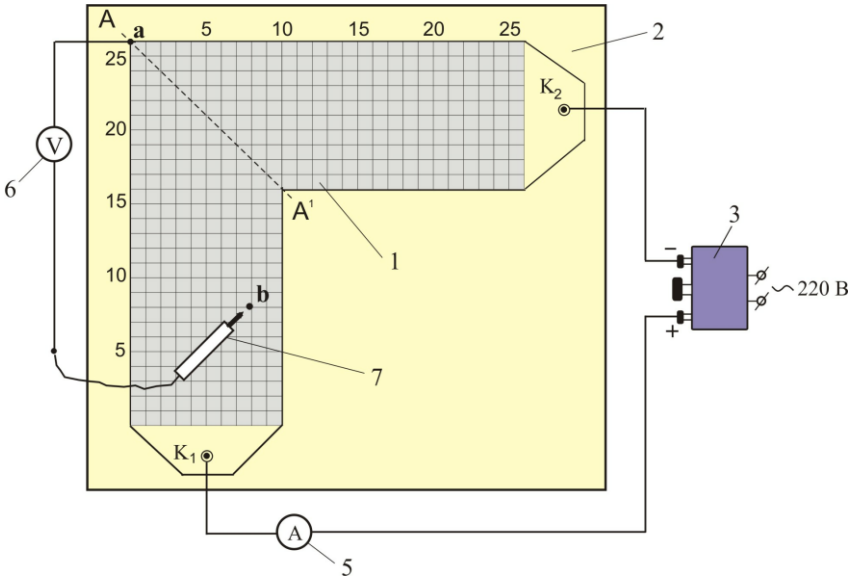
Опис лабораторної роботи

.

Зовнішній вигляд та схема лабораторної установки наведені на рис. 7.1.



а



б

Рис. 7.1 — Зовнішній вигляд (а) та схема (б) лабораторної установки:
1 — металевий лист; 2 — ізоляційна основа; 3 — джерело струму; 4 — вимірювальний блок; 5 — датчик сили струму; 6 — зонд; 7, 8 — лінійки; 9 — веб-камера; 10 — монітор; 11 — вікно керування дослідом; 12 — вікно мілівольтметра; 13 — вікно веб-камери

У ній досліджується електричне поле постійного струму в металевому листі 1 (рис. 7.1), що закріплений на ізоляційній основі 2. Воно створюється за допомогою електричного кола, що містить джерело постійного струму 3,

металевий лист 1, який з'єднується з колом через клеми K_1 і K_2 та амперметр (датчик сили струму) 5. За допомогою джерела струму 3 і амперметра 5 встановлюється та контролюється сила струму в колі протягом виконання роботи.

Для виміру потенціалу даної точки листа 1 служить електричне коло, що складається з вольтметра (датчика напруги) 6 і зонда 7. Датчики сили струму та напруги з'єднані з вимірювальним блоком 4, що сполучений з комп'ютером. Результати вимірювання відображаються на дисплеї монітора 10 в цифровому вигляді. Після дотику зондом довільної точки (наприклад, точки *b* листа на рис. 7.1б) за показами вольтметра можна визначити різницю потенціалів між нею і точкою, до якої під'єднаний вольтметр (точка *a*). Оскільки точка *a* лежить на осі симетрії AA' листа 1, яка є лінією нульового потенціалу, то вольтметр вимірює потенціал точки *b*, що відрахований від нуля. Щоб вимірювання зондом не впливали на електричне поле листа (тобто, не змінювали потенціал в точці дотику), необхідно, щоб електричний опір вимірювального кола був значно більшим, ніж опір ділянки листа між точками *a* і *b*.

Дотикаючись зондом різних точок листа, можна, за показами вольтметра, знайти сукупність точок, на яких потенціал однаковий, і за результатами цих вимірів побудувати графічно еквіпотенціальні лінії. Після побудови еквіпотенціальних ліній можна визначити наближено напруженість електричного поля в різних точках металевого листа. Як видно з (7.5), напруженість обчислюється за формулою

$$|E| = \frac{|\Delta\varphi|}{\Delta l}, \tag{7.7}$$

де $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ – різниця потенціалів між сусідніми еквіпотенціальними лініями поблизу заданої точки; Δl – відстань між цими лініями, що виміряна вздовж лінії напруженості, яка проходить через дану точку.

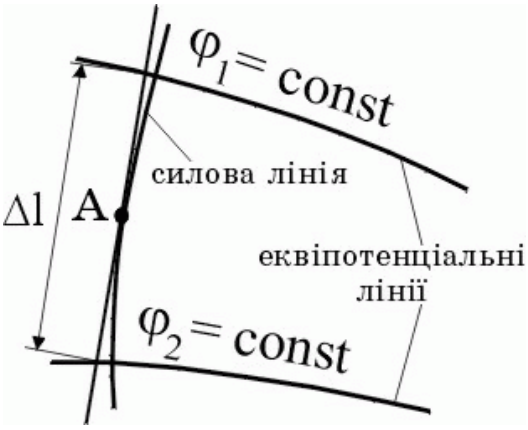


Рис. 7.2 – Приклад побудови ліній напруженості електричного поля струму

Приклад побудови, за якою відбувається обчислення напруженості в (7.7), показаний на фрагменті графічного зображення поля струму (рис. 7.2).

Завдання:

а) за даними вимірювань побудувати графічно сукупність еквіпотенціальних поверхонь та силових ліній поля постійного струму;

б) визначити за результатами графічної побудови напрямок та величину напруженості $\vec{E}$ електричного поля, напрямок та величину густини струму $\vec{j}$ в точках, що вказані викладачем.

Порядок виконання роботи

1. Підготуватись до виконання роботи. Для цього складіть електричне коло за схемою рис. 7.1б. Вимірювальний блок повинен бути під'єднаний до комп'ютера, джерело струму вимкнено.

2. Завантажити програму „ІТМ" проведення вимірювань. У відкритому вікні „Навчальна лабораторія ІТМ" вибрати і натиснути „Робота з вимірювальним приладом". Після відкриття вікна „Новий експеримент" вибрати і натиснути „Проведення". В результаті відкриється вікно „Хід експерименту" і вікна „Амперметр" і „Вольтметр".

3. Якщо процес вимірювань спостерігається на кількох робочих місцях, активізувати роботу веб-камери.

4. Увімкніть джерело струму 3, прогрійте лист 2-3 хвилини і за показами амперметра визначте силу струму в колі.

5. Перенесіть контури нижньої половини металевого листа на міліметровий папір в масштабі 1:1.

6. Знайдіть розподіл потенціалу на нижній половині листа 1. Для цього зонд переміщують вздовж лівої граничної вертикалі поверхні листа в напрямку від точки *a* на осі AA' вниз (в напрямку від поділки 25 до поділки 0) і знаходять, за показами вольтметра, точку з величиною потенціалу 0,2 мВ. Відмітивши цю точку на міліметровому папері, знаходять точки з такою ж величиною потенціалу на сусідніх вертикалях, переміщуючи щоразу зонд на одну поділку праворуч і відмічаючи всі точки на міліметровому папері. Виміри закінчити на границі листа праворуч. Плавно з'єднавши експериментальні точки, накреслити еквіпотенціальну лінію з величиною потенціалу $\varphi = 0,2$ мВ.

7. Аналогічно до пункту 6, дослідити експериментально та побудувати на міліметровому папері еквіпотенціальні лінії, що відповідають величинам потенціалу 0,4 мВ, 0,6 мВ, 0,8 мВ,1,0 мВ.

8. За розподілом еквіпотенціальних ліній побудувати (з інтервалом через дві поділки) розподіл силових ліній електричного поля, що нормальні до еквіпотенціальних ліній.

9. У вказаних викладачем точках металевого листа визначити напрямок векторів $\vec{E}$ і $\vec{j}$ та їх модулі за експериментально одержаним графічним зображенням поля та за формулами (7.5) і (7.6) відповідно.

Контрольні питання

1. Дайте визначення напруженості електростатичного поля.
2. Яке поле має назву потенціального?
3. Дайте визначення потенціалу електростатичного поля.
4. Які способи опису використовуються для графічного зображення електростатичного поля?
5. Дайте визначення силової лінії електростатичного поля.
6. Дайте визначення еквіпотенціальної поверхні (лінії).
7. Який аналітичний зв'язок між напруженістю і потенціалом електростатичного поля?
8. Як взаємно орієнтовані силова лінія і еквіпотенціальна поверхня?
9. Дайте визначення густини струму.
10. Наведіть вираз закону Ома в диференціальній формі.
11. Як зв'язані між собою напрямки векторів густини струму $\vec{j}$ і напруженості електричного поля $\vec{E}$?
12. Які величини визначаються у лабораторній роботі?
13. Як будуються еквіпотенціальні та силові лінії у лабораторній роботі?
14. Як визначається величина та напрямок напруженості електричного поля у довільній точці поля стаціонарного струму?
15. Чому еквіпотенціальні лінії повинні бути перпендикулярні до бокових границь листа?

Література

1. И.В. Савельев. Курс общей физики. т.2.– М.: Наука, 1988. – 496с., §§ 5, 6, 8.

2. Опис комплекту лабораторних робіт від виробника „ІТМ©".

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8
ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖЕННЯ ТА РОЗРЯДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРА

Прилади і матеріали: 1) джерело струму; 2) резистор; 3) конденсатор; 4) датчики сили струму та напруги; 5) вимірювальний блок.

Мета роботи: вивчення властивостей RC-кіл на прикладі зарядження і розрядження конденсатора та експериментальне визначення величини невідомих опору та ємності конденсатора.

Короткі теоретичні відомості

В електричних колах сила струму та падіння напруги можуть у загальному випадку змінюватись в часі, тому необхідно визначити, за яких умов можна використовувати закони, які були встановлені для постійного струму, а за яких ні. Дослід і теорія показують, що закони постійного струму можна використовувати, якщо зміна сили струму в колі відбувається не дуже швидко. Такий підхід справедливий за двох умов.

По-перше, відомо, що якщо всередині провідника виник електричний заряд, то під дією створеного ним же електричного поля він буде зменшуватись за експоненціальним законом (релаксувати) і час, за який його величина зменшується в e = 2,72 рази, має назву *часу діелектричної релаксації* $\tau_м$ і він визначає проміжок часу, за який відновлюється стаціонарність електричних процесів у колі. Тоді, якщо час T, за який відбувається зміна сили струму в колі, набагато більший, ніж час діелектричної релаксації ($\tau_м \ll T$), то система встигає релаксувати і можна вважати, що в даний момент часу сила струму (падіння напруги) у всьому колі однакова.

По-друге, електричне збурення розповсюджується в колі з швидкістю $v = c/\sqrt{\varepsilon\mu}$, де c – швидкість світла у вакуумі, а ε і μ – діелектрична та магнітна проникності середовища відповідно. Якщо довжина кола ℓ, то час, за який електричне збурення перетне весь контур, дорівнює $\tau = \ell/v = \ell\sqrt{\varepsilon\mu}/c$. Очевидно, що за умови $\tau \ll T$ можна також вважати, що в даний момент часу сила струму (падіння напруги) у всьому колі однакові.

Отже, якщо в колі відбувається зміна струму і виконуються умови $\tau_м \ll T$ і $\tau \ll T$, то такий електричний процес має назву *квазістаціонарного* і можна використовувати закони, що справедливі для постійного струму. Майже всі технічні змінні струми є квазістаціонарними.

Прикладом квазістаціонарного процесу є процес зарядки і розрядки конденсатора. Розглянемо цей процес за допомогою кола (RC-коло), що зображене на рис. 8.1, яке містить джерело струму з постійною ЕРС $\mathcal{E}$, активний опір R, конденсатор C та ключ K. У положенні 1 (рис. 8.1) ключа К („зарядження”) відбувається зарядка конденсатора через значний активний опір

R до значення ЕРС джерела струму. При перемиканні ключа в положення 2 відбувається розрядка конденсатора через той же активний опір.

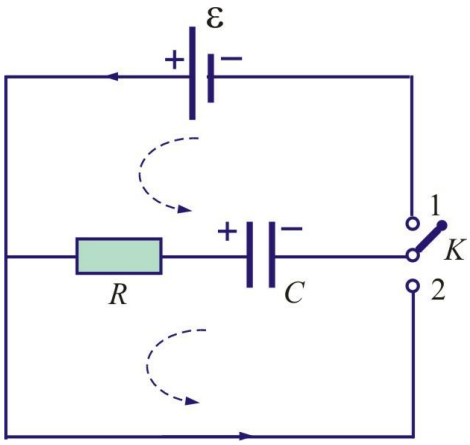


Рис. 8.1 ─ Електрична схема кола зарядження-розрядження конденсатора

Визначимо залежність заряду від часу $q(t)$ та сили струму $I(t)$ в процесі зарядки конденсатора. Для цього застосуємо другий закон Кірхгофа до кола $\mathcal{E}\ RC\ \mathcal{E}$. Згідно з законом сума падінь напруги у замкненому колі дорівнює сумі всіх ЕРС, що є в контурі. Нехтуючи падінням напруги на внутрішньому опорі джерела струму, маємо

$$U_R + U_C = \varepsilon, \tag{8.1}$$

де $U_R = IR$ − падіння напруги на активному опорі, а $U_C = q/C$ − падіння напруги на конденсаторі. Оскільки сила струму $I = dq/dt$, то в (8.1) одержимо

$$R\frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = \varepsilon. \tag{8.2}$$

Це рівняння можна привести до зручної для подальшого інтегрування форми

$$\frac{dq}{\varepsilon C - q} = \frac{dt}{RC}. \tag{8.3}$$

Якщо за проміжок часу від 0 до t заряд зростає від 0 до q, то інтегрування в (8.3) запишеться у вигляді

$$\int_0^q \frac{dq}{\varepsilon C - q} = \int_0^t \frac{dt}{RC}. \tag{8.4}$$

Після інтегрування знаходимо рівняння

$$\ln\left(\frac{\varepsilon C - q}{\varepsilon C}\right) = -\frac{t}{RC}, \tag{8.5}$$

з якого після експонування одержимо закономірність зміни заряду в часі $q(t)$ при зарядженні конденсатора у вигляді

$$q(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)\varepsilon C. \tag{8.6}$$

Легко побачити з (8.6), що при $t = 0$ заряд $q = 0$, а при $t = \infty$ заряд $q_0 \to \varepsilon C$. В останньому випадку напруга на конденсаторі зростає до значення ε.

Зміну сили струму в часі одержимо, знайшовши похідну від заряду за часом, тобто

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \tag{8.7}$$

де $I_0 = \varepsilon / R$ - це початкове значення струму при $t = 0$. З цієї залежності випливає, що сила струму зменшується з часом за експонентою (релаксує). Графік $I(t)$ наведений на рис. 8.2 (крива I). З (8.7) випливає, що через проміжок часу $t = T = RC$ сила струму зменшиться в e = 2,72 рази і стане рівною $I = I_0 / e$.

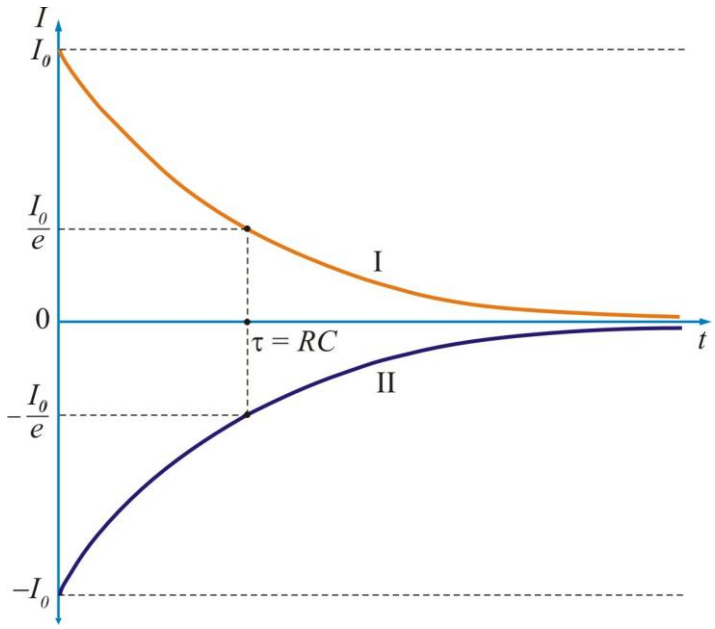


Рис. 8.2 – Графік залежності $I(t)$ для процесів зарядження (I) та розрядження (II)

При розрядженні конденсатора (ключ К в положенні 2 „розрядження”) джерело струму від’єднане, тому рівняння (8.1) має вигляд

$$U_R + U_C = 0 \tag{8.8}$$

і, після аналогічного попередньому розгляду, одержимо для заряду

$$q(t) = \varepsilon C e^{-\frac{t}{RC}} = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \tag{8.9}$$

де $q_0 = \varepsilon C$ – початковий заряд конденсатора при $t = 0$. Відповідно, залежність струму розрядження від часу буде мати вигляд

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = -\frac{q_0}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} = -I_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \tag{8.10}$$

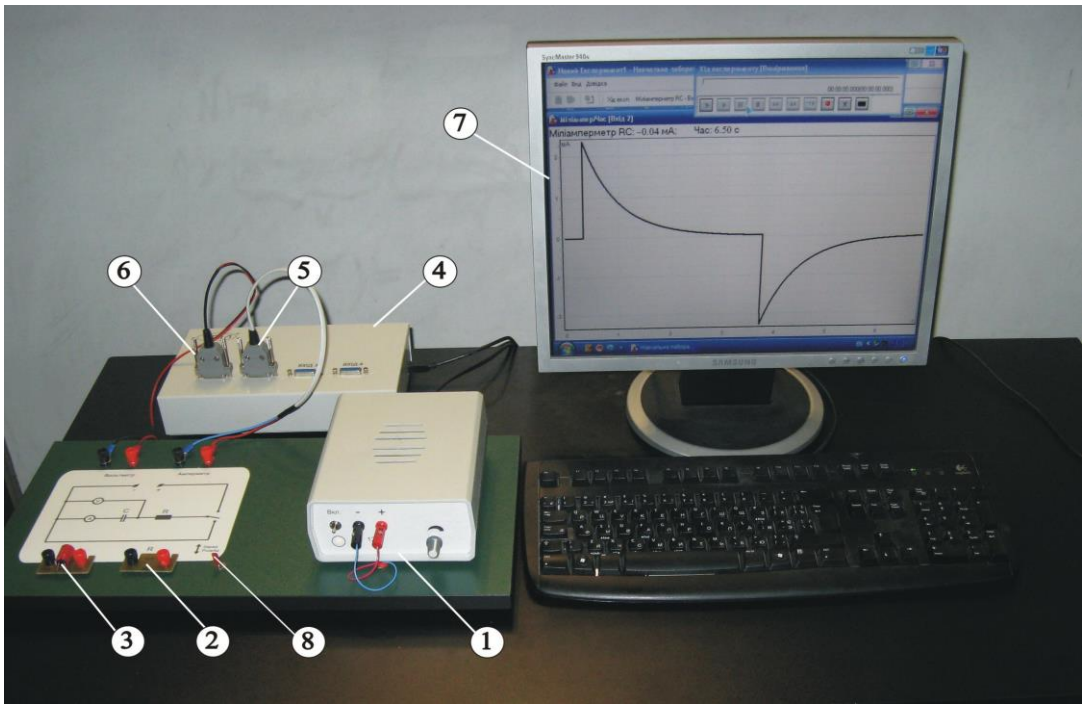
Порівнюючи вирази (8.7) і (8.10), бачимо, що залежності струму від часу при зарядженні та розрядженні конденсатора мають однакову (експоненціальну) залежність, але напрямки струму в цих процесах протилежні.

Проміжок часу $t = T = RC$ у виразах (8.6-8.7), (8.9-8.10) характеризує швидкість процесів зарядження-розрядження конденсатора і відповідно швидкість встановлення електричної рівноваги в колі. За фізичним змістом проміжок часу $T = RC$ є *час, за який сила струму змінюється* (*зменшується або зростає*) *в е = 2,72 рази*. Він має назву *сталої часу* даного контура і в СІ вимірюється в секундах. Наприклад, для контура, що має ємність C = 1 мкФ і опір R = 1 Ом, стала часу $T = 10^{-6}$ с. З одного боку час діелектричної релаксації $\tau_м$ всередині металів на кілька порядків менше T, а з другого боку, якщо вибрати орієнтовно довжину контура $\ell = 1$м, то час розповсюдження електричного збурення в ньому $\tau = 10^{-8}$ с, що на два порядки менше T. Отже, в такому колі виконуються умови $\tau_м \ll T$ і $\tau \ll T$ і електричний процес зарядження (розрядження) в ньому буде квазістаціонарний.

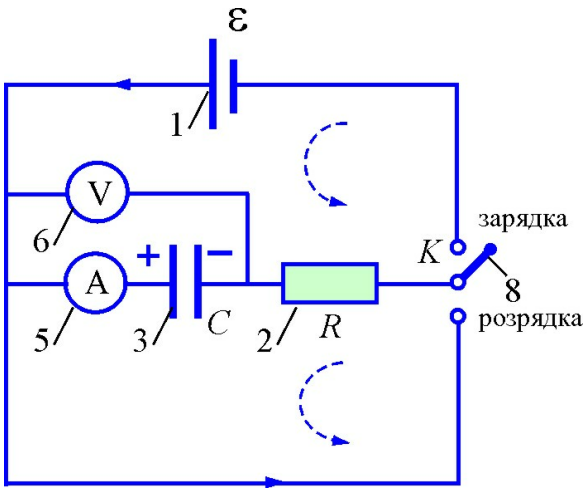
Опис лабораторної роботи

Для вивчення процесу зарядження (розрядження) конденсатора використовується лабораторна робота, зовнішній вигляд якої наведений на рис. 8.3а, а електрична схема на рис. 8.3б. Електрична схема установки відрізняється від схеми, наведеної на рис. 8.1 лише наявністю вимірювальних приладів: амперметра і вольтметра. Зарядження конденсатора 3 через опір 2 (рис. 8.3а) відбувається за допомогою джерела струму 1. Вимірювання сили струму та напруги виконується відповідними датчиками сили струму 5 та

напруги 6 (рис. 8.3а), які з'єднані з вимірювальним блоком 4, що сполучений з комп'ютером. Результати вимірювання відображаються через комп'ютер на дисплей монітора 7 у вигляді залежності $I(t)$ і (або) $U(t)$. Наприклад, на рис. 8.3а на дисплеї монітора відображена залежність $I(t)$ для процесів зарядки (перша крива, що відповідає спаду сили струму) і розрядки (наступна крива, що відповідає наростанню сили струму). Для перемикання процесів зарядки-розрядки служить ключ 8.



а



б

Рис. 8.3 — Зовнішній вигляд лабораторної роботи (а) та електрична схема (б) кола:

1 – джерело струму; 2 – резистор; 3 – конденсатор; 4 – вимірювальний блок;

5 – датчик сили струму; 6 – датчик напруги; 7 – монітор, 8 – ключ

Залежність сили струму від часу можна використати для визначення основних параметрів електричного кола – опору *R* та ємності *C*. Для цього прологарифмуємо залежність *I*(*t*) для процесу зарядки, тобто вираз (8.7). Тоді одержимо

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{1}{RC} t . \qquad (8.11)$$

Очевидно, що в координатах $(\ln I - t)$ це є рівняння прямої з від'ємним коефіцієнтом нахилу прямої, що рівний за величиною

$$k = \frac{\Delta(\ln I)}{\Delta t} = \frac{\ln I_m - \ln I_n}{t_m - t_n} = \frac{1}{RC} . \qquad (8.12)$$

де індекси *m* і *n* нумерують дві довільні точки прямої.

Тому, якщо побудувати графічно залежність $\ln I(t)$ і знайти за нею коефіцієнт нахилу прямої, то можна визначити *сталу часу*

$$T = \frac{1}{k} = RC . \qquad (8.13)$$

Пряму $\ln I(t)$ можна графічно екстраполювати до точки $t = 0$ і за значенням $\ln I(t=0) = \ln I_0$ визначити початкову силу струму I_0 [1]. Оскільки $I_0 = \varepsilon / R$, то, вимірявши напругу на джерелі струму ε, легко за відомим I_0 знайти опір, тобто

$$R = \frac{\varepsilon}{I_0} . \qquad (8.14)$$

Після цього з (8.13) за відомими *T* і *R* визначимо невідому ємність С.

Завдання:

а) одержати експериментальну залежність *I*(*t*);

б) за залежністю *I*(*t*) знайти сталу часу *T* та визначити невідомі опір *R* та ємність *C*;

в) порівняти експериментально визначені значення опору *R* і ємності *C* конденсатора з їх значеннями, що вказані виробником, та зробити висновки щодо результатів експерименту.

---

[1] Початкову силу струму загалом можна було б визначати з експериментальної залежності $I(t)$, але саме в точці $t = 0$ визначення сили струму супроводжується більшою похибкою.

Порядок виконання роботи

1. Підготуватись до виконання роботи. Для цього під'єднати опір 2 та конденсатор 3 до клем, датчики сили струму 5 і напруги 6 до вимірювального блока 4, а сам блок до увімкненого комп'ютера. Ключ 8 повинен бути в нижньому положенні „Розрядка", джерело струму вимкнене.

2. Завантажити програму „ІТМ" проведення вимірювань. У відкритому вікні „Навчальна лабораторія ІТМ" вибрати і натиснути „Робота з вимірювальним приладом". Після відкриття вікна „Новий експеримент" вибрати і натиснути „Проведення". В результаті відкриється вікно „Хід експерименту" з сіткою системи координат ($I - t$).

3. Увімкнути джерело струму і встановити напругу, за якої відбувається вимірювання (4-8 В). Значення напруги занести в таблицю.

4. У вікні „Хід експерименту", натиснути кнопку „Пуск" меню і перевести ключ в положення „Зарядка". Спостерігати за падінням сили струму на графіку залежності $I(t)$, що відображається на дисплеї монітора і при наближенні значення сили струму до нуля перевести ключ в положення „Розряд". Спостерігати процес наростання сили струму при розряді і при наближенні значення сили струму до нуля зупинити процес вимірювань натисненням кнопки „Стоп" в меню вікна „Хід експерименту". Вимкнути джерело струму.

5. Після одержання залежності $I(t)$, за допомогою маркера, що являє точку перетину горизонтальної і вертикальної прямих, вибрати 8-10 точок кривої $I(t)$ процесу зарядки (або розрядки) і записати в таблицю вимірів значення вибраних проміжків часу і відповідних їм значень сили струму.

Таблиця

№	t_i, с	U, В	I_i, мА	$\ln I_i$	$\ln I_m - \ln I_n$	$t_m - t_n$, с	k, с$^{-1}$	Т, с
1.								
2.								
. . .								

5. За даними таблиці побудувати графік залежності $\ln I(t)$ і, вибравши на ньому дві зручні для обчислень точки $(\ln I_m, t_m), (\ln I_n, t_n)$, знайти за формулою (8.12) коефіцієнт нахилу прямої k.

6. За знайденим k і формулою (8.13) знайти сталу часу T.

7. Екстраполювавши залежність $\ln I(t)$ до перетину з віссю $\ln I$, знайти значення $\ln I_0$, а за ним початкове значення сили струму I_0.

8. За формулою (8.14) знайти невідомий опір R.

9. За формулою (8.13) знайти невідому ємність *C*.

10. Порівняти визначені експериментально значення опору *R* і ємності *C* конденсатора з їх значеннями, що вказані виробником, та зробити висновки щодо результатів експерименту.

Контрольні питання

1. Дайте визначення електроємності. В яких одиницях вимірюється електроємність?
2. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола (для замкненого кола).
3. Сформулюйте закони Кірхгофа.
4. За яких умов струм у колі може вважатись квазістаціонарним?
5. За яким законом змінюється сила струму у колі при зарядженні (розрядженні) конденсатора?
6. Яка величина має назву сталої часу і який її фізичний зміст?
7. Як визначається стала часу в лабораторній роботі?
8. Як визначається невідомий опір у лабораторній роботі?
9. Як визначається невідома електроємність у лабораторній роботі?
10. Який хід виконання лабораторної роботи?

Література.

1. С.Г. Калашников. Электричество. – М.: Наука, 1985–576с., §§ 73-74.

2. Физический практикум. /Под ред. В.И. Ивероновой.– М: Гос. изд-во физ.- мат. л-ры, 1962.– 956с.

3. Опис комплекту лабораторних робіт від виробника „ІТМ©”.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9
ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Прилади і матеріали: 1) джерело постійного струму типу ВСА - 12; 2) тангенс – гальванометр; 3) амперметр до 2А типу Э513 або МВА 47/5; 4) реостат типу РПШ-5 або РСП до 3А; 5) перемикач.

Мета роботи: вивчення основних властивостей магнітного поля Землі і використання законів магнетизму для експериментального визначення однієї з його кількісних характеристик – горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі.

Короткі теоретичні відомості

Дослід показує, що в довільній точці простору навколо Землі та на її поверхні існує магнітне поле, а Земля в цілому є величезним магнітом. Полюси магнітного поля Землі не співпадають з географічними полюсами, а саме: південний магнітний полюс знаходиться поблизу північного географічного – біля північних берегів Америки (близько 75° північної широти і 101° західної довготи), північний магнітний полюс знаходиться поблизу південного географічного – (в Антарктиці, близько 67° південної широти і 140° східної довготи). Схематично магнітне поле Землі зображене за допомогою ліній вектора напруженості магнітного поля на рис. 9.1, але реальна його картина досить складна і до того ж змінюється за часом і за місцевістю. Такі зміни носять назву магнітних варіацій.

Природа утворення магнітного поля Землі, незважаючи на наявність досить чутливих методик вимірювання характеристик магнітних полів, до цього часу не встановлена, а число моделей, що запропоновані для пояснення механізму виникнення магнітного поля Землі та інших космічних тіл, нараховує більше тридцяти. Найбільш розповсюджена з них для пояснення явища планетарного магнетизму є магнітна гідродинамічна гіпотеза, запропонована І.Я. Френкелем. Згідно з нею, магнітне поле Землі виникає внаслідок механічного руху рідкої речовини в мантії Землі (шар між твердим ядром і корою Землі), яка має досить високу електропровідність внаслідок її термоіонізації. У результаті механічного руху відбувається упорядковане переміщення заряджених частинок, тобто виникає струм, що є джерелом магнітного поля. У свою чергу, переміщення в магнітному полі провідної речовини викликає появу в ній індукційних струмів, що створюють додаткове магнітне поле і т. д. Хоча гідродинамічна модель є найбільш розповсюдженою, її висновки не мають прямих експериментальних підтверджень.

Незалежно від точки зору на природу виникнення, магнітне поле Землі підлягає досить ретельному якісному та кількісному дослідженню. Кількісною характеристикою магнітного поля Землі, як і довільного магнітного

поля, служить напруженість $\vec{H}$ (магнітна індукція $\vec{B}$) або її складові, а індикатором його наявності може служити магнітна стрілка. Проведемо одну з ліній вектора напруженості (вона виділена на рис. 9.1 жирною кривою) через точку А, в якій визначається напруженість. Вектор напруженості $\vec{H}$ буде дотичний до цієї лінії в даній точці (рис. 9.1). Таке ж положення займе повздовжня вісь магнітної стрілки, якщо її вільно підвісити в точці А, так щоб центр мас співпадав з точкою підвісу.

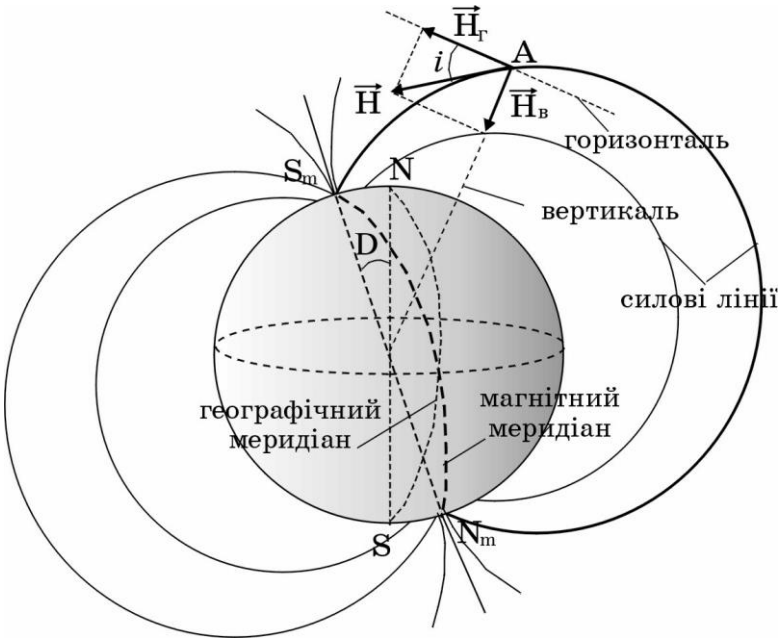


Рис. 9.1 — Схематичний приклад зображення ліній напруженості магнітного поля Землі та його основних характеристик

Якщо сумістити з виділеною лінією вертикальну площину, то вектор $\vec{H}$ (і вісь магнітної стрілки) будуть лежати в цій площині, а її перетин з поверхнею Землі утворить лінію, що має назву *магнітного меридіана* (виділений на рис. 9.1 жирною пунктирною кривою), тому сама площина носить назву *площини магнітного меридіана*. Внаслідок того, що магнітні та географічні полюси не співпадають, площина магнітного меридіана утворює з площиною відповідного географічного меридіана кут *D* (рис. 9.1), який має назву *кута магнітного схилення.* Магнітне схилення відраховується в обидва боки від географічного меридіана і має назву східного (додатного) або західного (від'ємного) в залежності від того, на захід чи на схід від географічного меридіана відхиляється північний полюс магнітної стрілки.

Проведемо через точку А вертикаль[1], з'єднавши цю точку з центром Землі (рис. 9.1), а перпендикулярно їй – горизонтальну площину. Тоді вектор $\vec{H}$ можна розкласти на дві складові: горизонтальну $\vec{H}_г$ та вертикальну

[1] В дійсності використовується прямовисна лінія.

$\vec{H}_в$. Кут i між вектором $\vec{H}$ (віссю магнітної стрілки) і горизонтальною площиною має назву *кута магнітного нахилення* (рис. 9.1). У північній півкулі вниз нахиляється північний полюс магнітної стрілки (кут нахилення має знак ”+”), в південній півкулі вниз нахиляється південний полюс магнітної стрілки (кут нахилення має знак ”–”). Оскільки при переході з північної півкулі на південну кут i змінюється за знаком, то на поверхні Землі можна виділити сукупність точок, в яких магнітне нахилення $i = 0$. Ця сукупність точок утворює магнітний екватор, площина якого перпендикулярна до магнітної осі. Величина магнітного нахилення залежить від широти і в середніх широтах $i \approx 70^\circ$. На магнітних полюсах магнітна стрілка встановлюється практично вертикально, тому в високих широтах навігація за магнітним компасом неможлива і використовується астрономічна навігація.

Хоча напрямок і величина вектора напруженості $\vec{H}$ повністю задає магнітне поле Землі в даній точці, на практиці його зручніше характеризувати трьома величинами: величиною горизонтальної складової магнітного поля Землі $H_г$, кутом магнітного нахилення i та кутом магнітного схилення *D*, які мають назву *елементів земного магнетизму*. Вказуючи значення цих величин на географічних картах, будують магнітні карти місцевості. Так, сукупність точок з однаковими значеннями кута схилення, нахилення та горизонтальної складової напруженості утворюють криві , що мають назву ізогон, ізоклин та ізодин, відповідно. За допомогою магнітної карти можна, за даними компаса, визначити положення географічного меридіана, тобто орієнтуватись на місцевості.

Як показує дослід, горизонтальна складова не перевищує за величиною $H_г = 28$ А/м. Наприклад, для середньої Європи горизонтальна скла-дова близька за значенням до $H_г \approx 16$ А/м, а вертикальна – до $H_в \approx 39{,}6$ А/м.

Зауважимо, що на земній кулі є області магнітних аномалій, в яких значення елементів земного магнетизму аномальні по відношенню до їх значень в сусідніх областях, що пов’язано з наявністю магнітного залізняка в надрах Землі (наприклад, Курська магнітна аномалія).

Відволікаючись від конкретної моделі утворення магнітного поля Землі, в першому наближенні його можна моделювати як поле однорідно намагніченої кулі. У цьому випадку на магнітних полюсах магнітне нахилення $i = 90^\circ$, тобто магнітна стрілка орієнтується вертикально, а повна напруженість $\vec{H}$ збігається з вертикальною $\vec{H}_в$. На магнітному екваторі $i = 0^\circ$, а повна напруженість $\vec{H}$ збігається з горизонтальною $\vec{H}_г$, тобто магнітна стрілка займає горизонтальне положення.

Опис лабораторної роботи

Експериментальний метод визначення $\vec{H}_г$ полягає в порівнянні дії магнітного поля Землі на магнітну стрілку, що може обертатись тільки в горизонтальній площині, з дією іншого магнітного поля, напруженість $\vec{H}_0$ якого відома. За наявності лише магнітного поля Землі магнітна стрілка, внаслідок обмеженості її руху тільки в горизонтальній площині, буде орієнтуватись уздовж напрямку вектора $\vec{H}_г$.

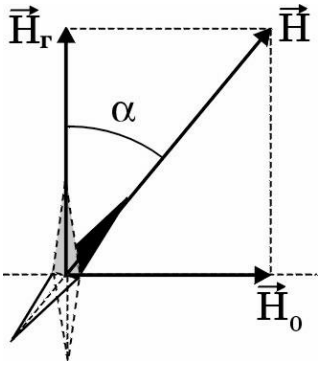


Рис. 9.2 — Схема орієнтації векторів напруженості додаткового магнітного поля $\vec{H}_0$ та горизонтальної складової магнітного поля Землі

Якщо створити додаткове магнітне поле $\vec{H}_0$, вектор напруженості якого перпендикулярний до $\vec{H}_г$, магнітна стрілка буде орієнтуватись (рис.9.2) уздовж вектора напруженості $\vec{H}$ результуючого магнітного поля, що дорівнює

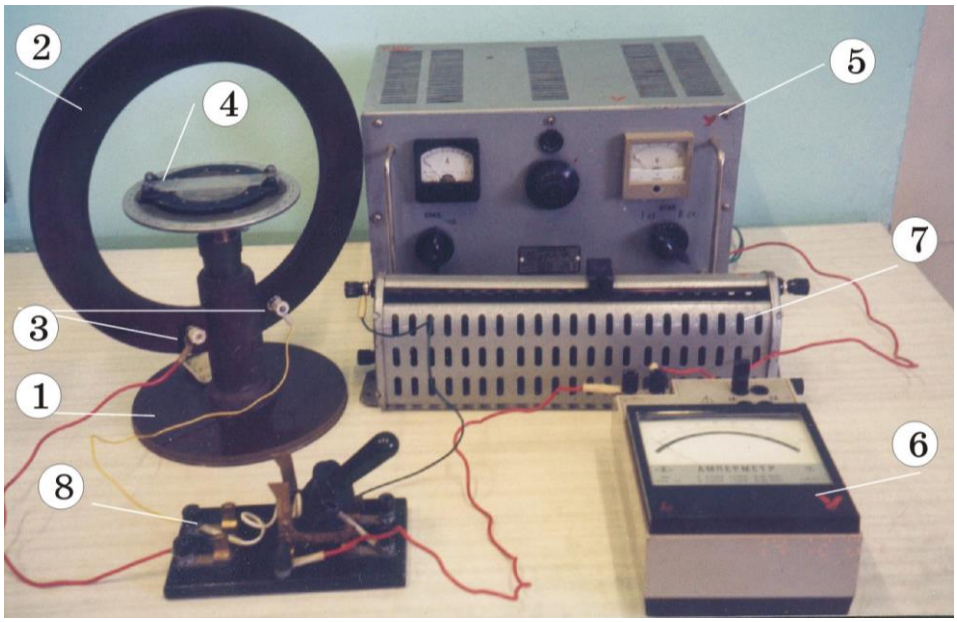
$$\vec{H} = \vec{H}_г + \vec{H}_0 . \qquad (9.1)$$

З рис. 9.2 видно, що, знаючи величину напруженості $\vec{H}_0$ додаткового магнітного поля і визначивши величину кута α між векторами $\vec{H}$ і $\vec{H}_г$, можна знайти величину $H_г$ за виразом

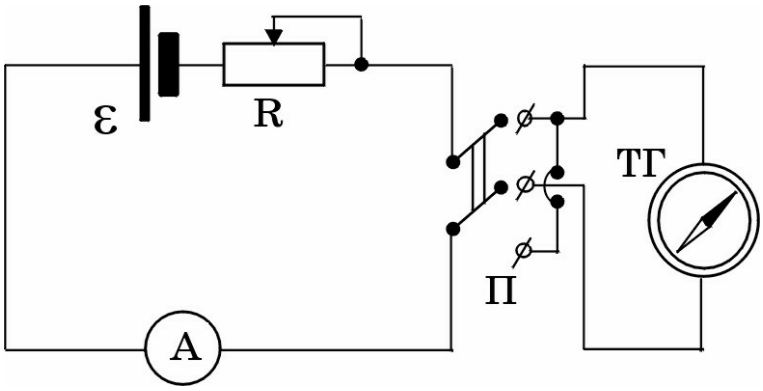
$$H_г = \frac{H_0}{tg\,\alpha} . \qquad (9.2)$$

Викладений вище метод вимірювання $\vec{H}_г$ реалізується в лабораторній установці, зовнішній вигляд якої зображений на рис. 9.3а. Основним її елементом є тангенс-гальванометр 1, що складається з колової рамки 2, яка являє плоску котушку, кінці якої виведено до клем 3. В центрі котушки розміщена бусоль 4 – компас з лімбом, що поділений на градуси. Магнітна стрілка компаса закріплена на вертикальній осі (голці), яка обмежує рух

стрілки в вертикальній площині і дозволяє їй вільно обертатись тільки в горизонтальній площині. Окрім того, магнітна стрілка повинна бути невеликою за розмірами, так щоб можна було знехтувати зміною напруженості магнітного поля, що створюється коловим струмом (рамкою) вздовж стрілки і вважати, що на магнітну стрілку діє таке ж магнітне поле, що і в центрі колового струму.



а



б

Рис. 9.3 – Загальний вигляд лабораторної установки (а) та її електричне коло (б):

1 – тангенс-гальванометр, 2 – рамка; 3 – клеми; 4 – бусоль; 5 – джерело струму; 6 – амперметр; 7 – реостат; 8 – перемикач.

Тангенс-гальванометр є елементом електричного кола, що зображене на рис. 9.3б. Величина струму I у колі з джерелом $\mathcal{E}$ вимірюється амперметром A і регулюється реостатом R. Перемикач $П$ дозволяє змінити напрямок струму в котушці тангенс-гальванометра $ТГ$ на протилежний.

Якщо сумістити площину рамки тангенс – гальванометра з площиною магнітного меридіана, то магнітна стрілка бусолі буде лежати в площині рамки (колового контура) і знаходитись в центрі його. Пропустивши струм силою I через котушку рамки тангенс – гальванометра, можна створити додаткове магнітне поле колового струму, напруженість $\vec{H}_0$ якого в центрі котушки буде спрямована перпендикулярно до площини рамки тангенс – гальванометра і визначається за виразом

$$H_0 = \frac{In}{2R}, \tag{9.3}$$

де n – число витків котушки, R – радіус витка. В результаті магнітна стрілка повернеться на кут α. Підставивши (9.3) в (9.2), одержимо вираз для експериментального визначення величини горизонтальної складової магнітного поля Землі

$$H_г = \frac{In}{2Rtg\alpha}. \tag{9.4}$$

Отже, знаючи дані тангенс гальванометра (радіус котушки R і число витків n) та вимірявши значення сили струму I і кута α, легко обчислити $\vec{H}_г$ за формулою (9.4).

Знайдене значення $H_г$ повинно бути близьким до метрологічного його значення для даної місцевості. Але треба зважити, що магнітне поле Землі досить слабе і експериментально виміряне значення величини $H_г$ може не збігатися з метрологічним, внаслідок наявності в лабораторії пристроїв, що містять котушки, постійні магніти, тощо, які можуть служити джерелом стороннього магнітного поля. Тому, в процесі виконання лабораторної роботи, бажано уникнути наявності сторонніх магнітних полів.

Завдання:

а) за даними вимірювань відхилення стрілки бусолі при різних значеннях сили струму розрахувати величину горизонтальної складової напруженості $H_г$ магнітного поля Землі;

б) порівняти результати експериментального визначення з метрологічним значенням напруженості магнітного поля Землі в даній місцевості;

в) зробити висновок про наявність інших (окрім магнітного поля Землі і поля тангенс –гальванометра) джерел магнітного поля.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою, що зображена на рис. 9.4б.

2. Повертаючи підставку тангенс – гальванометра, сумістити колову рамку з площиною магнітного меридіана, так щоб стрілка компаса орієнтувалась полюсами вздовж лінії, що з'єднує поділки $0^\circ - 180^\circ$. Закріпити підставку в цьому положенні до кінця досліду.

3. Замкнути коло і, регулюючи реостатом струм у колі, визначити кут α повороту магнітної стрілки при різних значеннях величини струму *I*. Значення величини струму *I* та кута α записати в таблицю, що наведена нижче.

	I, А	α				$\bar{\alpha}$	$tg\,\bar{\alpha}$	$H_{гi}$, А/м	$(\Delta H_{гi})^2$, $(А/м)^2$
		прям. напр.		звор. напр.					
1									
2									
. . .									
								$\bar{H}_г =$	$\sum_i (\Delta H_{гi})^2 =$

4. За допомогою перемикача *П* змінити напрямок струму в коловому контурі (рамці) і провести виміри кута α при тих же значеннях струму, що і в п.3. Дані записати в таблицю.

5. Вимкнути установку і привести її у вихідний стан.

6. Обчислити середнє значення кута α для кожного значення струму *I* та величину $H_г$ за формулою (9.4).

7. Знайти середнє значення $\bar{H}_г$ та повну абсолютну $\Delta H_г$ похибку.

8. Записати остаточний результат у вигляді $H_г = \bar{H}_г \pm \Delta H_г$.

9. Порівняти знайдене значення $H_г$ з метрологічним значенням $H_г$ для даної місцевості і зробити висновки відносно якості вимірювань.

Контрольні питання

1. Дайте загальну характеристику магнітного поля Землі. Де розміщені магнітні полюси Землі?

2. Як спрямований вектор напруженості магнітного поля Землі по відношенню до силової лінії? На які складові розкладають вектор напруженості?

3. Як орієнтується в магнітному полі магнітна стрілка якщо вона: а) вільно висить на нитці так, що центр мас співпадає з точкою підвісу; б) розміщена на вістрі голки так, що центр мас знаходиться на вістрі.

4. Які характеристики магнітного поля Землі мають назву елементів земного магнетизму?

5. Дайте визначення кута магнітного схилення.

6. Дайте визначення кута магнітного нахилення.

7. Як змінюється горизонтальна складова магнітного поля Землі при русі вздовж магнітного меридіана від магнітного екватора до магнітного полюса?

8. Яка мета лабораторної роботи?

9. З яких елементів складається лабораторна установка і яке їх призначення?

10. Яке призначення має тангенс-гальванометр і з яких елементів він складається?

11. Який вираз використовується для розрахунку напруженості магнітного поля, що створюється в центрі тангенс-гальванометра коловим струмом? За яких умов можна використовувати цей вираз?

12. Як знайти напрямок вектора напруженості магнітного поля, що створюється в центрі колового струму?

13. Вкажіть порядок виконання лабораторної роботи.

14. Які фактори можуть впливати на вимірювання величини $H_г$ в лабораторних умовах?

Рекомендована література.

1. И.В. Савельев. Курс общей физики. т.2.– М.: Наука, 1978. – 480с., §§ 42, 47.

[2]. Загальна фізика. Лабораторний практикум. /В.М. Барановський, П.В. Бережний, І. Т. Горбачук та ін.; За заг. ред. І.Т. Горбачука.– К.: Вища шк., 1992.– 509с.

ДОДАТОК

І. Таблиця одиниць фізичних величин

№ п/п	Фізична величина	Найменування в СІ	Позначення в СІ	Відповідні позасистемні одиниці
1	Довжина	метр	м	$1\mathring{A} = 10^{-10}$ м
2	Маса	кілограм	кг	1 а.о.м. = $1{,}66\cdot10^{-27}$ кг 1 т = 10^{3} кг
3	Час	секунда	с	1 рік = $3{,}15\cdot10^{7}$ с 1 доба = $8{,}64\cdot10^{4}$ с 1 година = $3{,}6\cdot10^{3}$ с 1 хвилина = 60 с
4	Густина	кілограм на кубічний метр	кг/м^3	
5	Сила	ньютон	Н=кг·м/с^2	1 кгс = 9,81 Н
6	Питома вага	ньютон на кубічний метр	Н/м^3	
7	Тиск	паскаль	Па=Н/м^2	1 мм рт. ст. = $1{,}33\cdot10^{2}$ Па 1 атм = 760 мм рт. ст. = $1{,}013\cdot10^{5}$ Па 1 кгс/см^2 = $9{,}81\cdot10^{4}$ Па
8	Робота, енергія	джоуль	Дж=Н·м	1 кгс·м = 9,81 Дж 1 еВ = $1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж 1 кал = 4,19 Дж
9	Потужність	ват	Вт=Дж/с	1 к.с. = 75 кгс·м/с = 735,5 Вт
10	Температура	градус	К	0 ^{0}С = 273,15 К
11	Заряд	кулон	Кл	1 ампер-година = $3{,}6\cdot10^{8}$ Кл
12	Електричний потенціал, напруга, ЕРС	вольт	В	
13	Напруженість електричного поля	вольт на метр	В/м	
	Електрична ємність	фарад	Ф	
14	Магнітна індукція	тесла	Тл	
15	Напруженість магнітного поля	ампер на метр	А/м	$1\gamma = 7{,}95775\cdot10^{-4}$ А/м
16	Електроємність	фарад	Ф	

II. Довідкові матеріали

1. Основні фізичні константи (округлені дані)

№з/п	Фізична константа	Позначення	Значення
1	Прискорення вільного падіння	g	9,81 м/с^2
2	Гравітаційна стала	G	$6{,}67\cdot10^{-11}$ м^3/(кг·с^2)
3	Швидкість світла у вакуумі	c	$3{,}00\cdot10^{8}$ м/с
4	Стала Авогадро	N_A	$6{,}02\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$
5	Універсальна газова стала	R	8,31 Дж/(моль·К)
6	Стала Больцмана	k	$1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К
7	Елементарний заряд	e	$1{,}60\cdot10^{-19}$ Кл
8	Маса спокою електрона	m_e	$9{,}110\cdot10^{-31}$ кг
9	Маса спокою протона	m_p	$1{,}6726\cdot10^{-27}$ кг
10	Маса спокою нейтрона	m_n	$1{,}6750\cdot10^{-27}$ кг
11	Атомна одиниця маси	а.о.м.	$1{,}660\cdot10^{-27}$ кг
12	Електрична стала	ε_0	$8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м
13	Магнітна стала	μ_0	$4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м

2. Деякі астрономічні величини

№ з/п	Найменування	Значення
1	Середній радіус Землі	$6{,}37\cdot10^{6}$ м
2	Середня маса Землі	$5{,}98\cdot10^{24}$ кг
3	Відстань від центра Землі до центра Сонця	$1{,}49\cdot10^{11}$ м
4	Відстань від центра Землі до центра Місяця	$3{,}84\cdot10^{8}$ м

3. Густина ρ деяких твердих тіл та рідин

№з/п	Тверде тіло	ρ, кг/м^3	№ з/п	Рідина	ρ, кг/м^3
1	Алюміній	$2{,}70\cdot10^{3}$	1	Вода (при 4 °С)	$1{,}00\cdot10^{3}$
2	Залізо	$7{,}88\cdot10^{3}$	2	Гліцерин	$1{,}26\cdot10^{3}$
3	Мідь	$8{,}93\cdot10^{3}$	3	Олія	$0{,}92\cdot10^{3}$
4	Нікель	$8{,}90\cdot10^{3}$	4	Гас	$0{,}82\cdot10^{3}$
5	Свинець	$11{,}3\cdot10^{3}$	5	Спирт	$0{,}79\cdot10^{3}$
6	Срібло	$10{,}5\cdot10^{3}$	6	Ртуть	$13{,}6\cdot10^{3}$

4. Динамічна в'язкість η деяких речовин

№з/п	Газ	T, °C	η, мкПа·с	№ з/п	Рідина	T, °C	η, мкПа·с
1	Азот	0	16,5	1	Вода	0	1790
2	Водень	0	8,8		-	20	1002
3	Кисень	0	20,2		-	100	280
4	Гелій	0	18,8	2	Гліцерин	– 20	$134\cdot10^{6}$
5	Повітря	0	17,1		-	0	$121\cdot10^{5}$
	-	20	18,2		-	20	$150\cdot10^{4}$
	-	100	21,2	3	Спирт	20	1190

5. Коефіцієнти теплопровідності *k* деяких речовин (за нормальних умов)

№ з/п	Речовина	k, Вт/(м·К)	№ з/п	Речовина	k, Вт/(м·К)
1	Повітря	0,0241	4	Алюміній	207
2	Водяна пара	0,0158	5	Цегла	0,6 – 0,8
3	Кисень	0,0244	6	Залізобетон	22,5 – 40,0

6. Відносні атомні маси (округлені значення) *A* та порядкові номери *Z* деяких елементів у таблиці Менделєєва

№ з/п	Елемент	Символ	A	Z	№ з/п	Елемент	Символ	A	Z
1	Азот	N	14	7	6	Ксенон	Xe	131	54
2	Аргон	Ar	40	18	7	Натрій	Na	23	11
3	Водень	H	1	1	8	Неон	Ne	20	10
4	Гелій	He	4	2	9	Вуглець	C	12	6
5	Кисень	O	16	8	10	Хлор	Cl	35	17

7. Діелектрична проникність *ε* деяких речовин

№ з/п	Речовина	ε	№ з/п	Речовина	ε
1	Повітря	1,0	5	Слюда	7,0
2	Вода	81	6	Скло	7,0
3	Масло (трансформаторне)	2,2	7	Фарфор	5,0
4	Парафін	2,0	8	Ебоніт	3,0

8. Питомий опір ρ деяких металів

№ з/п	Метал	ρ, Ом·м	№ з/п	Метал	ρ, Ом·м
1	Залізо	$9{,}8\cdot10^{-8}$	3	Ніхром	$1{,}1\cdot10^{-8}$
2	Мідь	$1{,}7\cdot10^{-8}$	4	Срібло	$1{,}6\cdot10^{-8}$

9. Множники і префікси для утворення десяткових кратних і часткових одиниць та їх найменування

№ з/п	Префікс		Множник	№ з/п	Префікс		Множник
	назва	позначення			назва	позначення	
1	екса	Е	10^{18}	1	деці	д	10^{-1}
2	пета	П	10^{15}	2	санті	с	10^{-2}
3	тера	Т	10^{12}	3	мілі	м	10^{-3}
4	гіга	Г	10^{9}	4	мікро	мк	10^{-6}
5	мега	И	10^{6}	5	нано	н	10^{-9}
6	кіло	к	10^{3}	6	піко	п	10^{-12}
7	гекто	г	10^{2}	7	фемто	ф	10^{-15}
8	дека	да	10^{1}	8	ато	а	10^{-18}

10. Грецький алфавіт

№ з/п	Позначення літер	Назва літер	№ з/п	Позначення літер	Назва літер
1	Α, α	альфа	13	Ν, ν	ню
2	Β, β	бета	14	Ξ, ξ	ксі
3	Γ, γ	гама	15	Ο, ο	омікрон
4	Δ, δ	дельта	16	Π, π	пі
5	Ε, ε	епсілон	17	Ρ, ρ	ро
6	Ζ, ζ	дзета	18	Σ, σ	сігма
7	Η, η	ета	19	Τ, τ	тау
8	Θ, θ	тета	20	Υ, υ	іпсілон
9	Ι, ι	іота	21	Φ, φ	фі
10	Κ, κ	капа	22	Χ, χ	хі
11	Λ, λ	ламбда	23	Ψ, ψ	псі
12	Μ, μ	мю	24	Ω, ω	омега

Підп. до друк 28.04.10 Формат 60х84 1/16
Папір 80г/м^2 Друк ризограф Умовн.-друк. арк. 5,3
Тираж прим. Вид. № 16/10 Зам. №

Відділення редакційно-видавничої діяльності
Національного університету цивільного захисту України
61023 м. Харків, вул. Чернишевська, 94.