

7. ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ



7.1. Теоретичні відомості.

Поверхня рідини, яка межує з іншим середовищем (наприклад, зі своїм паром, з іншою рідиною або з твердим тілом) знаходиться в особливих умовах. Це обумовлено тим, що молекули поверхневого шару (на відміну від молекул у глибині) оточені молекулами тієї ж рідини не з усіх боків.

Якщо над рідиною знаходиться її пар (або інший газ), то результуюча сил притягання, що діють на молекулу поверхневого шару, буде спрямована *усередину* рідини. Тому переміщення з поверхні у глибину супроводжується *додатною* роботою молекул. Якщо площа поверхні рідини за будь-яких причин зростає (поверхня розтягується), це означає, що частина молекул переходить з внутрішніх шарів на поверхню. Такі переходи супроводжуються *від'ємною* роботою сил міжмолекулярного притягання, бо переміщення відбувається проти напрямку дії цих сил.

Отже, збільшення поверхні рідини може відбуватися за рахунок здійснення роботи проти сил молекулярного притягання (за рахунок роботи *зовнішніх* сил). В результаті молекули в поверхневому шарі володіють додатковою енергією (енергія поверхневого шару), яка, очевидно, зростає із збільшенням площі поверхні.

Відомо, що у стані стійкої рівноваги енергія системи *мінімальна*. У нашому випадку це означатиме, що рідина у стані рівноваги повинна мати поверхню з мінімально можливою площею. Це у свою чергу означає, що повинні існувати сили, які намагаються зменшити поверхню рідини, і які повинні бути спрямовані вздовж поверхні, *по дотичній* до неї. Ці сили називаються *силами поверхневого натягу*. Проте треба пам'ятати, що причиною виникнення сил поверхневого натягу є сили, які діють на молекули

поверхневого шару рідини, і які спрямовані усередину рідини (а у деяких випадках усередину середовища, з яким межує рідина).

Можна показати, що сила поверхневого натягу $F_{\text{пов}}$ пропорційна довжині l лінії розділу поверхні рідини:

$$F_{\text{пов}} = \sigma \cdot l.$$

Коефіцієнт пропорційності σ ($\sigma > 0$) є основною величиною, що характеризує властивості поверхні рідини, і називається *коефіцієнтом поверхневого натягу* (або просто *поверхневим натягом*). Отже, коефіцієнт поверхневого натягу чисельно дорівнює силі (що діє по дотичній до поверхні рідини), яка припадає на одиницю довжини лінії розділу поверхні.

Якщо при постійній температурі площа поверхні рідини оборотним шляхом змінилася на нескінченну малу величину dS , то робота δA рідини (сил поверхневого натягу, які обумовлені силами молекулярного притягання) при цьому:

$$\delta A = -\sigma dS.$$

Отже, коефіцієнт поверхневого натягу σ ($\sigma > 0$) чисельно дорівнює роботі, яку потрібно виконати для ізотермічного збільшення площі поверхні рідини на одиницю. Знак “мінус” вказує на те, що збільшення поверхні ($dS > 0$) супроводжується від’ємною роботою рідини.

Сили поверхневого натягу намагаються скоротити поверхню. Це особливо яскраво проявляється у дослідах з тонкими плівками рідини. Такі плівки утворюються деякими рідинами, наприклад, мильним розчином.

Якщо занурити дротяну рамку, одна із сторін якої є рухомою, у мильний розчин, то вся вона зтягнеться плівкою рідини (рис. 7.1). Завдяки дії сил поверхневого натягу $F_{\text{пов}}$ рухомий стержень AB буде переміщуватися вгору. Для рівноваги потрібно прикласти до стержня силу F , наприклад, у вигляді вантажу (сюди входить і вага самого стержня).

Якщо стержень AB перемістився вгору на відстань dx , то робота сил поверхневого натягу:

$$\delta A = F_{\text{пов}} dx.$$

З іншого боку

$$\delta A = -\sigma dS = \sigma \cdot 2adx,$$

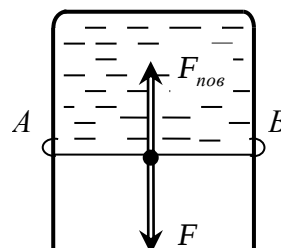


Рис. 7.1. Дослід з мильною плівкою

де a – довжина стержня;

dS – зміна площі поверхні плівки, $dS = -2adx$ (поверхня скоротилася); тут враховано, що плівка має *дві* поверхні, бо являє собою тонкий шар рідини.

Порівнюючи ці формули, отримуємо:

$$F_{\text{пов}} = \sigma \cdot 2a.$$

Отже, сила поверхневого натягу, що діє вздовж *однієї* поверхні рідини, пропорційна довжині l лінії розділу цієї поверхні:

$$F_{\text{пов}} = \sigma \cdot l.$$

Зазначимо, що описаний дослід використовується для визначення числового значення коефіцієнта поверхневого натягу рідини у *методі відриву петлі (або кільця)*.

Із збільшенням температури σ зменшується і при критичній температурі дорівнює нулю, адже при цьому зникає різниця між рідиною та її паром, а отже, зникає і сама поверхня розділу між ними.

Поверхневим натягом рідини пояснюються такі всім відомі природні явища як: кулеподібна форма дрібних крапель роси на листях, підняття води по волокнах рослин, здатність деяких комах переміщуватися по поверхні води тощо. Розглянемо далі суть одного з методів вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу.



7.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я . Виміряти коефіцієнт поверхневого натягу води методом відриву крапель.

О б л а д н а н н я : ємність з дистильованою водою; штатив; лійка конусоподібна з коротким стеблом; гумова трубка з краном та скляним наконечником (діаметром 3÷5 мм); терези з різноважками; хімічний стакан (або мензурка).

Примітка. Дослід щодо визначення коефіцієнта поверхневого натягу *відомої* рідини методом відриву крапель можна провести за допомогою шприца та лінійки (або штангенциркуля).



Рис. 7.2. Експериментальна установка для вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу методом відриву крапель

Метод відриву крапель. Відомо, що з вузьких трубок рідина може витікати окремими краплями, форма яких близька до кулеподібної. При виході з трубки розмір краплі поступово зростає (її відриву протидіють сили поверхневого натягу). Відрив краплі відбувається при певному її розмірі, коли сила тяжіння стає рівною за модулем силі поверхневого натягу. Отже, із спостережень за відривом крапель можна визначити чисельне значення коефіцієнта поверхневого натягу σ рідини. Звідки і назва відповідного способу – *метод відриву крапель* (див. рис. 7.2).

Перед відривом краплі утворюється шийка, радіус якої дещо менший, ніж внутрішній радіус трубки. Вздовж кола цієї шийки і діє сила поверхневого натягу (рис. 7.3, а), яка в момент відриву повинна дорівнювати силі тяжіння:

$$2\pi r \cdot \sigma = mg \quad \text{або} \quad \pi d \cdot \sigma = mg, \quad (7.1)$$

де r , d – відповідно радіус та діаметр шийки;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини;

m – маса краплі.

З останньої формули отримуємо

$$\sigma = \frac{mg}{\pi d}. \quad (7.2)$$

Отже, вимірявши масу m краплі та діаметр d її шийки перед відривом, за формулою (7.2) можна визначити коефіцієнт поверхневого натягу σ рідини.

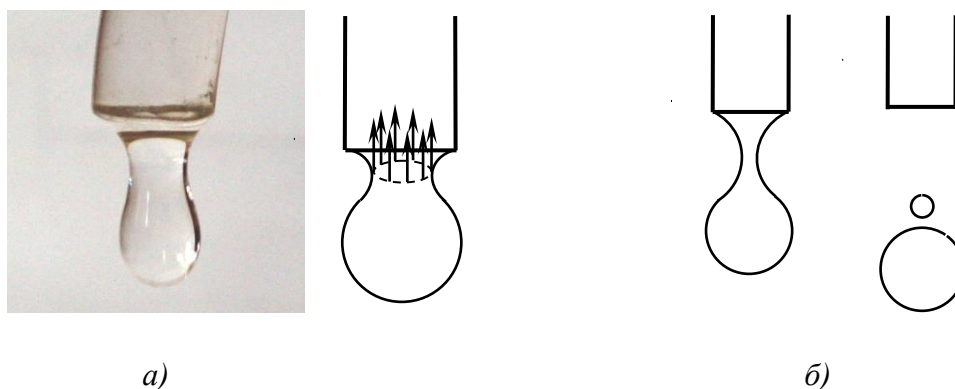


Рис. 7.3. Процес відриву краплі

Для наближених обчислень за діаметр шийки приймають внутрішній діаметр трубки. Для більш точних вимірювань краплю, що відривається, проєктують з відомим збільшенням на екран, де саме і проводять вимірювання діаметра шийки.

Масу краплі можна виміряти на аналітичних терезах. Звичайно для підвищення точності вимірюють масу M певного числа n крапель. У такому випадку σ визначають за формулою:

$$\sigma = \frac{Mg}{\pi dn}. \quad (7.3)$$

Нескладно показати, що межі відносної ε_σ та абсолютної $\Delta\sigma$ похибок при визначенні σ за формулою (7.3) можна оцінити так:

$$\varepsilon_\sigma \equiv \frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta d}{d}; \quad \Delta\sigma = \varepsilon_\sigma \cdot \sigma, \quad (7.4)$$

де ΔM , Δd – відповідно межі абсолютних похибок при прямих вимірюваннях маси води та внутрішнього діаметра трубки.

рідину. При цьому динамометр показував 2,6 мН. Петлю повільно витягають з рідини. В момент відриву петлі динамометр показав 9,4 мН. Знайдіть поверхневий натяг рідини.

- А. Менше 40 мН/м. Б. Від 40 мН/м до 50 мН/м.
В. Від 50 мН/м до 60 мН/м. Г. Більше 60 мН/м.

Рівень Б

6. Отримайте формулу (7.2).
7. Навіщо в експериментальній установці передбачено кран?
8. Як виміряти масу краплі у разі, якщо вона не порушує рівноваги терезів (передбачуване значення маси краплі лежить за межами чутливості терезів)?
9. Як виміряти масу води у стакані за допомогою терезів?
10. Чому дорівнює маса води в мензурці (рис. 7.5).
11. Знайдіть масу однієї краплі води, якщо відомо, що їх у мензурці 420 (рис. 7.5).
12. Якщо за діаметр шийки краплі прийняти внутрішній діаметр трубки, то отримане за формулою (7.3) значення σ буде більшим або меншим ніж насправді?



Рис. 7.5. До завдань 10 та 11

13. Отримайте формули (7.4).
14. У пункті “обладнання” зазначається, що виміряти коефіцієнт поверхневого натягу води можна за допомогою досить простого обладнання: шприца та лінійки (або штангенциркуля). Поясніть як саме це зробити? Які недоліки має цей спосіб порівняно з розглянутим вище?



7.3. Додаткові творчі завдання.

Завдання для формування банку ідей.

1. Як виміряти внутрішній діаметр капілярної трубки за допомогою швацької голки та штангенциркуля?

2. Як виміряти внутрішній діаметр скляної капілярної трубки, маючи у розпорядженні ємність з водою, лінійку та довідник з фізики?
3. Як визначити внутрішній діаметр скляного капіляра за допомогою мензурки з водою та лінійки?
4. Як оцінити середній діаметр каналів волокон фільтрувального паперу за допомогою ємності з водою, лінійки та довідника з фізики?
5. Як виміряти масу рідини при наявності шприца та довідника з фізики?
6. Як визначити коефіцієнт поверхневого натягу води за допомогою двох скляних пластинок, штангенциркуля та аркуша паперу?
7. Як, не користуючись ніякими приладами, показати, що коефіцієнт поверхневого натягу у мильного розчину менший, ніж – у чистої води?



Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.

Експериментальні задачі.

1. Визначте коефіцієнт поверхневого натягу води. *Обладнання:* чаша з водою, шматок дроту (наприклад, з нержавіючої сталі) довжиною приблизно 30 см та діаметром приблизно 0,5 мм, кусачки, динамометр з діапазоном вимірювання 0 – 10 мН, лінійка, штатив.
2. Визначте коефіцієнт поверхневого натягу невідомої рідини. *Обладнання:* невідома рідина, вода, два стакани, терези без різноважків, піпетка, матеріал для врівноважування терезів (аркуш паперу або пісок).
3. Визначте коефіцієнт поверхневого натягу рідини (густина рідини $\rho = 1082 \text{ кг/м}^3$). *Обладнання:* ємність з рідиною, капіляр, шприц, міліметровий папір.
4. Оцініть коефіцієнт поверхневого натягу невідомої рідини. *Обладнання:* невідома рідина, піпетка, пластинка, що покрита парафінованим папером, міліметровий папір, мензурка.

Тренувальні винахідницькі задачі.

1. Запропонуйте можливі способи регулювання швидкості витікання рідини у методі відриву крапель за відсутності крана.

2. У методі відриву крапель виміряти безпосередньо діаметр шийки краплі (у момент її відриву) досить складно (*Чому?*). Тому часто за її діаметр наближено приймають внутрішній діаметр трубки. Це знижує точність вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу. Запропонуйте більш точний спосіб визначення діаметра шийки краплі.

3. Запропонуйте спосіб або пристрій автоматичного підрахунку числа крапель у розглянутому методі вимірювання поверхневого натягу.

4. Розробіть пристрій для очистки води від дрібних частинок (наприклад, від частинок акварельної фарби) за допомогою фільтрувального паперу.

Зробіть своїми руками!

Виготовте пристрій для автоматичного поливу кімнатних рослин (рис. 7.6), який складається з чаші (підноса) та закритої пляшки з водою. На боковій поверхні пляшки (біля її дна) зроблено отвір діаметром приблизно 2 мм.

Поясніть принцип дії пристрою. Виявіть його недоліки та спробуйте їх усунути.

Примітка. Наведений пристрій є одним з розв'язків відповідної винахідницької задачі, що пропонувалася на VIII-му Всеукраїнському турнірі юних винахідників і раціоналізаторів у 2005 р. (винахід належить команді Запорізької області “Грані”).



Рис. 7.6. Пристрій для автоматичного поливу кімнатних рослин (діюча модель)

8. ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ РІДИНИ



8.1. Теоретичні відомості.

Внутрішнє тертя рідин (те ж саме відноситься до газів) – це властивість, завдяки якій вирівнюються швидкості руху різних шарів рідини. Ця властивість проявляється, наприклад, у тому, що вітер з часом затихає. Вирівнювання швидкостей сусідніх шарів рідини (якщо вони є різними) пояснюється тим, що із шару з більшою швидкістю руху переноситься імпульс до шару, що рухається з меншою швидкістю.

При русі рідини (або газу) вздовж труби швидкості різних шарів розподілені так, як показано на рис. 8.1, *а* (стрілками позначено вектори швидкості руху різних шарів). З найбільшою швидкістю рухається центральний шар (розташований навколо осі труби), із наближенням до стінок швидкість зменшується, а шар, що безпосередньо межує з поверхнею труби, покоїться.

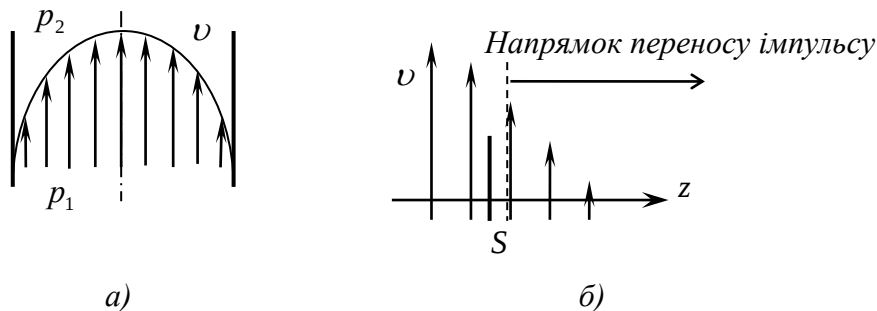


Рис. 8.1. Розподіл швидкостей різних шарів рідини при її русі по трубі (*а*) та напрямок переносу імпульсу при цьому (*б*)

При такому русі відбувається перенос імпульсу від центрального шару, швидкість якого найбільша, до шарів, що рухаються повільніше (рис. 8.1, *б*). Оскільки цей процес пов'язаний зі зміною імпульсу шарів, то рідина (або газ) поводить себе так, нібито на неї діє деяка сила. Ця сила і називається *силою внутрішнього тертя*.

Розглянемо цей процес детальніше. З рис. 8.1, б видно, що зміна швидкості руху рідини відбувається в напрямі, що є перпендикулярним до самої швидкості v (з урахуванням симетрії, z – будь-яка піввісь, яка перпендикулярна до осі труби і починається на цій осі). Зрозуміло, що в цьому випадку швидкість є функцією лише z .

Експеримент свідчить про те, що імпульс L , що переноситься за одиницю часу через уявну площадку з площею S , яка розділяє сусідні шари рідини, та яка перпендикулярна до осі z , визначатиметься так:

$$L = -\eta \frac{dv}{dz} S, \quad (8.1)$$

де dv/dz – величина, що характеризує зміну швидкості шарів рідини вздовж осі z (зміна швидкості, що припадає на одиницю довжини). Очевидно, що $dv/dz < 0$. Знак “–” вказує на те, що імпульс переноситься в напрямку зменшення швидкості (в додатному напрямку осі z).

Коефіцієнт η у формулі (8.1) називається *коефіцієнтом внутрішнього тертя* або *коефіцієнтом в'язкості* (або просто *в'язкістю*). Він залежить від властивостей рідини (або газу), а також від температури. Однак, характер цієї залежності для газів і рідин є різним. Для газів із збільшенням температури коефіцієнт в'язкості зростає (дещо швидше від $\sqrt{T}$), а для рідин – зменшується ($\sim e^{\frac{b}{T}}$, де $b = \text{const} > 0$).

Іноді η називають коефіцієнтом *динамічної* в'язкості, на відміну від коефіцієнта *кінематичної* в'язкості ν , який визначається як $\nu = \eta/\rho$ (де ρ – густина рідини або газу).

Фізичний зміст η полягає у тому, що він чисельно дорівнює імпульсу, який переноситься за одиницю часу (1 с) через площадку з площею, яка дорівнює одиниці (1 м^2), перпендикулярно до цієї площадки, при зміні швидкості на 1 м/с на ділянці одиничної довжини (1 м) в напрямку переносу імпульсу.

Або, застосовуючи поняття градієнт: η чисельно дорівнює імпульсу, який переноситься за одиницю часу через площадку одиничної площі (яка перпендикулярна до градієнта швидкості) при модулі градієнта швидкості, що дорівнює одиниці.

Нагадаємо, що *градієнтом* певної скалярної величини φ (позначається $\text{grad } \varphi$), що залежить від координат, називається вектор, який характеризує швидкість зміни цієї величини у просторі. Цей вектор напрямлений у бік *найшвидшого зростання* φ та чисельно дорівнює швидкості цього зростання. У прямокутній декартовій системі координат

$$\text{grad } \varphi = \vec{i} \frac{d\varphi}{dx} + \vec{j} \frac{d\varphi}{dy} + \vec{k} \frac{d\varphi}{dz},$$

де $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ – орти декартової системи координат;

$\frac{d\varphi}{dx}$, $\frac{d\varphi}{dy}$, $\frac{d\varphi}{dz}$ – похідні, що характеризують швидкість зміни величини φ вздовж осей x , y , z .

Якщо φ змінюється лише вздовж одного напрямку (наприклад, вздовж z), то

$$\text{grad } \varphi = \vec{i} \frac{d\varphi}{dz},$$

а його чисельне значення співпадає з похідною $d\varphi/dz$.

Отже, в нашому випадку похідна dv/dz є чисельним значенням градієнта швидкості.

У системі одиниць СІ коефіцієнт в'язкості η вимірюється у $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$, а у системі СГС в $\text{г}/\text{см}\cdot\text{с}$ (ця одиниця називається *пуаз* (П), на честь Пуазейля).

Одиницею кінематичної в'язкості ν в системі СІ є $\text{м}^2/\text{с}$, а у системі СГС – $\text{см}^2/\text{с}$ (ця одиниця називається *стокс*, на честь Стокса).

При переносі імпульсу від шару до шару відбувається зміна імпульсу цих шарів (збільшення або зменшення). Тому на кожний шар діє сила, яка згідно з другим законом Ньютона дорівнює зміні імпульсу за одиницю часу. Але ж величина L у формулі (8.1) – це і є зміна імпульсу за одиницю часу. Отже, в'язкість призводить до того, що між шарами рідини, які рухаються з різними швидкостями, діє сила тертя (сила внутрішнього тертя).

Згідно з (8.1), величина сили внутрішнього тертя, що діє на поверхню з площею S (яка розділяє два сусідніх шари рідини)

$$F = -\eta \frac{dv}{dz} S.$$

З цієї формули випливає, що η чисельно дорівнює силі, яка припадає на одиницю площі, при градієнті швидкості, що дорівнює одиниці.

Із внутрішнім тертям пов'язано те, що для протікання рідини (або газу) по трубі потрібна певна *різниця тисків* (так, на рис. 8.1 $p_1 > p_2$). Для отримання потрібної швидкості течії ця різниця тисків повинна бути тим більшою, чим більшим є коефіцієнт в'язкості.

Розглянемо далі один з методів вимірювання коефіцієнта в'язкості.

💡 8.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я . Виміряти коефіцієнт внутрішнього тертя (коефіцієнт в'язкості) рідини методом Стокса.

О б л а д н а н н я : відкритий скляний циліндр із досліджуваною рідиною; приблизно однакові сталеві кульки; мікрометр; лінійка вимірювальна; секундомір; лійка.

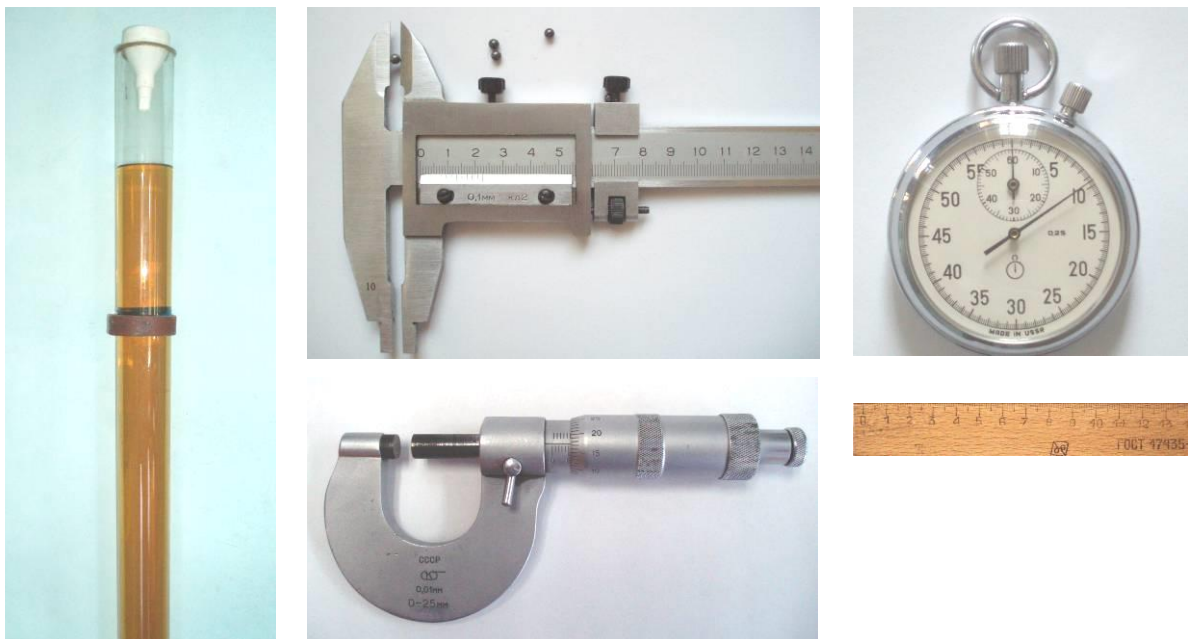


Рис. 8.2. Деякі пристрої, що використовуються при виконанні досліду

Метод Стокса. Метод базується на дослідженні падіння кульки у досліджуваній рідині. При русі у рідині на кульку діють три сили: сила тяжіння, сила Архімеда та сила опору.

Сила тяжіння

$$F_m = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g, \quad (8.2)$$

де r – радіус кульки;

ρ – густина кульки;

g – прискорення вільного падіння.

Сила Архімеда

$$F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g, \quad (8.3)$$

де ρ_0 – густина рідини.

Сила опору руху кульки визначається за формулою Стокса:

$$F_C = 6\pi\eta r v, \quad (8.4)$$

де η – коефіцієнт в'язкості рідини;

v – швидкість руху кульки у рідині.

Зазначимо, що остання формула була отримана Стоксом у припущенні, що обтікання кульки є ламінарним, а також, що її рух відбувається у рідині, яка має *необмежену протяжність* у всіх напрямках.

Дослід проводиться за допомогою відкритого циліндра з досліджуваною рідиною. Для спрямування руху кульки вздовж осі циліндра зверху у циліндр вставлено лійку (рис. 8.3).

На початку руху у рідині швидкість кульки зростатиме. При цьому зростатиме і сила опору F_C , оскільки вона, як видно з (8.4), пропорційна швидкості. Через деякий час сили Архімеда F_A та опору F_C

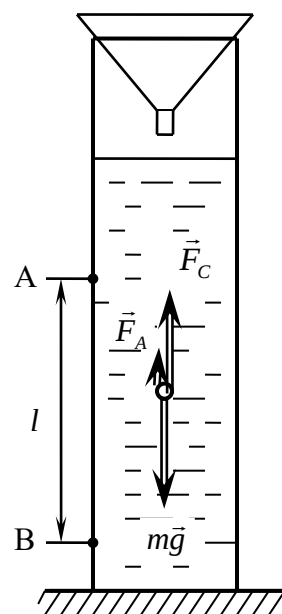


Рис. 8.3. Рух кульки у рідині

зрівноважать силу тяжіння F_m :

$$F_A + F_C = F_m .$$

З цього моменту кулька буде рухатися *рівномірно* з деякою усталеною швидкістю $v_{уст}$. Підставивши в останнє рівняння формули (8.2), (8.3) та (8.4), знайдемо вираз для коефіцієнта в'язкості:

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho - \rho_0) \frac{gr^2}{v_{уст}} . \quad (8.5)$$

Вимірявши довжину l певної ділянки рівномірного руху кульки та час τ її руху на цій ділянці, можна визначити усталену швидкість $v_{уст}$ кульки за формулою: $v_{уст} = l/\tau$. Тоді робоча формула для η набирає вигляду:

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho - \rho_0) \frac{gr^2\tau}{l} . \quad (8.6)$$

Отже, для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя за формулою (8.6) необхідно виміряти радіус r кульки, довжину l певної ділянки рівномірного руху кульки та час τ її руху на цій ділянці.

Умови застосовності методу Стокса. Оскільки у розглянутому способі визначення η використовується формула Стокса (8.4), то він є правильним лише у випадку, коли виконуються припущення, зроблені при виводі самої формули (нагадаємо, обтікання кульки має бути ламінарним, а рідина повинна мати необмежену протяжність у всіх напрямках). Критерієм вірогідності результатів експерименту у методі Стокса можна вважати відсутність систематичної залежності значень η від радіуса r кульок.

Провівши дослід з деяким числом n кульок, отримуємо спектр значень коефіцієнта в'язкості: $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_n$. Якщо ці значення не виявляють систематичної залежності від радіуса кульок, то можна провести їх математичну обробку.

Середнє значення коефіцієнта в'язкості:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i .$$

Середнє квадратичне відхилення окремого вимірювання:

$$\sigma_{\eta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{\eta} - \eta_i)^2}.$$

Межі абсолютної $\Delta\eta$ та відносної ε_{η} похибок при визначенні коефіцієнта в'язкості можна оцінити за формулами:

$$\Delta\eta = \frac{3\sigma_{\eta}}{\sqrt{n}}; \quad \varepsilon_{\eta} = \frac{\Delta\eta}{\bar{\eta}}.$$

Дослідження впливу стінок посудини. Якщо спостерігається систематична залежність η від радіуса r кульок, то, як правило, це пов'язано з впливом стінок посудини. В цьому випадку замість формули (8.5) слід скористатися формулою, що має поправку (її винесено в окремий множник) на кінцеві розміри посудини з внутрішнім радіусом R :

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho - \rho_0) \frac{gr^2}{\nu_{\text{вст}}} \cdot \frac{1}{1 + 2,4 \frac{r}{R}}.$$

Дослідження характеру обтікання кульки рідиною. Як відомо, при русі рідини по трубі характер течії – ламінарний або турбулентний (вихровий) – можна встановити за допомогою числа Рейнольдса (безрозмірна величина):

$$\text{Re} = \frac{\nu r \rho_0}{\eta},$$

де ν – швидкість потоку;

r – радіус труби;

ρ_0 , η – відповідно густина та коефіцієнт в'язкості рідини.

Якщо значення числа Рейнольдса менше критичного, рух рідини є ламінарним, якщо ж перевищує – турбулентним.

Характер обтікання кульки можна також встановити за допомогою числа Рейнольдса, яке для даного випадку:

$$\text{Re} = \frac{\nu_{\text{вст}} r \rho_0}{\eta},$$

де $\nu_{\text{вст}}$ – швидкість кульки; r – радіус кульки.

Обтікання буде ламінарним, якщо $\text{Re} < 10$. Цю нерівність можна перевірити за отриманими експериментальними даними.

Оцінка часу та шляху релаксації. Момент часу, з якого рух кульки можна вважати рівномірним, можна оцінити теоретично. Дійсно, на підставі другого закону Ньютона диференціальне рівняння руху кульки матиме вигляд (тут V – об’єм кульки):

$$V\rho \frac{dv}{dt} = Vg(\rho - \rho_0) - 6\pi\eta r v,$$

Інтегруючи це рівняння, знаходимо швидкість

$$v(t) = v_{\text{уст}} - [v_{\text{уст}} - v(0)]e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (8.7)$$

де введено такі позначення: $v(0)$ – швидкість кульки в момент початку її руху в рідині (звичайно $v(0) = 0$);

$v_{\text{уст}}$ – усталена швидкість кульки при її рівномірному русі у рідині,

$$v_{\text{уст}} = \frac{Vg(\rho - \rho_0)}{6\pi\eta r} = \frac{2}{9}gr^2 \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\eta};$$

τ – час релаксації,

$$\tau = \frac{V\rho}{6\pi\eta r} = \frac{2}{9} \frac{r^2\rho}{\eta}.$$

Як видно з формули (8.7), якщо час падіння t перевищує час релаксації τ у декілька разів, то процес установа швидкості можна вважати таким, що закінчився.

Інтегруючи рівняння (8.7), знайдемо переміщення кульки

$$s(t) = v_{\text{уст}}\tau \left(\frac{t}{\tau} - 1 + e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (8.8)$$

За допомогою цієї формули можна оцінити відстань від поверхні рідини, на якій рух кульки вже можна вважати рівномірним. Дійсно, при $t \gg \tau$ знаходимо

$$s \gg v_{\text{уст}}\tau.$$

Остання нерівність і визначає відстань між поверхнею рідини та верхньою позначкою А на рис. 8.3.



Підготовчі вправи.

Рівень А

1. Виберіть правильне твердження. В’язкість рідин (газів) – це властивість, завдяки якій ...

- А. ... дві або декілька речовин, які стикаються, проникають одна в іншу.
- Б. ... тепло передається від більш нагрітої частини речовини до менш нагрітої.
- В. ... вирівнюються швидкості руху різних шарів рідин (газів).

Г. ... між рідиною та її паром настає стан динамічної рівноваги.

2. Кулька рівномірно падає у рідині. В якій рідині – воді, гліцерині чи трансформаторному маслі – швидкість руху буде найбільшою?

А. У воді.

Б. У гліцерині.

В. У трансформаторному маслі.

Г. Швидкість буде однаковою у всіх рідинах.

3. Вода витікає з резервуара через тонку трубку (капіляр). При нагріванні води швидкість її витікання ...

А. ... збільшуватиметься.

Б. ... зменшуватиметься.

В. ... не змінюватиметься.

Г. ... спочатку зменшуватиметься, а потім збільшуватиметься.

4. У даній роботі розглянуто метод визначення в'язкості рідини, який базується на спостереженні за падінням кульки у рідині. Виберіть припущення, яке має виконуватися у даному методі.

А. Спостереження слід проводити на початковій ділянці руху кульки у рідині.

Б. Падіння кульки має проходити у досить вузькій трубці.

В. Обтікання кульки рідиною має бути ламінарним.

Г. Обтікання кульки рідиною має бути турбулентним.

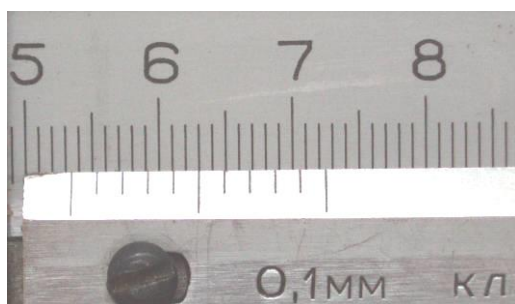
5. Відлік за шкалою штангенциркуля на рис. 8.4, а та б відповідно дає ...

А. ... 72,5 мм; 39,5 мм.

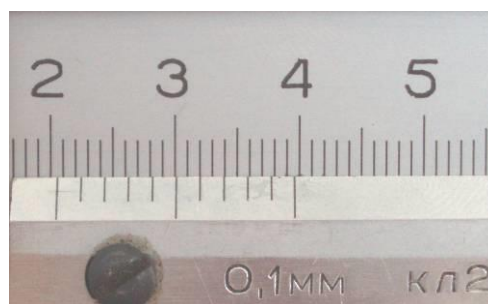
Б. ... 53,5 мм; 20,6 мм.

В. ... 5,35 мм; 2,06 мм.

Г. ... 5,5 мм; 2,6 мм.



а)



б)

Рис. 8.4. Покази штангенциркуля

6. Відлік за шкалою мікрометра на рис. 8.5, а та б відповідно дає ...

А. ... 10,25 мм; 15,13 мм.

Б. ... 13,25 мм; 16,13 мм.

В. ... 10,75 мм; 16,63 мм.

Г. ... 13,25 мм; 16,63 мм.

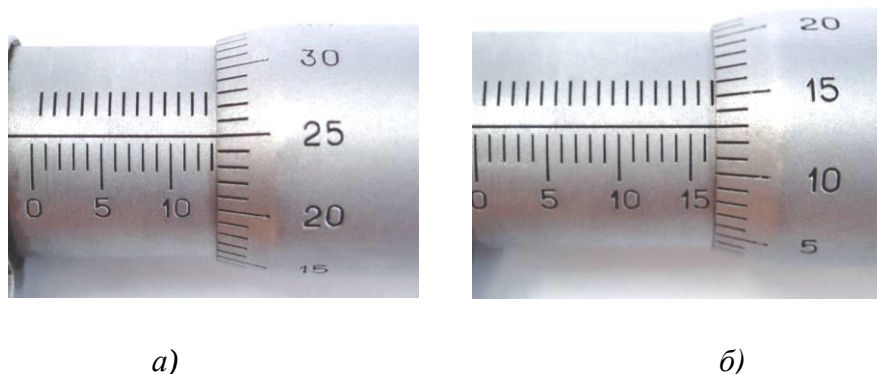


Рис. 8.5. Покази мікрометра

Рівень Б

7. Подані значення в'язкості запишіть в одиницях СІ (у $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$):
 120 $\text{мкПа}\cdot\text{с}$; 0,46 $\text{мПа}\cdot\text{с}$; 15 $\text{г}/(\text{см}\cdot\text{с})$; 0,64 П.

8. Знайдіть подані нижче основні вузли мікрометра безпосередньо на самому приладі або на його фотографії. Основними вузлами мікрометра є:

- сталева скоба, яка має нерухому п'яту;
- стебло з нижньою та верхньою шкалами;
- мікрометричний гвинт, що механічно з'єднаний з барабаном, на якому нанесено шкалу (при обертанні барабана гвинт, обертаючись, переміщується поступально);
- тріскачка – фрикційний пристрій (знаходиться на кінці барабана);
- стопорний гвинт.

9. Визначте ціну поділки шкали на барабані мікрометра, якщо відомо, що за один оберт барабана мікрометричний гвинт зміщується поступально на 0,5 мм, а вся шкала має 50 однакових поділок.

10. Для стрілочного секундоміра можливу похибку відліку приймають рівною ціні його поділки, на відміну від інших шкільних приладів, для яких ця похибка складає, як правило, половину ціни поділки. Як ви вважаєте, з чим це пов'язано?

11. Який рух тіла називають рівномірним? Як експериментально визначити ділянку, на якій рух кульки в рідині можна вважати рівномірним?

12. Складіть зручну таблицю для зведення результатів прямих вимірювань та розрахунків для серії дослідів з певним числом n кульок.

13. Як за допомогою наданого у роботі обладнання виміряти внутрішній діаметр циліндра з досліджуваною рідиною?

14. Який потік рідини називають ламінарним, а який – турбулентним?

15. Отримайте самостійно робочу формулу (8.6).

16. Обґрунтуйте формули для оцінки похибок $\Delta\eta$ та ε_η .

17*. Перевірте, чи дійсно обтікання кульки рідиною є ламінарним.

18*. Отримайте формули (8.7) та (8.8).

19*. Оцініть теоретично відстань від поверхні рідини, на якій рух кульки вже можна вважати рівномірним (див. рис. 8.3).



8.3. Додаткові творчі завдання.

Завдання для формування банку ідей.

1. Як знайти діаметр однакових кульок за допомогою мензурки з водою?

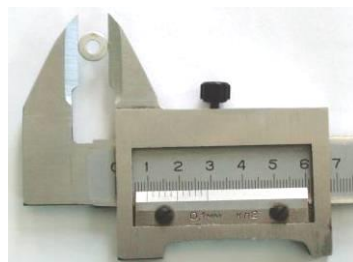
2. Як за допомогою аркуша цупкого паперу та лінійки виміряти внутрішній діаметр труби? Наведіть принаймні два способи?

3. Як за допомогою лінійки та аркуша паперу виміряти зовнішній діаметр труби, якщо до її торців неможливо підібратися? Як виконати це завдання лише за допомогою аркуша паперу “у клітинку”?

4. Як виміряти внутрішній діаметр труби за допомогою штангенциркуля, зображеного на рис. 8.6, а? Чи можна це зробити за допомогою іншого штангенциркуля (рис. 8.6, б)?



а)



б)

Рис. 8.6. Штангенциркулі

5. Як визначити швидкість потоку води з водопровідного крана за допомогою циліндричної посудини, секундоміра та штангенциркуля?

6. Як виміряти швидкість витікання води зі шланга за допомогою лінійки?

7. Бак відомого об'єму заповнюється водою за допомогою гнучкого шланга. Як визначити час заповнення бака за допомогою лінійки?

8. З нещільно закритого водопровідного крана тоненьким струмінцем витікає вода. Як, маючи лише лінійку, оцінити швидкість витікання води, а також її об'ємну витрату (об'єм води, що витікає з крана за одиницю часу)?

9. Як оцінити прискорення вільного падіння, спостерігаючи за тоненьким струмінцем, що витікає із майже закритого водопровідного крана? У розпорядженні є лінійка, посудина відомого об'єму та годинник.

Примітка. Для оцінних розрахунків у задачах 5 – 9 в'язкість води можна не враховувати.



Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.

Експериментальні задачі.

1. Дослідіть залежність швидкості падіння кульок у гліцерині від їхнього радіуса. *Обладнання:* вимірювальний циліндр з гліцерином, набір свинцевих кульок різних розмірів, лінійка, секундомір, мікрометр.

2. Дослідіть функціональну залежність швидкості витікання рідини з посудини від рівня цієї рідини у ній. *Обладнання:* дволітрова пластикова пляшка, шило, пластмасова трубочка (для коктейлю), пластилін, підставка для пляшки, лінійка, посудина для стоку води.

3. Дослідіть залежність сили опору повітря від швидкості усталеного руху (падіння) паперового конуса. *Обладнання:* десять паперових конусів, рулетка довжиною 2 м, пластилін.

Тренувальні винахідницькі задачі.

1. У розглянутому вище методі Стокса потрібно визначати час рівномірного руху кульки на певній ділянці. Безпосередні вимірювання за

допомогою секундоміра обумовлюють досить велику похибку. Запропонуйте спосіб або пристрій більш точного визначення часу руху кульки.

2. Для вимірювання швидкості вітру використовують спеціальні прилади – *анемометри*. На рис. 8.7 наведено кілька можливих схем анемометрів. Поясніть принцип дії кожної схеми. Виявіть їхні переваги та недоліки. Спробуйте усунути недоліки поданих схем або запропонуйте власну конструкцію анемометра.

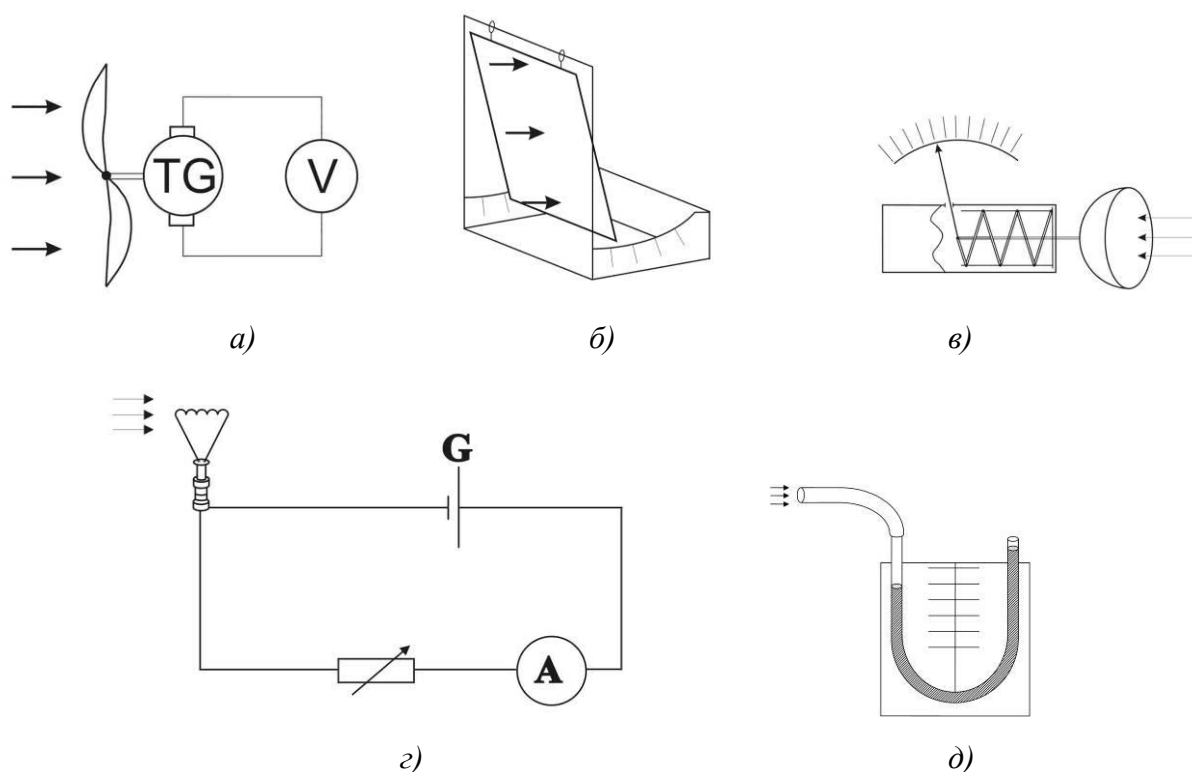


Рис. 8.7. Деякі схеми анемометрів



Зробіть своїми руками!

1. На рис. 8.8 наведено кронциркуль та нутромір – технічні пристрої, які допомагають вимірювати лінійні розміри. Вони складаються з двох однакових частин, які з'єднані з можливістю повертатися одна відносно одної на довільний кут. За допомогою кронциркуля можна, наприклад, вимірювати зовнішній діаметр труби, а за допомогою нутроміра – внутрішній. Поясніть, як саме? Виготовте кронциркуль або нутромір. Прилади стануть у пригоді у домашньому господарстві.



Рис. 8.8. Кронциркуль (а) та нутромір (б)

2. Виготовте анемометр (скористайтесь вже існуючими його схемами або застосуйте власну конструкцію). Проведіть тарування приладу.

9. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА



9.1. Теоретичні відомості.

Для накопичення різнойменних електричних зарядів використовуються *конденсатори*. Конденсатор – це пристрій, що складається з двох провідників (обкладок), розділених шаром діелектрика, товщина якого є малою порівняно з лінійними розмірами провідників. Так, дві плоскі металеві пластини, що розташовані паралельно та розділені шаром діелектрика, утворюють *плоский конденсатор*.

Якщо підключити конденсатор до джерела постійної напруги, то конденсатор зарядиться – на його обкладках з'являться рівні за модулем, але протилежні за знаком заряди $+q$ та $-q$. При цьому між обкладками виникне різниця потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$, яка в даному випадку співпадає за змістом з напругою U між обкладками:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U.$$

Електричною ємністю C конденсатора називають фізичну величину, що визначається відношенням заряду q однієї з обкладок конденсатора до різниці потенціалів (напруги) між його обкладками:

$$C \equiv \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (9.1)$$

Ємність C характеризує властивість конденсатора накопичувати електричний заряд: при зарядженні різних конденсаторів від даного джерела постійної напруги ($U = \text{const}$) більший заряд q з'явиться на обкладках конденсатора з більшою ємністю C ($q = CU$). Одиницею електроємності в СІ є *фарад* (Ф).

З'ясуємо, від яких параметрів конденсатора залежить його ємність. Обмежимося випадком плоского конденсатора.

У зв'язку з тим, що відстань між обкладками плоского конденсатора набагато менша лінійних розмірів його пластин, електричне поле усередині конденсатора можна вважати *однорідним*. У такому випадку напруга U між обкладками дорівнює

$$U = Ed, \quad (9.2)$$

де E – напруженість електричного поля між пластинами;

d – відстань між обкладками конденсатора.

Вважаючи поле однорідним, маємо:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 S}, \quad (9.3)$$

де σ – поверхнева густина заряду пластини, $\sigma = q/S$;

ε – діелектрична проникність діелектрика, який заповнює простір між обкладками;

ε_0 – електрична стала;

S – площа пластини конденсатора.

Підставивши формули (9.2) та (9.3) в (9.1), отримаємо вираз для ємності плоского конденсатора:

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

Конденсатори знайшли широке використання в електротехніці та радіоелектроніці: для налаштування радіоприймачів, для згладжування пульсацій струму, для забезпечення з'єднання (роз'єднання) електричного кола, для компенсації реактивної потужності у мережах електропостачання, у датчиках (переміщення, контролю рівня рідини) тощо.

Отже, вимірювання електроємності як основної характеристики конденсатора є важливою задачею електричних вимірювань.



9.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я . Виміряти електричну ємність конденсатора балістичним методом.

О б л а д н а н н я : конденсатор невідомої ємності; набір конденсаторів відомої ємності (або батарея конденсаторів); гальванометр (або

мікроамперметр) магнітоелектричної системи; блок живлення постійного струму; перемикач однополюсний; з'єднувальні провідники.



Рис. 9.1. Деякі пристрої, що використовуються при виконанні досліду

Балістичний метод. Приладами магнітоелектричної системи називають такі, робота яких базується на дії магнітного поля постійного магніту на рамку зі струмом (рис. 9.2). При проходженні постійного струму через рамку такого приладу момент сил Ампера, що діють на рамку, пропорційний силі струму. Повороту рамки протидіє момент сили пружності спіральних пружин, який зростає пропорційно куту повороту стрілки. Отже, кут відхилення стрілки виявляється пропорційним силі струму в рамці приладу.

Інший результат отримуємо при *короткочасному* проходженні струму через рамку приладу магнітоелектричної системи, наприклад, при розрядженні конденсатора. Так, якщо час τ протікання струму через рамку значно менший періоду вільних коливань рухомої системи приладу, то таке короткочасне проходження струму діє як поштовх, який викликає вільні коливання рухомої системи. При цьому амплітуда коливань стрілки буде пропорційна електричному заряду, який пройшов через рамку.

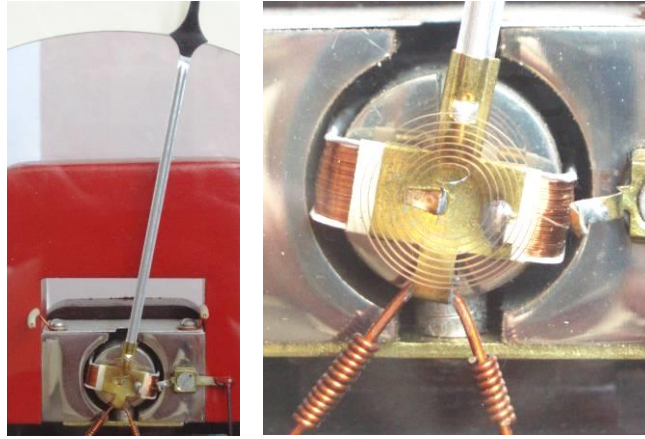


Рис. 9.2. Будова приладу магнітоелектричної системи

Отже, якщо заряджати конденсатор постійної ємності від джерела постійної напруги, а потім розряджати його через гальванометр, то стрілка приладу кожного разу буде відхилятися по шкалі на однакове число поділок (з точністю до випадкових похибок). Для конденсаторів іншої ємності відхилення стрілки гальванометра буде іншим, але пропорційним ємності конденсатора.

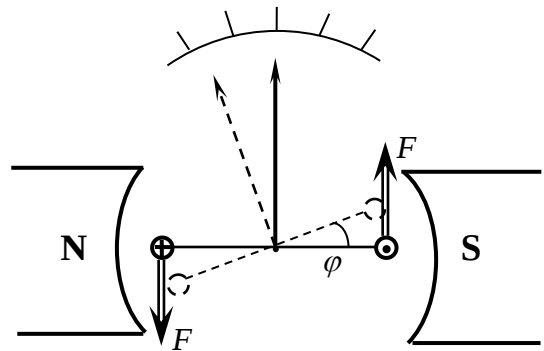


Рис. 9.3. Відхилення рамки приладу при проходженні електричного струму

Останнє твердження легко довести за допомогою спрощеної моделі. Нехай рамка приладу має лише один виток (рис. 9.3), який складається з двох бічних стержнів з довжинами l та масами m , на які діє сила Ампера при протіканні струму в рамці. Стержні з'єднані легкими провідниками. Повороту рамки від положення рівноваги (на рис. 9.3 цьому положенню відповідає горизонтальне розташування рамки) протидіють дві спіральні пружини з коефіцієнтами жорсткості γ .

Знайдемо максимальний кут відхилення рамки від положення рівноваги при розрядженні конденсатора ємністю C , зарядженого до напруги U , вважаючи, що розрядження відбувається за досить короткий час τ . Це припущення дозволяє вважати, що відхилення рамки упродовж часу τ буде малим. За цей час кожен з бічних стержнів рамки отримає імпульс p .

Згідно з другим законом Ньютона, за час dt під дією сили Ампера F_A імпульс стержня зміниться на dp :

$$dp = F_A dt.$$

Тому після розрядження конденсатора модуль імпульсу кожного стержня буде:

$$p = \int_0^{\tau} F_A dt = Bl \int_0^{\tau} Idt = Blq,$$

де q – заряд, який пройшов через рамку за час τ .

При повній розрядці конденсатора

$$q = CU.$$

Тому

$$p = BlCU.$$

Кут φ відхилення рамки (стрілки приладу) знайдемо, скориставшись законом збереження енергії:

$$2 \frac{p^2}{2m} = 2 \frac{\gamma \varphi^2}{2}.$$

Звідки

$$\varphi = \frac{p}{\sqrt{\gamma m}} = \frac{BlU}{\sqrt{\gamma m}} \cdot C.$$

Отже, кут φ відхилення стрілки приладу магнітоелектричної системи при розрядженні через нього конденсаторів (заряджених до однакової напруги) пропорційний їх ємності C :

$$\varphi \sim C.$$

Для проведення дослідів з визначення ємності конденсатора балістичним методом можна скласти електричне коло за схемою, яку зображено на рис. 9.4. Коло містить джерело постійного струму, конденсатор, гальванометр (або мікроамперметр) та однополюсний перемикач.

Для зарядження конденсатора його достатньо на короткий час з'єднати з джерелом струму. Для цього перемикач K потрібно перевести у положення 1. Розрядження конденсатора через гальванометр досягається переведенням перемикача у положення 2. При цьому слід, зосередивши увагу на стрілці гальванометра, помітити максимальне її відхилення (у поділках шкали).

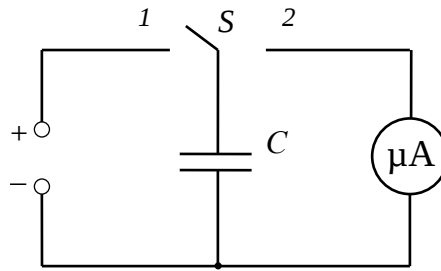


Рис. 9.4. Принципова електрична схема для зарядження та розрядження конденсатора

Зазначимо, що струм розрядки конденсатора може перевищити максимально допустимий для гальванометра. Щоб зменшити імовірність пошкодження приладу, досліди слід починати з конденсаторами меншої ємності. Крім того, при першій спробі розрядження конденсатора для обмеження струму послідовно з гальванометром можна ввімкнути реостат.

За допомогою конденсаторів відомої ємності можна дослідним шляхом переконатися, що число поділок N , на яке відхиляється стрілка гальванометра, буде пропорційне ємності C конденсатора:

$$N \sim C.$$

Введемо коефіцієнт пропорційності k за формулою:

$$k \equiv \frac{C}{N}. \quad (9.4)$$

З останньої формули легко зрозуміти, що k чисельно дорівнює ємності конденсатора, що викликає при розряджанні відхилення стрілки гальванометра на *одну* поділку.

Коефіцієнт пропорційності k можна визначити за допомогою конденсатора відомої ємності. Знаючи k , за відхиленням N_x стрілки гальванометра легко визначити ємність C_x невідомого конденсатора (провівши з ним описаний дослід):

$$C_x = kN_x. \quad (9.5)$$

Похибки проведеного у такий спосіб вимірювання ємності конденсатора можна оцінити так. Згідно з формулою (9.5), для межі відносної похибки маємо:

$$\varepsilon_{C_x} = \varepsilon_k + \varepsilon_{N_x} = \varepsilon_N + \varepsilon_{N_x}, \quad (9.6)$$

де $\varepsilon_k = \varepsilon_N$ з урахуванням формули (9.4);

$\varepsilon_N, \varepsilon_{N_x}$ – межі відносних похибок визначення показів гальванометра.

Методика оцінки ε_N та ε_{N_x} однакова. Розглянемо її на прикладі знаходження ε_N . Провівши дослід із зарядження та розрядження конденсатора відомої ємності кілька (нехай n) разів, отримаємо спектр значень показів гальванометра, які будуть дещо відрізнятися в силу випадкових причин:

$$N_1, N_2, N_3, \dots, N_n.$$

Середнє значення відхилення $\bar{N}$ стрілки приладу у серії з n дослідів:

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i.$$

Середнє квадратичне відхилення окремого вимірювання:

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}.$$

Межі абсолютної $\Delta \bar{N}$ та відносної ε_N похибок при визначенні показів гальванометра можна оцінити за формулами:

$$\Delta \bar{N} = \frac{3\sigma_N}{\sqrt{n}}; \quad \varepsilon_N = \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}}.$$

У такий же самий спосіб можна оцінити ε_{N_x} . Визначивши за формулою (9.6) межу відносної похибки ε_{C_x} , можна оцінити межу абсолютної похибки ΔC_x отриманого значення ємності C_x :

$$\Delta C_x = \varepsilon_{C_x} \cdot C_x.$$

Розглянемо більш точний спосіб визначення коефіцієнта пропорційності k . Виконавши досліди з конденсаторами різної ємності, отримаємо записану у табличній формі залежність числа N поділок шкали гальванометра від ємності C конденсатора. Вище було показано, що ця залежність є лінійною. За її графіком (прямою) можна знайти k .

Зазначимо, що якщо побудувати графік залежності $C = C(N)$, то коефіцієнт k , що визначається формулою (9.4), співпадатиме за змістом з кутовим коефіцієнтом нахилу цієї прямої (рис. 9.5). Останній дорівнює тангенсу кута, який утворює пряма з додатним

напрямком осі абсцис. Отже, коефіцієнт пропорційності k можна визначити за координатами $(N_0; C_0)$ будь-якої точки графіка $C = C(N)$:

$$k = \frac{C_0}{N_0}.$$

Нагадаємо, що при спрощеній побудові проводити пряму потрібно так, щоб приблизно однакове число експериментальних точок виявилось по різні боки графіка.

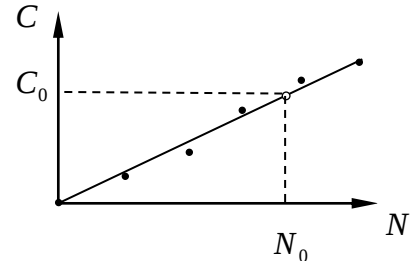


Рис. 9.5. Визначення коефіцієнта k за графіком $C = C(N)$

? Підготовчі вправи.

Рівень А

1. Які величини можна визначити за наведеними виразами? Встановіть відповідність:

- | | |
|--|--|
| 1 $\frac{q^2}{2C}$ | А Напруженість поля усередині плоского конденсатора |
| 2 $\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ | Б Модуль сили притягання між обкладками конденсатора |
| 3 U/d | В Енергія електричного поля конденсатора |
| 4 $C \cdot U$ | Г Ємність плоского конденсатора |
| | Д Заряд на обкладці конденсатора |

2. Яка фізична величина є силовою характеристикою електричного поля?

- | | |
|-------------------------|--------------------|
| А. Електричний заряд. | Б. Електроємність. |
| В. Різниця потенціалів. | Г. Напруженість. |

3. На рис. 9.6 наведено шкільний розсувний конденсатор. Він є ...

- | | |
|----------------------|------------------|
| А. ... сферичним. | Б. ... плоским. |
| В. ... циліндричним. | Г. ... кульовим. |

4. Діелектрична проникність діелектрика показує, ...

- | |
|--|
| А. ... у скільки разів напруженість поля в діелектрику більше напруженості поля у вакуумі. |
| Б. ... у скільки разів напруженість поля в діелектрику менше напруженості поля у вакуумі. |



Рис. 9.6. Шкільний конденсатор

В. ... на скільки напруженість поля в діелектрику більше напруженості поля у вакуумі.

Г. ... на скільки напруженість поля в діелектрику менше напруженості поля у вакуумі.

5. Яка з наступних змін параметрів *не* призведе до збільшення заряду конденсатора?

А. Збільшення площі пластин.

Б. Зменшення відстані між пластинами.

В. Збільшення товщини пластин.

Г. Збільшення напруги між пластинами.

6. Коли напруга на конденсаторі дорівнює 200 В, модуль заряду кожної з його пластин $2 \cdot 10^{-3}$ Кл. Знайдіть ємність конденсатора.

А. 4 мкФ.

Б. 10 мкФ.

В. 40 мкФ.

Г. 100 мкФ.

7. Як зміниться ємність плоского повітряного конденсатора, якщо відстань між пластинами зменшити у 5 разів?

А. Зменшиться у 5 разів.

Б. Залишиться незмінною.

В. Збільшиться у 5 разів.

Г. Збільшиться у 25 разів.

8. Який конденсатор (з тих, що зображені на рис. 9.7) можна вмикати в мережу змінної напруги 220 В?

А. Конденсатор 1.

Б. Конденсатор 2.

В. Конденсатор 3.

Г. Будь-який з наведених.



Рис. 9.7. Конденсатори

Рівень Б

9. Поясніть, що таке конденсатор:

- основні конструктивні особливості;
- призначення та принцип дії;
- позначення на електричних схемах.

10. Накресліть принципову електричну схему кола для вимірювання ємності конденсатора балістичним методом.

11. Який зміст має коефіцієнт пропорційності k , що визначається за формулою (9.4)?

12. Як можна обмежити струм розрядки конденсатора, щоб не пошкодити гальванометр (мікроамперметр)?

13. Отримайте робочу формулу (9.5).

14. Як оцінити похибки вимірювання ємності C_x конденсатора у методі гальванометра (балістичний метод)?

15. При повторенні досліду із зарядження та розрядження деякого конденсатора було отримано спектр значень N_i відхилення стрілки гальванометра (у поділках його шкали): 11; 12; 12; 10; 11; 13. Знайдіть середнє значення відхилення $\bar{N}$ стрілки та оцініть межі його абсолютної $\Delta\bar{N}$ і відносної ε_N похибок.

16. Заряджаючи по черзі конденсатори різної ємності від джерела постійної напруги та розряджаючи їх через гальванометр, отримали залежність відхилення стрілки гальванометра (у поділках його шкали) від ємності конденсатора (табл. 9.1).

Таблиця 9.1

Експериментальні дані до задачі 16

Ємність конденсатора C , мкФ	1	2	3	4	5
Число поділок N	6	13	16	23	32

За цією табличною залежністю необхідно:

- побудувати графік залежності $C = C(N)$;
- за графіком знайти коефіцієнт пропорційності k , що визначається за формулою (4);
- визначити, на яке число поділок повинна відхилитися стрілка гальванометра при розрядженні конденсатора з ємністю 10 мкФ;
- знайти ємність конденсатора, який при розрядженні викликав би відхилення стрілки на 20 поділок.

17. У досліді вимірювався заряд q на одній з обкладок конденсатора при різних значеннях прикладеної до пластин напруги U . Результати подані у табл. 9.2.

Таблиця 9.2

Експериментальні дані до задачі 17

Напруга U , В	2,0	4,0	6,0	8,0	10
Заряд q , мкКл	14	30	44	62	75

За цими даними:

- побудувати графік залежності $q = q(U)$;
- за графіком визначити ємність конденсатора, який було використано у досліді.

18*. У табл. 9.3 наведено залежність струму I розрядки конденсатора від часу t

Таблиця 9.3

Експериментальні дані до задачі 18

I , мкА	32	24	22	20	18	17	15	13	12	11	10	9,5	8,5
t , с	5	10	15	20	25	30	40	60	80	100	120	140	180

За цими даними необхідно:

- побудувати графік залежності $I = I(t)$;
- знайти аналітичний вигляд залежності $I = I(t)$;
- визначити струм у початковий момент часу, а також через 5 хв після цього;
- визначити заряд, який пройшов у ланцюгу.

9.3. Додаткові творчі завдання.

Завдання для формування банку ідей.

1. На тонких шовкових нитках підвішені дві однакові гільзи з фольги, одна з яких заряджена, а інша ні. Як визначити, яка саме з них заряджена, не користуючись ніякими приладами та матеріалами?

2. Як за допомогою негативно зарядженої кульки зарядити позитивно (негативно) іншу таку ж саму кульку, не змінюючи заряду першої кульки?

3. Чи можна, маючи дві металеві кульки, з яких лише одна заряджена, надати порожньому металевому циліндру заряд більший, ніж заряд на кульці?

4. Як за допомогою декількох однакових вольтметрів виміряти напругу на ділянці кола, якщо її передбачуване значення перевищує межу вимірювання одного вольтметра?

5. Як за допомогою лінійки та довідника з фізики визначити ємність конденсатора, що складається з прямокутної скляної пластини, обидва боки якої обклеєні станіолем?

6. Між обкладками (дисками) шкільного розсувного конденсатора (див. рис. 9.6) розміщено скляну пластинку. Конденсатор зарядили і від'єднали від джерела. Як збільшити енергію конденсатора (запропонуйте принаймні два способи)? Поясніть, звідки конденсатор отримує при цьому додаткову енергію.



Рис. 9.8. Електролітичний конденсатор

7. Як визначити енергію електричного поля, яку може накопичити електролітичний конденсатор (рис. 9.8) при його підключенні до джерела постійного струму, якщо у наявності є лише вольтметр?



Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.

Експериментальні задачі.

1. Виміряйте електроємність конденсатора та діелектричну проникність його діелектрика. *Обладнання:* два однакових керамічних (сегнетоелектричних) конденсатори невідомої ємності, один з яких має зшліфовану грань, керамічний конденсатор відомої ємності ($C = 0,03$ мкФ), джерело постійного струму, гальванометр М 273/9, перемикач, штангенциркуль, лупа.

2. Визначте ємність конденсатора. *Обладнання:* конденсатор, джерело змінного струму, вольтметр, резистор з відомим опором, з'єднувальні провідники.

3. Визначте ємність конденсатора. *Обладнання:* два конденсатори: відомої ($C = 10$ мкФ) та невідомої C_x ємності, джерело постійного струму (гальванічний елемент), вольтметр, потенціометр, ключ, монтажна плата, з'єднувальні провідники.

4. Визначте ємність конденсатора методом його зарядки або розрядки. *Обладнання:* конденсатор великої ємності, мікроамперметр, резистор з відомим

опором, джерело постійного струму, секундомір, ключ, з'єднувальні провідники.

Тренувальні винахідницькі задачі.

1. Розкрийте таємницю чорного ящика (рис. 9.9), якщо після замикання контакту вимикача S (за допомогою якого подається напруга на чорний ящик) лампа H починає світитися не “одразу”, а лише через деякий час.

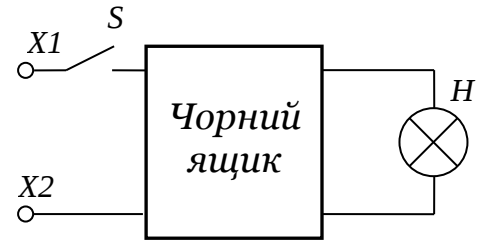


Рис. 9.9. Чорний ящик до тренувальної винахідницької задачі №1

2. Як з шести конденсаторів 1 мкФ, 2 мкФ, 4 мкФ, 8 мкФ, 16 мкФ та 32 мкФ зробити батарею конденсаторів, за допомогою якої можна було б отримувати будь-яке ціле значення ємності від 1 мкФ до 63 мкФ? Як розширити діапазон можливих значень ємності в такому пристрої?

3. Як відомо, ємність плоского конденсатора залежить від відстані між обкладками, від їх площі, від діелектричної проникності діелектрика, який заповнює простір між пластинами. Ці залежності використовуються в *ємнісних датчиках*. Так, на рис. 9.10 наведено схему датчика рівня рідини. У випадку, коли рідина є електропровідною, обкладки конденсатора мають бути ізольовані від рідини шаром діелектрика.

Завдання.

- Поясніть схему та фізичний принцип дії наведеного датчика.
- Отримайте формулу залежності електричної ємності C датчика від висоти h рівня рідини $C = C(h)$ у випадках, коли рідина є:

- діелектриком;
- провідником.

- Використавши наведений датчик, розробіть пристрій для вимірювання рівня рідини.

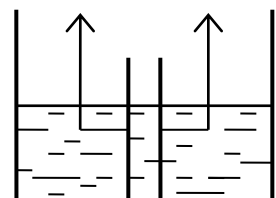


Рис. 9.10. Ємнісний датчик рівня рідини

- Запропонуйте свій варіант ємнісного датчика рівня рідини. Поясніть його конструкцію та принцип дії. Отримайте функціональну залежність ємності датчика від висоти рівня рідини.

Примітки.

а) У випадку, коли рідина є провідником, потрібно врахувати подвійний шар діелектрика, що ізолює обкладки від рідини;

б) всі необхідні для виводу формули $C = C(h)$ параметри (розміри конденсатора, діелектричні проникності матеріалів) вважати відомими.



Зробіть своїми руками!

В електролітичних конденсаторах шаром діелектрика виступає плівка оксиду алюмінію на алюмінієвій фользі (вона є однією з обкладок), яка розміщена в електроліті (який є іншою обкладкою). Мала товщина плівки дозволяє виготовляти електролітичні конденсатори великої ємності при порівняно малих розмірах. Але ці конденсатори мають суттєвий недолік: необхідно враховувати *полярність* при ввімкненні в електричне коло. Через це електролітичні конденсатори не можна вмикати безпосередньо в мережу змінного струму.

Проте, існують способи застосування електролітичних конденсаторів у мережі змінного струму. Наприклад, можна скористатися схемою, яку подано на рис. 9.11.

Поясніть, як працює схема.

Зберіть схему, підібравши елементи на відповідну напругу.

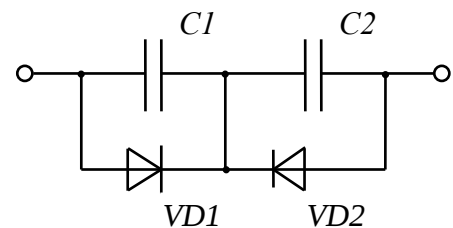


Рис. 9.11. Схема ввімкнення електролітичних конденсаторів у коло змінного струму

10. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКА



10.1. Теоретичні відомості.

Вимірювання електричного опору є досить поширеною фізико-технічною задачею. Так, однією з умов працездатності певного електричного пристрою (електронагрівальні пристрої, електричні машини та апарати, електровимірювальні прилади тощо) є відповідність опору його струмопровідних частин (нагрівальні спіралі, обмотки) розрахунковим (номінальним) даним. Вимірювати (або принаймні оцінювати) опір інколи доводиться і вдома при з'ясуванні причини несправності побутових пристроїв (лампи розжарювання, електроплитки, праски, електросвердлильної машини).

Опір провідника, по якому протікає постійний струм, ще називають *омічним* опором. У разі проходження по провіднику змінного струму, його повний опір визначається не лише омічним опором, а залежить, наприклад, від частоти змінного струму та форми провідника. У даній роботі йтиметься про вимірювання саме омічного опору.



10.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я . Виміряти опір дротяного реостата. Визначити питомий опір матеріалу дроту та встановити, з якого металу його зроблено.

О б л а д н а н н я : досліджуваний дротяний реостат (опір реостата кілька Ом), амперметр (опір амперметра $R_a = 0,1$ Ом), вольтметр (опір вольтметра $R_v = 2$ кОм), міліметрова лінійка або штангенциркуль, джерело струму (батарейка або блок живлення постійного струму), вимикач, з'єднувальні провідники.

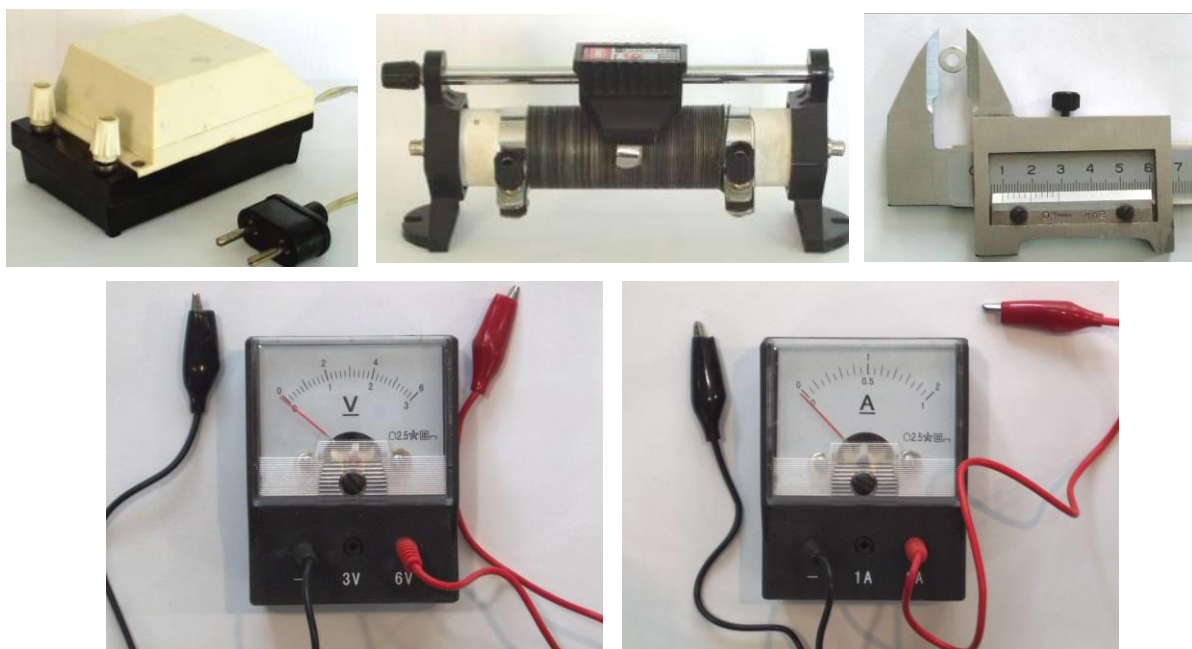


Рис. 10.1. Деякі пристрої, що використовуються при виконанні досліду

Метод амперметра – вольтметра. Для прямого вимірювання електричного опору існує спеціальний прилад – *омметр*. Проте визначити опір можна і без нього (непрямим методом). Для одного з таких способів потрібні амперметр і вольтметр. Цей спосіб, який базується на застосування закону Ома для ділянки кола, відомий у теорії електричних вимірювань як *метод амперметра і вольтметра*. Він передбачає дві принципові схеми вимірювання (рис. 10.2).

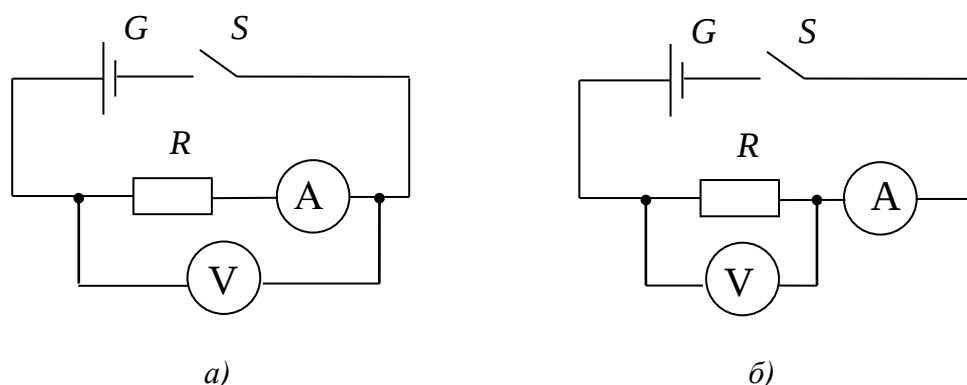


Рис. 10.2. Схеми вимірювання опору за методом амперметра і вольтметра

При вимірюванні за схемою (a), опір резистора визначається за формулою:

$$R = \frac{U - U_a}{I} = \frac{U - I \cdot R_a}{I}, \quad (10.1)$$

де U – напруга на резисторі та амперметрі (напруга, яку показує вольтметр);

U_a – напруга на амперметрі; I – сила струму, що протікає через резистор та амперметр (сила струму, яку показує амперметр); R_a – опір амперметра.

При вимірюванні за схемою (б):

$$R = \frac{U}{I - I_g} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_g}}, \quad (10.2)$$

де U – напруга на резисторі (напруга, яку показує вольтметр); I – сила струму, що протікає через амперметр; I_g – сила струму, що протікає через вольтметр; R_g – опір вольтметра.

Формули (10.1) та (10.2) спрощуються, якщо $R_a \ll R$ або $R_g \ll R$. В цих випадках

$$R \approx \frac{U}{I}. \quad (10.3)$$

Отже, в нашій роботі для вимірювання опору реостата потрібно зняти покази амперметра і вольтметра за схемою (а) або (б).

Відносну похибку вимірювання опору, з урахуванням формул (10.1) та (10.2), можна оцінити за формулами:

- для схеми (а):

$$\varepsilon_R \equiv \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U - IR_a} + \frac{\Delta I \cdot R_a}{U - I \cdot R_a}, \quad (10.4)$$

де ΔI , ΔU – межі абсолютних похибок при прямих вимірюваннях сили струму та напруги відповідно;

- для схеми (б):

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I \cdot R_g}{IR_g - U} + \frac{\Delta U}{IR_g - U}. \quad (10.5)$$

Якщо ж користуватися наближеною формулою (10.3), то відносна похибка:

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U}. \quad (10.6)$$

В останньому випадку буде мати місце ще й систематична похибка, пов'язана із переходом від “точних” формул (10.1) та (10.2) до наближеної – (10.3).

Для визначення питомого опору ρ матеріалу дроту, з якого виготовлено реостат, скористаємось відомою формулою для опору R однорідного провідника довжиною l з постійним поперечним перерізом S :

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Звідки

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

Площу поперечного перерізу S та довжину l дроту можна знайти непрямыми методами. Кінцева формула для ρ матиме вигляд:

$$\rho = \frac{RL^2}{4n^3D}, \quad (10.7)$$

де L – довжина обмотки реостата; n – кількість витків обмотки; D – діаметр витка обмотки.

Отже, для визначення питомого опору матеріалу обмотки реостата потрібно знати його опір, довжину обмотки та діаметр її витків. Користуючись формулою (10.7), можна оцінити відповідну похибку такого вимірювання:

$$\varepsilon_\rho \equiv \frac{\Delta\rho}{\rho} = \varepsilon_R + 2\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta D}{D}. \quad (10.8)$$

Після знаходження значення ρ , за відповідною таблицею питомих опорів можна встановити матеріал провідника реостата.

Підготовчі вправи.

Рівень А

1. Установіть відповідність:

1	I	А	В
2	U	Б	Кл
3	R	В	Ом·м

- 4 ρ Г А
 Д Ом

2. Установіть відповідність:

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1 $I = \frac{dq}{dt}$ | А Вираз для сили постійного струму в провіднику |
| 2 $I = \frac{U}{R}$ | Б Закон Ома для повного кола |
| 3 $I = \frac{E}{R+r}$ | В Визначення сили струму |
| 4 $I = e \cdot n \cdot v \cdot S$ | Г Закон Ома для ділянки кола |
| | Д Закон Ома у диференціальній формі |

3. Чому дорівнює електричний опір мідного провідника довжиною 100 м з площею поперечного перерізу 0,25 мм²? Питомий опір міді (при 20°C) складає 1,7·10⁻⁸ Ом·м.

- А. 4,25 мОм. Б. 0,68 Ом. В. 6,8 Ом. Г. 68 Ом.

4. Яким має бути опір амперметра для вимірювання сили струму в певній ділянці кола?

- А. Порівнянним з опором ділянки кола. Б. Набагато меншим за опір ділянки кола.
В. Набагато більшим за опір ділянки кола. Г. Порівнянним з опором вольтметра.

5. Шкала вольтметра має 150 поділок. Вольтметр розрахований на вимірювання напруги до 3 В. Стрілка приладу відхиляється на 50 поділок при проходженні через нього струму 1 мА. Чому дорівнює електричний опір приладу?

- А. 0,5 кОм. Б. 1 кОм. В. 1,5 кОм. Г. 2 кОм.

Рівень Б

6. На рис. 10.3 наведені шкали приладів з однією границею вимірювання. Визначте: призначення приладу; ціну поділки шкали; границю вимірювання; покази приладу.

Оцініть межі: абсолютної похибки приладу Δ_{np} , абсолютної похибки відліку $\Delta_{відл}$, абсолютної Δ та відносної ε похибок результату вимірювання.

Виміряне значення запишіть з урахуванням межі абсолютної похибки у вигляді: $A \pm \Delta A$.

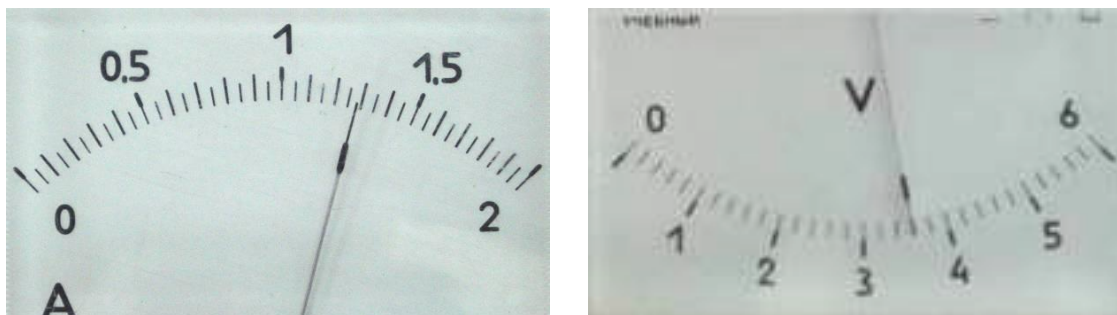


Рис. 10.3. До завдання 6

7. Отримайте формули (10.1) та (10.2).

8. Яку схему Ви виберете (рис. 10.4) для вимірювання опору резистора, якщо опори амперметра і вольтметра складають відповідно декілька Ом і декілька кОм? Розгляньте випадки, коли передбачуваний опір резистора лежить у межах кількох Ом та кількох кОм.

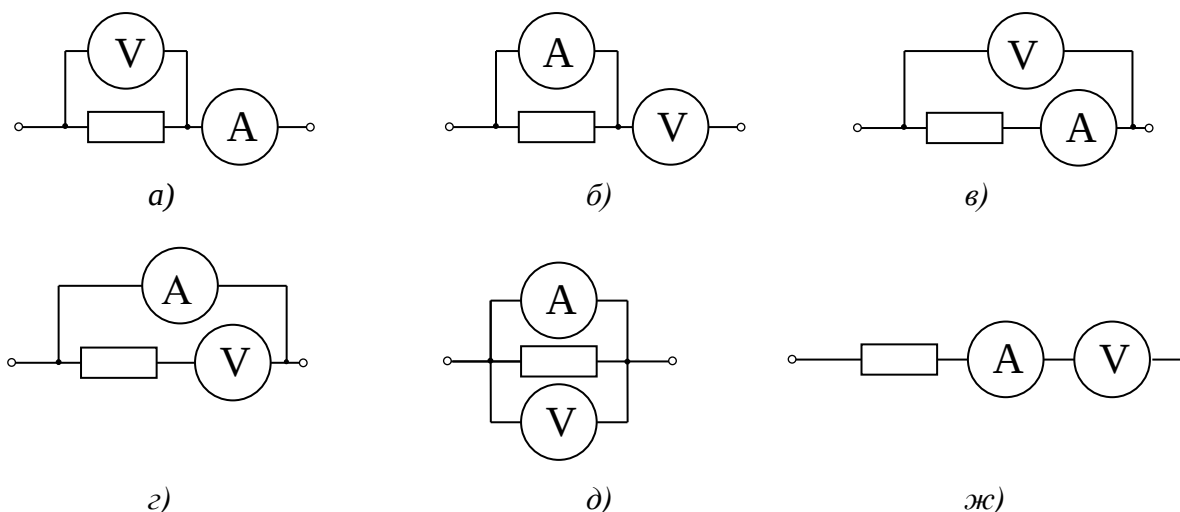


Рис. 10.4. Схеми до завдань 8 та 9

9. Яку зі схем (див. рис. 10.4) слід застосувати у нашому дослідженні?

10. Чи можна у даній роботі скористатись наближеною формулою (10.3)? Виміряний за цією формулою опір виявиться більшим або меншим, ніж насправді?

11. Як з'ясувати експериментально (за допомогою наданого обладнання), чи можна вважати опір вольтметра набагато більшим, а опір амперметра набагато меншим, ніж опір досліджуваного резистора?

12. Чи правильно працює ватметр, який показує потужність постійного струму $P = 600$ Вт, якщо справні прилади показують: напругу $U = 120$ В, силу струму $I = 6,0$ А?

13. Доведіть формули (10.4), (10.5) та (10.6).

14. Як знайти довжину дроту реостата (не розмотуючи його) за допомогою штангенциркуля або лінійки?

15. Як знайти діаметр дроту реостата за допомогою лінійки?

16. Отримайте формули (10.7) та (10.8).

17. Дослід з вимірювання питомого опору дротяного резистора проводився за допомогою акумулятора, амперметра (для вимірювання сили струму у резисторі), вольтметра (ним вимірювалася напруга на резисторі), рулетки та мікрометра (для вимірювання довжини та діаметру дроту відповідно). За наведеними результатами прямих вимірювань, $I = 0,50$ А $\pm$ 0,05 А, $U = 3,0$ В $\pm$ 0,1 В, $l = 100,0$ см $\pm$ 0,5 см, $d = 0,30$ мм $\pm$ 0,01 мм, визначте питомий опір резистора. Яка точність при цьому була досягнута?



10.3. Додаткові творчі завдання.

Завдання для формування банку ідей.

1. Як виміряти діаметр дроту за допомогою олівця і аркуша “у клітинку”?

2. Як виміряти діаметр дроту лише за допомогою аркуша “у клітинку”?

3. Як знайти довжину дроту у мотку (не розмотуючи його) за допомогою терезів з різноважками, міліметрового паперу та довідника з фізики?

4. Як за допомогою декількох однакових амперметрів виміряти силу струму на ділянці кола, якщо її передбачуване значення перевищує границю вимірювання одного амперметра?

5. Як виміряти опір вольтметра за допомогою резистора з відомим опором та джерела струму (відомо, що опір вольтметра набагато більший за внутрішній опір джерела)?

6. Як знайти опір електричної праски у робочому режимі (паспортні дані відсутні) за допомогою електролічильника та радіоприймача? Розглянути окремо випадки, коли радіоприймач живеться від мережі та від батареї гальванічних елементів.



Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.

Експериментальні задачі.

1. Визначити опір резистора з найбільшою точністю. *Обладнання:* резистор з невідомим опором, амперметр, вольтметр, джерело струму, з'єднувальні провідники.

2. Визначити опір резистора. *Обладнання:* резистор з невідомим опором, резистор з відомим опором, амперметр, джерело струму та провідники.

3. Визначити опори трьох резисторів, з'єднаних зіркою. Підключати вимірювальні прилади до точки з'єднання всіх трьох резисторів неможна. *Обладнання:* Три резистори (з'єднані зіркою), амперметр, вольтметр, джерело струму, з'єднувальні провідники.

4. В одному чорному ящику знаходиться резистор, у іншому – лампочка від ліхтаря. Встановити, в якому ящику знаходиться лампочка. *Обладнання:* Два ящика з виводами, батарея гальванічних елементів, реостат, амперметр, вольтметр, з'єднувальні провідники.

Тренувальні винахідницькі задачі.

1. Запропонуйте, як на основі вольтметра зробити омметр (накресліть схему, визначте ціну поділки та границю вимірювання омметра, виготовте запропонований пристрій).

2. Один з проводів двожильного кабелю має контакт із землею. Запропонуйте спосіб визначення місця пошкодження (кабель прокладено під землею).

3. Як із шести резисторів 1 Ом, 2 Ом, 4 Ом, 8 Ом, 16 Ом та 32 Ом зробити магазин опорів, за допомогою якого можна було б отримувати будь-яке ціле значення опору від 1 Ом до 63 Ом? Як розширити діапазон можливих значень опору в такому пристрої?

4. На основі шкільного вольтметра з границею вимірювання 6 В розробіть вольтметр зі змінною границею вимірювання: 6 В, 12 В, 30 В.



Зробіть своїми руками!

1. З 12 однакових резисторів спаяйте куб (рис. 10.5). Обчисліть опір між будь-якими вершинами такого куба. Розрахункові дані перевірте шляхом прямих вимірювань.

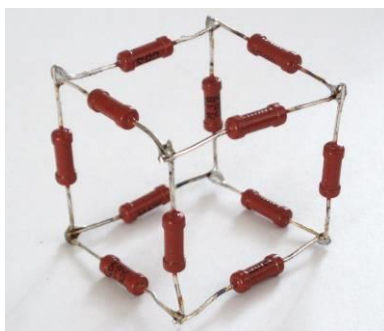


Рис. 10.5. Куб з резисторів

2. Виготовте пристрій для пошуку розриву в електричному колі (“пробник”), який стане у пригоді в домашньому господарстві. Конструкцію та принцип дії найпростішого пробника легко зрозуміти за його принциповою схемою (рис. 10.6). Замість лампи *HL* можна застосувати світлодіод.

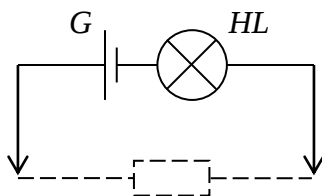


Рис. 10.6. Принципова схема найпростішого пробника

11. ВИМІРЮВАННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ



11.1. Теоретичні відомості.

У першому наближенні Земля являє собою величезний магніт, полюси якого знаходяться поблизу географічних полюсів, при цьому Південний магнітний полюс (S) знаходиться у північній півкулі, а Північний магнітний полюс (N) – у південній. Магнітні полюси зміщені по відношенню до осі обертання Землі приблизно на $11,5^\circ$.

Магнітне поле Землі можна зобразити графічно за допомогою ліній магнітної індукції (у будь-якій їх точці вектор магнітної індукції $\vec{B}$ спрямований по дотичній до лінії у цій точці). Поблизу екватора ці лінії спрямовані горизонтально, а на магнітних полюсах Землі – майже вертикально.

Кут α , під яким лінія магнітної індукції (вектор магнітної індукції $\vec{B}$) у даній точці спрямована до горизонту, називається кутом магнітного *нахилення* (рис. 11.1, а). Напрямок горизонтальної складової індукції магнітного поля $B_{гор}$ приймається за напрямок магнітного меридіана, а вертикальна площина, яка через нього проходить, називається площиною магнітного меридіана. Кут β між географічним і магнітним меридіанами називається кутом магнітного *схилення* (рис. 11.1, б).

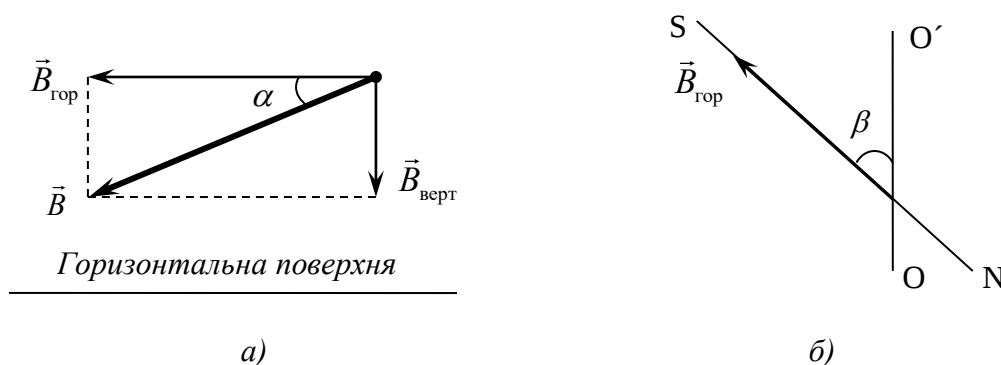


Рис. 11.1. Кути магнітного нахилення α (а) та схилення β (б):
NS – магнітний меридіан, OO' – географічний меридіан

Вимірювання кута магнітного нахилу α у різних точках Землі дозволили зробити висновок про те, що магнітний “диполь” (“магніт”) знаходиться у глибині Земної кулі, а саме в її ядрі. Магнітне поле Землі створюється струмами, які протікають в її ядрі.

При більш точному розгляді земного магнетизму є помітними відхилення від дипольного поля. Вони виникають, головним чином, за рахунок світових (материкових) аномалій магнітного поля. Найбільшими з них є такі: *Східно-Сибірська* аномалія, яка підвищує магнітну індукцію поля в окремих районах Сибіру до значення, яке перевищує значення магнітної індукції на Південному магнітному полюсі; *Південно-Атлантична* (або *Бразильська*) аномалія з різко зниженими значеннями індукції поля.

Окрім світових аномалій, є багато локальних (місцевих) аномалій. Наприклад, *Магнітогорська* та *Курська*, у межах яких магнітна індукція поля гірських порід може перевищувати індукцію нормального земного поля. Проте, через малі розміри місцеві аномалії практично не впливають на глобальний розподіл магнітного поля планети.

Магнітне поле Землі виступає своєрідним захистом для всього живого від потоків заряджених частинок із космосу. Швидкі заряджені частинки (електрони, протони, α -частинки тощо), які викинуті Сонцем, утворюють так званий “сонячний вітер”. У магнітному полі Землі траєкторія руху заряджених частинок змінюється, і вони огинають Землю. На відстанях приблизно від 500 до 60 000 км заряджені частинки рухаються, немов би навіваючись на лінії індукції магнітного поля Землі, здійснюючи коливання від одного до іншого полюса за 0,1 – 1 с. Ця область космосу називається *радіаційним поясом* Землі. Лише у полярних областях незначна кількість цих частинок проникає з радіаційного поясу у верхні шари атмосфери і викликає *полярні сяйва*.

Вимірювання індукції магнітного поля Землі є досить важливою науково-технічною задачею. Так, розташування на Землі неоднорідностей магнітного поля дозволяє проводити розвідку корисних копалин. Легше за все виявляються великі скупчення магнітних руд. Але оскільки поклади ферімагнітних порід часто пов’язані із родовищами інших корисних копалин, магнітна розвідка застосовується для пошуку нафти, вугілля, поліметалічних руд.

Розглянемо далі один з методів вимірювання горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.



11.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я . Виміряти горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі за допомогою тангенс-гальванометра.

О б л а д н а н н я : тангенс-гальванометр, джерело постійного струму, амперметр, реостат, перемикач двополюсний, з'єднувальні провідники.

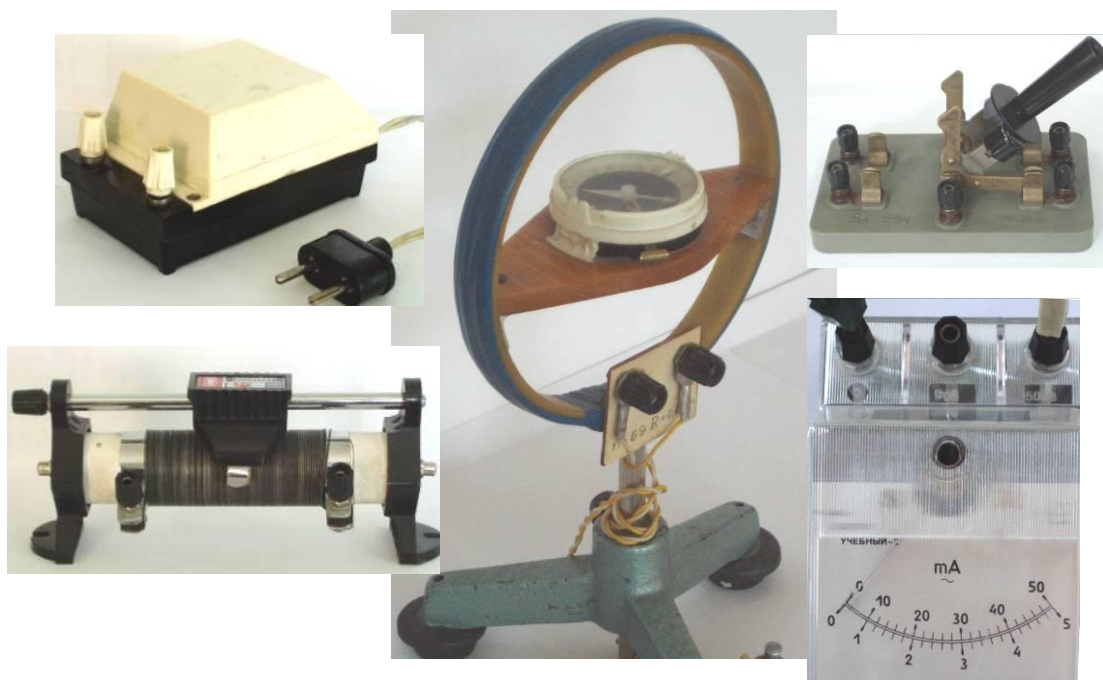


Рис. 11.2. Деякі пристрої, що використовуються при виконанні досліду

Метод тангенс-гальванометра. Магнітна стрілка, яка має змогу повертатися лише навколо вертикальної осі, буде відхилятися в горизонтальній площині під дією горизонтальної складової $B_{гор}$ магнітного поля Землі. Ця властивість магнітної стрілки використовується для визначення $B_{гор}$ у спеціальному приладі – *тангенс-гальванометрі*.

Прилад складається з короткої циліндричної котушки, що має N витків радіусом R (витки лежать у вертикальній площині), та компаса, який розміщено у горизонтальній площині в центрі котушки. (Знайдіть фотографію тангенс-гальванометра на рис. 11.2.) При відсутності струму у котушці магнітна стрілка компаса буде розташована вздовж напрямку горизонтальної компоненти земного магнітного поля, тобто в площині магнітного меридіана.

Перед початком роботи тангенс-гальванометр встановлюють так, щоб витки котушки лежали у площині магнітного меридіана. При цьому площини витків будуть паралельні до напрямку магнітної стрілки компаса.

Якщо тепер пропускати електричний струм через витки котушки, то в її центрі вектор індукції магнітного поля котушки $\vec{B}_\kappa$ буде перпендикулярний до індукції земного поля.

Для короткої стрілки компаса магнітне поле в центрі кругового струму можна вважати однорідним. Стрілка приладу розташується вздовж результуючої індукції магнітних полів Землі і котушки. Згідно з рис. 11.3

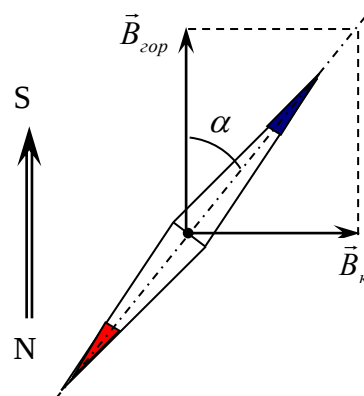


Рис. 11.3. Накладання магнітних полів Землі та витків в центрі котушки

$$B_{\text{зор}} = B_\kappa \operatorname{ctg} \alpha. \quad (11.1)$$

На підставі закону Біо – Савара – Лапласа величину B_κ в центрі котушки можна зв'язати із силою струму I у її витках формулою:

$$B_\kappa = \frac{\mu_0 I}{2R} N, \quad (11.2)$$

де μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Отримаємо останню формулу. Розглянемо круговий струм силою I . Виділимо на ньому лінійний елемент струму $Id\vec{l}$ (рис. 11.4). Згідно із законом Біо – Савара – Лапласа елемент струму $Id\vec{l}$ у довільній точці спостереження створює магнітне поле, індукція $d\vec{B}$ якого визначається формулою

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{[Id\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^2} dl \sin \varphi,$$

де $\vec{r}$ – радіус-вектор, проведений з елемента струму в розглядувану точку поля;

φ – кут між $Id\vec{l}$ та $\vec{r}$, у випадку кругового струму $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $\sin \varphi = 1$.

Очевидно, що вектори магнітної індукції кожного елемента в центрі кругового струму співпадають за напрямком. Це дає змогу окремо знайти напрямок і величину індукції результуючого магнітного поля в центрі витка. Так, за правилом гвинта знаходимо, що вектор $\vec{B}$ напрямлений перпендикулярно площині кругового струму, на спостерігача. Його модуль знайдемо, проінтегрувавши dB по всьому круговому струму:

$$B = \int_L dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_L \frac{dl}{r^2}.$$

Для кожного елемента струму r однакове і дорівнює радіуса витка $r = R$, а $dl = R d\varphi$, тому

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \int_L dl = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \int_0^{2\pi} R d\varphi = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Якщо ж круговий струм створений N витками, то магнітна індукція в його центрі

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} N.$$

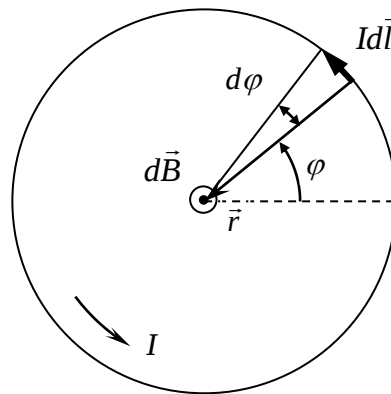


Рис. 11.4. До обчислення магнітної індукції в центрі кругового струму

Отже, підставляючи формулу (11.2) в (11.1), отримаємо вираз для визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі:

$$B_{\text{гор}} = \frac{\mu_0 IN}{2R} \text{ctg } \alpha. \quad (11.3)$$

Як правило, число витків N котушки та їх радіус указано на тангенс-гальванометрі. Тому визначення $B_{\text{гор}}$ зводиться до вимірювання кута α відхилення стрілки компаса при фіксованому значенні сили струму I у котушці (рис. 11.5).

Зазначимо, що в експерименті при одному і тому ж значенні сили струму I кут відхилення α стрілки компаса кожного разу може бути дещо іншим. Головним чином це пов'язано із тертям вісі стрілки в опорі. Тому при оцінці похибки отриманого значення $B_{\text{гор}}$ слід врахувати випадкову похибку при вимірюванні α .

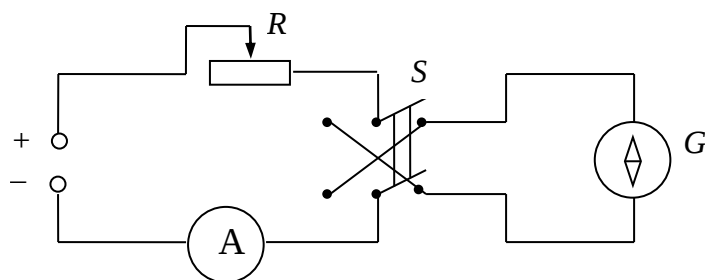


Рис. 11.5. Схема ввімкнення тангенс-гальванометра

Для цього можна, наприклад, при даному значенні I виміряти α , змінюючи кожного разу напрямок струму (полярність ввімкнення котушки) за допомогою двополюсного перемикача. Отримавши спектр значень $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$, знаходять середнє значення

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i$$

та відповідні межі абсолютної $\Delta\alpha$ та відносної ε_α похибок:

$$\Delta\alpha = \frac{3\sigma_\alpha}{\sqrt{n}}, \quad (11.4)$$

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\bar{\alpha}}, \quad (11.5)$$

де σ_α – середнє квадратичне відхилення окремого вимірювання,

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{\alpha} - \alpha_i)^2}.$$

Похибка отриманого за формулою (11.3) значення $B_{\text{гор}}$, у першу чергу, пов'язана із неточностями при вимірюваннях кута α (похибки при вимірюваннях сили струму I та радіуса R витків котушки порівняно малі). Тому нескладно показати, що межі абсолютної $\Delta B_{\text{гор}}$ та відносної $\varepsilon_{B_{\text{гор}}}$ похибок можна оцінити так:

$$\varepsilon_{B_{\text{гор}}} \approx \varepsilon_{\text{tg}\alpha} = \frac{2\Delta\alpha}{\sin 2\alpha}; \quad \Delta B_{\text{гор}} = B_{\text{гор}} \varepsilon_{B_{\text{гор}}}. \quad (11.6)$$

? Підготовчі вправи.**Рівень А**

1. Які величини можна визначити за наведеними виразами? Встановіть відповідність:

- | | | | |
|---|--------------------------|---|---|
| 1 | $ q vB \sin \alpha$ | А | Модуль сили Ампера |
| 2 | $\frac{\mu_0 I}{2R}$ | Б | Магнітна індукція в однорідному ізотропному магнетикі |
| 3 | $\mu\mu_0 H$ | В | Модуль сили Лоренца |
| 4 | $BI\Delta l \sin \alpha$ | Г | Модуль сили взаємодії двох постійних магнітів |
| | | Д | Магнітна індукція в центрі кругового струму |

2. Силовою характеристикою магнітного поля є ...

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| А. ... магнітна проникність. | Б. ... вектор магнітної індукції. |
| В. ... магнітний потік. | Г. ... сила Лоренца. |

3. Фізична величина, що характеризує магнітні властивості речовини, називається ...

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| А. ... діелектричною проникністю. | Б. ... магнітною індукцією. |
| В. ... магнітною проникністю. | Г. ... індуктивністю. |

4. Лінії магнітної індукції відрізняються від ліній напруженості електростатичного поля тим, що вони ...

- | | |
|---|------------------------------------|
| А. ... починаються на південному полюсі магніту. | |
| Б. ... закінчуються на північному полюсі магніту. | |
| В. замкнуті. | Г. ... перетинаються одна з одною. |

5. Як зорієнтована магнітна стрілка у магнітному полі Землі?

- | |
|---|
| А. Північний її полюс обернений до північного магнітного полюсу Землі. |
| Б. Північний її полюс обернений до південного географічного полюсу Землі. |
| В. В площині географічного меридіана. |
| Г. В площині магнітного меридіана. |

6. В яких точках земної поверхні кут магнітного нахилення дорівнює приблизно нулю, а в яких – майже 90° ?

- | |
|--|
| А. На екваторі – 0° , на магнітних полюсах – 90° . |
| Б. На екваторі – 90° , на магнітних полюсах – 0° . |
| В. На магнітних полюсах – 0° , на географічних – 90° . |

Г. На північному магнітному полюсі – 0° , а на південному – 90° .

Рівень Б

7. Поясніть будову та принцип дії тангенс-гальванометра.

8. Як встановити котушку тангенс-гальванометра так, щоб її витки лежали у площині магнітного меридіана?

9. Як знайти напрямок вектора індукції магнітного поля у центрі кругового струму?

10. Задля чого в електричній схемі (див. рис. 11.5) передбачено:

- реостат;
- амперметр;
- перемикач двополюсний?

11. При якому положенні повзунка реостата відхилення магнітної стрілки компаса магнітним полем котушки буде максимальним? Витки котушки лежать в площині магнітного меридіана.

12. Яким чином можна змінити напрямок струму в котушці тангенс-гальванометра (див. рис. 11.5)? З якою метою передбачено цю можливість?

13. При яких кутах відхилення стрілки вимірювання буде мати найменшу похибку?

14. Яка з безпосередньо вимірюваних величин вносить у результат (в отримане значення $B_{гор}$) найбільшу похибку?

15. Як залежить точність отриманого значення $B_{гор}$ від діаметра котушки тангенс-гальванометра?

16. Вкажіть шляхи підвищення точності результатів експерименту.

17. Отримайте робочу формулу (11.3).

18. Сформулюйте закон Біо – Савара – Лапласа.

19. Отримайте формули для магнітної індукції:

- в центрі кругового струму силою I та радіусом R ;
- на відстані r від прямого струму силою I .



11.3. Додаткові творчі завдання.

Завдання для формування банку ідей.

1. Як визначити, яка з двох в'язальних сталевих шпиць намагнічена, не користуючись нічим, окрім самих шпиць?
2. Як виготовити котушку, яка при пропусканні струму на обох кінцях:
 - мала б північні полюси;
 - мала б південні полюси;
 - взагалі не мала б полюсів?
3. Як визначити полюси підковоподібного магніту, якщо не видно їх позначення, за допомогою телевізора (або осцилографа)? Чи будь-який телевізор можна використати для цього?
4. Як визначити магнітні полюси електромагніту, виготовленого із цвяха, ізольованого дроту, реостата та батарейки:
 - за допомогою компаса;
 - не використовуючи ніякого додаткового обладнання?
5. Як з'ясувати, чи намагнічено сталевий стержень за допомогою шматка мідного дроту та котушки з нитками?
6. Як визначити напрямок магнітного меридіана, якщо у наявності є: стакан з водою, щіпка кам'яної солі NaCl, ножиці, шматок мідного дроту, невелика цинкова пластинка та корок?
7. Як за допомогою сильного магніту (краще підковоподібного) з'ясувати, на якому струмі (постійному або змінному) працює лампа розжарювання?



Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.

Експериментальні задачі.

1. Визначте значення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі. *Обладнання:* електронний осцилограф, магнітна стрілка, калька, лінійка. *Примітка.* У задачі передбачається, що відстань від анода до екрана є відомою (або її можна безпосередньо виміряти).

2. Визначте магнітну індукцію поля штабового магніту на його поздовжній осі на відстані $l = 30$ см від центральної (середньої) лінії магніту, якщо відомо, що у даній місцевості магнітна індукція поля Землі $B \approx 4,1 \cdot 10^{-5}$ Тл, а вектор $\vec{B}$ напрямлений під кутом $\varphi \approx 65^\circ$ до горизонту. *Обладнання:* магніт у вигляді тонкого циліндра довжиною 40 мм, лінійка довжиною 40 ÷ 50 см, компас.

3. Визначте залежність індукції магнітного поля прямолінійного струму від сили струму та відстані до струму. Горизонтальна складова індукції магнітного поля Землі дорівнює $2,5 \cdot 10^{-5}$ Тл. *Обладнання:* магнітна стрілка, велика дротяна рамка, джерело постійного струму, реостат, амперметр, лінійка.

4. Дослідіть залежність сили взаємодії металевої гайки з підковоподібним магнітом від різних положень металевої перемички, яка з'єднує полюси магніту. *Обладнання:* підковоподібний магніт, металева перемичка, гайка, нитка, динамометр, міліметровий папір.

5. Зібравши установку за поданою схемою або малюнком (рис. 11.6), дослідити залежність сили притягання електромагніту від:

- сили струму у котушках електромагніту;
- числа витків (у випадку однієї та двох котушок);
- відстані між якорем та осердям (розміщуючи між ними змінне число шарів паперу);
- площі дотику якоря з осердям.

Обладнання: електромагніт, джерело постійного струму, реостат, міліамперметр, ключ, з'єднувальні провідники, штатив, набір тягарців, аркуш цупкого паперу, штангенциркуль.

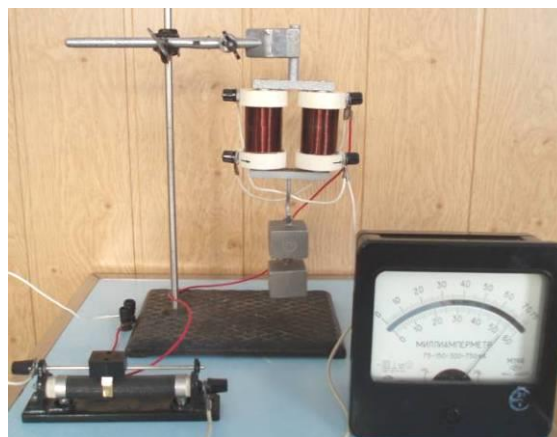
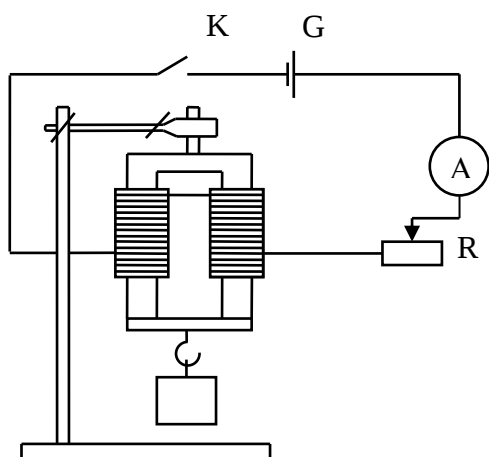


Рис. 11.6. Схема та малюнок дослідної установки до експериментальної задачі 5

Тренувальні винахідницькі задачі.

1. Досить часто доводиться стикатися із небажаним намагнічуванням деталей, інструментів, механічних годинників тощо. Залишкову індукцію можна зняти, наприклад, шляхом нагрівання тіла вище точки Кюрі, при цьому речовина переходить з феромагнітного стану у парамагнітний. Після наступного охолодження (при якому відбувається зворотний перехід з пара- у феромагнітний стан) зразок стає не намагніченим. Однак при нагріванні деякі механічні властивості сталі можуть суттєво змінитися. Крім того, інколи цей спосіб взагалі не можна здійснити (зокрема для розмагнічування механічних годинників). Запропонуйте спосіб або пристрій для більш зручного розмагнічування.

2. Розкрийте “таємницю” чорного ящика (рис. 11.7), якщо при підключенні до його входних клем гальванічного елемента з ЕРС 6В на вихідних клеммах виникає напруга, достатня для іскрового пробою повітряного проміжку у декілька міліметрів завтовшки.



Рис. 11.7. Чорний ящик до винахідницької задачі 2

**Зробіть своїми руками!**

Виготовте саморобний компас, що може стати у пригоді під час подорожі. Він, складається з намагніченої швацької голки, корка та ємності з водою (рис. 11.8). Намагнітити голку досить просто. Для цього її достатньо піднести до постійного магніту. Якщо ж його у наявності немає, можна намотати на голку кілька витків (20 ÷ 30) ізолюваного дроту та підключити на короткий час (≈ 10 с) до батареї. *За рахунок чого намагнічується голка у такий спосіб?*



Рис. 11.8. Саморобний компас

12. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ



12.1. Теоретичні відомості.

Експеримент показує, що всі вільні заряди, які зустрічаються в природі, складаються з дискретних зарядів сталої величини. Найменша порція електричного заряду називається *елементарним електричним зарядом*. Він дорівнює модулю заряду електрона. Будь-який інший електричний заряд складається з цілого числа елементарних зарядів, тобто він є кратним модулю заряду електрона. Висунути гіпотезу про існування елементарного заряду, а згодом і його виміряти вперше вдалося у досліді з *електролізом*. Розглянемо це явище детальніше.

Як відомо при розчиненні у воді солей, кислот та лугів нейтральні молекули цих речовин розпадаються на позитивні і негативні *іони*. Існують також неводні розчинники (наприклад, спирти, кетони тощо). Розпад молекул розчинених речовин на іони в результаті взаємодії з розчинником називається *електролітичною дисоціацією*.

Однією з причин дисоціації є ослаблення зв'язків іонів (зменшення сил взаємодії іонів) у молекулах речовин, які знаходяться у розчинах або розплавах. Так, у молекулі мідного купоросу CuSO_4 іони Cu^{2+} та SO_4^{2-} утримуються силами електростатичної (кулонівської) взаємодії. При розчиненні мідного купоросу у воді іони Cu^{2+} та SO_4^{2-} в молекулі CuSO_4 оточуються молекулами розчинника. Молекули води H_2O є *полярними*. Тому вони зазнають орієнтуючого впливу з боку електричного поля полярних молекул мідного купоросу. При цьому молекули води будуть намагатися повернутися до іону Cu^{2+} своїми негативними “частинами”, а до іону SO_4^{2-} – позитивними. При такому розташуванні полярних молекул води створюване ними електричне поле зменшує силу притягання між різнойменними іонами в молекулі солі. За рахунок теплового руху молекул у розчині зв'язок між іонами в молекулі CuSO_4 може розірватися з утворенням вільних іонів Cu^{2+} та SO_4^{2-} .

Поки зовнішнє електричне поле відсутнє, іони у розчині здійснюють лише хаотичний тепловий рух. В електричному ж полі (рис. 12.1) іони, подібно до електронів у металах, починають дрейфувати у напрямку сили, яка на них діє: позитивні іони (катіони) – до негативного електрода (катода), негативні іони (аніони) – до позитивного електрода (анода).

Речовини з іонною провідністю (носіями струму у них виступають іони) називаються *електролітами* (у більш вузькому значенні електроліти – речовини, які у розчині розпадаються на іони). Окрім водних розчинів кислот, солей та основ, електролітами є сполуки металів з металоїдами у розплавленому стані, іонні кристали і деякі інші речовини.

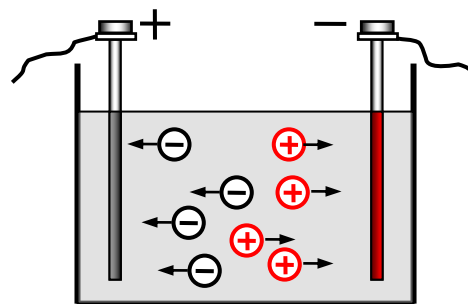
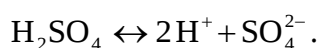


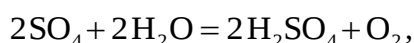
Рис. 12.1. Рух іонів у розчині під дією електричного поля

При протіканні струму через електроліт переноситься не лише заряд (як, наприклад, у металах), але й речовина, адже носіями струму у таких провідниках є іони (тобто заряджені атоми або групи атомів). При цьому на електродах виділяються складові частини електроліту (в результаті хімічний склад розчину або розплав змінюється). Це явище і називається *електролізом*.

Електроліз водного розчину сірчаної кислоти. При розчиненні сірчаної кислоти H_2SO_4 у воді відбувається дисоціація молекул кислоти:

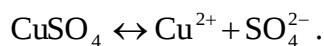


Позитивні іони H^+ нейтралізується електронами з катода, біля якого виділяється водень H_2 . Негативні іони SO_4^{2-} віддають два електрони аноду, перетворюючись при цьому на радикали SO_4 , які потім вступають у реакцію з водою

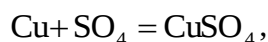


і на аноді виділяється кисень O_2 . Кількість сірчаної кислоти у розчині при електролізі не змінюється.

Електроліз водного розчину мідного купоросу. При дисоціації маємо:



Якщо анод мідний, а катод вугільний, то при електролізі на катоді виділяється чиста мідь, а на аноді – мідний купорос



кількість якого в результаті електролізу не змінюється.

Технічне застосування електролізу. Спектр застосування електролізу досить широкий. Шляхом електролізу розплавлених руд отримують лужні та лужноземельні метали (алюміній, магній, берилій тощо).

Електроліз використовують для очистки металів від домішок (рафінування міді).

У декоративних цілях, а також для створення антикорозійного захисту, поверхні деяких тіл покривають тонким шаром або дорогоцінного металу (платина, золото, срібло), або металу, який є корозійностійким (нікель, хром, кадмій). Технологічний процес покриття називається *гальваностегією*. За допомогою електролізу можна виготовити рельєфні металеві копії предметів. Цей процес називається *гальванопластикою*.

Окрім цього, електроліз використовують для створення на поверхнях деталей захисних оксидних плівок різних кольорів (анодування), а також для отримання важкої води D_2O .

Досліди з електролізом дозволяють виміряти елементарний електричний заряд, маси іонів та деякі інші величини. Розглянемо далі суть одного з методів вимірювання елементарного заряду.



12.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я . Виміряти елементарний електричний заряд в експерименті з електролізом.

О б л а д н а н н я : електролітична ванна з вугільним та мідним електродами, ємність з водним розчином мідного купоросу CuSO_4 , блок живлення постійного струму, реостат, ключ, з'єднувальні провідники, амперметр, секундомір, терези з різноважками, промокальний папір.

Базуючись на розглянутому механізмі електропровідності електролітів, нескладно знайти масу речовини, яка виділяється при електролізі. Припустимо, що через електроліт пройшов заряд Q , а на електроді при цьому виділилася

речовина масою m . Очевидно, що маса речовини дорівнює добутку маси одного іона m_0 на число іонів N , що осіли на електроді:

$$m = m_0 N.$$

Маса одного іона

$$m_0 = \frac{M}{N_A},$$

де M – молярна маса речовини;

N_A – стала Авогадро, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

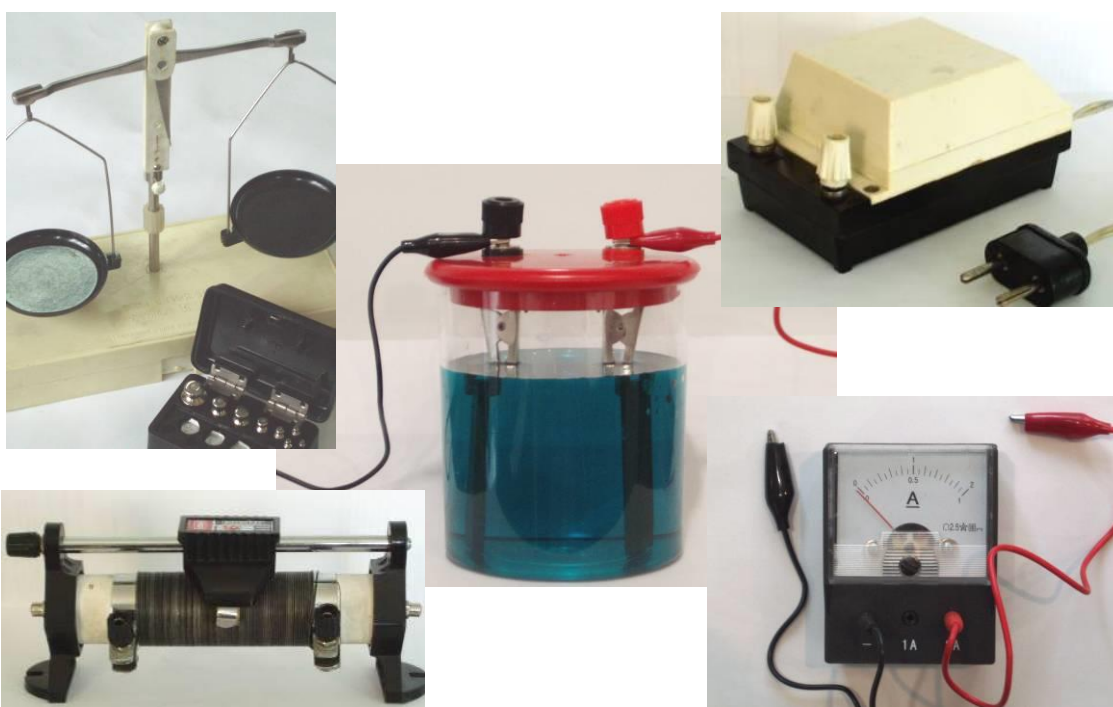


Рис. 12.2. Деякі пристрої, що використовуються при виконанні досліду

Число іонів, які осіли на електроді, можна виразити через заряд Q , що пройшов через електроліт, і заряд одного іона q_0 :

$$N = \frac{Q}{q_0}.$$

Заряд будь-якого іона за модулем дорівнює добутку елементарного заряду e (який дорівнює модулю заряду електрона) на валентність Z іона:

$$q_0 = Ze.$$

Отже,

$$m = m_0 N = \frac{M}{N_A e Z} Q.$$

Якщо сила струму I при електролізі впродовж часу τ залишалася незмінною, то

$$Q = I\tau.$$

Таким чином, маса речовини, яка виділилася на електроді

$$m = \frac{M}{N_A e Z} Q = \frac{M}{N_A e Z} I\tau. \quad (12.1)$$

В останній формулі величини N_A та e – універсальні сталі, а M та Z є сталими для даної речовини. Тому множник $\frac{M}{N_A e Z}$ – стала для даної речовини.

З формули (12.1) випливає, що маса речовини, яка виділяється на електроді, пропорційна заряду, що пройшов через електроліт, або, іншими словами, пропорційна силі струму і часу його протікання. Ця залежність уперше була експериментально встановлена М. Фарадеєм у 30-х роках XIX сторіччя і має назву *закону Фарадея*.

Якщо сталий множник у формулі (12.1) позначити через k :

$$k \equiv \frac{M}{N_A e Z},$$

то закон Фарадея можна записати у вигляді

$$m = kQ = kI\tau.$$

Коефіцієнт k називається *електрохімічним еквівалентом* речовини (кг/Кл).

Зазначимо також, що добуток сталої Авогадро на елементарний заряд отримав назву *числа (сталі) Фарадея F* :

$$F = N_A e.$$

З формули (12.1) отримуємо вираз для визначення елементарного електричного заряду за даними дослідів:

$$e = \frac{M}{N_A Z} \frac{I\tau}{m}. \quad (12.2)$$

Отже, для обчислення e за формулою (12.2), необхідно у досліді з електролізом мідного купоросу виміряти масу m міді, яка виділилася на катоді, силу струму I у колі та час τ його протікання. Відповідна експериментальна установка для електролізу мідного купоросу наведена на рис. 12.3.

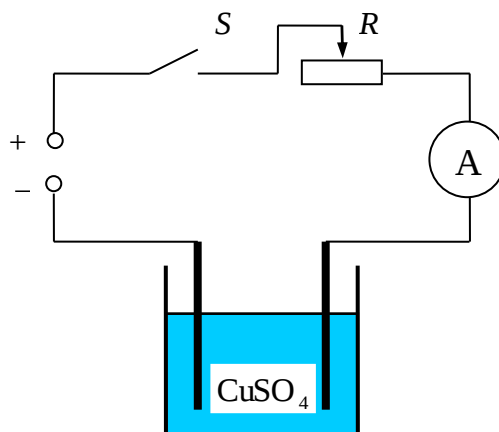


Рис. 12.3. Схема експериментальної установки

Роль закону Фарадея у розвитку поняття про електрон. Сучасна наука дозволяє, як було показано, вивести закон Фарадея теоретично з електронної теорії без допомоги експерименту. Проте за часів Фарадея не існувало не тільки електронної теорії, але й навіть самого поняття про електрон. Саме закон, відкритий Фарадеем експериментальним шляхом, став поштовхом до висунення гіпотези про існування в природі елементарної (найменшої) порції електрики.

Вперше обчислити значення елементарного заряду за допомогою закону Фарадея вдалося Стонею (1874) та незалежно від нього Гельмгольцу (1881). Як показав подальший розвиток фізики елементарний заряд дорівнює модулю заряду електрона: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

З урахуванням формули (12.2), оцінка межі відносної похибки ε_e отриманого значення e буде визначатися сумою меж відносних похибок вимірювання сили струму ε_I , часу його протікання ε_τ та маси міді, яка осіла на катоді ε_m :

$$\varepsilon_e = \varepsilon_I + \varepsilon_\tau + \varepsilon_m = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta \tau}{\tau} + \frac{\Delta m}{m},$$

де ΔI , $\Delta \tau$, Δm – межі абсолютних похибок вимірювання відповідних величин (I , τ та m).

Вказівки щодо способів оцінки похибок прямих вимірювань (зокрема при використанні електровимірювальних приладів, секундоміра та терезів) детально розглянуто у розділі “Вимірювання фізичних величин”. Тут лише зазначимо, що межа відносної похибки вимірювання часу ε_t у даному експерименті є досить малою, порівняно із ε_I та ε_m , і нею можна знехтувати. Це пояснюється тим, що тривалість досліду з електролізом сягає, як правило, кілька десятків хвилин ($\tau \sim 10^3$ с), а $\Delta\tau \sim 1$ с.

Отже, межі відносної ε_e та абсолютної Δe похибок можна оцінити за формулами:

$$\varepsilon_e \approx \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta m}{m}; \quad \Delta e = \varepsilon_e e. \quad (12.3)$$

Оцінити точність результату можна і шляхом безпосереднього порівняння отриманого експериментально значення елементарного заряду e з відповідним значенням $e_{\text{дов}}$, що дає довідник. У цьому випадку

$$\Delta e = |e_{\text{дов}} - e|; \quad \varepsilon_e = \frac{\Delta e}{e_{\text{дов}}}. \quad (12.4)$$

? Підготовчі вправи.

Рівень А

1. Яке співвідношення є математичним записом першого закону Фарадея для електролізу?

$$\text{А. } k = \frac{A}{F \cdot n}. \quad \text{Б. } m = k \cdot I \cdot t. \quad \text{В. } F = q \cdot B \cdot v \cdot \sin \alpha. \quad \text{Г. } F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{R^2}.$$

2. Питомий опір електролітів зменшується з підвищенням температури, оскільки ...

- А. ... змінюється густина речовини.
- Б. ... зменшується кількість іонів за рахунок рекомбінації.
- В. ... зменшується середня квадратична швидкість руху молекул.
- Г. ... збільшується кількість іонів за рахунок дисоціації молекул електроліту.

3. Другий закон Фарадея встановлює взаємозв'язок між ...

А. ... масою речовини, що виділяється на електродах, і зарядом.

Б. ... силою струму, що протікає через електролітичну ванну, і напругою на ванні.

В. ... електрохімічним еквівалентом речовини та її молярною масою.

Г. ... питомим опором електроліту та його температурою.

4. Якщо електроди виготовлено з міді, то процес електролізу мідного купоросу триватиме доки ...

А. ... виснажиться розчин мідного купоросу. Б. ... розчиниться анод.

В. ... існує напруга на електродах.

Г. ... розчиниться катод.

5. Визначте електрохімічний еквівалент свинцю, якщо за 5 год електролізу при силі струму 5 А на катоді виділилося 97 г свинцю.

А. Приблизно $1 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл.

Б. Приблизно $2 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл.

В. Приблизно $3 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл.

Г. Приблизно $4 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл.

Рівень Б

6. Сформулюйте закон Фарадея та наведіть його математичний запис.

7. Дві однакові електролітичні ванни заповнені розчином мідного купоросу. У першій ванні концентрація розчину вища. Порівняйте кількість міді, яка виділиться на їх катодах, якщо ванни з'єднані: а) послідовно; б) паралельно.

8. Три електролітичні ванни з'єднані послідовно (рис. 12.4). На яких електродах буде виділятися хлор, а на яких – мідь? В якій ванні міді виділиться більше?

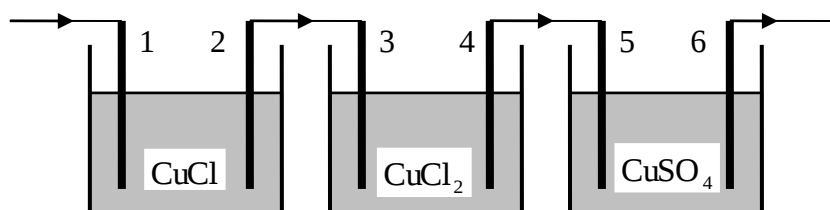


Рис. 12.4. До завдання 8

9. Які дані необхідно отримати у досліді з електролізу мідного купоросу для визначення елементарного електричного заряду? Отримайте відповідну формулу для розрахунку.

10. Обґрунтуйте формули (12.3) та (12.4).

11. Які значення мають величини N_A , M та Z у формулі (12.1) у випадку електролізу мідного купоросу?

12. Дайте відповіді на запитання, що стосуються експериментальної установки для даної лабораторної роботи.

а) Задля чого в електричному колі (див. рис. 12.3) передбачено реостат; амперметр?

б) Знайдіть на схемі анод і катод. Де саме буде виділятися мідь при електролізі мідного купоросу?

в) Який з двох електродів – мідний чи вугільний – доцільно використати у даній роботі як катод, а який – як анод? Чи можна провести дослід з двома мідними електродами? А з двома вугільними?

г) Чи можна в роботі використовувати джерело змінного струму?

д) в якому положенні має бути повзунок реостата у момент замикання електричного кола (див. рис. 12.3) на початку досліду?

е) як виміряти у досліді масу міді, яка виділилася на катоді?

є) навіщо в переліку обладнання передбачено промокальний папір?

13. Зважування катода до та після електролізу мідного купоросу (рис. 12.5) проводилася на учбових терезах з використанням набору гир Г4-211.

За цими даними:

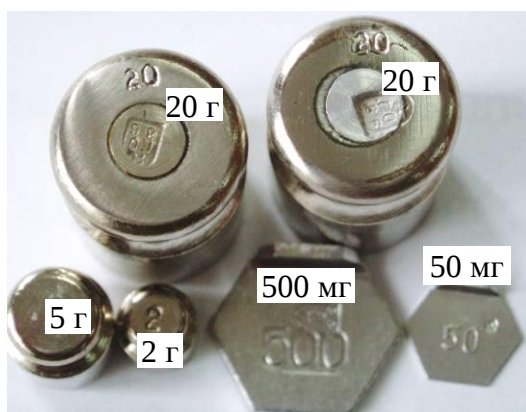
а) знайдіть масу m міді, що виділилася на катоді;

б) оцініть межі абсолютної Δm та відносної ε_m похибок результату вимірювання (похибки терезів $\Delta_{\text{терезів}}$ та гир $\Delta_{\text{всіх гир}}$ знайдіть за паспортними або довідниковими даними).

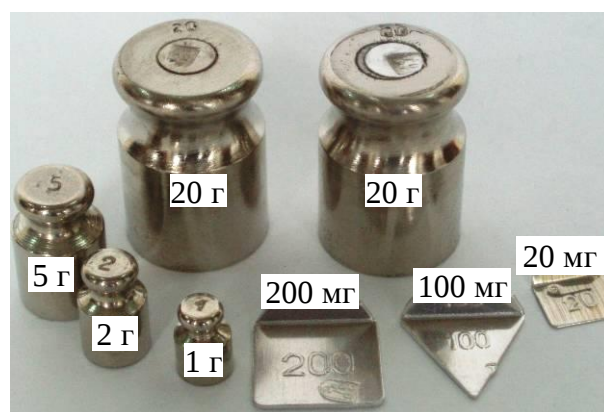
14. Покажіть, що одиницею електрохімічного еквівалента k у СІ є кг/Кл.

15. Що показує електрохімічний еквівалент міді?

16. З'ясуйте фізичний зміст числа Фарадея F .



а)



б)

Рис. 12.5. До завдання 13: набір гир, якими зрівноважено катод до (а) та після (б) електролізу

? 12.3. Додаткові творчі завдання.

Завдання для формування банку ідей.

1. Демонстрація електролітичного покриття проводилася за допомогою електролітичної ванни з мідним та вугільним електродами, мідного купоросу CuSO_4 та джерела постійного струму. Вугільний електрод було вкрито шаром міді. Запропонуйте кілька способів зняття цього покриття для можливості повторення демонстрації.

2. Як визначити полярність затискачів генератора постійного струму за допомогою стакана з водою та з'єднувальних провідників?

3. Як визначити знаки полюсів акумулятора, якщо у наявності є лише мідні провідники та сира картоплина?

4. Необхідно оцінити середню швидкість, з якою ваш товариш долає на моторному човні відстань від одного селища до іншого і назад? Як це зробити, якщо у вашому розпорядженні є акумулятор, ємність з водним розчином мідного купоросу CuSO_4 , мідні електроди, точні терези з набором гир, реостат, амперметр, з'єднувальні провідники, лінійка, довідник з фізики та географічна карта області?



Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.

Експериментальні задачі.

1. Складіть гальванічний елемент та визначте його полюси. *Обладнання:* сира картоплина, сталевий гвіздок, мідні провідники, гальванометр.
2. Виміряйте елементарний електричний заряд. *Обладнання:* скляний стакан зі слабким розчином соляної кислоти, градуйована пробірка, джерело постійного струму, міліамперметр, з'єднувальні провідники, два електроди, секундомір.
3. Виміряйте масу іона міді. *Обладнання:* електролітична ванна з двома вугільними електродами, терези з різноважками, амперметр, розчин мідного купоросу, секундомір, джерело постійного струму, з'єднувальні провідники.
4. Визначте концентрацію кухонної солі у водному розчині, який вам видано. *Обладнання:* скляна банка об'ємом 0,5 л, посудина з водним розчином кухонної солі невідомої концентрації, джерело змінного струму з регульованою напругою, амперметр, вольтметр, два електроди, з'єднувальні провідники, ключ, набір з 8 щіпок кухонної солі з відомими масами, міліметровий папір, ємність з прісною водою.
5. Визначте число Фарадея. *Обладнання:* амперметр, джерело постійного струму, реостат, секундомір, терези з різноважками, електролітична ванна з двома вугільними електродами, розчин сульфату міді CuSO_4 .

Тренувальні винахідницькі задачі.

1. Ви маєте: воду, кухонну сіль, мило, ізольований мідний дріт, ніж, дерев'яну паличку, алюмінієвий стакан та велику скляну каструлю. Довжина палички трохи більша діаметра каструлі. Запропонуйте конструкцію хімічного джерела струму (гальванічного елемента). Безпосередній контакт між міддю та алюмінієм виключити.
2. Як правило, демонстрацію залежності опору R провідника від його параметрів ($R = \rho l / S$) – довжини l , площі поперечного перерізу S та матеріалу, який характеризується питомим опором ρ – проводять за допомогою

металевих провідників. Запропонуйте пристрій аналогічного призначення, в якому як провідник використовувалася б рідина.



Зробіть своїми руками!

У домашньому господарстві стане у пригоді пристрій, що сигналізуватиме про протікання води у кімнаті (наприклад, з водопровідної системи). Виготовити його зовсім нескладно. Пристрій має датчик “потопу” та сигнальну частину, яка сповіщає про затоплення (рис. 12.6).

Датчик складається з пластмасового корпусу 1, двох електродів 2 (мідної та цинкової пластини), з площами поверхонь приблизно 25 см², які розділені шаром 3 питної соди NaHCO_3 товщиною близько 5 мм. Корпус датчика можна виготовити зі звичайних пластмасових кришок для закривання банок. На корпусі потрібно зробити кілька отворів 4 діаметром 2÷3 мм (щоб вода могла потрапити усередину датчика). З електродами датчика за допомогою провідників з'єднано сигнальний пристрій 5. Ним може бути дзвінок від годинника, який працює від батарейки 1,5 В.

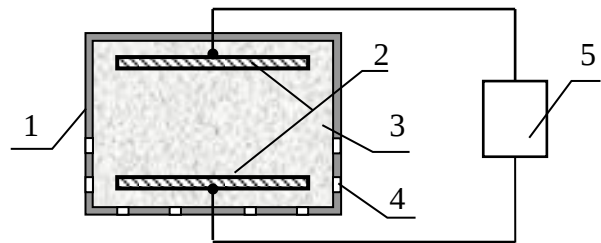


Рис. 12.6. Схема пристрою для сигналізації про протікання води у кімнаті

Датчик розміщують на підлозі (у найбільш імовірних для протікання води місцях), а дзвінок – там, де зручно. *Поясніть як працює цей пристрій?*

Підказка. При потраплянні води усередину датчика, між його електродами утворюється водний розчин соди, який є електролітом.

Примітка. Наведений пристрій є одним з розв’язків відповідної винахідницької задачі, що пропонувалася на VIII-му Всеукраїнському турнірі юних винахідників і раціоналізаторів у 2005 р. (винахід належить команді Запорізької області “Грані”).

13. ВИМІРЮВАННЯ АБСОЛЮТНОГО ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ СКЛА



13.1. Теоретичні відомості.

Як відомо, *світло* – сукупність величезного числа елементарних частинок – фотонів, які у деяких експериментах поведуть себе як звичайні частинки, а у деяких – як електромагнітні хвилі. Швидкість фотонів (швидкість світла) у вакуумі приблизно дорівнює $3 \cdot 10^8$ м/с. Цю швидкість позначають через c .

Абсолютним показником заломлення n називається відношення швидкості c поширення електромагнітної хвилі у вакуумі до швидкості v її поширення у даному середовищі:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (13.1)$$

Світловими *променями* називають геометричні лінії, які вказують напрям поширення пучків світла. На межі розділу двох середовищ може відбуватися не лише відбивання світла, але й проникнення його в інше середовище зі зміною швидкості поширення (рис. 13.1). При цьому спостерігається заломлення світла – зміна напрямку світлових променів.

Кутом падіння називають кут α між падаючим променем світла A (рис. 13.2) та перпендикуляром до межі розділу двох середовищ, відновленим у точці падіння O . *Кутом відбивання* називається кут β між відбитим променем B і перпендикуляром до поверхні, відновленим у точці відбивання O . *Кутом заломлення* називається кут γ між променем C , що пройшов через межу розділу двох середовищ, і перпендикуляром до межі, відновленим у точці заломлення O променя.

Закон відбивання світла: падаючий промінь, відбитий промінь і перпендикуляр, відновлений у точці падіння, лежать в одній площині; кут падіння дорівнює куту відбивання:

$$\alpha = \beta.$$

Математичний зв'язок між кутами падіння і заломлення, а також показниками заломлення відповідних середовищ, виражається у вигляді закону заломлення світла або закону Снелла (у перекладі з латинської – Снелліуса).

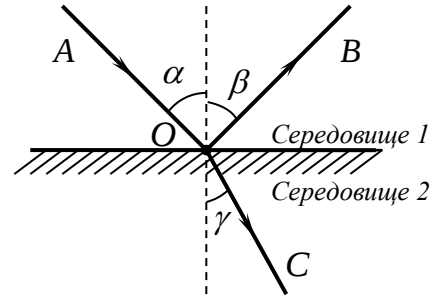


Рис. 13.1. Відбивання та заломлення світла

Закон заломлення світла: падаючий промінь, заломлений промінь і перпендикуляр до межі розділу двох середовищ лежать в одній площині; при цьому відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для даних середовищ не залежить від кута падіння (а залежить від довжини хвилі світла):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}. \quad (13.2)$$

Величина n_{21} називається *відносним показником заломлення* другого середовища відносно першого. Як видно з (13.2), він визначається відношенням абсолютних показників заломлення n_2 та n_1 цих середовищ або відношенням швидкостей поширення світла у першому і другому середовищах:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (13.3)$$

При порівнянні двох прозорих середовищ те з них, що має більший показник заломлення, називається *оптично більш густим*.

Інколи закон Снелла записують у вигляді рівності:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2,$$

яка є простою для запам'ятовування: справа знаходиться добуток величин, які відносяться до першого середовища, а зліва – до другого.

Отримаємо закон Снелла (13.2) з *принципу Ферма*, згідно з яким, світло поширюється з однієї точки середовища в іншу вздовж шляху, для проходження якого витрачається найменший час. Принцип Ферма є найбільш

загальним принципом геометричної оптики. Він впливає з принципу Гюйгенса у граничному випадку нескінченно малої довжини хвилі світла.

Нехай пучок світла виходить з точки A середовища 1 з показником заломлення n_1 і потрапляє у точку B середовища 2 з показником заломлення n_2 . Введемо позначення h_1 , h_2 , L , зміст яких зрозумілий з рис. 13.2. Точку падіння C задамо за допомогою відстані x вздовж поверхні розділу від точки A до точки C . Тоді час поширення світла з точки A у точку B дорівнюватиме:

$$t = \frac{AC}{v_1} + \frac{CB}{v_2} = \frac{\sqrt{h_1^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{h_2^2 + (L-x)^2}}{v_2}, \quad (13.4)$$

де v_1 , v_2 – відповідно швидкості поширення світла у середовищах 1 та 2. Згідно з формулою (13.1)

$$v_1 = c/n_1, \quad v_2 = c/n_2.$$

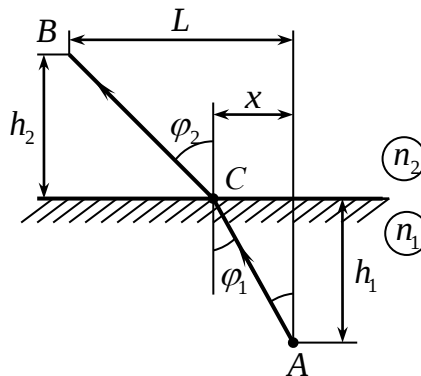


Рис. 13.2. До доведення закону Снелла

Тоді вираз (13.4) набирає вигляду:

$$t = \frac{n_1}{c} \sqrt{h_1^2 + x^2} + \frac{n_2}{c} \sqrt{h_2^2 + (L-x)^2}. \quad (13.5)$$

Згідно з принципом Ферма, час на подолання шляху з точки A у точку B мінімальний, а це можливо за умови

$$\frac{dt}{dx} = 0.$$

Тому з урахуванням (13.5) отримаємо

$$n_1 \frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} - n_2 \frac{L - x}{\sqrt{h_2^2 + (L - x)^2}} = 0.$$

З рис. 13.2 видно, що

$$\frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} = \sin \varphi_1, \quad \frac{L - x}{\sqrt{h_2^2 + (L - x)^2}} = \sin \varphi_2.$$

Звідки $n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2$, що і потрібно було довести.



13.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я 1. Виміряти абсолютний показник заломлення скла за допомогою мікроскопа.

2. Виміряти показник заломлення скла, з якого виготовлена лінза.

О б л а д н а н н я: набір скляних пластин, мікроскоп, двоопукла лінза, штангенциркуль, лінійка вимірювальна.

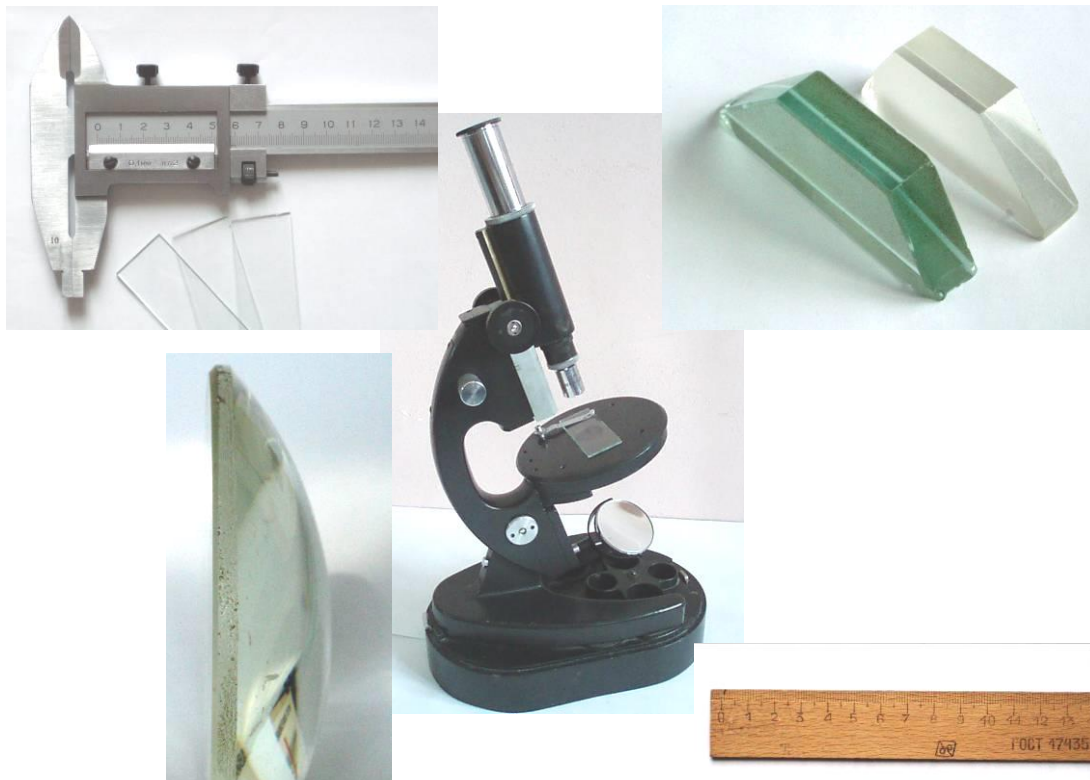


Рис. 13.3. Деякі пристрої, що використовуються при виконанні дослідів

Вимірювання показника заломлення за допомогою мікроскопа. Даний метод ґрунтується на явищі позірного зменшення товщини пластинки, коли розглядають крізь неї мітку на нижній поверхні пластини при кутах падіння променів, близьких до нуля. В цьому випадку, як видно з рис. 13.4, показник заломлення скла можна визначити так:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (13.6)$$

Оскільки спостереження ведеться майже вздовж нормалі до поверхні, то кути α і β малі, і тому справедливі наближені рівності:

$$\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha, \quad \sin \beta \approx \operatorname{tg} \beta. \quad (13.7)$$

Тоді

$$n \approx \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (13.8)$$

Останнє відношення можна виразити через позірну h та дійсну H товщини пластини (див. рис. 13.4):

$$n \approx \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{H}{h}. \quad (13.9)$$

Отже, згідно з формулою (13.9), для вимірювання показника заломлення скла потрібно виміряти позірну h та дійсну H товщини пластини.

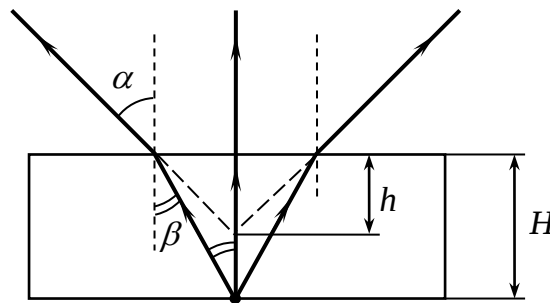


Рис. 13.4. Позірне зменшення товщини пластини

Як провести заміри цих величин за допомогою мікроскопа? Спочатку слід зробити мітки на нижній та верхній поверхнях пластини (наприклад, нанести лінії кульковими ручками різного кольору). Далі за допомогою мікроскопа потрібно навести різкість, наприклад, на нижню мітку, відмітивши при цьому

положення тубуса за показами барабана мікрогвинта, а потім, піднімаючи тубус, необхідно отримати чітке зображення верхньої мітки. Відстань, на яку підніметься тубус, дорівнюватиме позірній товщині h пластини.

Якщо мікроскоп не має спеціального індикатора висоти підйому тубуса, то переміщення тубуса можна визначити за числом зубців ручки кремальєри мікроскопа. Для цього потрібно попередньо знайти переміщення тубуса при повороті ручки на один зубець, визначивши хід тубуса за повний оберт ручки і поділивши його на загальне число зубців ручки.

За допомогою мікроскопа можна також виміряти дійсну товщину H пластини. Для цього слід навести різкість зображення певної мітки на предметному столику мікроскопа, а потім, поклавши на столик скляну пластину, досягти різкого зображення мітки на її верхній поверхні. В цьому випадку переміщення тубуса дорівнює дійсній товщині H пластини.

Відповідно до формули (13.9), межі відносної ε_n та абсолютної Δn похибок при вимірюванні n можна оцінити так:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta h}{h}, \quad \Delta n = \varepsilon_n \cdot n. \quad (13.10)$$

Для підвищення точності визначення n досліди з вимірювання H і h треба повторити декілька разів. Тоді під H і h у формулах (13.10) слід розуміти середні значення цих величин. Крім того, у значеннях ΔH і Δh слід врахувати похибку індикатора Δ_{ind} (ціна його поділки $C = 0,01$ мм, тому можна вважати $\Delta_{ind} = 0,01$ мм), а також випадкову похибку $\Delta_{вип}$ (методика оцінювання випадкових похибок детально розглянута у розділі “Вимірювання фізичних величин”).

Якщо ж сорт скла пластини відомий, то користуючись довідником, можна знайти “істинне” (більш точне) значення його показника заломлення Δ_{ict} . В цьому випадку абсолютну і відносну похибки можна оцінити за формулами:

$$\Delta n = |n_{ict} - n_{вип}|, \quad \varepsilon_n = \frac{\Delta n}{n_{ict}}, \quad (13.11)$$

де $n_{\text{вим}}$ – виміряне значення показника заломлення.

Вимірювання показника заломлення скла лінзи. Для вимірювання показника заломлення скла, з якого виготовлена лінза, можна скористатися формулою тонкої лінзи:

$$\frac{1}{F} = \left(\frac{n}{n_c} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (13.12)$$

де F – фокусна відстань лінзи;

R_1, R_2 – радіуси кривизни поверхонь, що утворюють лінзу;

n_c – показник заломлення середовища, в якому знаходиться лінза.

Якщо лінза симетрична та двоопукла, то $R_1 = R_2 = R$, і за умови, що лінза знаходиться у повітрі, маємо

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \frac{2}{R},$$

звідки

$$n = 1 + \frac{R}{2F}. \quad (13.13)$$

З формули (13.13) видно, що для визначення показника заломлення n скла потрібно виміряти фокусну відстань F лінзи та радіус R її сферичних поверхонь.

Фокусну відстань можна знайти, отримавши на екрані зображення джерела світла та вимірявши відстань d від предмета до лінзи і відстань f від лінзи до зображення. Проте, якщо джерело світла знаходиться на досить великій відстані від лінзи ($d \rightarrow \infty$), то з формули тонкої лінзи

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

випливає, що

$$F \approx f.$$

Тому для вимірювання F достатньо одержати за допомогою лінзи на екрані (на стіні, на аркуші паперу) зображення предметів, які знаходяться, наприклад, за вікном кабінету, і виміряти відстань f від лінзи до одержаного зображення.

Радіус сферичних поверхонь лінзи можна розрахувати, провівши вимірювання геометричних розмірів лінзи: її товщини H , діаметра D та товщини циліндричного шару h (рис. 13.5). Так, для трикутника OAB маємо:

$$R^2 = AB^2 + OB^2 = l^2 + (R - a)^2.$$

Виконавши перетворення, дістанемо

$$R = \frac{a^2 + l^2}{2a},$$

$$\text{де } l = \frac{D}{2}, \quad a = \frac{H - h}{2}.$$

Отже,

$$R = \frac{\left(\frac{H - h}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2 \frac{H - h}{2}} = \frac{(H - h)^2 + D^2}{4(H - h)}. \quad (13.14)$$

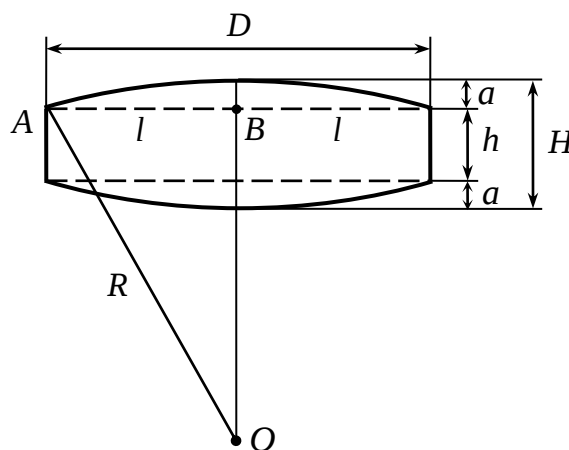


Рис. 13.5. Геометричні розміри лінзи

? Підготовчі вправи.

Рівень А

1. Які величини можна визначити за наведеними виразами? Встановіть відповідність:

1 c/v

А Швидкість світла у певному середовищі

2 n_2/n_1

Б Граничний кут повного внутрішнього відбивання

3 c/n

В Кут заломлення світла

4 $\arcsin(n_2/n_1)$

Г Абсолютний показник заломлення середовища

Д Відносний показник заломлення середовища 2 відносно середовища 1

2. Як зміниться кут між падаючим і відбитим променями (див. рис. 13.6), якщо дзеркало повернути за годинниковою стрілкою на 15° ?

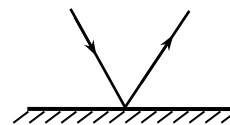


Рис. 13.6. До завдання 2

А. Не зміниться. Б. Зменшиться на 15° .

В. Збільшиться на 15° . Г. Збільшиться на 30° .

3. На рис. 13.7 показано світловий промінь, що переходить із середовища 1 у середовище 2. Виберіть правильне твердження.

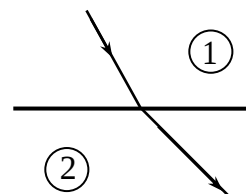


Рис. 13.7. До завдання 3

А. Кут падіння променя більший, ніж кут заломлення.

Б. Промінь проходить із середовища 1 у середовище 2 без заломлення.

В. Коли промінь переходить із середовища 1 у середовище 2, він заломлюється.

Г. Оптична густина середовища 1 менша, ніж оптична густина середовища 2.

4. Два спостерігача визначають приблизно кутову висоту Сонця над горизонтом. Перший спостерігач знаходиться на березі озера, а інший – аквалангіст – неглибоко під водою. Для кого з них Сонце буде здаватися вищим?

А. Для аквалангіста.

Б. Для обох спостерігачів висота Сонця однакова.

В. Для спостерігача на березі. Г. Аквалангіст взагалі не буде бачити Сонце.

5. Промінь світла падає з повітря на поверхню спокійної води. Кут падіння променя дорівнює 60° . Чому дорівнює кут між відбитим і заломленим променями?

А. Менше 33° . Б. Від 42° до 48° . В. Від 76° до 81° . Г. Більше 102° .

Рівень Б

6. Вкажіть межі значень абсолютного показника заломлення n .

7. Для води $n \approx 1,33$. Що це означає?

8. Що таке повне внутрішнє відбивання? Чому “внутрішнє”? За яких умов воно можливе? Що таке граничний кут?

9. Чи може відбутися повне відбивання світла на межі переходу його з води в скло?

10. Намалуйте хід променя через плоскопаралельну пластинку і тригранну призму.

11. Як за допомогою мікроскопа виміряти позірну товщину скляної пластинки?

12. Як виміряти за допомогою мікроскопа дійсну товщину пластинки?

13. Отримайте робочу формулу (13.9).

14. Як оцінити похибки визначення показника заломлення скла у методі вимірювання за допомогою мікроскопа?

15. Як за допомогою сонячних променів визначити фокусну відстань збиральної лінзи?

16. Відповідно до формул (13.13) та (13.14), запишіть вирази для верхньої та нижньої меж (ВМ та НМ) вимірювання показника заломлення скла лінзи.

17*. Отримайте формули для визначення показника заломлення скла та радіуса сферичної поверхні (аналогічні до формул (13.13) та (13.14)) у випадку плоско-опуклої лінзи.



13.3. Додаткові творчі завдання.

Завдання для формування банку ідей.

1. Одержано невелику кількість нової речовини і потрібно визначити швидкість світла в ній. Яку характеристику речовини для цього достатньо виміряти?

2. Дві однакові сферичні скляні колби наповнені різними рідинами. Як визначити, в якій рідині швидкість світла більша? У наявності є лише ввімкнута електрична лампочка та аркуш паперу.

3. Одна з двох однакових сферичних колб заповнена водою, а інша – спиртом. Колби щільно закриті корками (відкривати їх не можна). Як за допомогою настільної лампи визначити, в якій колбі вода, а в якій – спирт?

4. Як визначити швидкість світла у воді, якщо у наявності є склянка з водою, папір, лінійка, олівець? (Швидкість світла у повітрі $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.)

5. Як визначити показник заломлення прямокутного скляного бруска за допомогою лінійки, олівця, трьох-чотирьох шпильок, та картону (цупкого паперу)?

6. Як визначити показник заломлення прямокутного скляного бруска за допомогою лінійки, олівця та аркуша паперу?

7. Як визначити показник заломлення прямокутного скляного бруска за допомогою лише аркуша міліметрового паперу?



Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.

Експериментальні задачі.

1. Визначте показник заломлення речовини плоскопаралельної пластини відносно повітря. *Обладнання:* плоскопаралельна пластинка, аркуш паперу, циркуль, лінійка без поділок.

2. Визначте показник заломлення рідини. *Обладнання:* циліндричний стакан з водою, лінійка, лампочка, батарейка, з'єднувальні провідники, екран.

3. Визначте якомога точніше показник заломлення рідини. *Обладнання:* колба з рідиною, скляна кювета, лінза, екран, лампочка, батарейка, з'єднувальні провідники, смужка міліметрового паперу.

4. Визначте показник заломлення невідомої рідини. *Обладнання:* тонкостінний хімічний стакан (циліндричної форми), досліджувана рідина, міліметровий папір, джерело світла (кишеньковий ліхтарик), ножиці, скотч.

5. Знайдіть показник заломлення рідини. *Обладнання:* лампочка від кишенькового ліхтарика, джерело струму, з'єднувальні провідники, скляна банка циліндричної форми з рідиною, збиральна лінза, білий екран, лінійка.

6. Визначте товщину скляних пластинок, зібраних у пакет, не відкриваючи обгортку його торців. *Обладнання:* папір, лінійка, олівець, пакет скляних пластин з однаковим показником заломлення.

7. Визначте показник заломлення невідомої рідини. *Обладнання:* чаша Петрі, плоскопаралельна пластинка, скотч, ножиці, лінійка (трикутник), аркуш паперу, невідома рідина.

Тренувальні винахідницькі задачі.

1. Маленький предмет (монета) лежить на дні порожньої чашки (рис. 13.8). Запропонуйте спосіб, який би дозволяв побачити цей предмет, якщо око спостерігача знаходиться трохи нижче від штрихової лінії (див. рис. 13.8), звідки предмет, начебто, не можна розгледіти.

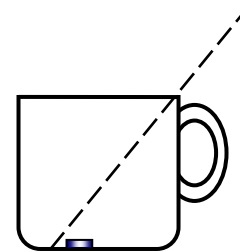


Рис. 13.8. До тренувальної винахідницької задачі 1

2. Запропонуйте простий прилад для вимірювання показника заломлення невідомої рідини.

Зробіть своїми руками!

Виготовте пристрій для вимірювання показника заломлення рідини методом порівняння дійсної і позірної глибин. Розглянемо його схему (рис. 13.9).

Сталевий гвізdek 3, який є предметом, знаходиться на дні високого стакану 1 з рідиною 2. Голка-показчик 5, закріплена на штативі 6, має змогу переміщуватися у пошуках положення суміщення із зображенням 7 гвіздка. При спостереженні предмета (гвіздка) нормально до поверхні рідини (див. рис. 13.9), його зображення знаходитиметься у середині рідини. Спостереження слід проводити одним оком.

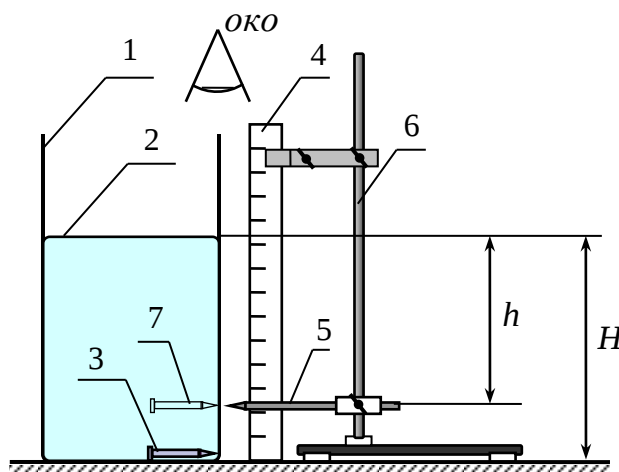


Рис. 13.9. Схема пристрою для визначення показника заломлення рідини

методом порівняння позірної та дійсної глибин:

1 – високий стакан; 2 – досліджувана рідина; 3 – предмет (гвіздок); 4 – лінійка;
5 – голка-показчик; 6 – штатив; 7 – позірне зображення предмета

Зазначимо, що у положенні суміщення уявного зображення гвіздка та голки, через рідину видно, що предмет нібито утворює неперервну лінію з голкою. Суміщення голки перевіряють, відхиляючи голову трохи в боки. Якщо при цьому голка та зображення не відділяються одне від одного, то голка знаходиться безпосередньо навпроти уявного зображення. Визначивши за лінійкою позірну h та дійсну H глибини, можна знайти показник заломлення рідини за формулою

$$n = H/h.$$

Для підвищення точності визначення n експеримент слід повторити кілька разів, змінюючи кожного разу дійсну глибину H води (шляхом додавання води у стакані) і вимірюючи відповідну позірну глибину h . За отриманим спектром значень (H_i, h_i) слід побудувати графік залежності, відкладаючи для зручності вздовж осі абсцис значення h , а вздовж осі ординат – значення H . Очевидно, що цей графік – пряма лінія, яка проходить через початок координат. Показник заломлення знаходиться за нахилом цієї лінії (див. відповідний пункт розділу “Вимірювання фізичних величин”).

14. ВИМІРЮВАННЯ ФОКУСНОЇ ВІДСТАНІ ЗБИРАЛЬНОЇ ТА РОЗСІЮВАЛЬНОЇ ЛІНЗ



14.1. Теоретичні відомості.

Лінзою називається прозоре тіло, обмежене з двох боків криволінійними, найчастіше, сферичними поверхнями. Одна з поверхонь лінзи може бути плоскою. За формою обмежуючих поверхонь розрізняють шість типів лінз: двоопукла (рис. 14.1, а), плоско-опукла (рис. 14.1, б), увігнуто-опукла (рис. 14.1, в), двоввігнута (рис. 14.1, г), плоско-ввігнута (рис. 14.1, д), опукло-ввігнута (рис. 14.1, е).

Пряма, що проведена через центри C_1 і C_2 кривизни поверхонь, називається *головною оптичною віссю* лінзи (рис. 14.2). Лінза вважається тонкою, якщо її товщина набагато менше радіусів кривизни R_1 і R_2 її поверхонь. В тонкій лінзі точки перетину обох поверхонь з головною оптичною віссю можна вважати як такі, що зливаються в одну точку O , яка називається *оптичним центром* лінзи. Прямі, що проходять через оптичний центр лінзи і не співпадають з її головною оптичною віссю, називаються *побічними оптичними осями*.

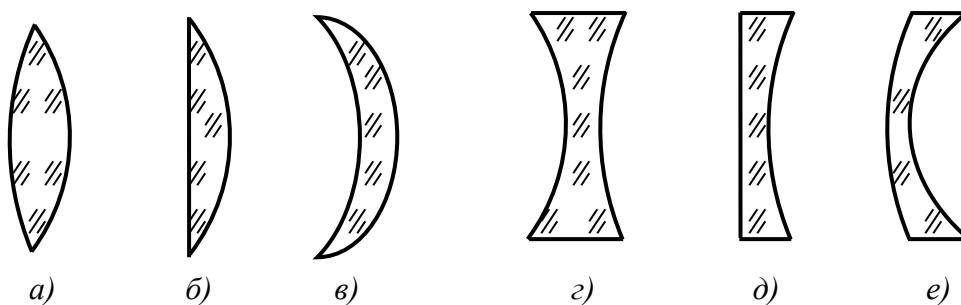


Рис. 14.1. Види лінз

Проходячи через лінзу, промені заломлюються двічі. При побудові променів у тонких лінзах заломлення на обох поверхнях замінюють одним

заломленням у так званій *головній площині* лінзи, яка проходить через її оптичний центр, перпендикулярно до головної оптичної вісі.

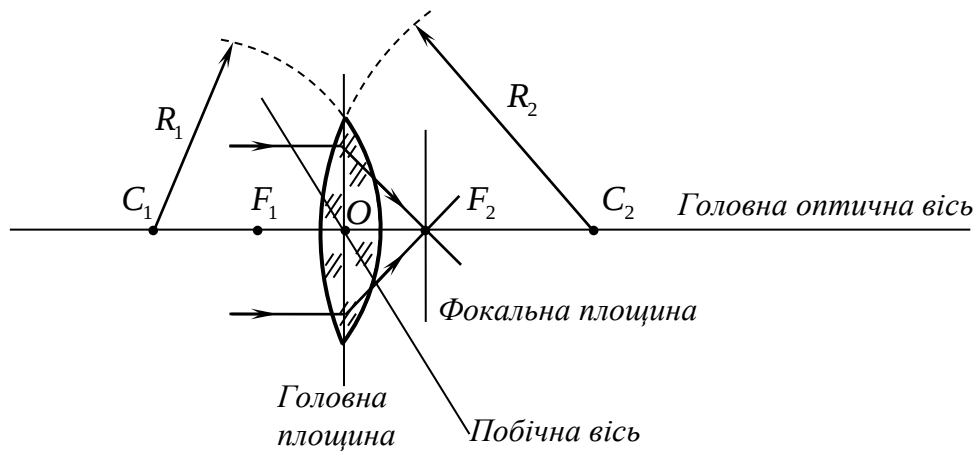


Рис. 14.2. Основні параметри лінзи

Промені, які паралельні головній оптичній вісі, перетинаються у точці, що лежить на цій осі і називається *фокусом* лінзи. Будь-яка лінза має два фокуси F_1 та F_2 , що лежать по різні боки від неї. Площина, що проходить через фокус перпендикулярно до головної оптичної вісі, називається *фокальною площиною*. Відстань від оптичного центра O лінзи до її фокуса називається *фокусною відстанню* F . Величина D , обернена до фокусної відстані F , називається *оптичною силою* лінзи:

$$D \equiv \frac{1}{F}.$$

Одиницею оптичної сили лінзи у СІ є діоптрія (дптр): $[D] = \text{дптр} = \text{м}^{-1}$.

Можна показати, що для тонкої лінзи, поверхні якої мають радіуси кривизни R_1 та R_2 , справедлива формула:

$$D = \frac{1}{F} = \left(\frac{n}{n_c} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (14.1)$$

де n – показник заломлення матеріалу лінзи;

n_c – показник заломлення середовища, в якому знаходиться лінза.

У формулі (14.1) радіусам приписуються певні знаки. Радіуси кривизни опуклих поверхонь вважаються додатними, а ввігнутих – від’ємними. У плоских поверхонь радіус кривизни дорівнює нескінченності ($R = \infty$).

Лінза називається *збиральною*, якщо її фокусна відстань додатна $F > 0$, і *розсіювальною*, якщо $F < 0$. Параксіальний пучок світла, направлений на збиральну лінзу паралельно до її головної вісі, після проходження крізь лінзу збереться у її фокусі (рис. 14.3, *а*). Якщо ж такий самий пучок направити на розсіювальну лінзу, то він розсіється так, що продовження його променів немов виходять з фокусу (рис. 14.3, *б*).

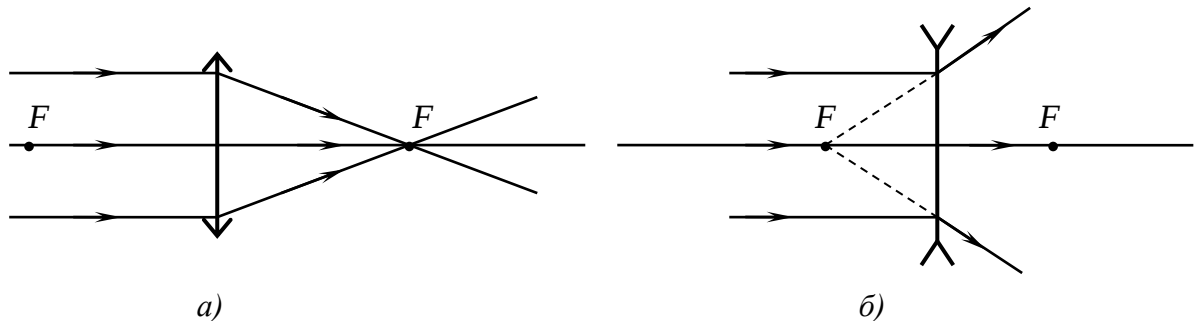


Рис. 14.3. Збиральна (*а*) та розсіювальна (*б*) лінзи

Як видно з формули (14.1), одна й та сама лінза у різних середовищах може бути як збиральною, так і розсіювальною. Так, скляні лінзи *а*), *б*), *в*) на рис. 14.1 у повітрі будуть збиральними, а лінзи *г*), *д*), *е*) – розсіювальними.

💡 14.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я . Виміряти фокусні відстані збиральної та розсіювальної лінз.

О б л а д н а н н я : збиральна лінза, розсіювальна лінза, джерело струму, електрична лампочка на підставці, ключ, лінійка вимірвальна, з’єднувальні провідники, екран.



Рис. 14.4. Деякі пристрої, що використовуються при виконанні досліду

Визначення фокусної відстані збиральної лінзи. Один з найпростіших методів визначення фокусної відстані F збиральної лінзи базується на формулі тонкої лінзи:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (14.2)$$

де d – відстань від предмета до лінзи;

f – відстань від зображення цього предмета до лінзи.

У формулі (14.2) слід враховувати знаки величин, які до неї входять. Як вже зазначалося, фокусну відстань збиральної лінзи прийнято вважати додатним числом, а фокусну відстань розсіювальної лінзи – від’ємним. Відстань d від предмета до лінзи та відстань f від дійсного зображення до лінзи вважають додатними числами, відстань від лінзи до уявного зображення – від’ємним числом.

З формули (14.2) зразу дістаємо формулу для фокусної відстані F збиральної лінзи:

$$F = \frac{df}{d + f}. \quad (14.3)$$

Як предмет у досліді може виступити спіраль розжарювання ввімкненої лампочки.

Отже, для визначення фокусної відстані збиральної лінзи за формулою (14.3) необхідно отримати на екрані за допомогою лінзи дійсне зображення спіралі розжарювання ввімкненої лампочки та виміряти відстань d від лінзи до предмета, а також відстань f від лінзи до зображення цього предмета на екрані.

Для більш точного визначення фокусної відстані F слід провести кілька дослідів, в кожному з яких потрібно виміряти пару величин: d та f .

Якщо вздовж осі абсцис відкласти значення $1/d$, а вздовж осі ординат значення $1/f$, то згідно з формулою (14.2), переписаною у вигляді:

$$\frac{1}{f} = -\frac{1}{d} + \frac{1}{F}, \quad (14.4)$$

отримаємо пряму лінію (рис. 14.5).

Порівнюючи формулу (14.4) з рівнянням прямої $y = kx + b$, дістаємо, що коефіцієнт b прямої відповідає величині $1/F$.

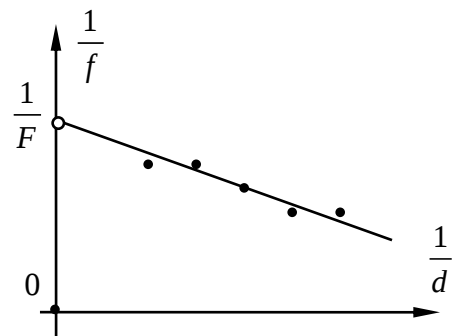


Рис. 14.5. Графічне визначення фокусної відстані

Отже, значення ординати точки перетину побудованої прямої з віссю $1/f$ дає значення, обернене до фокусної відстані лінзи ($1/F$). Це значення відповідає оптичній силі D лінзи (у діоптріях), якщо $1/d$ та $1/f$ відкладено у м^{-1} .

Межу відносної похибки ε_F визначення фокусної відстані збиральної лінзи за формулою (14.3) можна оцінити так:

$$\varepsilon_F \equiv \frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta(d+f)}{d+f} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta d}{d+f} + \frac{\Delta f}{d+f}.$$

Оскільки $\Delta d = \Delta f$ (Чому?), то

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{2\Delta d}{d+f}. \quad (14.5)$$

Межа абсолютної похибки

$$\Delta F = \varepsilon_F \cdot F. \quad (14.6)$$

Зазначимо, що фокусну відстань збиральної лінзи можна досить легко знайти, отримавши на екрані зображення далеких предметів. Для цього лінзу слід розмістити так, щоб падаючі на неї промені були перпендикулярні до головної площини лінзи. Наприклад, розташувачи лінзу під лампою розжарювання, яка висить на стелі, можна одержати зображення нитки розжарювання на підлозі. Ще краще одержати зображення Сонця на екрані (у вигляді яскравої точки). У цих випадках промені є практично паралельними до головної оптичної вісі лінзи. Тому після лінзи вони проходять через її фокус. Отже, відстань від зображення на екрані далеких предметів до лінзи наближено дорівнює фокусній відстані лінзи.

Визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи. Розсіювальна лінза утворює лише уявні зображення, які неможливо отримати на екрані, тому не можна безпосередньо виміряти відстань від лінзи до зображення. Проте фокусну відстань (або оптичну силу) розсіювальної лінзи можна визначити непрямым методом, наприклад, за допомогою збиральної лінзи, за умови, якщо її оптична сила D_1 більша за модуль оптичної сили $|D_2|$ розсіювальної лінзи:

$$D_1 > |D_2|.$$

Суть методу полягає у наступному. Отримавши за допомогою збиральної лінзи дійсне зображення S' джерела світла на екрані, ставлять між збиральною лінзою та екраном розсіювальну лінзу. Дійсне зображення світла при цьому зміщується (рис. 14.6). Нове положення зображення S'' можна знайти переміщенням екрана.

Скориставшись властивістю оборотності світлових променів, можна вважати, що світлові промені виходять з уявного джерела S'' і утворюють його зображення S' . Позначивши відстані від точок S'' та S' до розсіювальної лінзи відповідно через d та f , запишемо формулу тонкої лінзи (для розсіювальної лінзи) з урахуванням знаків:

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}, \quad (14.7)$$

де F – модуль фокусної відстані розсіювальної лінзи.

З формули (14.7) дістаємо вираз для модуля фокусної відстані розсіювальної лінзи:

$$F = \frac{fd}{d - f}. \quad (14.8)$$

Отже, для визначення фокусної відстані розсіювальної лінзи за формулою (14.8) необхідно виміряти дві величини: відстань f від старого зображення S' (зображення, яке дає збиральна лінза окремо) до розсіювальної лінзи та відстань d від нового зображення S'' (зображення, яке дає система лінз) до розсіювальної лінзи.

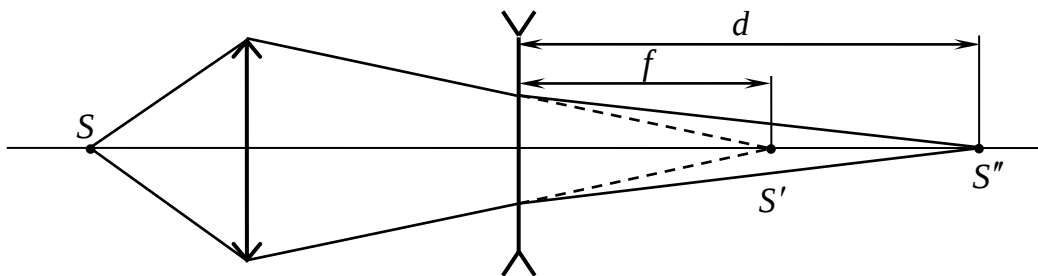


Рис. 14.6. Отримання зображення за допомогою системи збиральної та розсіювальної лінз

Оцінимо межу відносної похибки ε_F при визначенні фокусної відстані за формулою (14.8):

$$\varepsilon_F \equiv \frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta(d - f)}{d - f} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta d}{d - f} + \frac{\Delta f}{d - f}.$$

Оскільки $\Delta d = \Delta f$, то

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{2\Delta d}{d - f}. \quad (14.9)$$

Межу абсолютної похибки оцінимо за формулою

$$\Delta F = \varepsilon_F \cdot F. \quad (14.10)$$



Підготовчі вправи.

Рівень А

1. На рис. 14.7 наведено фотографії двох лінз. Виберіть правильне твердження.

- А. Обидві лінзи є збиральними.
- Б. Лінза 1 – збиральна, лінза 2 – розсіювальна.
- В. Обидві лінзи є розсіювальними.
- Г. Лінза 1 – розсіювальна, лінза 2 – збиральна.

2. Фокусну відстань лінзи вимірюють у ...

- А. ... метрах.
- Б. ... діоптріях.
- В. ... секундах.
- Г. ... герцах.

3. Оптичну силу лінзи вимірюють у ...

- А. ... амперах.
- Б. ... ньютонах.
- В. ... вольтах.
- Г. ... діоптріях.



Рис. 14.7. До завдання 1

4. Якщо відстань від предмета до збиральної лінзи перевищує подвійну фокусну відстань, то зображення предмета в цій лінзі ...

- А. ... пряме уявне зменшене.
- Б. ... пряме уявне збільшене.
- В. ... обернене дійсне зменшене.
- Г. ... обернене дійсне збільшене.

5. Які лінзи, з тих, що наведені на рис. 14.2, можна використовувати у повітрі як збільшувальне скло?

- А. Лінзи г), д) та е).
- Б. Лінзи а), б) та в).
- В. Лише лінзу а).
- Г. Всі лінзи.

6. Які лінзи, з тих, що наведені на рис. 14.2, дозволяють одержати дійсні зображення предметів? Лінзи скляні і знаходяться у повітрі.

- А. Лінзи г), д) та е).
- Б. Лінзи а), б) та в).
- В. Лише лінза а).
- Г. Всі лінзи.

Рівень Б

7. Що таке фокус лінзи? Оптичний центр? Головна оптична вісь? Побічна вісь? Фокальна площина?

8. На кожному з рисунків *а*), *б*), *в*) (рис. 14.8) показано головну оптичну вісь MN тонкої лінзи, світну точку S та її зображення S' . Знайдіть побудовою, де знаходяться оптичний центр O лінзи та її фокуси F . Визначте також тип лінзи (збиральна чи розсіювальна) та тип зображення (дійсне чи уявне).

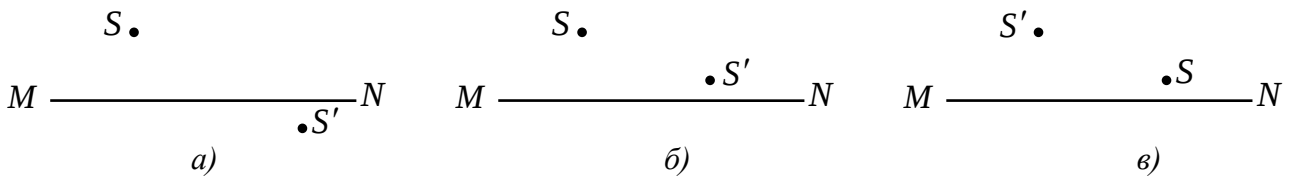


Рис. 14.8. До завдання 8

9. На рисунках *а*) та *б*) (рис. 14.9) показано світловий промінь, що падає на лінзу. Побудуйте подальше поширення цього променя.

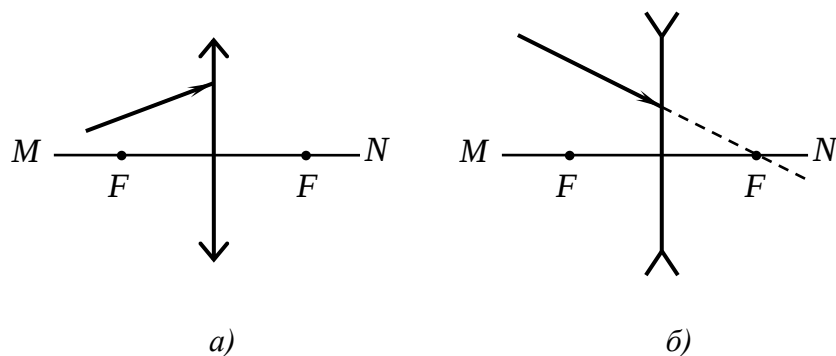


Рис. 14.9. До завдання 9

10. Побудуйте зображення предметів 1, 2, 3 (рис. 14.10, *а*) та 4 (рис. 14.10, *б*).

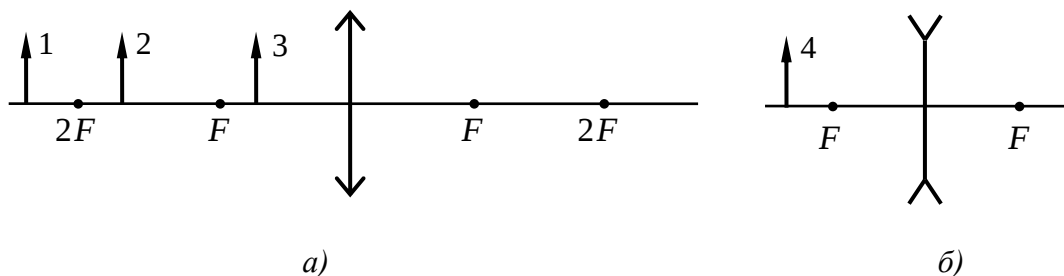


Рис. 14.10. До завдання 10

11. Від чого і як залежить оптична сила лінзи?

12. Розміри предмета більші від розмірів лінзи. Побудуйте зображення такого предмета в збиральній лінзі.

13. Поясніть, на чому базується всім відомий спосіб “випалювання” малюнків на дерев’яних дошках за допомогою лінзи у сонячний день.

14. Як за допомогою лінзи можна розпалити вогонь у сонячний день? Яку лінзу для цього потрібно взяти: збиральну чи розсіювальну?

15. За допомогою формули (14.1) з’ясуйте, які з наведених на рис. 14.2 скляних лінз є збиральними, а які розсіювальними, якщо вони знаходяться у повітрі.

16. Чи може збиральна лінза стати розсіювальною і навпаки?

17. Є дві лінзи: збиральна та розсіювальна. Як визначити, не користуючись ніякими приладами, яка з них має більшу (за модулем) оптичну силу?

18. Обґрунтуйте формули (14.5) та (14.9).

19. Поясніть, як оцінити похибки визначення F методом меж. Користуючись формулою (14.8), знайдіть верхню та нижню межі значень фокусної відстані (F_{BM} та F_{HM} відповідно).

20. Проаналізувавши формулу (14.8), запропонуйте шляхи зменшення відносної похибки вимірювання F .



14.3. Додаткові творчі завдання.

Завдання для формування банку ідей.

1. Як з’ясувати, не виймаючи лінз з паперових конвертів, яка з них є розсіювальною, а яка – збиральною?

2. Як, знаходячись у кімнаті, що освітлюється електричною лампою, дізнатися, яка з двох збиральних лінз з однаковими діаметрами має більшу оптичну силу?

3. Як оцінити радіус увігнутого сферичного дзеркала (або радіус кривизни увігнутої лінзи) за допомогою секундоміра та сталеві кульки відомого радіуса?

4. Візьміть окуляри і, не дотикаючись пальцями до скелець, визначте, для кого вони призначені: для короткозорих чи далекозорих.

5. Як виміряти фокусну відстань збиральної лінзи за допомогою плоского дзеркала, лінійки та аркуша “у клітинку”.

6. Як виміряти фокусну відстань розсіювальної лінзи у сонячний день, якщо у наявності є лінійка, олівець та аркуш “у клітинку”?



Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.

Експериментальні задачі.

1. Визначте показник заломлення скла, з якого виготовлена лінза, та радіуси кривизни її поверхонь. *Обладнання:* двоопукла лінза, трилітрова банка з водою (показник заломлення води $n_g = 4/3$), джерело світла, штатив, лінійка.

Примітка. Оптична сила сферичної поверхні радіуса r , з одного боку якої знаходиться середовище з показником заломлення n_1 , а з іншого – середовище з показником n_2 , дорівнює

$$D = \frac{n_2 - n_1}{r}.$$

Цій оптичній силі D відповідає фокусна відстань F_i , яка вимірюється з боку середовища з показником заломлення світла n_i , і яка дорівнює

$$F_i = \frac{n_i}{D}.$$

2. Визначте: а) фокусну відстань; б) радіуси кривизни поверхонь; в) показник заломлення скла збиральної та розсіювальної лінз. *Обладнання:* увігнуто-опукла лінза і двоввігнута лінза на підставках, рулетка, екран, лампочка на підставці, акумулятор, ключ, з'єднувальні провідники.

3. Визначте показник заломлення речовини плоско-опуклої лінзи. *Обладнання:* плоско-опукла лінза, штангенциркуль, лінійка, екран, лампочка на підставці, джерело струму, ключ, з'єднувальні провідники.

4. Визначте оптичну силу розсіювальної лінзи. *Обладнання:* розсіювальна лінза, збиральна лінза, масштабна лінійка, екран, лампочка на підставці, джерело струму, ключ, з'єднувальні провідники.

5. Складіть три дволінзові збільшувальні оптичні системи з наданих лінз. Теоретично та експериментально визначте збільшення цих систем. *Обладнання:* три лінзи (розсіювальна та дві збиральні з різними фокусними відстанями), штативи, екран, лінійка, свічка, сірники, метрові лінійка з поділками.

Примітка. Експериментальне збільшення системи можна визначити, одночасно розглядаючи і порівнюючи лінійні розміри предмета та його зображення.

Тренувальні винахідницькі задачі.

1. Якщо розмістити точкове джерело світла у фокусі збиральної лінзи, то після проходження крізь лінзу промені поширюватимуться паралельним пучком. Якщо тепер розмістити перпендикулярно пучку плоске дзеркало, то воно відіб'є світлові промені. І після зворотного проходження крізь лінзу вони знову створять зображення точкового предмета у фокусі.

Проведіть даний дослід. Запропонуйте пристрій для зручного вимірювання фокусної відстані збиральної лінзи, який би базувався на розглянутому (або іншому) способі.

2. У даній лабораторній роботі описано спосіб вимірювання фокусної відстані розсіювальної лінзи. До його недоліків можна віднести такі:

- необхідність мати у наявності збиральну лінзу з відомою фокусною відстанню (при цьому оптична сила цієї лінзи повинна бути більшою за модуль оптичної сили розсіювальної лінзи);

- досить велика кількість операцій (безпосередніх вимірювань та розрахунків), які потрібно виконати експериментатору для визначення фокусної відстані лінзи.

Запропонуйте пристрій або спосіб для більш зручного знаходження фокусної відстані розсіювальних лінз, які були б позбавлені указаних недоліків.



Зробіть своїми руками!

Ознайомтеся з конструкцією та принципом дії телескопа. Виготовте його діючу модель. Визначте збільшення, яке вона дає.

Конструкція телескопа. Для спостереження за віддаленими об'єктами використовують телескопи. Найпростіший телескоп складається з двох лінз, одна з яких довгофокусна, інша – короткофокусна. Довгофокусна лінза має великий діаметр і знаходиться на кінці труби, який обернений до об'єкта спостереження. Ця лінза називається *об'єктивом*. Лінза-об'єktiv – збиральна лінза. Короткофокусна лінза малого діаметра знаходиться на іншому кінці труби. Ця лінза обернена до ока спостерігача і називається *окуляром*. Лінза-окуляр може бути як збиральною, так і розсіювальною. Схема телескопа, в якій окуляр – збиральна лінза, називається схемою Кеплера (рис. 14.11, а). Схема, в якій окуляр – розсіювальна лінза, називається схемою Галілея (рис. 14.11, б). Труба Кеплера дає збільшене уявне перевернуте зображення, а труба Галілея – збільшене уявне пряме.

Принцип дії телескопа. Лінза об'єктива з фокусною відстанню $F_{об}$ створює у фокальній площині дійсне зменшене зображення далекого предмета. Окуляр розташований від фокальної площини об'єктива на відстані, що дорівнює фокусній відстані окуляра $F_{ок}$. Тому паралельний пучок світла, сфокусований об'єктивом телескопа, перетворюється окуляром знову на паралельний пучок. Після виходу з окуляра паралельний пучок світла фокусується оптичною системою ока у точку на поверхні сітківки.

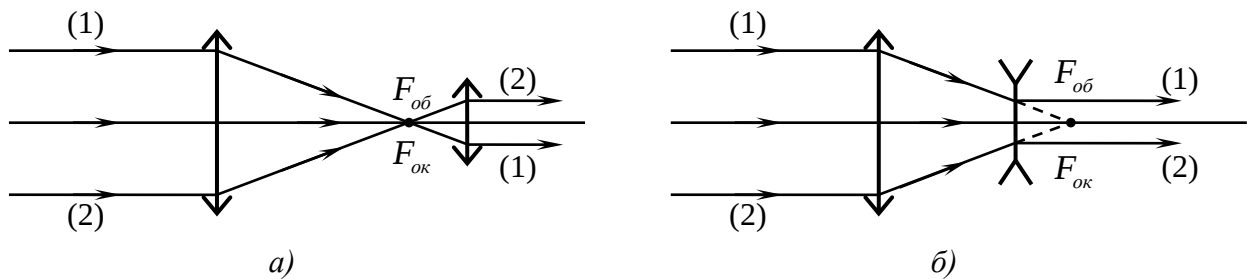


Рис. 14.11. Телескопічні системи: Кеплера (а) та Галілея (б)

Якщо далекий предмет AB без використання телескопа видно під кутом φ_1 , то після проходження оптичної системи телескопа кут зору φ_2 на цей предмет (на його зображення) для спостерігача стає значно більшим (рис. 14.12). Збільшенням телескопа Γ називається відношення

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1}.$$

Як видно з рис. 14.12, вираз для збільшення Γ можна подати у вигляді

$$\Gamma = \frac{F_{об}}{F_{ок}},$$

де $F_{об}$, $F_{ок}$ – відповідно фокусні відстані об'єктива та окуляра (у разі, коли окуляром виступає розсіювальна лінза, $F_{ок}$ – модуль її фокусної відстані).

З останньої формули випливає, що як об'єктив слід узяти довгофокусну лінзу (для саморобного телескопа $F_{об} = 0,5 \text{ м} \div 1,5 \text{ м}$), а окуляром має бути короткофокусна лінза ($F_{ок} = 2 \text{ см} \div 10 \text{ см}$).

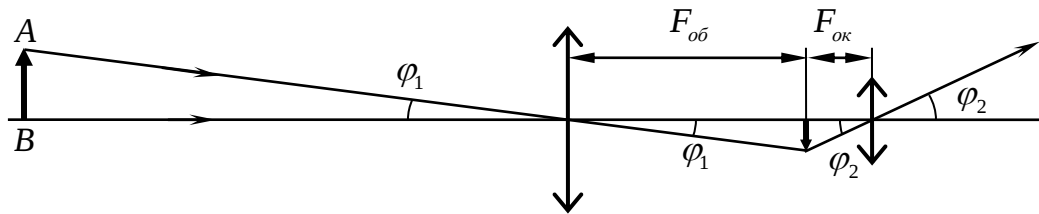


Рис. 14.12. Збільшення кута зору у телескопі Кеплера

15. ВИМІРЮВАННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ



15.1. Теоретичні відомості.

Однією з основних характеристик світла є довжина хвилі λ . Вимірювання довжини світлової хвилі можна здійснити, скориставшись явищами інтерференції та дифракції.

Дифракцією світла називають явище огинання світловою хвилею контурів непрозорих перешкод і, як наслідок цього, проникнення світла в область геометричної тіні. На явищі дифракції світла ґрунтується будова такого оптичного приладу, як дифракційна решітка.

Дифракційна решітка – спектральний прилад, який слугує для розкладання світла в спектр та вимірювання довжини хвилі. Решітки в залежності від їх застосування бувають металевими або скляними. На скляних решітках дифракцію можна спостерігати як у прохідному, так і у відбитому світлі, а на металевих – лише у відбитому.

У найпростішому випадку дифракційна решітка – прозора скляна пластинка, яка містить велику кількість однакових рівновіддалених паралельних штрихів (до 1200 на 1 мм). Кращі металеві решітки мають до 2000 штрихів на один міліметр поверхні, при цьому загальна довжина решітки складає 100 мм – 150 мм.

Розглянемо решітку, в якій щілини шириною b чергуються з непрозорими ділянками шириною a (рис. 15.1). Обидві ці величини визначають одну з головних характеристик решітки – її *період* $d = a + b$, який ще називають сталою решітки.

Нехай на дифракційну решітку падає вузький паралельний пучок монохроматичного світла, який дифрагуватиме на щілинах решітки. За решіткою поставимо збиральну лінзу, а в її фокальній площині розмістимо екран (див. рис. 15.1). Виділимо промені, які виходять з решітки під

однаковими кутами φ . Різниця ходу двох таких променів, що йдуть з відповідних точок сусідніх щілин, визначається виразом

$$\Delta = d \sin \varphi.$$

В тих напрямках (тобто для таких кутів φ), для яких різниця ходу дорівнює цілому числу довжин хвиль (парному числу півхвиль),

$$\Delta = k \cdot \lambda = 2k \cdot \lambda/2,$$

спостерігається інтерференційний *максимум* (світла смуга на екрані).

Пояснимо останнє твердження. При додаванні хвиль від двох когерентних джерел амплітуда результуючих коливань набуває максимального значення, якщо коливання, які додаються, співпадають по фазі, або якщо різниця фаз є кратною 2π :

$$\Delta\varphi = k \cdot 2\pi.$$

Різниця фаз 2π виникає за умови, якщо коливання у часі відрізняються на один період T коливань. За один період T коливання поширюються на відстань, що дорівнює довжині хвилі λ . Тому інтерференційні максимуми спостерігаються в точках, різниця ходу до яких від двох джерел дорівнює довжині хвилі λ або цілому числу довжин хвиль: $\Delta = k \cdot \lambda$.

Навпаки, для тих напрямків, де різниця ходу дорівнює половині довжини хвилі або *непарному числу півхвиль*,

$$\Delta = (2k + 1) \cdot \lambda/2,$$

виникає інтерференційний *мінімум* (темна смуга). Отже, в напрямках, де кути φ задовольняють умові

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (15.1)$$

спостерігаються *головні максимуми* дифракційної картини.

Зазначимо, що між головними максимумами знаходиться декілька слабких *побічних* максимумів. На фоні яскравих головних максимумів вони майже невидимі.

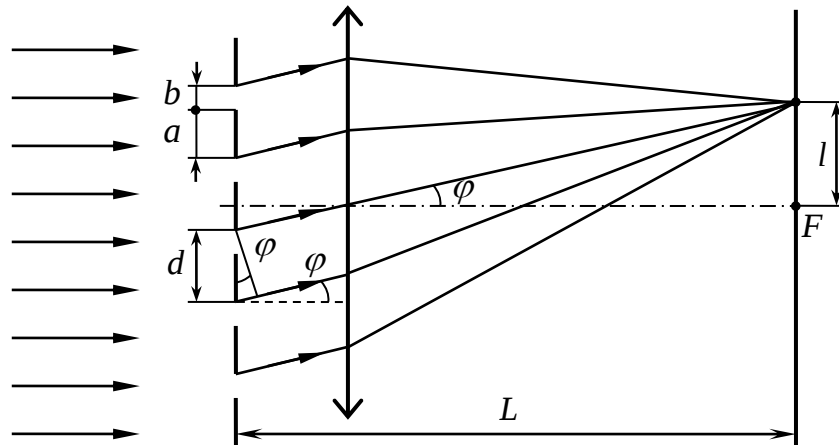


Рис. 15.1. Схема утворення дифракційної картини

При освітленні решітки білим світлом (воно є немонохроматичним, адже містить електромагнітні хвилі різної довжини – від 400 нм до 760 нм) лише центральний максимум (дифракційний спектр *нульового* порядку) дає білу смугу, оскільки з формули дифракційної решітки (15.1) випливає, що при $k = 0$ для всіх довжин хвиль $\varphi = 0$.

Всі інші максимуми дають на екрані різнокольорові смуги, бо максимуму іншого кольору відповідає інший кут відхилення. Ці різнокольорові смуги, які розташовані симетрично відносно спектра нульового порядку, називають спектрами першого, другого, ..., k -го порядку. При цьому через те, що довжина хвилі фіолетового кольору менша довжини хвилі червоного світла, відповідно до формули $\sin \varphi = k\lambda/d$, дифракційний кут для фіолетового світла менший, ніж для червоного. Тому у спектрі дифракційної решітки фіолетові лінії розташовані ближче до центра дифракційної картини.

З аналізу формули дифракційної решітки (15.1) випливає необхідність виготовлення решіток з малим періодом d . Так, з $\sin \varphi = k\lambda/d$ зрозуміло, що великі дифракційні кути (тобто більш широкий спектр) дають решітки з малим періодом. З (15.1) також зрозуміло, що для кожної решітки існує максимально можливий порядок спектра $k < d/\lambda$, оскільки $\sin \varphi \leq 1$.

Можна показати, що для дифракційної решітки, яка має N щілин, амплітуда електромагнітної хвилі в головних максимумах у N разів більше амплітуди світлової хвилі,

яка приходить в цьому ж напрямку від однієї щілини, а інтенсивність в N^2 разів більше відповідної інтенсивності.



15.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я . Виміряти довжину світлової хвилі за допомогою дифракційної решітки з відомим періодом.

О б л а д н а н н я : джерело світла (лампа розжарювання або сонячне світло), світлофільтри різних кольорів, прилад для визначення довжини світлової хвилі (який складається з: дифракційної решітки з відомим періодом, виміральної лінійки, тримача решітки, екрана з щілиною).

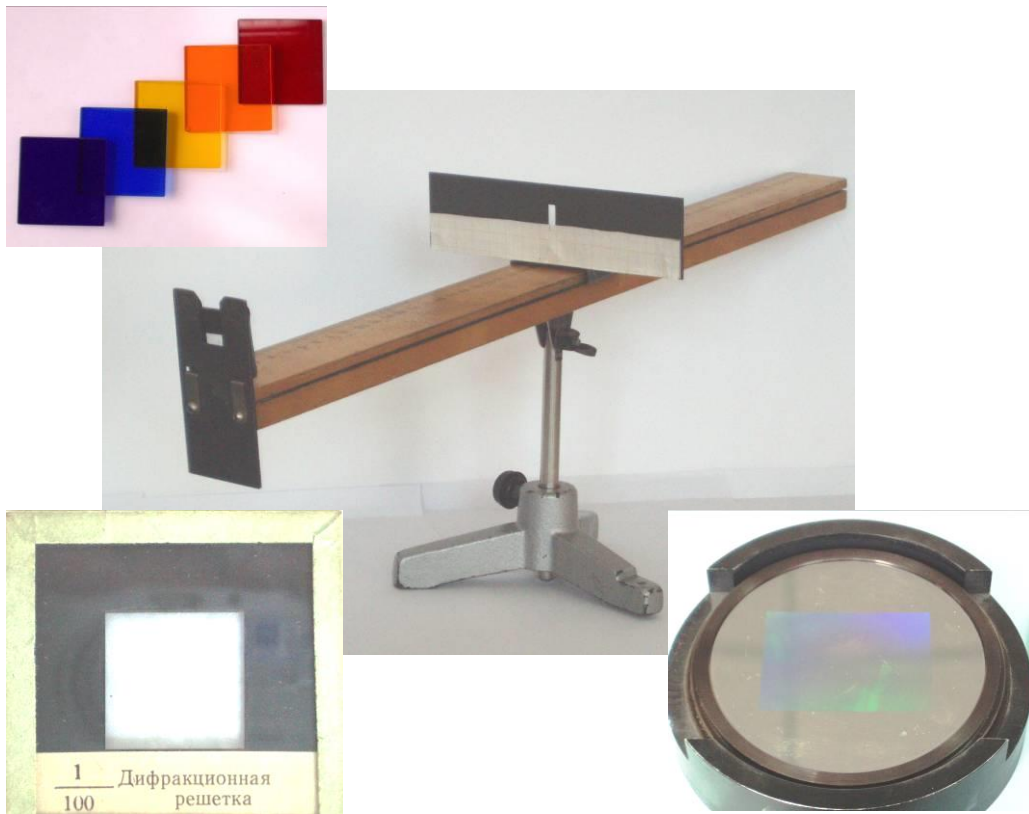


Рис. 15.2. Деякі пристрої, що використовуються при виконанні досліду

Вимірювання довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної решітки. *Спосіб 1.* Для експерименту збираємо установку, схема якої зображена на рис. 15.1. Паралельний коаксіальний пучок світла можна створити, встановивши на шляху світла від лампи розжарювання непрозорий

екран з вузькою (2 мм – 3 мм) щілиною. Далі на шляху утвореного пучка світла слід розмістити дифракційну решітку, збиральну лінзу та екран (у фокальній площині лінзи). Переміщуючи екран, отримують на ньому чітке зображення щілини та дифракційні спектри по обидва боки від нього. Положення дифракційного спектра першого порядку ($k=1$) для дифракційної решітки з періодом d визначається з умови

$$d \sin \varphi = \lambda, \quad (15.2)$$

де λ – довжина хвилі світла певного кольору;

φ – кут, під яким спостерігається максимум.

Як видно з (15.2), для визначення довжини хвилі λ світла певного кольору, наприклад, червоного, потрібно знайти відповідне значення $\sin \varphi$. Оскільки кут φ малий, то $\sin \varphi \approx \tan \varphi$. Отже, вимірявши відстань l від центру зображення щілини на екрані (білої смуги) до червоної межі спектра, а також відстань L між лінзою та екраном (див. рис. 15.1), можна визначити довжину хвилі червоного світла:

$$\lambda_{\text{черв}} = d \cdot \frac{l}{L}. \quad (15.3)$$

З формули (15.3) дістаємо вираз для оцінки межі відносної похибки:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta L}{L}.$$

В останній сумі найбільший внесок дає другий доданок: межа абсолютної похибки вимірювання відстані l від центра зображення щілини до відповідного максимуму не менше половини ширини спектра. Тому,

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\Delta l}{l}. \quad (15.4)$$

Спосіб 2. Дифракційні спектри, утворені решіткою, можна спостерігати і суб'єктивно, розмістивши дифракційну решітку близько до ока. В цьому випадку роль лінзи, яка збирає в одну точку паралельний пучок світлових променів, які йдуть під кутом φ від дифракційної решітки, виконує оптична

система ока людини, а роль екрана, на якому отримується спектр, сітківка ока (рис. 15.3).

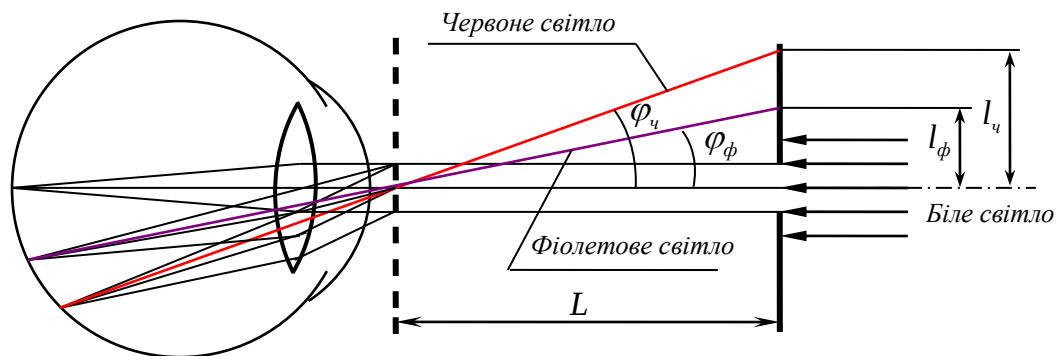


Рис. 15.3. Схема утворення дифракційної картини на сітківці ока

Для вимірювання довжини хвилі досить зручним є спеціальний прилад (див. рис. 15.2), який складається з: дифракційної решітки з відомим періодом, вимірювальної лінійки, тримача решітки, екрана зі щілиною. Екран має змогу переміщуватися вздовж лінійки.

Для спостереження дифракційних спектрів потрібно дивитись крізь дифракційну решітку на щілину в екрані. Найкращі умови видимості спектра при цьому досягають зміною взаємного положення джерела світла та екрана. Зазначимо, що як джерело світла може виступати і освітлювальна лампа розжарювання, що висить на стелі. Крім того, можна використовувати і сонячне світло (при цьому ні в якому разі не можна дивитись на Сонце!).

Отже, дивлячись на освітлювач (щілину в екрані) крізь дифракційну решітку, бачимо різні порядки дифракційних спектрів, розташованих симетрично відносно щілини. Оскільки період решітки d відомий, а порядок спектра легко визначити візуально, то для визначення довжини хвилі світла певного кольору треба визначити відповідний $\sin \varphi$, адже з (15.1) маємо

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}. \quad (15.5)$$

Внаслідок того, що кути φ малі, $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi$. З рис. 15.3 видно, що

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{L}, \quad (15.6)$$

де l – відстань між щілиною і лінією спектра k -го порядку даного кольору;

L – відстань від щілини до решітки.

З урахуванням (15.6), формула (15.5) набуває вигляду:

$$\lambda = \frac{dl}{kL}. \quad (15.7)$$

Межу відносної похибки при такому вимірюванні λ можна також оцінити за формулою (15.4). Зазначимо, що на практиці зручніше вимірювати не l , а $2l$ – відстань між відповідними лініями спектрів k -го порядку даного кольору, які лежать по обидва боки (симетрично) від щілини.



Підготовчі вправи.

Рівень А

1. Дифракцією світла називається ...

- А. ... зміна напрямів світлових променів при переході з одного середовища в інше.
- Б. ... огинання світлом перешкод.
- В. ... взаємне посилення чи послаблення двох когерентних світлових хвиль.
- Г. ... розкладання світла в спектр при проходженні його через трикутну призму.

2. Виберіть правильне твердження.

- А. Світлові хвилі поширюються тільки у вакуумі.
- Б. При переході світлових хвиль з повітря у воду змінюється їх частота.
- В. Для поширення світлових хвиль обов'язково потрібне пружне середовище.
- Г. При переході світлових хвиль з повітря в скло змінюється довжина хвилі.

3. При накладанні двох світлових хвиль з однаковою частотою та постійною різницею фаз спостерігається ...

- | | |
|------------------------------|---------------------------|
| А. ... заломлення світла. | Б. ... відбивання світла. |
| В. ... інтерференція світла. | Г. ... дифракція світла. |

4. У деякій точці простору накладаються одна на одну дві когерентні світлові хвилі з різницею ходу півтори довжини хвилі. Виберіть правильне твердження.

- А. Фази хвиль у даній точці збігаються.
- Б. Фази хвиль у даній точці відрізняються на $\pi/2$.
- В. Хвилі приходять у дану точку в протифазі.

Г. Фази хвиль у даній точці відрізняються на $\pi/4$.

5. Установіть відповідність:

- | | | | |
|---|-----------------------------------|---|------------------------------|
| 1 | Формула дифракційної решітки | А | $\Delta = (2k + 1)\lambda/2$ |
| 2 | Умова інтерференційного максимуму | Б | $k < d/\lambda$ |
| 3 | Зв'язок довжини хвилі з частотою | В | $\Delta = k\lambda$ |
| 4 | Умова інтерференційного мінімуму | Г | $d \sin \varphi = k\lambda$ |
| | | Д | $\lambda = c/\nu$ |

6. Дифракційну решітку, у якої 100 штрихів на 1 мм, освітлено монохроматичним світлом. Відстань до екрана дорівнює 2 м. Яка довжина хвилі цього світла, якщо відстань на екрані між нульовим максимумом і максимумом другого порядку дорівнює 23,6 см?

- | | |
|-------------------------|--------------------------|
| А. Менше 60 нм. | Б. Від 290 нм до 300 нм. |
| В. Від 580 нм до 600 нм | Г. Більше 880 нм. |

Рівень Б

7. Яку роль відіграє збиральна лінза в утворенні дифракційної картини? Чи можна збиральну лінзу замінити розсіювальною?

8. Чому екран для спостереження дифракційної картини встановлюється у фокальній площині лінзи?

9. Навіщо між лампою-освітлювачем і дифракційною решіткою іноді встановлюють екран з щілиною?

10. Яке світло називається білим? Випишіть з будь-якого посібника значення довжин хвиль для семи основних кольорів спектра.

11. Як виділити з білого світла світлову хвилю певного кольору?

12. Наведіть переваги та недоліки двох описаних способів вимірювання λ .

13. Як зміниться вигляд дифракційної картини при використанні дифракційної решітки, період якої у два рази менший?

14. Чим відрізняється спектр, отриманий за допомогою дифракційної решітки, від спектра, отриманого за допомогою призми?

15. Що таке порядок спектра k ?

16. Отримайте робочу формулу (15.7).

17. Обґрунтуйте формулу (15.4). Запропонуйте шляхи зменшення відносної похибки вимірювання λ .



15.3. Додаткові творчі завдання.

Завдання для формування банку ідей.

1. Як оцінити довжину світлової хвилі певного кольору, якщо у наявності є штангенциркуль, лампа розжарювання, білий екран, рулетка.

2. Як оцінити роздільну здатність ока (найменший кут, під яким два об'єкти ще видно роздільно), спостерігаючи дві близько розташовані крапки на білому аркуші з різних відстаней? У наявності є рулетка, аркуш міліметрового паперу, аркуш білого паперу та голка.

3. Як оцінити лінійні розміри світлочутливих елементів ока – колбочок, якщо у наявності є голка, аркуш білого паперу, аркуш міліметрового паперу та рулетка?



Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.

Експериментальні задачі.

1. Визначте спектральні межі чутливості свого ока, максимальне і мінімальне значення його оптичної сили. *Обладнання:* дифракційна решітка, електрична лампа з прямою ниткою розжарення, вимірювальна лінійка, рулетка, аркуші білого та чорного паперу.

2. Визначте:

- довжину хвилі випромінювання лазера;
- вміст оптичного “чорного ящика” (розбирати ящик заборонено);
- характерні параметри об'єктів чорного ящика.

Увага! Не спрямовуйте випромінювання лазера безпосередньо в очі. Ви можете пошкодити сітківку.

Обладнання: лазер, оптичний “чорний ящик”, рулетка, штангенциркуль, аркуш міліметрового паперу, скотч, прищіпка, пластилін.

3. Визначте довжину хвилі випромінювання напівпровідникового лазера та період відбивної дифракційної решітки. *Обладнання:* напівпровідниковий лазер, два бруски, вимірювальна лінійка, екран, алюмінієва фольга, дві швацькі голки, скляна пластинка, пластилін, частина сектора лазерного диска (дифракційна решітка), ластик, аркуш міліметрового паперу.

Тренувальні винахідницькі задачі.

1. Запропонуйте кілька способів оцінки зернистості сітківки ока (розміру його світлочутливого елемента) за допомогою вимірювальної лінійки, дзеркала та олівця. *Підказка.* Спробуйте скористатись тим, що око людини спроможне одночасно різко бачити предмети на різних відстанях.

Увага! Дотикатися до ока будь-чим заборонено!



Зробіть своїми руками!

Робочу поверхню лазерного диска можна використовувати як відбивальну дифракційну решітку (*Чому?*). Виріжте ножицями частину сектора лазерного диска. Розташуйте диск під певним кутом до прямих сонячних променів (або паралельних променів від лампи розжарювання). На шляху відбитих променів розмістіть збиральну лінзу, а в її фокальній площині – екран. За отриманою дифракційною картиною виміряйте період решітки.

16. ВИМІРЮВАННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛУ



16.1. Теоретичні відомості.

Зовнішнім фотоелектричним ефектом (або просто фотоефектом) називається явище виривання електронів з речовини під дією світла. Самі електрони, які вилітають таким чином з речовини називають *фотоелектронами*. Експериментальним шляхом були встановлені такі закономірності зовнішнього фотоефекту (важливе місце у цьому належить дослідом Г. Герца, О.Г. Столетова, Ф. Ленарда, Дж. Томсона, А.Ф. Іоффе):

- 1) максимальна швидкість фотоелектронів, які вилітають з поверхні тіла, не залежить від інтенсивності світла, а залежить від його частоти: збільшення частоти призводить до зростання швидкості;
- 2) число фотоелектронів, які вириваються з катода за 1 с (фотострум насичення), прямо пропорційне інтенсивності світла;
- 3) для кожної речовини існує *червона межа* фотоефекту – найбільша довжина хвилі $\lambda_{\max}$ світла (найменша його частота $\nu_{\min}$), при якій фотоефект ще можливий.

Окрім того, встановлена практична безінерційність фотоефекту: він виникає одразу ж при освітленні поверхні тіла (за умови, що частота світла $\nu > \nu_{\min}$). Ці закономірності фотоефекту не можливо пояснити на основі електромагнітної хвильової теорії світла.

З точки зору цієї теорії електромагнітна хвиля, досягнувши поверхні металу, викликає вимушені коливання електронів, завдяки чому вони вириваються з металу. Але тоді потрібний певний час для “розгойдування” електронів, і при малій освітленості металу має спостерігатися помітне запізнення між початком освітлення та моментом вильоту електронів. Крім того, кінетична енергія електронів, які вилітають з металу, повинна залежати від амплітуди сили, яка викликає вимушені коливання, а отже, від напруженості електричного поля в електромагнітній хвилі.

Фотоефект можна пояснити, виходячи з корпускулярної теорії світла. Нагадаємо, що за Планком випромінювання та поглинання світла речовиною відбувається не неперервно, а окремими (дискретними) порціями – *квантами*. За гіпотезою Ейнштейна світло і поширюється у вигляді дискретних частинок – світлових квантів. Ці частинки згодом (у 1926 р.) отримали назву *фотонів*.

У монохроматичному світлі з частотою ν всі фотони мають однакову енергію, рівну

$$\varepsilon = h\nu, \quad (16.1)$$

де h – стала Планка, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Джерелами фотонів є переходи атомів, молекул та атомних ядер зі збуджених станів у стани з меншою енергією. Фотони випромінюються під час прискореного руху заряджених частинок, при розпадах і анігіляції частинок.

З квантової точки зору на природу світла механізм фотоефекту пояснюється тим, що фотон віддає свою енергію електрону речовини. Відомо, що для виходу з металу електрон має подолати потенціальний бар'єр на межі метал – вакуум. Для цього електрон має виконати роботу виходу A . В результаті поглинання фотона його енергія $\varepsilon = h\nu$ повністю передається електрону. Якщо $\varepsilon > A$, то електрон зможе виконати роботу виходу та вийти з металу.

Кількісно зовнішній фотоефект описується рівнянням Ейнштейна, яке являє собою закон збереження енергії:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (16.2)$$

де $h\nu$ – енергія фотона;

A – робота виходу електрона, яка дорівнює найменшій енергії, що її необхідно надати електрону для того, щоб видалити його за межі речовини в вакуум;

$mv_{\max}^2/2$ – максимальна кінетична енергія електрона, що вилетів з поверхні тіла.

Розглянемо, чим визначається робота A виходу електрона з металу. Електрони в твердих тілах (у кристалах) розташовуються по рівнях дозволених енергетичних зон, маючи при цьому різні енергії. Вони заповнюють ці зони, починаючи з нижньої. Згідно з принципом Паулі в кожній зоні може знаходитися не більше електронів, ніж там є вільних рівнів. Тому електрони заповнюють декілька зон. Остання повністю заповнена енергетична зона називається *валентною зоною*, а наступна за нею дозволена зона називається *зоною провідності*.

Зона провідності майже порожня у ізоляторів, заповнена неповністю у напівпровідників і суттєво – проте не до кінця – заселена електронами у випадку металів. Саме з цими електронами – електронами провідності – пов'язаний фотоефект у металах.

Кінетична енергія поступального руху електронів дорівнює їх енергії, відрахованої від дна зони провідності. При низькій температурі електрони займають в зоні провідності всі рівні до деякого. Енергія цього рівня називається *енергією Фермі* ε_F (для металів $\varepsilon_F \approx 4 - 6$ еВ). При $T > 0$ К межа між вільними та зайнятими рівнями визначена не різко. Теплове “розмиття” за порядком величини дорівнює $2kT$ (при кімнатній температурі це відповідає $\approx 0,05$ еВ, що складає лише 1% від енергії Фермі та декілька відсотків від енергії фотонів видимого світла).

Уточнимо тепер поняття роботи виходу електрона. *Робота виходу* A електрона з металу дорівнює енергії, яку потрібно витратити для видалення з кристалу електрона, що має енергію, рівну енергії Фермі (тут ми нехтуємо невеликим тепловим розмиттям), і який рухається в напрямку поверхні. Якщо енергія фотона більше A , то надлишок енергії залишається у електрона. Вона і являє собою максимально можливу кінетичну енергію $m v_{\max}^2 / 2$ фотоелектрона. Кінетична енергія буде меншою, якщо електрони були вибиті з більш глибоких рівнів, або, якщо вони рухалися не у бік поверхні.

За допомогою рівняння Ейнштейна (16.2) можна пояснити всі закономірності фотоефекту. Так, з (16.2) випливає, що максимальна кінетична енергія фотоелектрона, а отже, і його максимальна початкова швидкість, залежать від частоти світла ν та роботи виходу A , але не залежать від інтенсивності світла (перша закономірність фотоефекту).

Загальне число фотоелектронів N_e , які залишають за 1 с поверхню металу, має бути пропорційним числу фотонів N_ϕ , які падають за той самий час на

поверхню. Якщо E – освітленість поверхні, яка пропорційна інтенсивності світла I , то число фотонів, що щосекунди падають на поверхню, складає $N_\phi \propto E/h\nu \propto I/h\nu$. Таким чином, доводиться друга закономірність зовнішнього фотоефекту: число фотоелектронів, що вилітають з металу за 1 с, пропорційне інтенсивності світла, $N_e \propto I$.

З рівняння (16.2) також випливає, що зовнішній фотоефект можливий лише за умови, що $h\nu \geq A$. Позначимо через $\nu_{\min}$ найменшу частоту світла, при якій фотоефект ще можливий. Маємо $h\nu_{\min} = A$. Відповідна гранична довжина хвилі $\lambda_{\max} = c/\nu_{\min} = hc/A$. Отже, червона межа фотоефекту (тобто, $\nu_{\min}$ або $\lambda_{\max}$) залежить лише від роботи виходу електрона, яка визначається хімічною природою металу та станом його поверхні (цим і пояснюється третя закономірність фотоефекту). Червоною ця межа названа тому, що при $\lambda > \lambda_{\max}$, тобто при “більш червоному” світлі, фотоефект не відбувається.

Окрім зовнішнього фотоефекту (в результаті якого електрони залишають речовину), можливий також *внутрішній* фотоефект. Він полягає у тому, що електрони, залишаючись у речовині, змінюють свій енергетичний стан. Наприклад, у напівпровідниках та діелектриках частина електронів під дією світла переходить з валентної зони в зону провідності. При цьому збільшується електропровідність речовини (провідність, обумовлену появою додаткових вільних зарядів, називають *фотопровідністю*). Розглянемо це явище детальніше.

Розподіл електронів по рівнях енергії у напівпровідниках суттєво відрізняється від їх розподілу в металах. При низьких температурах напівпровідники є ізоляторами – їхня валентна зона заповнена повністю, а зона провідності порожня. При підвищенні температури невелика кількість електронів переходить з валентної зони в зону провідності. Якщо поступово збільшувати енергію фотонів, спочатку з’явиться слабкий фотострум, пов’язаний з вибиванням електронів із зони провідності. Однак значні фотоструми виникають тоді, коли енергії фотонів вистачає для вибивання електронів з валентної зони (де електронів багато). В цьому випадку саме енергія, яка відповідає верхній межі валентної зони, визначатиме межу фотоефекту. Енергія ж Фермі у випадку напівпровідників не відіграє такої ролі, як у металах, оскільки вона лежить у забороненій зоні, де електронів немає.

Зміна енергетичних станів електронів може призводити до зміни внутрішнього електричного поля в кристалі і, як наслідок цього, до появи ЕРС (яку називають фото-ЕРС)

на межі двох різних напівпровідників (на р-п переході) або на межі напівпровідника та металу при їх освітленні. Таке явище називають *вентильним* фотоефектом.

Фотоефект знайшов широке застосування в різних технічних пристроях: фотоелементах, фоторезисторах, фотодіодах, фотоелектронних помножувачах, сонячних батареях (вентильний фотоефект) тощо.

💡 16.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я . Виміряти роботу виходу електрона з катода вакуумного фотоелемента методом затримуючої напруги.

О б л а д н а н н я : вакуумний фотоелемент СЦВ-3 (із сурм'яно-цезієвим фотокатодом), розміщений у світлонепроникному корпусі з віконцем, в яке можна встановлювати світлофільтр; набір світлофільтрів; джерело світла: сонячне світло або світло від лампи розжарювання; джерело постійного струму (4 В); два реостати; мікроамперметр, вольтметр (з границею вимірювання 1 В); з'єднувальні провідники.



Рис. 16.1. Деякі пристрої, що використовуються при виконанні досліду

Вимірювання роботи виходу електрона з металу методом затримуючої напруги. У запропонованому завданні пропонується виміряти

роботу виходу електрона з металевого катода вакуумного фотоелемента (див. пункт “обладнання”). Найпростіший вакуумний фотоелемент (рис. 16.2) складається із скляного балона, з якого відкачано повітря. Одна половина балона вкрита зсередини світлочутливим шаром, який виступає фотокатодом. В залежності від того, для якої спектральної області призначено фотоелемент, застосовують різні покриття: срібне, цезієве, сурм’яно-цезієве тощо. Анод виготовляють у вигляді кільця або кульки і розташовують у центрі балона. Катод і анод з’єднані з двома штирками-електродами, за допомогою яких фотоелемент вмикається в електричне коло. Інколи балон фотоелемента заповнюють якимось інертним газом (як правило аргоном) під тиском приблизно 1 – 10 Па. Це робиться для збільшення фотоструму внаслідок ударної іонізації газу.

Використовуваний у даній роботі фотоелемент СЦВ-3 має сурм’яно-цезієвий фотокатод. Сам фотоелемент розміщується у світлонепроникному корпусі (*Чому?*), який має віконце для проходження світла. У віконце можна встановлювати світлофільтр.

Роботу виходу A електрона з катода фотоелемента можна знайти, скориставшись рівнянням Ейнштейна для фотоефекту:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Звідки

$$A = h\nu - \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (16.3)$$

Отже, для визначення A потрібно освітити фотоелемент світлом з відомою частотою ν та виміряти максимальну кінетичну енергію фотоелектронів.

Кінетичну енергію $mv_{\max}^2/2$ фотоелектронів можна виміряти, приклавши *затримуючу* напругу між анодом і катодом. Для цього треба з’єднати катод з



Рис. 16.2. Вакуумні фотоелементи

позитивним полюсом джерела напруги, а анод – з негативним. Схема відповідної експериментальної установки наведена на рис. 16.3. Плавна зміна напруги у цій схемі досягається шляхом введення в електричне коло двох реостатів $R1$ та $R2$. Поступово збільшуючи прикладену затримуючу напругу, можна отримати таке її значення, при якому жоден фотоелектрон не може досягти анода – сила фотоструму у фотоелементі дорівнюватиме нулю. При такому значенні напруги U робота сил електричного поля, яке гальмує рух фотоелектронів, дорівнює максимальній кінетичній їх енергії:

$$|e|U = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (16.4)$$

де $|e|$ – модуль заряду електрона;

U – мінімальне значення затримуючої напруги, при якому фотострум стає рівним нулю.

З урахуванням рівності (16.4) рівняння (16.3) набуває вигляду:

$$A = h\nu - |e|U. \quad (16.5)$$

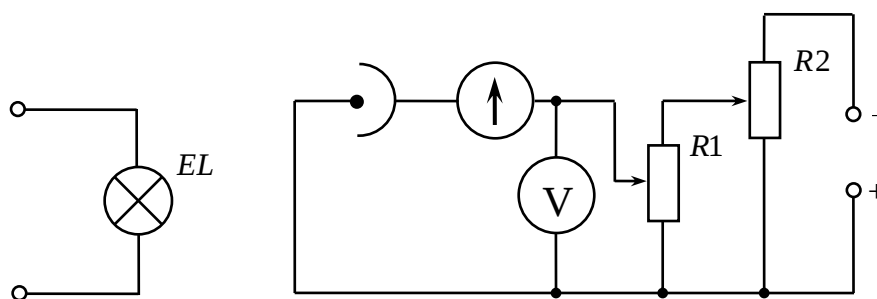


Рис. 16.3. Схема експериментальної установки для вимірювання максимальної кінетичної енергії фотоелектронів

У даній роботі як джерело світла використовується сонячне світло або світло від лампи розжарювання. Спектри випромінювання цих джерел *неперервні*. Для виділення із неперервного спектра випромінювання з певною (заданою) частотою використовують *світлофільтри* відповідного кольору. Так, синій світлофільтр СС-2 з оптичного скла пропускає світло з довжиною хвилі $\lambda_1 = 420$ нм. Цій довжині хвилі відповідає частота $\nu_1 = c/\lambda_1 = 7,15 \cdot 10^{14}$ Гц.

Аналогічно можна знайти частоту світла, що проходить через світлофільтр іншого кольору.

Зазначимо, що будь-який світлофільтр має певну смугу пропускання. Це впливає на точність вимірювання роботи виходу A електрона з металу. Для підвищення точності застосовують лазерне випромінювання, яке є практично монохроматичним, на відміну від світла, що його дають скляні світлофільтри.

Розглянемо більш точний спосіб вимірювання A . З (16.5) отримуємо

$$U = \frac{h\nu}{|e|} - \frac{A}{|e|}. \quad (16.6)$$

Останній вираз вказує на *лінійну* залежність затримуючої напруги U від частоти ν світла, яке падає на фотоелемент, тобто графік $U = U(\nu)$ – пряма лінія (рис. 16.4).

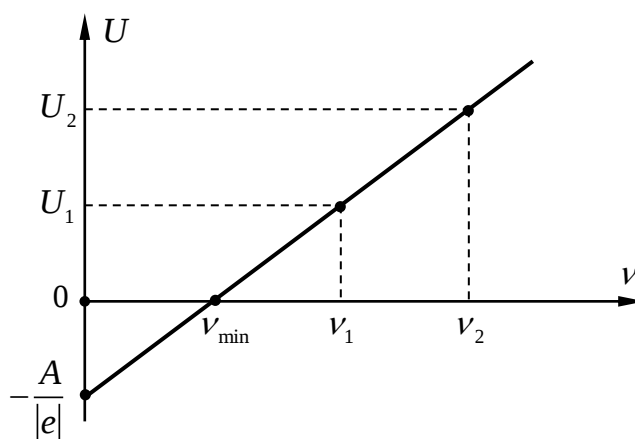


Рис. 16.4. Залежність затримуючої напруги U , прикладеної до фотоелемента, від частоти ν світла

З рис. 16.4 видно, що величина $h/|e|$ дорівнює тангенсу кута нахилу прямої, а величина $A/|e|$ – довжина відрізка на осі U , який відтинається прямою від початку координат. З рис. 16.4 також можна визначити червону межу фотоефекту $\nu_{\min}$.



Підготовчі вправи.

Рівень А

1. Хвильові властивості світла проявляються при ...

- А. ... фотоефекті. Б. ... проходженні світла через дифракційну решітку.
В. ... випромінюванні світла. Г. ... поглинанні світла атомом.

2. Корпускулярні властивості світла проявляються при ...
- А. ... дифракції світла. Б. ... інтерференції двох світлових променів.
В. ... фотоефекті. Г. ... розкладанні білого світла в спектр призмою.
3. Максимальна кінетична енергія вибитих випромінюванням з поверхні металу електронів ...
- А. ... не залежить від довжини хвилі випромінювання.
Б. ... прямо пропорційна до інтенсивності випромінювання.
В. ... не залежить від інтенсивності випромінювання.
Г. ... не залежить від частоти випромінювання.
4. Кількість електронів, вибитих випромінюванням з поверхні металу за 1 с, ...
- А. ... не залежить від інтенсивності випромінювання.
Б. ... прямо пропорційна до інтенсивності випромінювання.
В. ... обернено пропорційна до інтенсивності випромінювання.
Г. ... залежить лише від частоти випромінювання.
5. Фотоефект може припинитися, якщо ...
- А. ... зменшити у 2 рази світловий потік.
Б. ... зменшити у 2 рази частоту падаючого світла.
В. ... збільшити у 2 рази частоту падаючого світла.
Г. ... збільшити у 2 рази відстань між поверхнею металу і джерелом світла.
6. На поверхню металу падають фотони з енергією 3,5 еВ. Яка максимальна кінетична енергія вибитих з поверхні електронів, якщо робота виходу електронів з металу дорівнює 1,5 еВ?
- А. 5,5 еВ. Б. 3,5 еВ. В. 2 еВ. Г. 1,5 еВ.

Рівень Б

7. Що таке еВ? Виразіть його в одиницях СІ.
8. У скільки разів енергія кванта синього світла відрізняється від енергії кванта жовтого світла?
9. Що таке червона межа фотоефекту? Чому саме *червона*?
10. Чому в лабораторній установці катод фотоелемента підключається до позитивного полюса джерела струму?

11. Що відбудеться, якщо у лабораторній схемі полярність увімкнення джерела напруги змінити на протилежну?

12. Навіщо у даній роботі використовуються світлофільтри?

13. За графіком залежності затримуючої напруги від частоти електромагнітного випромінювання, що діє на катод вакуумного фотоелемента (рис. 16.5), знайдіть:

- а) роботу виходу електронів з катода;
- б) максимальну кінетичну енергію електронів при частоті світла $2 \cdot 10^{15}$ Гц;
- в) червону межу фотоефекту?

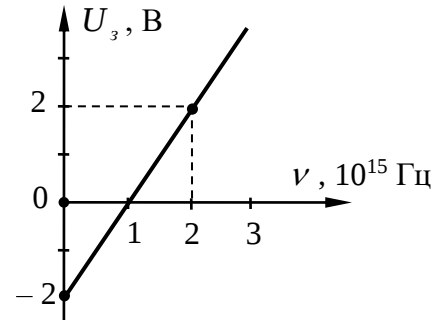


Рис. 16.5. До завдання 13

14. Як за графіком залежності затримуючої напруги U на фотоелементі від частоти ν світла визначити сталу Планка h .

15. Оцініть, яку частину енергії випромінювання Сонця отримує Земля.

? 16.3. Додаткові творчі завдання.

Завдання для формування банку ідей.

1. Про освітленість катода фотоелемента можна судити за силою струму насичення у колі. Проте у цьому струмі беруть участь і термоелектрони (тобто електрони, які вилітають з катода завдяки явищу термоелектронної емісії). У який спосіб можна було б зменшити роль термоелектронів?

2. Як визначити сталу Планка за допомогою установки, яка використовується у даній лабораторній роботі?

3. У процесі роботи рентгенівської трубки випромінювання відбувається за рахунок кінетичної енергії електронів, прискорених постійним електричним полем. Як можна збільшити жорсткість рентгенівського випромінювання (підвищити його частоту)?

4. Як визначити висоту Сонця над горизонтом (градуси або радіани) за допомогою:

- транспорта та нитки з тягарцем;

- вимірювальної лінійки та аркуша паперу;
- олівця та аркуша паперу “у клітинку”?



Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.

Експериментальні задачі.

1. Дослідіть залежність сили фотоструму I від поверхневої густини потоку випромінювання E . Побудуйте відповідний графік, відкладаючи по осі абсцис E (у Вт/м^2), а по осі ординат I (в мікроамперах). *Обладнання:* селеновий фотоелемент, лабораторний прилад для вивчення законів фотометрії із лампочкою розжарювання на підставці (рис. 16.5), джерело струму на 4 В, мікроамперметр на 100 мкА, амперметр на 1 А, вольтметр на 6 В, реостат, ключ, з'єднувальні провідники.



Рис. 16.5. Прилад для вивчення законів фотометрії

Примітка: для оцінки повний потік енергії випромінювання лампочки наближено можна прийняти рівним її електричній потужності.

2. Оцініть ККД сонячної батареї. *Обладнання:* сонячна батарея, міліамперметр, вольтметр, магазин опорів, транспортир, лінійка вимірювальна, з'єднувальні провідники. У наявності також є табличні дані про залежність густини потоку сонячного випромінювання (Вт/см^2) від висоти Сонця над горизонтом (градуси).

Тренувальні винахідницькі задачі.

1. Запропонуйте схему експериментальної установки для зняття вольт-амперної характеристики вакуумного фотоелемента.

2*. На IX Всеукраїнському турнірі юних винахідників і раціоналізаторів (2006 р.) командою Запорізької області “Трані” було запропоновано

конструкцію оптичного звукознімача для електрогітари (патент України № 23109U) (рис. 16.6, а та б).

Ідея винаходу полягала у наступному. На корпусі гітари під кожною струною встановлено світлодіод, що випромінює світло в інфрачервоному діапазоні. Над кожною струною розміщено фоторезистор, що працює у тому ж діапазоні. Кожен фоторезистор підключений до підсилювача електричних сигналів, з якого сигнал подається на електродинамік. Звукознімач підключено до джерела живлення (ним може бути батарея гальванічних елементів на 3 В).

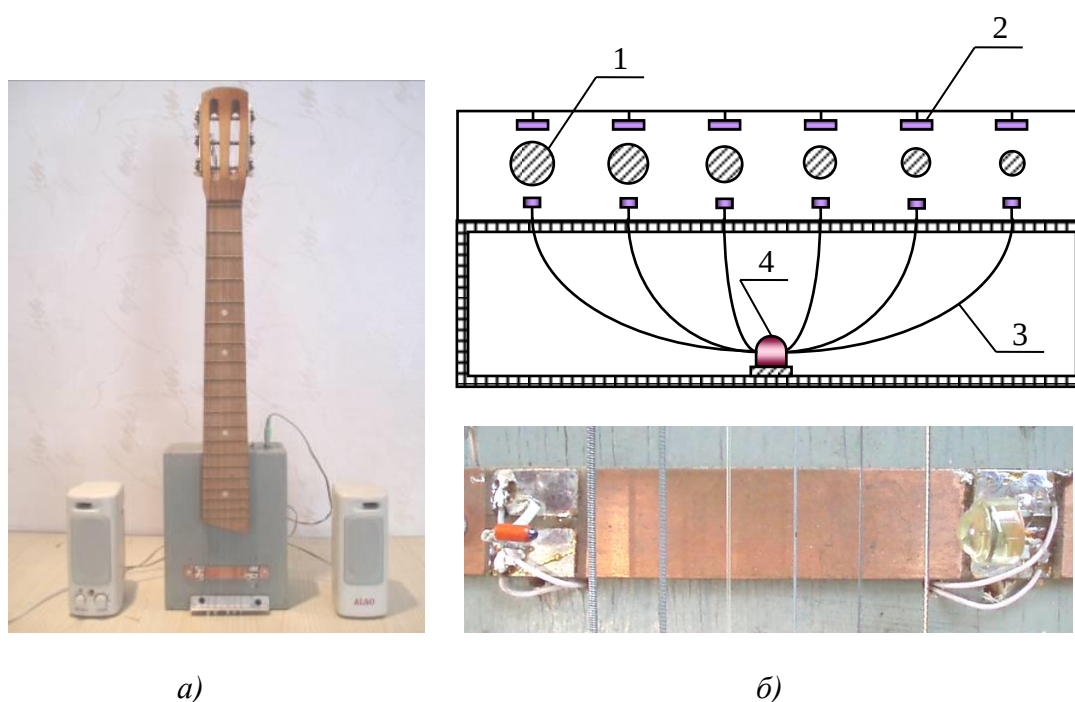


Рис. 16.6. Діюча модель електрогітари (а) з оптичним звукознімачем (б):
1 – струна; 2 – фоторезистор; 3 – світловод; 4 – світлодіод

У робочому стані світлодіоди випромінюють інфрачервоні промені, що попадають на фоторезистори. Коливання струни обумовлюють періодичну зміну світлового потоку, що потрапляє на фоторезистор. Це призводить до виникнення у колі фоторезистора електричних коливань з частотою, що дорівнює подвоєній частоті коливань струни. Отриманий електричний сигнал підсилюється і за допомогою динаміка перетворюється у звуковий.

Інфрачервоні промені під кожною струною можна також створити за допомогою одного світлодіода та системи світловодів (оптичних волокон).

Знайдіть недоліки у наведеному технічному рішенні та спробуйте їх усунути.

Зробіть своїми руками!

Напівпровідниковий прилад, в якому використовується ефект зміни електричного опору під дією світла в результаті внутрішнього фотоефекту, називається *фоторезистором*. Він може виступати елементом схеми автоматичного управління. Так, на рис. 16.7 наведено схему автоматичного вмикання та вимикання електричної лампи. В цій схемі фоторезистор підключений послідовно з джерелом струму та електромагнітним реле K . При освітленні фоторезистора лампа EL у виконавчому колі згасає, при відсутності освітлення – загорається. Схему можна застосувати для автоматичного ввімкнення: освітлення у приміщеннях, ламп сигнальних буїв та маяків тощо.

Поясніть принцип дії розглядуваної схеми та зберіть за нею електричне коло. Знайдіть недоліки у запропонованій схемі. Спробуйте їх усунути або запропонувати власну схему автоматичного управління ввімкненням освітлення (наприклад, з використанням логічних елементів).

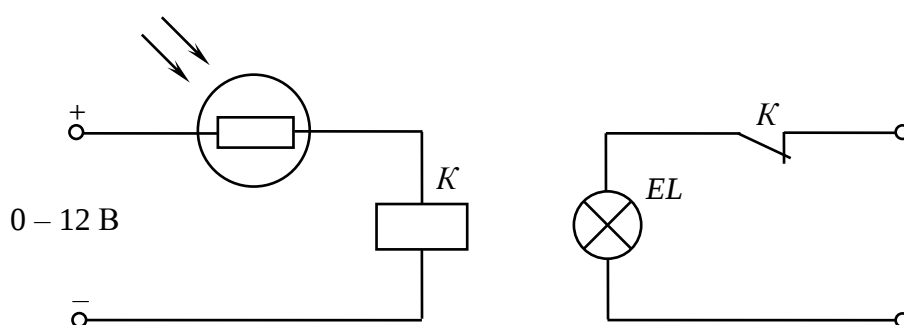


Рис. 16.7. Схема автоматичного вмикання та вимикання електричної лампи

Деякі поради при зборці електричного кола. Виміряйте омметром електричні опори освітленого фоторезистора R_1 та обмотки котушки реле R_2 . З'ясуйте, при якій силі струму I у колі спрацьовує реле K . Для цього підключіть до джерела струму послідовно амперметр та

реле, а до нормально замкнутих контактів реле приєднайте омметр. Плавнo збільшуючи напругу на виході джерела виміряйте силу струму спрацьовування реле.

Обчисліть робочу напругу U , яку потрібно подати для спрацьовування реле на послідовно з'єднані освітлений фоторезистор і обмотку котушки реле:

$$U = I(R_1 + R_2).$$

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Основна:

1. Бушок Г.Ф. Курс фізики: навч. посібник: У 2 кн. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм / Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. – К.: Либідь, 2001. – 448 с.
2. Бушок Г.Ф. Курс фізики: навч. посібник: У 2 кн. Кн. 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка / Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер. – К.: Либідь, 2001. – 422 с.
3. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузьмичев; отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наук. думка, 1989. – 864 с.
4. Кучерук І.М. Загальний курс фізики: У 3 т. / За ред. І.М. Кучерука. – К.: Техніка, 2006.
5. Лабораторные занятия по физике: Учебное пособие / [Гольдин Л.Л., Игошин Ф.Ф., Козел С.М. и др.]; под ред. Гольдина Л.Л. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 704 с.
6. Сквайрс Дж. Практическая физика / Дж. Сквайрс; пер. с англ.; под ред. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1971. – 246 с.

Додаткова:

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2002. – 479 с.
2. Павленко А.І. Інноваційні технології навчального фізичного експерименту: геометрична оптика / А.І. Павленко. – Запоріжжя: Прем'єр, 2004. – 120 с.
3. Фетисов В.А. Оценка точности измерений в курсе физики средней школы: кн. для учителя / В.А. Фетисов. – М.: Просвещение, 1991. – 96 с.
4. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков: справочник / Ю Шульц; пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.

ПЕРЕДМОВА	3
Вимірювання фізичних величин	5
1. Дослідження руху тіла, кинутого під кутом до горизонту	34
2. Вимірювання прискорення вільного падіння	48
3. Вивчення коливань пружинного маятника	63
4. Вимірювання маси тіла	74
5. Вимірювання атмосферного тиску	82
6. Вимірювання вологості повітря	93
7. Вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини	105
8. Вимірювання коефіцієнта внутрішнього тертя рідини	114
9. Вимірювання електроємності конденсатора	128
10. Вимірювання електричного опору провідника	142
11. Вимірювання горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі	151
12. Вимірювання елементарного електричного заряду	163
13. Вимірювання абсолютного показника заломлення скла	175
14. Вимірювання фокусної відстані збиральної та розсіювальної лінз ...	188
15. Вимірювання довжини світлової хвилі	202
16. Вимірювання роботи виходу електрона з металу	212
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	226

Навчальне видання
(українською мовою)

Андрєєв Андрій Миколайович

Осипов Олексій Юхимович

ФІЗИКА
ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ
З ТВОРЧИМИ ЗАВДАННЯМИ

Навчальний посібник для студентів
вищих навчальних закладів

Редактор *О.П. Івакін*
Технічний редактор *Н.М. Соболева*
Коректор *О.П. Івакін*