

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ВИКОНАННЯ**

# **КОМП'ЮТЕРНИХ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ФІЗИКИ**

(для студентів 1 курсу денної і заочної форм навчання бакалаврів за  
напрямами 6.050701 - “Електротехніка та електротехнології”,  
6.040106 - “Екологія, охорона навколишнього середовища та  
збалансоване природокористування”, 6.060101 - “Будівництво”,  
6.050702 - “Електромеханіка”, 6.060103 - “Гідротехніка (водні  
ресурси)”, 6.070101 - “Транспортні технології (за видами  
транспорту)”, 6.080101 - “Геодезія, картографія та землеустрій”)

**ХАРКІВ - ХНАМГ – 2010**

Методичні вказівки до виконання комп'ютерних лабораторних робіт з фізики (для студентів 1 курсу денної і заочної форм навчання бакалаврів за напрямками 6.050701 - “Електротехніка та електротехнології”, 6.040106 - “Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування”, 6.060101 - “Будівництво”, 6.050702 - “Електромеханіка”, 6.060103 - “Гідротехніка (водні ресурси)”, 6.070101 - “Транспортні технології (за видами транспорту)”, 6.080101 - “Геодезія, картографія та землеустрій”) / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: О.М. Петченко, А.В. Безуглий, Є.І. Назаренко. Х.: ХНАМГ, 2010. – 68 с.

Укладачі: О. М. Петченко, А. В. Безуглий, Є. І. Назаренко

Рецензент: канд. фіз.-мат. наук, доц. А.С.Сисоєв

Рекомендовано кафедрою фізики,  
протокол № 2 від 08.10.2008 р.

## ПЕРЕДМОВА

Експеримент у фізиці дуже важливий, адже він визначає для фізичної теорії право на буття. Тому на першому плані при вивченні фізики завжди стояв фізичний практикум.

В наш час актуальним є запровадження передових технологій навчання – таких, як дистанційне навчання. В даних вказівках наведено опис комп'ютерних лабораторних робіт, пристосованих саме для дистанційної форми навчання. Але викладач за бажанням (і за наявності комп'ютерного класу з відповідним програмним забезпеченням) може проводити віртуальні лабораторні роботи з курсу фізики, наведені в цих вказівках, і під час звичайного заняття зі студентами в аудиторії вищого навчального закладу.

Запропонований практикум ставить завдання примусити комп'ютер досліджувати різноманітні фізичні явища. Користувач має можливість вивчати фізичні явища, переконатися в справедливості законів фізики, виконуючи “фізичні досліди” на універсальній експериментальній установці – комп'ютері.

Методичні вказівки до кожної роботи містять: основні теоретичні відомості про явища, які вивчаються, основні фізичні закони, які їх описують; опис алгоритму комп'ютерної програми та її можливостей; вказівки до виконання роботи; вказівки щодо змісту звіту; питання та завдання для самоконтролю. Комп'ютерні програми дозволяють отримувати результати в широких межах зміни параметрів (фізичних величин) і дають можливість студентам з творчим мисленням для більш широкого вивчення явищ, виходячи за межі завдання, поставленого в лабораторній роботі

Перша частина лабораторних робіт (роботи 1-8) виконана на основі комп'ютерних програм, розроблених в середовищах “Delphi” та “C++ Builder”. Вони мають двовимірний інтерфейс.

Лабораторні роботи 9-12 – це роботи з пакету “Physics”, призначеного для дистанційного навчання. Інтерфейс цих лабораторних вже є тривимірним, схожим на інтерфейс сучасних комп'ютерних ігор – так званих “стрілялок”. У методичних вказівках перед циклом цих робіт приведена “Інструкція користувачу”, яка навчить студентів, що не грають у комп'ютерні ігри, поведінці у віртуальному світі.

Комп'ютерний практикум створює віртуальну фізичну лабораторію й дозволяє замінити виконання лабораторних робіт в реальній лабораторії, яка вимагає дорогого обладнання, виконанням їх аналогів в комп'ютерному класі і може бути використаний в усіх формах навчання, включаючи дистанційну.

## Лабораторна робота № 1

### ВИВЧЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ

#### 1. Мета роботи

Вивчення вільного падіння тіл в полі сил тяжіння, визначення прискорення вільного падіння. Знайомство з методом обчислення похибок прямих та непрямих вимірювань.

#### 2. Вказівки з організації самостійної роботи студентів

Прискорення вільного падіння — це прискорення, якого набуває тіло при русі в полі сили тяжіння. Згідно з законом всесвітнього тяжіння два тіла масами  $m_1$  і  $m_2$  взаємодіють між собою з силою пропорційною добутку їх мас і обернено пропорційною квадрату відстані між ними

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.1)$$

де  $\gamma$  — гравітаційна стала. Формула (2.1) справедлива для матеріальних точок і для тіл сферичної форми. Ця взаємодія носить назву гравітаційної. Пояснити її можна наступним чином: кожне тіло, що має певну масу, створює в навколишньому просторі гравітаційне поле, яке діє на будь-яке інше тіло.

Для тіла, яке знаходиться поблизу поверхні Землі на висоті  $h$  над її поверхнею і самою Землею сила взаємодії буде мати вигляд

$$F = \gamma \frac{m M_z}{(R_z + h)^2}, \quad (2.2)$$

де  $m$  — маса тіла,  $M_z$  — маса Землі,  $R_z$  — радіус Землі,  $h$  — висота тіла над поверхнею Землі.

Якщо висота мала порівняно з радіусом Землі вираз (2.2) можна записати в формі

$$F = \gamma \frac{m M_z}{R_z^2}. \quad (2.3)$$

Перепишемо співвідношення (2.3) у вигляді

$$F = mg, \quad (2.4)$$

де величина

$$g = \gamma \frac{M_z}{(R_z + h)^2} \quad (2.5)$$

набуває (якщо порівняти (2.4) з другим законом Ньютона) сенсу прискорення, з яким рухається тіло внаслідок притягання до Землі. Це прискорення носить назву прискорення сили земного тяжіння. Оскільки Земля не є ідеальною

сферою то поблизу поверхні Землі сила тяжіння залежить від географічної широти місцевості та від висоти над рівнем моря. Із збільшенням висоти над поверхнею Землі сила тяжіння зменшується обернено пропорційно квадрату відстані між центрами тіла та Землі.

В даній роботі прискорення вільного падіння  $g$  визначається за прямими вимірюваннями часу  $t$  та висоти падіння  $H$ . Відстань  $H$ , яке тіло проходить за час  $t$  визначається за кінематичним законом руху:

$$H = \frac{gt^2}{2},$$

звідки

$$\sqrt{H} = t\sqrt{\frac{g}{2}}. \quad (2.6)$$

Якщо виміряти час падіння кульки з різної висоти та побудувати графік залежності  $\sqrt{H}$  від  $t$ , то згідно з (2.6) отримаємо пряму, тангенс кута нахилу якої до осі  $t$  буде дорівнювати  $\sqrt{\frac{g}{2}}$ .

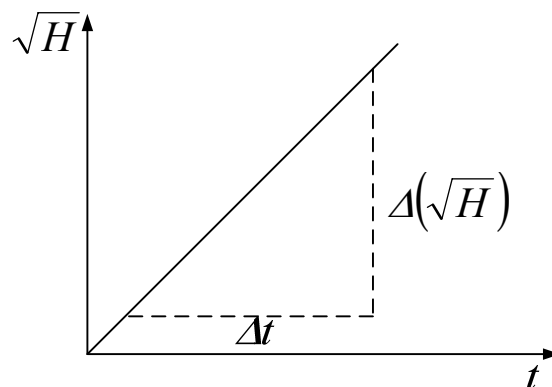


Рис. 2.1

Графік залежності  $\sqrt{H}$  від  $t$  (див. рис. 2.1) дає можливість обчислити значення  $g$  за формулою

$$g = 2\left(\frac{\Delta\sqrt{H}}{\Delta t}\right)^2 = 2\left(\frac{\sqrt{H_2} - \sqrt{H_1}}{t_2 - t_1}\right)^2. \quad (2.7)$$

### 3. Опис комп'ютерної програми

Програма моделює рух тіла в середовищі в широких межах зміни густини середовища  $\rho$  та коефіцієнта в'язкості  $\eta$ , а також в частинному випадку, коли  $\rho \cong 0$ ,  $\eta \cong 0$ , тобто, у вакуумі. Шлях падіння кульки вимірюється за шкалою, на якій нанесені поділки в м. Час падіння кульки вимірюється секундоміром. На екрані дисплею виведені кнопки регулювання секундоміра для вмикання,

вимикання та скидання до нуля. Програма дозволяє зупинити процес падіння в будь-який момент, а потім або продовжити із збереженими значеннями величин на цей момент часу, або повернутися до початкового моменту.

#### 4. Інструкція користувачу

1. Встановіть у вікні інтерфейсу “рідина  $N$ ” — “інша”. Задайте значення густини  $\rho = 0,000001 \text{ кг/м}^3$ , в’язкості  $\eta = 0,00000001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Скиньте секундомір, натиснувши на “Знову”.
2. Встановіть висоту, згідно з № варіанту таблиці 1. Одразу ж після запуску програми, ввімкніть секундомір. В момент досягнення кулькою дна посудини, вимкніть секундомір. Занесіть в таблицю 2 значення висоти та часу падіння. Повторіть вимірювання 3-5 разів для кожного з шести значень висоти падіння. Висоту падіння кожного разу збільшуйте, починаючи з початкового, наведеного в таблиці 2.1 на 2 м. Занесіть дані в таблицю 2.2. Обчисліть середнє значення  $\langle t \rangle$  для кожного значення висоти.

Таблиця 4.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R$ , см	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
$H$ , м	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20
$m$ , г	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6

3. Побудуйте графік залежності  $\sqrt{H}$  від  $\langle t \rangle$ . Обчисліть величину  $g$  за формулою (2.7).
4. Обчисліть похибки вимірювань.
5. Проведіть експеримент пункту 2 для випадку, коли кулька падає в реальних умовах у повітрі. Для цього задайте значення густини середовища  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ , коефіцієнта в’язкості  $\eta = 17,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . результати занесіть в таблицю подібну до таблиці 2 побудуйте залежність  $\sqrt{H}$  від  $t$  на одному й тому ж графіку, що й для вакууму.

Таблиця 4.2

№	Час падіння, с					
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$
1						
2						
3						
4						
середнє значення						
$T$						

## **5. Зміст звіту та вказівки до обробки і аналізу результатів**

В звіті по роботі представити дані вимірювань, занесені в таблиці, залежності  $\sqrt{H}$  від  $t$  для вакууму та повітря, представлені на одному рисунку, висновки результатів порівняння графіків, результати обчислення похибок вимірювання, результат обчислення прискорення вільного падіння у вигляді  $g = \langle g \rangle \pm \Delta g$  (у вакуумі та у повітрі, порівняння величини  $g$  з табличним значенням для даної широти місцевості).

## **6. Тести для самоперевірки**

1. Яка мета даної роботи?
2. Як залежить величина прискорення вільного падіння від географічної широти місцевості та висоти над рівнем моря?
3. Яким кінематичним законом описується вільне падіння тіл?
4. Як визначається прискорення вільного падіння в даній роботі?
5. Які вимірювання називають прямими?
6. Які вимірювання називають непрямыми?
7. Як обчислюються похибки при прямих вимірюваннях?
8. Як обчислюються похибки при непрямих вимірюваннях?

## Лабораторна робота № 2

### ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ ЗА МЕТОДОМ СТОКСА

#### 1 Мета роботи

Вивчення особливостей руху кульки у в'язкій рідині та визначення в'язкості рідини за методом Стокса.

#### 2. Вказівки до організації самостійної роботи

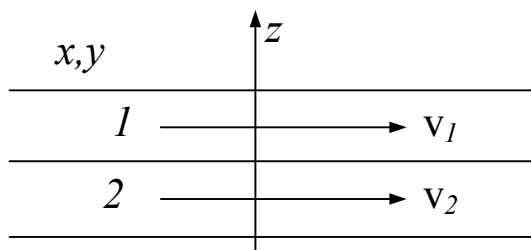


Рис. 2.1

Уявімо собі площину  $x,y$ , яка рухається в рідині або газі (див. рис. 2.1) зі швидкістю  $v_1$ . Шар рідини (або газу), що безпосередньо прилягає до площини, прилипає до неї і починає рухатися з такою ж швидкістю. Наступний шар 2, що знаходиться нижче, теж почне рухатися, втягуючи в рух інші подальші шари речовини. Очевидно, що швидкість кожного з наступного шару буде зменшуватись в напрямку, перпендикулярному напрямку руху ( $v_1 > v_2$ ). В такому випадку молекули верхнього шару 1 в середньому будуть мати більшу кількість руху (більше значення імпульсу ніж нижчого). Таким чином буде відбуватися гальмування кожного попереднього шару наступним, буде виникати сила, яка перешкоджатиме переміщенню речовини (рідини або газу). Зміна імпульсу тіла за одиницю часу дорівнює силі, що діє на це тіло. Отже обидва шари рідини (або газу) діятимуть одне на одне з рівними за величиною, та протилежними за напрямком силами, які лежать в площині паралельній площині  $x,y$ ; сили, які діють на нижній шар, прискорюють його, сили, що діють на верхній шар, гальмують його рух. Це ніщо інше як сили тертя. Причиною виникнення яких є перенос кількості руху від одного шару до іншого. Оскільки вони виникають між шарами речовини, вони носять назву сил внутрішнього тертя або сил в'язкості.

Обчислимо швидкість зміни швидкості в напрямку осі  $z$  (тобто перпендикулярно напрямку швидкості шарів)  $\frac{\Delta v}{\Delta z}$  ( $\Delta z$  - відстань між шарами).



Якщо швидкість шарів рівномірно зростає із збільшенням координати  $Z$ , то  $\frac{\Delta v}{\Delta z}$  буде сталою для всієї маси рідини або газу.

Ньютон встановив для сили в'язкості  $F$  наступний закон

$$F = \eta S \frac{\Delta v}{\Delta z}, \quad (2.1)$$

Де  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості, або коефіцієнт внутрішнього тертя,  $S$  – площа стикання сусідніх шарів.

Згідно з (2.1) коефіцієнт в'язкості чисельно дорівнює силі тертя між сусідніми шарами рідини, що розташовані на відстані  $l$  м, і мають площу дотикання  $1 \text{ м}^2$ , яка б викликала зміну швидкості між сусідніми шарами на  $1 \text{ м/с}$ .

Існують різні методи визначення коефіцієнта в'язкості рідини. Один із них, метод Стокса, базується на спостереженні падіння малої кульки в досліджуваній рідині.

Стокс розглядав повільний рух малої кульки в необмеженому середовищі, при відсутності завихрення рідини та вивів теоретично таку формулу для сили внутрішнього тертя

$$F_c = 6\pi r \eta v, \quad (2.2)$$

де  $r$  — радіус кульки,  $\eta$  — коефіцієнт в'язкості рідини,  $V$  — швидкість кульки відносно рідини.

Розглянемо падіння малої кульки в рідині (див. рис. 2.2). В будь-який момент часу на кульку діють три сили:

1) сила тяжіння, яка направлена вертикально вниз

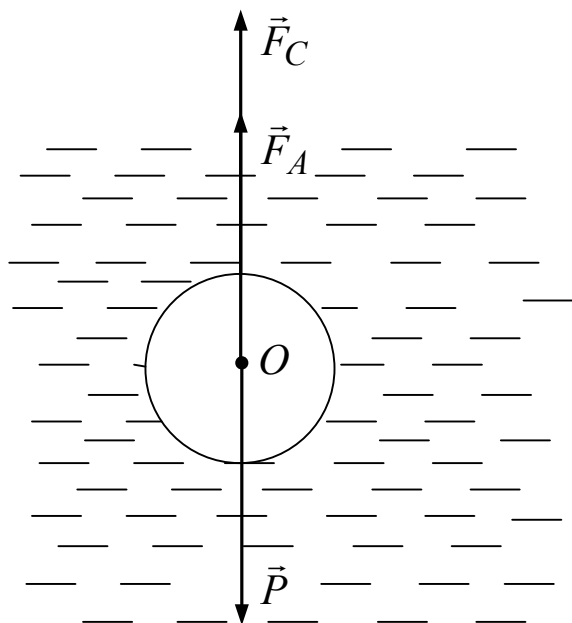
$$P = m g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g, \quad (2.3)$$

де  $\rho$  — густина речовини кульки;

2) виштовхувальна сила, або сила Архімеда, яка направлена вертикально вгору і дорівнює вазі витісненої тілом рідини

$$F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \delta g, \quad (2.4)$$

де  $\delta$  — густина рідини;



3) сила внутрішнього тертя  $F_c$ , що направлена проти напрямку швидкості кульки.

Рівняння руху кульки, виходячи з другого закону Ньютона, можна записати у вигляді

$$\vec{F}_A + \vec{P} + \vec{F}_C = m\vec{a}, \quad (2.5)$$

Сили  $\vec{P}$  і  $\vec{F}_A$  на протязі руху падіння кульки залишаються незмінними, а сила  $\vec{F}_C$  залежить від швидкості кульки. На початку руху, коли її швидкість в початковий момент  $v = 0$ , ( $F_c = 0$ ), а в подальшому вона спочатку зростає пропорційно швидкості (див. ф. (2.2)), а потім – як  $v^2$ .

Рис. 2.2

Різниця  $P - F_A$ , яка направлена вертикально вниз, викликає прискорення кульки. Кулька буде рухатися прискорено доти, доки всі сили, що діють на кульку, не врівноважаться. В результаті зростання швидкості кульки наступає такий момент, коли

$$P - F_A - F_C = 0. \quad (2.6)$$

Підставляючи (2.2), (2.3), (2.4) в (2.6), отримаємо рівняння

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g - \frac{4}{3}\pi r^3 \delta g = 6\pi r \eta g,$$

з якого в'язкість

$$\eta = \frac{2}{9}r^2 g (\rho - \delta) \frac{1}{V}, \quad (2.7)$$

де  $g$ ,  $\rho$ ,  $\delta$  — табличні величини, величини  $r$  та  $V$  — легко вимірюються. Одновимірний рух кульки описується за наближеними кінематичними формулами, за модифікованою схемою Ейлера (див. додаток 2).

### 3. Опис комп'ютерної програми

Програма моделює одновимірний рух кульки у в'язкій рідині з урахуванням всіх сил, які діють на кульку: сили тяжіння, сили Архімеда та сили внутрішнього тертя. Оскільки вимірювання часу треба виконувати для рівномірного руху, програмою передбачено виведення на екран риски в момент, коли всі сили, що діють на кульку, врівноважуються. З цього моменту рух кульки стає рівномірним. На екран виведено два секундоміри. Один вмикається з початком руху кульки і вмикається автоматично, коли кулька

досягає дна судини. Другий можна вмикати і вимикати від руки, клацаючи мишкою на кнопки вмикання та вимикання. Радіус, масу кульки, висоту судини можна змінювати як завгодно, маючи тільки на увазі, що радіус кульки повинен залишатися менше за діаметр судини. Але якщо ви й забудете про це, програма нагадає, висвітлить зауваження. Якщо ви виберете кульку з питомою вагою, меншою за питому вагу рідини, відразу ж висвітиться віконце з зауваженням, що кулька падати не буде. При малій різниці між густиною кульки та рідини, кулька може пройти всю відстань, так і не досягнувши стану рівномірного руху. На панелі інтерфейсу також виведені параметри зображення, які можна змінювати, такі, як колір рідини, колір кульки, радіус зображення кульки. Тертя рідини об стінки судини, яке може виникати в реальному експерименті, коли радіус кульки та діаметр судини — величини одного порядку, не враховується.

#### 4. Інструкція користувачу

1. Ознайомтесь з інтерфейсом програми. На панелі “Параметри установки” виберіть номер № рідини у відповідності з вашим номером варіанту. Змінюючи радіус кульки та її масу, встановіть значення  $r$  кульки у відповідності з таблицею 4.1 – таблицею варіантів завдань. Значення величин в віконцях можна змінювати після натискання на кнопку “Заново”. Кнопка “Стоп” зупиняє експеримент із збереженням всіх величин в даний момент часу. Клацнувши кнопкою “Запуск”, можна його продовжити або припинити, клацнувши мишкою на “Заново”.

Таблиця 4.1.

№ варіантів	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ рідини	№1	№1	№2	№2	№2	№2	№2	№3	№3	№4	№4	№4
$R$ , мм	6,1	6,2	5,7	5,7	5,8	5,9	6,0	6,0	6,3	6,4	6,4	6,35
$m$ , г	1	1	1	1,1	1,1	1,2	1,3	1	1	1	1,1	1

2. Підберіть висоту падіння таку, щоб не менше половини шляху кулька рухалася із сталою швидкістю. Поставте мітку (нижче мітки, яка висвічується в момент, коли рух стає рівномірним).
3. Виміряйте за шкалою та запишіть шлях, який кулька проходить між встановленою міткою та дном судини.
4. Заміряйте чотири – п'ять разів час проходження кулькою шляху. Занесіть дані в таблицю 4.2. Обчисліть похибки прямих та непрямих вимірювань. За похибку вимірювання довжини  $\Delta H$  взяти ціну найменшої поділки шкали висоти. При обчисленні  $\eta$  змінними вважати величини  $H$  та  $t$ .

Таблиця 4.2.

№	$R, \text{ м}$	$\Delta R, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$\Delta H, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$\Delta \tau, \text{ с}$	$\eta, \text{ Па/с}$	$\Delta \eta / \eta$	$\Delta \eta, \text{ Па/с}$
1									
2									
3									
4									
5									

### 5. Зміст звіту та вказівки до обробки і аналізу результатів

В звіті повинні бути приведені мета роботи, результати вимірювань, обчислення похибок прямих вимірювань (часу), абсолютної та відносної похибки результату – в'язкості рідини, порівняння результату з табличними даними, після встановлення – яка рідини була використана в модельному експерименті.

### 6. Тести для самоперевірки

1. В чому полягає мета роботи?
2. Що таке сила внутрішнього тертя?
3. Які сили діють на кульку при її русі в рідині?
4. Запишіть формули для сили Стокса, сили тяжіння, сили Архімеда.
5. Запишіть рівняння руху кульки.
6. Яким буде рух кульки на початку руху?
7. Запишіть рівняння рівномірного руху кульки.

## Лабораторна робота № 3

### ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ МОЛЕКУЛИ

#### 1. Мета роботи

Вивчити хаотичний рух молекул, визначити середню довжину вільного пробігу молекул.

#### 2. Вказівки до організації самостійної роботи

Двовимірний динамічний модель ідеального газу базується на загальних положеннях молекулярно-кінетичної теорії (МКТ):

1. Всі речовини складаються з молекул (або атомів).
2. Атоми (молекули) знаходяться в стані хаотичного руху.
3. Молекули і атоми взаємодіють між собою. Характер взаємодії в рідкій речовині і визначає: буде речовина газом, рідиною чи твердим тілом.

Внаслідок хаотичного (теплого) руху між молекулами безперервно відбуваються зіткнення. Рухаючись рівномірно і прямолінійно молекула проходить деякий шлях між двома послідовними зіткненнями, який називається довжиною вільного пробігу. Довжина вільного пробігу весь час змінюється. Середня відстань, яку проходить молекула між двома послідовними ударами, носить назву середньої довжини вільного пробігу молекули  $\lambda_2$ . Для визначення  $\lambda_2$  досить розділити шлях, який проходить молекула за  $1$  с, що чисельно дорівнює середній швидкості  $v$ , на середнє число зіткнень  $Z_2$ , яких

молекула зазнає за  $1$  с 
$$\lambda_2 = \frac{v}{Z_2}.$$

Для визначення  $Z_2$  будемо вважати молекулу диском, діаметр якого дорівнює  $d$ . Зобразимо шлях диска всередині ламаної смуги шириною  $2d$  (див. рис. 2.1).

Інші молекули вважаємо нерухомими. Молекула, що рухається, зіткнеться тільки з тими молекулами, центри яких знаходяться на відстанях рівних або менших  $d$ . Середнє число зіткнень  $Z_2$  за  $1$  с. дорівнює числу молекул в площі ламаної смуги  $Z_2 = n_2 S$ , де  $n_2$  - концентрація молекул (в даному випадку  $n_2$  - це число молекул (дисків), яке припадає на одиницю площі). Площа ламаної смуги можна прирівняти площі спрямленої смуги висотою  $v$  та шириною  $2d$ , отже  $Z_2 = n_2(2d) v$ .

Тоді середня довжина пробігу

$$\lambda_2 = \frac{1}{2 d n_2}, \quad (2.1)$$

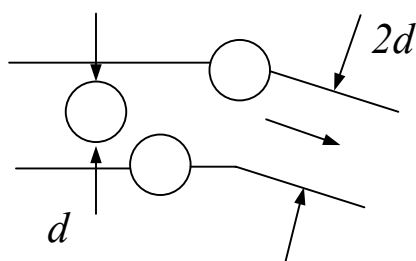


Рис. 2.1

Подібні міркування приводять для трьохвимірної моделі до формули виду

$$\lambda = \frac{l}{\pi n d^2}, \quad (2.2)$$

де  $n$  – число молекул в одиниці об'єму газу.

Порівнюючи формули (2.1) та (2.2) можна встановити зв'язок між довжинами вільного пробігу для три – та двовимірної моделі

$$\lambda = \frac{2 \lambda_2 n_2}{\pi n d}, \quad (2.3)$$

Встановимо зв'язок між  $n_2$  та  $n$ . Визначимо концентрацію молекул на площині (грані куба)

$$n_2 = \frac{N_1 N_2}{L^2} = \frac{N^2}{L^2}.$$

Якщо розглядати куб з однаковою кількістю молекул в трьох напрямках (див. рис. 2.2), то  $n = \frac{N^3}{L^3}$ . Тоді  $\frac{n}{n_2} = \frac{N^3}{L^3} \frac{L^2}{N^2} = \frac{N}{L}$  і

$$\frac{n}{n_2} = \frac{N^3}{L^3} \frac{L^2}{N^2} = \frac{N}{L}. \quad (2.4)$$

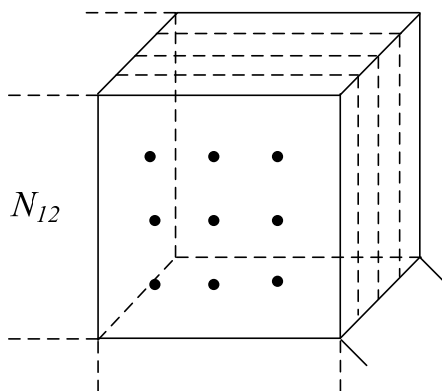


Рис. 2.2

Порівнюючи вирази (2.1) та (2.2) можна зробити висновок, що залежність  $\lambda$  від концентрації молекул та розмірів молекули в обох випадках: дво- і тривимірному залишається однаковою. Звичайно, при цьому треба

враховувати, що у двовимірному випадку  $n_2 = \frac{N^2}{L^2}$ , розміри молекули характеризуються діаметром  $d$ , а в тривимірному –  $n = \frac{N^3}{L^3}$ , розміри  $\sim d^2$ .

### 3. Опис комп'ютерної програми

Програма створює масиви даних: координати  $N^2$  молекул  $X_i, Y_i$  на площині  $X, Y$  та їх початкові складові швидкостей  $V_{xi}, V_{yi}$ . Початкові швидкості молекул задаються однакові за величиною та рівною ймовірній швидкості при даній температурі

$$V_{im} = \sqrt{kT/m} \quad (3.1)$$

де  $m$  – маса молекули,  $T$  – абсолютна температура,  $k$  – стала Больцмана.

Розподіл молекул на площині в початковий момент та під час руху відображається на екрані дисплею.

### 4. Інструкція користувачу

1. Встановіть режим роботи програми „Визначення довжини вільного пробігу”, встановіть „Розподіл частинок - рівномірний”, ввімкніть „Перегляд”, „Показати траєкторію”.
2. Задайте числові дані у відповідності з номером варіанту завдання, згідно з таблицею 5, де маса молекули  $m$  вибирається однаковою «Маса 1», «Маса 2»,  $N$  – число молекул вздовж осі  $y$  («Вздовж вертикалі»),  $M = M_1 + M_2$ , ( $M_1$  – число молекул в першій половині площини,  $M_2$  – число молекул в другій половині площини вздовж осі  $x$  – вибираються однаковими  $M_1 = M_2$ ),  $d$  – діаметр молекули («Діаметр 1», «Діаметр 2» - вибираються однакові),  $T$  – температура. Задайте «Число кроків» – 1000.

Таблиця 4.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$m$	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
$N$	10	10	10	12	12	12	10	10	10	10	10	10
$M_1$	5	5	5	6	6	6	5	5	5	5	5	5
$M_2$	5	5	5	6	6	6	5	5	5	5	5	5
$d$	2	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4

3. Спостерігайте хаотичний рух молекул та траєкторію виділеної молекули (вона виділяється синім кольором).
4. Для прискорення вимірювань вимкніть «Перегляд» та «Показати траєкторію». Виміряйте середню довжину вільного пробігу для ваших

даних. Не змінюючи вихідних даних повторіть вимірювання тричі. Запишіть в таблицю. Повторіть вимірювання ще для шести значень діаметру в межах  $1-7 (10^{-10} \text{ м})$ . Програма видає середнє значення довжини вільного пробігу молекули перераховане для трьохвимірної моделі. Запишіть в таблицю.

- Змінюючи концентрацію молекул шляхом зміни чисел  $N$  та  $M$ , від початкових значень, з кроком  $\Delta N = \Delta M = 2$  отримати сім значень  $\lambda$  для семи значень концентрації  $n$  при сталому значенні діаметра молекул  $d$ . Записати в таблицю. При цьому треба мати на увазі, що на екран виводиться перераховане об'ємне значення концентрації  $n$ .

## 5. Зміст звіту та вказівки до обробки і аналізу результатів

- Результати вимірювань повинні бути представлені у вигляді таблиць:

Таблиця 4.2

$N$ $n$	$\bar{\lambda}$	$d$	$\lg \bar{\lambda}$	$\lg d$
1				
2				
3				

Таблиця 4.3

	$\bar{\lambda}$	$n$	$\lg \bar{\lambda}$	$\lg n$
1				
2				
3				

- За підрахунок значеннями логарифмів величин побудувати графіки в логарифмічному масштабі:  $\lg \lambda = f(\lg d)$ ,  $n = \text{const}$  та  $\lg \lambda = f(\lg n)$ ,  $d = \text{const}$ .
- Порівняти результати отримані з модельного експерименту з теоретичними. З теоретичної формули (3.2), беручи десятковий логарифм маємо для  $n = \text{const}$

$$\lg \lambda = \lg C_1 - 2 \lg C_1,$$

де  $C_1 = 1/\pi n$ , тобто маємо лінійну залежність  $\lg \lambda$  як функції від аргументу  $\lg d$ , коефіцієнт нахилу якої дорівнює  $k_m = -2$ . Якщо з експериментального графіка  $\lg \lambda = f(\lg d)$  визначити коефіцієнт нахилу  $k_c = \Delta \lg \lambda / \Delta \lg d$ , то з порівняння  $k_m$  та  $k_c$  можна зробити висновок, як узгоджуються теоретичні результати з експериментальними (як залежить  $\lambda$  від  $d$ ). Аналогічно перевірити, як залежить  $\lambda$  від  $n$ . Зробити висновки.

## 6. Тести для самоперевірки

- Сформулюйте три основні положення МКТ.
- Що таке довжина вільного пробігу молекули?
- Що таке середня довжина вільного пробігу молекули?
- Як визначається середня довжина вільного пробігу  $\bar{\lambda}$  в двовимірній моделі хаотичного руху?
- Як визначається  $\bar{\lambda}$  в тривимірній моделі?
- Як зв'язані концентрації молекул в двовимірній та тривимірній моделях?
- Як записується закон збереження імпульсу при пружному ударі двох кульок?
- Як записується закон збереження енергії при пружному ударі двох кульок?



## Лабораторна робота № 4

# ВИВЧЕННЯ МЕТОДІВ ГРАФІЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

### 1. Мета роботи

Познайомитись із графічним зображенням електричного поля за допомогою електричних силових ліній поля.

### 2. Вказівки до організації самостійної роботи

Важливим поняттям електростатики є поняття точкового заряду. Точковими зарядами називають заряджені тіла, розміри яких малі порівняно з відстанню між ними. Кожен заряд створює електричне поле у навколишньому просторі. Важливою характеристикою електричного поля є вектор напруженості поля  $\vec{E}$ . Поле будь-якого електричного заряду або системи зарядів можна описати графічним способом за допомогою ліній напруженості, або силових ліній поля. Лінії напруженості проводять таким чином, щоб кількість ліній, що пронизують одиницю поверхні, перпендикулярно до площини поверхні, дорівнювала чисельному значенню вектора  $\vec{E}$ . Тоді за картиною ліній напруженості можна судити про напрям та величину вектора  $\vec{E}$  в різних точках простору.

Лінії поля точкового заряду  $q$  являють собою сукупність радіальних прямих, які виходять із позитивного заряду або входять в негативний заряд.

Для точкового заряду напруженість поля в будь-якій точці у вакуумі визначається формулою:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}. \quad (2.1)$$

де  $\epsilon_0$  – електрична стала.

Повне число ліній  $N$ , які перетинають сферичну поверхню довільного радіуса  $r$  називають потоком вектора  $\vec{E}$ . Воно буде дорівнювати добутку густини ліній на величину площі поверхні сфери  $4\pi r^2$ . Густина ліній, згідно з умовою, дорівнює

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}. \quad (2.2)$$

Таким чином, кількість ліній  $N$  або потік вектора  $\vec{E}$  через замкнену поверхню, яка охоплює заряд, чисельно дорівнює:

$$N = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}. \quad (2.3)$$

Це твердження являє собою зміст теореми Гауса. Отриманий результат означає, що число ліній на будь-якій відстані від заряду буде одним і тим же. Звідси виходить, що силові лінії можуть починатися на заряді і закінчуватися на заряді, або прямувати в нескінченність. Картина силових ліній точкового заряду в площині, яка включає заряд, буде подібною картині ліній для заряду, розподіленого вздовж тонкої нитки з деякою густиною  $\tau$  в площині, перпендикулярній нитці. Для зарядженої нитки у вказаній площині напруженість поля визначається формулою

$$E = \frac{\tau}{2\pi \varepsilon_0 r} = \frac{N}{2\pi r}, \quad (2.4)$$

а кількість ліній, які перетинають коло радіуса  $r$ , тоді буде дорівнювати:

$$N = \frac{\tau}{\varepsilon_0}. \quad (2.5)$$

Порівнюючи вирази (2.3) та (2.5) бачимо, що немає значення: будемо ми вивчати поле, що створює точковий заряд або система точкових зарядів, які знаходяться в одній площині, чи поле в площині, перпендикулярній нитці або системі заряджених ниток. Картина силових ліній точкового заряду в площині, в якій розміщується заряд  $q$  буде такою ж як і для заряду, розподіленого вздовж тонкої нитки з лінійною густиною, що чисельно дорівнює величині точкового заряду  $q$ :  $\tau = q$ . Внаслідок доказаної еквівалентності далі ми будемо вживати термін – точковий заряд.

### 3. Опис комп'ютерної програми

Програма викреслює силові лінії електричного поля у площині. Цей процес продовжується до тих пір, поки силова лінія не йде в нескінченність, або до якого-небудь негативного заряду. Число силових ліній, які починаються біля кожного позитивного заряду пропорційне величині заряду. Величина заряду вибирається в умовних одиницях.

Зовнішній вигляд інтерфейсу програми зображено на рисунку 3.1.

### 4. Інструкція користувачу

1. Помістіть в точку з координатами  $x = 0$ ,  $y = 0$  точковий заряд  $q$  (величину  $q$  взяти з таблиці 4.1). Виберіть число ліній  $N = 10$ , число кроків (яке визначає довжину силових ліній на екрані) підберіть так, щоб вони охоплювали весь екран. Зарисуйте картину поля (якісно).
2. Збільшіть заряд удвічі. В скільки разів треба збільшити число  $N$ , щоб за графічним зображенням поля можна було визначити величину напруженості?
3. Виберіть на картині поля замкнену лінію довільної форми. Підрахуйте число ліній, які входять в площину, охоплену лінією  $N_l$  (потік, який входить),

число ліній, які виходять назовні  $N_2$  (потік, що виходить). Чому дорівнює потік, який перетинає замкнену лінію?

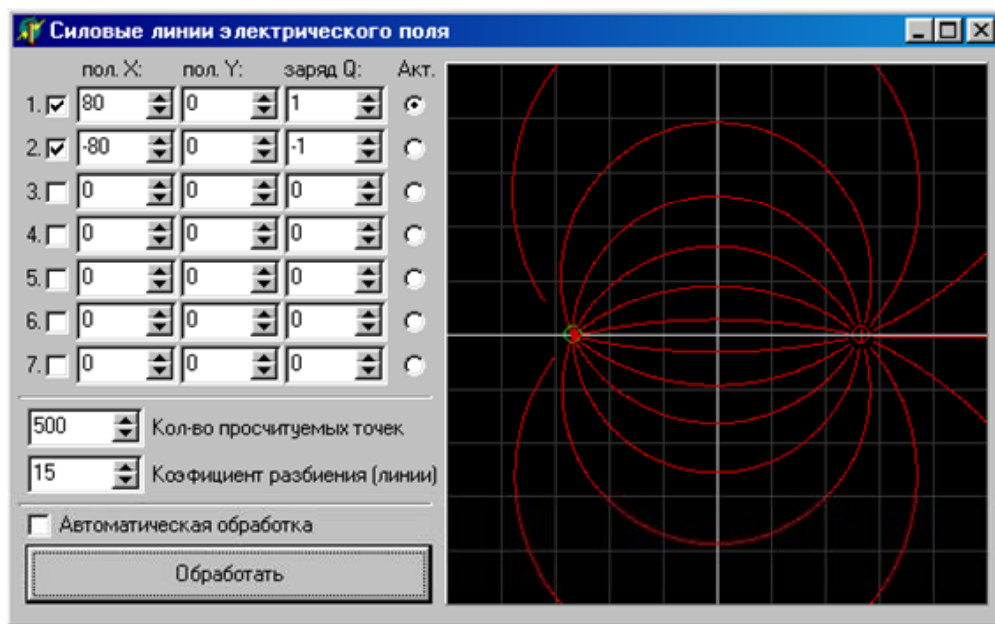


Рис. 3.1

4. Розмістіть два однакових заряди на відстані 2-х клітинок (величину  $q$  взяти з таблиці 4.1). Отримайте для них картину силових ліній, зарисуйте її(якісно).
5. Отримайте картину силових ліній для системи двох однакових зарядів протилежного знаку(якісно, для диполя). Зарисуйте її.
6. Помістіть заряд величиною  $Q = 50 \div 100$  умовних одиниць в точку з координатами  $x = 0, y = 0$ . Внесіть в поле цього заряду невеликий пробний заряд  $q$  (згідно з таблицею 4.1). Змінюючи його положення відносно  $Q$ , зробіть висновок, наскільки сильно він спотворює картину поля. Повторіть операції для негативного заряду  $-q$ .
7. Розмістіть в вершинах квадрата заряди однакової величини за схемою (див. рис. 3.1) – така система носить назву – квадруполь. Отримайте картину силових ліній та зарисуйте її. Які особливості має картина поля квадруполя?

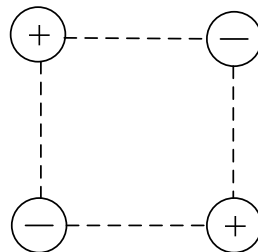


Рис. 4.1

Таблиця 4.1

$N_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$q$	1	2	1	2	3	4	2	3	4	1	5	5
$N$	8	8	10	10	6	6	6	8	4	12	6	8

## **5. Зміст звіту та вказівки до обробки та аналізу результатів**

Зміст повинен містити мету роботи, якісні зарисовки картин поля, утворених одним, двома точковими зарядами, диполем, квадруполем(п.п. 1, 4, 5, 7), висновки за п.п. 3, 6, 7.

## **6. Тести для самоперевірки**

1. Дайте визначення силовій лінії поля.
2. Що характерно для силових ліній електростатичного поля ?
3. Нарисуйте лінії електричного поля для точкового позитивного, негативного заряду.
4. Запишіть формулу, яка визначає напруженість точкового заряду.
5. Як пов'язаний потік вектора  $\vec{E}$  з повним числом силових ліній, що виходять із заряду (або входять в заряд)?
6. Сформулюйте теорему Гауса. Що таке диполь?
7. Яку систему зарядів називають квадруполем?

## Лабораторна робота №5

### ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКІВ ЗА МЕТОДОМ МОСТА УІТСТОНА

#### 1. Мета роботи

Вивчити метод вимірювання опору провідників за мостовою схемою та виміряти опір провідників зазначеним методом.

#### 2. Вказівки до організації самостійної роботи

Одним з найбільш точних методів вимірювання електричного опору є метод моста Уітстона. Міст Уітстона зображено на рис 2.1.

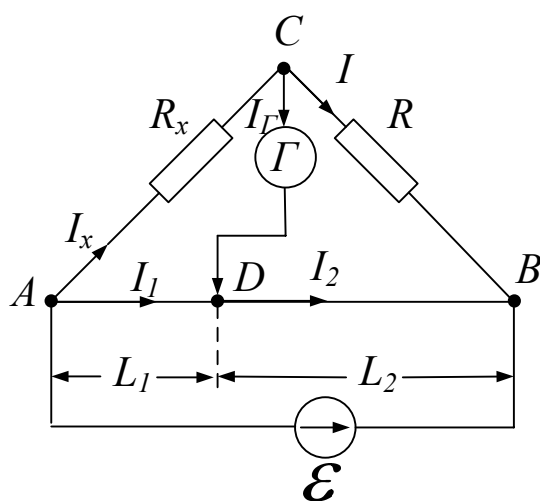


Рис. 2.1

За звичай між точками  $A$  та  $B$  вмикають калібрований дріт – реохорд із ковзним контактом  $D$ ;  $U$  – постійна напруга від джерела струму ( $\mathcal{E}$ );  $R$  – відомий еталонний опір;  $R_x$  - невідомий опір;  $G$  – гальванометр;  $L_1$  і  $L_2$  – “плечі реохорда”.

Метод вимірювання опору за допомогою моста Уітстона базується на порівнянні невідомого опору  $R_x$  з відомим еталонним опором  $R$ .

Нехай струм в плечах моста та в діагоналі  $CD$  тече так, як показано на рис. 2.1.

Напрямок обходу контурів виберемо за годинниковою стрілкою. Згідно з першим правилом Кірхгофа алгебраїчна сума струмів у вузлі (нагадаємо, що вузол — це точка, де сходиться не менше трьох віток) дорівнює нулю. Тоді для вузла  $C$  маємо:

$$I_x - I - I_G = 0. \quad (2.1)$$

Оскільки  $I_x$  входить в вузол, беремо його з плюсом, а струми  $I$ ,  $I_G$  виходять з вузла — беремо їх з мінусом.

Для вузла  $D$ :

$$I_1 - I_2 + I_G = 0. \quad (2.2)$$

Згідно з другим правилом Кірхгофа алгебраїчна сума падінь напруги на елементах замкненого контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що діють у контурі. Причому, якщо напрям струму в елементі збігається з напрямком обходу контуру, то відповідне падіння напруги входить в рівняння з плюсом, якщо не збігається – з мінусом. Якщо напрям дії ЕРС збігається з напрямком обходу, то ЕРС береться з плюсом, не збігається – з мінусом. Виходячи із сформульованих правил отримуємо ще три рівняння:

$$\begin{aligned} \text{для контуру ACDA:} & \quad I_x R_x + I_r R_r - R_1 I_1 = 0; \\ \text{для контуру ABEA:} & \quad I_1 R_1 + I_2 R_2 = U; \\ \text{для контуру CBDC:} & \quad IR - I_2 R_2 - I_r R_r = 0; \end{aligned} \quad (2.3)$$

де  $R_x$  – внутрішній опір гальванометра;  $R_1, R_2$  – опір “плечей” реохорда  $L_1$  та  $L_2$ .

Всього маємо в схемі п’ять віток, п’ять струмів – п’ять невідомих і відповідно п’ять рівнянь для їх визначення (2.1) і (2.2).

Змінюючи положення контакту  $D$  (тим самим змінюючи співвідношення між  $L_1$  та  $L_2$ ), можна досягти того, щоб потенціал точки  $D$  став рівним потенціалу точки  $C$  ( $\varphi_D = \varphi_C$ ). В цьому випадку струм через гальванометр дорівнює нулю, міст збалансовано. Враховуючи, що  $I_r = 0$ , систему (2.3) можна спростити:

$$I_x = I, I_1 = I_2, I_x R_x = I_1 R_1, IR = I_2 R_2. \quad (2.4)$$

Поділивши останні два рівняння почленно одне на друге, маємо:

$$\frac{I_x R_x}{IR} = \frac{I_1 R_1}{I_2 R_2}. \quad (2.5)$$

Враховуючи перші два рівняння (2.4), вираз (2.5) можна спростити:

$$\frac{R_x}{R} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (2.6)$$

Опір “плечей” реохорда можна визначити за формулами:

$$R_1 = \rho \frac{L_1}{S}, \quad R_2 = \rho \frac{L_2}{S}, \quad (2.7)$$

де  $\rho$  – питомий опір дроту реохорда,  $S$  – площа поперечного перерізу дроту.

Підставляючи значення  $R_1$  та  $R_2$  (2.7) в співвідношення (2.6) отримаємо формулу для обчислення невідомого опору  $R_x$

$$R_x = R \cdot \frac{L_1}{L_2}, \quad (2.8)$$

Таким чином, підбираючи відповідно співвідношення між  $L_1$  та  $L_2$  (щоб  $I_r = 0$ ), знаючи еталонний опір  $R$ , можна визначити  $R_x$ .

В роботі визначається (вимірюється) опір для випадку, коли  $R_x$  являє собою два опори  $R_{x1}, R_{x2}$  з’єднані послідовно та паралельно. Схеми послідовного та паралельного сполучення приведені на рис 2.2.

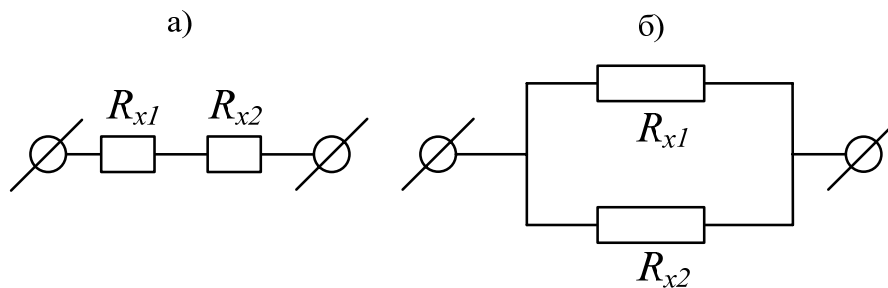


Рис. 2.2

Для послідовного сполучення (див. рис. 2.2, а) загальний опір

$$R_x = R_{1x} + R_{2x}.$$

Для паралельного сполучення (див. рис. 2.2, б)

$$R_x = \frac{R_{1x} R_{2x}}{R_{1x} + R_{2x}}. \quad (2.9)$$

### 3. Опис комп'ютерної програми

Алгоритм обчислень базується на розв'язку системи лінійних рівнянь, складених за правилами Кірхгофа (2.1) і (2.3). Програма дозволяє зібрати мостову схему з елементів, перелік яких представлений на основній панелі інтерфейсу.

Для цього клацнувши лівою клавiшею миші, наприклад, на “Реохорд” викликаємо його появу. Натискаючи на лiву клавiшу можна пересунути елемент в будь-яку точку екрану. Для виконання з'єднань між елементами схеми (див. рис. 3.1) треба навести курсор на клавiшу, клему приладу і як тільки з'явиться хрестик клацнути лiвою кнопкою, потiм навести курсор на клему другого елемента повторити теж саме. Якщо ви помилилися iз з'єднанням, для того, щоб прибрати “провiд” треба навести на нього курсор, клацнути спочатку лiвою, а потiм правою клавiшею. При появі вiконця “прибрати”, навести на нього курсор і клацнути лiвою клавiшею. Якщо з першого разу щось не вийшло, повторiть операцiї. Коли схема зiбрана натискаємо курсором на вимикач – “вкл”. При цьому пiдключається рухомий контакт реохорда. Наводячи курсор на рухомий контакт перемiщуємо його влiво-вправо, добиваючись нульового показання гальванометра.

Якщо клацнути лiвою клавiшею на елемент – опiр, ЕРС, висвiчується допомiжна панель, за допомогою якої можна встановити певне значення  $R$  або ЕРС. Зовнiшнiй вигляд iнтерфейсу програми зображено на рис. 3.1.

### 4. Інструкція користувачу

1. Зібрати схему (див. рис. 2.1).
2. Переміщуючи повзунок реохорда, встановити силу струму, що дорівнює нулю. Виміряти за шкалою довжини “плечей”  $L_1$  та  $L_2$ , результати записати в таблицю вимірювань.

3. За формулою (2.8) обчислити  $R_{x1}$ . Занести результат до таблиці.
4. Відключити  $R_{x1}$  та підключити  $R_{x2}$ , виконати пункти 2, 3.
5. Підключити до клем  $A$ ,  $C$ , як невідомий опір  $R_x$  два резистора з'єднані послідовно, а потім паралельно. Виконати пункти 2, 3.

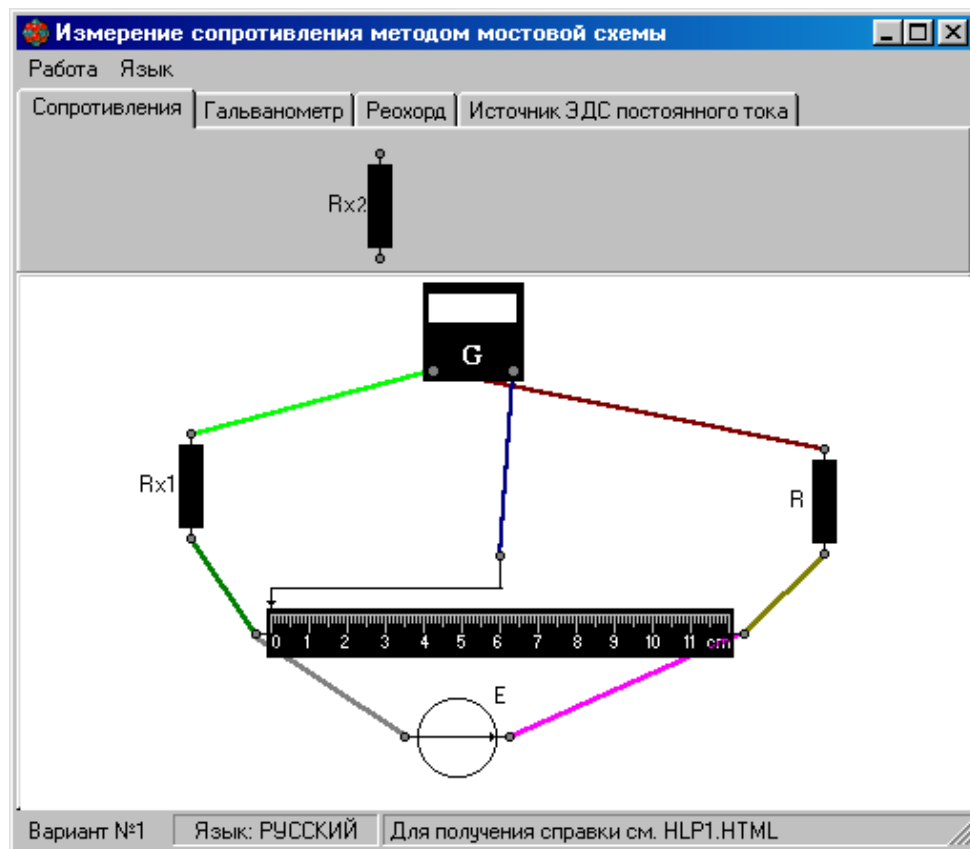


Рис. 3.1

6. Знаючи опори резисторів  $R_{x1}$ ,  $R_{x2}$  обчислити опір при їх послідовному та паралельному сполученні. Результати занести до таблиці.
7. Обчислити похибки вимірювань, враховуючи, що  $(\Delta R/R)100\%=2\%$ ,  $\Delta L_1 = \Delta L_2 = 0,5$  мм.

## 5. Зміст звіту та вказівки до обробки і аналізу результатів

Звіт повинен містити: таблицю результатів вимірювань та розрахунки, розрахунок похибок за загальним правилом обчислень похибок для прямих та непрямих вимірювань ( $R_x$ ).

## 6. Тести для самоперевірки

1. Сформулюйте та запишіть перше правило Кірхгофа. Що таке вузол?
2. Сформулюйте друге правило Кірхгофа.
3. Від чого залежить опір провідників? Записати формулу.
4. Як визначається опір при послідовному, паралельному з'єднанні резисторів?
5. При якому відношенні “плечей”  $L_1/L_2$  похибка вимірювання  $R_x$  буде мінімальною?
6. В чому полягають умови балансування моста?



## Лабораторна робота № 6

### ОСЦИЛОГРАФУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

#### 1. Мета роботи

Ознайомитись із застосуванням електронного осцилографа для спостереження форми сигналу, вимірювання напруги, частоти, різниці фаз, вивчити явища, що виникають при складанні взаємно-перпендикулярних коливань.

#### 2. Вказівки до самостійної роботи

**Принцип дії електронно-променевої трубки.** Найважливішою деталлю осцилографа є електронно-променева трубка – ЕПТ (див. рис. 2.1).

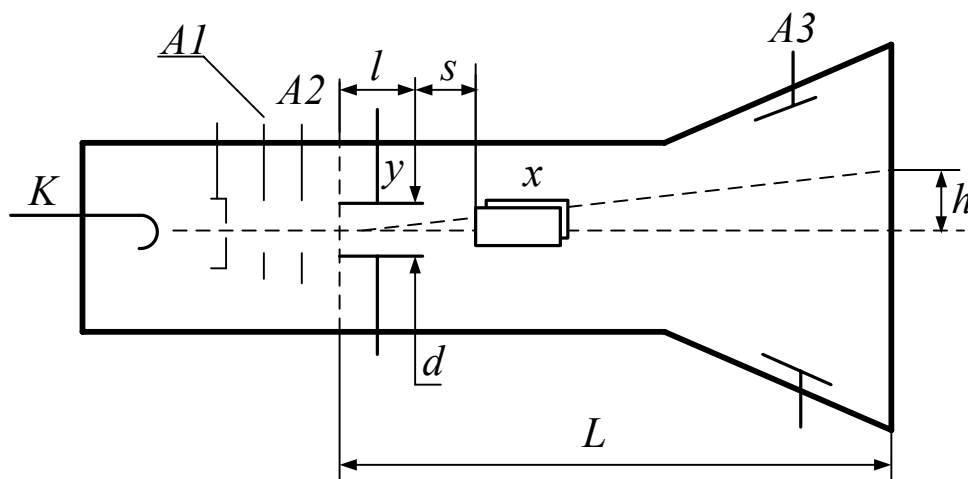


Рис. 2.1

ЕПТ складається зі скляної колби, всередині якої міститься джерело електронів – катод  $K$ . Катод знаходиться всередині керуючого (циліндричного) електрода. Зміною негативного потенціалу на ньому регулюється кількість електронів, які проходять через його отвір, що змінює яскравість плями на екрані ЕПТ. Перший анод  $A_1$  служить для фокусування, другий анод  $A_2$  – для прискорення електронів. Дві пари пластин  $Y$  та  $X$  служать для відхилення променя: вертикально відхиляючі пластини (пластини  $Y$ ) – в вертикальній площині, горизонтально – відхиляючі (пластини  $X$ ) – в горизонтальній площині.

Якщо прикласти між катодом та другим анодом напругу  $U_a$  (при напрузі між парами пластин  $U_x = 0$ ,  $U_y = 0$ ) пучок електронів буде попадати в центр екрана.

Якщо тепер подати на пластини  $y$  напругу  $U_y$ , то між ними виникне однорідне поле напруженістю

$$E_y = \frac{U_y}{d}, \quad (2.1)$$

де  $d$  – відстань між пластинами. На кожний електрон, що рухається між пластинами тепер буде діяти сила  $F_y$ , яка спричинить його прискорення у вертикальному напрямі

$$\frac{F_y}{m} = \frac{e E_y}{m} = \frac{e U_y}{m d}, \quad (2.2)$$

де  $m$  – маса електрона,  $e$  – його заряд.

Вертикальна складова швидкості електрона

$$v_y = a_y \Delta t_y \quad (2.3)$$

залежить від прискорення  $a_y$  та проміжку часу  $\Delta t$ , протягом якого електрон перебуває між пластинами. Цей проміжок часу визначається довжиною пластини  $l$  та повздовжньою швидкістю електрона  $v_z$

$$\Delta t_y = \frac{l}{v_z}. \quad (2.4)$$

Підставляючи значення  $a_y$  (2.2) у вираз (2.3), а також  $\Delta t_y$  з співвідношення (2.4) отримаємо:

$$v_y = \frac{e U_y l}{m v_z d}. \quad (2.5)$$

Від краю пластин до екрана електрон проходить відстань  $L$ , яка значно більша за довжину пластин  $l$  (див. рис. 2.1), в зв'язку з цим можна знехтувати зміщенням траєкторії електрона в полі пластин порівняно з відхиленням  $h$  плями на екрані трубки і записати

$$\frac{v_y}{v_z} = \frac{h}{l}. \quad (2.6)$$

Підставляючи у співвідношення (2.6) значення  $v_y$  (2.5) знайдемо повздовжню складову швидкості електрона

$$v_z = \sqrt{\frac{e U_y L E}{m d h}}. \quad (2.7)$$

Повздовжню складову швидкості  $v_z$  можемо визначити також із умови, що робота анодної напруги над прискоренням електрона  $e U_a$  іде на зміну кінетичної енергії електрона.

Таким чином:

$$v_z = \sqrt{\frac{2eU_a}{m}}. \quad (2.8)$$

Прирівнюючи (2.7) та (2.8) отримаємо, що відхилення  $h$  електрона

$$v_z = \sqrt{\frac{U_y L E}{2 d U_a}} = U_y S, \quad (2.9)$$

де  $S$  – константа для даної ЕПТ (якщо  $U_a$  – фіксована). Величина  $S$  носить назву чутливості ЕПТ:

$$S = \frac{h}{U_y}. \quad (2.10)$$

Із визначення (2.10) виходить, що чутливість  $S$  (ЕПТ) відносно напруги чисельно дорівнює величині зміщення променя на екрані, що приходить на один вольт напруги, прикладеної до пластин.

**Принцип дії генератора розгортки.** Для спостереження ходу процесів в часі (наприклад зміни напруги) на горизонтально відхиляючі пластини необхідно подавати напругу, яка лінійно зростає з часом – напругу розгортки. Якщо при цьому на  $Y$ -пластини подати напругу, яка вивчається, то електронний пучок опише на екрані графік зміни напруги в часі. Для спостереження періодичних процесів необхідно, щоб напруга розгортки змінювалась періодично. Причому період розгортки  $T$  був кратний періоду сигнал  $T_0$ , тобто  $T = nT_0$  (де  $n$  – ціле число). В цьому разі електронний промінь на екрані з кожним повторенням циклу розгортки буде викреслювати одну й ту ж траєкторію. Після проходження по горизонталі до певної точки на екрані, промінь повинен повертатись в початкове положення (зворотний хід). Викладеним вимогам можна задовольнити, якщо напруга  $U_x$  розгортки буде змінюватись за законом, зображеним на рис. 2.2, де  $t_1$  – час прямого ходу,  $t_2$  – час зворотного ходу променя. Така напруга називається пилкоподібною.

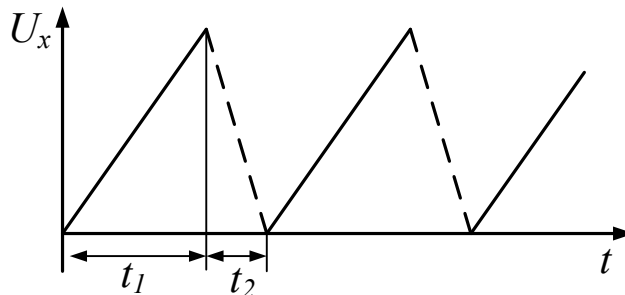


Рис. 2.2

**Складання взаємно-перпендикулярних коливань.** Маємо два коливання – одне направлене вздовж осі  $x$ , друге – вздовж осі  $y$

$$X = A \sin(\omega t + \varphi),$$

$$Y = B \sin(\omega t + \Psi). \quad (2.11)$$

Виключаючи з системи рівнянь (2.11) параметр  $t$  отримаємо рівняння еліпса у вигляді:

$$\left(\frac{x}{A}\right)^2 + \left(\frac{y}{B}\right)^2 - \frac{2xy}{AB} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (2.12)$$

де  $\delta$  – різниця фаз коливань (2.12).

$$\delta = \varphi - \Psi.$$

Точку перетину еліпса з віссю  $y$  можна знайти з (2.12) поклавши  $x = 0$  (див. рис. 2.3), тоді

$$y_0 = B \sin \delta. \quad (2.13)$$

Таким чином

$$\delta = \arcsin \frac{y_0}{B}. \quad (2.14)$$

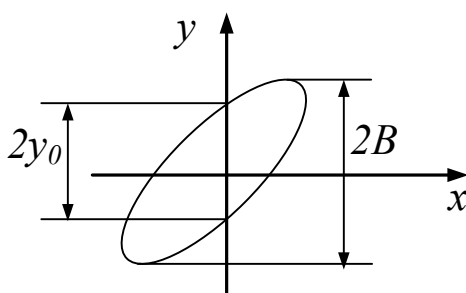


Рис. 2.3

### 3. Опис комп'ютерної програми

Програма має два режими роботи: в першому можна вивчити призначення відхиляючих пластин ЕПТ, в другому – принцип дії генератора розгортки, та проаналізувати складання двох взаємно перпендикулярних коливань. В першому режимі на панель інтерфейсу програми виведені вікна для задання параметрів регулювання: напруги на відхиляючих пластинах  $U_y$ , анодної (прискорюючої) напруги  $U_a$ , відстані між пластинами  $d$ , ширини пластин  $l$ , відстаней між анодом та катодом  $B$ , пластинами та екраном  $L$ , початкової “теплової” швидкості електрона, величини яких можна змінювати в широких межах. При цьому на екрані можна спостерігати траєкторію електрона. В другому режимі на екрані ЕПТ, який розміщується в площині екрана дисплея можна спостерігати криві напруги, яка подається на вертикальні відхиляючі пластини: при вимкненій розгортці, коли подається пилкоподібна напруга на горизонтально відхиляючі пластини, а також на  $x$ - та  $y$ -пластини подаються два синусоїдальні сигнали, амплітуди, частоти та початкові фази, які можна змінювати в широких межах, спостерігаючи фігури Лісажу. Зовнішній вигляд інтерфейсу програми зображено на рис. 3.1

#### 4. Інструкція користувачу

1. За допомогою кнопок на інтерфейсі встановіть значення параметрів у відповідності з табл. 4.1 Отримайте на екрані траєкторію електрона.

Таблиця 4.1

№	$U_a$ , В	$L$ , мм	$U_y$ , В	$d$ , мм	№	$U_a$ , В	$L$ , мм	$U_y$ , В	$d$ , мм
1	1000	140	10	10	7	1000	140	10	10
2	1000	150	10	10	8	1000	150	10	10
3	1200	160	10	10	9	1200	160	10	10
4	1200	160	12	10	10	1200	160	12	10
5	1000	150	8	10	11	1000	150	8	10
6	1000	150	12	12	12	1000	150	14	14

2. Поміняйте полярність  $U_y$ . Як змінилася траєкторія?
3. Задайте кілька послідовних значень напруги  $U_y$  від максимального значення  $+U_y$  до мінімального значення  $-U_y$ . З'ясуйте, яку лінію буде викреслювати електронний промінь на екрані ЕПТ?

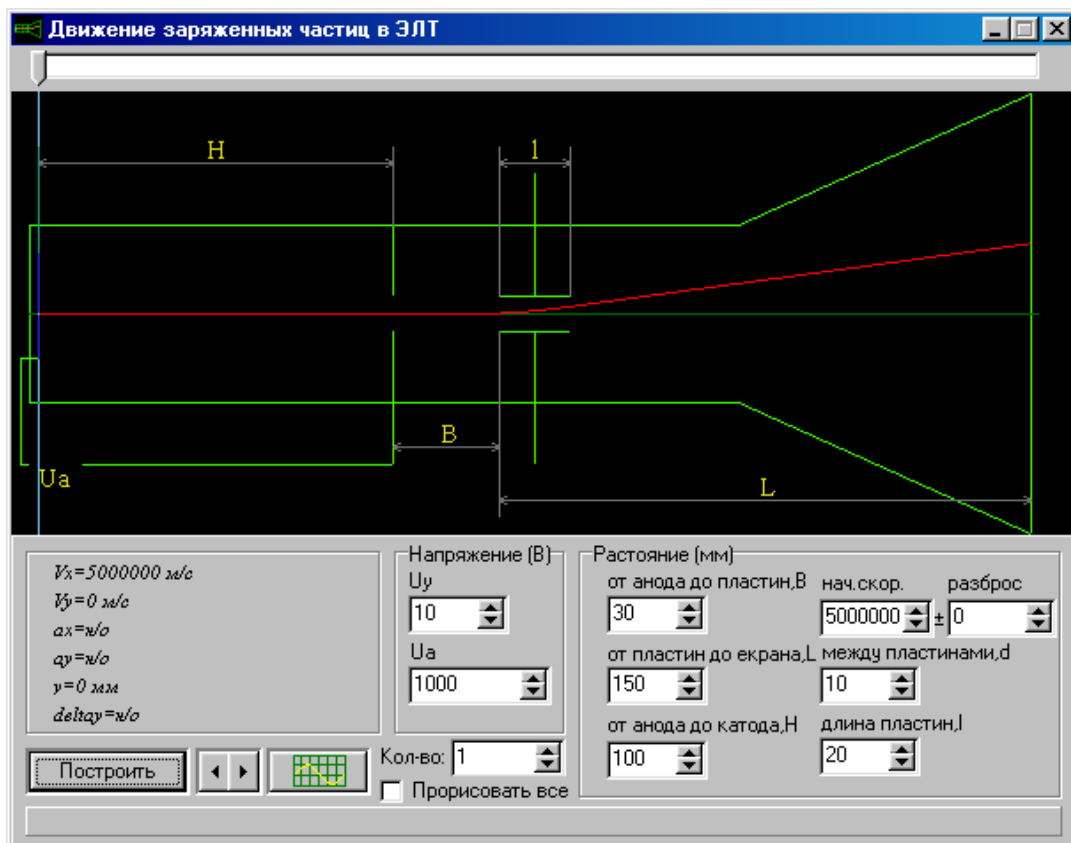


Рис. 3.1

4. За даними пункту 1 обчисліть чутливість ЕПТ за формулою (2.10).

5. Змініть режим програми, натиснувши кнопку  $\sim$ . В цьому режимі можна подавати напругу на обидві пари пластин, причому  $U_x$  та  $U_y$  можуть мати або синусоїдальну або пилкоподібну напругу. Подайте синусоїдальну напругу на  $y$ -пластини, на  $x$ -пластини  $U_x=0$ . Чи збігається висновок, зроблений в п. 3 з отриманим зображенням?
6. Подайте пилкоподібну напругу на  $x$ -пластини, на  $y$ -пластини – синусоїдальну. Зарисуйте отримане зображення. Подайте тепер на  $x$ -пластини теж синусоїдальну напругу. Порівняйте отриману криву з нарисованою.
7. Зробіть висновок, чому треба на  $x$ -пластини подавати пилкоподібну напругу, тобто, висловнюючись мовою математики – напругу, яка змінюється за лінійним законом. В якому з цих двох випадків можна спостерігати істинну форму сигналу, що подається на  $y$ -пластини?
8. Підберіть період синусоїди (змінюючи  $\omega_y$ ) так, щоб на екрані було зображено 1, 2, 3, і т.д. періодів синусоїди. Яким співвідношенням зв'язані період розгортки (пилки) з періодом синусоїди?
9. Подайте на обидві пари пластин синусоїдальну напругу однакової амплітуди:  $A=B$ , та однакової частоти:  $\omega_y=\omega_x$ . Змінюючи різницю фаз  $\delta$  отримайте: пряму; еліпс; коло; пряму з протилежним нахилом. Запишіть відповідні значення різниці фаз  $\delta$ . Визначте різницю фаз за формулою (2.14).
10. Повторіть операції п. 8 для випадку, коли  $A \neq B$ . Якщо подати синусоїдальні напруги на обидві пари пластин, то при кратних співвідношеннях частот  $\omega_x$  та  $\omega_y$  ( $\omega_x=n\omega_y$ , або  $\omega_y=n\omega_x$ ,  $n$  – ціле число) можна спостерігати фігури Лісажу.
11. Подайте на обидві пари пластин синусоїдальну напругу, задовольнивши умовам:  $A = B$ ,  $\delta = 30$  градусів. Зафіксуйте  $\omega_x$ . Змінюючи  $\omega_y$  так, щоб  $\omega_x/\omega_y=1, 2, 3, 2/3$ , встановіть формулу, за якою при відомому значенні  $\omega_x$  можна обчислити  $\omega_y$ .
12. Повторіть пункт 10, але тепер зафіксуйте  $\omega_y$  і змінюючи відношення  $\omega_y/\omega_x = 1, 2, 3, 2/3$  обчисліть  $\omega_y$ .

## 5. Зміст звіту та вказівки до обробки і аналізу результатів

Звіт повинен містити:

1. висновки за пунктами 3), 5), 7);
2. встановлені залежності (формули) за п.п. 8), 10), 11);
3. загальний висновок відносно того, що можна спостерігати та вимірювати за допомогою Е.О.

## 6. Тести для самоперевірки

1. Що є найважливішою деталлю осцилографа?
2. Поясніть будову й принцип дії електронно-променевої трубки.
3. Поясніть принцип дії генератора розгортки.
4. Яку фігуру на екрані осцилографа отримаємо при складання двох взаємно-перпендикулярних коливань?

## Лабораторна робота № 7

### ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КРУГОВОГО ВИТКА ТА СОЛЕНОЇДА

#### 1. Мета роботи

Вивчити магнітне поле контура з током та системи співвісних контурів, що утворюють котушку з струмом, базуючись на законі Біо-Савара-Лапласа.

#### 2. Вказівки до організації самостійної роботи

Магнітне поле  $\Delta \vec{B}$  елемента струму ( $I \Delta \vec{L}$ ) визначається за законом Біо-Савара-Лапласа

$$\Delta \vec{B}(r) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{[\Delta \vec{L}, \vec{r}]}{|\vec{r}|^3}. \quad (2.1)$$

де  $\mu_0$  - магнітна стала вакууму,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м/А}$ ,  $I$  – величина постійного електричного струму,  $\vec{r}$  – радіус-вектор, який характеризує положення точки, в якій створюється величина індукції  $\Delta B$  по відношенню до елемента ( $I \Delta \vec{L}$ ).

Закон Біо-Савара-Лапласа має загальний характер і в принципі може бути використаний для визначення магнітного поля, яке створюється провідником із струмом будь-якої форми. Зрозуміло, що ніяких ізольованих ділянок струму не буває і провідник повинен утворювати замкнене коло. Однак ми можемо наближено уявити безперервний провідник у вигляді ряду дискретних ділянок. Тоді вектор індукції  $\vec{B}$  в будь-якій точці простору можна визначити за допомогою принципу суперпозиції. Для нашого випадку кінцевих елементів струму

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^N \Delta \vec{B}_i. \quad (2.2)$$

де  $N$  – число елементів, на які розбивається контур. В скалярному вигляді

$$B_x = \sum_{i=1}^N \Delta B_{xi}, B_y = \sum_{i=1}^N \Delta B_{yi}, B_z = \sum_{i=1}^N \Delta B_{zi}. \quad (2.3)$$

Вклад кожної з ділянок довжиною  $\Delta L$  розташованої в точці  $\vec{r}_i$  в магнітне поле в точці  $\vec{r}$  (рис. 2.1) визначається за формулами (в проекціях)

$$\begin{aligned} \Delta B_x(\vec{r}) &= A[\Delta L_y(z - z_i) - \Delta L_z(y - y_i)]/|\vec{r} - \vec{r}_i|^3 \\ \Delta B_y(\vec{r}) &= A[\Delta L_z(x - x_i) - \Delta L_x(z - z_i)]/|\vec{r} - \vec{r}_i|^3, \\ \Delta B_z(\vec{r}) &= A[\Delta L_x(y - y_i) - \Delta L_y(x - x_i)]/|\vec{r} - \vec{r}_i|^3, \end{aligned} \quad (2.4)$$

де

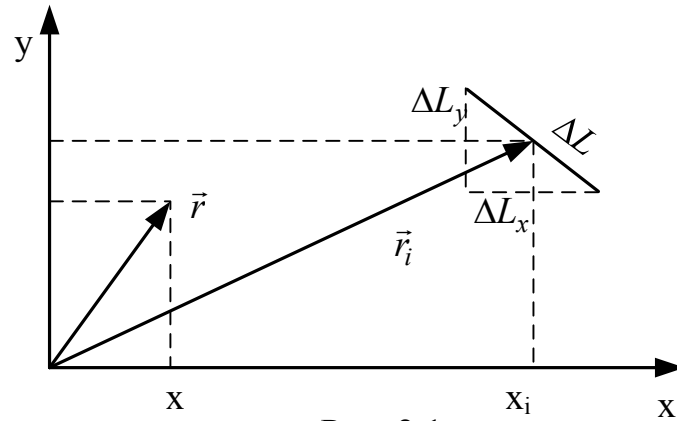


Рис. 2.1

$$|\vec{r} - \vec{r}_i|^3 = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{\frac{3}{2}}.$$

Для магнітного поля на осі, що проходить через центр системи витків можна отримати аналітичний вираз

$$B = \frac{I}{2} B_0 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2). \quad (2.5)$$

де кути  $\theta_1$  та  $\theta_2$  показані на рис. 2.2, на якому схематично зображена котушка зі струмом,  $B_0$  – індукція всередині довгого соленоїда

$$B_0 = \mu_0 \frac{N}{l} I. \quad (2.6)$$

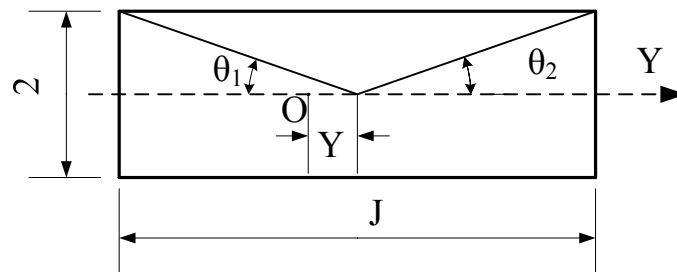


Рис. 2.2

### 3. Опис комп'ютерної програми

Програма обчислює та малює силові лінії магнітного поля кругового витка зі струмом, який лежить в площині  $xz$ , та системи  $N$  співвісних витків (див. рис. 3.1). Оскільки система має вісь симетрії, досить представити силові лінії в одній площині, яка проходить через неї. Цією площиною є площина  $xu$  вона виступає в ролі екрана. Обчислення виконуються за формулами (2.3), (2.4). Інтерфейс програми має основну та дві допоміжні панелі. На основній панелі виводяться вікна з параметрами котушки: це радіус витка, висота соленоїда, число елементів, на які розбивається виток при обчисленні індукції та загальне число елементів котушки. На одній з допоміжних панелей можна вибрати координати точки, з якої програма починає викреслювати силові лінії. За допомогою другої панелі можна визначити під яким кутом малювати силові



лінії у тривимірному просторі. Програма обчислює значення індукції в будь-якій точці. Підводячи курсор в будь-яку точку можна “виміряти” індукцію  $B$  та координати точки. Програма дозволяє також регулювати швидкість викреслювання силових ліній та їх густину. Розміри на екрані дисплею вимірюються в пікселях.

Зовнішній вигляд інтерфейсу програми зображено на рисунку 3.2.

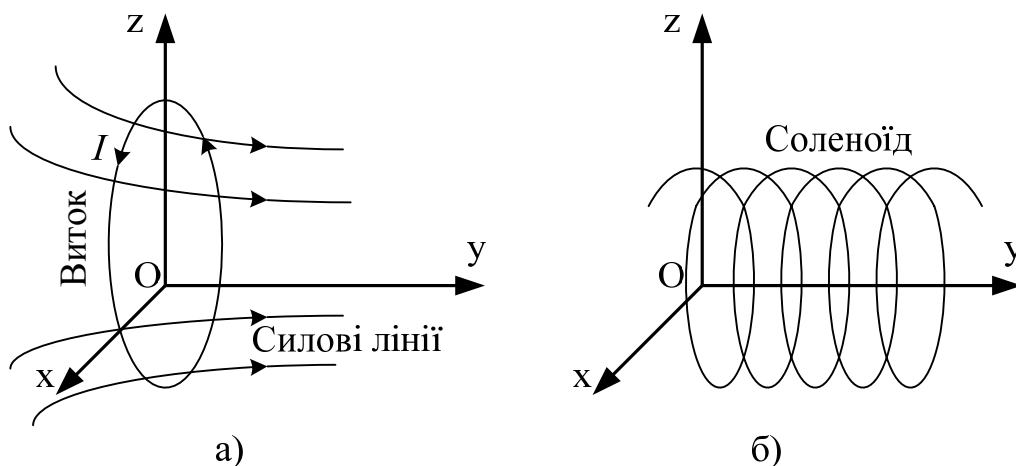


Рис. 3.1

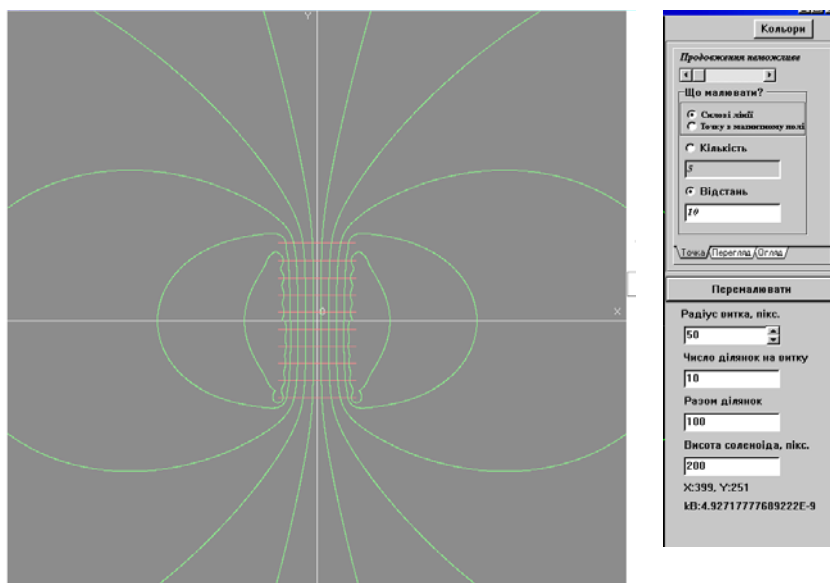


Рис. 3.2

#### 4. Інструкція користувачу

1. Створіть один виток із струмом. Для цього виберіть однакове число “ділянок на витку” та “разом ділянок”. “Відстань” між лініями, яка регулює густину ліній встановіть рівною 20 пікселям. Отримайте картину силових ліній для одного витка магнітного диполя. Зарисуйте її. Запишіть координати центра витка та значення індукції.
2. Збільшуючи число “ділянок на витку” в два, три і т.д. разів, прослідкуйте як змінюється точність розрахунку (шляхом порівняння  $B_1 - B_2$ ,  $B_2 - B_3$ , і т.д., різниця  $B_n - B_{n+1}$  повинна зменшуватись). Вибираючи “кут нахилу”

прослідкуйте, як змінюється при цьому апроксимація кругового витка ломаною лінію, внаслідок його розбивки на елементи  $\Delta L$ .

- Встановіть довжину котушки  $l = 200$  пікс,  $R = 50$  пікс, координати початкової точки для розрахунку силової лінії покладіть рівними  $R_{ox} \approx 50$  пікс,  $R_{oz} = R_{oy} = 0$ . Збільшіть густину силових ліній (шляхом зменшення “відстані”), встановіть “Разом ділянок” – 30. Збільшіть число витків. Прослідкуйте, як ведуть себе силові лінії (яка їхня форма) поблизу витків, чи перетинають вони циліндричну поверхню, на якій лежать витки? Виберіть на картині поля замкнену лінію довільної форми. Підрахуйте число ліній, які входять в площину, охоплену лінією  $N_1$  (потік, який входить), число ліній, які виходять назовні  $N_2$  (потік, що виходить). Чому дорівнює потік, який перетинає замкнену лінію?
- Запишіть значення індукції в центрі соленоїда (параметри візьміть за таблицею). Зніміть залежність  $B(l)$ , тобто виміряйте шість разів  $B$  в центрі соленоїда для шести різних значень довжини котушки. Запишіть значення  $B$  та відповідні їм значення  $l$ .
- Встановіть параметри соленоїда у відповідності з таблицею завдань 4.1. Виміряйте та запишіть  $B_0$  в центрі соленоїда. Запишіть ще шість значень  $B$  для шести значень відстані у від центра соленоїда.

Таблиця 4.1.

№	$L$	$R$	Разом ділянок	№	$L$	$R$	Разом ділянок
1.	500	50	300	7.	300	60	200
2.	200	50	200	8.	300	40	200
3.	500	100	200	9.	400	50	250
4.	300	70	200	10.	300	50	200
5.	400	80	300	11.	300	30	300
6.	500	90	300	12.	500	80	300

## 5. Зміст звіту та вказівки до обробки та аналізу результатів

Результати вимірювань подайте у вигляді таблиць та графіків. За пунктом 4) побудуйте графік  $\frac{B(l)}{B_0} = f(l)$ , зробіть висновок, як змінюється відношення

$\frac{B(l)}{B_0}$  з ростом довжини соленоїда? За пунктом 5) побудуйте графік  $\frac{B(y)}{B_0} = f(y)$ .

На одному рисунку для порівняння побудуйте залежність  $f(y) = \frac{l}{2}(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$ .

Зробіть висновок.

## 6. Тести для самоперевірки

- Що таке “елемент струму”?
- Запишіть закон Біо-Савара-Лапласа у векторній формі, у скалярній формі.
- В чому полягає принцип суперпозиції для магнітного поля?
- Запишіть формулу для індукції довгого соленоїда.

## Лабораторна робота №8

### ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

#### 1. Мета роботи

Визначити питомий заряд електрона через його рух у взаємно-перпендикулярних електричному та магнітному полях.

#### 2. Вказівки до організації самостійної роботи

Рух електрона в реальному приборі відбувається в кільцевому проміжку між катодом та анодом двоелектродної лампи (див. рис. 2.1).

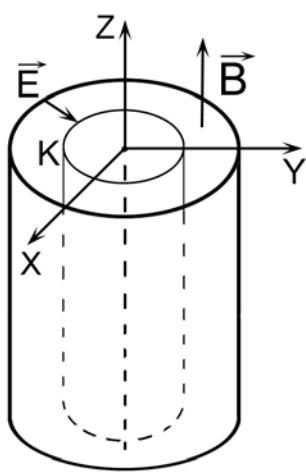


Рис. 2.1

Нитка розжарення (катод) **К** розташовується вздовж осі циліндричного анода **А** так, що електричне поле  $\vec{E}$  виявляється направленим вздовж радіуса. Лампа розміщується всередині соленоїда, який утворює магнітне поле, з індукцією  $\vec{B}$ , яка направлена паралельно катоду. Описаний прилад являє собою магнетрон.

Будемо вважати, що початкова (теплова) швидкість електрона, що вилетів із катода дорівнює нулю. Тоді при загальній орієнтації електричного та магнітного полів рух електрона буде відбуватися у площині, перпендикулярній магнітному полю. Двохвимірний рух електрона описується рівняннями динаміки у вигляді

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{a}, \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{V}. \quad (2.1)$$

Для успішного розв'язання задачі нам необхідно знати прискорення  $\vec{a}$ , як функцію координат. Коли електрон рухається між катодом та анодом, на нього діють сили:

- 1) з боку електричного поля, яке створюється анодною напругою  $U_a$ ;
- 2) магнітна сила Лоренца, яка діє з боку магнітного поля (коли струм в соленоїді  $J_c \neq 0$ );
- 3) сила з боку електричного поля, яке створюється об'ємним електричним зарядом з певною густиною  $\rho$  що знаходиться між анодом та катодом.

Якщо розглядати електроди двоелектродної лампи як циліндричний конденсатор, то електричне поле змінюється із зміною відстані  $r$  (від осі симетрії системи) за формулою

$$E = \frac{U_a}{\ln r_a / r_k} \cdot \frac{1}{r}. \quad (2.2)$$

де  $r_a$  – радіус анода,  $r_k$  – радіус катода.

Як відомо, сила Лоренца, яка діє на електрон

$$\vec{F}_l = -e[\vec{V}, \vec{B}]. \quad (2.3)$$

де  $V$  – швидкість електрона,  $B$  – індукція магнітного поля.

Якщо припустити, що густина електричного заряду між катодом та анодом змінюється внаслідок розходження електронного пучка за законом

$\rho(r) = \rho_0 \frac{1}{\sqrt{r}}$  (де  $\rho_0$  – константа для даної конструкції лампи), то виходячи з теореми Гауса, для напруженості електричного поля можна отримати вираз

$$E_\rho = \frac{2}{3} e \rho_0 \frac{(r^{3/2} - r_k^{3/2})}{r}. \quad (2.4)$$

Таким чином прискорення електрона в рівняннях (2.1) буде визначатися виразом

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_l}{m} + \frac{e\vec{E}}{m} + \frac{e\vec{E}_\rho}{m}. \quad (2.5)$$

де  $\vec{F}_l$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{E}_\rho$  – визначаються формулами (2.2), (2.3), (2.4).

### 3. Опис комп'ютерної програми

Програма базується на модифікованому алгоритмі Ейлера, який описує двовимірний рух електрона в перехрещених магнітному та електричному полях. Програма має основну – “траєкторія” та допоміжну – “Схема та настройки” панелі. В режимі “траєкторія” програма дозволяє вивчити траєкторію руху електрона в широких межах; зміни анодної напруги, величини струму в соленоїді, початкової (теплової) швидкості електрона, з якою він вилітає із катода. Програма також дає можливість спостерігати рух будь-якого числа електронів, які вилітають із катода з різними початковими швидкостями, прослідкувати вплив на рух електрона(або електронів) просторової густини заряду, який завжди існує в проміжку між анодом та катодом двоелектродної лампи. В процесі роботи з програмою є також можливість змінювати параметри електронної лампи – радіус катода, анода, регулювати точність обчислень, змінюючи крок переміщення електрона, змінювати масштаб зображення, його положення відносно центра екрана і, нарешті, вибрати приємні кольори зображення траєкторії, анода, катода та електронів.

Зовнішній вигляд інтерфейсу програми зображено на рис. 3.1.

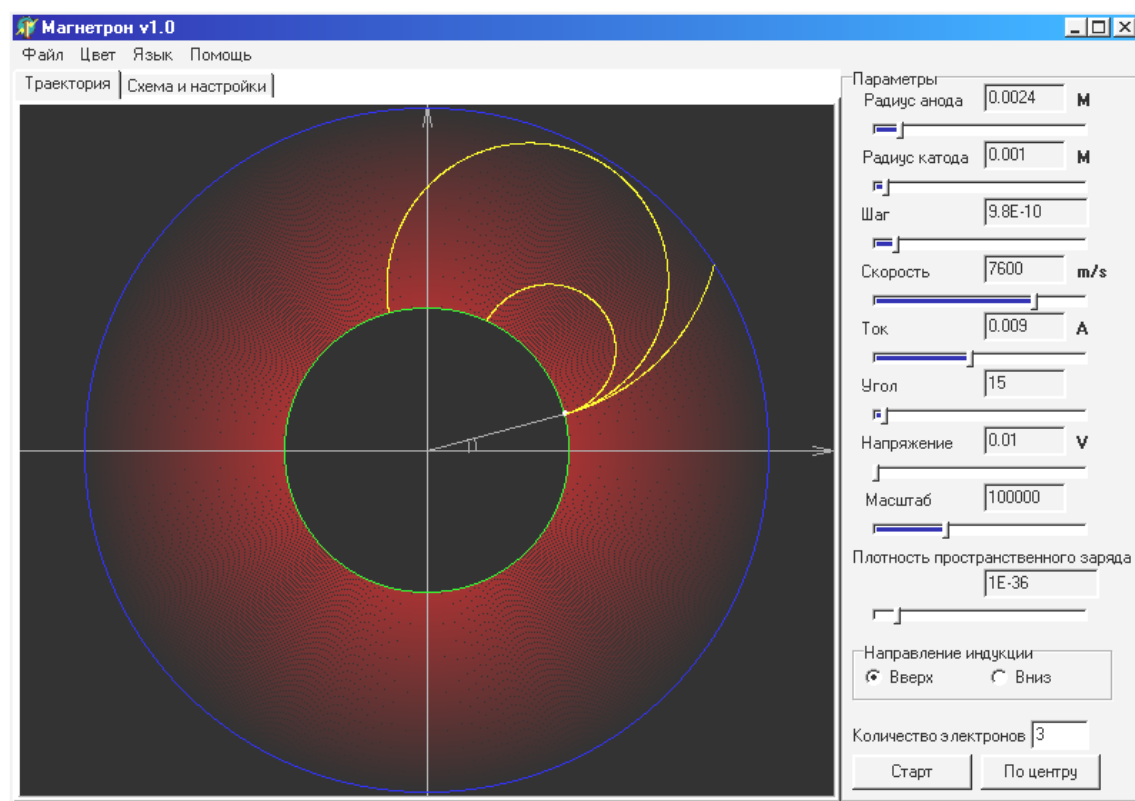


Рис. 3.1

#### 4. Інструкція користувачу

1. Значення густини об'ємного заряду  $\rho_0$ , індукції  $B$ , анодної напруги  $U_a$  покласти рівними нулю. Початкову швидкість вибрати у відповідності з таблицею 4.1. Яку траєкторію має електрон?

Таблиця 4.1

$N_{об}$	$V(м)$	$U_a(B)$	$V(м)$	$N_{об}$	$V(м)$	$U_a(B)$	$V(м)$
1	3000	2,5	500	7	750	1	1000
2	2000	2		8	1250	2	1000
3	1000	1,5		9	1750	1,5	1000
4	500	1		10	2250	1	500
5	1500	1,2		11	3250	2	500
6	2500	1,8		12	2750	2,5	500

- Збільшуючи індукцію зовнішнього магнітного поля добийтесь повернення електрона до катода. Яку траєкторію описує електрон в однорідному магнітному полі?
- Покладіть  $V_0 = 0$  анодну напругу згідно з таблицею. Збільшуючи індукцію від нуля добийтесь, щоб електрон пролітав повз анод. Запишіть значення  $B_k$  (критичне значення).
- Повторіть дослід п. 3 п'ять разів, збільшуючи кожного разу  $U_a$  на 0,1 В. Отримані дані запишіть в таблицю 4.1.

5. Обчисліть відношення  $\frac{e}{m}$  і знайдіть його середнє значення.
6. Встановіть швидкість електрона, анодну напругу згідно з таблицею. Чому при малих швидкостях траєкторія електрона утворює петлю, при збільшенні величини індукції?
7. Змінюючи густину об'ємного заряду  $\rho_0$  зробіть висновок, як  $\rho_0$  впливає на величину  $B_k$ ?
8. Встановіть початкову швидкість згідно з таблицею, задайте кількість електронів:  $n = 2, 3, 5$ .
9. Зробіть висновок, як впливає на значення  $B_k$  початкова швидкість. (В залежності від значення  $n$  початкова швидкість 1-го електрона  $V_1 = V_0/n$ , другого –  $V_2 = 2 V_0/n$  і т.д.).

## 5. Зміст звіту та вказівки до обробки і аналізу результатів

Звіт повинен містити:

- 1) Три види траєкторії (зарисовані): пряму, криву, петлеву з поясненнями, чому вони мають такий вигляд;
- 2) Таблицю із значеннями  $B_k$  для п'яти значень  $U_a$ , визначені значення  $\frac{e}{m}$  та  $\langle \frac{e}{m} \rangle$ .
- 3) Висновки щодо впливу початкової швидкості, густини об'ємного заряду на величину  $B_k$ .

## 6. Тести для самоперевірки

1. Що являє собою прилад магнетрон?
2. Які сили діють на електрон при його русі в лампі?
3. Запишіть формулу для сили Лоренца у векторному вигляді?
4. Проаналізуйте формулу для сили Лоренца. Коли сила буде максимальна, мінімальна?
5. Який напрямок буде мати сила Лоренца на рис.3.1?
6. Якими рівняннями описується рух електрона?
7. Який наближений метод розв'язку рівнянь руху використовується в даній роботі?

## Віртуальні лабораторні роботи 9-12

### Керівництво користувача

#### Опис стандартних функцій і можливостей

Вимоги до апаратної частини:

- тактова частота процесора одноядерних систем не менше 1500 МГц;
- оперативна пам'ять не менше 256 Мб;
- відео карта з підтримкою Direct X 8 і об'ємом пам'яті не менше 54 Мб;

Установка:

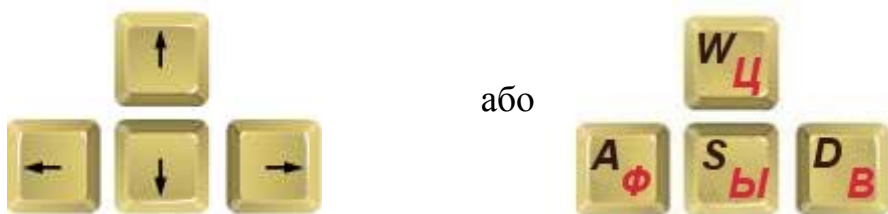
- Windows не молодше Windows 2000.
- Для нормальної роботи віртуальних лабораторій необхідно встановити plug-in для браузерів клієнтського комп'ютера. Викачати plug-in можна з сайту <http://www.adobe.com/>. Шукати на сайті Shockwave player.
- Виконувані файли лабораторій повинні бути розташовані у файловій системі так, щоб кількість символів в дорозі до файлів не перевищувала 127.
- Повинна бути включена підтримка DirectDraw і DirectSound (за умовчанням в Windows включено).
- У браузерах повинний бути дозволений перегляд активного вмісту на сторінках.

Управління у віртуальних лабораторіях

Світ, в який користувач потрапляє у віртуальних лабораторіях, є інтерактивним графічним середовищем. Воно управляється системами математичних моделей. Стан математичних моделей змінюється при зміні стану графічної моделі, яка у свою чергу міняється залежно від дій користувача. Зміна математичній моделі адекватно відбивається зміною графічної моделі.

#### *Переміщення камери в лабораторіях*

Для переміщення в горизонтальній площині в лабораторіях використовуються клавіатурні клавіші



Для задання напрямку руху натисніть ЛІВУ кнопку миші і, утримуючи її, пересуньте покажчик до того краю екрану, який відповідає вибраному напрямку повороту камери. Ви побачите, як услід за покажчиком повертається й камера.




Не відпускаючи ліву кнопку, переміщайте курсор миші і дивіться за поведінкою камери.

### ***Повороти камери в лабораторіях***

Для повороту камери натисніть ліву клавішу миші і утримуйте її натиснутою. Пересуньте покажчик миші – ви побачите, як услід за ним обернеться камера (для вас зміниться вигляд). Тобто ви як би повернете голову в віртуальному світі.

### ***Взаємодія з предметами на віртуальному світі лабораторій***

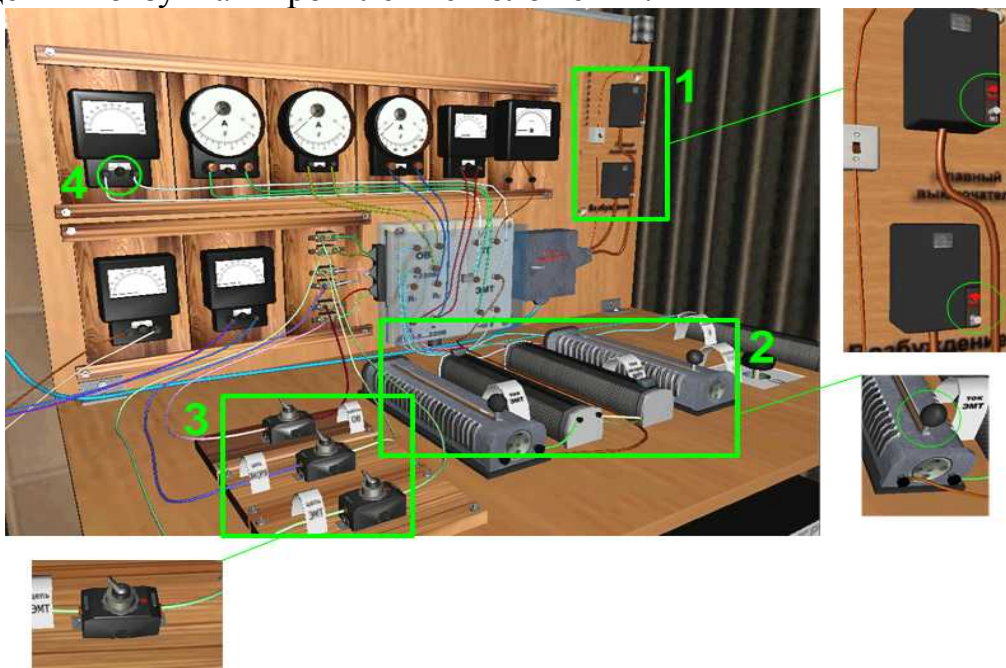
Будь-які взаємодії з об'єктами віртуального світу лабораторій починаються з того, що ви займаєте таку позицію, з якої об'єкт взаємодії буде добре видний і до нього можна як би «дотягнутися рукою».

Для здійснення дії над вибраним об'єктом ви наводите на нього покажчик миші (при цьому його вигляд повинен змінитися з  на  або ).

Потім натисніть праву кнопку миші.

Якщо об'єкт, з яким ви взаємодієте, має елементи для включення і виключення, як наприклад автоматичний вимикач 1 (див. рис.) з двома кнопками «ВКЛ» і «ВИКЛ» для зворотної дії, тобто наприклад, для виключення треба використовувати кнопку «ВИКЛ».

Якщо об'єкт, з яким ви взаємодієте, має тільки один інтерактивний елемент, як наприклад, реостат 2 (див. рис.) або перемикач межі 4 (див. рис.) на приладі або звичайний вимикач 3 (див. рис.), то використовується натиснення правої кнопки миші для прямої дії (включення) а комбінація клавіша CTRL+права кнопка миші для зворотної дії (виключення). Або переміщення повзунка реостата вперед – натиснення правої кнопки миші на ручці повзунка 2 (див. рис.) і утримання в натиснутому стані до переміщення повзунка реостата в необхідне положення, а CTRL+права кнопка миші +утримання кнопки – переміщення повзунка в протилежне положення.





## Лабораторна робота № 9

# ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ ЗБЕРЕЖЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОЛЬОТУ КУЛІ

### 1. Мета роботи

Вимірювання швидкості польоту кулі з використанням методу балістичного маятника.

### 2. Вказівки з організації самостійної роботи студентів

Швидкість тіла  $v$  визначається часом  $t$ , протягом якого воно проходить відрізок шляху довжиною  $s$ :  $v=s/t$ . Відстань  $l$  м кулі здолає за тисячні частки секунди. Вимірювати такі малі проміжки часу неможливо ні звичайним секундоміром, ні електричним. Велику швидкість кулі можна виміряти за допомогою методу балістичного маятника.

Метод балістичного маятника заснований на законах збереження імпульсу та механічної енергії. При непружному зіткненні кулі з тілом, маса якого в багато разів більша за масу кулі, остання практично повністю передасть йому свій імпульс. Швидкість, яку отримує тіло в результаті удару, буде в багато разів меншою, ніж швидкість кулі, тому вона набагато легше піддається експериментальному визначенню. Співвідношення між швидкостями кулі й балістичного маятника можна встановити за допомогою закону збереження імпульсу. Маятник, отримавши швидкість, здобуває й кінетичну енергію. За рахунок її запасу він відхиляється з положення рівноваги доти, поки його кінетична енергія не перейде повністю в потенціальну.

### 3. Опис реальної установки

Установка для виміру швидкості кулі методом балістичного маятника зображена на рис. 3.1. Балістичний маятник являє собою порожній металевий циліндр 2, підвішений на чотирьох вертикальних нитках довжини  $l$ . Нитки прикріплені до кронштейна 3, який розташований на штативі 4. Дно циліндра покрите товстим шаром пластиліну. Знизу до циліндра прикріплена стрілка, що може переміщуватися вздовж шкали з матового скла 5. Шкала укріплена на підставі 6 і служить для вимірів кута відхилення циліндра  $\alpha$ . Шкала підсвічується лампочкою, а її збільшене зображення оптичною системою проектується на матовий екран. Постріл роблять із пневматичної рушниці 1 таким чином, щоб траєкторія кулі збіглася з віссю циліндра. У цьому випадку після зіткнення з кулею циліндр не обертається.

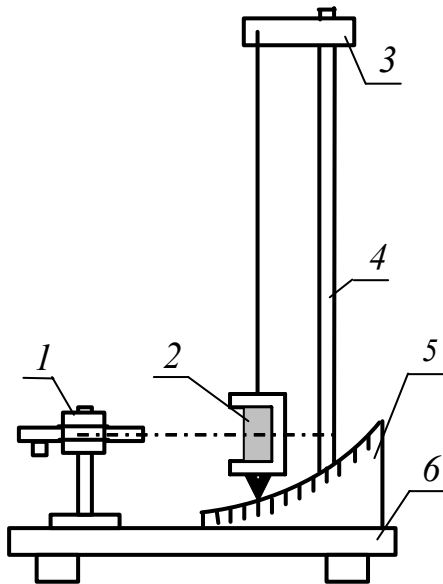


Рис. 3.1

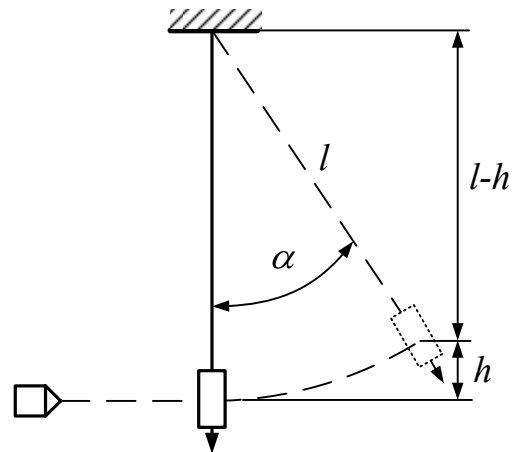


Рис. 3.2

Зіткнення є настільки короткочасним, що зсув маятника за час удару можна не враховувати. Після зіткнення маятник зміститься з положення рівноваги й підніметься на висоту  $h$  (див. рис. 3.2). При цьому його кінетична енергія перейде в потенціальну. Втратою механічної енергії маятника, яка відбувається під дією сил тертя за час переміщення з положення рівноваги в точку зупинки, можна знехтувати. У цьому легко переконатися, вивчивши залежність амплітуди коливань маятника від числа зроблених коливань (через сто повних коливань амплітуда зменшиться менше, ніж наполовину).

При зіткненні кулі з балістичним маятником виконується закон збереження для горизонтальних складових імпульсу, тому що в горизонтальних напрямках на кулю й маятник діють тільки сили опору повітря, які зникають малі в порівнянні з силами взаємодії, що виникають між кулею й маятником при зіткненні. Оскільки маса  $M$  балістичного маятника значно перевищує масу  $m$  кулі

$$M \gg m,$$

то швидкість  $u$ , що здобуває балістичний маятник після непружного зіткнення з кулею, визначається співвідношенням

$$u \approx \frac{m v}{M}, \quad (3.1)$$

де  $v$  – швидкість кулі. З іншого боку, відповідно до закону збереження енергії маємо

$$u^2 = 2gh. \quad (3.2)$$

З рис. 3.2 випливає, що

$$h = l(1 - \cos \alpha). \quad (3.3)$$

Відхилення балістичного маятника після потрапляння в нього кулі малі тому  $\alpha \ll 1$ , і формулу (3.3) можна записати у вигляді

$$h = 2l \sin^2 \frac{\alpha}{2} \approx 2l \frac{\alpha^2}{4} = \frac{l\alpha^2}{2}. \quad (3.4)$$

Підставимо (3.4) у вираз (3.2) й одержимо таку формулу для визначення швидкості балістичного маятника після пострілу:

$$u = \alpha \sqrt{gl}. \quad (3.5)$$

А з виразів (3.1) і (3.5) можна вивести формулу для швидкості кулі

$$v = \frac{M}{m} u = \frac{M\alpha\sqrt{gl}}{m}. \quad (3.6)$$

Отже, як випливає з (3.6), для визначення швидкості кулі ми повинні знати маси кулі й маятника та визначити кут відхилення маятника після удару.

#### 4. Опис віртуальної установки й правил керування об'єктами

Оскільки у віртуальному світі ми можемо використати будь-які приміщення й устаткування, то схема віртуальної установки трохи змінена. Для строгого виконання правил техніки безпеки рушниця й балістичний маятник, роль якого грає мішок з піском 1, поміщені в окрему «збройову» кімнату (див. рис. 4.1). Нитка маятника 2 у стані рівноваги торкається одного з плечей рухливого кронштейна 3. На другому плечі кронштейна укріплена лазерна вказівка 4, промінь якої відображається на склі. За рухом маятника користувач спостерігає з іншої, «вимірювальної» кімнати через товсте скло, у верхній частині якого розміщена шкала для виміру кутових відхилень маятника 5.

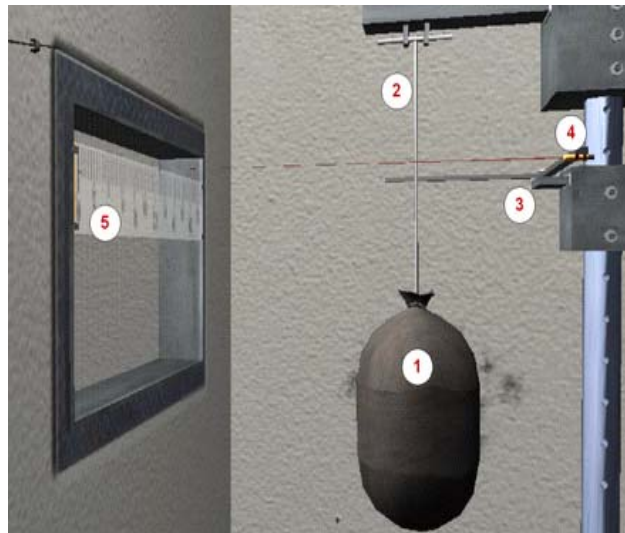


Рис. 4.1

Пневматична рушниця (див. рис. 4.2) розташована в цій же «збройовій» кімнаті на спеціальній підставці 6 напроти мішка. Його заряджання здійснюється за допомогою зарядної скоби 7, а постріл – за допомогою

електромагнітного курка 8, пульт управління яким розташований у іншій, «вимірювальній» кімнаті.



Рис. 4.2

УВАГА! При *першому вході* у вимірювальну кімнату рушниця готова до пострілу.

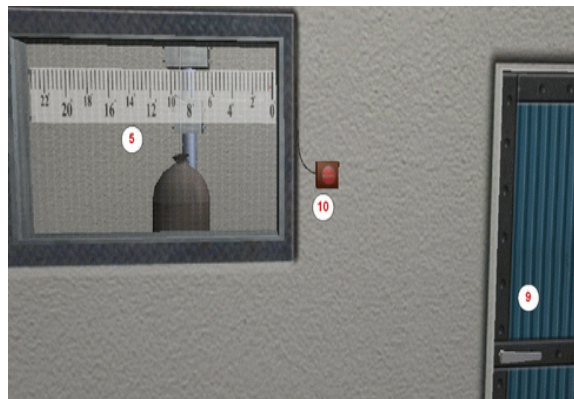


Рис. 4.3

У «вимірювальній» кімнаті (див. рис. 4.3 і 4.4) є двоє дверей: двері в збройову кімнату 9 й, – напроти їх, – входні двері 11 у лабораторію. Ліворуч від дверей 9 розташоване вікно зі шкалою кутів відхилень маятника 5. Праворуч від вікна перебуває кнопка пострілу 10.



Рис. 4.4

## 5. Порядок виконання віртуальної лабораторної роботи

1. Запустіть з компакт-диску файл віртуальної лабораторної роботи Lab6.htm.
2. Виберіть із запропонованого вам набору мішок і запишіть його номер і масу у табл. 5.1. Натисніть ліву кнопку миші на обраному мішку. Ви потрапите у віртуальну вимірювальну кімнату (картинка, що Ви побачите, буде схожа на рис. 4.4).

Таблиця 5.1. Таблиця вимірів віртуальної лабораторної роботи №1

№ мішка	Маса мішка, кг	Відхилення показчика $\alpha$ , градуси	Відхилення показчика $\alpha$ , рад	Швидкість кулі $v$ , м/с
1	2	3	4	5
1	5,6			
2	6,0			
3	6,9			
4	7,5			
5	9,2			
$v_{сер} =$				
$v = v_{сер} \pm \Delta v$	$v =$ м/с			

5.1 Створіть таблицю 1 за допомогою програми Excel і внесіть у неї вихідні дані. Збережіть отриманий документ.

3. Потренуйтеся у керуванні об'єктами віртуального світу. Загальні правила тут аналогічні тим, що використовуються в комп'ютерних іграх, а саме:

- клацання лівою кнопкою миші на полі роботи повертає камеру в тому напрямку, куди ви клацнули;
- натискання кнопок  $\leftarrow$  і  $\rightarrow$  на основній клавіатурі зміщує камеру відповідно вліво й вправо;
- натискання кнопок  $\uparrow$  і  $\downarrow$  відповідно наближає й віддаляє камеру від об'єкта;
- всі активні деталі при наведенні на них курсору змінюють вид курсору (з'являється «рука»);
- такі дії, як відкривання дверей, зарядження рушниці, постріл, зупинка мішка та його розгойдування, установка показчика шкали на кронштейні на нуль і т.д. здійснюються за допомогою натискання правої клавіші миші;
- повернення моделей здійснюється за допомогою одночасного натискання клавіші Ctrl і правої клавіші миші.

4. Натисніть на кнопку 10 і зробіть перший (пробний) постріл. При цьому ви побачите хитання мішка, а покажчик (світловий зайчик) установиться в деякому місці шкали 5.

УВАГА! Результат НЕ ЗАПИСУЙТЕ, тому що швидше за все він неправильний внаслідок неправильного положення лазерної вказівки 4 (збитий нуль шкали).

5. Клацніть правою клавішею миші на дверях у збройову кімнату 9, двері відкриваються. Маніпулюючи мишею (ліва клавіша) і кнопками  $\leftarrow$ ,  $\rightarrow$ ,  $\uparrow$  і  $\downarrow$  увійдіть у збройову кімнату. Підійдіть до мішка й, притримуючи його за підставу (права клавіша), зупиніть мішок. Клацнувши правою клавішею миші на вказівці 4, встановіть кронштейн 3 із вказівкою 4 у положення, коли промінь вказівки встановлений на нулі шкали.

6. Підійдіть до рушниці та зарядіть її. Для цього клацніть правою клавішею миші на зарядній скобі 7. При цьому скоба зробить рух униз - вгору.

7. Маніпулюючи мишею (ліва клавіша) і кнопками  $\leftarrow$ ,  $\uparrow$ ,  $\rightarrow$  і  $\downarrow$ , вийдіть зі збройової кімнати й добийтеся того, щоб одночасно були видні шкала 5 і кнопка пострілу 10. Клацніть правою клавішею миші на кнопці пострілу 10 і зробіть постріл. При цьому ви побачите хитання мішка, а покажчик (світловий зайчик) установиться в деякому місці шкали 5. Знову маніпулюючи мишею (ліва клавіша) і кнопками  $\leftarrow$ ,  $\uparrow$ ,  $\rightarrow$  і  $\downarrow$ , добийтеся максимально можливого збігу яскравого червоного світлового зайчика на шкалі з його відбиттям на задній поверхні шкали. Це дозволить максимально усунути помилку паралакса. Запишіть у таблицю 5.1 кут відхилення покажчика  $\alpha$  у кутових градусах і хвилинах.

УВАГА! Ціна поділки шкали дорівнює 24'.

8. Вийдіть із лабораторії через двері 11, клацнувши на її ручці правою клавішею миші. Ви знову опинитесь на стартовій сторінці лабораторної роботи.

9. Повторіть дії пунктів 2 - 8, вибираючи послідовно мішки 2, 3, 4 й 5. Для завершення роботи закрийте вікно браузера.

10. Переведіть значення  $\alpha$  у радіани й внесіть їх у стовпчик 4 таблиці 1. Для цього використовуйте формулу  $\alpha(\text{рад}) = \alpha(^{\circ}) \cdot \pi / 180$ .

11. Використовуючи робочу формулу (3.6) і такі значення параметрів установки:

$$l = 1,2 \text{ м}, m = 0,009 \text{ кг}, g = 9,81 \text{ м/с}^2,$$

обчисліть для кожного випадку значення швидкості кулі  $v_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) і внесіть їх у таблицю 5.1 за допомогою програми Excel. Подальші обчислення варто проводити на тому ж аркуші Excel.

12. Обчисліть середнє значення швидкості кулі  $\langle v \rangle$  :

$$\langle v \rangle = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 v_i$$

і запишіть його в останній рядок таблиці 5.1.

13. Оцініть максимальну абсолютну похибку вимірів швидкості кулі. Для цього виконаєте наступні дії.

1. Знайдіть абсолютні похибки  $\Delta v_i$  кожного вимірювання за формулою

$$\Delta v_i = | \langle v \rangle - v_i |.$$

2. Знайдіть абсолютну похибку швидкості кулі

$$\Delta v = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta v_i.$$

3. Запишіть результат вимірів у вигляді

$$v = \langle v \rangle \pm \Delta v.$$

14. Збережіть аркуш Excel с таблицею вимірів і результатами розрахунків і відправте викладачеві.

## 6. Тести для самоперевірки

1. Що являє собою балістичний маятник?
2. Які сили діють на мішок при його максимальному відхиленні після пострілу?  
Чому дорівнює результуюча цих сил при максимальному відхиленні мішка?
3. Запишіть формулу закону збереження імпульсу для зіткнення кулі з мішком.
4. Як за максимальним відхиленням мішка можна визначити швидкість кулі?
5. Як змінюється швидкість (шлях) при рівноприскореному (рівномірному) прямолінійному русі?
6. Сформулюйте закон збереження повної механічної енергії.

## Лабораторна робота № 10

### ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ТІЛ ЗА ДОПОМОГОЮ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА

#### 1. Мета роботи

Вивчення законів руху математичного та фізичного маятників, експериментальне визначення за їх допомогою прискорення сили тяжіння.

#### 2. Вказівки з організації самостійної роботи студентів

Фізичним маятником називають будь-яке тверде тіло, яке під дією сили тяжіння може вільно коливатися навколо нерухомої горизонтальної осі, що не проходить через центр мас. Якщо тіло являє собою матеріальну точку, яка підвішена на невагомій і нерозтяжній нитці, то такий маятник зветься математичним. У випадках, коли можна знехтувати силами тертя та опором середовища, рух таких маятників можна описати диференціальним рівнянням

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M, \quad (2.1)$$

де  $I$  – момент інерції маятника відносно осі коливання,  $\varphi$  – кут його відхилення від положення рівноваги,  $M$  – момент сил, що діють на маятник.

При малих кутах відхилення, коли можна вважати справедливим співвідношення  $\sin \varphi \approx \varphi$ , коливання маятників близькі до гармонічних. У цьому випадку період коливань математичного маятника пов'язаний тільки з прискоренням вільного падіння у даному місці земної кулі  $g$  та довжиною маятника  $l$  формулою:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (2.2)$$

Період коливань фізичного маятника визначається формулою

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgd}}, \quad (2.3)$$

де  $m$  – маса маятника;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $d$  – відстань від осі підвішування маятника до його центра мас.

Порівнюючи формулу (2.3) з формулою для періоду коливань математичного маятника можна відзначити, що період коливань фізичного маятника збігається з періодом коливань математичного маятника, який має довжину

$$l_{\text{зв}} = \frac{I}{md}.$$



Таку довжину називають **зведеною довжиною** фізичного маятника і позначають  $l_{зв}$ . Точку, яка знаходиться на відстані зведеної довжини маятника від точки опори маятника, називають **центром коливання фізичного маятника**. Можна показати, що точка опори на осі підвішування та центр коливання мають властивість взаємності: якщо вісь підвішування змінити так, щоб вона проходила через центр коливання, то попередня точка підвішування стане новим центром коливання, а період коливань маятника не зміниться.

Згідно з формулою (2.3) період коливань фізичного маятника також залежить тільки від зведеної довжини маятника та прискорення сили тяжіння і не залежить від амплітуди коливань. Незалежність періоду коливань від амплітуди називають **ізохронністю**. Її експериментальне дослідження є одним з методів перевірки основних положень теорії коливань. Властивість ізохронності коливань широко використовується у різноманітних пристроях: годинниках, у приладах для визначення прискорення сили тяжіння, коливань земної кори, прискорення рухомих тіл. прискорення сили тяжіння у різних точках земної поверхні необхідне знання для побудови гравітаційного поля Землі. Вивчення аномалій цього поля дозволяє одержати корисну інформацію для пошуку корисних копалин та внутрішню будову нашої планети.

### 3. Опис реальної установки

Як фізичний маятника використовують однорідний сталевий стержень  $1$ , або стержень з нерухомо закріпленим будь-яким тілом  $3$  (див. рис. 3.1). На стержні знаходиться опорна призма  $2$ , гостре ребро якої є віссю підвісу маятника. Призму можна переміщувати вздовж стержня, змінюючи таким чином відстань від точки опори маятника до його центра мас –  $d$ . Маятник може здійснювати декілька сотень коливань без помітного затухання. Це дозволяє у першому наближенні знехтувати моментом сил тертя і скористатися для визначення періоду коливань формулою (2.3).

Згідно з теоремою Штейнера момент інерції  $I$  такого маятника відносно точки підвісу

$$I = I_c + md^2, \quad (3.1)$$

де  $I_c$  – момент інерції стержня відносно центра мас. Таким чином,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_c}{mgd} + \frac{d}{g}}. \quad (3.2)$$

Аналіз формули (3.2) показує, що період необмежено збільшується  $T \rightarrow \infty$  у двох випадках коли  $d \rightarrow 0$ , або  $d \rightarrow \infty$ .

Період є мінімальним при  $d = \sqrt{\frac{I_c}{m}}$ . Якщо  $T > T_{\min}$ , одне і те ж значення  $T$

досягається при двох різних значеннях  $d$ . Залежність  $T$  від  $d$  зображена на рис. 3.2.

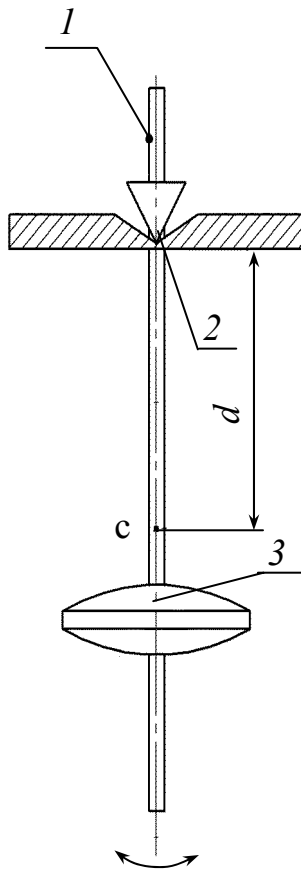


Рис. 3.1

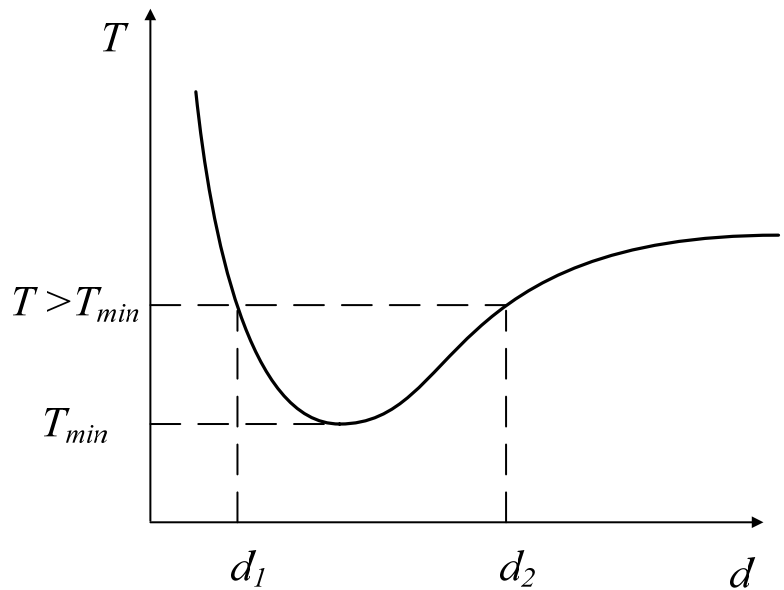


Рис. 3.2

Якщо побудувати такий графік за експериментальними даними, то його можна використати для визначення як зведеної довжини маятника, так і прискорення сили тяжіння. Однак для побудови такого графіка необхідна велика кількість експериментальних точок, а достатня точність при цьому не буде забезпечена. Тому доцільно вибирати такі координати, щоб залежність, яку одержують в експерименті, мала вигляд прямої лінії. Після нескладних перетворень співвідношення (3.2) можна записати таким чином:

$$T^2 d = 4\pi^2 \frac{I_c}{mg} + \frac{4\pi^2}{g} d^2. \quad (3.3)$$

З виразу (3.3) видно, що графік залежності  $T^2 d$  від  $d^2$  має бути лінійним. Кутовий коефіцієнт цієї прямої  $k=4\pi^2/g$ , а відрізок, який відсікається на осі  $T^2 d$ , дорівнює  $b = \frac{4\pi^2 I_c}{mg}$ . Тобто, побудований за експериментальними даними графік можна використати для визначення  $g$  та  $I_c$ .

Для експериментального визначення відстані  $d$  у роботі використовують спеціальну підставку, яка має гостру грань. Якщо маятник зняти з консолі, розташувати на підставці та урівноважити, то відстань від його центра мас, який знаходиться над гранню, до опорної призми і є шуканою відстанню  $d$ .

Такий метод визначення прискорення сили тяжіння дозволяє значною мірою позбавитися від випадкових похибок, які виникають через неможливість

достатньо точно виміряти значення  $I_c$  та  $d$ . Однак систематичні похибки, закладені в цій моделі, наприклад, нехтування силами тертя, зберігаються. Дещо точнішим є метод визначення  $g$  за допомогою обертового маятника.

#### 4. Опис віртуальної установки й правил керування об'єктами

Віртуальна лабораторія складається з однієї кімнати, у якій на стінці закріплено фізичний маятник (див. рис. 4.1).

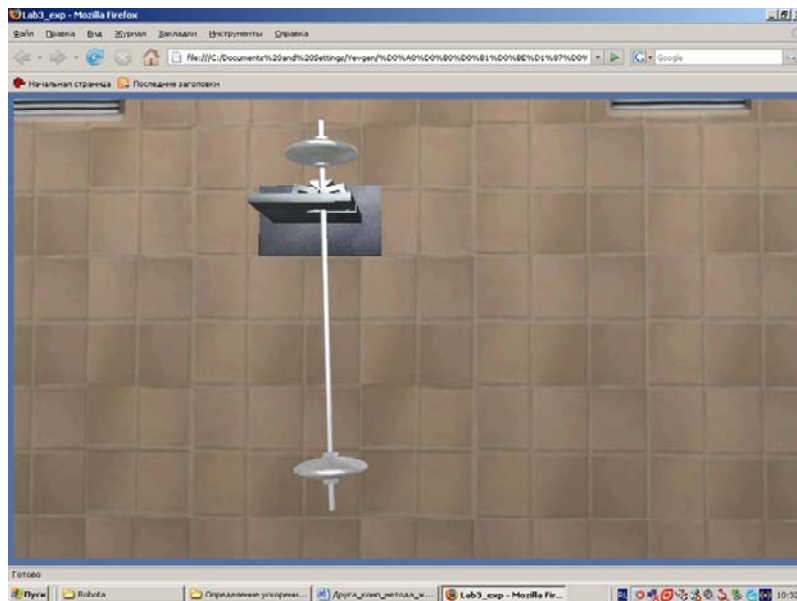


Рис. 4.1

Щоб фізичний маятник почав коливатися, потрібно лівою кнопкою мишки легенько відхилити нижню частину маятника. Під час виконання лабораторної роботи потрібно кожен раз трішки виводити з положення рівноваги нижню частину фізичного маятника. При великих відхиленнях маятник може впасти з кронштейна, на якому він кріпиться до стіни. Якщо так сталося, що маятник впав, то тією ж лівою кнопкою миші можна почепити маятник знову на кронштейн. Але ця дія потребує деякого вміння від користувача.

#### 5. Порядок виконання віртуальної лабораторної роботи

1. Запустіть з компакт-диску файл віртуальної лабораторної роботи Lab3.htm.
2. Відхилити нижній край фізичного маятника на невеликий кут  $\varphi < 5^\circ$  і надати йому можливість здійснювати вільні коливання. Приблизно через 5-10 повних коливань включити секундомір і виміряти  $t$  час 30 повних коливань. Виміри зробити тричі і знайти середнє значення часу  $t_{сер}$ . Дані занести у перший рядок таблиці 5.1. Знайти період коливань  $T$ , розділивши  $t_{сер}$  на 30.

Таблиця 5.1

№ досліду	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_{\text{сеп}}$	$T$	$d$	$g$
1							
2							
3							

- Зменшити початкове відхилення маятника у 1,5 - 2 рази і знову визначити період його коливань  $T$ . Якщо в межах точності вимірювання виявиться, що обидва значення періоду дорівнюють, то для подальших дослідів можна вибрати будь-які значення початкового відхилення, які не перевищують  $\varphi$ . Якщо різниця у вимірних значеннях періодів виходить за межі похибки вимірювань, то слід вибрати за  $\varphi$  менший з використаних кутів і повторити дослідження.
- Закріпити опорну призму на кінці стержня. Виміряти час 30 повних коливань і визначити період коливань. Поклавши маятник на підставку, зрівноважити його і визначити точку  $c$  (центр мас). Виміряти відстань  $d$  між віссю коливання маятника та центром мас.
- Переміщуючи опорну призму вздовж маятника-стержня, визначити періоди коливань маятника ще для п'яти положень опорної призми. Знайти для кожного положення опорної призми значення  $d$ . Одержані дані занести до таблиці.
- Побудувати графік функції  $T^2d$  від  $d^2$  і переконатися в тому, що він - лінійний.
- Визначити параметри одержаної прямої, а за ними значення прискорення вільного падіння  $g$  та момент інерції маятника  $I_c$ . Порівняти знайдене значення  $g$  з табличним.

## 6. Тести для самоперевірки

- Що являє собою фізичний маятник?
- Як визначається період вільних коливань маятника?
- Як і чому залежить значення прискорення вільного падіння від висоти над поверхнею Землі?
- Як і чому залежить значення прискорення вільного падіння від географічної широти?
- Як змінюється швидкість (шлях) при рівноприскореному (рівномірному) прямолінійному русі?
- Сформулюйте закон збереження повної механічної енергії.

## Лабораторна робота № 11

### ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ КРУТИЛЬНИХ ВАГ

#### 1. Мета роботи

Перевірити формулу закону в'язкого тертя Ньютона, визначити динамічну в'язкість повітря.

#### 2. Вказівки з організації самостійної роботи студентів

Згідно з молекулярно-кінетичною теорією газ розглядається як сукупність слабо взаємодіючих частинок, що безупинно і хаотично рухаються. Найпростіша теоретична модель газу – модель ідеального газу з частинок, що не взаємодіють на відстані. Зіткнення частинок відповідають закономірностям абсолютно пружного удару. Модель з достатнім наближенням можна використовувати для того, щоб описати поведінку реальних газів при умовах, близьких до нормальних.

Модель ідеального газу дозволяє одержати просте співвідношення для залежності коефіцієнту динамічної в'язкості газів  $\eta$  від середньої довжини вільного пробігу  $\langle \lambda \rangle$  його молекул:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle v \rangle, \quad (2.1)$$

де  $\rho$  – густина газу,  $\langle v \rangle$  – середня арифметична швидкість руху його молекул. Враховуючи, що густину можна виразити з рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$\rho = \frac{M p}{R T},$$

а середня арифметична швидкість руху молекул визначається за формулою

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}},$$

де  $T$  – термодинамічна температура,  $p$  – тиск,  $R$  – універсальна газова стала,  $M$  – молярна маса, після підстановки наведених вище співвідношень у вираз (2.1) одержуємо формулу для визначення довжини вільного пробігу  $\langle \lambda \rangle$ :

$$\langle \lambda \rangle = 1,5 \frac{\eta}{p} \sqrt{\frac{\pi R T}{2M}}. \quad (2.2)$$

За отриманими значеннями  $\langle \lambda \rangle$  і скориставшись співвідношенням

$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n},$$

можна оцінити ефективний діаметр молекул

$$\sigma = \sqrt{\frac{l}{\sqrt{2} \pi <\lambda> n}}, \quad (2.3)$$

де  $n$  – кількість молекул в одиниці об'єму газу в умовах експерименту. Воно може бути знайдене з рівняння

$$n = n_0 \frac{p T_0}{p_0 T}, \quad (2.4)$$

де  $n_0$  – кількість молекул в одиниці об'єму газу при нормальних умовах. З рівняння (2.3) та (2.4) одержуємо

$$\sigma = \sqrt{\frac{p_0 T}{\sqrt{2} \pi <\lambda> n_0 p T_0}}. \quad (2.5)$$

Величини  $p$  та  $T$ , що входять до рівняння (2.2) та (2.5), можна одержати безпосередньо прямим вимірюванням. Тому для досягнення поставленої у лабораторній роботі мети достатньо експериментально визначити в'язкість повітря.

Існує кілька методів визначення динамічної в'язкості газів, котрі також як і при обчисленні в'язкості рідини, ґрунтуються на експериментальному вимірюванні сили внутрішнього тертя, яка визначається співвідношенням Ньютона.

Проте складність їх практичної реалізації у ряді випадків пов'язана з тим, що для газів в'язкість, а отже і сили внутрішнього тертя, при умовах, близьких до нормальних, на 5-6 порядків менша відповідних значень для рідин. Тому використані методики повинні передбачити можливість вимірювання малих значень сил або їх моментів.

В даній лабораторній роботі пропонується ознайомитися з двома найбільш розповсюдженими методами вимірювання в'язкості газів. Перший метод ґрунтується на безпосередньому вимірюванні моменту сил внутрішнього тертя за допомогою крутильних ваг. У другому методі використовуються закономірності протікання газу (або рідини) крізь капіляр круглого перерізу. В такому разі, згідно з формулою Пуазейля в'язкість газу визначається за співвідношенням

$$\eta = \frac{\pi \Delta p r^4 t}{8 l V}, \quad (2.6)$$

де  $\Delta p$  – перепад тиску на кінцях капіляра;  $V$  – об'єм газу, який пройшов крізь капіляр круглого перерізу довжиною  $l$  за час  $t$ ;  $r$  – радіус капіляра.

У формулі (2.6) усі величини в правій частині можуть бути визначені безпосереднім вимірюванням і, отже, вона може бути використана для експериментального визначення в'язкості.

### 3. Опис реальної установки

Схема установки наведена на рис. 3.1. Основним її елементом є чутливі крутильні ваги. На штативі 1 за допомогою вставних втулок 2 закріплена тонка вольфрамова нитка 3, яку натягають за допомогою гвинта на нижній закріплюючій втулці. Посередині нитки встановлено втулку 4 з закріпленими на ній двома важелями, лопатями 5 та 9. На відстані декількох міліметрів від лопаті 9 знаходиться легкий жорсткий диск 10, насаджений на вал електродвигуна, число обертів якого можна регулювати. Відстань між лопатями крутильних ваг і диском може змінюватись від 1 до 5 мм переміщенням диску уздовж вала двигуна. Для заспокоєння коливань рухомої частини ваг (демпфірування) друга лопать крутильного тіла 4 частково занурена у посудину з рідиною 6.

Якщо ввімкнути електродвигун, на лопать 9 буде діяти сила внутрішнього тертя, яка описується співвідношенням Ньютона для в'язкого тертя:

$$F_{mp} = \eta S \frac{dv}{dx}, \quad (3.1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт внутрішнього тертя (динамічна в'язкість);  $dv/dx$  – градієнт швидкості;  $S$  – площа поверхні лопаті. Під дією цієї сили на крутильне тіло діє крутильний момент  $M = F_{mp}l$  (де  $l$  – плече), котрий приводить до закручення нитки. У стані рівноваги кут закручування нитки пропорційний моменту сил:

$$\alpha = \gamma M, \quad (3.2)$$

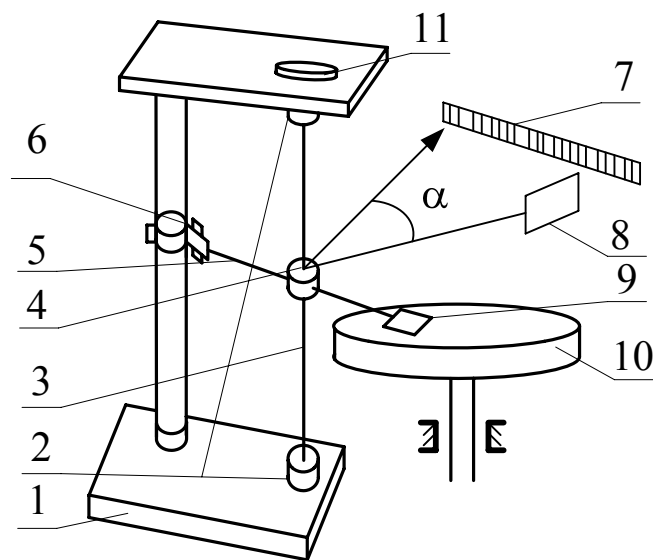


Рис. 3.1

де  $\gamma$  – чутливість терезів. Це дозволяє використовувати крутильні ваги для вимірювання сили внутрішнього тертя за результатами вимірювання кута закручування  $\alpha$ . Підрахунок кута закручування проводять за допомогою світлового зайчика, спрямованого з джерела світла 8 на дзеркало, закріплене на втулці 4. Враховуючи, що кут закручування малий, можна записати

$$\alpha = \Delta n / 2 a, \quad (3.3)$$

де  $\Delta n$  – зміщення світлового зайчика від початкового положення, відраховане за шкалою 7,  $a$  – відстань від дзеркала до шкали 7.

Для встановлення зайчика в початкове положення системи (в середнє положення шкали), верхня втулка 2 може обертатися за допомогою гвинта 11.

Чутливість крутильних терезів визначається параметрами нитки (модулем зсуву матеріалу нитки, її діаметром і довжиною). Вона може бути визначена експериментально з використанням залежності періоду коливань рухомої системи ваги від чутливості нитки. Аналіз рівняння крутильних коливань показує, що при малому затуханні рухома система буде здійснювати коливання з періодом  $T$ , рівним:

$$T = 2\pi\sqrt{J\gamma}, \quad (3.4)$$

де  $J$  – момент інерції терезів.

Конструкція установки дозволяє змінювати за допомогою допоміжних важків, встановлених на важелі, що з'єднують лопаті 5 і 9 з втулкою 4. Якщо виміряти період коливань терезів для двох положень допоміжних важелів 1 і 2, то, відповідно до формули (10), можна записати

$$T_1^2 - T_2^2 = 4\pi^2 (J_1 - J_2) \gamma, \quad (3.5)$$

де  $J_1$  і  $J_2$  – моменти інерції терезів у положенні важків 1 і 2.

Згідно з теоремою Штейнера:

$$J_1 = J_0 + 2ml_1^2; \quad J_2 = J_0 + 2ml_2^2, \quad (3.6)$$

де  $J_0$  – момент інерції крутильного тіла;  $ml_1^2$  і  $ml_2^2$  – моменти інерції важків у положенні 1 або 2;  $l_1$  і  $l_2$  – відстань від важків до осі обертання в першому і другому випадках.

З формул (3.2) та (3.5) витікає розрахункова формула для визначення чутливості терезів

$$\gamma = \frac{T_1^2 - T_2^2}{8\pi^2 m(l_1^2 - l_2^2)}. \quad (3.7)$$

#### 4. Опис віртуальної установки й правил керування об'єктами

Віртуальна установка виглядає наступним чином (див. рис. 4.1). На металевій плиті 1 закріплено колону 2 з двома кронштейнами 3, між якими натягнута тонка вольфрамова нитка 4. На колоні 2 також зафіксований електромагніт 5, що при взаємодії зі сталеву пластинкою 6 забезпечує згасання (демпфірування) небажаних коливань важеля 7. Центр мас важеля 7 зафіксовано на вольфрамовій нитці 4 і до нього прикріплено дзеркальце, яке відбиває на шкалу 8 світловий промінь від лазера, закріпленого по центру шкали (для проходження світлового променя від лазера до дзеркальця у центрі шкали 8 є маленький отвір). Електродвигун з диском 9 створює потік повітря на лопать, що зафіксована на іншому кінці важеля 7. Цей потік й призводить до



обертання важеля 7 і закручування нитки 4. Частоту обертання диска можна змінювати реостатом 10.

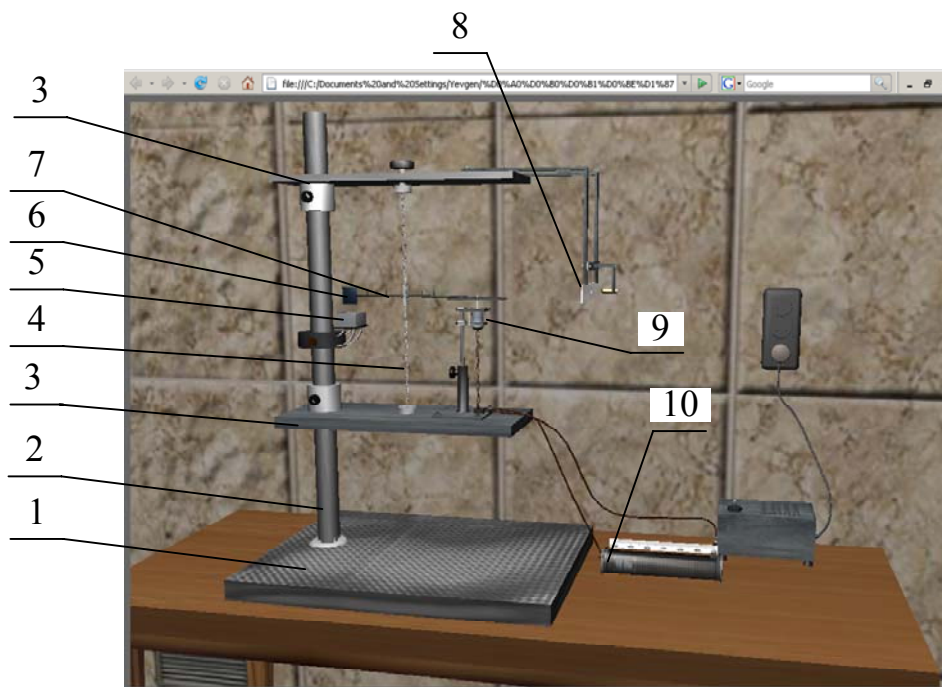


Рис. 4.1

## 5. Порядок виконання віртуальної лабораторної роботи

1. Запустіть з компакт-диску файл віртуальної лабораторної роботи Lab8.htm).
2. Визначення чутливості крутильних ваг: установити на важелі крутильних ваг додаткові важки; обережно відвести крутильне тіло з положення рівноваги; за час 10 повних коливань, виміряних за допомогою секундоміра, визначити період коливань  $T_1$ ; пересунути важок на важелях у інше положення і визначити період коливань  $T_2$ ; виміряти відстань  $l_1$  і  $l_2$ ; за формулою (3.7) обчислити чутливість крутильних ваг.
3. Перевірити формулу для закону в'язкого тертя Ньютона, визначивши динамічну в'язкість повітря. Для цього встановити між лопаттю і диском на електродвигуні 9 відстань 1 мм; увімкнути електродвигун і виміряти кут закручування при найменшій швидкості обертання електродвигуна  $\omega$ ; визначити силу внутрішнього тертя  $F_{тр}$  за формулою

$$F_{тр} = \Delta n / 2l\gamma a, \quad (5.1)$$

де  $l$  – відстань від крутильного тіла до центра лопатів.

4. Виконати таке ж вимірювання ще для 5-6 значень кутової швидкості.
5. Побудувати графік залежності  $F_{тр} = f(\omega)$  і переконатися, що ця залежність лінійна.

6. Визначити значення кутового коефіцієнту  $K$  нахилу прямої.

7. Розрахувати в'язкість повітря за формулою

$$\eta = \frac{\Delta x}{RS} K, \quad (5.2)$$

де  $R$  – відстань від осі обертання диска до центра лопаті.

8. Для чотирьох значень відстані між диском і лопатю крутильних ваг  $\Delta x$ , визначити силу внутрішнього тертя  $F_{\text{тр}}$  при постійній кутовій швидкості  $\omega$ , виконавши пп.. 1-3.

9. Побудувати графік залежності  $F_{\text{тр}}=f(\Delta x)$  та проаналізувати його на основі закону (3.1).

### **6. Тести для самоперевірки**

1. Що являє собою прилад крутильних терезів?
2. Які сили діють на важіль 7 при його обертанні?
3. Запишіть формулу закону збереження моменту імпульсу для важеля.
4. Як за відхиленням важеля можна визначити в'язкість повітря?
5. Як змінюється швидкість (шлях) при рівноприскореному (рівномірному) прямолінійному русі?
6. Сформулюйте закон збереження повної механічної енергії.

## Лабораторна робота № 12

# ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТА ІНЕРЦІЇ ТІЛ ЗА ДОПОМОГОЮ МАЯТНИКА МАКСВЕЛА

### 1. Мета роботи

Вивчити рух маятника Максвелла і визначити з його допомогою момент інерції кільця.

### 2. Вказівки з організації самостійної роботи студентів

Моментом інерції матеріальної точки відносно осі  $z$  називається добуток маси матеріальної точки  $m$  на квадрат її відстані  $r$  до осі обертання:

$$I_z' = mr^2.$$

Момент інерції твердого тіла відносно осі  $z$ , являє собою суму моментів інерції матеріальних точок, з яких складається тіло:

$$I_z = \sum_{i=1}^n I_{z_i}' = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$$

Момент інерції однорідного і симетричного тіла в формі кільця можна визначити експериментально за допомогою маятника Максвелла. Потенціальна енергія маятника в полі сили тяжіння переходить в кінетичну енергію обертального руху і навпаки.

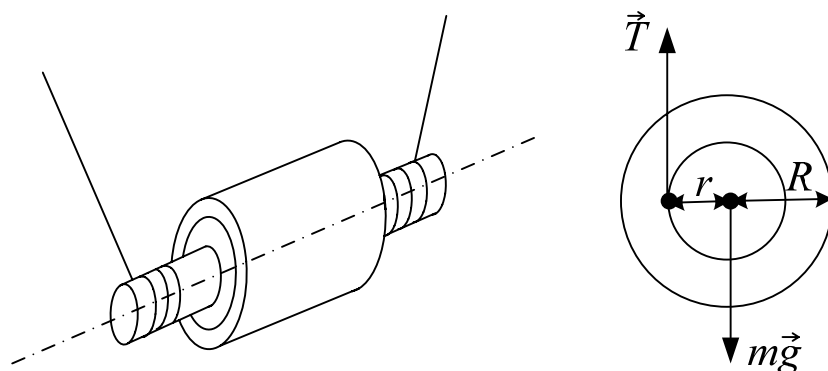


Рис. 2.1

Маятник Максвелла зображено на рис. 2.1. Він являє собою однорідний металевий диск радіуса  $R$ , у середині якого закріплено металевий стержень меншого радіуса  $r$ . До кінця цього стержня прикріплені дві міцні нитки. При

звільненні маятник починає рухатися поступально вниз і обертально навколо своєї осі симетрії.

Обертання, продовжуючись за інерцією в нижній точці руху (коли нитки вже розмотані), призводить знову до намотування ниток на стержень, а отже, і до підйому маятника. Рух маятника сповільнюється, він зупиняється у верхній точці, а потім знову починає свій рух униз.

Для маятника Максвелла, що обертається під дією сили тяжіння й опускається з прискоренням  $a_0$  без врахування сил тертя, можна записати основне рівняння поступального руху

$$m_0 a_0 = m_0 g - 2T; \quad (2.1)$$

основне рівняння обертального руху

$$I_0 \beta = 2 T r; \quad (2.2)$$

і рівняння, що пов'язує лінійне з кутовим прискоренням

$$a_0 = \beta r; \quad (2.3)$$

де  $m_0$  – маса маятника;

$I_0$  – момент інерції маятника;

$g$  – прискорення сили ваги;

$r$  – радіус стержня;

$T$  – сила натягу кожної з двох ниток;

$a_0$  – прискорення поступального руху центра інерції маятника;

$\beta$  – кутове прискорення маятника,

Вимірюючи час  $t$  і висоту  $h$  падіння маятника, прискорення  $a_0$  можна визначити за формулою

$$a_0 = \frac{2h}{t^2}. \quad (2.4)$$

Спільний розв'язок рівнянь (2.1) – (2.3) дозволяє одержати вирази для моменту інерції маятника

$$I_0 = \frac{m_0 (g - a_0) r^2}{a_0}. \quad (2.5)$$

Якщо на диску маятника закріпити однорідне кільце з віссю симетрії, яка збігається з віссю маятника, то можна визначити момент інерції системи

$$I_c = \frac{(m_0 + m_k)(g - a_c)r^2}{a_c}, \quad (2.6)$$

де  $m_k$  – маса кільця;

$a_c$  – прискорення руху системи.

З іншого боку момент інерції системи є сумою моментів інерції маятника та кільця. Тому момент інерції кільця визначимо за формулою

$$I_k = I_c - I_0. \quad (2.7)$$

### 3. Опис реальної установки

На рис. 3.1 зображена схема реальної установки. Вона складається зі штанги з лінійкою 1, на якій кріпиться пристрій для фіксації маятника 2, самого маятника Максвелла 3 та пристрою для відліку часу падіння маятника 4. У звичайному стані маятник Максвелла з намотаними на стержень нитками закріплений у верхній точці за допомогою електромагніта. Пуск маятника здійснюється шляхом його звільнення за допомогою спеціального електронного пристрою, зв'язаного з цифровим секундоміром. Секундомір фіксує час падіння маятника.

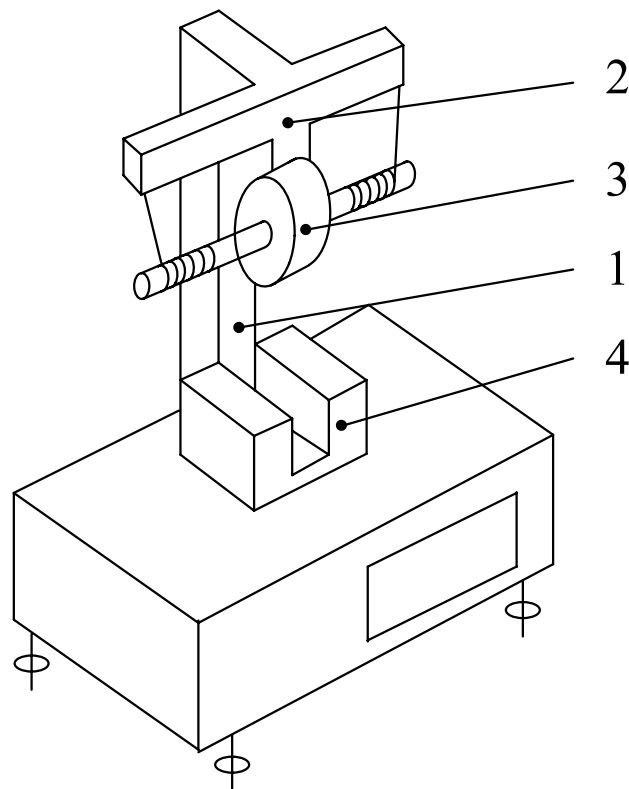


Рис. 3.1

#### 4. Опис віртуальної установки й правил керування об'єктами

Віртуальна установка виглядає наступним чином (див. рис. 4.1). На металевій плиті 1 закріплено колонну 2 з двома кронштейнами 3. До верхнього кронштейна прив'язано дві нитки 4, до яких кріпиться дзига 5. У верхній точці дзига фіксується електромагнітом, який вимикається кнопкою 6. Електронний блок 7 служить для виміру часу спуску дзиги. Цей час вказує індикатор 8. Набір досліджуваних кілець міститься у скрині 9.

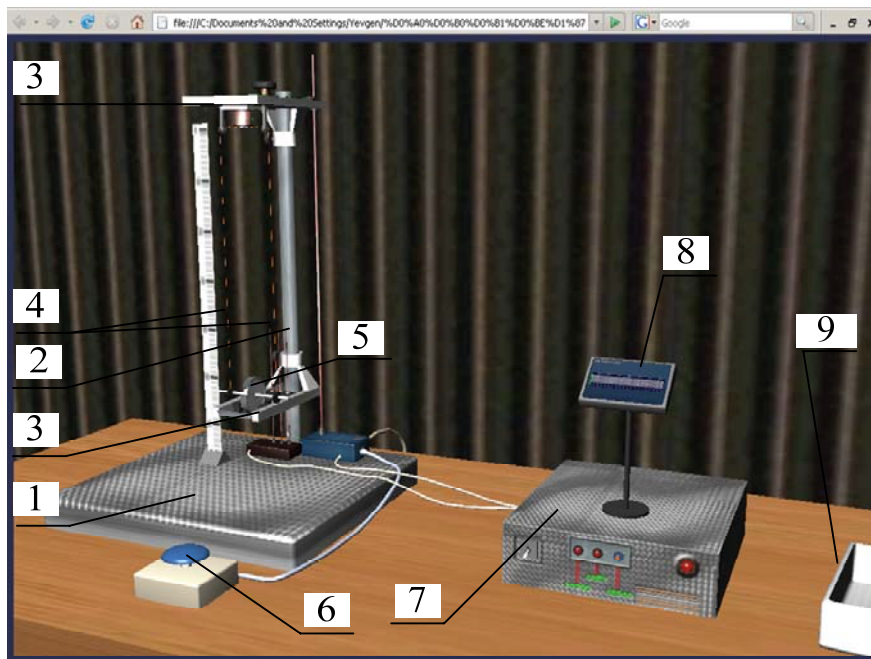


Рис. 4.1

#### 5. Порядок виконання віртуальної лабораторної роботи

1. Запустіть з компакт-диску файл віртуальної лабораторної роботи (Lab4.htm).
2. Визначити масу маятника Максвелла  $m_0$ , яка є сумою мас стержня і диска. Значення останніх вибиті на маятнику. Виміряти за допомогою лінійки радіус  $r$  стержня маятника Максвелла.
3. Взяти у викладача три значення шляху руху маятника  $h$ . Записати значення  $m_0$ ,  $r$  і  $h$  у табл. 5.1.
4. Намотуючи нитки, підняти маятник Максвелла на першу задану висоту  $h$  і зафіксувати його за допомогою фіксуючого пристрою.

5. Натиснувши кнопку 6, звільнити маятник. При цьому автоматично включиться цифровий секундомір, який покаже час першого падіння маятника  $t$ .
6. Двічі виконати п. 4 – 5. Цим самим ми знайшли три значення часу руху маятника  $t$ , які відповідають першому з трьох значень  $h$ .
7. Знайти середнє значення часу  $t$ . За формулою (2.4) обчислити прискорення поступального руху маятника Максвелла  $a_0$ .
8. За формулою (2.5) обчислити момент інерції маятника Максвелла  $I_0$ . Результати вимірювань і обчислень занести у табл. 5.1.
9. Повторити п. 4 – 8 для двох інших значень шляху  $h$ .
10. Обчислити середнє значення моменту інерції маятника  $I_{0\text{сеп}}$ .
11. Закріпивши на диску маятника кільце і визначити масу кільця.
12. Повторити дії, які вказані в п.4 – 9, для тих же значень  $h$ , але для системи “маятник + кільце”. Прискорення  $a_c$  і момент інерції  $I_c$  системи обчислювати за формулами (2.4) і (2.6) відповідно. Результати вимірювань і обчислень записати у табл. 5.2.
13. Обчислити середнє значення моменту інерції системи  $I_{c\text{сеп}}$ .
14. Використавши середні значення моментів інерції системи  $I_{c\text{сеп}}$  та маятника  $I_{0\text{сеп}}$ , за формулою (2.7) обчислити момент інерції кільця  $I_k$ .

Таблиця 5.1

№	$m_o$	$R$	$h$	$t$	$t_{\text{сеп}}$	$a_0$	$I_0$	$I_{0\text{сеп}}$
1								

Таблиця 5.2.

№	$m_k$	$h$	$t$	$t$	$t_{\text{сеп}}$	$a_c$	$I_c$	$I_{c\text{сеп}}$
1								

## 6. Тести для самоперевірки

1. Що являє собою маятник Максвелла?
2. Які сили (моменти сил) діють на маятник Максвелла при його обертанні?
3. Запишіть формулу закону збереження моменту імпульсу для маятника Максвелла.
4. Як змінюється кутова швидкість (кут повороту тіла) при рівноприскореному (рівномірному) обертальному русі?
5. Як перетворюється енергія під час руху маятника Максвелла?
6. Сформулюйте закон збереження повної механічної енергії.

## ДОДАТКИ

### Д.1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ ПОХИБОК

Якими б точними не були прилади, досконалими методи вимірювань, при вимірюванні фізичної величини  $X$  (часу, довжини, тощо) неможливо отримати точне, “істинне значення” величини  $X_{ict}$ .

Якщо позначити  $X_i$  результат деякого  $i$ -того вимірювання величини  $X$ , то величину

$$\Delta X_i = X_i - X_{ict} \quad (Д.1)$$

називають абсолютною похибкою даного вимірювання. Для характеристики точності вимірювання вводять також поняття відносної похибки

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{ict}}. \quad (Д.2)$$

Завдання, яке стоїть перед теорією похибок є визначення похибок вимірювання фізичних величин.

Вимірювання поділяються на прямі та непрямі. Прямим називають вимірювання, завдяки якому значення величини знаходять безпосередньо з показань приладу. Прикладами прямих вимірювань є: вимірювання температури за допомогою термометра; довжини штангенциркулем тощо.

При непрямих вимірюваннях значення фізичної величини знаходять завдяки відомій залежності цієї величини від величин, які можуть бути виміряні шляхом прямих вимірювань. Наприклад, густину тіла – за його масою та розмірами, тощо.

Найважливіший клас похибок – випадкові похибки. Ці похибки обумовлені недосконалістю наших органів чуттів, а тому не можуть бути усунуті.

### Д.2. РОЗРАХУНОК ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК ДЛЯ ПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

Хай, вимірюючи багато разів деяку фізичну величину, наприклад, час, за який тіло проходить одну і ту ж відстань  $S$  отримали ряд значень  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ , тоді за  $X_{ict}$  приймають середнє арифметичне значення

$$\langle X \rangle = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad (Д.3)$$

яке при  $N \rightarrow \infty$  повинно збігатися з  $X_{ict}$ .

Найважливіше завдання теорії похибок – знаходження інтервалу значень фізичної величини, в середині якого з деякою ймовірністю (яку називають довірчою ймовірністю) знаходиться величина

$$(\langle X \rangle - \Delta X) < X_{ict} < (\langle X \rangle + \Delta X). \quad (Д.4)$$

Якщо, наприклад, ми гарантуємо, що вимірюючи один раз величину  $X$  за даною методикою, отримаємо результат, який лежить в межах даного інтервалу (Д.4) з гарантією 95%, то довірна ймовірність  $P_{дов}$  буде дорівнювати  $P_{дов}=0,95$ .



Для обґрунтування методу обчислення похибок, треба встановити закон, якому підпорядковуються випадкові відхилення величини, що вимірюється. Ми тільки вкажемо основну ідею, яка полягає в припущенні (що є виправданим): невеликі відхилення  $\Delta X$  від  $X_{icm}$  є більш ймовірними ніж великі. На цій ідеї базується нормальний закон розподілу – закон Гауса. Але цей закон справедливий для великого числа вимірювань  $N$ .

В інженерній практиці базуються на розподілі Ст'юдента. Для кожної довірчої ймовірності  $P$  можна обчислити таке число  $t_{NP}$  (коефіцієнт Ст'юдента) для якого випадкова величина  $X$ , що підпорядковується розподілу Ст'юдента, буде знаходитися в межах

$$\langle X \rangle - t_{NP} \delta < X_{icm} < (\langle X \rangle + t_{NP} \delta), \quad (Д.5)$$

де величина  $\delta$  – середньоквадратичне відхилення результату вимірювань, яке визначається формулою

$$\delta = \sqrt{\frac{(X_1 - \langle X \rangle)^2 + (X_2 - \langle X \rangle)^2 + \dots + (X_N - \langle X \rangle)^2}{N(N-1)}} = \frac{\sqrt{(X_1 - \langle X \rangle)^2}}{N(N-1)}$$

$N$  – число вимірювань,  $t_{NP} \delta = \Delta X$ .

Коефіцієнти Ст'юдента для різного числа вимірювань наведено в таблиці 12

Таблиця 12

N	2	3	4	5	10	100
$t_{NP}$	12.7	4.3	3.2	2.8	2.0	2.0

### Д.3. РОЗРАХУНОК ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК ДЛЯ НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

При непрямих вимірюваннях значення фізичної величини  $F$  визначається за формулою

$$F = F(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (Д.7)$$

(Д.1.7)

де  $X_1, X_2, \dots, X_n$  фізичні величини, які вимірюються прямо.

Абсолютна похибка  $\Delta F$  непрямих вимірювань визначається за формулою:

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial X_1} \Delta X_1\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial X_2} \Delta X_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial X_N} \Delta X_N\right)^2}, \quad (Д.8)$$

де  $\partial F / \partial X_i$  – частинна похідна функції  $F$  за змінною  $X_i$  (при її обчисленні інші змінні  $X_j$ , ( $j=i, j=1-N$ ) вважаються сталими величинами);  $\Delta X_i$  – абсолютна похибка вимірювання величини  $X_i$ .

Результат непрямого вимірювання (кінцевий результат у звіті) подається у вигляді

$$F = \langle F \rangle \pm \Delta F, \quad (Д.9)$$

де  $F = (\langle X_1 \rangle, \langle X_2 \rangle, \dots, \langle X_n \rangle)$  – значення функції  $F$  від середніх значень змінних.

#### Д.4. ПРАВИЛА ЗАОКРУГЛЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ОБЧИСЛЕНЬ

1. У результаті обчислень абсолютної похибки вимірювань фізичної величини треба залишати лише першу значущу цифру.
2. У середньому значенні величини остання значуща цифра повинна бути одного й того ж порядку, що й перша значуща цифра похибки.

**Приклад.** При обчисленні прискорення земного тяжіння  $g$  були отримані результати:

$$\langle g \rangle = 9,767 \dots \text{м/с}^2; \Delta g = 0,2364 \dots \text{м/с}^2.$$

У відповідності з формулою (Д.9) та правилами (1,2) маємо

$$\langle g \rangle = (9,7 \pm 0,2) \text{ м/с}^2.$$

## ЗМІСТ

	Стор.
Передмова.....	3
<b>Лабораторна робота 1.</b> Вивчення вільного падіння.....	4
<b>Лабораторна робота 2.</b> Вимірювання коефіцієнта в'язкості рідини за методом Стокса.....	8
<b>Лабораторна робота 3.</b> Визначення середньої довжини вільного пробігу молекули.....	13
<b>Лабораторна робота 4.</b> Вивчення методів графічного зображення електричного поля.....	17
<b>Лабораторна робота 5.</b> Вимірювання електричного опору провідників за методом моста Уїтстона.....	21
<b>Лабораторна робота 6.</b> Осцилографування фізичних процесів.....	25
<b>Лабораторна робота 7.</b> Вивчення магнітного поля кругового Витка та соленоїда.....	31
<b>Лабораторна робота 8.</b> Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона.....	35
<b>Лабораторна робота 9.</b> Застосування законів збереження для визначення швидкості польоту кулі.....	41
<b>Лабораторна робота 10.</b> Визначення прискорення вільного падіння тіл за допомогою фізичного маятника.....	48
<b>Лабораторна робота 11.</b> Вимірювання в'язкості з допомогою крутильних ваг.....	53
<b>Лабораторна робота 12.</b> Визначення моменту інерції тіл за допомогою маятника Максвелла.....	59
Додатки .....	64
Д.1. Основні положення теорії похибок.....	64
Д.2. Розрахунок випадкових похибок для прямих вимірювань.....	64
Д.3. Розрахунок випадкових похибок для непрямих вимірювань.....	65
Д.4. Правила заокруглювання результатів обчислень.....	66

## НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки до виконання комп'ютерних лабораторних робіт з фізики (для студентів 1 курсу денної і заочної форм навчання бакалаврів за напрямками 6.050701 - “Електротехніка та електротехнології”, 6.040106 “Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування”, 6.060101 “Будівництво”, 6.050702 “Електромеханіка”, 6.060103 “Гідротехніка (водні ресурси)”, 6.070101 “Транспортні технології (за видами транспорту)”, 6.080101 “Геодезія, картографія та землеустрій”)

Укладачі: **Петченко** Олександр Матвійович,  
**Безуглий** Анатолій Васильович,  
**Назаренко** Євгеній Іванович,

Редактор: М. З. Аляб'єв

План 2009, поз. 287-М

Підп. до друку 02.07.09	Формат 60х84 1/16.	Друк на ризографі
Ум.-друк. арк. 1,6.	Зам. №	Тираж 48 прим.

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК №731 від 19.12.2001