

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування
Кафедра хімії та фізики

05-06-162M

METHODICAL GUIDELINES

to the performance of laboratory works to the academic discipline
«Physics» for students of higher education of the first (bachelor's)
level of all educational and professional programs of the specialties
of the NUWEE of all forms of study

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з освітнього компоненту
«Фізика» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського)
рівня усіх освітньо-професійних програм спеціальностей
НУВГП усіх форм навчання

Схвалено науково-методичною
радою НУВГП
Протокол № 7 від 18.06.2025 р.

Methodological guidelines to the performance of laboratory works to the academic discipline «Physics» for students of higher education of the first (bachelor's) level for all educational and professional programs of the specialties of the NUWEE of all forms of study [Electronic edition] / Moroz M. V., Rudyk B. P., Garashchenko O. V., Gayevskii V. R., Soliak L. V. Rivne : NUWEE, 2025. 78 p.

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Фізика» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня усіх освітньо-професійних програм спеціальностей НУВГП усіх форм навчання [Електронне видання] / Мороз М. В., Рудик Б. П., Гаращенко О. В., Гаєвський В. Р., Соляк Л. В. Рівне : НУВГП, 2025. 78 с.

Укладачі: Мороз М. В., д.х.н., професор кафедри хімії та фізики; Рудик Б. П., к.ф.-м.н., доцент кафедри хімії та фізики; Гаращенко О. В., к.т.н., доцент кафедри хімії та фізики; Гаєвський В. Р., к.т.н., доцент кафедри хімії та фізики; Соляк Л. В., ст. викладач кафедри хімії та фізики.

Відповідальний за випуск: Мороз М. В., доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри хімії та фізики.

Вчений секретар науково-методичної ради: Костюкова Т. А.

© М. В. Мороз, Б. П. Рудик,
О. В. Гаращенко,
В. Р. Гаєвський, Л. В. Соляк, 2025
© НУВГП, 2025

Contents

Preface	4
Laboratory 1.1. Atwood's Machine.....	6
Laboratory 2.1. Determination of liquid viscosity by the Stokes method	20
Laboratory 3.1. Measurement capacitance of a capacitor by a ballistic galvanometer.....	32
Laboratory 4.2. Verifying of Ampere's law.....	54
Laboratory 5.8. Experimental study of the photoelectric effect	66
References	78

Preface

Integration into the single European higher education space requires appropriate methodological support.

Laboratory work in the academic discipline «Physics» for first-year (bachelor's) level higher education students of all technical specialties corresponds to the approved syllabuses, includes the sections «Mechanics», «Molecular Physics and Thermodynamics», «Electrostatics», «Magnetism» and «Quantum Optics» and is aimed at the practical assimilation of theoretical knowledge given in lectures and practical classes.

The purpose of these laboratory works is to study physical processes and phenomena. The task of laboratory works and methodological instructions is to familiarize students with the basic theoretical concepts, formulas and laws, to teach students how to measure physical quantities, determine the accuracy of measuring instruments and master the methods of processing measurement results.

In the process of performing laboratory work, students must consolidate theoretical knowledge from this section of the program, learn to work with laboratory laboratory equipment and devices. When preparing for laboratory work, the student writes down theoretical material in a separate notebook. Students also need to undergo a briefing on safety rules and register in a special journal. Laboratory work is drawn up in the form of a report of the established form developed by the department.

After completing each laboratory work, it is necessary to defend it by answering the control questions placed at the end of each laboratory work.

Laboratory work missed for any reason must be done with the teacher on duty according to the schedule.

ПЕРЕДМОВА

Інтеграція до єдиного європейського простору вищої освіти передбачає відповідне методичне забезпечення.

Лабораторні роботи з навчальної дисципліни «Фізика» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня всіх технічних спеціальностей відповідають затвердженим силабусам, включають розділи «Механіка», «Молекулярна фізика і термодинаміка», «Електростатика», «Магнетизм» та «Квантова оптика» і спрямовані на практичне засвоєння теоретичних знань, що даються на лекціях і практичних заняттях.

Метою даних лабораторних робіт є вивчення фізичних процесів і явищ. Завданням лабораторних робіт і методичних вказівок є ознайомлення студентів з основними теоретичними поняттями, формулами і законами, навчити студентів вимірюванню фізичних величин, визначенню точності вимірювальних приладів і оволодіння методами обробки результатів вимірювань.

В процесі виконання лабораторної роботи студенти повинні закріпити теоретичні знання з даного розділу програми, навчитися працювати з лабораторним обладнанням та приладами. При підготовці до лабораторної роботи студент записує теоретичний матеріал в окремому зошиті. Також студентам необхідно пройти інструктаж з правил техніки безпеки і зареєструватися в спеціальному журналі. Лабораторна робота оформляється у вигляді звіту встановленої форми, розробленої на кафедрі.

Після оформлення кожної лабораторної роботи необхідно її захистити, відповідаючи на контрольні запитання, розміщення в кінці кожної лабораторної роботи.

Пропущену з будь-якої причини лабораторну роботу треба відробляти з черговим викладачем згідно графіка.

Laboratory 1.1. Atwood's Machine

Objectives:

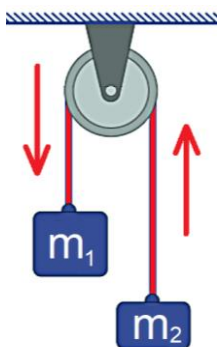
1) to study study basic principles of mechanics (only straight-line motion by now): average and instantaneous velocity and acceleration, Newton's Laws of motion;

2) to find the acceleration of free fall g using Atwood's Machine.

Theory

As we know, Mechanics is the part of Physics and its goal is to predict motion of the bodies. Here we have no plenty of space, so we suggest students use not only our paper, but other [educational courses](#) and [resources](#).

Note: the theory used in this lab is covered in book *University Physics with Modern Physics*, Chapters: 3 (velocity and acceleration), 4 (Newton's Laws), 5.1-5.2.



Background

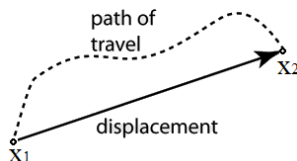
Uniform motion (*рівномірний рух*) in which the body covers equal distances in equal intervals of time. This motion is with constant speed (without acceleration).

Non-uniform motion (*нерівномірний рух*) is the motion with acceleration, where speed is varied.

Displacement (*переміщення*) $\Delta \vec{s}$ is the *vector* distance from some initial point x_1 to a final point x_2 of a

body movement. In cases of nondirect motion the **displacement** is not equal to the **path** (*шлях*) of travel (distance), or even could be equals zero in *rotation motion*.

Average velocity (*середня швидкість*) is the ratio of displacement to time:



$$\vec{v}_{avg} = \frac{\overrightarrow{\text{displacement}}}{\text{time}} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}.$$

Average speed is the ratio of distance to time:

$$\text{speed} = \frac{\text{distance of path}}{\text{time}} = \frac{\Delta d}{\Delta t}.$$

Note that **velocity** $\vec{v}$ is the **vector** value, because it depends on displacement $\Delta \vec{s}$ which is a vector (has magnitude and direction). **Speed is not a vector value**, it does not have direction, just magnitude.

The instantaneous velocity (миттєва швидкість, від *instant* – мить) is the velocity of a body at a particular moment in time. Instantaneous velocity is the derivative of position $d\vec{s}$ with time dt . Also, instantaneous velocity is can be defined as the limit of the average velocity as the time interval Δt shrinks to zero $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t} = \frac{d\vec{s}}{dt}.$$

The acceleration (прискорення) $\vec{a}$ is the rate at which velocity changes with time:

$$\vec{a} = \frac{\overrightarrow{\text{velocity}}}{\text{time}} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

The instantaneous acceleration (миттєве прискорення) is the acceleration of a body at a *particular moment* in time. The instantaneous acceleration is the derivative of velocity $d\vec{v}$ with time dt or the limit of the average velocity $\Delta \vec{v}_{avg}$ as the time interval Δt approaches to zero $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}_{avg}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Newton's 1st Law of motion

describes the behavior of a body when no forces is acting (or it's been



balanced, so net force (*результующая сила*) $\sum \vec{F} = 0$):

A body remains in a state of rest or constant velocity ($\vec{a} = 0$) when no external force acts upon it.

Newton's first Law expresses the principle of inertia: the velocity of the body is constant in the absence of external forces (a straight line motion at $v = \text{constant}$).

The frames (*системи відліку*) with no acceleration ($\vec{a} = 0$), where **Newton's 1st Law** is true, calls '**The Inertial frame of reference**' (*інерціальні системи відліку*). The frames where acceleration $\vec{a} \neq 0$, calls non-inertial frames of reference.

The Earth, in general, is the Inertial frame but with some exceptions because of rotation like Coriolis force.

In everyday life we can neglect these forces from calculation and take Earth as 'flat Inertial frame' or even take it curios, but for long range artillery it is plays significant role.



Newton's 2nd Law describes behavior of a body when the force is acting upon ($\sum \vec{F} \neq 0$):

The rate of change of momentum of the body is proportional to the force on a body.

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

The momentum $\vec{p}$ (*імпульс*) is the product of the mass and velocity of an object, and equals $\vec{p} = m\vec{v}$. Momentum is an important vector value, sometimes it's called '*the quantity of motion*'. For a body with constant mass m , **Newton's 2nd Law** can be rewritten as:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

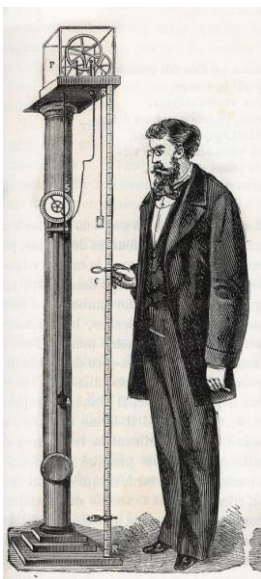
where $\vec{F}$ – applied force, $\vec{a}$ – acceleration of a body.



Newton's 3rd Law is also known as the law of ‘*action and reaction*’. This law is important in analyzing problems of static equilibrium, where all forces are balanced, but it also applies to bodies in uniform or accelerated motion.

*When **two** bodies interact, they exert equal and opposite forces on each other.*

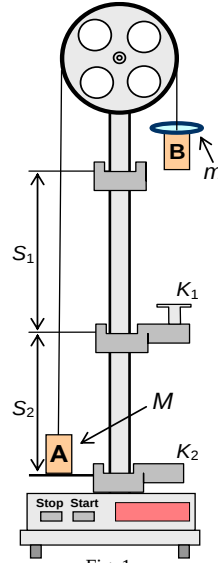
Example: when you are clapping hands, the force of your left hand on your right hand is equal and opposite to the force of your right hand on your left hand. Or when you are sitting on a chair, your force of weight is balanced by force of reaction of the chair, the forces are equal and opposite, so net force $\sum \vec{F} = 0$ and you are not falling down, but sitting still ($v = 0$).



Tension (*натяг*) is the net force of *pulling* on either end of a string. If forces pull at both ends, they are additive. In certain problems, the force at one end of a moving string is not a pulling force, but works in the opposite direction. In that case, it must be subtracted from the force pulling from the other end. (A string with two ‘*pushing*’ forces is not under tension).

Atwood's Machine was invented by English mathematician George Atwood in 1784 to demonstrate the dynamics of Newton's Laws of Motion, uniform and uniformly accelerated movements of bodies. The principle of the Atwood's Machine is very simple: it consists of two weights, a string and a light pulley with low friction. An example of **Atwood's Machine** can be found in our everyday life – is an elevator with its cabin and counterweight.

The Lab device is shown in fig. 1. A light pulley rotates freely around an axis fixed in the upper part of a vertical rack. A string is thrown over the pulley, and hangs two cylinder weights **A** and **B** with equal masses M at the ends, so the system is in balance. On the start position the weight **B** is lifted up (when the button ‘Start’ is not pushed and the electromagnet is holding a pulley). When additional mass m (the ring) can be placed on top of mass **B** (fig. 1), the system of weights goes out of balance and holds only by electromagnet. By pressing the ‘Start’ button, the electromagnet switches off and the system of weight begins to move and passes S_1 path with acceleration. At the moment of passing the Photogate K_1 , the additional load m (overload) is removed by support, and the movement becomes a uniform – S_2 path with no acceleration. The time t_2 of uniform movement S_2 is captured by Photogates K_1 , K_2 and shown on the stopwatch display.



In the upper position the weight **B** with the additional mass m will be equal $M + m$, so the gravity force on **B** will be equal $(M + m)\vec{g}$. Let us first consider the movement of **B**, it experiences two forces: the gravity force $(M + m)\vec{g}$ and tension force $\vec{T}_2$ (fig. 2). So, Newton's 2nd Law for **B** states that:

$$(M + m)\vec{g} - \vec{T}_2 = (M + m)\vec{a}_2, \quad (1)$$

where $\vec{a}_2$ – an acceleration of a weight **B**.

For the mass **A** Newton's 2nd Law states:

$$M\vec{g} - \vec{T}_1 = -M\vec{a}_1, \quad (2)$$

where $\vec{a}_1$ – an acceleration of a weight **A**.

Consider we've got an *ideal Atwood's Machine*, with non frictional, massless pulley and non stretchable massless string. If this is true, we can make two simplifications:

1. The acceleration of **A** is equal in absolute magnitude to the acceleration of **B** and is directed in the opposite direction (we assume that the string does not stretch)

$$\vec{a}_2 = -\vec{a}_1 = |\vec{a}|. \quad (3)$$

2. If we neglect the force of pulley friction, then tension $\vec{T}$ will be equal for masses **A** and **B**, so:

$$\vec{T}_1 = \vec{T}_2 = |\vec{T}| \quad (4).$$

Assuming for '*ideal pulley*', we've got the equation (1) and (2):

$$(M + m)g - T = (M + m)a, \quad (5)$$

$$Mg - T = -Ma. \quad (6)$$

Solving equations (5) and (6) the acceleration equals:

$$a = \frac{mg}{2M + m}. \quad (7)$$

As we see from (4), here we have the uniform acceleration motion. Let's find the displacement S_1 and S_2 from the kinematic equation:

$$S_1 = \frac{at_1^2}{2}, \quad (8)$$

$$S_2 = vt_2 = at_1 t_2, \quad (9)$$

where t_1 is the time of uniform acceleration on a path S_1 and t_2 of uniform motion on a path segment S_2 measured by a stopwatch.

Substituting a and t_1 from (7) and (9) into equation (8), we've got

$$S_1 = \frac{S_2^2 (2M + m)}{2mgt_2^2}. \quad (10)$$

Express the value g from (10):

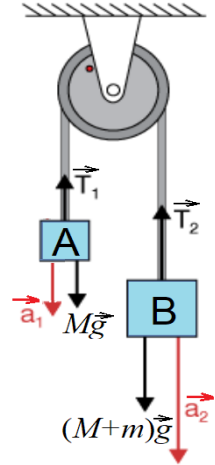


Fig. 2

$$g = \frac{S_2^2(2M + m)}{2S_1mt_2^2}. \quad (11)$$

Procedure

1. Using the millimeter scale on the Lab rack stand, determine the path S_1 of uniformly accelerated motion and S_2 – the path of uniform motion of weight B and write them to the *Table*.

2. Write down the masses of weights M and m to the *Table*.

3. Place the additional weight on weight B and raise it to the upper position.

4. Press the ‘**Reset**’ button of the stopwatch, then press the ‘**Start**’ button.

5. Write down the time t_2 of uniform movement to the *Table*.

6. Repeat the experiment at least five times.

7. Determine the average value of t_2 .

8. Estimate the errors of the values and write them to the *Table*.

9. Use formula (11) to calculate the acceleration of free fall g .

10. Estimate the relative error ε of g according to formula (12).

11. Determine the absolute error Δg by the formula (13).

12. Record the result.

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{2\Delta S_2}{S_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_1}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t_2}{t_2}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta M}{2M + m}\right)^2 + \left(\frac{2M\Delta m}{(2M + m)m}\right)^2} \quad (12)$$

$$\Delta g = \varepsilon \cdot g \quad (13)$$

Table

$M =$

$\Delta M_0 =$

$\Delta S_0 =$

$m =$

$\Delta m_0 =$

$\Delta t_0 =$

No	S_1 , mm	S_2 , mm	t_2 , s
SI	$\times 10^{-3}$ m	$\times 10^{-3}$ m	–
1			
2			
3			
4			
5			
Average			

Questions

1. Give the definition of the instantaneous velocity and instantaneous acceleration vectors.
2. What physical quantity is called the displacement, average speed, velocity, acceleration?
3. What motion is called uniform, non-uniform motion? Write $S(t)$, $v(t)$, the velocity and path formulas for these movements.
4. Inertial frame of reference. What is that? Non-inertial?
5. Formulate Newton's Laws.
6. Draw and explain graphs of dependencies $S(t)$, $v(t)$, $a(t)$ for uniform and uniform movements.
7. *Write the equations for Atwood's Machine in vectors and derive the g formula.

Vocabulary

Atwood's Machine	машина Атвуда
Uniform motion	рівномірний рух
Non-uniform motion	нерівномірний рух
Displacement	переміщення
Path	шлях
Average velocity	середня швидкість
Average speed	середня швидкість
Instantaneous velocity	миттєва швидкість
Acceleration	прискорення
Instantaneous acceleration	миттєве прискорення
Newton's Laws	закони Ньютона
Net force	результируюча сила
Act	дія
Inertia	інерція
Frame	системи відліку
Inertial frame of reference	інерціальні системи відліку
Non-inertial frames of reference	неінерціальні системи відліку
Coriolis force	сила Коріоліса
Momentum	імпульс

Tension	натяг
Pull	тягнути
Push	штовхати
Non frictional, massless pulley	невагомий блок, що рухається без тертя
Non stretchable massless string	нерозтяжна невагома нитка
Kinematic equation	рівняння руху
Neglect	знехтувати
Stopwatch	секундомір
Rack stand	Стійка
Photogate	Фотоелектричний давач (оптопара)

Машина Атвуда

Мета роботи: визначити прискорення вільного падіння.

Теоретичні відомості

(Теорія до даної роботи описана в лекційному курсі (інтерактивного комплексу Ч І, §1.2, §1.4.)

Миттєва швидкість характеризує зміну радіус-вектора в часі. Це швидкість в даний момент часу або в даній точці траєкторії. Вона дорівнює першій похідній радіуса-вектора по часу і напрямлена вздовж дотичної до траєкторії.

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Вектор середньої швидкості рівний відношенню приросту радіуса-вектора $\Delta \vec{r}$ рухомої точки до часу Δt , за який він відбувся

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Миттєве прискорення характеризує зміну швидкості в часі. Воно дорівнює першій похідній швидкості по часу або другій похідній радіуса-вектора по часу

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}.$$

Рівномірним поступальним називається рух зі сталою швидкістю ($\vec{v} = \text{const}$).

Кінематика рівномірного руху : $s = v t$; $v = \text{const}$; $a=0$.

Рівноприскореним називається рух зі сталим прискоренням ($a=\text{const}$).

Кінематика рівноприскореного руху: $S = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$;

$v = v_0 \pm at$; $a=\text{const}$.

Перший закон Ньютона: існують такі системи відліку в яких матеріальна точка (тіло) перебуває в стані спокою або рухається рівномірно і прямолінійно доти, поки дія з боку інших тіл не змусить її змінити цей стан.

Другий закон Ньютона: швидкість зміни імпульсу матеріальної точка (тіла), рівна рівнодійній всіх діючих сил

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} . \quad \text{Для сталої маси } \vec{F} = m \vec{a} .$$

Третій закон Ньютона: сили, з якими взаємодіють два тіла, рівні за модулем і протилежні за напрямком.

$$\vec{F}_{1,2} = \vec{F}_{2,1} .$$

Інерціальними називаються системи відліку, відносно яких виконується перший закон Ньютона.

Неінерціальними називаються системи відліку, які рухаються з прискоренням відносно інерціальної системи.

Опис установки та вивід робочої формули

Машина Атвуда призначена для вивчення поступального руху тіл. Принцип дії приладу оснований на використанні законів Ньютона та рівнянь рівномірного та рівноприскореного рухів.

Прилад зображений на рис. 1. Легкий блок вільно обертається навколо осі, що закріплена у верхній частині вертикальної стійки. Через блок перекинута нитка, на кінцях

якої висять тягарці A і B з рівними масами M . На ці тягарці зверху можна покласти ще один або декілька тягарців різних мас (m). Система тягарців при цьому виходить з рівноваги і починає рухатись прискорено.

В момент проходження фотодатчика K_1 додатковий тягарець знімається, далі рух тягарця B стає рівномірним.

На шкалі секундоміра висвічується час рівномірного руху тягарця B між фотодатчиками K_1, K_2 .

Розглянемо спочатку рух тягарця B . Будемо користуватися нерухомою системою координат, центр якої суміщений з віссю блока. Вісь Ox направимо вниз. Нехай m - маса додаткового тягарця, що знаходиться на тягарі B .

На тягарець B діють дві сили: сила тяжіння $(M + m)g$ і сила натягу правої частини нитки T_2 . За другим законом Ньютона

$$(M + m)g - T_2 = (M + m)a, \quad (1)$$

де a – прискорення тягарця B .

Прискорення тягарця A рівне по величині прискоренню тягарця B і направлене в протилежний бік (вважаємо, що нитка не розтягується).

Нехай сила натягу лівого кінця нитки буде T_1 , тоді

$$Mg - T_1 = -Ma. \quad (2)$$

Якщо знехтувати силою тертя, то

$$T_1 = T_2. \quad (3)$$

З рівнянь (1-3) отримаємо:

$$a = \frac{mg}{2M + m}. \quad (4)$$

З (4) видно, що рух в даному випадку рівноприскорений. Тягарці, рухаючись рівноприскорено, пройдуть шлях

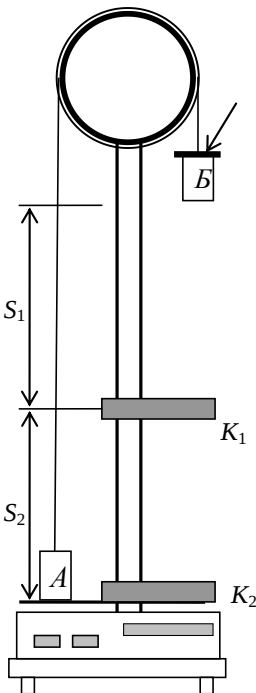


Рис. 1.

$$S_1 = \frac{at_1^2}{2}, \quad (5)$$

де t_1 – час рівноприскореного руху. Тягарці, рухаючись рівномірно, пройдуть шлях

$$S_2 = vt_2 = at_1 t_2,$$

де v – швидкість рівномірного руху, t_2 - час рівномірного руху (вимірюється секундоміром).

$$t_2 = \frac{S_2}{a t_1}. \quad (6)$$

Підставляючи a (4) і t_1 з (6) в рівняння (5), отримаємо

$$S_1 = \frac{S_2^2(2M + m)}{2mgt_2^2}. \quad (8)$$

З рівняння (8) визначимо прискорення вільного падіння

$$g = \frac{S_2^2(2M + m)}{2 S_1 m t_2^2}. \quad (9)$$

Хід роботи

1. Визначити шлях S_1 – рівноприскореного руху і S_2 – рівномірного руху тягарця B за допомогою міліметрової шкали на стійці приладу.
2. Записати маси тягарців M і m .
3. Натиснути кнопку «Пуск».
4. Додатковий тягарець покласти на тягарець B , підняти у верхнє положення і кнопку «Пуск» відтиснути.
5. Натиснути послідовно кнопки “Сброс” , “Пуск” і зняти відлік часу t_2 рівномірного руху тягарця B .
6. Натиснути кнопки “Сброс” , дослід за пунктами 4-5 повторити 5 разів.
7. Визначити середнє значення t_2 .
8. Оцінити паспортні приладові похибки та похибки табличних величин.

9. За робочою формулою (9) обчислити прискорення вільного падіння.
10. Обчислити відносну і абсолютну похибки, записати кінцевий результат.

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{2\Delta S_2}{S_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_1}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t_2}{t_2}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta M}{2M + m}\right)^2 + \left(\frac{2M\Delta m}{(2M + m)m}\right)^2}$$

$$\Delta g = \varepsilon \cdot g .$$

Таблиця результатів вимірювань

$M =$

$\Delta M_0 =$

$\Delta S_0 =$

$m =$

$\Delta m_0 =$

$\Delta t_0 =$

№ з.п.	$S_1,$	$S_2,$	$t_2,$
СІ			
1			
2			
3			
4			
5			
Ср.			

Контрольні питання

1. Дати означення миттєвої швидкості.
2. Дати означення миттєвого прискорення.
3. Яку фізичну величину називають середньою швидкістю?
4. Які рухи називають рівномірним, рівноприскореним? Записати формули швидкості та шляху для цих рухів.
5. Які системи відліку називають інерціальними, неінерціальними?
6. Сформулювати закони Ньютона.

7. Намалювати і пояснити графіки залежностей $a = a(t)$, $v = v(t)$, $s = s(t)$ для рівномірного та рівноприскореного рухів.
8. Вивести робочу формулу.

Laboratory 2.1. Determination of liquid viscosity by the Stokes method

Objectives: to determine the viscosity of the liquid.

Investigate: the conditions for the uniformity of the bead's motion in the liquid under study.

Theory

Molecules of gases and liquids move continuously and chaotically due to thermal motion. At the same time, they exchange impulses and energies. If there is a spatial heterogeneity of density, temperature, or speed of ordered movement of individual layers (шари) in the environment, then an ordered movement is superimposed on the thermal movement of molecules, which leads to the leveling of these inhomogeneities.

Transport phenomena (явища переносу) are the processes of establishing equilibrium in the system through the transfer of mass (diffusion), energy (heat conduction), and the momentum (імпульс) of directional movement (internal friction (внутрішнє тертя) or viscosity).

Background

The phenomenon of diffusion consists in the mutual penetration and mixing of the particles of a substance due to the inhomogeneity of the density or the difference in the concentrations of the components of the mixture in different places of the volume (об'єм). Mass flow occurs in the direction of decreasing density or concentration. The phenomenon is described by **Fick's empirical law**.

$$dM = -D \frac{d\rho}{dz} S dt,$$

where D – is diffusion, which is equal to the mass of matter transferred through a unit of area per unit of time at a unit density gradient; $\frac{d\rho}{dz}$ – density gradient; S – surface area; dt is the transfer time.

If there is a temperature gradient $\frac{dT}{dz}$ along the Z axis, then a heat flow occurs in the direction of decreasing temperature through a surface with an area S perpendicular to the Z axis. The phenomenon of heat conduction is described by the **Fourier's law**.

$$dQ = -K \frac{dT}{dz} S dt ,$$

where dQ is the amount of heat; dt – time interval; K - the thermal conductivity of a substance is the amount of heat passing per unit time through a unit area at a unit density gradient. The mechanism of

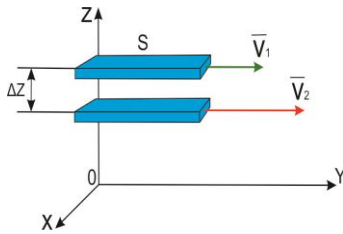


Fig. 1

the phenomenon of heat conduction consists in the transfer of energy of thermal chaotic motion during the collision of molecules.

In the *phenomenon of internal friction* (viscosity), there is a transfer of momentum of directional movement from molecules from layers that move faster to slower ones and vice versa. As a result, the faster layer slows down (сповільнюватися), the slower one accelerates (прискорюватися) (Fig. 1). From a mechanical point of view, this process can be explained by frictional forces that slow down faster and accelerate slower layers of molecules. These forces are directed tangentially to the surface of the contact layers against the relative velocity. The experiment shows that the movement momentum dp transmitted from layer to layer through the surface is proportional to the speed gradient of the layers $\frac{dv}{dz}$, the area of this surface S and the transfer time dt :

$$dp = -\eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S dt .$$

As a result, there is a force of internal friction between the layers

$$F = \left| \frac{dp}{dt} \right| = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S , \quad (1)$$

where η is the viscosity, which depends on the nature of the substance and its state. Equation (1) is Newton's formula for viscous friction. From relation (1) we determine:

$$\eta = \frac{F}{\left| \frac{dv}{dz} \right| S} . \quad (2)$$

Viscosity η – numerically equal to the force of internal friction acting between layers of a unit area at a unit velocity gradient.

Let the body move in the liquid that wets it. A layer of liquid adheres to the surface of the body (due to intermolecular forces of attraction), which will move faster than the adjacent layer. A velocity gradient $\frac{dv}{dz}$ occurs between these layers and this leads to the

appearance of a viscous force (internal friction), which is a resistance force (сила опору). As is known, the force of internal friction between adjacent layers is proportional to the velocity gradient:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S , \quad (3)$$

where S – the area of contact layers.

The layers that are distant from the surface of the body almost do not move. Therefore, the velocity gradient is proportional to the velocity of the body. Thus, the viscous force

$$F = k \cdot u , \quad (4)$$

where u is the speed of the body, k is the proportionality factor, which depends on the nature of the liquid and on the shape and size of the body. Stokes showed that for a bead that moves uniformly at a low speed (in this case, the resistance of the liquid is determined only by the force of friction)

$$F = 6 \pi r \eta u , \quad (5)$$

where r is the radius of the bead.

Let the bead fall in the liquid (Fig. 2). Forces act on it:

$\vec{F}_A$ – buoyant force (виштовхувальна сила); $m\vec{g}$ – the force of gravity; $\vec{F}_\eta$ – the force of viscosity. The modulus net force (рівнодійна сил) is:

$$R = mg - F_A - F_{\epsilon} . \quad (6)$$

The speed of the bead increases until the net force becomes zero, then

$$F_{\epsilon} = mg - F_A \quad (7)$$

$$mg = \rho_1 V g ; \quad (8)$$

$$F_A = \rho_2 V g ; \quad (9)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 . \quad (10)$$

After substituting ratios (5), (8), (9), (10) in (7), we get

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 g (\rho_1 - \rho_2)}{v} , \quad (11)$$

where ρ_1 – the density (густина) of the bead, ρ_2 – the density of the liquid, V – the volume of the bead, g – acceleration due to gravity

(прискорення вільного падіння).

The device for measuring viscosity is a cylinder with liquid (Fig. 3), on which marks are made in the upper and lower parts. The upper mark is at such a height that upon reaching it, the movement of the bead could be considered uniform. If the distance between the marks is l , and the time of fall is t , then the speed.

$$v = \frac{l}{t} . \quad (12)$$

Let's express the radius of the bead in terms of its diameter.

$$r = d/2 . \quad (13)$$

By substituting (12), (13) into (11), we get the working formula:

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{g (\rho_1 - \rho_2) t d^2}{l} . \quad (14)$$

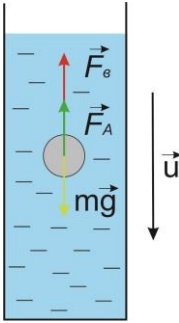


Fig. 2

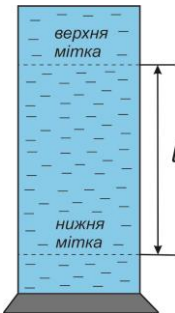


Fig. 3

Procedure

1. Measure the distance l between the upper and lower marks on the beaker using a millimeter scale.
2. Measure the diameter of the bead d using a micrometer (repeat the experiment 5 times).
3. Find the optimal bead throwing height.
4. Throwing the bead from a height above the surface of the liquid, measure with a stopwatch the time of the bead travels a distance l .
5. Record the values of ρ_1, ρ_2, g .
6. To estimate passport instrument errors and errors of table values.
7. Calculate the average value of d .
8. Calculate the liquid viscosity η using working formula (14).
9. Calculate the relative and absolute errors, record the final result.

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \frac{(\Delta \rho_1)^2 + (\Delta \rho_2)^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2}, \Delta \eta = \varepsilon \cdot \eta$$

Table

$\rho_1 =$ $\Delta(\rho_1)_0 =$ $\rho_2 =$ $\Delta(\rho_2)_0 =$
 $g =$ $\Delta g_0 =$ $\Delta l_0 =$ $\Delta d_0 =$ $\Delta t_0 =$

	I bead	II bead	III bead	Average
No	$d, \text{ mm}$	$d, \text{ mm}$	$d, \text{ mm}$	
SI	10^{-3} m	10^{-3} m	10^{-3} m	
1				
2				
3				
Average				
$t, \text{ s}$				
$f, \text{ s} \cdot \text{ m}^2$				
$\Delta f, \text{ s} \cdot \text{ m}^2$				

Questions

1. What phenomena are transfer phenomena? Specify the characteristic features of each of these phenomena.
2. What is the essence of the phenomenon of viscous friction? Write down the expression for the force of internal friction.
3. What is the physical meaning of viscosity?
4. Explain the mechanism of the viscous friction force (сила тертя) acting on a bead moving in a viscous medium.
5. Write the Stokes formula. Derive the working formula (14).
6. How does the speed of a bead change when it falls in a liquid? What is the reason for this? Derive the formula for the constant velocity of the bead.

Vocabulary

accelerate	прискорюватися
acceleration due to gravity	прискорення вільного падіння
buoyant force	виштовхувальна сила
density	густина
diffusion	дифузія
internal friction	внутрішнє тертя
friction force	сила тертя
heat transfer	теплопередача
liquid	рідина
mass transfer	масопередача
momentum	імпульс
net force	рівнодійна сил
non-equilibrium process	нерівноважний процес
resistance force	сила опору
slows down	сповільнюватися
transport phenomena	явища переносу
uniform motion	рівномірний рух
viscosity	в'язкість
volume	об'єм

Визначення в'язкості рідини методом Стокса

Мета роботи: визначити в'язкість рідини.

Дослідити: умови рівномірності руху кулі в досліджуваній рідині.

Теоретичні відомості і опис установки

Молекули газів та рідин внаслідок теплового руху безперервно і хаотично рухаються. При цьому вони обмінюються імпульсами та енергіями. Якщо в середовищі існує просторова неоднорідність густини, температури або швидкості впорядкованого руху окремих шарів, то на тепловий рух молекул накладається впорядкований рух, який веде до вирівнювання цих неоднорідностей.

Явища переносу – це процеси встановлення рівноваги в системі шляхом переносу маси (дифузія), енергії (теплопровідність) та імпульсу напрямленого руху (внутрішнє тертя або в'язкість).

Явище дифузії полягає у взаємному проникненні і перемішуванні частинок речовини внаслідок неоднорідності густини чи різниці концентрацій компонент суміші в різних місцях об'єму. Потік маси виникає в напрямку зменшення густини чи концентрації. Явище описується емпіричним **законом Фіка**.

$$dM = -D \frac{d\rho}{dz} S dt,$$

де D – дифузія, яка дорівнює масі речовини, що переноситься через одиницю площі за одиницю часу при одиничному градієнті густини; $\frac{d\rho}{dz}$ – градієнт густини; S – площа поверхні; dt – час переносу.

Якщо вздовж осі Z існує градієнт температури $\frac{dT}{dz}$, то в напрямку зменшення температури виникає потік тепла через поверхню площею S перпендикулярну до осі Z . Явище *теплопровідності* описує **закон Фур'є**.

$$dQ = -K \frac{dT}{dz} S dt ,$$

де dQ – кількість теплоти; dt – проміжок часу; K – теплопровідність речовини – це кількість теплоти, що проходить за одиницю часу через одиничну площу при одиничному градієнті густини. Механізм явища теплопровідності полягає в передачі енергії теплового хаотичного руху при зіткненні молекул.

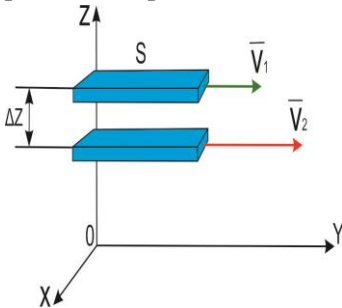


Рис. 1

У явищі внутрішнього тертя (в'язкості) спостерігається перенос імпульсу напрямленого руху від молекул із шарів, які рухаються швидше до повільніших і навпаки. У результаті більш швидкий шар гальмується, менш швидкий прискорюється (рис. 1). Такий процес з механічної точки зору можна пояснити виникненням

сил тертя, які сповільнюють більш швидкий і прискорюють повільніший шари молекул. Ці сили напрямлені по дотичній до поверхні стичних шарів проти відносної швидкості. Дослід показує, що імпульс руху dp , що передається із шару в шар через поверхню пропорційний градієнту швидкості $\frac{dv}{dz}$ шарів, площі цієї поверхні S та часу переносу dt

$$dp = -\eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S dt .$$

В результаті між шарами виникає сила внутрішнього тертя

$$F = \left| \frac{dp}{dt} \right| = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S , \quad (1)$$

де η – в'язкість, яка залежить від природи речовини і її стану. Із співвідношення (1) визначимо:

$$\eta = \frac{F}{\left| \frac{dv}{dz} \right| S} . \quad (2)$$

В'язкість η – чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, яка діє між шарами одиничної площі при одиничному градієнті швидкості.

Нехай тіло рухається в рідині, що його змочує. До поверхні тіла прилипає шар рідини (внаслідок міжмолекулярних сил притягання), який буде рухатись швидше ніж суміжний шар.

Між цими шарами виникає градієнт швидкості $\frac{dv}{dz}$ і це веде до

виникнення сили в'язкості (внутрішнього тертя), яка є силою опору. Як відомо, сила внутрішнього тертя між сусідніми шарами пропорційна градієнту швидкості:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S , \quad (3)$$

де S – площа стичних шарів.

Шари, що віддалені від поверхні тіла, майже не рухаються. Отже градієнт швидкості пропорційний швидкості руху тіла. Таким чином, сила в'язкості

$$F = k \cdot u , \quad (4)$$

де u – швидкість тіла, k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від природи рідини і від форми та розмірів тіла. Стокс

показав, що для кульки, яка рухається рівномірно з невеликою швидкістю (в цьому випадку опір рідини зумовлено лише силою тертя)

$$F = 6 \pi r \eta u , \quad (5)$$

де r – радіус кульки.

Нехай кулька падає в рідині (рис. 2). На неї діють сили:

$\vec{F}_A$ – Архімеда, $m\vec{g}$ – сила тяжіння, $\vec{F}_\epsilon$ – сила в'язкості.

Модуль рівнодійної цих сил

$$R = mg - F_A - F_\epsilon . \quad (6)$$

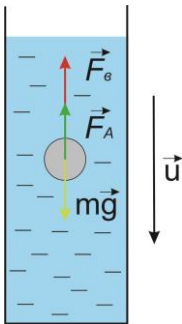


Рис. 2

Швидкість кульки зростає до тих пір, поки рівнодійна не стане рівною нулю, тоді

$$F_g = mg - F_A; \quad (7)$$

$$mg = \rho_1 V g; \quad (8)$$

$$F_A = \rho_2 V g; \quad (9)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3. \quad (10)$$

Після підстановки в (7) співвідношень (5), (8), (9), (10) отримаємо

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 g (\rho_1 - \rho_2)}{v}, \quad (11)$$

де ρ_1 – густина кульки, ρ_2 – густина рідини, V – об'єм кульки, g – прискорення вільного падіння.

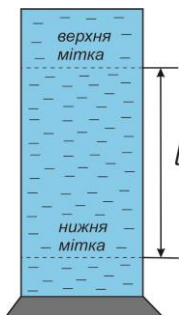


Рис. 3

Установка для вимірювання в'язкості – це циліндр з рідиною (рис. 3), на якому у верхній і нижній частинах зроблені мітки. Верхня мітка знаходиться на такій висоті, щоб при її досягненні рух кульки міг би вважатись рівномірним. Якщо відстань між мітками l , а час падіння t , то швидкість

$$v = \frac{l}{t}. \quad (12)$$

Виразимо радіус кульки через її діаметр

$$r = d/2. \quad (13)$$

Підставивши (12), (13) в (11) отримаємо робочу формулу:

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{g (\rho_1 - \rho_2) t d^2}{l}. \quad (14)$$

Хід роботи

1. Виміряти віддаль l між верхньою і нижньою мітками на мензурці за допомогою міліметрової шкали.
2. Виміряти діаметр кульки d за допомогою мікрометра (дослід повторити 5 разів).

3. Знайти оптимальну висоту кидання кульки h_0 .
4. Кидаючи кульку з висоти h_0 над поверхнею рідини, виміряти секундоміром час проходження кульки віддалі l .
5. Записати значення ρ_1, ρ_2, g .
6. Оцінити паспортні приладові похибки та похибки табличних величин.
7. Обчислити середнє значення величини d .
8. Обчислити за робочою формулою (14) в'язкість рідини η .
9. Обчислити відносну і абсолютну похибки, записати кінцевий результат.

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \frac{(\Delta \rho_1)^2 + (\Delta \rho_2)^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2}$$

$$\Delta \eta = \varepsilon \cdot \eta$$

Таблиця результатів вимірювань

$\rho_1 =$ $\Delta(\rho_1)_0 =$ $\rho_2 =$ $\Delta(\rho_2)_0 =$
 $g =$ $\Delta g_0 =$ $\Delta l_0 =$ $\Delta d_0 =$ $\Delta t_0 =$

	I кулька	II кулька	III кулька	Ср.
№	d , мм	d , мм	d , мм	
CI				
1				
2				
3				
Ср.				
t ,				
f ,				
Δf ,				

Контрольні запитання

1. Які явища відносяться до явищ переносу? Вказати характерні особливості кожного з цих явищ.
2. В чому полягає суть явища в'язкого тертя? Записати вираз для сили внутрішнього тертя.
3. Який фізичний зміст в'язкості?
4. Пояснити механізм виникнення сили в'язкого тертя, що діє на кульку, яка рухається у в'язкому середовищі.
5. Записати формулу Стокса. Вивести робочу формулу (14).
6. Як змінюється швидкість кульки при падінні в рідині? Чим це зумовлено? Вивести формулу для постійної швидкості руху кульки.

Laboratory 3.1. Measurement capacitance of a capacitor by a ballistic galvanometer

Objectives: to determine the electrical capacity of the capacitor.

Theory

Note: the theory used in this lab is covered in book Young H.D., Freedman R.A. University Physics with Modern Physics, Chapter 24, p.788-795.

Background

The electrical capacity (електроємність) C of a conductor (провідник) is a physical quantity that is numerically equal to the charge (заряд) that must be given to the conductor to change its potential by one volt:

$$C = \frac{q}{\varphi} \qquad C = \frac{Q}{V},$$

(Ukrainian) (English),
where $\varphi = V$ is the conductor potential, $q = Q$ is the charge of a conductor.

The SI unit of potential is volt (V), the SI unit of capacitance (ємність) is farad (F), the SI unit of charge in coulomb (C).

Farad (1F) is the electric capacity (or simply the capacity) of such an isolated conductor, the potential of which changes by one volt, when a charge of one coulomb is given to it.

One farad is equal to *one coulomb per volt*:

$$1 \text{ F} = 1 \text{ farad} = 1 \text{ C/V} = 1 \text{ coulomb/volt}.$$

One farad is a very large capacitance. In many applications the most convenient units of capacitance are the microfarad ($1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$) and the picofarad ($1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$).

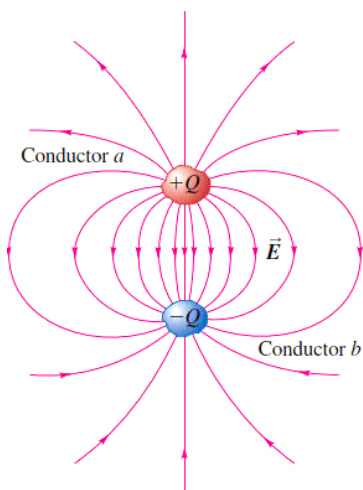


Fig. 1

A system of conductors that has a large capacity for small dimensions (малі розміри) is called a capacitor.

Any two conductors separated by an insulator (діелектрик) (or a vacuum) form a capacitor (Fig. 1).

A capacitor is a device for storing electric charge. Practical capacitors exist in many forms, but each basically consists of two conducting sheets (струмопровідні обкладки) or plats (пластини) separated by an insulator (діелектрик). If a potential difference V_{ab} is applied between the plates, these will acquire (набудуть) equal charges of opposite sign, the value of each charge being proportional to the applied voltage.

The ratio of charge to potential difference does not change. This ratio (the constant of proportionality) is called the capacitance of the capacitor:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U} \quad C = \frac{Q}{V_{ab}} \text{ (definition of capacitance),}$$

(Ukrainian) (English)

where $\varphi_1 - \varphi_2 = U = V_{ab}$ is a potential difference; U is the applied voltage.

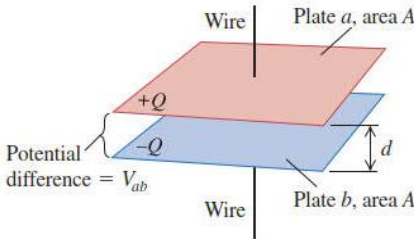


Fig. 2

Depending on the shape (форма) of the plates, flat, cylindrical, spherical and other capacitors are distinguished (розрізняються).

Arrangement of the capacitor plates is on Fig. 2.

We call this arrangement a parallel-plate capacitor (плоско-паралельний конденсатор).

The electric-field magnitude E for this arrangement we can see on Fig. 3.

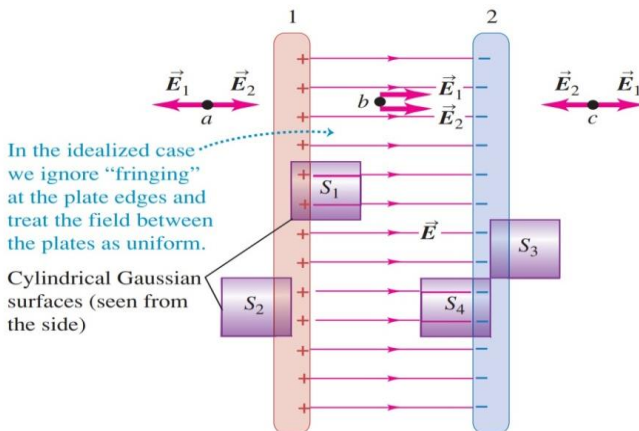


Fig. 3

We found that $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$ where ε_0 ("epsilon-nought" or "epsilon zero") is the electric constant or the permittivity of free space $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ or F/m ; σ is the magnitude (absolute value) of the surface charge density (поверхнева густина заряду) on each plate. This is equal to the magnitude of the total charge Q on each plate divided by the area $A=S$ of the plate, or $\sigma = \frac{Q}{A}$, so the magnitude of electric field E can be expressed as: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon_0 A}$.

The field is uniform (поле однорідне) and the distance between the plates is d so the potential difference (voltage) between the two plates is: $V_{ab} = Ed = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{Qd}{A}$.

From this we see that the capacitance C of a parallel-plate capacitor in vacuum is: $C = \frac{Q}{V_{ab}} = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$ (capacitance of a parallel-plate capacitor in vacuum):

$$C = \frac{q}{U} = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \text{ (Ukrainian)} \quad C = \frac{Q}{V_{ab}} = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \text{ (English)}$$

If two conducting plates are separated by an insulator, the capacitance of a parallel-plate capacitor is given by the expression(вираз):

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \text{ (Ukrainian)} \quad C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A}{d} \text{ (English),}$$

where ε_0 is the electric constant or the permittivity of free space, ε is the dielectric constant of the material between the plates (permittivity), $A=S$ is the area of the plate, d is the distance between the plates.

Capacitors are manufactured with certain standard capacitances and working voltages. You can obtain the values you need by combining capacitors; many combinations are possible, but the simplest combinations are a series connection and a parallel connection.

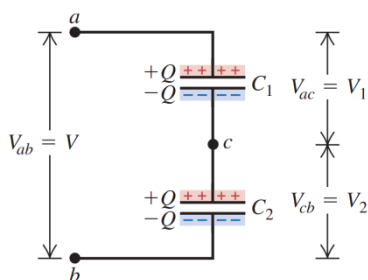
Capacitors in Series

(a) Two capacitors in series

Capacitors in series:

- The capacitors have the same charge Q .
- Their potential differences add:

$$V_{ac} + V_{cb} = V_{ab}.$$



(b) The equivalent single capacitor

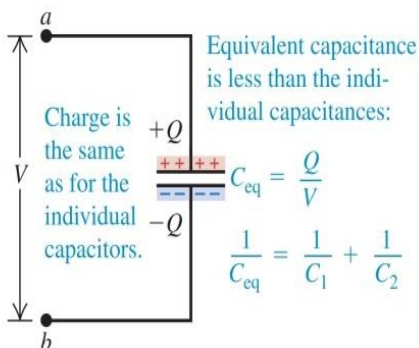


Fig. 4. A series connection of two capacitors

In circuit diagrams (електрична схема) a capacitor is represented by either of these symbols:



Figure 4a and 5 show the schematic diagrams of the series connection.

Two capacitors are connected in series (one after the other) by conducting wires between points *a* and *b*.

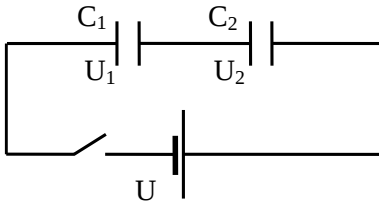


Fig. 5

Both capacitors are initially uncharged. When a constant positive potential difference is applied between points and capacitors become charged.

The Figure 4a shows that the charge on all conducting plates has the same magnitude. The top plate of C_1 acquires(набуває) a positive

charge $Q = q$. The electric field of this positive charge pulls(притягує) negative charge up to the bottom plate of C_1 until all of the field lines (силові лінії) that begin on the top plate end on the bottom plate. This requires that the bottom plate have charge $-Q$. These negative charges had to come from the top plate of C_2 which becomes positively charged with charge $+Q$.

Thus, in a series connection the magnitude of charge on all plates is the same (однакові).

Referring to Fig. 4a and Fig. 5, we can write the potential differences between points *a* and *c*, *c* and *b*, and *a* and *b* as

$$V_{ac} = U_1 = \frac{q}{C_1}; V_{cb} = U_2 = \frac{q}{C_2};$$

$$V_{ab} = U = U_1 + U_2 = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} = q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)$$

and so

$$\frac{U}{q} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) \quad (1)$$

The combination can be replaced by an *equivalent capacitor* of capacitance $C=C_{eq}$. For such a capacitor, shown in Fig. 4.b:

$$C = \frac{q}{U} \text{ or } \frac{1}{C} = \frac{U}{q} \quad (2)$$

Combining Eqs. (1) and (2), we find

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

We can extend this analysis to any number of capacitors in series.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots = \sum_i^n \frac{1}{C_i} \quad (\text{capacitors in series})$$

The reciprocal (зворотня величина) of the equivalent capacitance of a series combination equals the sum of the reciprocals of the individual capacitances.

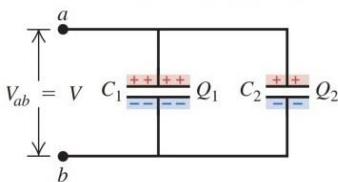
In a series connection the equivalent capacitance is always less than any individual capacitance.

Capacitors in Parallel

The arrangement shown in Fig. 6a is called a parallel connection. Two capacitors are connected in parallel between points *a* and *b*.

(a) Two capacitors in parallel

- The capacitors have the same potential *V*.
- The charge on each capacitor depends on its capacitance: $Q_1 = C_1 V$, $Q_2 = C_2 V$.



(b) The equivalent single capacitor

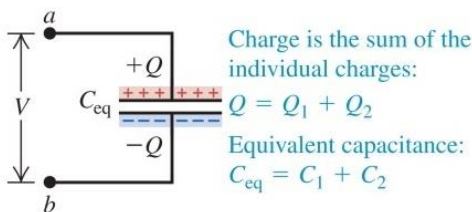


Fig. 6. A parallel connection of two capacitors

In this case the upper plates of the two capacitors are connected by conducting wires to form an equipotential surface, and the lower plates form another.

Hence in a parallel connection the potential difference for all individual capacitors is the same and is equal to $V_{ab} = V = U$

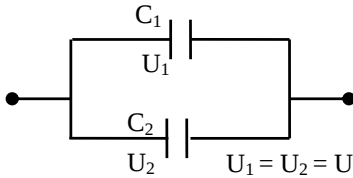


Fig. 7

The charges Q_1 and Q_2 are not necessarily equal, however, since charges can reach each capacitor independently from the source (such as a battery) of the voltage U .

The charges are

$$q_1 = C_1 U \quad \text{and}$$

$$q_2 = C_2 U$$

The **total** charge q of the combination, and thus the total charge on the equivalent capacitor, is

$$q = q_1 + q_2 = (C_1 + C_2)U$$

$$\text{so} \quad \frac{q}{U} = C_1 + C_2 \quad (3)$$

The parallel combination is equivalent to a single capacitor with the same total charge $q = q_1 + q_2$ and potential difference $V = U$ as the combination (Fig. 6b).

The equivalent capacitance of the combination $C = C_{eq}$, is the same as the capacitance $\frac{q}{U}$ of this single equivalent capacitor.

So, from Eq. (3),

$$C = C_1 + C_2.$$

In the same way we can show that for any number of capacitors in parallel,

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots = \sum_i^n C_i \quad (\text{capacitors in parallel})$$

The equivalent capacitance of a parallel combination equals the sum of the individual capacitances.

In a parallel connection the equivalent capacitance is always *greater* than any individual capacitance.

As we have already found out the capacitance of the capacitor is

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U} \quad (4)$$

Thus, to determine the capacity of the capacitor, it is necessary to find its charge and the potential difference between the plates.

The quantity of charge is determined by the use of a ballistic galvanometer in this laboratory work. For a ballistic galvanometer, the charge q that passed through the device is proportional to the first deviation of the moving part of the galvanometer, that is, the largest angular deviation α of the "bunny" from the equilibrium position is

$$q = k_0 \cdot \alpha,$$

where k_0 is a proportionality constant that is characteristic of the galvanometer.

Considering that the angle α is proportional to the number of divisions n on the scale of the galvanometer, it is possible to write

$$q = k \cdot n, \quad (5)$$

where k is the ballistic galvanometer constant.

So, from Eq. (4) and (5),

$$C \cdot U = k \cdot n$$

Let us have a standard capacitor with a known capacity C_0 and a test capacitor with an unknown capacity C . Let's charge them one by one to the same potential difference and discharge them through a galvanometer.

$$\text{So:} \quad C_0 \cdot U = k \cdot n_0 \quad \text{and} \quad C \cdot U = k \cdot n, \quad (6)$$

where n_0 and n are the largest deviations of the "bunny" during the discharge of the standard and test capacitors, respectively.

Solving the system of equations (6) with respect to C , we obtain the working formula:

$$C = C_0 \frac{n}{n_0}. \quad (7)$$

The electrical circuit description

The electrical circuit shown in Fig. 8 are using for implementation of this work.

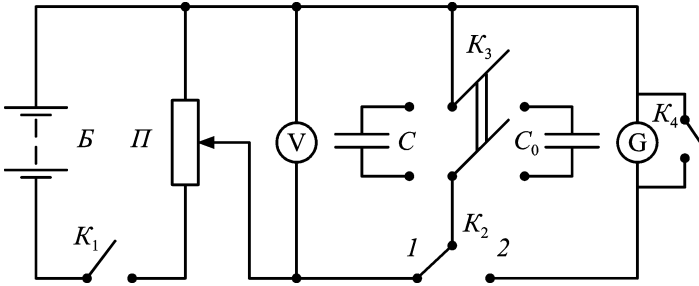


Fig. 8

In circuit we have the following devices:

B - a source of direct electric current (DC source); Π - the rheostat, turned on according to the potentiometer circuit;

V - a voltmeter that measures the potential difference on the test and standard capacitors; K_1 - a key to turn on the DC source; K_2 - a key for charging and discharging capacitors; K_3 - a switch for connecting one of the capacitors to the circuit;

G - a galvanometer; K_4 - a key to calm the moving system of the galvanometer.

A ballistic galvanometer is a galvanometer of a magnetoelectric system.

The oscillation period of the moving part of the galvanometer is much longer than the time of passage of the pulse of the measured current.

Ballistic galvanometers are manufactured with a long period of own oscillations. This is achieved by increasing the mass and, accordingly, the moment inertia moment of its moving part.

Oscillations of the moving system decays very slowly. To calm the galvanometer coil, it is short-circuited with a key. This is explained by the fact that in a coil rotating in a permanent magnet field, an electromotive force of induction and an induction current arises, which, according to Lenz's rule, opposes the coil moving.

Procedure

1. Make the electrical circuit shown in Fig. 8.
2. Set the "bunny" line of sight on the zero mark of the galvanometer scale.
3. Close the key K_1 and set the voltage specified by the teacher using a potentiometer II .
4. Connect the C_0 standard capacitor to the circuit using a key K_3 . To charge the capacitor, turn the K_2 key to position 1 for 2-3 seconds. Switch K_2 to position 2 and fix the maximum deviation of the "bunny" line of sight from the equilibrium position. Record the n_0 obtained values in the table.

Repeat the experiment at least 5 times.

5. Connect the tested capacitor C to the circuit using a K_3 key. While charging and discharging the capacitor similarly to the actions of point 4, record the readings of n in the table.
6. To estimate passport instrument errors and errors of table values.
7. Calculate the average values n_0 and n .
8. Calculate the electrical capacity of capacitor C according to working formula (7).
9. Calculate the relative and absolute errors, record the final result.

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta C_0}{C_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n_0}{n_0}\right)^2},$$

$$\Delta C = \varepsilon C.$$

Table

$C_0 =$

$\Delta(C_0)_0 =$

$\Delta(n)_0 = \Delta(n_0)_0 =$

No	n_0	n
1		
2		
3		
4		
5		
Average		

Questions

1. What is called the capacitance of a separated conductor, capacitor?
2. In what units is electrical capacity measured?
3. Name the types of capacitors.
4. Derive the formula for the capacitance of a parallel-plate capacitor.
5. How does the capacitance of a capacitor depends from the dielectric permeability (permittivity) of the substance between its plates?
6. Derive formulas for the electric capacity of a battery of capacitors connected in series and in parallel.
7. Describe the structure and explain the principle of operation of a ballistic galvanometer.

Vocabulary

capacity of the capacitor	ємність конденсатора
capacitance	ємність
conductor	провідник

charge	заряд
isolated conductor	відокремлений провідник
sheets or plats	обкладки або пластини (конденсатора)
arrangement	пристрій
parallel-plate (flat) capacitor	плоско-паралельний конденсатор
surface charge density	поверхнева густина заряду
potential difference (voltage)	різниця потенціалів напруга
capacitors in series	послідовно сполучені конденсатори
capacitors in parallel	паралельно сполучені конденсатори
parallel combination	паралельне з'єднання
series connection	послідовне з'єднання
reciprocal	зворотня величина
equation	рівняння
measurement results	результати вимірювань

Визначення електроємності конденсатора балістичним гальванометром

Мета роботи: визначити електроємність конденсатора.

Теоретичні відомості

(Теорія до даної роботи описана в лекційному курсі (інтерактивного комплексу Ч I, § 3.6–3.8).

Електроємність провідника – це фізична величина, яка чисельно рівна заряду, який необхідно надати провіднику, щоб змінити його потенціал на один вольт:

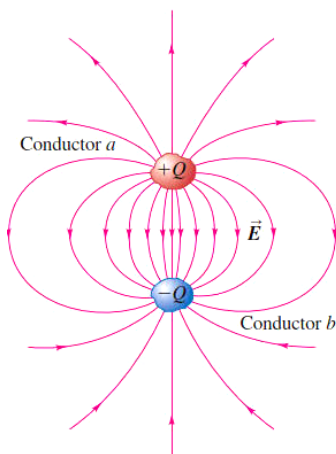


Рис. 1

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad C = \frac{Q}{V},$$

(Укр.) (Англ.),

де $\varphi = V$ – потенціал провідника, $q = Q$ – заряд провідника.

В СІ одиницею вимірювання потенціалу є вольт [В], електроємності (ємності) – фарад [Ф], заряду – кулон [Кл]. Отже, один фарад це електроємність (або просто

ємність) такого відокремленого провідника, потенціал якого змінюється на один вольт при наданні йому заряду в один кулон:

$$1 \text{ фарад} = 1 \text{ Кл/В} = 1 \text{ кулон/вольт.}$$

Один фарад – це дуже велика електроємність. У більшості випадків найбільш поширеною одиницею вимірювання електроємності є мікрофарад ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$) та пікофарад ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$).

Систему провідників, яка має велику ємність за малих розмірів, називають *конденсатором*. Два близько розміщені провідника, розділені діелектриком (або вакуумом) утворюють конденсатор (Рис. 1). Отже, конденсатор – це пристрій для накопичення електричного заряду.

Конденсатори мають різні форми, але всі складаються з двох струмопровідних обкладок або пластин, розділених шаром діелектрика.

Якщо між пластинами прикладена різниця потенціалів V_{ab} , вони мають рівні за модулем і протилежні за знаком заряди причому, величина кожного заряду буде пропорційна

прикладений напрузі. Відношення заряду до різниці потенціалів є постійною (коефіцієнт пропорційності) і називається електроємністю конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U} \quad C = \frac{Q}{V_{ab}},$$

(Укр.) (Англ.)

де $\varphi_1 - \varphi_2 = U = V_{ab}$ – різниця потенціалів між обкладками конденсатора або U – прикладена напруга.

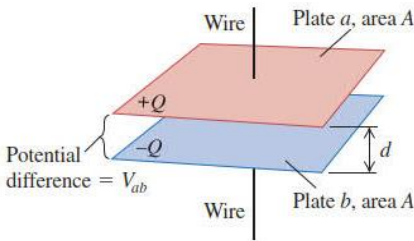


Рис. 2

Залежно від форми обкладок розрізняють плоскі, циліндричні, сферичні та інші конденсатори.

На Рис. 2. показано будову плоско-паралельного конденсатора. На Рис. 3 зображено силові лінії, тобто лінії напруженості електричного поля E плоско-паралельного конденсатора.

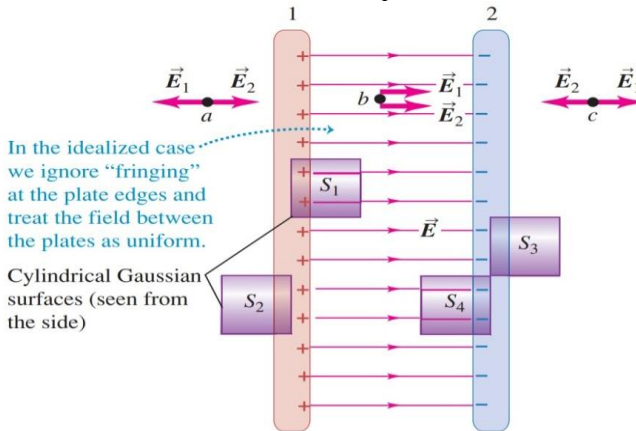


Рис. 3

Напруженість електричного поля між двома пластинами рівна

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, \text{ де } \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2 \text{ або Ф/м (епсілон нульове) –}$$

електрична стала; σ – поверхнева густина заряду на кожній пластині. Поверхнева густина заряду дорівнює відношенню сумарного заряду Q кожної пластини до площі $A=S$ цієї пластини, тобто $\sigma = \frac{Q}{S}$. Тоді напруженість поля можна

записати так:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon_0 S}.$$

Оскільки поле між пластинами плоского конденсатора можна вважати однорідним, відстань між пластинами d , то різниця потенціалів між двома пластинами запишемо у вигляді:

$$V_{ab} = Ed = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{Qd}{S}.$$

З цієї формули електроємність плоско-паралельного конденсатора у вакуумі:

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

$$C = \frac{q}{U} = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \text{ (Укр.)} \quad C = \frac{Q}{V_{ab}} = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \text{ (Англ.)}$$

Таким чином, якщо дві провідні пластини розділені діелектриком, то електроємність плоско-паралельного конденсатора задається виразом:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \text{ (Укр.)} \quad C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A}{d} \text{ (Англ.),}$$

де ε_0 – електрична стала або відносна діелектрична проникність вакууму; ε – відносна діелектрична проникність діелектрика, що знаходиться між пластинками конденсатора; $A=S$ – площа пластинок; d – відстань між ними.

Конденсатори виробляють з деякими заданими стандартними значеннями ємностей та напруг. Можна отримати необхідні значення, комбінуючи конденсатори; можливі багато комбінацій, але найпростіші – це послідовне та паралельне з'єднання конденсаторів.

На електричних схемах конденсатори показують символами:



Послідовне з'єднання

(а) Два конденсатори з'єднані послідовно (б) Еквівалентна схема

Capacitors in series:

- The capacitors have the same charge Q .
- Their potential differences add:

$$V_{ac} + V_{cb} = V_{ab}$$

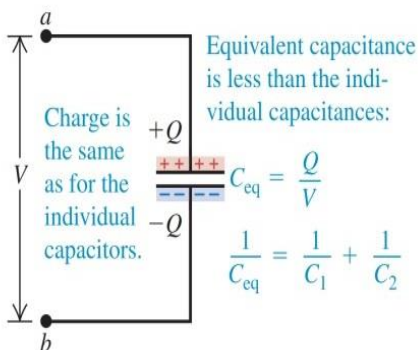
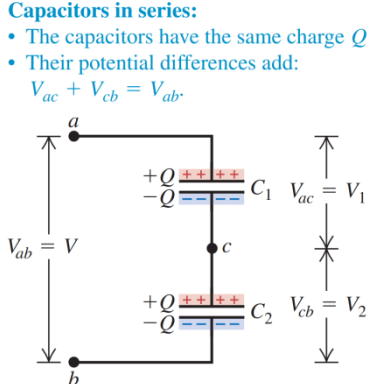


Рис. 4. Послідовне з'єднання двох конденсаторів

На рис. 4а та 5 показана принципова схема послідовного з'єднання конденсаторів.

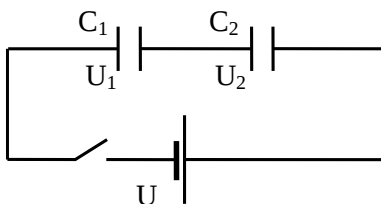


Рис. 5

Обидва конденсатори спочатку незаряджені. Коли між точками a та b прикладається постійна різниця потенціалів, конденсатори заряджаються. З рис. 4а видно, що заряд на всіх провідних пластинах однаковий. Верхня пластина

конденсатора набуває позитивного заряду $Q=q$. Електричне

поле цього позитивного заряду притягує негативний заряд до нижньої пластини конденсатора C_1 доти, поки всі силові лінії електростатичного поля, що починаються на верхній пластині, не закінчуються на нижній. В результаті цього нижня пластина набуває заряд « $-Q$ ». Ці негативні заряди повинні надходити з верхньої пластини конденсатора C_2 , яка стає, відповідно, позитивно зарядженою з зарядом « $+Q$ ».

Отже, при послідовному з'єднанні конденсаторів значення зарядів всіх пластин однакове і дорівнює заряду батареї конденсаторів. Із Рис. 4а та Рис. 5 можна записати різницю потенціалів між точками a та c ; c та b і a та b як:

$$V_{ac} = U_1 = \frac{q}{C_1}; V_{cb} = U_2 = \frac{q}{C_2};$$

$$V_{ab} = U = U_1 + U_2 = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} = q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)$$

а, отже:

$$\frac{U}{q} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) \quad (1)$$

Сполучення конденсаторів може бути замінено еквівалентним конденсатором з ємністю $C = C_{екв}$ – ємність батареї конденсаторів. Для такого конденсатора, що показаний на Рис. 4б електроємність:

$$C = \frac{q}{U} \text{ or } \frac{1}{C} = \frac{U}{q} \quad (2)$$

З формул (1) та (2) отримаємо:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Ми можемо поширити цей аналіз на будь-яку кількість послідовно з'єднаних конденсаторів

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots = \sum_i^n \frac{1}{C_i} \text{ (послідовне з'єднання)}$$

Зворотна величина еквівалентної ємності (ємності батареї) послідовно сполучених конденсаторів дорівнює сумі зворотних величин ємностей окремих конденсаторів.

При послідовному з'єднанні значення еквівалентної ємності (ємності батареї) завжди менше за найменшу окрему електроємність, що входить в цю батарею.

Паралельне з'єднання

(а) Два конденсатори з'єднані паралельно (б) Еквівалентна схема

- The capacitors have the same potential V .
- The charge on each capacitor depends on its capacitance: $Q_1 = C_1 V$, $Q_2 = C_2 V$.

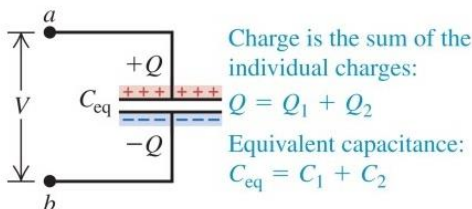
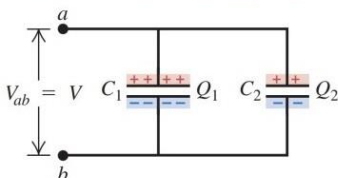


Рис. 6. Паралельне з'єднання двох конденсаторів

На рис. 6а та 7 показана принципова схема паралельного з'єднання конденсаторів. З рис. 6а видно, що верхні обкладки двох конденсаторів з'єднані провідниками, утворюючи одну екіпотенціальну поверхню (з однаковим потенціалом), а нижні – утворюють іншу поверхню. Отже, при паралельному сполученні різниця потенціалів для всіх окремих конденсаторів є однаковою та рівною:

$$V_{ab} = V = U$$

Заряди Q_1 та Q_2 не обов'язково рівні; кожен конденсатор може мати свій заряд незалежно від джерела (такого як акумулятор) напруги U . Заряди на окремих конденсаторах:

$$q_1 = C_1 U \quad \text{та} \quad q_2 = C_2 U$$

Сумарний заряд батареї а, отже, і еквівалентного конденсатора:

$$q = q_1 + q_2 = (C_1 + C_2) U$$

тобто,

$$\frac{q}{U} = C_1 + C_2 \quad (3)$$

Паралельне з'єднання еквівалентне одному конденсатору з таким самим сумарним зарядом $q = q_1 + q_2$ та різницею потенціалів $V = U$ як проілюстровано на Рис. 6 б.

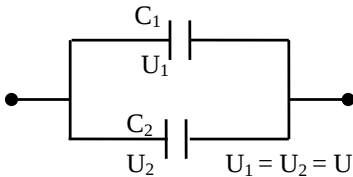


Рис. 7

Еквівалентна електроємність батареї паралельно з'єднаних конденсаторів $C = C_{eq}$ є такою ж як ємність $\frac{q}{U}$ одного еквівалентного конденсатора.

З формули (3):

$$C = C_1 + C_2.$$

Аналогічно можемо бачити, що для будь-якої кількості конденсаторів, з'єднаних паралельно:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots = \sum_i^n C_i \text{ (паралельне з'єднання)}$$

Еквівалентна ємність (ємність батареї) при паралельному з'єднанні дорівнює сумі електроємностей окремих конденсаторів

При паралельному з'єднанні ємність батареї завжди більша, ніж ємність будь-якого окремого конденсатора.

Як ми вже з'ясували *електроємність конденсатора* – це фізична величина, яка рівна відношенню заряду q конденсатора до різниці потенціалів ($\varphi_1 - \varphi_2$) між його обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (4)$$

Таким чином, щоб визначити ємність конденсатора необхідно знати його заряд та різницю потенціалів між обкладками.

В даній роботі величина заряду визначається за допомогою балістичного гальванометра. Для балістичного гальванометра заряд q пропорційний першому відхиленню рухомої частини гальванометра, тобто найбільшому кутовому відхиленню α “зайчика” від положення рівноваги

$$q = k_0 \cdot \alpha,$$

де k_0 – коефіцієнт пропорційності.

Враховуючи, що кут α пропорційний числу поділок n на шкалі приладу, можна записати

$$q = k \cdot n \quad (5)$$

де k – стала балістичного гальванометра.

На основі (4) та (5) отримаємо

$$C \cdot U = k \cdot n.$$

Нехай маємо еталонний конденсатор з відомою ємністю C_0 і досліджуваний конденсатор з невідомою ємністю C . Зарядимо їх по черзі до однакової різниці потенціалів U і розрядимо через гальванометр. У такому випадку

$$C_0 \cdot U = k \cdot n_0 \quad \text{та} \quad C \cdot U = k \cdot n, \quad (6)$$

де n_0 і n – найбільші відхилення “зайчика” при розрядженні еталонного і досліджуваного конденсаторів відповідно.

Розв’язуючи систему рівнянь (6) відносно C , отримаємо робочу формулу:

$$C = C_0 \frac{n}{n_0}. \quad (7)$$

Опис установки

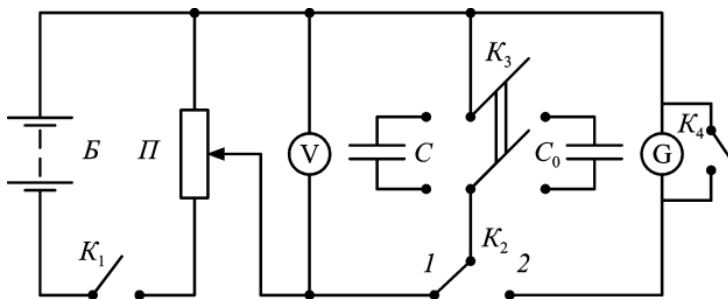


Рис. 8

Для виконання даної роботи використовують електричну схему зображену на рис. 8. У схемі: B – джерело постійного струму; P – реостат, ввімкнений за схемою потенціометра; V – вольтметр, яким вимірюється різниця потенціалів на досліджуваному і еталонному конденсаторах; K_1 – ключ для

вмикання джерела постійного струму; K_2 – ключ для зарядки і розрядки конденсаторів; K_3 – перемикач для під'єднання в схему одного з конденсаторів; G – гальванометр; K_4 – ключ для заспокоєння рухомої системи гальванометра.

Балістичний гальванометр – це гальванометр магнітоелектричної системи, період коливань рухомої частини якого значно більший від часу проходження імпульсу вимірюваного струму. Балістичні гальванометри виготовляють з великим періодом власних коливань. Це досягається збільшенням маси і, відповідно, моменту інерції його рухомої частини.

Коливання рухомої системи згасають дуже повільно. Щоб її заспокоїти, котушку гальванометра закорочують ключем. Це пояснюється тим, що в котушці, яка обертається в полі постійного магніту, виникає електрорушійна сила індукції та індукційний струм, котрий згідно з правилом Ленца протидіє рухові котушки.

Хід роботи

1. Скласти електричну схему зображену на рис. 8.
2. Встановити візирну лінію “зайчика” на нульовій позначці шкали гальванометра.
3. Замкнути ключ K_1 та встановити задану викладачем напругу за допомогою потенціометра Π .
4. Під'єднати до схеми еталонний конденсатор C_0 за допомогою ключа K_3 . Для зарядки конденсатора перевести ключ K_2 у положення 1 на 2-3 секунди. Перемкнути K_2 у положення 2 та зафіксувати максимальне відхилення візирної лінії “зайчика” від положення рівноваги. Отримані значення n_0 записати в таблицю. Дослід повторити не менше 5 разів.
5. Під'єднати до схеми досліджуваний конденсатор C за допомогою ключа K_3 . Заряджаючи та розряджаючи конденсатор аналогічно діям п.4 записати покази n в таблицю.
6. Оцінити паспортні приладові похибки та похибки табличних величин.

7. Обчислити середні значення n_0 та n .
8. Обчислити за робочою формулою (7) електроємність конденсатора C .
9. Обчислити відносну і абсолютну похибки, записати кінцевий результат.

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta C_0}{C_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n_0}{n_0}\right)^2},$$

$$\Delta C = \varepsilon C.$$

Таблиця результатів вимірювань

$$C_0 = \quad \Delta(C_0)_0 = \quad \Delta(n)_0 = \Delta(n_0)_0 =$$

№	n_0	n
1		
2		
3		
4		
5		
Ср.		

Контрольні запитання

1. Що називають електроємністю відокремленого провідника, конденсатора?
2. В яких одиницях вимірюється електроємність?
3. Назвати види конденсаторів.
4. Вивести формулу електроємності плоского конденсатора.
5. Як залежить електроємність конденсатора від діелектричної проникності речовини, що знаходиться між його обкладками?
6. Вивести формули електроємності батареї конденсаторів, з'єднаних послідовно і паралельно.
7. Опишіть будову і поясніть принцип дії балістичного гальванометра.

Laboratory 4.2. Verifying of Ampere's law

Objectives: 1) to verify Ampere's law. 2) to calculate the magnitude of the magnetic field.

Theory

Note: the theory used in this lab is covered in book *University Physics with Modern Physics*, Chapter 27.6, pages 898-900.

Background

Ampère's law, one of the basic relations between electricity and magnetism, stating quantitatively the relation of a magnetic field to the electric current or changing electric field that produces it.

When considering historical discoveries in magnetism, we have to mention Oersted's finding that a wire carrying an electrical current caused a nearby compass to deflect. A **current-carrying conductor** (провідник зі струмом) produces a **magnetic field** (магнітне поле) around it. i.e. behaves like a magnet and exerts a force when a magnet is placed in its magnetic field. Similarly, the magnetic field also exerts equal and opposite force on the current-carrying conductor. This is because when two magnetic fields (the magnetic field produced by the current-carrying conductor and the magnetic field due to the nearby magnet) interact with each other, there can be an attraction or repulsion between them. This attraction and repulsion are based on the direction of the external magnetic field and the direction of the current in the conductor. If the direction of the magnetic field and the electric current is perpendicular to each other, then the force acting on the conductor is perpendicular to both the current and magnetic field.

A conductor is placed between the north and south pole of a horseshoe magnet with an upward magnetic field and is connected in series with the battery as depicted below (Fig.1). When an **electric current** (електричний струм) is

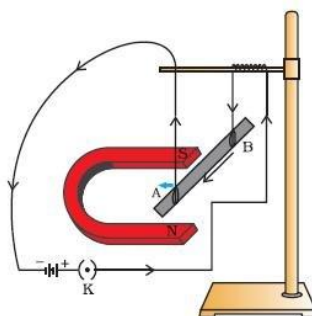


Fig.1

passed through the conductor by switching on the plug key, the conductor moves away from the horseshoe magnet indicating that the force from the magnet is acting on the conductor. Now, if the polarity of either battery or the **horseshoe magnet** (підковоподібний магніт) is reversed and the electric current is passed, then the conductor will move towards the magnet indicating the direction of the force is reversed.

Experiments show that on element (dl) of a conductor with electrical current (I) which is in the magnetic field (B) acts the force. This force calls Ampere's force:

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l} \times \vec{B}], \quad (1)$$

or in scalar form

$$dF_A = IdlB\sin\alpha, \quad (2)$$

where α is the angle between the direction of the electrical current and the direction of the magnetic field.

For any given combination of current and magnetic field strength, the Ampere's force is greatest when the direction of the current is 90° to the direction of the magnetic field. It is important to note that a current-carrying conductor will experience no force if the current in the conductor is parallel to the field.

The direction of the Ampere's force can be found using the left-hand rule (Fig. 2): if the left hand is placed so that the lines of force of the magnetic field enter the palm, and the extended four phalanges of the fingers indicate the direction of the electrical current, then the thumb bent at 90° will show the direction of Ampere's force, which acts on the conductor.

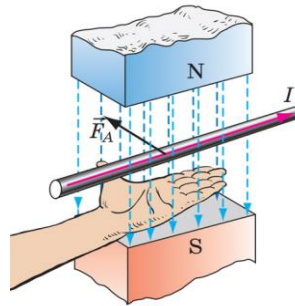


Fig. 2

Ampère's Law has many practical applications. It can be used to know what magnetic field is generated by an electric current. This is useful in building [electromagnets](#), motors, [generators](#), [transformers](#) and more.

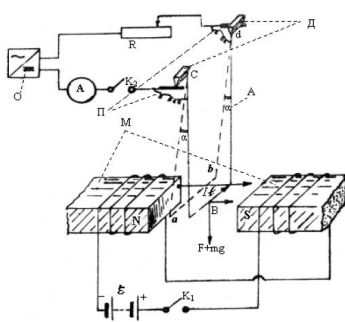


Fig. 3

In this lab work, the laboratory plant is a physical pendulum that oscillates between the poles of an electromagnet, perpendicular to the lines of magnetic induction. The scheme is shown in Fig. 3.

In general, physical **pendulum** (маятник) is a pendulum in which an extended object hangs from a pivot point that is displaced from the center of mass, about which the object is

free to rotate. When the pendulum oscillates with large amplitude, it is NOT in simple harmonic motion. The larger the amplitude the greater the deviation from the equation of an oscillator.

There are three main types of Simple Harmonic Motion

- Damped Oscillation
- Forced Oscillation
- Free Oscillation

Oscillations (коливання) that occur due to energy provided only at the initial moment of time are called free. Such oscillations can be harmonic or **damped** (вимушені).

Oscillations in which the change of a physical quantity over time occurs according to the law of sine or cosine are called harmonic.

The oscillation that fades with time is called damped oscillation. Due to damping, the amplitude of oscillation reduces with time. Reduction in amplitude is the result of energy loss from the system in overcoming external forces like friction or air resistance and other resistive forces. Thus, with the decrease in amplitude, the energy of the system also keeps decreasing. There are two types of damping

- Natural Damping
- Artificial Damping

When a body oscillates by being influenced by an external periodic force, it is called forced oscillation. Here, the amplitude of

oscillation, experiences damping but remains constant due to the external energy supplied to the system. For example, when you push someone on a swing, you have to keep periodically pushing them so that the swing doesn't reduce.

The main characteristics of harmonic oscillations and their measurement units are given in the table

Terms	Definitions	Units	Symbol
Period Of Oscillation	The time taken for one complete oscillation is called the period of oscillation.	Second	T
Oscillation Frequency	The number of cycles/oscillations per second is called the frequency (частота) of oscillation.	Hertz	f
Oscillation Amplitude	The maximum displacement from the mean position is called the amplitude of oscillation.	Metre	A

One of the objectives of laboratory work is to determine the magnitude of the magnetic field B created by electromagnets. This quantity is the force characteristic of the magnetic field. The magnetic field B is a physical quantity that is equivalent to the

maximum Ampere's force acting on a single current-carrying conductor:

$$B = \frac{dF_{A\max}}{Idl} . \tag{3}$$

The unit of magnetic field induction is Tesla (T): $T=N/A \cdot m$.

Procedure

1. Connect the laboratory equipment to the mains
2. Measure the time of the specified number of oscillations of the pendulum both without current (t_0) and with specified current values (t). Write measured values in table 1. WARNING! The key must be closed to exclude the influence of Foucault currents.
3. Calculate the Ampere's force for each value of the current.
4. Plot the diagram F_A vs. I .
5. Choose from the diagram three experimental points that lie on the graph or are closest to it.
6. Calculate the magnetic field for these points. Write the results in table 2.
7. Determine the average value of magnetic field induction.

Table 1

No.	1	2	3	4	5	6	7
$I(A)$							
$t(s)$							
$F_A(N)$							

Table 2

No.	$I(\text{A})$	$F_{\text{A}}(\text{N})$	$B(\text{T})$
1			
2			
3			
Average			

Questions

1. Formulate and write down Ampere's law.
2. How is the direction of Ampere's force determined?
3. At what orientation of the current-carrying conductor in the magnetic field is Ampere's force maximum?
4. What is a physical pendulum? Will the oscillations of the pendulum be harmonic at large amplitudes?
5. What oscillations are called free, harmonic, damped, forced?
6. Define the main characteristics of harmonic oscillations (amplitude, frequency, period).
7. Define the vector of magnetic induction, specify the units of measurement in the SI system.

Vocabulary / Словник

current-carrying conductor	провідник зі струмом
electric current	електричний струм
magnetic field	магнітне поле
pendulum	маятник
oscillations	коливання
damped	вимушені
frequency	частота
induction	індукція
horseshoe magnet	підковоподібний магніт

Перевірка закону Ампера

Мета: 1) перевірити закон Ампера; 2) обчислити індукцію магнітного поля.

Теорія

Примітка: теорія, використана в цій лабораторній роботі, викладена у книзі "University Physics with Modern Physics", розділ 27.6, сторінки 898–900.

Вступ

Закон Ампера – одне з основних співвідношень між електрикою та магнетизмом, яке кількісно визначає зв'язок між магнітним полем та електричним струмом або змінним електричним полем, що його породжує.

Говорячи про історичні відкриття в магнетизмі, слід згадати відкриття Ерстеда, який встановив, що провідник зі струмом викликає відхилення стрілки компаса поблизу. Провідник зі струмом створює навколо себе магнітне поле, тобто поводить себе як магніт і чинить дію з певною силою на магніт, розташований у його магнітному полі. Аналогічно, магнітне поле також діє з рівною й протилежною силою на провідник зі струмом. Це пояснюється тим, що коли два магнітних поля (магнітне поле, створене провідником зі струмом, і магнітне поле сусіднього магніта) взаємодіють, між ними може виникати притягання або відштовхування. Це притягання або відштовхування залежить від напрямку зовнішнього магнітного поля та напрямку струму в провіднику. Якщо напрямки магнітного поля та електричного струму перпендикулярні, то сила, що діє на провідник, також перпендикулярна і до

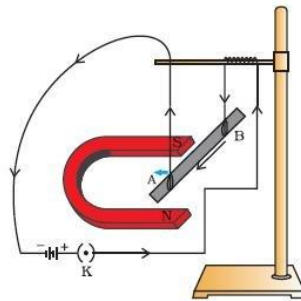


Рис. 1

струму, і до магнітного поля.

Провідник розміщується між північним і південним полюсами підковоподібного магніта з напрямком магнітного поля вгору та під'єднується послідовно з батареєю, як показано на рис.1. Коли через провідник пропускають електричний струм, замкнувши ключ, провідник відхиляється від підковоподібного магніта, що свідчить про дію сили на провідник. Якщо змінити полярність батареї або підковоподібного магніта та знову пропустити струм, провідник відхилиться у протилежний бік, що вказує на зміну напрямку сили.

Експерименти показують, що на елемент (dl) провідника зі струмом (I), який перебуває в магнітному полі індукції (B), діє сила. Ця сила називається силою Ампера:

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l} \times \vec{B}] \quad (1)$$

або в скалярній формі

$$dF_A = IdlB\sin\alpha \quad (2)$$

де α – кут між напрямком електричного струму та напрямком магнітного поля.

Для будь-якої комбінації сили струму і напруженості магнітного поля сила Ампера найбільша, коли напрямок струму перпендикулярний до напрямку магнітного поля. Варто зазначити, що провідник зі струмом не зазнає дії сили, якщо струм у провіднику паралельний до поля.

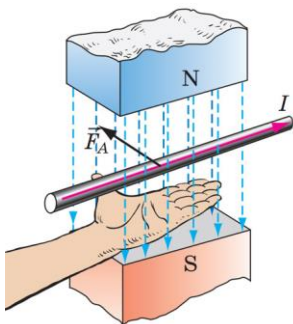


Рис. 2

Напрямок сили Ампера визначається за правилом лівої руки (рис. 2): якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії магнітного поля входили в долоню, а витягнуті чотири

пальці вказували напрямок електричного струму, то великий палець, відігнутий під кутом 90° , покаже напрямок сили Ампера, що діє на провідник.

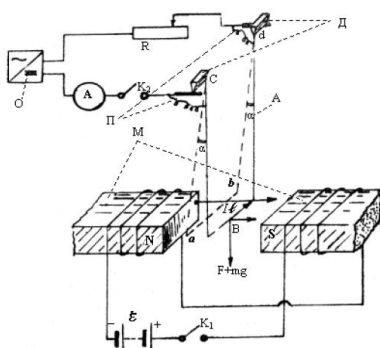


Рис. 3

Закон Ампера має багато практичних застосувань. Його можна використати для визначення магнітного поля, створеного електричним струмом. Це корисно при створенні електромагнітів, двигунів, генераторів, трансформаторів тощо.

У даній роботі лабораторною установкою є фізичний маятник, який

коливається між полюсами електромагніта, перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Схема показана на рис.3. Загалом фізичний маятник — це тіло, яке може коливатись навколо осі, що не проходить через його центр мас. Коли маятник коливається з великою амплітудою, його рух НЕ є гармонічним. Чим більша амплітуда, тим більше відхилення від рівняння осцилятора.

Існує три основних типи гармонічних коливань:

- Згасаючі коливання
- Вимушені коливання
- Вільні коливання

Коливання, які виникають лише за рахунок енергії, наданої в початковий момент часу, називаються вільними. Такі коливання можуть бути гармонічними або згасаючими.

Коливання, при яких зміна фізичної величини з часом відбувається за законом синуса або косинуса, називаються гармонічними.

Коливання, що згасають з часом, називаються згасаючими коливаннями. Через згасання амплітуда коливань зменшується з часом. Зменшення амплітуди є наслідком втрати енергії системою при подоланні зовнішніх сил, таких як тертя, опір повітря та інші сили опору. Тому зі зменшенням амплітуди енергія системи також зменшується. Існує два типи згасання:

- Природне згасання

- Штучне згасання.

Коли тіло коливається під впливом зовнішньої періодичної сили, це називається вимушеними коливаннями. Тут амплітуда коливань зазнає згасання, але залишається сталою завдяки зовнішньому джерелу енергії. Наприклад, коли ви розгойдуєте когось на гойдалці, потрібно періодично підштовхувати, щоб гойдалка не зупинилася.

До основних характеристик гармонічних коливань відносяться:

Амплітуда коливань – максимальне відхилення коливної точки від положення рівноваги. Вимірюється в метрах (м), позначається літерою A .

Період коливань – час одного повного коливання. Визначається в секундах (с), позначається літерою T .

Частота коливань – кількість коливань за одиницю часу. Визначається в Герцах (Гц), позначається літерою ν (ню).

Одним із завдань лабораторної роботи є визначення індукції магнітного поля, створеного електромагнітами. Величина магнітної індукції — це силова характеристика магнітного поля. Індукція магнітного поля — це фізична величина, що дорівнює максимальній силі Ампера, яка діє на одиничний провідник зі струмом:

$$B = \frac{dF_{Amax}}{Idl}. \quad (3)$$

Одиниця вимірювання магнітної індукції – Тесла (Тл):
 $Tл = Н/А \cdot м$.

Хід роботи

1. Під'єднайте лабораторне обладнання до мережі.
2. Виміряйте час заданої кількості коливань маятника без струму (t_0) і при заданих значеннях струму (I). Запишіть виміряні значення у таблицю 1. УВАГА! Ключ має бути замкнений для виключення впливу струмів Фуко.
3. Обчисліть силу Ампера для кожного значення струму.
4. Побудуйте графік залежності F_A від I .
5. Оберіть з графіка три експериментальні точки, що лежать на рафіку або найближчі до нього.

6. Обчисліть індукцію магнітного поля для цих точок. Запишіть результати у таблицю 2.

7. Визначте середнє значення індукції магнітного поля.

Таблиця 1

№	1	2	3	4	5	6	7
$I(A)$							
$t(c)$							
$F_A(H)$							

Таблиця 2

№	$I(A)$	$F_A(H)$	$B(Tл)$
1			
2			
3			
Ср.			

Контрольні запитання

1. Сформулюйте та запишіть закон Ампера.
2. Як визначається напрямок сили Ампера?
3. При якому розташуванні провідника зі струмом у магнітному полі сила Ампера максимальна?
4. Що таке фізичний маятник? Чи будуть коливання маятника гармонічними при великих амплітудах?
5. Які коливання називаються вільними, гармонічними, згасаючими, вимушеними?

6. Дайте визначення основних характеристик гармонічних коливань (амплітуда, частота, період).
7. Дайте визначення вектора магнітної індукції, вкажіть одиниці вимірювання в системі СІ.

Laboratory 5.8. Experimental study of the photoelectric effect

Objectives:

- 1) to investigate the volt-ampere characteristics of a photocell;
- 2) to confirm the inverse square law.

Theory

Note: the theory used in this lab is covered in the book *University Physics with Modern Physics*, Chapter 38.1, pages 1261-1266.

Background

A phenomenon of emission of electrons from the metal surface when light radiations of suitable frequency fall of them is the **photoelectric effect** (фотоефект). The **emitted electrons** (випромінені або вирвані електрони) are called **photoelectrons** (фотоелектрони) and the resulting current is called a **photoelectric current** (фотоелектричний струм). Alkali metals such as lithium, sodium and potassium exhibit the photoelectric effect when exposed to visible light, whereas other metals such as zinc and magnesium exhibit the effect when exposed to ultraviolet light. In order to escape the surface, an electron must absorb sufficient energy from the incident light in order to overcome the attraction of the positive ions within the material. These attractions constitute a potential energy barrier, and the

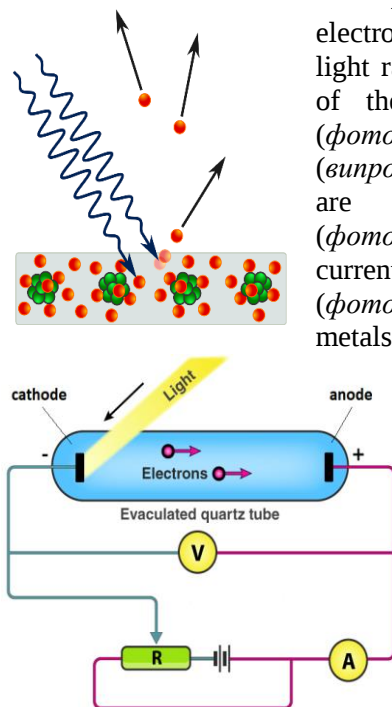


Fig. 1. A schematic diagram of the photoelectric effect setup

light provides the 'kick' that enables the electron to escape.

Fig. 1 shows a schematic representation of the apparatus that we will use to investigate this phenomenon. The apparatus consists of an evacuated glass tube containing a metal plate called a cathode, which is connected to the negative terminal of a battery. The anode is connected to the positive terminal. A voltmeter V measures the potential difference between the cathode and anode and an amperemeter A detects a current when the light hits the cathode and generates electrons.

A plot of the photoelectric current (or photocurrent) versus the potential difference between the cathode and anode is shown in Fig. 2 for two light intensities.

For large voltage values, all of the photoelectrons are collected at the anode, resulting in a maximum current, known as the **saturation current** (*струм насичення*). Additionally, increasing the light intensity results in an overall increase in current. When the battery in the circuit is reversed so that the cathode is positive and

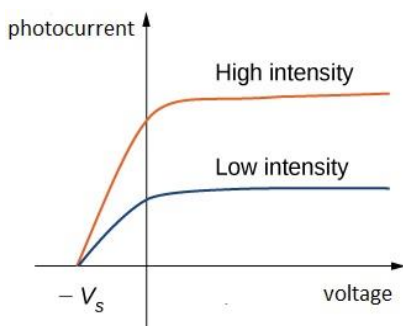


Fig. 2. Photocurrent as a function of the voltage

the anode is negative, the photoelectrons are repelled by the negative plate. Only electrons with kinetic energy greater than some eV value are energetic enough to reach the anode. Eventually, the value of V becomes so high that no current is observed; that is to say, no photoelectrons have enough energy to overcome the opposing potential difference and reach the anode. The value

of V at which the current becomes zero is called the **stopping potential** (*затримуюча напруга*) V_s .

When the photoelectric effect was first observed towards the end of the 19th century, several of its features could not be explained by the wave theory of light:

- no electrons are emitted if the frequency of the light falls below a cutoff frequency, which is a characteristic of the material being illuminated;

- the stopping voltage V_s is independent of the light intensity;
- the stopping voltage V_s increases with the light frequency.

One way to explain these observations is to assume that light exists as discrete energy bundles, or photons. The energy E of each photon is proportional to its frequency ν . This relationship is given by:

$$E = h f, \quad (1)$$

where h is Planck's constant (*стала Планка*) and f is the **frequency of light** (*частота світла*). Since only one electron is ejected by one photon incident on the metal surface, this experiment is an illustration of the quantization of energy.

Each material has a characteristic **energy threshold** (*енергетичний поріг*) for the photoelectric emission of electrons, i.e., there is a minimum energy and a corresponding photon frequency which will be able to release an electron from the metal. Any photon of lower frequency than the minimum frequency will not be able to release an electron. This minimum frequency is known as the **cutoff frequency** (*мінімальна частота*). If the incoming photon has energy $h f$ and the out-going electron has kinetic energy

$$K_{\max} = \frac{m v_{\max}^2}{2} \text{ then:}$$

$$h f = K_{\max} + \phi. \quad (2)$$

Equation (2) is **Einstein's photoelectric equation**. Here ϕ is called the **work function** (*робота виходу*) of the metal. It is the minimum energy required by an electron to escape the metal.

Electrons embedded at some depth in the metal may lose energy by collisions during their escape. Once out of the metal, they may also lose energy by collisions before reaching the collecting electrode located in the photocell. Equation 2 applies to an electron released from the surface of the metal, which travels to the collecting electrode without any collisions. Therefore, the kinetic energy in equation 2 represents the maximum possible kinetic energy of the ejected electron (without any collisions with surrounding electrons and atoms in the metal).

The maximum kinetic energy of the electrons can be found by measuring the work necessary to prevent any electron from

reaching the anode. This condition is achieved if the photocurrent drops to zero under the application of a potential difference V_s between the photosensitive surface (cathode), and the collecting electrode (the anode). The photocurrent can also be reduced to zero when the photons have a lower frequency than the cutoff frequency of the metal, and thus not enough energy to excite the electrons on the metal surface to escape.

Electrons in the photocell receive sufficient energy from the incoming light to reach the anode without an accelerating potential. Hence, to stop the electron flow, the anode must be made negative relative to the cathode. Under these conditions:

$$eV_s = K_{\max} , \quad (3)$$

where V_s is the electric potential difference applied, $K_{\max}$ is the maximum kinetic energy of an electron ejected from the metal surface, and e is the charge of an electron. Combining equations 2 and 3:

$$eV_s = hf - \phi . \quad (4)$$

Eq. (4) shows that the V_s increases with increasing frequency f . The intensity doesn't appear in Eq. (4), so V_s is independent of intensity.

Thus, the key experimental facts about the photoelectric effect (laws of the photoelectric effect) are the following:

1. The emission of photoelectrons will not occur at all, if the frequency of the incident electromagnetic radiation is less than a certain frequency called the cutoff frequency. Below the cutoff frequency there would be no photoelectrons regardless of the intensity of the incident light.

2. If the frequency of the incident radiation is larger than the cutoff frequency, the number of emitted photoelectrons is proportional to the intensity of the radiation.

3. The maximum kinetic energy of the emitted photoelectrons is independent of the intensity of incident light but depends on both the frequency of the incident electromagnetic radiation and the metal itself.

4. There is no delay between illumination and the emission of photoelectrons (the photoelectric emission is an instantaneous process).

The photoelectric current for the large positive values V_s is directly proportional to the incident light. Since the illumination of the cathode is inversely proportional to the square of the distance r from the illuminator to the cathode, the saturation current (I_{sat}) will also be inversely proportional to r^2 :

$$\frac{I_{sat,1}}{I_{sat,2}} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2, \quad (5)$$

where $I_{sat,1}$ and $I_{sat,2}$ are saturation currents for the distances r_1 and r_2 , respectively.

Procedure

1. Switch on the lamp, move it from extreme position toward the photocell and measure the distance r_1 between them.
2. By increasing the voltage between cathode and anode from zero to the maximum value, establish the volt-ampere characteristic of the photocell at the given illumination.
3. Change the distance between the lamp and photocell (r_2) and repeat step 2.
4. Write measured values in tables.
5. Plot two diagrams I vs. U on one plot.
6. Determine the saturation currents $I_{sat,1}$ and $I_{sat,2}$ from diagrams

and calculate their ratio. Also calculate the ratio $\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2$.

7. Compare obtained values and state the conclusions you draw from this experiment.

Table 1 $r_1 =$

$I,$										
$V,$										

Table 2 $r_2 =$

$I,$										
$V,$										

Questions

1. What is the photoelectric effect? Which nature of light can be explained by photoelectric effect?
2. What are the main points of the photoelectric effect (laws of the photoelectric effect)?
3. What happens if the intensity (i.e., amplitude) of ultraviolet radiation is increased?
4. Could we increase the intensity of the light to cause photoelectricity?
5. Give a definition of cutoff frequency.
6. Please continue: photon energy depends on ...
7. What is saturation current in the photoelectric effect?

Vocabulary / Словник

photoelectric effect	фотоефект
frequency	частота
cutoff frequency	мінімальна частота
incident radiation	падаюче випромінювання
emitted photoelectrons	вирвані фотоелектрони
energy threshold	енергетичний поріг
work function	робота виходу
stopping potential	затримуюча напруга
saturation current	струм насичення

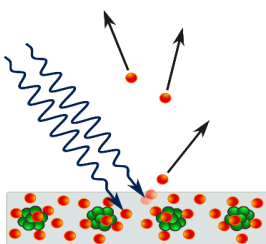
Експериментальне дослідження фотоелектричного ефекту

Мета роботи: 1) дослідити вольт-амперні характеристики фотоелементу; 2) підтвердити закон обернених квадратів.

Теорія

Примітка: теорія, до лабораторної роботи, описана в книзі

University Physics with Modern Physics, розділ 38.1, сторінки 1261-1266.



Довідкова інформація

Фотоелектр – явище вибивання електронів з речовини під дією світла відповідної частоти. Вибиті

(випромінені) електрони називаються **фотоелектронами**, а струм, що виникає в результаті такого процесу називається **фотоелектричним струмом**. Лужні метали, такі як літій,

натрій, калій, виявляють фотоелектричний ефект під дією світла видимого діапазону, а метали як цинк, магній тощо, виявляють фотоелектричний ефект під дією ультрафіолетового світла. Щоб вирватися з поверхні, електрон повинен поглинути достатню кількість енергії від падаючого світла для подолання притягання до позитивних іонів у матеріалі.

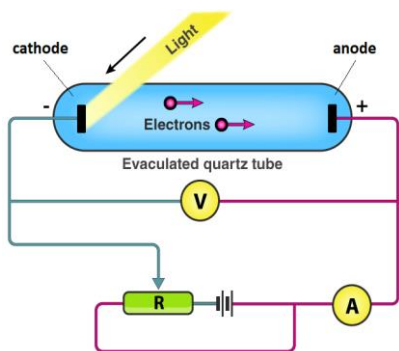


Рис. 1. Схема експериментальної установки

На рис. 1 показано схему експериментальної установки. Вона складається з фотоелемента – вакуумної скляної трубки, що містить металеву пластину, яка називається **катодом**, що підключена до мінусового полюса батареї. **Анод** підключений

до позитивної клемі. Вольтметр V вимірює різницю потенціалів між катодом і анодом, а амперметр A вимірює силу струму, коли світло потрапляє на катод і генерує електрони.

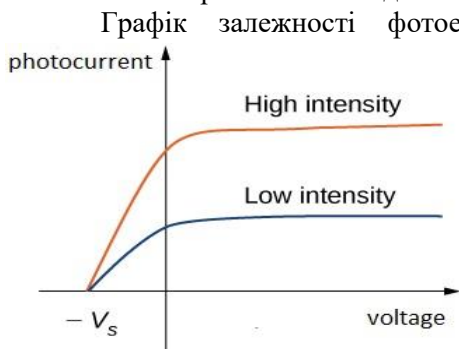


Рис. 2. Графіки залежностей фотоструму як функції напруги

фотоструму) від різниці потенціалів між катодом і анодом показаний на рис. 2 для двох інтенсивностей світла. При великих значеннях напруги всі фотоелектрони досягають анода, і струм досягає максимального значення, так званого **струму насичення**. Крім того, загальний струм

збільшується при збільшенні інтенсивності світла. Коли в електричному колі змінити полярність батареї, тобто щоб катод став позитивним, а анод – негативним, то фотоелектрони відштовхуватимуться від негативної пластини. Тільки ті електрони, які мають кінетичну енергію, що перевищує деяке значення eV можуть досягти анода. В результаті при деякому значенні V , струм не фіксуватиметься, тобто фотоелектрони не мають достатньої енергії, щоб подолати затримуючу різницю потенціалів для того, щоб досягти анода. Значення V при якому струм стає рівним нулю, називається **затримуючим потенціалом** (затримуюча напруга) V_s .

Фотоефект вперше спостерігали наприкінці 19 століття, коли хвильова теорія світла не могла пояснити кілька його особливостей, а саме:

- електрони не вириваються, якщо частота падаючого світла є нижчою деякої граничної частоти, характерною для матеріалу, що освітлюється;
- затримуюча напруга V_s не залежить від інтенсивності світла;

- затримуюча напруга V_s зростає зі збільшенням частоти падаючого світла.

Ці особливості можна пояснити, якщо припустити, що світло поширюється у вигляді дискретних енергетичних пучків, або фотонів. Енергія кожного фотона E пропорційна його частоті f , тобто:

$$E = hf, \quad (1)$$

де h – постійна Планка, f – частота світла. Оскільки один фотон, що падає на поверхню металу, вибиває лише один електрон, то цей експеримент є яскравою ілюстрацією квантування енергії.

Кожен матеріал має характерний **енергетичний поріг** для фотоелектричної емісії електронів, тобто існує мінімальна енергія та відповідно мінімальна частота фотонів, які зможуть вивільнити електрон із металу. Будь-який фотон з частотою нижчою за мінімальну не зможе вибити електрон. Якщо падаючий фотон має енергію hf , а вибитий електрон має

кінетичну енергію $K_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}$, то:

$$hf = K_{\max} + \phi. \quad (2)$$

Рівняння (2) є **фотоелектричним рівнянням Ейнштейна**. Величину ϕ називають **роботою виходу** електрона з металу, тобто це мінімальна енергія, необхідна електрону для виходу з металу.

Електрони, що знаходяться на деякій глибині в металі, витрачають енергію через зіткнення під час виходу. Рівняння 2 застосовується до електрона, вивільненого з поверхні металу, і який рухається до електрода без будь-яких зіткнень. Тому кінетична енергія в рівнянні 2 – це максимально можлива кінетична енергія вирваного електрона (без будь-яких зіткнень з оточуючими електронами та атомами в металі).

Максимальну кінетичну енергію електронів можна знайти визначивши роботу, яка необхідна для того щоб жоден електрон не досягнув аноду. Ця умова досягається, якщо фотострум падає до нуля при затримуючій різниці потенціалів V_s між fotocутливою поверхнею (катодом) і збиральним електродом (анодом). Фотострум також може бути зменшений

до нуля, коли частота падаючого світла нижча ніж робота виходу електронів з металу, і, отже, недостатньо енергії, щоб перевести електрони на поверхню металу та для того щоб цю поверхню покинути.

Нехай електрони у фотоелементі отримують достатню енергію від падаючого світла, щоб досягти анода без прискорюючого потенціалу. Отже, щоб зупинити потік електронів, анод повинен бути негативним відносно катода. За цих умов:

$$eV_s = K_{\max}, \quad (3)$$

де V_s – прикладена різниця потенціалів, $K_{\max}$ – максимальна кінетична енергія електрона, що покинув поверхню металу, а e – заряд електрона. З рівнянь 2 і 3 отримаємо:

$$eV_s = hf - \phi. \quad (4)$$

Рівняння (4) показує, що V_s зростає зі збільшенням частоти f . Інтенсивність не фігурує в рівнянні (4), а тому V_s не залежить від інтенсивності.

Таким чином, за описаними експериментальними даними можна сформулювати наступні **закони фотоэффекту**:

1. Випромінювання фотоелектронів не відбуватиметься взагалі, якщо частота падаючого електромагнітного випромінювання буде меншою за певну частоту, яка називається граничною (мінімальною) частотою. Нижче граничної частоти фотоелектрони не будуть випромінюватися незалежно від інтенсивності падаючого світла.

2. Якщо частота падаючого випромінювання більша за граничну частоту, кількість вирваних фотоелектронів пропорційна інтенсивності випромінювання.

3. Максимальна кінетична енергія вирваних фотоелектронів не залежить від інтенсивності падаючого світла, але залежить як від частоти падаючого електромагнітного випромінювання, так і від речовини металу.

4. Між освітленням і випромінюванням фотоелектронів немає затримки (фотоелектричне випромінювання є миттєвим процесом).

Фотоелектричний струм для великих позитивних значень V_s прямо пропорційний падаючому світлу. Оскільки освітлення катода обернено пропорційне квадрату відстані r від освітлювача до катода, то струм насичення (I_{sat}) також буде обернено пропорційний r^2 :

$$\frac{I_{sat,1}}{I_{sat,2}} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2, \quad (5)$$

де $I_{sat,1}$ і $I_{sat,2}$ – струми насичення для відстаней r_1 і r_2 відповідно.

Хід роботи

1. Увімкніть лампу, перемістіть її з крайнього положення в бік фотоелемента і виміряйте відстань r_1 між ними.
2. Збільшуючи напругу між катодом і анодом від нуля до максимального значення, дослідіть вольт-амперну характеристику фотоелемента при даній освітленості.
3. Змініть відстань між лампою та фотоелементом, тобто r_2 і повторіть крок 2.
4. Запишіть виміряні значення до таблиць 1 та 2.
5. Побудуйте графіки залежностей I як функції U .
6. Визначте з графіків струми насичень $I_{sat,1}$ і $I_{sat,2}$, обчисліть їх

відношення а також величину $\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2$.

7. Порівняйте отримані значення та сформулюйте висновки на основі отриманих даних.

Таблиця 1

$r_1 =$										
$I,$										
$V,$										

Таблиця 2

$r_2 =$

$I,$										
$V,$										

Контрольні запитання

1. Що таке фотоефект? Яку природу світла можна пояснити фотоефектом?
2. Сформулюйте закони фотоефекту.
3. Що відбудеться, якщо збільшити інтенсивність (тобто амплітуду) ультрафіолетового випромінювання?
4. Чи можна викликати фотоелектричний ефект збільшивши інтенсивність падаючого світла?
5. Дайте визначення граничної частоти.
6. Продовжте речення: енергія фотона залежить від.
7. Що таке струм насичення при фотоефекті?

References

1. Загальна фізика Частина 1. Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення. / за редакцією Ковалець М. О., Орленко В. Ф. Рівне : НУВГП, 2009. 396 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/2085/>
2. Загальна фізика. Частина II. Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення. / Д. І. Олексин, В. Ф. Орленко, Д. І. Вадець та ін. Рівне : НУВГП, 2009. 469 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/2085/>
3. Paul G. Hewitt, John Suchocki, Leslie A. Hewitt Conceptual physical science / Sixth edition. Boston : Pearson, 2015. 919 p. ISBN 9780134060491
4. Гаращенко В. І., Соляк Л. В., Гаращенко О. В., Гаєвський В. Р., Мороз М. В. Фізика. Теорія і практика. Частина I. Механіка. (Практикум розв'язання задач з фізики) : навч. посібник. Рівне : НУВГП, 2020. 281 с. ISBN 978-966-327-459-1.
5. Hugh D. Young, Roger A. Freedman. Univercity physics with modern physics. 14th edition. Pearson Education Limited. 2016. 1600 p. ISBN 13: 978-0-321-69686-1; ISBN 10: 0-321-69686-7.