

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Н.О.Якуніна, Л.П.Пономаренко

**ФІЗИКА-1. ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА 1
ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний
посібник для студентів закладів вищої освіти, які навчаються
за спеціальністю «Інформаційні системи та технології»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

УДК 537.8

ББК 22.33

Ф 48

Рецензент: В.Й Котовський завідувач кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського, доктор т.н., професор

Відповідальний редактор: В.М. Локтев В.М академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № від . .2021 р.)
за поданням Вченої ради фізико-математичного факультету
(протокол № від . 2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Якуніна Наталія Олександрівна, доцент кафедри загальної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського, к.ф.-м. наук, доцент,

Пономаренко Лілія Петрівна, доцент кафедри загальної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського, к.ф.-м. наук, доцент,

Ф 48 Фізика-1. Загальна Фізика 1. Лабораторний практикум . Навч. посібник / Н.О. Якуніна, Л.П.Пономаренко – К. : Вид-во «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. – 16 с.

У лабораторному практикумі представлені теоретичні відомості, опис лабораторної роботи з теми «Вимірювання прискорення вільного падіння», що викладається для майбутніх фахівців за спеціальністю «Інформаційні системи та технології», наведені методичні вказівки до виконання цієї роботи, містяться контрольні питання для самостійної роботи та підготовки до модульного контролю.

Посібник призначений для студентів, які навчаються у закладах вищої освіти і вивчають нормативну навчальну дисципліну «загальна фізика» з циклу математичної та природничо-наукової підготовки за спеціальністю «Інформаційні системи та технології».

Посібник може бути корисним для науково-педагогічних працівників, які викладають курс фізики, під час планування та підготовки завдань до лабораторних робіт та модульних контрольних робіт з навчальної дисципліни «Фізика-1. Загальна Фізика 1».

© Н.О. Якуніна, Л.П.Пономаренко, 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

Лабораторна робота № 3(1)

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ

Мета роботи: визначити прискорення вільного падіння за допомогою гравіметра.

Короткі теоретичні відомості

1. Гравітаційна взаємодія, її властивості та характеристики

Гравітація — це фундаментальна взаємодія в природі, якій підлягають всі матеріальні об'єкти. Вона характеризується наступними основними властивостями:

- 1) Діє на всі матеріальні об'єкти.
- 2) Має нескінченний радіус дії.
- 3) Гравітаційні сили надають всім тілам однакове прискорення незалежно від їхнього складу, будови та маси.
- 4) Гравітаційну взаємодію неможливо екранувати.
- 5) Гравітаційна взаємодія є найслабкішою порівняно відомими в природі взаємодіями. Серед інших типів взаємодій – сильної, слабкої і електромагнітної – гравітаційна взаємодія практично не відіграє ніякої ролі для мікрооб'єктів, таких як елементарні частинки. Наприклад, електрична сила взаємного відштовхування двох електронів перевищує силу їх притягіння більше ніж в 10^{42} разів.
- 6) Має властивість притягіння.

Мірою гравітаційної взаємодії є **гравітаційна сила**, величина якої визначається законом всесвітнього тяжіння. Ньютонів закон всесвітнього тяжіння стверджує: *два тіла з масами m_1 та m_2 притягують одне одного із силою F прямо пропорційною добутку мас і обернено пропорційною квадрату відстані r між ними:*

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

де коефіцієнт пропорційності G називається *гравітаційною сталою*. Її величина $G = (6,6720 \pm 0,0041) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ була отримана експериментально.

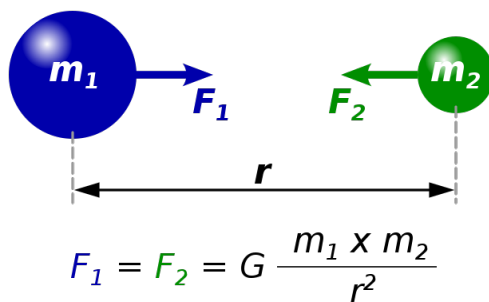


Рис.1.

Наведена вище формула дозволяє обчислити лише абсолютну величину сили тяжіння. Повнішим є векторне рівняння, що описує як величину гравітаційної сили так і її напрямок:

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r}, \quad (1)$$

де \vec{F} — вектор сили, з якою тіло 1 діє на тіло 2; \vec{r} — одиничний вектор напрямлений від тіла 1 до тіла 2; r — відстань між тілами 1 та 2.

Строго кажучи, наведені тут формули справедливі лише для точкових об'єктів. Якщо тіла мають просторові розміри, силу притягання між ними слід рахувати шляхом інтегрування сили у векторній формі по об'ємах двох тіл. Можна показати, що для тіла зі сферично-симетричним розподілом мас інтеграл дає ту саму силу тяжіння за межами цього тіла, яку б давала точкова маса розташована у центрі тіла.

Гравітаційне прискорення тіла, що виникає під дією гравітаційних сил, не залежить від маси цього тіла. Дана властивість пов'язана з тим, що сила тяжіння пропорційна масі тіла. Цей факт є особливою характерною рисою закону всесвітнього тяжіння. Маса тіла визначається як мірило його інерційності. Виходячи із загальних міркувань, гравітаційне притягання — зовсім інше явище, ніж інерція. Тому, формально можна ввести дві різні величини: інерційну масу, яка описувала б відгук тіла на дію сили, та гравітаційну масу, яка описувала б

притягання. Однак, експеримент свідчить про те, що ці дві величини пропорційні, а в більшості систем фізичних одиниць — рівні, одна одній. Рівність інерційної та гравітаційної мас пізніше була взята за основу загальної теорії відносності як основний постулат.

2. Гравітаційне поле і його характеристики

Гравітаційна взаємодія між тілами здійснюється за допомогою гравітаційного поля (поля тяжіння), що створюється цими тілами. Якщо в гравітаційне поле помістити матеріальне тіло, то на нього буде діяти сила, пропорційна масі цього тіла.

Силовою характеристикою гравітаційного поля є напруженість поля. **Напруженість гравітаційного поля** - це векторна величина, що чисельно дорівнює відношенню сили, що діє з боку гравітаційного поля на тіло, яке в ньому знаходиться, до маси m цього тіла:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (2)$$

Напруженість гравітаційного поля не залежить від маси тіла, а є функцією координат (x, y, z) точки поля, в яку поміщають тіло, і часу.

Таким чином напруженість поля \vec{g} являє собою векторну величину, напрямком якої визначається напрямком гравітаційної сили \vec{F} , а чисельне значення - формулою прискорення вільного падіння. Напруженість гравітаційного поля співпадає по величині, по напрямку і по одиницям вимірювання з прискоренням вільного падіння, проте за своїм фізичним змістом це зовсім різні фізичні величини. Якщо напруженість поля характеризує стан простору в даній точці, то сила та прискорення з'являється тільки тоді, коли в даній точці знаходиться пробне тіло.

Гравітаційне поле називається **стаціонарним**, якщо тіла, що його створюють, є нерухомими відносно системи відліку, обраної для опису поля. Напруженість

стаціонарного гравітаційного поля не залежить від часу і є функцією тільки координат.

Нехай тіло масою M створює гравітаційне поле, у яке поміщають тіло масою m . Із другого закону Ньютона слідує, що під дією сил гравітаційного поля тіло масою m набуває прискорення \vec{a} , що чисельно дорівнює напруженості цього поля:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \vec{g} \quad (3)$$

Із закону всесвітнього тяжіння (1) враховуючи формулу (2) одержуємо, що напруженість гравітаційного поля, що створюється нерухомим тілом масою M :

$$\vec{g} = -G \frac{M}{r^3} \vec{r}, \quad (4)$$

де \vec{r} — радіус-вектор точки поля, що розглядається.

Із графіка функції $g = g(r)$ наглядно видно (рис.2), що напруженість гравітаційного поля g прямує до нуля, коли відстань r прямує до нескінченності. Саме тому ствердження типу "супутник покинув гравітаційне поле Землі" є невірними.

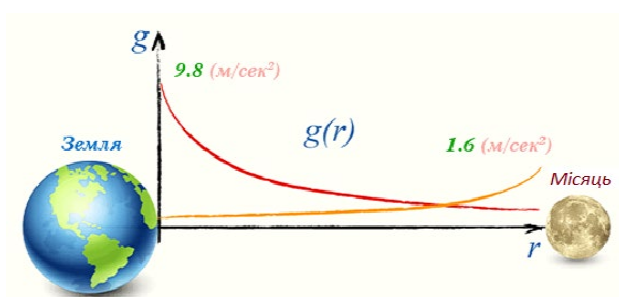


Рис.2.

Гравітаційні поля небесних тіл перекриваються. Якщо рухатися вздовж прямої, що з'єднує центри Землі та Місяця, то, починаючи з певного місця, буде переважати напруженість гравітаційного поля Місяця (рис.2).

3. Прискорення вільного падіння

Наведене співвідношення (1) дозволяє визначити не тільки масу будь-якого тіла, а і маси космічних тіл, включаючи Землю, знаючи її радіус і гравітаційне

прискорення на її поверхні.

Історично маса Землі була вперше визначена Генрі Кавендіш, який провів перші вимірювання гравітаційної постійної. Якщо змінювати висоту тіла над поверхнею Землі, то \vec{g} буде змінюватись (таблиця 2). Його можна обчислити за формулою:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{(r+h)^2}.$$

Таблиця 1.

Гравітаційне прискорення на різній висоті над рівнем моря			
<i>h</i> , км	<i>g</i> , м/с ²	<i>h</i> , км	<i>g</i> , м/с ²
0	9,8066	20	9,7452
1	9,8036	50	9,6542
2	9,8005	80	9,5644
3	9,7974	100	9,505
4	9,7943	120	9,447
5	9,7912	500	8,45
6	9,7882	1000	7,36
8	9,7820	10 000	1,50
10	9,7759	50 000	0,125
15	9,7605	400 000	0,0025

Треба брати до уваги, що на прискорення тіла, що падає, впливають декілька факторів:

- Обертанням Землі. Внаслідок обертання Землі, завдяки дії доцентрової сили, прискорення вільного падіння тіла на полюсах вище, ніж на екваторі.
- Формою Землі. Земля не ідеальна сфера, а має сплюснуту на полюсах форму.
- Висотою над рівнем моря.
- Неоднорідністю Землі.

Тому прискорення вільного падіння не однакове скрізь на Землі. Стандартне значення приблизно відповідає прискоренню падіння тіла на широті 45° і на висоті рівня моря.

Прискорення вільного падіння \vec{g} - прискорення, що надається тілу в вакуумі силою тяжіння, тобто геометричній сумою гравітаційного тяжіння планети (або іншого астрономічного тіла) і інерційних сил, викликаних її обертанням.

Обертання Землі і його вплив на рух тіл

Для визначеності будемо вважати, що мова йде про вільне падіння на Землі. Величину прискорення вільного падіння можна представити як векторну суму двох доданків: гравітаційного прискорення, викликаного земним тяжінням, і доцентрового прискорення.

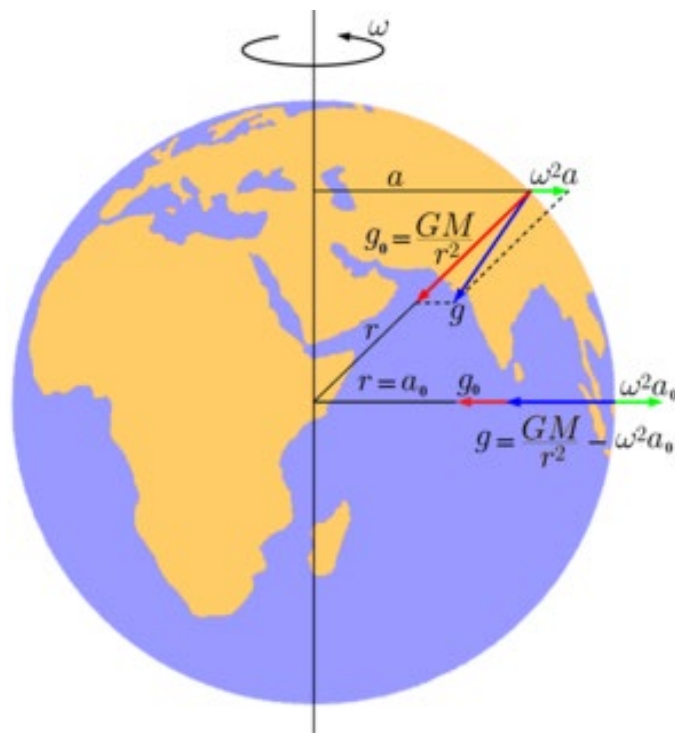


Рис. 3

Доцентрове прискорення є наслідком обертання Землі навколо своєї осі. Саме доцентрове прискорення, викликане обертанням Землі навколо своєї осі, вносить найбільший вклад в неінерціальна системи відліку, пов'язану із Землею.

Врахуємо те, що розміри будь-якого тіла на Землі нехтовно малі в порівнянні з радіусом Землі. Тоді в точці, що знаходиться на відстані a від осі обертання, доцентрове прискорення дорівнює :

$$a_{\text{ц}} = \omega^2 a \quad , \quad (5)$$

де ω - кутова швидкість обертання Землі, що визначається як $\omega = 2\pi / T$, а T - час одного обороту навколо своєї осі, для Землі рівне 86164 секундам (зоряна доба) .

Дві компоненти прискорення вільного падіння на Землі \vec{g} : гравітаційна (в наближенні сферично симетричною залежності густини від відстані від центру Землі) дорівнює GM/r^2 і відцентрова, яка дорівнює $\omega^2 a$, де a - відстань до земної осі, ω - кутова швидкість обертання Землі.

Вектор доцентрового прискорення направлений по нормалі до осі обертання Землі. На екваторі вона становить $3,39636 \text{ см} / \text{с}^2$, причому на інших широтах напрям вектору вільного падіння не збігається з напрямком вектору гравітаційного прискорення, спрямованого до центру Землі.

4. Сила тяжіння

Розглянемо сили, що діють на тіло, яке знаходиться на поверхні Землі.

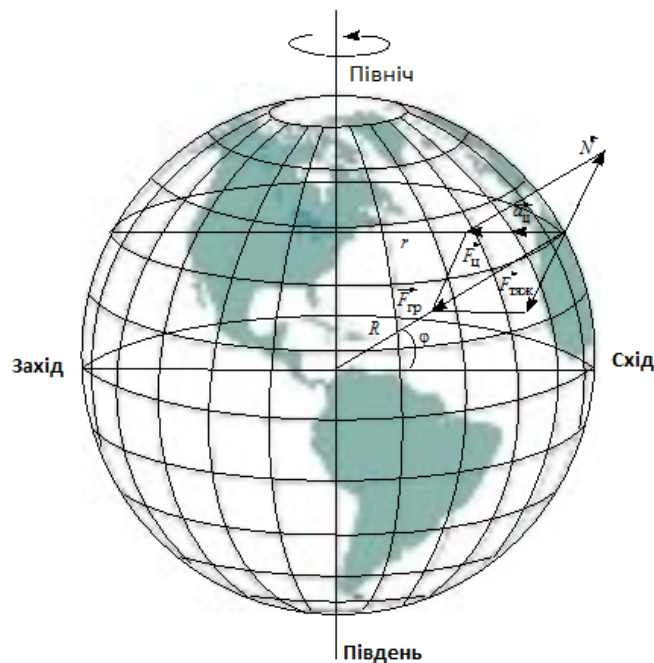


Рис. 4.

Тіло втримується на поверхні Землі доцентровою силою

$$\vec{F}_{\text{ц}} = m\vec{a}_{\text{ц}} = \vec{F}_{\text{гр}} + \vec{N}, \quad (6)$$

де \vec{N} - сила реакції земної поверхні або сила реакції опори.

*Складову сили всесвітнього тяжіння, що діє на тіло з боку Землі та надає йому прискорення вільного падіння називають **силою тяжіння**.*

Із рис. 4 видно, що сила тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$ дорівнює по модулі силі реакції опори \vec{N} . Згідно з (6) сила тяжіння на полюсах дорівнює гравітаційній силі $\vec{F}_{\text{гр}}$, оскільки на полюсах Землі $\vec{F}_{\text{ц}} = 0$.

На широті місцевості φ силу тяжіння можна визначити по теоремі косинусів

$$F_{\text{тяж}}^2 = F_{\text{гр}}^2 + F_{\text{ц}}^2 - 2F_{\text{гр}}F_{\text{ц}} \cos \varphi \quad (7)$$

Доцентрова сила на широті φ : $F_{\text{ц}} = m\omega^2 R \cos \varphi$, де R – відстань від центра Землі до тіла на її поверхні. Величина сили $F_{\text{ц}}$ набагато менша гравітаційної сили ($F_{\text{ц}} < 4 \cdot 10^{-2} F_{\text{гр}}$), тому в (7) доданком $F_{\text{ц}}^2$ можна знехтувати.

Тоді
$$F_{\text{тяж}}^2 \approx F_{\text{гр}}^2 - 2F_{\text{гр}}F_{\text{ц}} \cos \varphi = F_{\text{гр}}^2 \left(1 - \frac{2F_{\text{ц}} \cos \varphi}{F_{\text{гр}}}\right)$$

або
$$F_{\text{тяж}} \approx F_{\text{гр}} \sqrt{\left(1 - \frac{2F_{\text{ц}} \cos \varphi}{F_{\text{гр}}}\right)} \quad (8).$$

Таким чином, з виразу (8) слідує, що обертання Землі впливає на величину сили тяжіння. При цьому ***сила тяжіння відрізняється від гравітаційної сили по величині та напрямку***. Відзначимо однак, що дана відмінність є незначною тому впливом сили тяжіння, так як і впливом сил інерції, викликаних обертанням Землі, можна знехтувати при розв'язанні практичних завдань по визначенню прискорення вільного падіння.

5. Методи визначення прискорення вільного падіння

Вільне падіння - це рух тіла у вакуумі під дією тільки сили тяжіння. Галілео

Галілей встановив, що *при відсутності сил опору всі тіла падають на поверхню Землі під дією земного тяжіння з однаковим прискоренням, тобто прискоренням вільного падіння, що не залежить від маси тіла (закон Галілея).*

На тіло, що падає в повітрі, крім сили тяжіння діє ще і сила опору повітря, отже, строго кажучи, такий рух не є вільним падінням. Падіння тіл у повітрі можна приблизно вважати вільним лише за умови, що опір повітря малий і їм можна знехтувати.

Вивчення величини прискорення вільного падіння (і, відповідно, сили тяжіння) має важливе теоретичне й прикладне значення в геофізиці, геодезії, геології, космонавтиці є основою науки, що називається гравіметрією. По вимірюванням g у різних точках визначається фігура Землі (геоїда) і розподіл мас у її надрах, а дані про різні аномалії (відхилення сили тяжіння від нормального значення, обумовлене геометричними характеристиками геоїда) служать для пошуку й розвідки родовищ корисних копалин.

Прискорення вільного падіння (прискорення сили тяжіння) - прискорення, що надається тілу силою тяжіння, при виключенні з розгляду інших сил. Відповідно до рівняння руху тіл в неінерційних системах відліку прискорення вільного падіння чисельно дорівнює силі тяжіння, що впливає на об'єкт одиничної маси.

Прискорення вільного падіння на поверхні Землі варіюється від $9,780 \text{ м / с}^2$ на екваторі до $9,82 \text{ м / с}^2$ на полюсах [3]. Стандартне («нормальне») значення, прийняте при побудові систем одиниць, становить $9,80665 \text{ м / с}^2$ [4], [5].

Стандартне значення g було визначено як «середнє» в якомусь сенсі на всій Землі: воно приблизно дорівнює прискоренню вільного падіння на широті $45,5^\circ$ на рівні моря. У приблизних розрахунках його зазвичай приймають рівним $9,81$, $9,8$ або більше грубо 10 м / с^2 .

Для точних вимірювань абсолютних значень прискорення вільного падіння використовують гравіметри. Розрізняють два різновиди гравіметрів: абсолютні і відносні. Абсолютні гравіметри вимірюють прискорення вільного падіння безпосередньо. Відносні гравіметри визначають приріст прискорення вільного

падіння щодо значення в деякому вихідному пункті. Принцип їхньої дії базується на вимірюванні часу, за який тіло, що падає, проходить відстані між декількома точками.

Розглянемо випадок, коли початкова швидкість тіла, що падає з висоти h , дорівнює нулю (рис. 5).

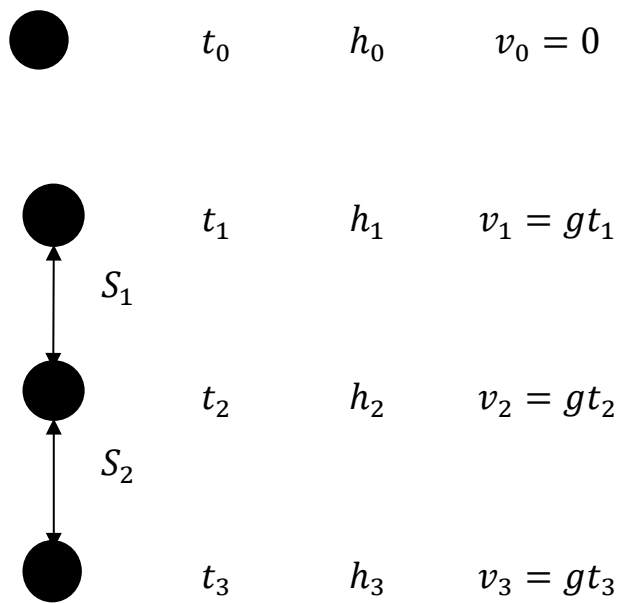


Рис. 5

Якщо ввести позначення $S_1 = h_2 - h$; $S_2 = h_3 - h_2$; $\Delta t_1 = \Delta t_2 - t_1$; $\Delta t_2 = t_3 - t_1$, то кінематичні рівняння руху на ділянці S_1 будуть мати вигляд:

$$S_1 = v_1 \Delta t_1 + \frac{g \Delta t_1^2}{2} \quad (9)$$

$$S_2 = v_2 \Delta t_2 + \frac{\Delta t_2^2}{2} = (v_1 + g \Delta t_1) \Delta t_2 + \frac{g \Delta t_2^2}{2} \quad (10)$$

Розв'язавши рівняння (9) відносно v_1 і підставивши v_1 в рівняння руху тіла (10) на ділянці S_2 отримаємо:

$$g = \frac{2S_2 \Delta t_1 - 2S_1 \Delta t_2}{\Delta t_1^2 \Delta t_2 + \Delta t_2^2 \Delta t_1} = \frac{2\left(\frac{S_2}{\Delta t_2} - \frac{S_1}{\Delta t_1}\right)}{(\Delta t_1 + \Delta t_2)} \quad (11)$$

Якщо припустити, що $S_1 = S_2 = S$, то отриманий вираз буде мати вигляд:

$$g = \frac{2\left(\frac{1}{\Delta t_1} - \frac{1}{\Delta t_2}\right)}{\Delta t_1 + \Delta t_2} S = \frac{S}{K} \quad (12)$$

де

$$K = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2\left(\frac{1}{\Delta t_1} - \frac{1}{\Delta t_2}\right)} \quad (13)$$

Оскільки отримана залежність лінійна (рис. 6), то очевидно, що побудувавши графік $S = f(K)$ можна визначити g через кут нахилу прямої

$$g = \frac{S}{K} = \operatorname{tg} \alpha$$

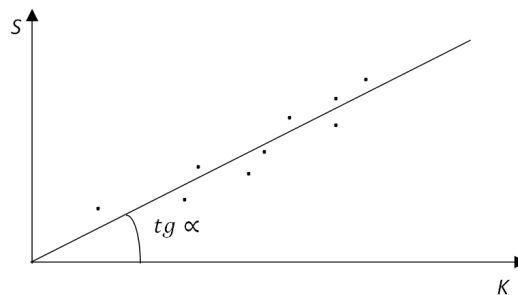


Рис. 6

6. Вимірювання та обробка результаті вимірювань

Для вимірювання прискорення вільного падіння використовується балістичний метод. Установа (рис.7) складається з підставки з регулювальними

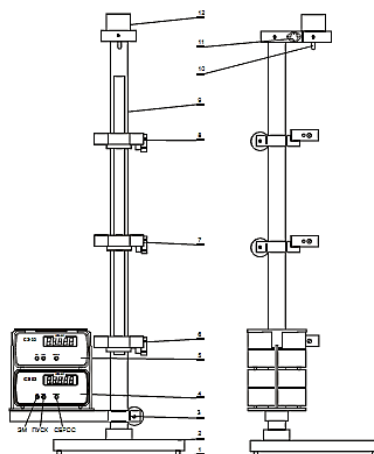


Рис. 7. Установа для вимірювання прискорення вільного падіння:

1 – регулювальні гвинти, 2 – основа, 3 – підставка секундомірів, 4 – секундомір нижній, 5 – секундомір верхній, 6 – фотодатчик 3, 7 – фотодатчик 2, 8 – фотодатчик 1, 9 – стойка установки, 10 – падаюче тіло, 11 – роз'єм електромагніту, 12 – електромагніт.

гвинтами, які дозволяють встановлювати вертикальне положення стойки з датчиками; стойки із закріпленням на ній електромагнітом, трьох фотодатчиків і двох секундомірів. Фотодатчики можуть переміщатися вздовж стійки та фіксуватися на різних відстанях один від одного.

7. Порядок виконання вимірювань та обробка результатів вимірювань

1. Перевірте правильність положення установки і, якщо буде потреба регулювальними гвинтами встановіть стойку у вертикальному положенні. Переконайтеся, що падаюче тіло вільно пролітає зазор фотодатчиків і перетинає їхні промені.
2. Вимкніть обидва секундоміри вмикачем на задній стінці приладів.
3. Встановіть рівні відстані між фотодатчиками S .
4. Натисніть кнопки "СБРОС" обох секундомірів: на індикаторах встановляться нульові значення.
5. Натисніть кнопку верхнього секундоміра "ЭМ" і вклавть досліджуване тіло (куля), в отвір електромагніту, який буде втримувати це тіло.
6. Натисніть кнопку "ПУСК" нижнього секундоміра, потім натисніть кнопку "ПУСК" верхнього секундоміра: проходження струму через електромагніт припиниться, і тіло (куля) не буде втримуватися електромагнітом.
7. Виконайте відлік вимірних проміжків часу Δt_1 і Δt_2 .
8. Проведіть додатково ще два вимірювання Δt_1 і Δt_2 .
9. Знайдіть середні значення.
10. За отриманими середніми значеннями розрахуйте величини Δt_1 , Δt_2 по формулі (13) розрахуйте значення K .
11. Результати занесіть у таблицю 1.
12. Змініть відстань між фотодатчиками і проведіть нову серію вимірів.
13. Проведіть 6-7 серій таких вимірів (у кожному випадку необхідно точно виміряти S). Намагайтесь отримати як можна ширший діапазон значень S .
14. За отриманими даними побудуйте графік залежності S от K .

15. На основі методу найменших квадратів проведіть через експериментальні точки пряму. Визначте по її нахилу прямої величину g .

Таблиця 1

Номер серії	Номер досліду	S (м)	Δt_1 (с)	$\Delta t_{1\text{cp}}$ (с)	Δt_2 (с)	$\Delta t_{2\text{cp}}$ (с)	S (м)	K	g_i (с)	g_{cp} (с)
1	1									
	2									
	3									
2	1									
	2									
	3									
3	1									
	2									
	3									
4	1									
	2									
	3									

8. Контрольні питання

1. Що називається вільним падіння тіла?
2. Що називається прискоренням вільного падіння тіла? Від яких величин воно залежить?
3. Що таке гравітаційне прискорення? Від яких величин воно залежить?
4. Які існують методи визначення прискорення вільного падіння?
5. Яким методом у даній роботі визначається прискорення вільного падіння? Опишіть цей метод.

6. Отримайте формулу для визначення прискорення вільного падіння.
7. Опишіть роботу установки, що використовується в даній роботі.
8. Визначте величини прискорення вільного падіння та гравітаційного прискорення в місці проведення досвіду зрівняйте з отриманим результатом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики, т.1, Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка, вид. – К.: Техніка, 1999, § 3.1 – 3.7, 4.1 – 4.4.
2. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. 2-е изд.–М.: Высшая школа, 1980, §8 - 9.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1. Механика, 3-е изд.–М.: Наука, 1989, §30.
4. Н.О.Якуніна, Н.В.Максимчук, Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Вимірювання прискорення вільного падіння», 2014