

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи З(1)

З розділу «Механіка» курсу «Загальна фізика»

Затверджено Методичною радою фізико-математичного факультету НТУУ «КПІ»

Укладачі:

Якуніна Н.О., канд. фіз.-мат. наук, доц.

Максимчук Н.В., канд. техн. наук, асист.

Відповідальний редактор:

Локтєв В.М., д-р фіз.-мат. наук, акад. НАН України

Київ

НТУУ «КПІ»

2014

ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ

Мета роботи: визначити прискорення вільного падіння за допомогою балістичного гравіметра.

Обладнання і матеріали: установка для вимірювання прискорення вільного падіння, секундоміри.

1. Гравітаційна взаємодія, її властивості та характеристики

Гравітація — це фундаментальна взаємодія в природі, якій підлягають всі матеріальні об'єкти.

Гравітаційна взаємодія 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 **сила тяжіння** або **гравітаційна сила**, величина якої визначається законом всесвітнього тяжіння.

Закон всесвітнього тяжіння І.Ньютона полягає у наступному: сила притягіння двох тіл прямо пропорційна масам цих тіл і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:

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

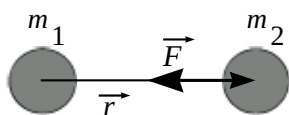
де m_1, m_2 – маси тіл, що взаємодіють;

R – відстань між центрами мас тіл;

G – гравітаційна стала.

У векторному вигляді закон всесвітнього тяжіння записується так:

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



де $\vec{r}$ – радіус-вектор, проведений від одного тіла до іншого (рис.1),

r - модуль радіус-вектора, що дорівнює відстані R .

Експериментально було отримано, що $G = (6,6720 \pm 0,0041) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$.

Закон всесвітнього тяжіння виконується для матеріальних точок і тіл, що мають кулеподібну форму.

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.

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 :

$$\vec{g} = -G \frac{M}{r^3} \vec{r},$$

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

Таким чином напруженість поля g являє собою векторну величину, напрямком якої визначається напрямком гравітаційної сили 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.

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.

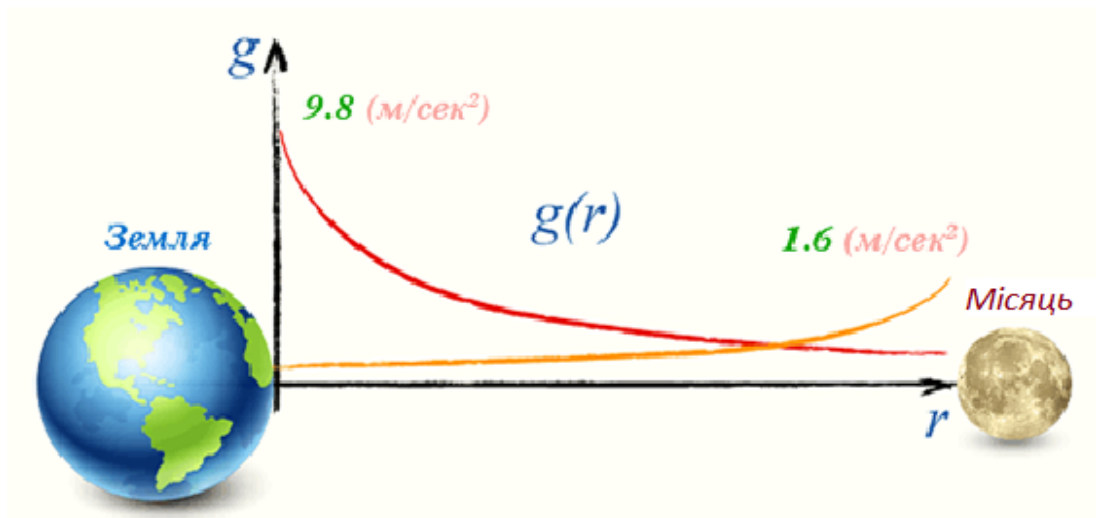


Рис.2.

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.

3. Обертання Землі і його вплив на рух тіл

Якщо припустити, що Земля має форму кулі і її маса розподілена сферично симетрично, то сила тяжіння тіла масою m до Землі спрямована до центру Землі, а її модуль обчислюється таким чином:

$$F = G \frac{mM_3}{R^2}, \quad (4)$$

где M_3 – маса Землі;

R – відстань від тіла до центра Землі.

Врахуємо те, що розміри будь-якого тіла на Землі нехтовно малі в порівнянні з радіусом Землі. Добове обертання Землі навколо своєї осі приводить до того, що тіло на поверхні Землі набуває доцентрового прискорення

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

вектор якого лежить у площині кола й спрямований перпендикулярно осі обертання по радіусу кола (рис.3). Оскільки кутова швидкість в формулі (5) для доцентрового прискорення входить у другій степені, то прискорення $a_{\text{ц}}$ не залежить від напрямку обертання.

Згідно з формулою (5), прискорення досягає найбільшого значення на екваторі. На полюсах доцентрове прискорення дорівнює нулю, оскільки полюси є нерухомими.

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

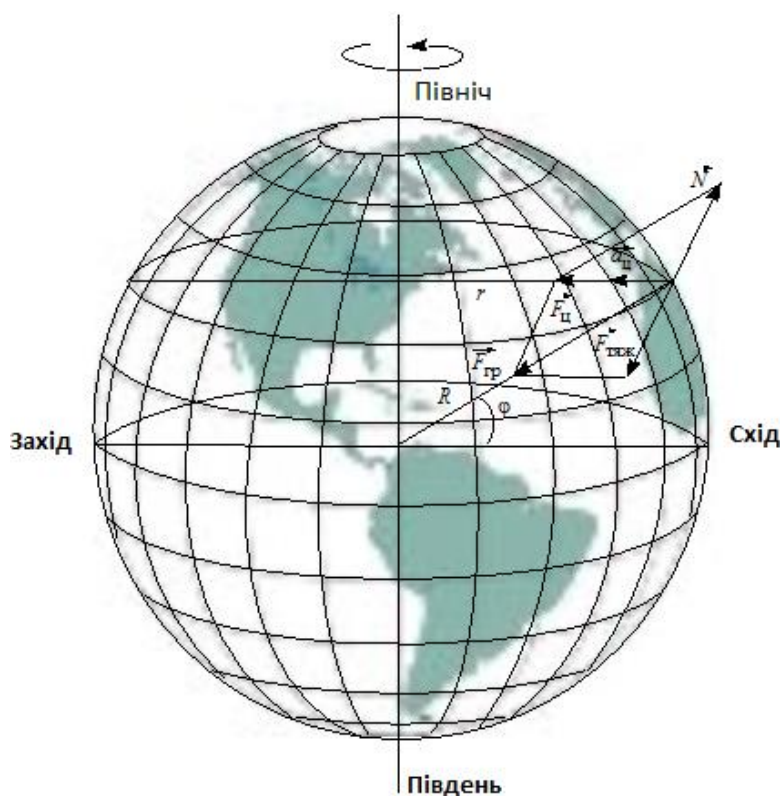


Рис. 3. Планета Земля і її обертання

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 :

$$F_{\text{ц}} = m\omega^2 R \cos \varphi,$$

где 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

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

або $F_{\text{тяж}} \approx F_{\text{гп}} \sqrt{1 - \frac{2F_{\text{ц}} \cos \varphi}{F_{\text{гп}}}}.$ (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'язання практичних завдань по визначенню прискорення вільного падіння.

4. Прискорення вільного падіння, методи визначення прискорення вільного падіння

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

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).**

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.

Для точних вимірювань абсолютних значень прискорення вільного падіння використовують балістичні гравіметри. 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. 4).

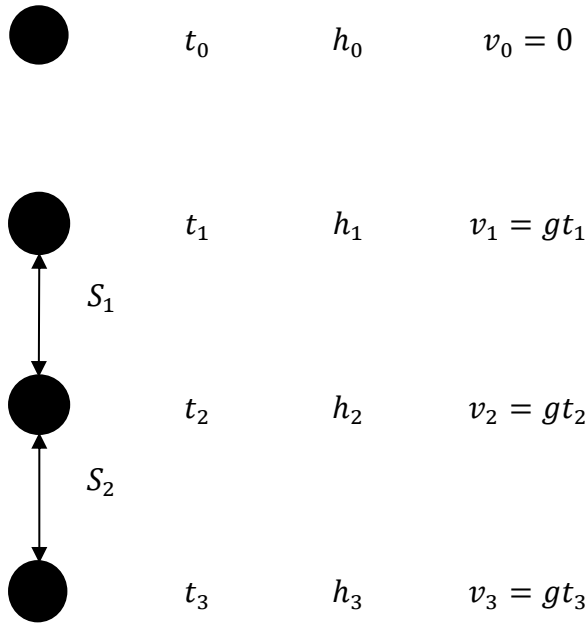


Рис. 4.

Якщо ввести позначення $S_1 = h_2 - h_1$; $S_2 = h_3 - h_2$; $\Delta t_1 = t_2 - t_1$; $\Delta t_2 = t_3 - t_2$, то кінематичні рівняння руху на ділянці S_1 будуть мати вигляд:

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

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

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

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

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

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

де

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

Оскільки отримана залежність лінійна (рис. 5), то очевидно, що побудувавши графік $S = f(K)$ можна визначити g через кут нахилу прямої

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

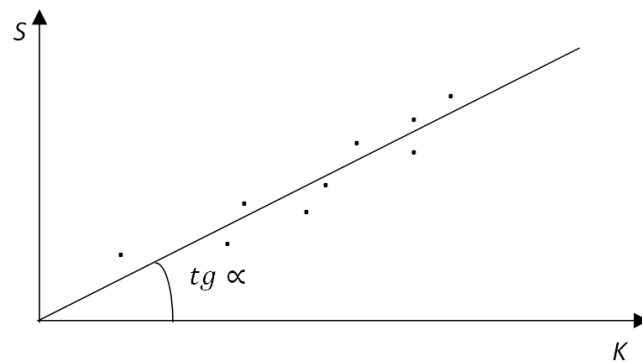


Рис. 5

5. Опис установки

Для вимірювання прискорення вільного падіння використовується балістичний метод. Установка (рис.6) складається з підставки з регулювальними 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.

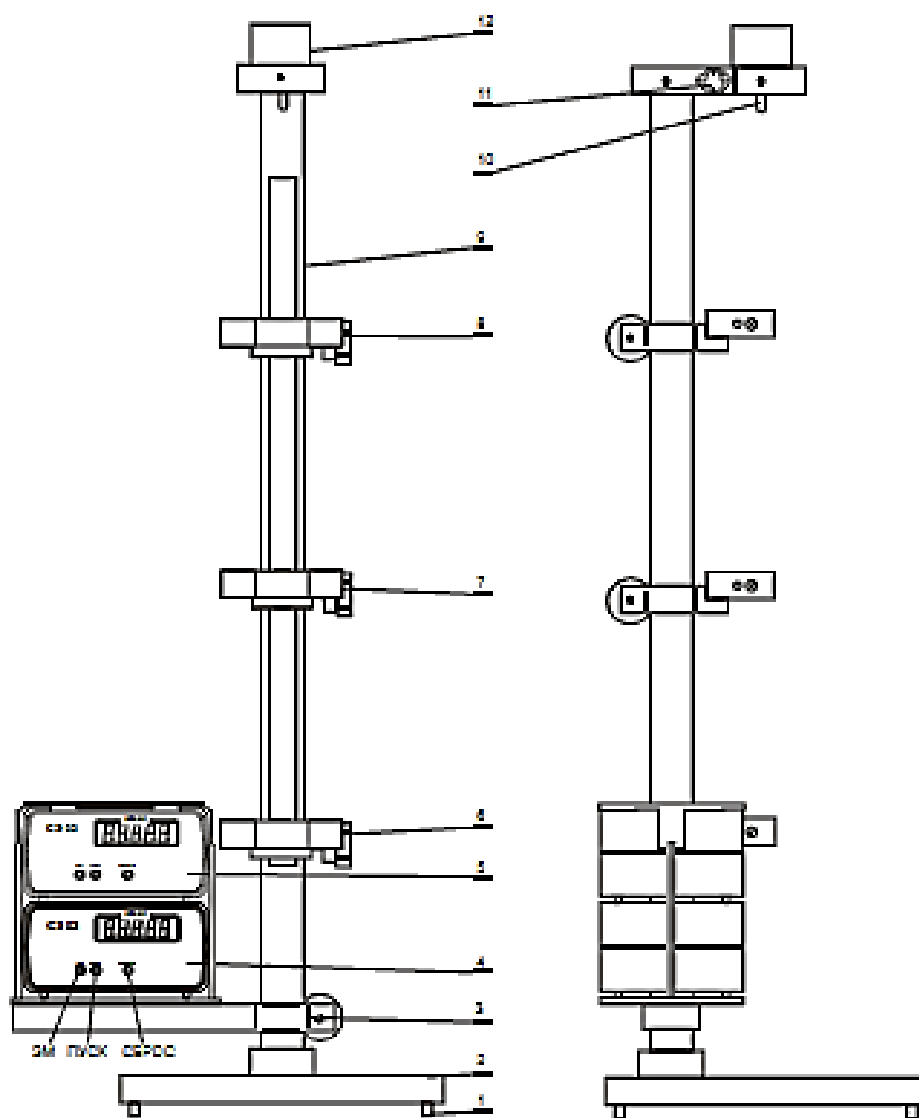


Рис. 6. Установка для вимірювання прискорення вільного падіння:

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 електромагніта, 12 – електромагніт.

6. Порядок виконання 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 вкладіть досліджуване тіло (куля), в отвір електромагніта, 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:

Номер серії	Номер дослідду	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									

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 .

4. Обробка результатів вимірювань

1. За отриманим даними побудуйте графік залежності S від K .
2. На основі методу найменших квадратів проведіть через експериментальні точки пряму. Визначте по її нахилу g .

5. 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. Визначите величини прискорення вільного падіння та гравітаційного прискорення в місці проведення досвіду зрівняйте з отриманим результатом.

6. ЛІТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1.Механика. 3-е изд. М.:Наука, 1989.