МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ФІЗИКИ
у режимі ЕНК

Частина1. Механіка, Молекулярна фізика та термодинаміка.

Одеса - 2021

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика» у режимі ЕНК для студентів всіх форм навчання за спеціальностей

Укладач: Кільян А.М. Одеса, ОДЕКУ, 26 с. укр. мова.

Відповідальний редактор: Герасимов О.І., зав. кафедрою загальної та теоретичної фізики ОДЕКУ.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ _____ 4

Порядок виконання лабораторної роботи у режимі ЕНК_____ 5

Перелік навчальної літератури _____ 5

Зразок протоколу лабораторної роботи _____ 6

Коливальний рух (теоретичні відомості до лабораторних робіт №1 та №2) _____ 7

Лабораторна робота №1. Математичний маятник _____ 9

Лабораторна робота №2. Пружинний маятник _____ 13

Лабораторна робота № 3. Визначення в'язкість рідини за методом Стокса _____ 20

Вступ

Мета цих методичних вказівок - формування у студентів практичних знань, вмінь та навичок з фізики в умовах дистанційного навчання, отримання вмінь опрацьовувати фізичні закони про процеси та явища, що відбуваються в неживій і живій природі, вміння бачити природничо-науково зміст проблем, що виникають в практичній діяльності фахівця, моделювання умов лабораторного фізичного експерименту. вміння працювати з фізичними приладами та обладнанням.

Лабораторні роботи виконуються дистанційно, згідно до графіку виконання робіт, або за розкладом занять через конференцію Zoom.

Для виконання робіт студент повинен отримати логін та пароль на власну електронну адресу та зареєструватися на сайті http://dpt12s.odeku.edu.ua/.

Зміст першої частини методичних вказівок включає до себе три лабораторних роботи: дві з механіки та одну з молекулярної фізики.

Порядок виконання робіт, їх захисту та оцінювання наведений у методичних вказівках.

Зауважимо, що виконання лабораторних робіт з фізики у дистанційному режимі ніяк не може замінити процес навчання студентів в лабораторії на реальних приладах та реальному фізичному обладнанні, але надає можливість не переривати послідовність навчання у зв'язку з такими обставами, як карантин тощо.

Тому методична робота, що пов'язана з дистанційним навчанням має користь і надає можливість студентам хоча б часткового ознайомлення з фізичними дослідами та фізичною лабораторією.

Лабораторні роботи, що описані в цих методичних вказівках, є достатньо класичними і узгоджені з освітньо-професійними програмами усіх спеціальностей ОДЕКУ.

Кількість годин на виконання лабораторних робіт регламентована навчальними планами цих спеціальностей.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ У РЕЖИМІ ЕЛЕКТРОННОГО НАВЧАЛЬНОГО КУРСУ (ЕНК)

Роботи виконуються за графіком, що складається на кафедрі.

1. Під час підготовки до лабораторної роботи студент повинен:

а) Проробити теоретичний вступ розділу, до якого належить робота та відповідний матеріал підручника.

б) Перевірити свої знання за контрольними запитаннями до теоретичного вступу.

в) Вивчити лабораторну роботу та відповісти на контрольні запитання до неї.

2. Роботи виконуються дистанційно, згідно до графіку виконання робіт, або за розкладом занять через конференцію Zoom.

3. Для виконання робіт студент повинен отримати логін та пароль на власну електронну адресу та зареєструватися на сайті http://dpt12s.odeku.edu.ua/.

4. Результати виконання робіт у вигляді протоколу у встановленому форматі студент надсилає на сайт кафедри у відповідний розділ.

5. Лабораторна робота оцінюється за критеріями, які доводяться до студентів викладачем перед початком виконання циклу робіт і розроблені згідно положень про кредитно-модульну систему навчання.

5.Студент, що має дві незахищені роботи, до наступної роботи не допускається.

Перелік навчальної літератури

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.1. – Київ: Техніка, 1999.

2. Савельев И.В. Курс физики. Т.1. – М.: Наука, 1989.

3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2001.

4. Коленков С.Р., Соломахо Г.И. Практикум по физике. Механика. М.: Высшая школа, 1990.

5. Гладун А.Д., Александров Д.А., Игошина Ф.Ф. Лабораторный практикум по общей физике. М.: Наука, 2004.

ЗРАЗОК ПРОТОКОЛУ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ
(Протокол готується з подвійного листа зошита у клітину)

Лицьовий бік протоколу

ОДЕКУ
Кафедра загальної і теоретичної фізики

Ст. Іванова І.П.
Гр. ГМ – 14

Викладач Петров М.Г.

Лабораторна робота №2

Перевірка законів кінематики і динаміки на приладі Атвуда

Одеса – 2021

Зміст протоколу

- Мета роботи
- Теоретичний вступ (основні закони та означення щодо об’єкту дослідження)
- Вивід робочої формули
- Схема установки (за наявності).
- Таблиця експериментальних даних
- Обробка експериментальних даних, обчислення шуканої величини та похибки вимірювання.
- Кінцевий результат
- Висновки (включають аналіз отриманих результатів, їх порівняння з табличними значеннями із зазначенням причин, які призвели до похибок або помилок при виконанні роботи).

КОЛИВАЛЬНИЙ РУХ

(Теоретичні відомості до лабораторних робіт №1 та №2)

Гармонічними коливаннями фізичної величини називають процес її зміни з часом за законом синуса або косинуса:

$$x = A\cos(\omega t + \alpha_0) \qquad (1)$$

У випадку механічних гармонічних коливань:

$x(\varphi)$ – лінійне (кутове) зміщення, тобто відхилення тіла або точки від положення рівноваги; A – амплітуда, тобто максимальне за модулем зміщення; $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ – циклічна (колова) частота коливань (T– період; ν– частота); $\alpha = \omega t + \alpha_0$ – фаза коливань; α_0 – початкова фаза.

Гармонічні коливання відбуваються під дією пружних або квазіупружних сил, пропорційних зміщенню і направлених до положення рівноваги:

$$F = -kx, \text{ де } k = \text{const.}$$

Якщо пружні, або квазіупружні сили – внутрішні сили системи, її коливання називають власними гармонічними коливаннями. В цьому випадку рівнянню руху $\vec{F} = m\vec{a}$ (з урахуванням того, що $F_{пр.} = -kx$, $a = \frac{d^2x}{dt^2}$) можна надати виду: $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$, (2)

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ - циклічна частота власних гармонічних коливань системи.

Рівняння (2) – це рівняння власних гармонічних коливань. Його розв'язок, тобто закон руху при гармонічному коливанні – це функція (1).

Власні гармонічні коливання можуть виконувати, наприклад, маятники при малих кутах відхилення.

Фізичний маятник. Фізичним маятником називають тіло, що здійснює коливання під дією сили тяжіння відносно горизонтальної осі, яка не проходить через центр мас (рис.1).

В положенні рівноваги центр мас фізичного маятника C знаходиться на одній вертикалі з точкою підвісу O. При відхиленні маятника від положення рівноваги на кут φ, виникає обертальний момент M сили тяжіння, плече якої $l_0 = l\sin\varphi$, де l – відстань від осі обертання до центру тяжіння C: $M = -mgl\sin\varphi$, де m – маса маятника, g – прискорення вільного падіння; знак „мінус" відповідає тому, що момент сили повертає тіло до положення рівноваги, а кут φ відраховується в протилежному напрямі.

За основним рівнянням динаміки обертального руху

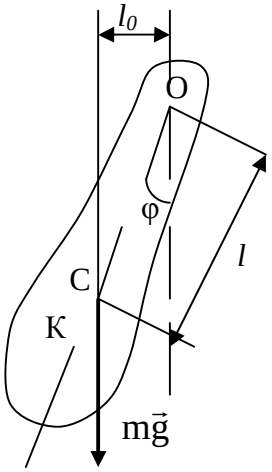


Рис.1.

$$I\left(\frac{d^2\varphi}{dt^2}\right) = -mgl\sin\varphi, \qquad (3)$$

де I – момент інерції маятника відносно горизонтальної осі, що проходить через точку підвісу O (на рисунку вісь перпендикулярна до його площини); $\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \varepsilon$ – кутове прискорення.

При малих кутах відхилення $\sin\varphi \approx \varphi$ і рівняння (3) набуває вигляду:

$$I\left(\frac{d^2\varphi}{dt^2}\right) = -mgl\varphi,$$

або $$\left(\frac{d^2\varphi}{dt^2}\right) + \frac{mgl}{I}\varphi = 0. \qquad (4)$$

Рівняння (4) – це рівняння власних гармонічних коливань фізичного маятника. Коефіцієнт при φ – квадрат циклічної частоти ω_0 його власних коливань:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{I}}. \qquad (5)$$

Тобто, для періоду власних коливань $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ отримуємо:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgl}}. \qquad (6)$$

Математичний маятник. Математичним маятником називають матеріальну точку, підвішену на невагомій нерозтяжній нитці.

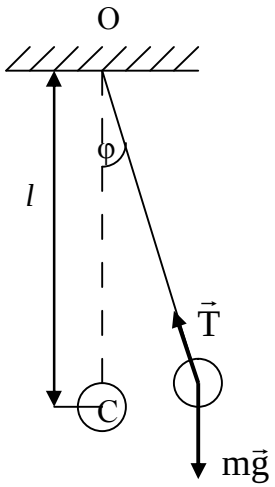


Рис.2

Як випливає з визначення, математичний маятник – поняття абстрактне (модельне уявлення). Якщо маленьку кульку підвісити на малорозтяжній нитці (рис.2), її момент інерції I відносно осі, що проходить через точку підвісу O, може бути визначений за теоремою Гюйгенса – Штейнера:

$$I = I_0 + ml^2 = \frac{2}{5}mR^2 + ml^2,$$

де $I_0 = \frac{2}{5}mR^2$ – момент інерції відносно осі, що проходить через центр кульки, R – радіус кульки, l – довжина нитки.

Якщо l >> R, то $ml^2 >> \frac{2}{5}mR^2$. Доданком I_0 можна знехтувати. Тоді $I = ml^2$ (7), тобто кульку можна вважати матеріальною точкою, а формула

(6) після підстановки виразу (7) трансформується у формулу Гюйгенса для періоду коливань математичного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (8)$$

Оборотний маятник. Порівняння формул (6) та (8) показує, що фізичний маятник коливається синхронно (тобто з тим самим періодом) з математичним маятником, довжина якого $L = \frac{I}{ml}$. Цю довжину називають **зведеною довжиною** фізичного маятника.

Точку К (рис.1), що міститься на лінії ОС на відстані L від точки підвісу, називають точкою коливань, або **центром коливань** фізичного маятника. Точка підвісу О та центр коливань К мають властивість взаємності: якщо маятник підвісити так, щоб вісь підвісу пройшла через точку К, то точка О стане центром коливань, а період коливань не зміниться. На цій властивості фізичного маятника заснований пристрій, що має назву оборотного маятника.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1
МАТЕМАТИЧНИЙ МАЯТНИК

(перед виконанням роботи вивчити теоретичний вступ „Коливальний рух”)

Мета роботи: визначення прискорення вільного падіння в даній точці Землі.

Теоретичний вступ.

Прискоренням вільного падіння $\vec{g}$ називають прискорення, якого тіло набуває під дією сили тяжіння. Воно різне в різних точках Землі: на полюсах – максимальне, а на екваторі – мінімальне.

Пояснюється це, по-перше, тим, що на вільно падаюче тіло діє не тільки сила гравітаційного притягання Землі $\vec{F}_{грав.}$ ($F_{грав.} = G\frac{mM_3}{R_3^2}$), але й відцентрова сила інерції $\vec{F}_{в.ц.}$, яка обумовлена добовим обертанням Землі навколо власної осі. Відцентрова сила інерції спрямована вздовж радіуса $r = R_3\cos\varphi$ кола, по якому обертається тіло, що знаходиться на широті φ, від його центра (рис.1) і дорівнює $\vec{F}_{в.ц.} = m\omega_3^2\vec{r}$ (ω_3 – кутова швидкість добового обертання Землі, R_3 - радіус Землі). Отже, значення відцентрової сили зменшується з широтою φ, від максимального на екваторі, де $r=R_3$, до нуля на полюсах.

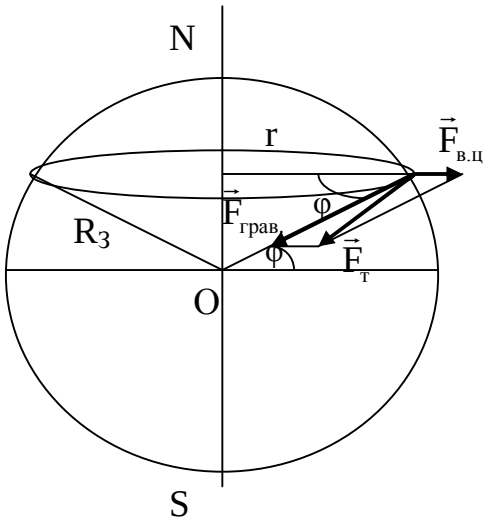


Рис.1

Таким чином, сила тяжіння $\vec{F}_т = m\vec{g}$ є векторною сумою двох сил, $\vec{F}_т = \vec{F}_{грав.} + \vec{F}_{в.ц.}$.

Відповідно, прискорення вільного падіння також має дві складові: $\vec{g} = \vec{g}_{грав.} + \vec{g}_{ін.} = \vec{g}_{грав.} + \omega_З^2\vec{r}$.

$\vec{g}_{грав.}$ – вектор, який характеризує гравітаційне поле Землі. У кожній точці земної кулі він визначається тільки розмірами та формою Землі, а також розподілом маси. Якби Земля була ідеальною кулею, а розподіл мас – однорідним, то вектор $\vec{g}_{грав.}$ був би напрямлений до центра Землі, а його значення – незмінним і дорівнювало

$$g_{грав.} = G\frac{M_З}{R_З^2},$$

де G – гравітаційна стала, $M_З$ – маса Землі.

Реально Земля є еліпсоїдом обертання, сплюснутим з боку полюсів, і її радіус $R_З$ залежить від широти. Отже, залежність $\vec{g}_{грав.}$ від радіусу Землі є другою причиною залежності прискорення вільного падіння від географічної широти.

Модуль результуючого прискорення без урахування неоднорідності розподілу маси Землі можна наближено представити як різницю $g_{грав.}$ і проекції $g_{ін.}$ на напрям вектора $\vec{g}_{грав.}$ (напрями $\vec{g}_{грав.}$ і $\vec{g}$ відрізняються незначно внаслідок того, що $g_{ін.} << g_{грав.}$)

$$g = g_{грав.} - g_{ін.}\cos\varphi = g_{грав.} - \omega_З^2 R_З\cos^2\varphi.$$

Звідки випливає, що на полюсах

$$g_{пол.} = g_{грав.} = G\frac{M_З}{R_{З\,пол.}^2},$$

а на екваторі $g_{екв.} = g_{грав}^{екв} - \omega_З^2 R_{екв.}$.

Виміри дають $g_{пол.}$ = 9,832 м/с^2; $g_{екв.}$=9,78 м/с^2.

Значення g=9,80665 м/с^2 прийняте за нормальне (стандартне) значення.

Дана робота дозволяє встановити значення g для широти Одеси. Для визначення прискорення вільного падіння в ній використовуються універсальний маятник, до складу якого входять математичний і фізичний (оборотний) маятники.

чі клавіші.

Визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника.

З формули періоду коливань математичного маятника (формула (8) теоретичного вступу „Коливальний рух”)

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

випливає

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}. \qquad (9)$$

Таким чином, для визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника треба виміряти його довжину l та період коливань T.

Порядок виконання роботи

1. Для виконання віртуальної лабораторної роботи перейти за посиланням на сайт https://phet.colorado.edu/sims/html/pendulum-lab/latest/pendulum-lab_uk.html.

2. Обрати на сайті розділ "ВСТУП". Параметри установки встановити відповідно до індивідуального варіанту , наведеного нижче в таблиці 1 варіанти.. Положення перемикачів "Гравітація" та "Тертя", під час вимірювань, - не змінювати!

Таблиця 1. Варіанти.

№ варіанту	Данні			
	Маса 1 (кг) $\mathbf{m_1}$	Довжина (м)		
		$\mathbf{l_1}$	$\mathbf{l_2}$	$\mathbf{l_3}$
1	0,10	0,30	0,50	0,70
2	0,20	0,20	0,40	0,60
3	0,30	0,50	0,70	0,90
4	0,10	0,40	0,60	0,80
5	0,20	0,60	0,80	1,00

5. Послідовно встановлюючи l1 l2 та l3 вимірювати відповідний час коливань для кожної довжини нитi. Кожне вимірювання (час проходження 10 коливань) виконувати щонайменше 3 рази. Для вимірювання часу коливань, ввімкнути секундомір, поставивши відповідну галочку на сторінці сайту.

6. Визначити період коливань за флокулою $\langle T\rangle = \frac{\langle t\rangle}{n}$

7. Розрахувати значення прискорення вільного руху (g) за формулою (9) для кожної довжини l.

8. Данні вимірювань та розрахунків занести в таблицю вимірювань (Таблиця 2).

Таблиця 2. Результати вимірів.

№ п./ п.	l, м	t, с	n	$T=\frac{t}{n}$, с	$\langle T\rangle^2$, $с^2$	g, $м/с^2$	Δg, $м/с^2$	$(\Delta g)^2$, $(м/с^2)^2$
1. 2. 3.								
1. 2. 3.								
1. 2. 3.								

9. Порівняти одержане значення прискорення вільного падіння з його табличним значенням на широті Одеси ($g_{таб.}$=9,81 $м/с^2$), визначивши точність їх збіжності

$$g_{експ.} = \left(\langle g_{експ.}\rangle \pm \Delta g_{експ.}\right) м/с^2$$
$$\alpha = ...$$
$$\varepsilon = \ldots \%$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\left|g_{таб.} - g_{експ.}\right|}{g_{експ.}} \cdot 100\% .$$

Вимірювання вважати задовільними, якщо $\varepsilon_1 \le \varepsilon$.

10. За результатами експерименту побудувати графік залежності квадрату періоду коливань від довжини маятника і перевірити лінійний характер залежності T^2 від l, тим самим перевіряючи формулу Гюйгенса.

11. Обчислити похибки вимірювань.

12. Зробити висновки.

13. Відповісти на контрольні запитання.

14. Протокол про виконання лабораторної роботи надіслати для оцінювання за адресою : http://dpt12s.odeku.edu.ua/mod/assign/view.php?id=966.

Контрольні запитання.

1. Які коливання називають гармонічними? Запишіть рівняння та закон гармонічних коливань. Під дією яких сил виникають гармонічні коливання?
2. Що називають зміщенням, амплітудою, періодом, частотою, циклічною частотою та фазою коливань?
3. Що таке фізичний маятник?
4. Що називають математичним маятником? Яку систему практично можна вважати математичним маятником?
5. Виведіть формулу циклічної частоти і періоду коливань фізичного та математичного маятників.
6. Що таке зведена довжина фізичного маятника?
7. Який маятник називають оборотним?
8. Що називають центром коливань фізичного маятника?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ПРУЖИННИЙ МАЯТНИК

1. Мета роботи: дослідити вільні згасаючі коливання пружинного маятника, визначити параметри коливальної системи та характеристики коливань (жорсткість пружини, коефіцієнт опору, період коливань, логарифмічний декремент, коефіцієнт затухання), а також дослідити характеристики коливань від маси тягарця маятника.

2. Теоретичні відомості.

Пружинним маятником називають систему, яка складається з невеликого тягарця масою m, підвішеного на вертикальній пружині жорсткістю k, другий кінець якої закріплений. Масою пружини зазвичай нехтують (рис. 1).

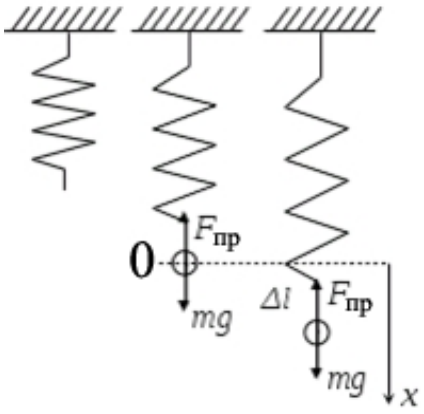


Рис. 1.

В положенні рівноваги (x =0) сила тяжіння $F_T = mg$, що діє на тягарець буде врівноважуватися силою пружності $F_{пр} = -k(\Delta l + x)$, отже:

$$mg = k\Delta l \ , \qquad (1)$$

де Δl - видовження пружини в стані рівноваги.

При зміщенні тягарця від положення рівноваги сила пружності буде більшою або меншою за силу тяжіння і їхня рівнодійна ***F*** буде направлена до положення рівноваги, а її модуль дорівнюватиме:

$$F = F_{пр} - mg \ , \qquad (2)$$

За законом Гука: $F_{пр} = - k(\Delta l + x)$, (3)

де ***x*** – зміщення системи від положення рівноваг ,$(\Delta l + x)$ - величина деформації пружини, знак “-” свідчить про те, що сила пружності за напрямком протилежна до деформації.

Підставимо у формулу (2) вирази (3) та (1) і отримаємо:

$$F = - k(\Delta l + x) - mg = - k\Delta l - kx - k\Delta l = - kx \ , \qquad (4)$$

Рівнодійна сил пружності і тяжіння пропорційна зміщенню **X** і направлена до положення рівноваги, тобто повертає систему в положення рівноваги, завдяки чому в системі відбуваються вільні коливання. Така сила називається повертаючою силою.

Реальні коливання, якщо їх не підтримувати ззовні, згасають внаслідок гальмівної дії сил опору зовнішнього середовища. Сила опору рухові тіла завжди напрямлена протилежно напряму руху, а її модуль при невеликих швидкостях пропорційний модулю швидкості: $F_{оп} = - rV$, де r – коефіцієнт опору.

Рівняння згасаючих коливань під дією пружної (чи квазіпружної) сили, враховуючи силу опору:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + r\frac{dx}{dt} + kx = 0 \ .$$

Ділимо всі члени цього рівняння на m:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{r}{m}\frac{dx}{dt} + \frac{k}{m}x = 0 \ . \qquad (5)$$

Розв`язком рівняння (5) буде:

$$x = A_0 e^{-\frac{rt}{2m}} \cos(\omega t + \varphi_0) = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_0). \qquad (6)$$

Графічно це рішення зображено у вигляді функції, графік якої ми бачимо на рисунку 2. Величина δ характеризує швидкість зменшення амплітуди коливань з часом. *Проміжок часу, протягом якого амплітуда коливань зменшується в е разів, називається часом релаксації.*

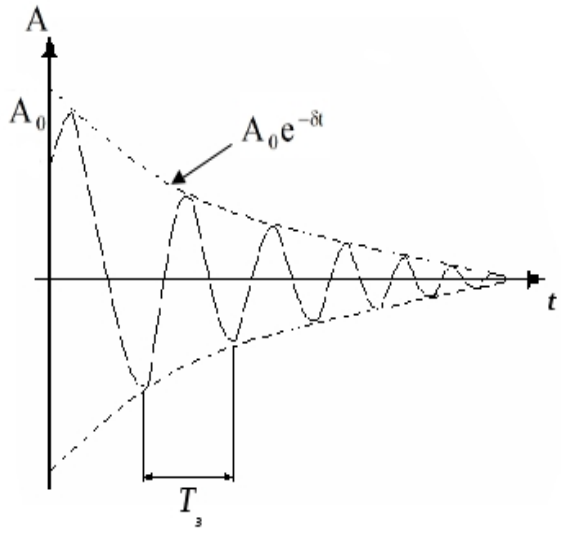


Рис.2.

Зі зміною амплітуди коливань буде змінюватися і повна енергія коливань. Повна енергія коливань дорівнює сумі кінетичної і потенціальної енергій. При проходженні тягарцем положення рівноваги вся енергія коливань – тільки кінетична, а в нижньому і верхньому крайніх положеннях тягарця вся енергія – тільки потенціальна, тобто $W_{п,макс} = W_{л,макс} = W$.

Як відомо, $$W_п = kx^2/2, \qquad (7)$$

Звідки $$W_{п,макс} = kA^2/2 = W.$$

Отже, $$W = \frac{m\omega^2 A^2}{2} = \frac{4\pi^2 A^2 m}{2T^2} = 2\pi^2 A^2 \nu^2 m, \qquad (8)$$

тобто енергія тіла, що здійснює гармонічні коливання, прямо пропорційна його масі, квадрату амплітуди коливань і квадрату їх частоти.

З формули циклічної частоти власних коливань $\omega_0 = 2\pi/T$ одержуємо, що період коливань (час за який здійснюється одне повне коливання) $T = 2\pi/\omega$.

Циклічна частота згасаючих коливань визначається за формулою

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{r}{2m}\right)^2} \qquad (9)$$

тоді, $$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k} - \left(\frac{r}{2m}\right)^2} \qquad (10)$$

тобто період коливань пружинного маятника тим більший, чим більша маса тягарця та меньше жорсткість пружини.

Порівнюючи між собою два значення амплітуди в момент часу, що відрізняється на період, дійдемо висновку, що

$$\frac{A(t)}{A(t+T)} = \frac{A_0 e^{-\delta t}}{A_0 e^{-\delta(t+T)}} = e^{-\delta t+\delta(t+T)} = e^{\delta T} \qquad (11)$$

є сталою величиною для даного коливального руху.

Ця величина δ називається декрементом згасання (або декрементом коливання). Натуральний логарифм цієї величини називається логарифмічним декрементом згасання.

$$\Lambda = \ln e^{\delta T} = \delta T = \frac{T}{r} = \frac{1}{Ne}, \qquad (12)$$

де Ne – число коливань, що здійснюються, доки амплітуда коливань зменшується в e разів. Λ - найбільш поширена кількісна міра затухання коливального руху; ця величина безрозмірна. Для більшості систем її значення приблизно дорівнює 0,1.

Знайшовши з графіка коливань логарифмічний декремент, можна визначити і коефіцієнт згасання, і коефіцієнт опору:

$$\delta = \frac{r}{2m}; \qquad (13)$$

звідки $$r = 2m\delta = \frac{2m\Lambda}{T}. \qquad (14)$$

3. Методика виконання роботи.

Методика виконання роботи даної роботи полягає в тому, що за виміряним значенням амплітуди коливань A_0 в початковий момент часу та амплітуди A_n через час t, за який відбулось n коливань, визначається період коливань T, коефіцієнт згасіння δ та логарифмічний декремент згасання Λ, ккоефіцієнт опору r за формулами:

$$T = \frac{t}{n} \quad (15)$$

$$\Lambda = \frac{1}{n}\ln\frac{A_0}{A_n} \quad (16)$$

$$\delta = \frac{\Lambda}{T} = \frac{1}{t}\ln\frac{A_0}{A_n} \quad (17)$$

$$r = \frac{2m}{t}\ln\frac{A_0}{A_n} \quad (18)$$

Для визначення жорсткості пружини використовується додатковий тягарець масою *M*, який додається до тіла, підвішеного на пружині, і призводить до її додаткового видовження $\Delta l_д$.

Тоді за умови рівноваги:

$$k(\Delta l + \Delta l_д) = (m + M)g \quad (19)$$

розкриємо дужки і отримаємо:

$$k\Delta l + k\Delta l_д = mg + Mg.$$

Враховуючи вираз (1) остаточно отримаємо формулу для розрахунку жорсткості пружини:

$$k = \frac{M}{\Delta l_д} g \quad (20)$$

4. Порядок виконання роботи.

1. Для виконання віртуальної лабораторної роботи перейти за посиланням на сайт https://phet.colorado.edu/sims/html/masses-and-springs/latest/masses-and-springs_uk.html. Зайти в розділ "Лаб.".

2. Зробити необхідні налаштування лабораторної роботи, встановивши регулятори (перемикачі) на сайті віртуальної лабораторної роботи відповідно до вимог вашого варіанту. Таблиця варіантів наведене нижче.

3. Для зручності вимірювань поставте позначки «□» навпроти опцій «Переміщення», «Положення рівноваги», «Шлях за період» та, за необхідністю, «Рухома лінія». Опцію «Рухома лінія» доцільно використовувати як додатковий орієнтир. Так само, для зручності, **використовуйте повільний режим**, поставивши відповідну позначку навпроти опції «Повільно».

4. Приєднайте жовтий тягарець до пружини, перевірте відповідність його маси значенню m_o для вашого варіанту. Натисніть на червону кнопку «Стоп», розташовану біля точки фіксації пружини.

5. Перед запуском вимірювань поставте лабораторну роботу на «Паузу», натиснувши кнопку "Старт/пауза" внизу екрану. Потім підготуйте віртуальний секундомір, розтасувати його на зручному для спостереження місці та ввімкніть відлік (секундомір не почне відлік часу допоки робота на "паузі").

6. Відтягніть підвішений на пружині тягарець, масою m_o, від положення рівноваги до нижньої пунктирної блакитної лінії «Довжина = 0 м» (нижній край тягарця торкається пунктирної блакитної лінії), дивиться попередній малюнок і відпустить, натиснувши кнопку "Старт/пауза", секундомір одночасно розпочне відлік часу коливань.

7. Пропустити 1-2 повних коливань та зупинить коливання, наприкінці 2 чи 3-го періоду, натиснувши на «Паузу». Поки робота на "паузі" виміряйте лінійкою траєкторії періоду, яка буде відображатися зліва від тягарця, та визначте амплітуду коливань A_0, (половина повної довжини траєкторії).

8. Після цього, знов натиснути кнопку "Старт/пауза", запустити роботу, відрахувати ще 2-3 повних коливань і виміряти амплітуду 5-го або 6-го коливання A_n та **час *t*,** за який відбулися всі коливання їх точну **кількість *n***.

9. Всі вимірювання, зазначені у п.п. 6 - 8 провести три рази і визначити середні значення виміряних величин.

10. За середніми значеннями визначити період коливань T, амплітуди коливання A_0 *та* A_n коефіцієнт згасіння δ, логарифмічний декремент згасіння , коефіцієнт опору середовища ***r*** . Необхідні розрахунки проводити за формулами (15-18). Результати записати в таблицю 2.

11. Зупинить коливання, натиснувши червону кнопку «Стоп», розташовану біля точки фіксації пружини. За допомогою лінійки відміряйте відстань від «синьої» до «чорної» лінії (відстань між довжиною пружини та положенням рівноваги - Δl). Результат записати в таблицю 2

14. Встановіть масу жовтого тягарця m_1 відповідно до вашого варіанту. Визначить видовження пружини Δl_1 при масі тягарця m_1.

15. Визначить додаткову масу тягарця за формулою $M = m_1 - m_o$ *та* додаткове видовження пружини $\Delta l_Д = \Delta l_1 - \Delta l$.

16. За формулою (20) визначити коефіцієнт жорсткості пружини *k*. Результати записати в таблицю 3.

17. Відтягнути жовтий тягарець з масою m_1- від положення рівноваги до нижньої пунктирної блакитної лінії «Довжина = 0 м» (нижній край тягарця торкається пунктирної блакитної лінії), і відпустить, натиснувши кнопку

"Старт/пауза", секундомір одночасно розпочне відлік часу коливань.. Повторити пункти 8 -10 три рази і результати записати в таблицю 2.

18. За середніми значеннями визначити видовження пружини при різних навантаженнях $\Delta l_Д$, Δl_1, Δl, амплітуди коливання A_0 та A_n, логарифмічний декремент згасіння , коефіцієнт опору середовища $\boldsymbol{r}$, коефіцієнт жорсткості пружини $\boldsymbol{K}$ за формулами (15, 16, 18 та 20). Результати записати в таблицю 2.

18. Замінить жовтий тягарець на рожевий, а потім на блакитний, не змінюючи інших параметрів системи, та виміряйте Δl (відміряйте відстань від «синьої» до «чорної» лінії) для кожного тягарця. За допомогою формули (1) розрахуйте масу жовтого та рожевого тягарців. Результати записати після таблиці 2.

Таблиця 1. Варіанти

Номер варіанту	m_o, (*кг*)	m_1, (*кг*)	Жорсткість пружини*	Тяжіння g (м/с$^{2)}$	Затухання*
1	0,10	0,18	1	9,8	2
2	0,11	0,19	2	9,8	1
3	0,15	0,20	3	9,8	3

*- номер позначки (відлік - зліва направо від початкової позначк

Таблиця 2. Результати вимірів.

№ п\п	*t*, (*с*)	*n*	*T*, (*с*)	A_0, (*м*)	A_n, (*м*)	Λ	δ (c^{-1})	*r*, $\frac{Нс}{м}$
Середні значення								

Таблиця 3. Результати вимірів.

№ п\п	Δl *(м)*	Δl_1 *(м)*	$\Delta l_Д$ *(м)*	A_0, *(м)*	A_n, *(м)*	Λ	r, $\frac{Нс}{м}$	k, $\frac{Нс}{м}$
Середні значення								

5. Контрольні запитання.

1. Що таке пружинний маятник?
2. Під дією яких сил відбуваються вільні затухаючі коливання пружинного маятника?
3. Записати диференціальне рівняння затухаючих коливань пружинного маятника та його розв'язок.
4. Що таке амплітуда, частота та період коливань?
5. Який фізичний зміст мають і в яких одиницях вимірюються період коливань, коефіцієнт затухання та логарифмічний декремент затухання?
6. Назвіть параметри пружинного маятника та одиниці їх вимірювання.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Визначення в'язкості рідини за методом Стокса.

1. Мета роботи: визначити в'язкість рідини за методом Стокса.

2. Теоретичні відомості

В'язкістю називається властивість рідини або газу чинити опір при переміщенні одного шару рідини або газу відносно їхнього.

У потоках рідини поблизу змочуваних твердих тіл різні шари рідини мають неоднакову швидкість. Швидкість шару, який безпосередньо торкається твердого тіла, дорівнює нулю; в міру віддалення від поверхні твердого тіла швидкість шарів рідини збільшується. Інакше кажучи, в таких потоках спостерігається відносний рух одних шарів рідини відносно інших (в напрямі перпендикулярному до потоку існує *градієнт швидкості*, тобто зміна швидкості по мірі збільшення відстані від твердого тіла).

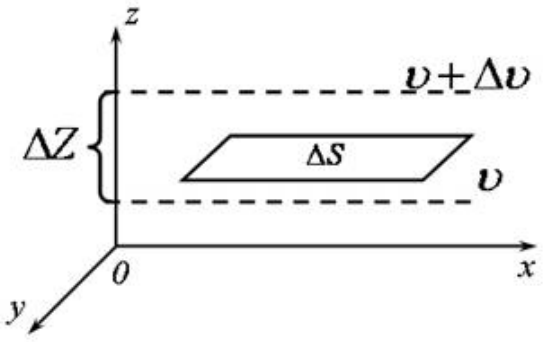


рис 1

Розглянемо рідину, яка рухається вздовж осі OX (рис 1). Нехай шари рідини рухаються з різними швидкостями. На осі OZ візьмемо дві краплини, які знаходяться на відстані ΔZ, швидкості цих краплин відрізняються на $\Delta\upsilon$. Відношення приросту швидкості $\Delta\upsilon$ до зміни координати ΔZ називається градієнтом швидкості (зміна швидкості з координатою) і позначається:

$$grad\,\upsilon = \lim_{\Delta z \to 0} \frac{\Delta\upsilon}{\Delta z} = \frac{d\upsilon}{dz}$$

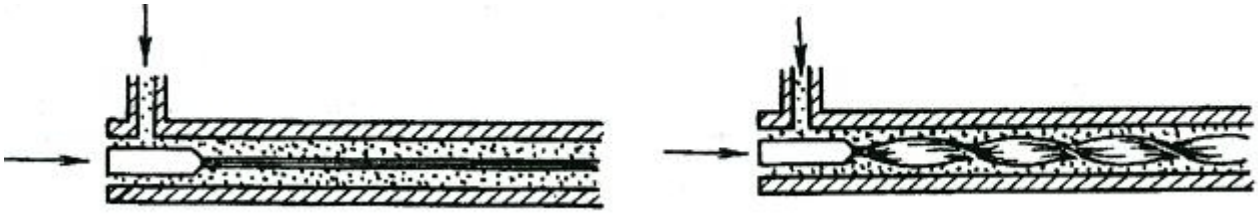
З точки зору математики, градієнт модуля швидкості – це похідна від модуля швидкості взята по координаті.

Коефіцієнт в'язкості η рідини (*«ета»*) при ламінарній течії (рис 2) (течії без завихрень рідини), як і коефіцієнт в'язкості газів, визначається за законом Ньютона:

$$F = \eta \frac{\Delta\upsilon}{\Delta z} \Delta S$$

де, F – сила в'язкості; ΔS- площа поверхні внутрішнього шару, по якій розподіляється сила в'язкого тертя; $\Delta\upsilon/\Delta z$ - зміна швидкості з віддаленням від тіла (градієнт швидкості).

Одиниця коефіцієнту в'язкості (динамічної в'язкості) визначається *1 Н с/м^2=1 Па с*.



ламінарна течія *турбулентна течія*

рис 2

Коефіцієнт динамічної в'язкості – це фізична величина, яка чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя *F*, що виникає на кожній одиниці площі дотику двох шарів *S*, які рухаються один відносно іншого з градієнтом швидкості $\Delta\upsilon/\Delta z$, який дорівнює одиниці.

Коефіцієнт в'язкості рідини залежить від природи рідини і для досліджуваної в даній роботі рідини з підвищенням температури зменшується.

В'язкість рідини зумовлена рухливістю окремих молекул або атомів, тому вона зменшується зі збільшенням температури.

Для газів внутрішнє тертя є результатом перенесення імпульсу хаотичним рухом молекул, отже, в'язкість газів збільшується при збільшенні температури.

Одним з широко використовуваних методів визначення коефіцієнта в'язкості рідини η є метод Стокса, який ґрунтується на вимірюванні швидкості рівномірного руху тіла сферичної форми (наприклад, кульки) в досліджуваній рідині. За законом Стокса сила в'язкості рідини *F* пропорційна коефіцієнту в'язкості , η радіусу кульки *r* і швидкості її руху *V*/

На тверду кульку у в'язкій рідині діють три сили: сила тяжіння ***P*** виштовхувальна сила Архимеда $\boldsymbol{P_l}$, сила в'язкості рідини опору рухові $\vec{f}$

$$P = mg = \rho Vg = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \rho g \;;$$

$$P_1 = m_1 g = \rho_1 Vg = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \rho_1 g \,,$$

де ρ_1 – густина рідини; ρ – густина кульки.

Стокс теоретично показав, що при падінні кульки в безмежній рідині, якщо при цьому не виникає завихрень (падіння маленької кульки з малою швидкістю), сила тертя, яка діє на неї, виражається формулою

$$f = 6\pi\eta\upsilon_{\circ}\eta$$

де υ_o – швидкість падіння кульки, η – коефіцієнт тертя, r – радіус кульки.

При русі кульки шар рідини, що межує з її поверхнею, прилипає до неї та рухається зі швидкістю кульки. Найближчі суміжні шари рідини також починають рухатися. Швидкість, яку вони отримують, тим менша, чим далі вони розташовані від кульки. Отже, при обчисленні опору середовища необхідно враховувати тертя окремих шарів рідини між собою, а не тертя між кулькою і рідиною.

У випадку падіння кульки всі сили спрямовані по вертикалі: сила тяжіння – донизу, сила Архимеда та сила опору – догори.

Сила опору f зі збільшенням швидкості зростає. Отже, з часом кулька досягає такої швидкості, за якої всі три сили будуть врівноважені. Такий рух називається стаціонарним. При цьому кулька рухається за інерцією з постійною швидкістю υ_o.

Для цього випадку маємо :

$$\vec{P} + \vec{P_1} + \vec{f} = 0;$$

$$P - P_1 - f = 0;$$

$$\frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \rho g - \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \rho_1 g - 6\pi \cdot r\eta\upsilon_{\circ} = 0$$

.

Розв’язуючи рівняння відносно коефіцієнта внутрішнього тертя η, одержуємо:

$$\eta = \frac{2}{g}\frac{\rho - \rho_1}{\upsilon_{\circ}} gr^2 = \frac{2}{g}\frac{\rho - \rho_1}{S} gr^2\tau$$

,

де S – шлях, який кулька пройшла за τ секунд.

Реалізувати падіння кульки в безмежному середовищі практично неможливо, оскільки рідина завжди міститься в якійсь посудині, що має стінки. Урахування наявності стінок при русі кульки вздовж осі циліндра приводить до виразу

$$\eta = \frac{1}{18} gd^2 \frac{(\rho - \rho_1)\tau}{(1 + 2{,}4\frac{d}{D})S} \quad , \qquad (1)$$

де D – діаметр поперечного перерізу циліндра; d – діаметр кульки.

Коефіцієнт внутрішнього тертя залежить від температури. У зв'язку в цим, записуючи значення коефіцієнта внутрішнього тертя досліджуваної рідини, необхідно вказувати температуру. Температуру необхідно виміряти з точністю до 0,5° С, оскільки поблизу 20° С зміна температури на 1° С спричиняє зміну коефіцієнта внутрішнього тертя на 6%.

3. Порядок виконання роботи

1. Для виконання віртуальної лабораторної роботи перейти за посиланням на сайт https://amrita.olabs.edu.in/?sub=1&brch=5&sim=225&cnt=4

2. На сайті встановити параметри лабораторної установки відповідно до індивідуального варіанту, наведеного у таблиці 1. Довжину путі кульки у рідині - S встановити, переміщаючи за допомогою "миші", позначку А на ємності з рідиною.

3. Для занурення скляної сфери у циліндр наведіть на сферу курсор "миші", натисніть праву клавішу "миші" та, не відпускаючи клавіші, перетягніть сферу до верхнього отвору циліндру. Потім, коли сфера буде над циліндром, натисніть ліву і , відразу праву клавіші "миші".

4 Данні вимірювань та розрахунків занести в Таблицю 2 (Таблиця результатів вимірювань).

5. Обчислити значення коефіцієнту в'язкості рідини за формулою (1) Задля розрахунків використовувати наступні значення фізичних величин: густина скла $\rho = 2600$ кг/м^3 ; густина гліцерину $\rho_l = 1260$ кг/м^3 або густина касторового масла $\rho_l = 961$ кг/м^3 .

6. Обчислити похибки вимірювань.

7. Порівняти отримані результати з табличними значеннями, наведеними у Таблицы 3.

8. Зробити висновки.

9. Відповісти на контрольні запитання.

10. Протокол про виконання лабораторної роботи надіслати для оцінювання за адресою http://dpt12s.odeku.edu.ua/mod/assign/view.php?id=967.

Таблиця 1. Варіанти.

№ варіанту	Досліджувана в'язка рідина (viscous liquid)	Діаметр циліндру мм. (Jar diameter) D	Відстань між межами А та В мм. (Distance between point A and B) S	Діаметр сфер мм. (Ball diameter) d_1	d_2	d_3
1	Гліцерин	55,00	600,00	5,30	5,10	5,40
2	Касторова олія	60,00	580,00	5,50	5,70	5,60
3	Гліцерин	65,00	560,00	5,80	5,90	6,00
4	Касторова олія	70,00	540,00	6,10	6,20	6,30
5	Гліцерин	75,00	520,00	6,60	6,50	6,70

Таблиця 2. Результати вимірів

№ кульки	Діаметр кульки мм.	Відстань між межами А та В (мм)	Час польоту кульки між межами А та В (мм)	Швидкість кульки (м/с)	Значення коефіцієнту в'язкості рідини (Па с)	Досліджу-вана рідина
1						
2						
3						
Середнє						

Таблиця 3. Коефіцієнти динамічної в'язкості деяких рідин при нормальних умовах.

Рідина	η (Па*с)
вода	$8.94 \cdot 10^{-4}$
бензол	$6.04 \cdot 10^{-4}$
метиловий спирт	$5.44 \cdot 10^{-4}$
ртуть	$1.526 \cdot 10^{-3}$
гліцерин	1.49
етиловий спирт	$1.074 \cdot 10^{-3}$
касторова олія	0.985
оливкова олія	0.081

Контрольні запитання

1) Що є причиною в’язкості рідин?

2) Який фізичний зміст коефіцієнту динамічної в’язкості рідин? В яких одиницях в СІ він вимірюється?

3) Коротко опишіть суть методу Стокса для вимірювання коефіцієнту в’язкого тертя.

4) Що називають градієнтом? Який фізичний зміст градієнта модуля швидкості?

5) Як залежить в’язкість рідин і газів від температури і чому? Поясніть відмінність цієї залежності для рідин і газів.