

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

ФАКУЛЬТЕТ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Кафедра вищої математики та фізики

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**для виконання лабораторних і самостійних робіт
з освітньої компоненти «ФІЗИКА»**

**Розділ
МЕХАНІКА**

Харків – 2026

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри вищої математики та фізики 2 березня 2026 р., протокол № 7.

У методичних вказівках наведені лабораторні роботи з фізики за темою «Механіка» відповідно до чинних навчальних програм УкрДУЗТ.

Виконання лабораторної роботи включає попередню теоретичну підготовку, проведення експериментів і складання звіту про результати досліджень.

Контрольні запитання, які наведені в кожній лабораторній роботі, полегшують підготовку до захисту роботи, складання заліку та іспиту.

Методичні вказівки призначені для здобувачів вищої освіти всіх спеціальностей, які вивчають курс «Фізика», денної та заочної форм здобуття освіти.

Укладачі:

професори Р. В. Вовк,

М. І. Гришанов,

доц. С. М. Камчатна

Рецензент

доц. К. А. Котвицька

ЗМІСТ

ВСТУП	5
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ, ЗАХИСТУ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	7
ПОЛОЖЕННЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ІЗ ФІЗИКИ.....	10
Лабораторна робота 1. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ КУЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА.....	14
1.1 Теоретичні відомості.....	14
1.2 Опис лабораторної установки.....	15
1.3 Виведення робочої формули.....	18
1.4 Послідовність виконання роботи.....	20
Контрольні запитання.....	21
Звіт про виконану роботу.....	21
Лабораторна робота 2. ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО УДАРУ КУЛЬ.....	24
2.1 Теоретичні відомості.....	24
2.2 Виведення робочих формул та опис лабораторної установки.....	24
2.3 Послідовність виконання роботи.....	31
Контрольні запитання.....	32
Звіт про виконану роботу.....	33
Лабораторна робота 3. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ ЗА МЕТОДОМ СТОКСА.....	35
3.1 Теоретичні відомості.....	35
3.2 Опис лабораторної установки.....	38
3.3 Виведення робочої формули.....	39
3.4. Послідовність виконання роботи.....	42
Контрольні запитання.....	42

Звіт про виконану роботу.....	43
Лабораторна робота 4. ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ СИСТЕМИ (МАХОВЕ КОЛЕСО, ШКІВ, ОБЕРТАЛЬНИЙ ВАЛ) ДИНАМІЧНИМ МЕТОДОМ.....	45
4.1 Теоретичні відомості.....	45
4.2 Опис лабораторної установки	48
4.3 Виведення робочої формули.....	50
4.4 Послідовність виконання роботи.....	53
Контрольні запитання.....	53
Звіт про виконану роботу.....	54
ДОДАТКОВІ ЗАПИТАННЯ.....	58
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	59
ДОДАТОК А. ДОВІДКОВИЙ МАТЕРІАЛ.....	60
Літери латинської та грецької абеток.....	60
Кратні одиниці.....	60
Часткові одиниці.....	61
Фізичні сталі величини.....	62

ВСТУП

Методичні вказівки для лабораторних робіт із фізики є невід'ємною та важливою складовою навчального процесу для здобувачів технічних спеціальностей, що забезпечує ефективність практичної підготовки здобувачів.

Лабораторні заняття є одним із основних напрямів навчальної роботи. Їхнє призначення – допомогти здобувачам пізнати сутність фізичних явищ, глибше усвідомити фізичні закони, ознайомитися з методами фізичного експерименту, навчитися обробляти експериментальні результати.

Ці методичні вказівки розроблено з урахуванням сучасних вимог щодо інженерної освіти і спрямовані на те, щоб кожна лабораторна робота стала не формальністю, а цікавим дослідницьким завданням, що сприяє глибокому засвоєнню фундаментальних основ фізики.

Методичні вказівки містять опис лабораторних робіт із курсу загальної фізики за темою «Механіка». До складу методичних вказівок ввійшли лабораторні роботи, які виконують на кафедрі вищої математики та фізики.

Метою методичних вказівок є надання здобувачам чіткого алгоритму підготовки, виконання та аналізу фізичного експерименту.

Основним завданням лабораторних робіт є:

- формування у здобувачів практичних навичок роботи з фізичними приладами, вимірювальним обладнанням та установками;
- опанування методів наукового дослідження фізичних процесів і явищ: планування експерименту, вимірювання, обробка та аналіз отриманих даних, оцінювання точності результатів і формулювання висновків;
- здобуття навичок виконання експериментальних підтверджень основних фізичних законів і принципів, які вивчають у теоретичному курсі.

Усі лабораторні роботи мають відповідну структуру, яка включає такі обов'язкові розділи:

- 1 Номер і назва роботи.
- 2 Мета дослідження.
- 3 Перелік приладів і матеріалів, які використовують у лабораторній роботі.
- 4 Теоретичні відомості, що містять основні поняття, закони та розрахункові формули, необхідні для виконання лабораторної роботи.
- 5 Опис лабораторної установки зі схемою або рисунком.
- 6 Виведення робочої формули.
- 7 Послідовність виконання роботи, яка являє собою покрокову інструкцію з проведення вимірювань, вказівки щодо заповнення таблиць, побудови графіків, розрахунків шуканих величин та оцінювання похибок вимірювань.
- 8 Контрольні запитання, призначені для підготовки до захисту роботи і закріплення набутих теоретичних знань.
- 9 Звіт про виконану роботу, де наведені робочі формули, додаткові дані, таблиці з результатами експериментів і відповідні розрахунки.
- 10 Висновки мають бути конкретними, ґрунтуватися на отриманих даних і відповідати поставленій меті.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ, ЗАХИСТУ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Кожен здобувач протягом семестру повинен виконати, оформити і захистити шість лабораторних робіт, протягом кожного модуля виконати три лабораторні роботи.

Здобувачі повинні ретельно готуватися до виконання лабораторних робіт. Для цього необхідно вивчити теорію досліджуваного явища за підручником, конспектом лекцій або навчальним посібником, орієнтуючись на контрольні запитання.

Для кожного заняття необхідно написати на будь-яких аркушах або в зошиті заготовку на лабораторну роботу, яка має включати таке:

1 Титульний аркуш. Номер роботи. Назва роботи. Мета роботи. Прилади та матеріали. Теоретичні відомості.

2 Звіт про виконану роботу: робочі формули, результати експерименту, обробка результатів експерименту.

3 Висновки.

Зразок оформлення титульного аркуша наведено на рисунку.

Здобувач повинен виконати лабораторну роботу на парі та завантажити повністю виконану та оформлену лабораторну роботу у MOODLE протягом наступних двох тижнів. Якщо робота завантажена після зазначеної дати, оцінка буде нижчою.

Лабораторну роботу необхідно оформити відповідно до вимог, надати відповідну назву файлу: назва файлу (л. р. № – № групи - ПІБ). **Наприклад**, л. р. № 4 - 106-МКТ-Д22 - Іванов О. М.

Роботу необхідно завантажувати у вигляді **ОДНОГО** файлу у форматі **.PDF**. Для перетворення формату .JPG у .PDF можна скористатися будь-яким онлайн-сервісом (наприклад [ilovepd](http://ilovepd.com)).

Якщо формат отриманого файлу більш ніж 1 Мб, то його потрібно стиснути за допомогою онлайн-сервісу, за допомогою якого створювали .PDF.

Захист лабораторної роботи відбувається за контрольними запитаннями та усно.

Відповіді на контрольні запитання необхідно надавати письмово згідно зі своїм варіантом. Номер варіанта відповідає номеру у списку групи. Номери контрольних питань визначають за таблицею варіантів. Відповідаючи на контрольні запитання, необхідно зберігати нумерацію запитань, яка наведена в методичних вказівках і таблиці варіантів (наприклад для варіанта 10: 7, 4, 10, а не 1, 2, 3).

Таблиця – Варіанти контрольних запитань

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Запитання 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7
Запитання 2	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4
Запитання 3	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1
Варіант	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Запитання 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8
Запитання 2	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5
Запитання 3	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2

Оцінка за лабораторну роботу складається з балів за підготовку до лабораторної роботи і балів за її захист. Максимальна кількість балів за одну лабораторну роботу складає 10 балів: п'ять балів за підготовку до лабораторної роботи і виконання (заготовка, повнота наповнення, оформлення та ін.) і п'ять балів за захист (контрольні запитання, теоретична підготовка).

Лабораторну роботу вважають виконаною та захищеною, якщо результати затверджені і перевірені викладачем.

Здати лабораторні роботи потрібно до початку модульного тижня/екзаменаційної сесії.

<p align="center">Український державний університет залізничного транспорту</p> <p align="center">Кафедра «Вища математика та фізика»</p> <p align="center">ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2</p> <p align="center">ВИВЧЕННЯ ПРУЖНОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО УДАРУ КУЛЬ</p> <p align="right">Роботу виконав: студент(ка)</p> <p align="right">_____</p> <p align="right">(прізвище, ім'я, по-батькові)</p> <p align="right">_____</p> <p align="right">(курс, група)</p> <p align="right">"____" _____ 20__ р.</p> <p align="right">Роботу прийняв:</p> <p align="right">_____</p> <p align="right">(прізвище та ініціали викладача)</p> <p align="right">_____</p> <p align="right">(посада)</p> <p align="right">Оцінка:</p> <p align="right">за знання теорії _____</p> <p align="right">(оцінка, бал)</p> <p align="right">за провед. експер. _____</p> <p align="right">(оцінка, бал)</p> <p align="right">Підсумкова _____</p> <p align="right">(оцінка, бал)</p> <p align="right">_____</p> <p align="right">(дата і підпис викладача)</p>

Рисунок – Зразок титульного аркуша для оформлення лабораторних робіт

ПОЛОЖЕННЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ІЗ ФІЗИКИ

1 Загальні вимоги безпеки

До виконання лабораторних робіт із фізики допускають лише тих здобувачів, які пройшли інструктаж із техніки безпеки.

Виконуючи лабораторні роботи, здобувачі повинні дотримуватися правил поведінки в лабораторії.

Потрібно враховувати, що під час проведення лабораторних робіт із фізики здобувачі можуть зазнати дії таких небезпечних і шкідливих факторів:

- ураження електричним струмом під час роботи з електроприладами;
- термічні опіки з нагріванням рідин і різних фізичних тіл;
- порізи рук із недбалим поводженням із лабораторним посудом і приладами зі скла;
- виникнення пожежі з неакуратним поводженням із легкозаймистими та горючими рідинами.

Тому з проведенням лабораторних робіт із фізики необхідно дотримуватися правил техніки безпеки.

Вимоги безпеки перед початком роботи

Перед початком роботи необхідно:

- вивчити опис лабораторної роботи і порядок її виконання;
- перевірити справність обладнання, приладів, цілісність лабораторного посуду та приладів зі скла;

- підготувати робоче місце: прилади та обладнання розмістити так, щоб унеможливити їх падіння та перекидання, а також прибрати з робочого місця всі сторонні предмети.

Вимоги безпеки під час роботи

Під час виконання лабораторної роботи здобувач повинен:

- точно виконувати всі вказівки викладача, не виконувати самостійно жодних робіт;
- працюючи зі спиртівкою, берегти одяг і волосся від займання, не запалювати одну спиртівку від іншої, не витягати з палаючої спиртівки пальник із гнотом, полум'я спиртівки не задувати, а гасити його, накриваючи спеціальним ковпачком;
- нагріваючи рідину в пробірці або колбі, використовувати спеціальні тримачі (штативи), отвір пробірки або шийку колби не спрямовувати на себе та інших здобувачів;
- щоб уникнути опіків, рідину та інші фізичні тіла нагрівати не вище 60-70 °С, не брати їх незахищеними руками;
- бути обережними з приладами зі скла та лабораторним посудом, не кидати і не вдаряти їх;
- стежити за справністю всіх кріплень у приладах і пристосуваннях, не торкатися і не нахилитися близько до частин машин і механізмів, що обертаються і рухаються.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

Із розливом легкозаймистої рідини та її займанням негайно повідомити про це викладача та залишити приміщення.

З отримання травми (поріз, опік, удар струмом) необхідно негайно повідомити про це викладача для надання першої допомоги.

За поганого самопочуття (запаморочення, нудота) необхідно припинити виконувати роботу і повідомити про це викладача.

Вимоги безпеки після закінчення роботи

Після закінчення роботи необхідно упорядкувати робоче місце, перевірити, щоб лабораторні установки було вимкнено; здати викладачеві прилади, обладнання, матеріали.

2 Загальні вимоги безпеки під час виконання лабораторних робіт із механіки

Цей перелік із техніки безпеки призначений для здобувачів, які виконують такі лабораторні роботи з механіки:

ЛР 1 «Визначення швидкості кулі за допомогою балістичного маятника».

ЛР 2 «Визначення пружного центрального удару куль».

ЛР 3 «Визначення коефіцієнта в'язкості рідини за методом Стокса».

ЛР 4 «Визначення моменту інерції системи (махове колесо, шків, обертальний вал) динамічним методом».

Перед виконанням лабораторної роботи здобувачі повинні пройти інструктаж із техніки безпеки, а також дотримуватися правил поведінки в лабораторії, порядку проведення лабораторних робіт.

Здобувач повинен вивчити зміст і порядок виконання лабораторної роботи, а також безпечні методи та прийоми її якісного виконання.

Під час виконання лабораторної роботи з механіки здобувачі повинні дотримуватися дисципліни та зберігати тишу; не робити різких рухів, щоб не зачепити обладнання та прилади; без дозволу викладача не брати прилади та інше обладнання для лабораторних робіт.

Розміщувати прилади на столі необхідно так, щоб унеможливити їх падіння або перекидання.

Під час виконання лабораторних робіт, у яких використовують будь-які прилади та обладнання, здобувач:

- не повинен спрямовувати пружинну гармату на інших здобувачів;
- не перевантажувати технічні ваги;
- користуючись вагами, тіло, що зважують, класти на ліву чашку вагів, а гирі - на праву;
- тіло, що зважують, і гирі опускати на чашку обережно, не кидати їх;
- не розгойдувати балістичний маятник руками;
- не допускати будь-яких механічних ударів, трясіння лабораторної установки;
- не розтягувати пружини на лабораторних установках;
- зі скочуванням металеві кулі по похилій площині та жолобу необхідно зупиняти кулю наприкінці шляху і не допускати при цьому механічного удару, який може пошкодити поверхню робочого столу і травмувати самого здобувача;
- опускаючи вантаж у рідину, не скидати вантаж різко.

Заборонено навантажувати вимірювальні прилади вище за граничні значення, позначені на їхній шкалі.

Після виконання лабораторної роботи з механіки здобувач повинен упорядкувати робоче місце; у разі виявлення несправності або пошкоджень у приладах і устаткуванні терміново повідомити викладача; отримавши травми або з виникненням аварійної ситуації під час виконання лабораторної роботи, негайно повідомити викладача.

Лабораторна робота 1

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ КУЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА

Мета роботи: вивчення абсолютно непружного зіткнення тіл.

Прилади і матеріали: лабораторна установка для визначення швидкості польоту кулі, технічні ваги, лінійка, тіла (кулі) різних мас.

1.1 Теоретичні відомості

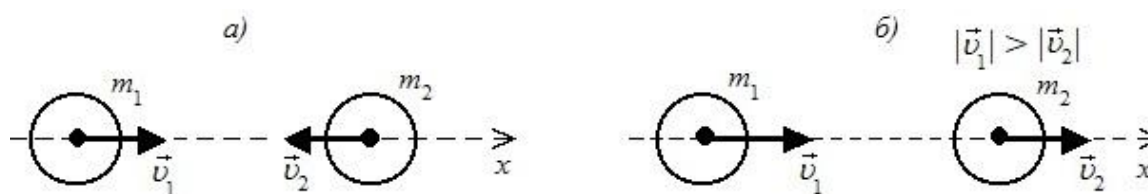
Закони збереження повної механічної енергії та імпульсу допомагають розв'язувати задачі з механіки в тих випадках, коли діючі сили невідомі. Прикладом такого роду задач є ударна взаємодія тіл.

Ударом (або зіткненням) прийнято називати короткочасну взаємодію тіл, у результаті якого їхні швидкості зазнають значних змін. Під час зіткнення тіл між ними діють короткочасні ударні сили зі складною залежністю від часу і просторових координат. Тому описувати ударну взаємодію за допомогою законів Ньютона практично неможливо. Застосування ж законів збереження енергії та імпульсу в багатьох випадках дає змогу виключити з розгляду сам процес зіткнення і отримати зв'язок між швидкостями тіл перед і після удару, минаючи всі проміжні значення цих величин.

Із реальним зіткненням тіл вони більше чи менше деформуються. При цьому кінетична енергія тіл частково або повністю переходить у потенціальну енергію пружної деформації і внутрішню енергію тіл. Збільшення внутрішньої (молекулярної) енергії призводить до нагрівання тіл (підвищення їхньої температури) [1].

У механіці часто використовують дві моделі ударного взаємодії – абсолютно пружний і абсолютно непружний удари.

При цьому слід розрізняти центральний удар від нецентрального. Центральним називають удар, за якого тіла рухаються вздовж прямої, що проходить через їхні центри мас. На рисунку 1.1 зображені два можливих випадки центрального удару двох куль.



а) кулі рухаються назустріч одна одній; б) кулі рухаються в однаковому напрямку

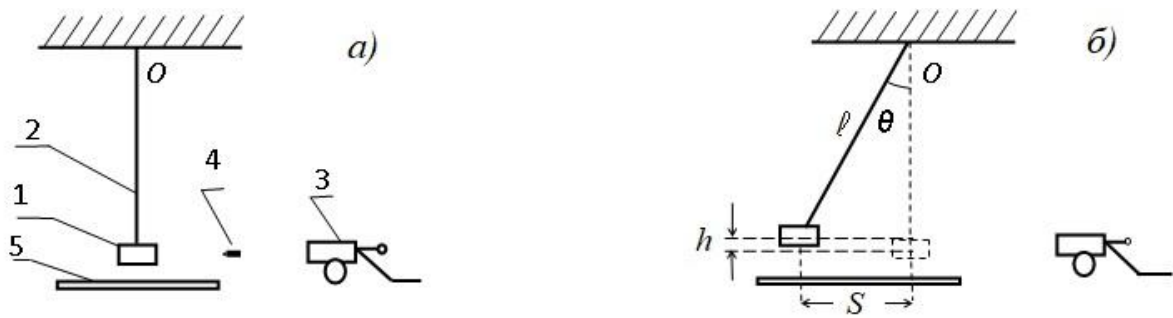
Рисунок 1.1 – Центральний удар двох куль

Абсолютно непружним називають такий удар, за якого два тіла з'єднуються (злипаються) один з одним і рухаються далі як одне тіло (з однаковою швидкістю).

За абсолютно непружного удару повна механічна енергія не зберігається. Вона частково або повністю переходить у внутрішню енергію тіл (нагрівання) і витрачається на деформацію тіл.

1.2 Опис лабораторної установки

Прикладом абсолютно непружного удару може бути потрапляння кулі в балістичний маятник. Лабораторна установка для дослідження абсолютно непружного зіткнення тіл (рисунок 1.2, а) складається з балістичного маятника (масивне тіло 1, підвішене на біфілярному підвісі 2), пружинної гарматки 3, із якої вилітає куля 4, і закріпленої лінійки 5, за допомогою якої візуально вимірюють відхилення S балістичного маятника від положення рівноваги (рисунок 1.2, б).



а) перед ударом; б) після удару

Рисунок 1.2 – Схема установки для проведення лабораторної роботи 1

Фотозображення лабораторної установки, лінійки для вимірювання відхилення маятника від положення рівноваги, технічні ваги для вимірювання маси куль подано на рисунках 1.3-1.5 відповідно.



Рисунок 1.3 – Фотозображення установки для виконання лабораторної роботи 1



Рисунок 1.4 – Фотозображення лінійки для вимірювання відхилення маятника від положення рівноваги



Рисунок 1.5 – Фотозображення технічних ваг для вимірювання мас куль

1.3 Виведення робочої формули

Після пострілу куля потрапляє в балістичний маятник і застряє в ньому. Маятник відхиляється від вертикалі на кут θ , а його центр мас переміщується в горизонтальному напрямку на відстань S (рисунок 1.2, б).

Перед зіткненням імпульс замкненої системи тіл – «куля-маятник» – дорівнює імпульсу кулі:

$$p_1 = m\upsilon, \quad (1.1)$$

де m – маса кулі;

υ – швидкість кулі.

Після удару, коли куля застрягне в маятнику, останній почне рухатися зі швидкістю V .

Імпульс системи «куля-маятник» p_2 становитиме

$$p_2 = (M + m)V, \quad (1.2)$$

де M – маса маятника.

За законом збереження імпульсу,

$$m\upsilon = (M + m)V. \quad (1.3)$$

Із відхиленням на кут θ центр мас маятника піднімається на висоту h . При цьому кінетична енергія системи «куля-маятник», що в нижній точці

дорівнює $(M + m)V^2 / 2$, перетворюється в потенціальну енергію $(M + m)gh$:

$$\frac{(M + m)V^2}{2} = (M + m)gh, \quad (1.4)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Розв'язавши рівняння (1.3) і (1.4), одержимо

$$v = \frac{M + m}{m} \sqrt{2gh}.$$

Ураховуючи те, що маса маятника M набагато перевищує масу кулі ($M > m$), можна записати

$$v = \frac{M}{m} \sqrt{2gh}. \quad (1.5)$$

Далі можна визначити висоту підняття центра мас маятника h через відстань S максимального відхилення маятника від положення рівноваги після зіткнення з кулею. Розглянемо прямокутний трикутник OBC (рисунок 1.2, б), у якому гіпотенуза OC дорівнює довжині нитки підвісу маятника $OC = \ell$, горизонтальний катет $BC = S$, вертикальний катет $OB = \ell - h$. Тоді, за теоремою Піфагора,

$$\ell^2 = S^2 + (\ell - h)^2 \quad \rightarrow \quad \ell^2 = S^2 + \ell^2 - 2\ell h + h^2. \quad (1.6)$$

Оскільки в умовах досліду кут θ дуже малий ($\theta \ll 1$), а $h \ll l$, то квадратичним додатком h^2 у формулі (1.6) можна знехтувати порівняно з $2lh$ і отримати таке співвідношення:

$$h = \frac{S^2}{2\ell}. \quad (1.7)$$

Після підстановки у вираз (1.5) одержуємо робочу формулу для визначення швидкості кулі:

$$v = S \frac{M}{m} \sqrt{\frac{g}{\ell}}. \quad (1.8)$$

1.4 Послідовність виконання роботи

- 1 Накреслити таблицю вимірюваних величин за зразком, наведеним нижче (таблиця 1.1).
- 2 Зробити постріл і виміряти горизонтальне відхилення S маятника від положення рівноваги.
- 3 Повторити дослід декілька разів і знайти середнє значення відхилення $\langle S \rangle$.
- 4 За формулою (1.8) визначити швидкість кулі (маса кулі m , маса маятника M і довжина підвісу маятника ℓ вказані на установці).
- 5 Виконати дії за пунктами 2 – 5 для другої кулі.
- 6 Проаналізувати результати і зробити висновки.
- 7 Підготувати відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

- 1 Дайте визначення абсолютно пружного та абсолютно непружного ударів.
- 2 Як визначають імпульс матеріальної точки?
- 3 Сформулюйте закон збереження імпульсу. Для яких видів співударів тіл він виконуваний?
- 4 Що називають кінетичною енергією матеріальної точки?
- 5 Дайте визначення консервативних сил. Які сили називають консервативними? Наведіть приклади консервативних сил. Дайте визначення потенціальної енергії тіла.
- 6 Як пов'язані один з одним консервативна сила, що діє на тіло, і його потенціальна енергія?
- 7 Чому дорівнює потенціальна енергія тіла в однорідному полі тяжіння?
- 8 Сформулюйте закон збереження енергії в механіці.
- 9 Запишіть закони збереження для пружного та непружного зіткнень тіл.
- 10 Виведіть формулу для визначення швидкості кулі, яку ви застосували в цій роботі.

Звіт про виконану роботу

1 Робоча формула.

$$v = S \frac{M}{m} \sqrt{\frac{g}{\ell}} \text{ — швидкість кулі.}$$

Величини, що вимірюють:

S – переміщення маятника, $[S] = \text{м}$.

Табличні величини:

$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ – прискорення вільного падіння.

Величини, що обчислюють:

v – швидкість кулі, $[v] = \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2 Результати експерименту.

Таблиця 1.1 – Вимірювані величини

Номер досліджу	$l, \text{м}$	$M, \text{кг}$	$m_1, \text{кг}$	$S_1, \text{м}$	$m_2, \text{кг}$	$S_2, \text{м}$
1						
2						
3						
4						
5						
⟨середнє⟩						

3 Обробка результатів експерименту:

$$\langle S_1 \rangle = \frac{S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} + S_{15}}{5} =$$

$$\langle S_2 \rangle = \frac{S_{21} + S_{22} + S_{23} + S_{24} + S_{25}}{5} =$$

4 Розрахувати швидкості v_1 і v_2 кульок m_1 і m_2 відповідно:

$$v_1 = \langle S_1 \rangle \frac{M}{m_1} \sqrt{\frac{g}{l}} =$$

$$v_2 = \langle S_2 \rangle \frac{M}{m_2} \sqrt{\frac{g}{l}} =$$

5 Висновки.

Лабораторна робота 2

ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО УДАРУ КУЛЬ

Мета роботи: вивчення законів збереження енергії та імпульсу в разі абсолютно пружного зіткнення тіл, визначення сили та часу співудару металевих куль.

Прилади і матеріали: лабораторна установка для визначення пружного співудару куль, міліметрова лінійка.

2.1 Теоретичні відомості

Прикладом застосування законів збереження імпульсу та механічної енергії для розв'язання реальної фізичної задачі є удар абсолютно пружних тіл.

Удар – це зіткнення двох або більше тіл, коли взаємодія продовжується дуже короткий час. З ударом у тілах виникають значні внутрішні сили, тому зовнішніми силами, які діють на тіла, можна знехтувати. Це дає змогу розглядати ці тіла як замкнуту систему і застосовувати до неї закони збереження.

Абсолютно пружним називають удар, із яким механічна енергія сукупності тіл, що співударяються, не перетворюється в інші види енергії [2].

2.2 Виведення робочих формул та опис лабораторної установки

Швидкості куль після їхнього співудару можна визначити за допомогою законів збереження імпульсу та енергії:

$$\begin{aligned} m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 &= m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2, \\ \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} &= \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

де m_1, m_2 – маси куль;

\vec{v}_1, \vec{v}_2 – швидкості куль перед співударом;

\vec{u}_1, \vec{u}_2 – швидкості куль після співудару.

Удар називають центральним, якщо тіла перед ударом рухаються вздовж прямої, що проходить через їхні центри мас. У випадку центрального удару куль їхні швидкості перед співударом і після нього спрямовані вздовж цієї прямої. Тоді вектори \vec{v} і \vec{u} можна замінити їхніми проєкціями v і u на вказану пряму. Ураховуючи це, перепишемо систему рівнянь (2.1) так:

$$\begin{aligned} m_1(v_1 - u_1) &= m_2(u_2 - v_2), \\ m_1(v_1^2 - u_1^2) &= m_2(u_2^2 - v_2^2). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Оскільки із зіткненням куль їхні швидкості змінюються, тобто $v_1 \neq u_1, u_2 \neq v_2$, друге рівняння системи (2.2) можна розділити на перше. Використавши для другого рівняння формулу $a^2 - b^2 = (a - b)(a + b)$, одержимо

$$v_1 + u_1 = v_2 + u_2. \quad (2.3)$$

Це рівняння розглядаємо сумісно з першим рівнянням системи (2.2):

$$\begin{aligned} m_1(v_1 - u_1) &= m_2(u_2 - v_2), \\ v_1 + u_1 &= v_2 + u_2. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Розв'язок цієї системи має вигляд (коли кулі рухаються у одному напрямку відносно осі x)

$$u_1 = \frac{2m_2v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}, \quad (2.5)$$

$$u_2 = \frac{2m_1v_1 - (m_1 - m_2)v_2}{m_1 + m_2}. \quad (2.6)$$

Коли маси тіл однакові ($m_1 = m_2$), із рівнянь (2.5) і (2.6) випливає, що $u_1 = v_2$ і $u_2 = v_1$, тобто тіла обмінюються швидкостями. Коли друге тіло нерухоме ($v_2 = 0$), перше тіло після удару зупиняється, а друге тіло буде рухатися зі швидкістю першого тіла v_1 .

Розглянемо абсолютно пружний центральний удар двох однакових куль ($m_1 = m_2 = m$), які висять на нитках однакової довжини. Відстань точки підвісу від центра кулі позначимо буквою l .

Відхилимо кулю 1 на нитці від вертикалі на певний кут і відпустимо (рисунок 2.1). У нижній точці вона буде рухатися зі швидкістю v_1 , яку можна знайти із закону збереження енергії. Куля 1, яка відхилена від положення рівноваги на кут α , має у гравітаційному полі Землі потенціальну енергію $W_n = mgh$, де h – висота, на яку вона піднімається, g – прискорення вільного падіння. Ця енергія з повертанням кулі в положення рівноваги перетворюється в кінетичну енергію: $W_n = W_k = \frac{mv_1^2}{2}$, звідки

$$v_1 = \sqrt{2gh}. \quad (2.7)$$

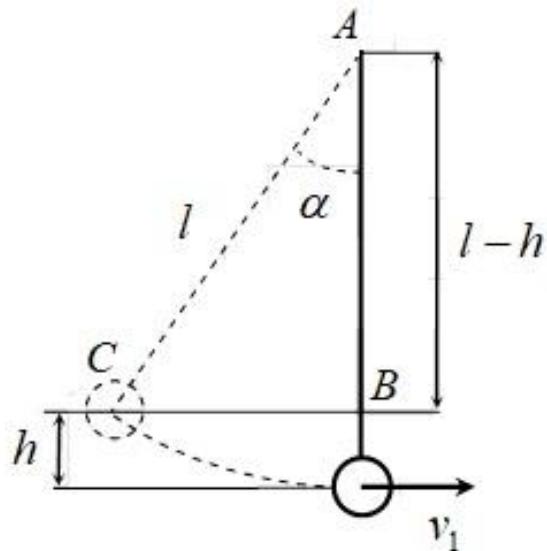


Рисунок 2.1 – Рух рухомої кулі з пружним ударом

На рисунку 2.1 видно, що $h = l - AB$. Оскільки $AB = l \cos \alpha$, то

$$h = l (1 - \cos \alpha) = 2l \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

Підставивши у формулу (2.7), одержимо

$$v_1 = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (2.8)$$

Повернувшись у положення рівноваги, куля 1 передає свій імпульс кулі 2 (рисунок 2.2) і зупиняється, а куля 2 починає рухатися. Імпульс, який вона одержала від першої кулі під час удару, $\Delta p = m \Delta v = m v_1$. За другим законом Ньютона $F = \frac{dp}{dt}$ можна знайти середню силу удару:

$$\langle F \rangle = \frac{m \Delta v}{\Delta t} = \frac{m v_1}{\tau}, \quad (2.9)$$

де $\tau = \Delta t$ – час зіткнення куль.

Час зіткнення куль вимірюють на лабораторній установці, схема якої наведена на рисунку 2.2. Дві однакових сталевих кулі підвішені на гнучких ізолюваних провідниках так, що у стані спокою вони висять майже торкаючись одна одну (зазор між ними становить 1 – 3 мм). Кулі можна відхиляти на різні кути і утримувати їх у крайньому лівому та крайньому правому положеннях за допомогою електромагнітів M_1 і M_2 , які вмикають перемикачем T_3 .

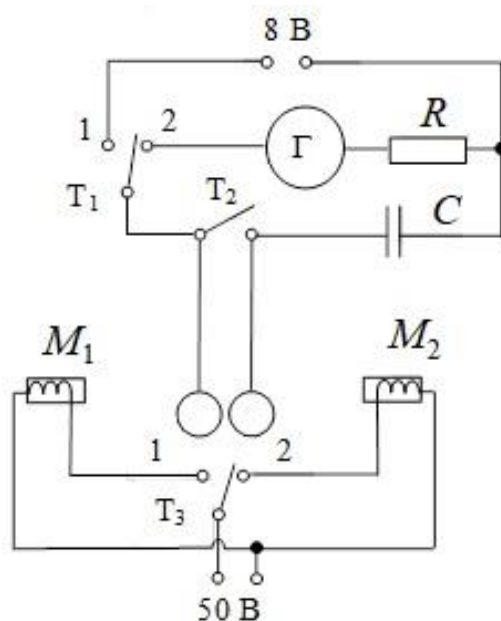


Рисунок 2.2 – Схема установки для виконання лабораторної роботи 2

За допомогою перемикача T_1 кулі можуть бути з'єднані з конденсатором C , резистором R і балістичним гальванометром Γ . Якщо кулі з'єднати послідовно із зарядженим конденсатором, то конденсатор за час зіткнення куль буде розряджатися через гальванометр. Час розрядження і час зіткнення куль тотожні ($\tau = \Delta t$), а час розрядження визначають за формулою

$$\tau = RC \ln \frac{q_0}{q_0 - q}, \quad (2.10)$$

де C – ємність конденсатора;

R – опір у колі конденсатора;

q_0 – заряд конденсатора перед зіткненням куль;

q – заряд, який пройшов через гальванометр за час зіткнення куль.

Заряд конденсатора q_0 і заряд q визначають балістичним гальванометром (балістичний гальванометр вимірює кількість заряду, який пройшов через нього за час протікання короткого імпульсу струму). Відхилення стрілки гальванометра – кількість поділок шкали n – буде пропорційне кількості заряду q :

$$q_0 = \beta n_0, \quad q = \beta n,$$

де β – коефіцієнт пропорційності.

Підставляючи ці вирази у формулу (2.10), отримуємо для часу розрядження конденсатора, тобто часу зіткнення куль, робочу формулу

$$\tau = RC \ln \frac{n_0}{n_0 - n}. \quad (2.11)$$

Фотозображення лабораторної установки подано на рисунках 2.3, 2.4.

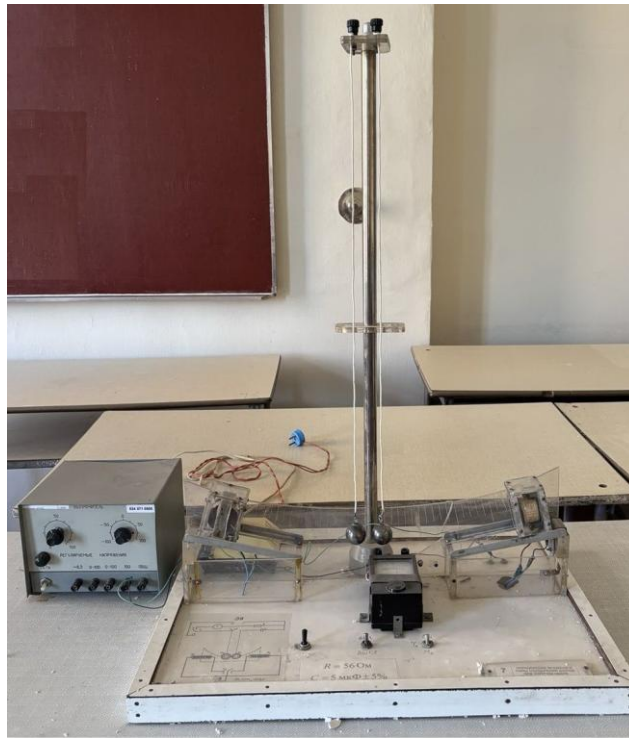


Рисунок 2.3 – Фотозображення лабораторної установки, загальний вигляд



Рисунок 2.4 – Фотозображення лабораторної установки з виконанням роботи

2.3 Послідовність виконання роботи

1 Накреслити таблицю вимірюваних величин за зразком, наведеним у таблиці 2.1.

2 Для заряджання конденсатора C перемикач T_1 поставити в положення 1 і замкнути тумблер T_2 .

3 Перевести перемикач T_1 у положення 2. Тоді відбудеться повне розрядження конденсатора C через гальванометр. Виміряти максимальне відхилення стрілки гальванометра n_0 за його шкалою.

4 Провести три – п'ять дослідів, що описані в пунктах 2 і 3, і знайти середнє значення показань гальванометра $\langle n_0 \rangle$. Перед кожним вимірюванням конденсатор треба заряджати не менш як 5 – 10 с.

5 Знову зарядити конденсатор, як вказано в пункті 2. Перемикач T_3 із нейтрального положення перевести в положення 1, замикаючи цим коло електромагніту M_1 . Підвести до цього електромагніту кулю 1, яка буде ним утримувана на деякій висоті, що відповідає куту α .

6 Розімкнути тумблер T_2 , а перемикач T_1 перевести в положення 2. Оминаючи нейтральне положення, перевести перемикач T_3 у положення 2, замикаючи цим коло електромагніту M_2 і розмикаючи коло електромагніту M_1 . Куля 1, звільнившись від електромагніту M_1 , ударяє кулю 2. У момент співудару куль замикається коло конденсатора C , який частково розряджається через гальванометр. Кількість електрики, яка протікає по його колу, вимірюють відхиленням стрілки гальванометра на n поділок за шкалою. Куля 2 після співудару почне рухатися, досягне електромагніту M_2 і буде утримувана ним (електромагніт M_2 використовують для запобігання повторного зіткнення куль).

7 Провести дослід із розрядженням конденсатора через кулі п'ять разів, повторюючи пункти 2 та 6. Записати показання гальванометра n в

таблицю. Знайти середнє значення $\langle n \rangle$ і за формулою (2.11) визначити час зіткнення куль τ (значення R і C вказані на установці).

8 Перемикачі T_1 і T_3 перевести в нейтральне положення, тим самим відключаючи коло конденсатора та електромагніти від джерел напруги.

9 Виміряти довжину нитки s , діаметр кулі d і знайти відстань центра кулі $l = s + \frac{d}{2}$ від точки підвісу.

10 Виміряти кут α відхилення нитки від положення рівноваги та за формулою (2.8) знайти швидкість v_1 кулі 1 у момент удару.

11 За формулою (2.9) знайти середню силу удару $\langle F \rangle$.

12 Проаналізувати результати і зробити висновки.

13 Підготувати відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1 Як визначають імпульс матеріальної точки (тіла)?

2 Сформулюйте другий закон Ньютона. Що таке імпульс сили?

3 Сформулюйте закон збереження імпульсу. Для яких співударів тіл він виконуваний?

4 Що називають кінетичною енергією матеріальної точки (тіла)?

5 Дайте визначення консервативних сил. Які сили називають консервативними? Наведіть приклади консервативних сил. Дайте визначення потенціальної енергії тіла.

6 Сформулюйте закон збереження енергії в механіці.

7 Знайдіть швидкість тіла, що впало з висоти h . Порівняйте одержану формулу з формулою (2.8) для швидкості кулі на нитці.

8 Дайте визначення пружного удару. Який удар називають центральним?

9 Знайдіть швидкості двох куль після їхнього центрального абсолютно пружного співудару.

10 Що таке балістичний гальванометр? Для чого він призначений?

Звіт про виконану роботу

1 Робочі формули.

$$\tau = RC \ln \frac{n_0}{n_0 - n} \quad - \text{ час зіткнення,}$$

$$v_1 = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha}{2} \quad - \text{ швидкість кулі,}$$

$$\langle F \rangle = \frac{m \Delta v}{\Delta t} = \frac{mv_1}{\tau} \quad - \text{ середня сила удару.}$$

Величини, що вимірюють:

n_0, n – показання гальванометра, $[n_0] = [n] = 1,$

α – кут початкового відхилення, $[\alpha] = \text{град,}$

l – довжина провідника, $[l] = \text{м,}$

m – маса кулі, $[m] = \text{кг}$

Табличні величини:

$g = 9.81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Величини, що обчислюють:

t – час зіткнення, $[t] = \text{с;}$

v – швидкість кулі, $[v] = \text{м/с;}$

$\langle F \rangle$ – середня сила удару, $[F] = \text{Н.}$

2 Результати експерименту.

Таблиця 2.1 – Вимірювані величини

Номер досліджу	n_0	n	α	l	m	R	C
	поділки шкали		град	м	кг	Ом	Ф
1							
2							
3							
4							
5							
⟨середнє⟩							

3 Обробка результатів експерименту:

$$\langle n_0 \rangle = \frac{n_{01} + n_{02} + n_{03} + n_{04} + n_{05}}{5} = \dots$$

$$\langle n \rangle = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5}{5} = \dots$$

$$\tau = RC \ln \frac{\langle n_0 \rangle}{\langle n_0 \rangle - \langle n \rangle} = \dots$$

$$\langle v_1 \rangle = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha}{2} = \dots$$

$$\langle F \rangle = \frac{m \langle v_1 \rangle}{\tau} = \dots$$

4 Висновки.

Лабораторна робота 3

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ ЗА МЕТОДОМ СТОКСА

Мета роботи: вивчення явища внутрішнього тертя в плинних середовищах, експериментальне визначення коефіцієнта в'язкості рідини.

Прилади і матеріали: лабораторна установка для визначення коефіцієнта в'язкості рідини за методом Стокса.

3.1 Теоретичні відомості

Реальним плинним середовищам – зокрема рідинам і газам – притаманна в'язкість або внутрішнє тертя. В'язкість – це властивість плинних середовищ чинити опір зсувові (руху одних шарів середовища відносно інших, сусідніх із ними). У рідинах в'язкість зумовлена силами зчеплення між молекулами, у газах – зіткненнями молекул один з одним. Саме тому з підвищенням температури в'язкість рідин зменшується, а в'язкість газів збільшується.

Розглянемо уявний експеримент: між двома паралельними пластинами 1 і 2 знаходиться рідина (рисунок 3.1). Нижня пластина 1 є нерухомою, а верхня пластина 2 рухається вправо відносно нижньої пластини 1 зі сталою швидкістю v . Шари рідини, які безпосередньо прилягають до пластин, утримують на них сили адгезії, що діють між молекулами рідини та молекулами речовини пластин. Тому верхній шар рідини рухається зі швидкістю v відносно нижньої пластини 1, а нижній шар рідини є нерухомим. Очевидно, що нижній шар рідини гальмує при цьому рух сусіднього з ним шару, що знаходиться вище за нього, той у свою чергу гальмує рух наступного сусіднього шару і т. д. При цьому швидкість руху шарів рідини змінюється вздовж осі y від 0 до v .

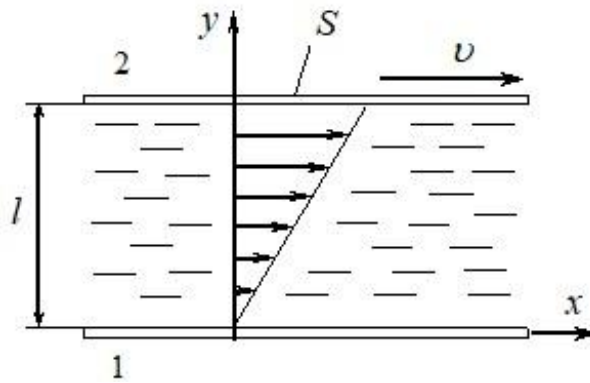


Рисунок 3.1 – Розподіл швидкості між шарами рідини з течією в горизонтальному напрямку

Для підтримування руху пластини 2 зі сталою швидкістю до неї необхідно прикласти деяку силу F в напрямку, паралельному осі x (рисунок 3.1). Для кожної конкретної рідини, як відомо з експерименту, ця сила є прямо пропорційною швидкості u руху пластини 2 і її площі S і обернено пропорційною відстані між пластинами l . Отже, можна записати

$$F \sim S \frac{v}{l}. \quad (3.1)$$

Це співвідношення для двох сусідніх шарів має вигляд

$$F = \eta \frac{dv}{dy} \Delta S, \quad (3.2)$$

де ΔS – площа їхнього дотику;

$\frac{dv}{dy}$ – градієнт швидкості рідини. Він показує, як різко змінюється

модуль швидкості рідини u уздовж осі y .

Коефіцієнт пропорційності η називають *коефіцієнтом в'язкості* плинного середовища. Чисельно він дорівнює силі F , яка діє між двома сусідніми шарами рідини з площею дотику $\Delta S = 1 \text{ м}^2$ для градієнта швидкості цих шарів, що дорівнює одиниці:

$$\eta = \frac{F}{\frac{dv}{dy} \Delta S}. \quad (3.3)$$

Коефіцієнт в'язкості характеризує властивості цього плинного середовища, оскільки за однакових умов, тобто однакових градієнті та площі дотику, сила F залежить тільки від роду середовища [3, 4].

Одиниця вимірювання коефіцієнта в'язкості в СІ – паскаль-секунда:

$$[\eta] = \text{кг}/(\text{м с}) = \text{Па}\cdot\text{с}.$$

У цій роботі в'язкість рідини визначають за *методом Стокса*, який ґрунтований на експериментальному дослідженні руху тіл у плинних середовищах. Коли довільне тіло рухається в такому середовищі (рідині чи газі), на нього діє з боку середовища сила, яку називають силою лобового опору. Вона виникає завдяки в'язкості середовища, а за дуже великих швидкостей руху рідини – унаслідок турбулентності (бурхливості рідини чи газу) позаду тіла. Таким тілом може бути тепловоз, що рухається, або підводний човен. Якщо потік середовища, який обтікає тіло, є ламінарним, тобто плавним (це відбувається за малих швидкостей руху рідини), *сила в'язкого тертя* F_v є прямо пропорційною швидкості руху тіла v :

$$F_v = k v. \quad (3.4)$$

Коефіцієнт пропорційності k залежить від розмірів і форми тіла, а також в'язкості η середовища. Зокрема, для сфери радіуса r було доведено Стоксом, що

$$k = 6\pi\eta r. \quad (3.5)$$

3.2 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка для визначення коефіцієнта в'язкості рідини за методом Стокса (рисунок 3.2) складається зі скляної вертикальної труби 1, закритої з нижнього кінця, наповненою рідиною 2, розміщеної в корпусі 3. На корпусі зроблені дві позначки 4 на відстані $D = 80$ см одна від одної. Лабораторний експеримент полягає у визначенні швидкості рівномірного руху кулі в рідині. Сталеві кулі, що використовують у лабораторній роботі, і штангенциркуль із нанометром для визначення діаметра куль зображено на рисунках 3.3 і 3.4 відповідно.

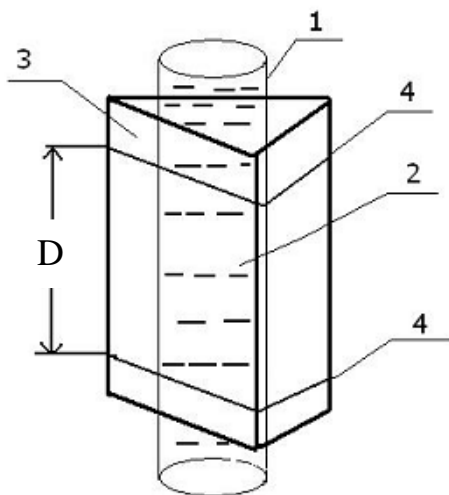


Рисунок 3.2 – Схема та фотозображення установки для проведення лабораторної роботи 3



Рисунок 3.3 – Фотозображення двох куль, що використовують у лабораторній роботі 3



Рисунок 3.4 – Фотозображення штангенциркуля та мікрометра для вимірювання діаметра кулі

3.3 Виведення робочої формули

Якщо в трубу опустити металеву кулю, вона буде рухатися вниз. При цьому на неї будуть діяти сили, зображені на рисунку 3.5:

1 Сила тяжіння P

$$P = mg = \rho_k Vg, \quad (3.6)$$

де m , ρ_k , V – відповідно маса, густина та об'єм кулі;

g – прискорення вільного падіння.

2 Сила в'язкого тертя

$$F_v = 6\pi r \eta v, \quad (3.7)$$

де r, v - відповідно радіус і швидкість кулі.

3 Сила Архімеда

$$F_A = \rho_p V g, \quad (3.8)$$

де ρ_p – густина рідини.

Куля в рідині буде рухатися спочатку прискорено:

$$m\vec{a} = \vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_v.$$

Сила в'язкого тертя при цьому буде зростати, поки векторна сума сил, що діють на кулю (рисунок 3.5), не перетвориться на нуль, тобто в проєкціях:

$$P - F_A - F_v = 0. \quad (3.9)$$

Після цього куля рухається рівномірно. Верхню позначку 4 вона перетинатиме маючи вже постійну швидкість.

Підставляючи у вираз (3.9) рівняння (3.6)-(3.8) і враховуючи, що об'єм кулі $V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{1}{6}\pi d^3$ ($d = 2r$ – діаметр кулі), одержимо

$$\rho_k \cdot \frac{1}{6}\pi d^3 \cdot g = \rho_p \cdot \frac{1}{6}\pi d^3 \cdot g + 3\pi d \eta v.$$

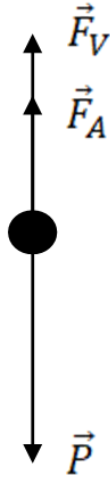


Рисунок 3.5 – Сили, що діють на рухому кулю в рідині

Звідси маємо для коефіцієнта в'язкості рідини рівняння

$$\eta = \frac{1}{18} g d^2 \frac{\rho_k - \rho_p}{v}. \quad (3.10)$$

Швидкість v можна визначити як відношення відстані D між кінцевими позначками 4 (на рисунку 3.2) до часу t руху кулі між ними:

$$v = \frac{D}{t}.$$

Рівняння (3.10) набуває вигляду (робоча формула)

$$\eta = \frac{gt(\rho_k - \rho_p)d^2}{18D}. \quad (3.11)$$

3.4 Послідовність виконання роботи

- 1 Накреслити таблицю для вимірюваних і заданих величин за зразком у таблиці 3.1.
- 2 За допомогою мікрометра визначити діаметри двох різних куль d_1 і d_2 (дані записати в таблицю 3.1).
- 3 Опустити першу кулю в трубку з рідиною і за допомогою чотирьох секундомірів визначити час руху кулі між кільцевими позначками (дані записати в таблицю 3.1). Відстань $D = 80$ см між позначками дана на установці.
- 4 Повторити дослід із другою кулею (дані записати в таблицю 3.1).
- 5 За робочою формулою (3.11) розрахувати коефіцієнт в'язкості рідини в кожному з експериментів.
- 6 Знайти середнє значення для коефіцієнта в'язкості.
- 7 Проаналізувати результати і зробити висновки.
- 8 Підготувати відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

- 1 Дайте визначення коефіцієнта в'язкості рідини.
- 2 Поясніть механізм внутрішнього тертя в газах і рідинах.
- 3 Чому з підвищенням температури в'язкість газів збільшується, а в'язкість рідин зменшується?
- 4 Як визначають градієнт швидкості? Що він показує?
- 5 Дайте формулювання закону Архімеда. Сформулюйте умову плавання тіла в рідині.
- 6 Дайте означення сили тяжіння. Що таке вага тіла?
- 7 Чому дорівнює сила в'язкого тертя, що діє на кулю в рідині?

8 Сформулюйте умову, за якої куля в експерименті рухатиметься в рідині рівномірно.

9 Як зміняться напрямки сил, що діють на кулю в рідині, якщо вона буде рухатися вгору?

10 Виведіть формулу для визначення коефіцієнта в'язкості, яку ви застосували в цій роботі.

Звіт про виконану роботу

1 Робоча формула.

$$\eta = \frac{g t (\rho_k - \rho_p) d^2}{18D} \text{ - коефіцієнт в'язкості рідини.}$$

Величини, що вимірюють: d – діаметр кулі,

t – час руху кулі,

Табличні величини:

$$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \quad \rho_p = 0,95 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$\rho_{ст} = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad \rho_{св} = 11,3 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Величини, що обчислюють: η – коефіцієнт в'язкості,

$$[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}.$$

2 Результати експерименту.

Таблиця 3.1 – Вимірювані величини

Номер секундоміра	ρ , кг/м ³	D , м	d_1 , м	t_1 , с	d_2 , м	t_2 , с
1		0,8		$t_{11} =$		$t_{21} =$
2				$t_{12} =$		$t_{22} =$
3				$t_{13} =$		$t_{23} =$
4				$t_{14} =$		$t_{24} =$
⟨середнє⟩						

3 Обробка результатів експерименту:

$$t_{1cp} = \frac{t_{11} + t_{12} + t_{13} + t_{14}}{4} = \quad .$$

$$t_{2cp} = \frac{t_{21} + t_{22} + t_{23} + t_{24}}{4} = \quad .$$

$$\eta_1 = \frac{g t_{1cp} (\rho_{cm} - \rho_p) d_1^2}{18D} = \quad .$$

$$\eta_2 = \frac{g t_{2cp} (\rho_{cm} - \rho_p) d_2^2}{18D} = \quad .$$

$$\eta_{cp} = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2} = \quad .$$

4 Висновки.

Лабораторна робота 4

ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ СИСТЕМИ (МАХОВЕ КОЛЕСО, ШКІВ, ОБЕРТАЛЬНИЙ ВАЛ) ДИНАМІЧНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи: вивчення законів динаміки обертального руху і визначення моменту інерції махового колеса зі шківом і валом обертання.

Прилади і матеріали: установка для вивчення законів динаміки обертального руху, секундомір, штангенциркуль, сантиметрова лінійка.

4.1 Теоретичні відомості

Момент інерції являє собою скалярну фізичну величину, яка є мірою інертності фізичного тіла, що обертається навколо конкретної осі. При цьому другий закон динаміки для обертального руху має вигляд

$$\vec{M} = J\vec{\varepsilon}, \quad (4.1)$$

де \vec{M} – обертальний момент сили, яка вимушує тіло обертатися;

J – момент інерції тіла;

$\vec{\varepsilon}$ – кутове прискорення тіла.

Момент інерції J тіла відносно заданої осі виражений як сума моментів інерції матеріальних точок, що складають це тіло:

$$J = \sum_k J_k, \quad (4.2)$$

де J_k – момент інерції k -ї матеріальної точки,

$$J_k = m_k r_k^2, \quad (4.3)$$

де m_k – маса k -ї точки;

r_k – відстань від k -ї матеріальної точки до осі обертання.

у загальному випадку вираз (4.2) має вигляд

$$J = \int r^2 dm. \quad (4.4)$$

За допомогою виразу (4.4) легко визначити моменти інерції деяких симетричних однорідних тіл відносно головної осі обертання, що проходить через центр тяжіння C . Приклади наведено в таблиці 4.1.

Момент інерції тіла відносно довільної осі обертання визначають за допомогою теореми про перенесення паралельних осей (**теорема Штейнера**):

$$J = J_C + ma^2, \quad (4.5)$$

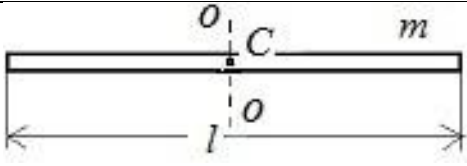
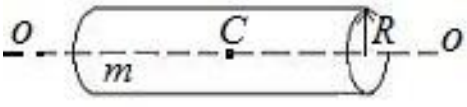

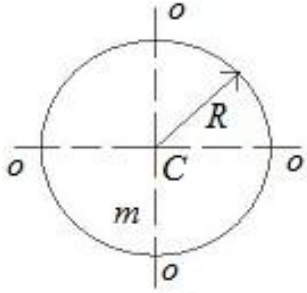
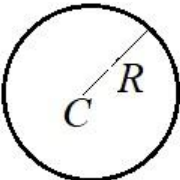
де J_C – момент інерції тіла відносно осі, що проходить через центр мас;

a – відстань від цієї осі до паралельної їй довільної осі;

m – маса тіла.

Теорема Штейнера корисна для розв'язання задач такого типу: «Маємо тіло, момент інерції якого J_C відносно осі OO , що проходить через його центр мас (\cdot) C , відомий. Але необхідно знайти момент інерції J цього тіла відносно довільної осі $O'O'$, паралельної OO » (рисунок 4.1) [5, 6].

Таблиця 4.1 – Моменти інерції деяких симетричних однорідних тіл відносно головної осі обертання, що проходить через центр тяжіння

1	Стрижень довжини l		$J = \frac{1}{12}ml^2 = J_C$
2	Диск/циліндр (заповнений речовиною) радіусом R		$J = \frac{1}{2}mR^2 = J_C$
3	Диск радіусом R (інша вісь обертання)		$J = \frac{1}{4}mR^2 = J_C$
4	Куля радіусом R		$J = \frac{2}{5}mR^2 = J_C$
5	Сфера радіусом R		$J = \frac{2}{3}mR^2 = J_C$
6	Кільце, обруч, пустотілий циліндр радіусом R		$J = mR^2 = J_C$ як для точки

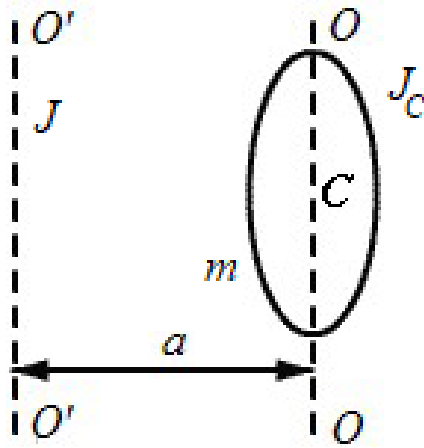


Рисунок 4.1 – Момент інерції тіла відносно осі $O'O'$

4.2 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка для вивчення законів динаміки обертального руху (рисунки 4.2, 4.3) складається з махового колеса 1 зі шківом 2, закріпленого на валу обертання 3. До шківів прикріплено мотузку 4, другий кінець якої містить гачок для підвішування тягарця 5 масою m .

Якщо мотузку намотати на шків і підвісити до гачка тягарець, махове колесо почне обертатися під дією моменту сили тяжіння, що діє на тягарець. При цьому потенціальна енергія тягарця маси m на деякій висоті h відносно підлоги

$$W_{\text{п}} = mgh$$

переходить у кінетичну енергію поступального руху тягарця

$$W_{\text{к.пост}} = \frac{mv^2}{2},$$

де m - маса тягарця;

v – швидкість тягарця,

і кінетичну енергію обертального руху всієї системи (махове колесо, шків, вал обертання)

$$W_{к,обер} = \frac{J\omega^2}{2},$$

де J – момент інерції махового колеса зі шківом і валом;

ω – кутова швидкість їх обертання.

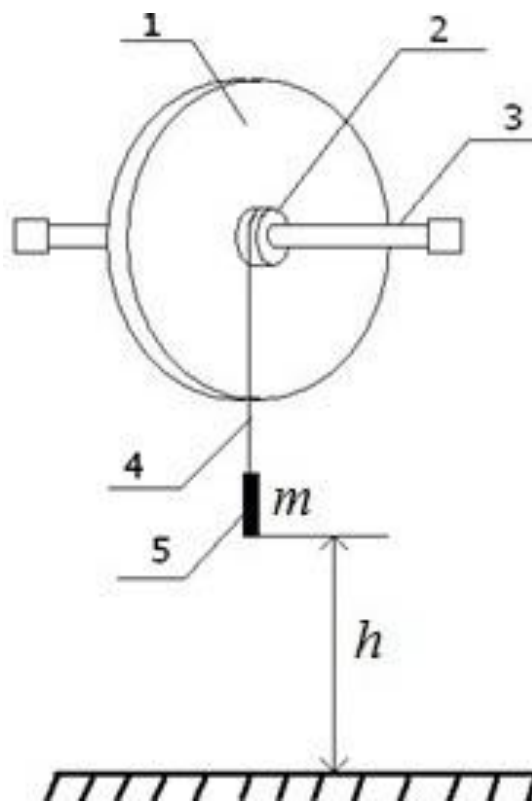


Рисунок 4.2 – Схема установки для проведення лабораторної роботи 4



Рисунок 4.3 – Фотозображення установки для виконання лабораторної роботи 4

4.3 Виведення робочої формули

Для моменту часу t , коли тягарець досягне підлоги, на основі закону збереження повної механічної енергії без урахування сил тертя маємо

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} \quad (4.6)$$

Оскільки на тягарець діє постійна сила тяжіння, його прискорення є постійним і пов'язане з висотою h співвідношенням $h = at^2 / 2$, звідки

$$a = \frac{2h}{t^2} . \quad (4.7)$$

Швидкість тягарця

$$v = at = \frac{2h}{t} . \quad (4.8)$$

Кутова швидкість обертання колеса (шківа, вала)

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{2h}{Rt} , \quad (4.9)$$

де t - час руху тягарця;

R - радіус шківа.

Із формули (4.6), підставляючи туди формули (4.8) і (4.9), одержимо робочу формулу

$$J = mR^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right) . \quad (4.10)$$

Ця формула дає змогу експериментально визначити момент інерції нашої системи.

Сила натягу мотузки F_H , яка діє на шків, створює обертальний момент (момент сили)

$$M = F_H R. \quad (4.11)$$

Цю силу можна знайти з другого закону Ньютона. Для тягарця маси m його записують у такому вигляді:

$$ma = mg - F_H,$$

звідки

$$F_H = m(g - a). \quad (4.12)$$

З урахуванням формул (4.7) і (4.12) рівняння (4.11) для моменту сили M набуває вигляду

$$M = mR \left(g - \frac{2h}{t^2} \right) = mR g \left(1 - \frac{2h}{g t^2} \right). \quad (4.13)$$

Використовуючи основний закон динаміки обертального руху $M = J\varepsilon$, можна знайти кутове прискорення колеса (шківа, вала):

$$\varepsilon = \frac{M}{J}. \quad (4.14)$$

4.4 Послідовність виконання роботи

- 1 Накреслити таблицю вимірюваних величин за зразком, наведеним у таблиці 4.2.
- 2 Штангенциркулем виміряти діаметр шківів та знайти його радіус R .
- 3 Підвісити до гачка тягарець маси m .
- 4 Виміряти висоту h , на якій знаходиться тягарець.
- 5 Відпустити махове колесо і одночасно увімкнути секундомір.
- 6 У момент удару тягарця об підлогу вимкнути секундомір і зафіксувати час t його руху.
- 7 Повторити дослід п'ять разів. Результати записати в таблицю 4.2 і за формулою (4.10) визначити момент інерції колеса.
- 8 За формулою (4.13) визначити момент сили M , що обертає колесо.
- 9 Знайти кутове прискорення колеса, використовуючи формулу (4.14).
- 10 Повторити експеримент для тягарця іншої маси.
- 11 Проаналізувати результати і зробити висновки.
- 12 Підготувати відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

- 1 Сформулюйте основне рівняння динаміки обертального руху. Дайте визначення моменту сили відносно осі обертання.
- 2 Дайте визначення моменту інерції твердого тіла відносно нерухомої осі.
- 3 Запишіть формулу моменту інерції однорідного диска або циліндра.
- 4 Які сили називають консервативними? Дайте визначення потенціальної енергії та запишіть формулу потенціальної енергії тіла в полі тяжіння Землі.

- 5 Що називають кінетичною енергією тіла?
- 6 Сформулюйте закон збереження енергії в механіці.
- 7 Чому дорівнює кінетична енергія обертального руху тіла?
- 8 Як пов'язані одна з одною лінійна та кутова швидкість точки, що обертається навколо нерухомої осі?
- 9 Виведіть формулу для визначення моменту інерції, використану в цій роботі.
- 10 Виведіть робочу формулу для визначення моменту сили.
- 11 Сформулюйте теорему Штейнера.

Звіт про виконану роботу

1 Робочі формули.

Момент інерції тіла

$$J = m R^2 \left(\frac{g t^2}{2h} - 1 \right)$$

Момент сили натягу мотузки

$$M = m R g \left(1 - \frac{2h}{g t^2} \right)$$

Кутове прискорення колеса

$$\varepsilon = \frac{M}{J}$$

Величини, що вимірюють:

R - радіус шківів;

h - висота тягарця над підлогою;

$m_1 = 0,3$ кг і $m_2 = 0,5$ кг - маси першого і другого тягарців відповідно;

t_{1i} і t_{2i} - час руху тягарців із масами m_1 і m_2 до підлоги в i -му експерименті (де $i = 1, 2, 3, 4, 5$; таблиця 4.2).

Табличні величини:

$g = 9,8$ м/с² – прискорення вільного падіння.

Величини, що обчислюють:

J - момент інерції тіла, $[J] = \text{кг} \cdot \text{м}^2$;

M - момент сили, $[M] = \text{Н} \cdot \text{м}$;

ε - кутове прискорення колеса, $[\varepsilon] = \text{рад/с}^2$.

2 Результати експерименту.

Таблиця 4.2

Номер дослідів	R , м	h , м	m_1 , кг	t_1 , с	m_2 , кг	t_2 , с
1						
2						
3						
4						
5						
⟨середнє⟩						

3 Обробка результатів експерименту.

Середній час руху тягарця із масою m_1

$$\langle t_1 \rangle = \frac{t_{11} + t_{12} + t_{13} + t_{14} + t_{15}}{5} = \quad .$$

Середній час руху тягарця із масою m_2

$$\langle t_2 \rangle = \frac{t_{21} + t_{22} + t_{23} + t_{24} + t_{25}}{5} = \quad .$$

Момент інерції системи

$$J_1 = m_1 R^2 \left(\frac{g \langle t_1 \rangle^2}{2h} - 1 \right) = \quad .$$

$$J_2 = m_2 R^2 \left(\frac{g \langle t_2 \rangle^2}{2h} - 1 \right) = \quad .$$

Середнє значення моменту інерції

$$\langle J \rangle = \frac{J_1 + J_2}{2} = \quad .$$

Обертальний момент у першому експерименті

$$M_1 = m_1 g R \left(1 - \frac{2h}{g \langle t_1 \rangle^2} \right) = \quad .$$

Обертальний момент у другому експерименті

$$M_2 = m_2 g R \left(1 - \frac{2h}{g \langle t_2 \rangle^2} \right) = \quad .$$

Кутове прискорення в першому експерименті

$$\varepsilon_1 = \frac{M_1}{J_1} = \quad .$$

Кутове прискорення у другому експерименті

$$\varepsilon_2 = \frac{M_2}{J_2} = \quad .$$

4 Висновки.

ДОДАТКОВІ ЗАПИТАННЯ

Перелік додаткових запитань наведений для підвищення кількості балів для захисту лабораторних робіт.

- 1 Елементи кінематики. Простір і час у класичній фізиці.
- 2 Матеріальна точка. Система відліку. Кінематичне вивчення механічного руху. Способи вивчення руху матеріальної точки.
- 3 Траєкторія, переміщення, шлях, швидкість, прискорення.
- 4 Кінематичні характеристики руху частинки по колу. Закон руху частинки.
- 5 Елементи динаміки частинок. Завдання динаміки.
- 6 Закони Ньютона в механіці.
- 7 Інерціальні системи відліку.
- 8 Маса. Імпульс. Принцип відносності Галілея. Диференціальне рівняння руху частинки. Дві основні задачі динаміки точки.
- 9 Елементи механіки твердого тіла. Модель абсолютно твердого тіла.
- 10 Поступальний і обертальний рух абсолютно твердого тіла. Закон руху центра мас.
- 11 Основне рівняння динаміки обертального руху. Момент інерції. Теорема Штейнера.
- 12 Кінетична енергія тіла, що обертається.
- 13 Закон всесвітнього тяжіння. Сила тяжіння. Вага тіла.
- 14 Сили пружності. Закон Гука.
- 15 Сили тертя.
- 16 Консервативні та дисипативні сили.
- 17 Механічна робота і потужність.
- 18 Коефіцієнт корисної дії похилої площини.

- 19 Кінетична та потенціальна енергії матеріальної точки і твердого тіла.
- 20 Закони збереження в механіці.
- 21 Момент інерції твердого тіла відносно осі. Теорема Штейнера.
- 22 Кінетична енергія обертального руху матеріальної точки і твердого тіла.
- 23 Момент імпульсу твердого тіла відносно осі обертання.
- 24 Основний закон динаміки обертального руху твердого тіла відносно осі.
- 25 Робота з обертанням тіла відносно осі.

Список літератури

- 1 Попов А. В., Вовк Р. В. Лекції з загальної фізики «Механіка, молекулярна фізика і термодинаміка». Харків: УкрДАЗТ, 2011. 223 с.
- 2 Кадченко В. М. Загальна фізика. Оптика: оглядові лекції. Кривий Ріг: КДПУ, 2020. 70 с.
- 3 Фізика і енергетика: навч. посіб. / І. Р. Зачек, І. Є. Лопатинський, Ф. М. Гончар, І. Є. Мороз. Львів: Ліга-Прес, 2015. 368 с.
- 4 Янг Г., Фрідман Р., Сендін Т., Форд Л. Фізика для університетів з розділами сучасної фізики. Львів: Наутілус, 2009. 1600 с.
- 5 Курс фізики: підручник / І. Р. Зачек, І. М. Кравчук, Б. М. Романишин та ін. Львів: «Бескид-Біт», 2002. 375 с.
- 6 Фізика: навч. посіб. / І. Є. Лопатинський, І. Р. Зачек, Г. А. Ільчук, Б. М. Романишин. Львів: Афіша, 2009. 385 с.

ДОДАТОК А

ДОВІДКОВИЙ МАТЕРІАЛ

Літери латинської та грецької абеток

<i>Латинський алфавіт</i>		<i>Грецький алфавіт</i>	
A a - а	N n - ен	A α - альфа	N ν - ню
B b - бе	O o - о	B β - бета	Ξ ξ - ксі
C c - це	P p - пе	Γ γ - гамма	Ο ο - омікрон
D d - де	Q q - ку	Δ δ - дельта	Π π - пі
E e - е	R r - ер	Ε ε - епсилон	Ρ ρ - ро
F f - еф	S s - ес	Z ζ - дзета	Σ σ - сигма
G g - ге	T t - те	Η η - ета	Τ τ - тау
H h - аш	U u - у	Θ θ - тета	Υ υ - іпсилон
I i - і	V v - ве	Ι ι - йота	Φ φ - фі
J j - жи	W w - дубль-ве	Κ κ κ - каппа	Χ χ - хі
K k - ка	X x - ікс	Λ λ - лямбда	Ψ ψ - псі
L l - ель	Y y - ігрек	Μ μ - мю	Ω ω - омега
M m - ем	Z z - зет		

Кратні одиниці

Кратні одиниці – одиниці, які в цілу кількість разів перевищують основну одиницю вимірювання деякої фізичної величини. Міжнародна система одиниць (СІ) рекомендує такі десяткові приставки для позначень кратних одиниць.

Десятковий множник	Приставка		Позначення		Приклад
	українська	міжнародна	українська	міжнародна	
10^1	дека	deca	да	da	дал — декалітр
10^2	гекто	hecto	г	h	гПа — гектопаскаль
10^3	кіло	kilo	к	k	кН — кілоньютон
10^6	мега	Mega	М	M	МПа — мегапаскаль
10^9	гіга	Giga	Г	G	ГГц — гігагерц
10^{12}	тера	Tera	Т	T	ТВ — теравольт

Часткові одиниці

Часткові одиниці складають певну частину встановленої одиниці вимірювання деякої величини. Міжнародна система одиниць (SI) рекомендує такі приставки для позначень часткових одиниць.

Десятковий множник	Приставка		Позначення		Приклад
	українська	міжнародна	українська	міжнародна	
10^{-1}	деци	deci	д	d	дм — дециметр
10^{-2}	санти	centi	с	c	см — сантиметр
10^{-3}	мілі	milli	м	m	мН — міліньютон
10^{-6}	мікро	micro	мк	μ	мкм — мікромметр, мікрон
10^{-9}	нано	nano	н	n	нм — нанометр
10^{-12}	піко	pico	п	p	пФ — пікофарад

Фізичні сталі величини

Елементарний електричний заряд	$e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$ Кл
Заряд електрона	$q_e = - 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Заряд протона	$q_p = + 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Маса спокою електрона	$m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31}$ кг = $5,486 \cdot 10^{-4}$ а.о.м.
Маса спокою протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00728 а.о.м.
Маса спокою нейтрона	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00866 а.о.м.
Питомий заряд електрона	$e/m_e = 1,7588 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Швидкість світла у вакуумі	$c = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала	$G = 6,672 \cdot 10^{-11}$ Н м ² /кг ²
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	$\mu_0 = 12,5664 \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Стала Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Стала Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Стала Фарадея	$F = e N_A = 9,648 \cdot 10^4$ Кл/моль
Об'єм одного моля ідеального газу за нормальних умов	$V_\mu = 0,0224$ м ³ /моль
Універсальна газова стала	$R = k N_A = 8,314$ Дж/(моль К)
Прискорення вільного падіння на рівні моря на широті 45°	$g = 9,80665$ м/с ²
Абсолютний нуль температури	$T = 0$ К ; $t = - 273,15$ °С
Нормальні умови (для ідеального газу)	$T_0 = 273$ К ; $p_0 = 101325$ Па
Коефіцієнт взаємозв'язку маси та енергії	$c^2 = E/m = 8,9874 \cdot 10^{16}$ Дж/кг = 931,5 МеВ/а.о.м.
Одна атомна одиниця маси	1 а.о.м. = $1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг
Один електрон-вольт	1 еВ = $1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж ; 1 МеВ = $1,60219 \cdot 10^{-13}$ Дж

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для виконання лабораторних і самостійних робіт
з освітньої компоненти «ФІЗИКА»

Розділ
Механіка

Відповідальна за випуск Камчатна С. М.

Редактор Ібрагімова Н. В.

Підписано до друку 14.04.2026 р.
Умовн. друк. арк. 3,75. Тираж . Замовлення № .
Видавець та виготовлювач Український державний університет
залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.