

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

Механіка і молекулярна фізика

*Фізичний практикум
для студентів інженерних спеціальностей*

Чернівці

2022

ББК 22.2+22.36
М 55 М
УДК [531/534+539.1] (076.5)

Рекомендовано навчально-методичною радою навчально-наукового Інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, протокол №3 від 5 січня 2022 р.

М75

Механіка і молекулярна фізика : Фізичний практикум для студентів інженерних спеціальностей / укл.: Курек І. Г., Курек Є. І., Олійнич-Лисюк А. В., Федорцова І. В. – Чернівці, 2022 – 72 с.

У роботі викладені детальні інструкції до лабораторних робіт з механіки та молекулярної фізики, які містять опис приладів, теоретичну частину та хід виконання роботи. До кожної лабораторної роботи наведені контрольні запитання та завдання, а також список рекомендованої літератури.

Призначена для студентів інженерних спеціальностей навчально-наукового Інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Ю. Федьковича, які починають експериментальне вивчення загального курсу фізики в лабораторії.

ББК 22.2+22.36

Лабораторні роботи з механіки

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Визначення об'єму циліндричного тіла

Мета роботи: вивчити конструкцію та технічні характеристики вимірювальних приладів, освоїти методи вимірювання ними лінійних величин, навчитися обчислювати похибки прямих та опосередкованих вимірювань.

Прилади і матеріали. Штангенциркуль; мікрометр; деталі для вимірювання.

Теоретичні відомості та опис приладів. Для безпосередніх вимірювань довжин широко використовуються різного типу лінійки та рулетки. Точність вимірювання довжин цими мірами невисока. Вона в основному не перевищує 0,5 мм. Для більш точних вимірювань користуються приладами з ноніусом. **Ноніус** – це невелика додаткова шкала до звичайного масштабу, яка дає змогу підвищити точність вимірювань у 10 - 20 разів. Ноніус переміщується по основній шкалі. Використання ноніуса ґрунтується на тому, що людське око легко розрізняє, чи є два штрихи продовженням один одного, чи вони дещо зсунуті. Довжина ноніуса вибирається такою, щоб сумарна довжина поділок ноніуса дорівнювала $(m - 1)$ поділкам основної шкали (рис.1, а), тобто:

$$ma = (m - 1)b, \quad (1)$$

де a і b – відповідно ціни поділок ноніуса і основної шкали. З формули (1) різниця $\Delta = b - a$ (точність ноніуса) дорівнює

$$\Delta = b - a = \frac{b}{m}. \quad (2)$$

Отже, **точністю ноніуса** називають величину b/m , яка дорівнює відношенню ціни найменшої поділки основної шкали до кількості поділок на ноніусі.

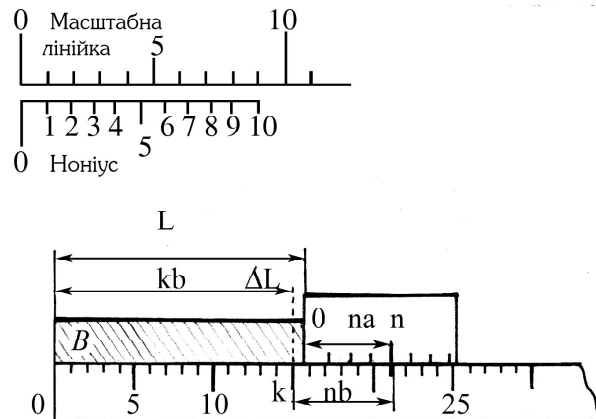


Рис. 1

Таким чином, у залежності від потреби, можна виготовити ноніус тієї чи іншої точності. Так, шкала ноніуса для вимірювання з точністю до 0,05 мм має 20 поділок на 19 мм, а шкала ноніуса для вимірювання з точністю до 0,02 – 500 однакових поділок на довжині 49 мм. Це так звані розширені ноніуси, в яких довжина поділки на 1/20 або 1/50 менша від довжини поділки основної шкали.

Розглянемо процес вимірювання за допомогою лінійного ноніуса. Нехай B – вимірюваний предмет (рис. 1, б). З рисунка видно, що його довжина

$$L = kb + \Delta L, \quad (3)$$

де kb – ціле число поділок основної шкали до нуля ноніуса, в мм; ΔL – невідомий відрізок, в частках міліметра. Позначимо через n ту поділку ноніуса, яка збігається з довільною поділкою основної шкали. Тоді

$$\Delta L = nb - na = n(b - a) = n \frac{b}{m}. \quad (4)$$

Із (3) і (4) знаходимо шукану довжину

$$L = kb + n \frac{b}{m}. \quad (5)$$

Отже, довжина відрізка, що вимірюється, дорівнює цілому числу поділок основної шкали до нуля ноніуса плюс точність ноніуса,

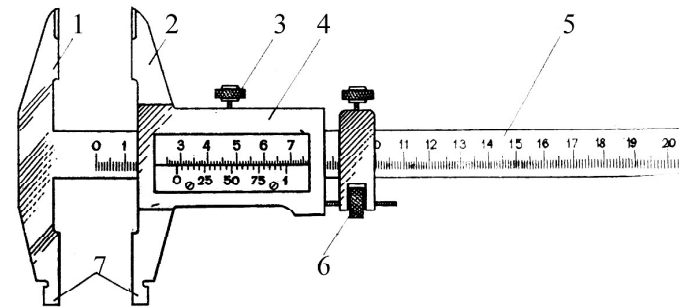


Рис. 2

помножена на номер поділки ноніуса, яка збігається з деякою поділкою основної шкали. Ноніуси застосовуються в різноманітних приладах, зокрема в штангенциркулях. **Штангенциркуль** (рис. 2) – це прилад для вимірювання лінійних розмірів із точністю від 0,1 до 0,02 мм. Він складається зі сталеві лінійки (штанги) 5 із міліметровими поділками, відносно якої переміщується рамка 4 з ноніусом, і двох пар губок (ніжок) – нерухомих 1 і рухомих 2. При зімкнутих губках відлік за ноніусом дорівнює нулеві. Щоб точно визначити розмір деталі, рухому губку переміщують до моменту дотику її до деталі за допомогою мікрометричного пристрою 6, щоб запобігти надмірному натисканню губок на деталь. Стопорним гвинтом 3 фіксують рухому губку і роблять відлік за ноніусом. При вимірюванні внутрішніх розмірів користуються каліброваними губками 7, загальна ширина яких при зведених губках дорівнює 10 мм. Цей розмір треба додавати до відліку за шкалою.

Хід роботи

Перед виконанням роботи: 1) вивчити конструкцію й технічні характеристики штангенциркуля та навчитися читати довільно проставлені розміри; 2) ознайомитися з порядком обробки результатів прямих та непрямих вимірювань, які викладені в додатках.

Вправа 1. Проведення та обробка результатів прямих вимірювань.

1. Виміряти не менше трьох разів висоту циліндричної деталі. Обчислити похибки прямих вимірювань.

2. Виміряти не менше трьох разів діаметр циліндричної деталі. Обчислити похибки прямих вимірювань.

Вправа 2. Проведення та обробка результатів опосередкованих (непрямих) вимірювань.

1. Обчислити середнє значення об'єму циліндричного тіла за формулою

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H . \quad (4)$$

2. Вивести формули для обчислення абсолютної та відносної похибок вимірювання об'єму згідно з прикладом, наведеним у додатку.

Контрольні запитання і завдання

1. Які будова і правила користування штангенциркулем?
2. Як визначається похибка одного прямого виміру?
3. Як обчислюються похибки при прямих вимірюваннях?
4. Як обчислюються похибки при опосередкованих вимірюваннях?

Рекомендована література

1. Інструкція до лабораторної роботи.
- 2-4. Додатки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Визначення прискорення вільного падіння за допомогою фізичного маятника

Мета роботи: визначення прискорення вільного падіння.

Прилади і матеріали. Обертвий маятник, секундомір, рулетка.

Теоретичні відомості та опис приладів. Фізичним маятником називається будь-яке тіло, підвішене в точці, що лежить вище його центра мас, і може коливатися. Обертві маятники, в залежності

від вимог, можуть мати різну форму. В нашому випадку він складається зі стержня, на який надіті важкі рухомі “сочевиці” та опорні призми. Використання обертового маятника для визначення прискорення вільного падіння g ґрунтується на властивості спряженості центра коливань (точки підвішування). Ця властивість полягає в тому, що для будь-якого фізичного, а відповідно й обертового маятника, завжди можна знайти такі дві точки, що при послідовному підвішуванні маятника в тій чи іншій з них період його коливань залишається незмінним. Такі дві точки називаються *спряженими*, а відстань між ними – *зведеною довжиною* фізичного маятника і позначається l . Для будь-якого фізичного маятника можна знайти безліч пар спряжених точок.

Формула, за якою визначають g , має вигляд:

$$g = \frac{4\pi^2 n^2 l}{t^2}, \quad (1)$$

де t – час протягом якого маятник здійснює n повних коливань.

І **основна задача** полягає в тому, щоб знайти в маятника такі два асиметричні відносно центра мас положення осей, при коливанні біля яких час t залишався би незмінним. Тоді відстань між цими осями дасть нам величину l .

Хід роботи

1. Підвісивши маятник на одній із опорних призм, за допомогою секундоміра виміряти час t_1 $n=20$ коливань.
2. Перевернути маятник, підвісити його на другій опорній призмі й виміряти час t_2 повних $n=20$ коливань.
3. Переміщенням другої опорної призми добитися того, щоб час t_2 збігався з t_1 . **“Сочевиці” не пересувати!**
4. Перевернути маятник у початкове положення і виміряти час t_3 $n=20$ коливань.
5. Обчислити похибки прямих вимірювань t .
6. Виміряти відстань між опорними призмами l один раз і оцінити похибку одного прямого вимірювання.
7. За формулою (1) визначити g .
8. Обчислити похибки непрямих вимірювань g за формулою (1).

Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Дайте визначення гармонійних коливань і запишіть рівняння, яким вони описуються. Дайте визначення власних коливань. Що таке квазіпружна сила?
3. Запишіть та поясніть закон всесвітнього тяжіння у векторній формі. Дайте визначення гравітаційного поля. Що таке напруженість і потенціал гравітаційного поля? Який їх фізичний зміст?
4. Дайте визначення математичного та фізичного маятників. Виведіть співвідношення для періодів їх коливань. Що таке центр качання та зведена довжина фізичного маятника?
5. Поясніть залежність g від широти місцевості. Що таке стан невагомості? Якою повинна бути тривалість доби, щоб тіла на екваторі були невагомі?

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.251-253, 257]; [3, с.421-422]; [2, с.200-204].
3. [2, с.302-308, с.321].
4. [1, с.166-167]; [2, с.225-229]; [3, с.421-427]; [4, с.409,602-615].
5. [4, с.183-189, с.194-199].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Вивчення законів кінематики та динаміки на машині Атвуда

Мета роботи: перевірка закону рівноприскореного руху

$$S = at^2/2.$$

Прилади і матеріали. Машина Атвуда, набір тягарців.

Теоретичні відомості та опис приладів. Машина Атвуда дає змогу одержати рівномірний і рівноприскорений рух тягарців, а також виміряти проміжки часу, протягом яких тягарці проходять задані відстані в рівномірному та рівноприскореному рухах.

Машина Атвуда (рис.3) складається з вертикального стояка, на верхньому кінці якого закріплено легкий блок, що обертається з малим тертям навколо горизонтальної осі. Через блок перекинута тоненька нитка з прикріпленими до її кінців вантажами 3 однакової маси M . Вантажі можуть спиратися на платформу 4, яка переміщується вздовж стояка. На стояку нанесено шкалу 2 з сантиметровими поділками. Для фіксації обох вантажів у певному положенні й для звільнення їх у верхній частині стояка закріплено електромагніт 5. Платформа 4 суцільна, а платформа 1 має отвір, через який вільно проходить вантаж. На платформі 4 закріплено контакт, за допомогою якого можна вмикати і вимикати секундомір. Окрім вантажів 3, в комплекті установки є додаткові тягарці 6 і 7, якими користуються для надання системі рівноприскореного руху.

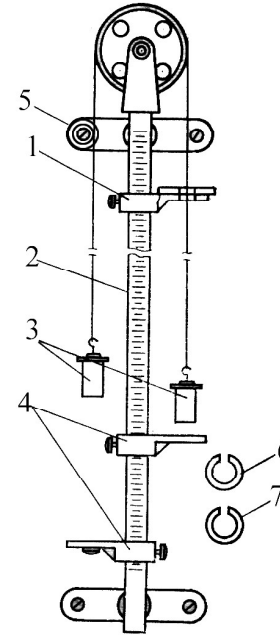


Рис. 3

переміщується вздовж стояка. На стояку нанесено шкалу 2 з сантиметровими поділками. Для фіксації обох вантажів у певному положенні й для звільнення їх у верхній частині стояка закріплено електромагніт 5. Платформа 4 суцільна, а платформа 1 має отвір, через який вільно проходить вантаж. На платформі 4 закріплено контакт, за допомогою якого можна вмикати і вимикати секундомір. Окрім вантажів 3, в комплекті установки є додаткові тягарці 6 і 7, якими користуються для надання системі рівноприскореного руху.

Хід роботи

1. На правий вантаж покласти обидва додаткові тягарці (у нашому випадку маса тягарців $m=12+6,5$ (г)), увімкнути струм у колі електромагніту і встановити систему так, щоб вона утримувалась за допомогою електромагніту в стані спокою.

2. Суцільну платформу 4 встановити на відстані $S=0,3$ м від **нижньої основи** правого основного вантажу. При розмиканні електричного кола електромагніту вмикається секундомір, який зупиняється при торканні правого вантажу 3 до суцільної платформи 4. Його покази відповідають часу руху t вантажу.

3. При постійній масі додаткових тягарців, змінюючи величини S_1 , виміряти час t_1 , який в усіх випадках взяти як середнє з трьох вимірювань при фіксованому в кожному випадку S_1 . Прискорення системи в усіх випадках буде однаковим, оскільки *сила*, яка є

причиною прискореного руху системи, однакова у всіх випадках. Тому повинно виконуватись співвідношення

$$a = \frac{2S_1}{t_1^2} = \frac{2S_2}{t_2^2} = \dots = \frac{2S_n}{t_n^2},$$

яке треба перевірити.

4. Похибки прямих вимірювань обчислити для S і t для одного із випадків.

5. Похибки опосередкованих вимірювань розрахувати для прискорення в тому випадку, для якого обчислювались похибки прямих вимірювань S і t .

Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Які існують способи опису руху? В чому їх суть?
3. Дайте визначення вектора середньої швидкості, миттєвої швидкості. Доведіть, що вектор швидкості напрямлений по дотичній до траєкторії.
4. Як графічно зображаються залежності прискорення, швидкості, шляху від часу у випадках рівномірного, рівноприскореного та рівносповільненого рухів?
5. Дайте визначення та запишіть співвідношення для векторів середнього та миттєвого прискорень. Як і чому напрямлені вектори нормального і тангенційного прискорень відносно траєкторії? Як вони впливають на швидкість? Як визначаються напрямок та величина повного прискорення?
6. Дайте визначення сили. Поясніть, як сила пов'язана з рухом. Чому співвідношення $F = ma$ не можна розглядати як визначення сили? Дайте визначення імпульсу (кількості руху). Сформулюйте та запишіть другий закон Ньютона в диференційній формі.

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2-3. [1, с.38-41].
5. [1, с.41-43]; [2, с.32-44].
6. [1, с.95-99]; [3, с.51-52, с.66-67].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Визначення коефіцієнта динамічної в'язкості рідини методом Стокса

Мета роботи: визначити коефіцієнт динамічної в'язкості гліцерину.

Прилади і матеріали. Скляний циліндр із гліцерином; металеві кульки з відомого матеріалу; мікрометр; секундомір; рулетка.

Теоретичні відомості та опис приладів. В'язкістю називається властивість рідини або газу чинити опір при відносному зміщенні їх шарів. У потоках реальних рідин і поблизу змочуваних твердих тіл різні шари рідини мають різні швидкості. Шар рідини або газу, який "налипає" на поверхню твердого тіла, має відносно цієї поверхні швидкість, яка дорівнює нулеві. У міру віддалення від поверхні твердого тіла відносна швидкість шарів рідини збільшується. Інакше кажучи, в таких потоках спостерігається рух одних шарів відносно інших (у напрямі, перпендикулярному до потоку, існує градієнт швидкості, який показує зміну швидкості в залежності від відстані між шарами). Сила в'язкості рідин і газів при їх ламінарній течії визначається законом Ньютона

$$F = \eta \frac{dv}{dz} S,$$

де F – сила в'язкості; S – площа поверхні внутрішнього шару, на яку

розраховується сила внутрішнього тертя; $\frac{dv}{dz}$ – градієнт швидкості;

η – коефіцієнт динамічної в'язкості.

В'язкість рідин зумовлена рухливістю окремих молекул або атомів, на відміну від газів, для яких внутрішнє тертя є результатом хаотичного руху молекул.

Одним із широко використовуваних методів визначення η рідин є метод Стокса, який ґрунтується на вимірюванні швидкості рівномірного руху тіла сферичної форми (кульки) в досліджуваній рідині. За законом Стокса, сила в'язкості рідини F пропорційна

коефіцієнту в'язкості, радіусу кульки r і швидкості її руху v :

$$F = 6\pi\eta r v . \quad (1)$$

При падінні кульки в рідині ця сила спочатку зростає. Потім при врівноваженні сили в'язкості F , архімедової сили F_A та сили тяжіння mg ($mg = F + F_A$) рух кульки стає рівномірним. Підставивши значення цих сил, отримаємо:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g + 6\pi\eta r v ,$$

звідки

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

де ρ і ρ_1 – густини відповідно кульки й досліджуваної рідини.

Формули (1) і (2) справедливі для випадку твердої кульки, яка рухається рівномірно без обертання при відсутності турбулентності і якщо рідина гідродинамічно нестислива, однорідна й має необмежену протяжність у всіх напрямках.

У даній роботі використовується скляний циліндр, внутрішній радіус якого $R=24$ мм, наповнений досліджуваною рідиною (гліцерином). Стінки циліндра обмежують рідину. На циліндрі зроблено дві кільцеві позначки: верхня – це початок рівномірного руху кульки, а нижня відмежовує дію дна посудини.

Швидкість рівномірного руху кульки в рідині можна визначити за формулою

$$v = \frac{l}{t} , \quad (3)$$

де l – відстань між позначками; t – час руху кульки між позначками.

Ураховуючи вплив стінок циліндра, формулу (3) і виразивши радіус кульки через її діаметр, формулу (2) можна переписати у вигляді:

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_1) R t}{18l(R + 1,2d)} g d^2 . \quad (4)$$

Хід роботи

1. Встановити циліндр із досліджуваною рідиною вертикально і розмістити його так, щоб крізь нього проходило світло. Тоді можна добре бачити кульку, що падає.
2. Виміряти мікрометром діаметр кульки.
3. Рулеткою виміряти відстань між позначками на циліндрі.
4. Розрахувати похибки прямих вимірювань діаметра кульки і відстані між позначками.
5. Зорієнтувати кульку по осі циліндра й опустити її в рідину. Секундоміром визначити час, протягом якого кулька проходить відстань між позначками на циліндрі. У момент проходження кулькою позначок спостерігач для усунення похибки на паралакс повинен стати так, щоб очі були на одному горизонтальному рівні з позначкою.
7. Оцінити похибку при вимірюванні часу як похибку одного прямого виміру.
8. За формулою (4) обчислити η .
9. Повторити дослід із кулькою іншого діаметра, визначити η і порівняти зі значенням, отриманим у п. 8.
10. Вивести формули для обчислення абсолютної та відносної похибок вимірювань коефіцієнта в'язкості за формулою (4) і обчислити ці похибки.

Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Розгляньте рух кульки у в'язкій рідині і виведіть співвідношення для визначення коефіцієнта в'язкості без урахування впливу стінок посудини.
3. Поясніть, як виникають сили сухого тертя? Яка їх природа? Що таке тертя спокою? Поясніть явища заносу і застою.
4. Дайте визначення сил рідкого тертя. Поясніть умови їх виникнення. Як сили рідкого тертя залежать від швидкості? Що таке гранична швидкість і чому вона дорівнює?
5. Який фізичний зміст коефіцієнта динамічної в'язкості? В яких одиницях він вимірюється?

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [3, с.140-143].
3. [4, с.200-204, с.208-209]; [3, с.143-149].
- 4, 5. [3, с.136-140]; [5, с.252-255].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Перевірка основного рівняння обертального руху за допомогою маятника Максвелла

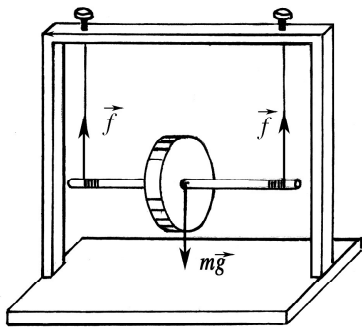


Рис. 4

Мета роботи: вивчити складний рух твердого тіла; перевірити основне рівняння обертального руху $M = I\beta$.

Прилади і матеріали. Маятник Максвелла; лінійка; штангенциркуль; секундомір.

Теоретичні відомості та опис приладів. Маятник Максвелла – це диск, жорстко насаджений на валик (вісь) (рис.4),

який двома нитками кріпиться до верхньої поперечини прямокутної рамки. Намотуючи нитки на валик, можна перевести маятник у верхнє граничне положення і, відпустивши, спостерігати, як під дією сили тяжіння та натягу ниток він опускається та підіймається, тобто здійснює коливання. Маятник, як тверде тіло, рухається одночасно і поступально, і обертально. Тому, щоб описати його рух, потрібно записувати рівняння як поступального, так і обертального рухів.

Рівняння поступального руху центра мас маятника має вигляд:

$$ma = mg - 2f, \quad (1)$$

де m – маса маятника ($m = m_1 + m_2$, $m_1 = 251,75$ г – маса диска, $m_2 = 83,33$ г – маса валика); f – сила натягу нитки; g – прискорення

вільного падіння; a – прискорення центра мас.

Рівняння обертального руху записується у вигляді

$$M = I\beta, \quad (2)$$

де β – кутове прискорення маятника, яке виражається через прискорення його центра мас a і діаметр валика d співвідношенням

$$\beta = \frac{2a}{d}; \quad (3)$$

I – момент інерції маятника:

$$I = \frac{1}{8}(m_1 D^2 + m_2 d^2), \quad (4)$$

де D – діаметр диска; M – момент сил натягу ниток:

$$M = 2f \frac{d}{2} = fd. \quad (5)$$

Розв'язок системи рівнянь (1), (2) і (3) дає прискорення маятника

$$a = \frac{mg}{m + 4I/d^2} \quad (6)$$

і силу натягу ниток

$$f = \frac{mg}{2(1 + md^2/4I)}. \quad (7)$$

Прискорення, одержане за формулою динаміки (6), можна перевірити за формулою кінематики

$$a = \frac{2H}{t^2}, \quad (8)$$

де H – відстань між верхнім і нижнім граничними положеннями осі валика; t – час руху маятника між цими положеннями; a – прискорення центра мас маятника. Порівняння результатів обчислень за (6) і (8) є першим кроком до мети роботи.

Прискорення не залежить від напрямку руху маятника, весь час напрямлене вниз і не змінює свого знака, а швидкість змінює знак у момент проходження маятником нижньої “мертвої” точки.

Хід роботи

1. За допомогою штангенциркуля знайти D і d . Вимірювання виконати не менше трьох разів і обчислити похибки прямих вимірювань.
2. За формулою (4) обчислити момент інерції маятника.
3. За формулою (6) знайти прискорення центра мас маятника.
4. Виміряти відстань H між верхнім і нижнім положеннями осі валика та час руху t маятника між цими положеннями. Вимірювання виконати не менше трьох разів і обчислити похибки прямих вимірювань.
5. За формулою (8) знайти прискорення центра мас маятника і порівняти його зі значенням, знайденим за формулою (6). Обчислити похибки опосередкованих вимірювань прискорення за формулою (8).
6. За формулою (7) знайти силу натягу ниток.
7. За формулою (5) обчислити момент сил, які діють на маятник.
8. Підставити у формулу (3) прискорення центра мас, знайдене за формулою (8), і обчислити кутове прискорення β .
9. Використовуючи момент інерції маятника I , знайдений у п. 2, обчислити момент сил за формулою (2).
10. Перевірити основне рівняння обертального руху, порівнявши моменти сил, знайдені в пп. 7 і 9.

Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Дайте визначення плоского руху. Які особливості динаміки плоского руху твердого тіла? Чому для плоского руху доцільно записувати рівняння руху та рівняння моментів відносно точки, через яку проходить центральна головна вісь, перпендикулярна до площини руху?
3. Дайте визначення моменту сили, моменту інерції, кутової швидкості, кутового прискорення.
4. Виведіть основне рівняння обертального руху системи матеріальних точок (твердого тіла) навколо нерухомої осі $\mathbf{M} = I\beta$.
5. Поясніть рух маятника Максвелла за один період коливань. Як поведуть себе прискорення і швидкість? Чому і коли у випадку недостатньої міцності нитки вона може розірватися?

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.46-47, с.164-166].
- 3-4. [2, с.179-183, с.185-189, с.254-265]; [3, с.180-182, с.200-201, с.220- 221].
5. [1, с.164-166], [3, с.210-211]; [4, с.419-429].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

Вивчення пружного удару двох куль

Мета роботи: визначення середньої сили зіткнення.

Прилади і матеріали. Установка для вивчення пружного удару двох куль; дві металеві кулі; технічні терези; різноважки; рулетка.

Теоретичні відомості та опис приладів. Прикладом застосування законів збереження енергії та імпульсу може бути явище удару. Удар – це зміна стану тіл унаслідок короткочасної їх взаємодії при зіткненні. Зіткненням називається взаємодія двох або більше матеріальних тіл, яка відбувається у відносно малій області простору протягом відносно малого проміжку часу так, що за межами цієї області простору і поза цим проміжком часу можна говорити про початкові й кінцеві стани тіл як про стани, в яких ці тіла не взаємодіють. Одним із найпростіших видів удару є центральний удар двох куль.

Центральний удар – це такий, при якому лінія удару проходить через центри куль. Лінія удару – це пряма, проведена нормально до елемента поверхні зіткнення куль у момент удару. Непружний удар спостерігається при зіткненні тіл із пластичних матеріалів або пластичного й пружного тіл. Після непружного удару швидкості тіл, що співударяються, стають однаковими, а механічна енергія частково або повністю переходить в інші види енергії, наприклад у теплову.

Пружний удар спостерігається при взаємодії тіл, виготовлених із пружних матеріалів і відбувається у два етапи. На першому етапі сили, що діють на кульки, зростають зі збільшенням деформації. Збільшення деформації супроводжується зміною швидкості кульок.

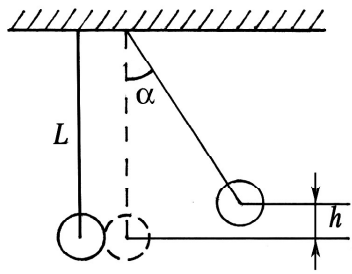


Рис. 5

Кулька, що має більшу швидкість, сповільнюватиметься, а та, що мала меншу, прискорюватиметься. При досягненні максимальної деформації швидкості кульок дорівнюватимуть одна одній.

Із моменту, який характеризує початок другого етапу пружного удару, значення деформації зменшується. При цьому сили

деформації розштовхують кульки. Після того як деформації зникнуть, кульки розійдуться повністю, відновлять свою форму й рухатимуться з різними швидкостями. Таким чином, наприкінці другого етапу удару весь запас потенціальної енергії пружнодеформованих тіл знову перетворюється в кінетичну енергію.

Отже, в результаті пружного удару не відбувається перетворення механічної енергії системи взаємодіючих тіл в інші види енергії.

Середню силу удару можна знайти, скориставшись другим законом Ньютона:

$$F\tau = m\Delta v, \quad (1)$$

де τ – це час зіткнення; m – маса однієї кульки (другу вважаємо нерухомою); Δv – зміна швидкості тіла, що виникла в результаті зіткнення. Із рівняння видно, що чим менший час зіткнення, тим більша сила при тій самій зміні швидкості. Під час зіткнення кулька, що рухається, повністю передає імпульс нерухомій і зупиняється.

Зміна швидкості кульки в результаті зіткнення

$$\Delta v = v - v',$$

де v – швидкість кульки до зіткнення; v' – швидкість кульки після зіткнення. Якщо кулька після зіткнення зупиняється, то $v' = 0$ і $\Delta v = v$. Тоді (1) можна переписати у вигляді

$$F\tau = mv.$$

Звідси

$$F = \frac{mv}{\tau}. \quad (2)$$

Швидкість кульки до зіткнення можна знайти із закону збереження енергії. Відхилена на кут α кулька має запас потенціальної енергії

$E_{\text{п}} = mgh$ (рис. 5). Ця енергія перед ударом переходить у кінетичну

$E_{\text{к}} = mv^2/2$. Тоді

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (3)$$

Із рисунка $h = L(1 - \cos\alpha) = 2L \sin^2 \frac{\alpha}{2}$. Підставивши h в (3),

маємо

$$v = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{gL}. \quad (4)$$

Підставивши (4) в (2), отримаємо

$$F = 2m \frac{\sqrt{gL}}{\tau} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (5)$$

Хід роботи

1. На технічних терезах визначити масу кульки m і оцінити похибку одного прямого виміру.

2. Рулеткою виміряти відстань L від точки підвісу до центра кульки і оцінити похибку одного прямого виміру.

Увага! Після увімкнення приладу кульок торкатися тільки ізольованими предметами!

3. Увімкнути прилад в електричну мережу. Натиснути кнопку “Сеть”. Праву кульку відхилити до магніта, ліву – встановити в положення рівноваги.

4. Виміряти кут відхилення й оцінити похибку одного прямого виміру.

5. Натиснути кнопку “Пуск”.

6. Зчитати час зіткнення τ .

Для повторних вимірювань натиснути кнопку “Сброс”, відпустити кнопку “Пуск”, піднести кульку до магніта, натиснути кнопку “Пуск” і зчитати час зіткнення.

7. Вимірювання часу зіткнення виконати не менше трьох разів і обчислити похибки прямих вимірювань.

8. За формулою (5) знайти середню силу удару та обчислити похибки опосередкованих вимірювань.

Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Дайте визначення зіткнення як фізичного явища. Сформулюйте та запишіть закони збереження імпульсу, моменту імпульсу, енергії для зіткнень.
3. Дайте визначення пружного і непружного зіткнень.
4. Чому сила, яка виникає при зіткненні двох сталевих кульок у даній роботі, дуже велика? Вважаючи зіткнення кульок лобовим (центральною ударом), а маси кульок однаковими, доведіть, що вся енергія від кульки, що рухається, передається нерухомій кульці.
5. Дайте визначення роботи сили. Доведіть, що робота сили дорівнює приросту кінетичної енергії.
6. Дайте визначення потенціальних сили. Запишіть критерій потенціальності поля. Дайте визначення енергії тіла в полі потенціальних сил. Доведіть, що робота потенціальних сил дорівнює від'ємному приросту потенціальної енергії.
7. Сформулюйте закон збереження енергії в механіці.

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2-4. [1, с.199-205, 208-209]; [2, с.160-165]; [3, с.117-126].
5. [2, с.132-138]; [4, с.140-143].
- 6-7. [1, с.119-134]; [4, с.143-149].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14

Визначення швидкості поширення звуку в повітрі методом стоячої хвилі

Мета роботи: експериментальне визначення швидкості звуку в повітрі.

Приладні матеріали. Звуковий генератор; телефон; мікрофон; електронний осцилограф; скляна труба.

Теоретичні відомості та опис приладів. Процес поширення звуку в газах з погляду термодинаміки можна вважати адіабатним.

Зважаючи на це, Лаплас отримав співвідношення для розрахунку швидкості поширення звуку в газах

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (1)$$

де $\gamma = C_p/C_v$ – показник адіабати; R – універсальна газова стала; T – температура газу; μ – молярна маса газу.

Швидкість поширення звуку в газах можна також визначити за його частотою та довжиною хвилі λ

$$v = \lambda \nu. \quad (2)$$

Існує багато різних методів експериментального визначення довжини звукової хвилі заданої частоти, серед яких одним із найчастіше використовуваних є метод стоячих хвиль.

Якщо взяти закриту з одного кінця заповнену повітрям трубу діаметром $d < \lambda/2$, в якій поширюється звукова хвиля, то при накладанні падаючої й відбитої від закритого кінця труби хвиль утвориться стояча хвиля з наступним розподілом зміщень:

$$\xi = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t, \quad (3)$$

де A – амплітуда біжучої хвилі; x – координата точки середовища, яка в момент часу t змістилася від положення рівноваги на ξ .

Амплітуда коливань у стоячій хвилі визначається виразом $2A \cos(2\pi x/\lambda)$. Це доводить, що вона залежить від координати x , яка визначає положення точки середовища. Ті точки середовища, в яких стоячі хвилі мають найбільші амплітуди, називають пучностями, а точки, в яких амплітуди дорівнюють нулю, – вузлами. Положення пучностей, як це видно із (3), визначаються умовою

$$\frac{2\pi x_n}{\lambda} = \pm \pi n, n \in Z$$

або в іншому вигляді

$$x_n = \pm n \frac{\lambda}{2}. \quad (4)$$

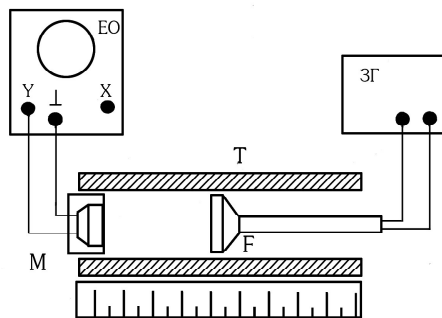


Рис. 6

Із (4) знайдемо відстані між двома сусідніми пучностями

$$L = x_{n+1} - x_n = \frac{\lambda}{2}. \quad (5)$$

Тобто відстань між двома сусідніми пучностями дорівнює половині довжини падаючої хвилі

$$\lambda = 2L. \quad (6)$$

Отже, робоча формула для визначення швидкості поширення звуку в повітрі методом стоячих хвиль матиме вигляд

$$v = 2Lv. \quad (7)$$

Установка (рис. 6) складається зі скляної труби Т і телефона F, який є джерелом звуку і живиться від звукового генератора ЗГ. Звукові коливання сприймаються мікрофоном М, перетворюються в електричний сигнал, який подається на блок вертикально відхиляючих пластин осцилографа. При вимкненому блоці розгортки на екрані осцилографа спостерігається вертикальна лінія.

Хід роботи

1. Увімкнути звуковий генератор та осцилограф і дати їм можливість прогрітися протягом кількох хвилин.
2. При певній частоті звукових коливань (її задає керівник заняття) домогтися чіткого зображення на екрані осцилографа вертикальної лінії.
3. Пересуваючи мікрофон уздовж осі труби, знайти чотири таких його положення, при яких вертикальна лінія на екрані осцилографа матиме максимальну довжину. Це означає, що положення мікрофона

відповідатиме пучностям зміщення.

4. За формулою (5) знайти три значення відстаней L між пучностями і обчислити похибки прямих вимірювань. Для частоти оцінити систематичну похибку.
5. За формулою (7) визначити швидкість поширення звуку в повітрі.
6. Обчислити похибки опосередкованих вимірювань.
7. Змінити частоту звукового сигналу і виконати пп. 3–5.
9. Обчислити теоретичне значення швидкості звуку в повітрі при кімнатній температурі за формулою (1). Для повітря $\gamma=1,4$; $\mu=29$ г/моль.

Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Що називається хвилею, фронтом хвилі, хвильовою поверхнею, довжиною хвилі? Які хвилі називаються поздовжніми (поперечними)?
3. Поясніть механізм утворення звукової хвилі в повітрі. Дайте визначення основним характеристикам звуку: висота, тембр, акустичний спектр, сила (гучність). Чим вони визначаються?
4. Запишіть та поясніть рівняння плоскої (сферичної) хвилі. Що таке хвильове число (хвильовий вектор)? Дайте визначення фазової швидкості.
5. Виведіть хвильове рівняння.
6. Виведіть рівняння стоячої хвилі.
7. Запишіть рівняння стоячої хвилі. Виведіть вирази для координат вузлів і пучностей.
8. Чому із підвищенням температури швидкість звуку зростає?

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2-3. [6, с.274-277, с.292-295]; [3, с.472-478].
- 4-5. [6, с.277-282].
- 6-8. [4, с.727-732]; [3, с.488-491]; [6, с. 289-292].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16

Вивчення руху гіроскопа

Мета роботи: визначення моменту інерції гіроскопа.

Прилади і матеріали. Гіроскоп; секундомір.

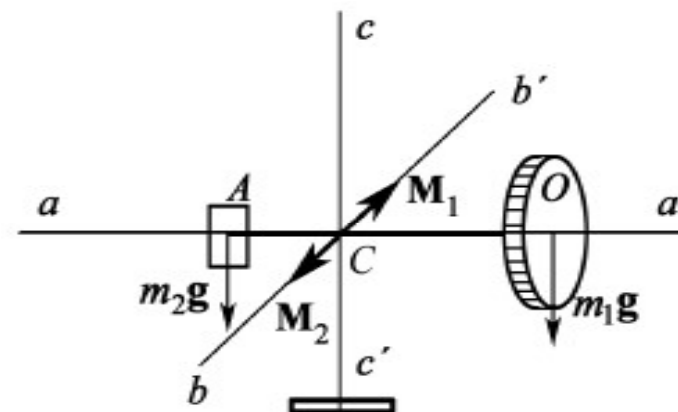


Рис. 7

Теоретичні відомості та опис приладу. Гіроскопом називається симетричне тверде тіло, яке обертається з дуже великою швидкістю навколо власної осі, що є однією з вільних осей. Гіроскоп має три ступені вільності, якщо він закріплений так, що може здійснити будь-який поворот навколо нерухомої точки. Ця точка називається центром підвісу. Якщо центр мас гіроскопа збігається з центром підвісу, то результуючий момент сил тяжіння, що діють на різні частини гіроскопа, відносно центра підвісу дорівнює нулю. Оскільки тертя в місцях закріплення гіроскопа мале, то можна вважати момент сил тертя таким, що дорівнює нулю.

Таким чином, якщо сумарний момент сил, що діє на гіроскоп, дорівнює нулю, то такий гіроскоп називається вільним. Якщо сумарний момент сил, що діє на гіроскоп, відмінний від нуля, то гіроскоп зазнає прецесії. Прецесія гіроскопа описується рівнянням

$$\frac{d\mathbf{N}}{dt} = \mathbf{M}, \quad (1)$$

де \mathbf{M} – сумарний момент зовнішніх сил; \mathbf{N} – момент імпульсу фігури гіроскопа.

$$\mathbf{N} = I\boldsymbol{\omega}, \quad (2)$$

де I – момент інерції гіроскопа, який залежить від геометричної форми й маси фігури гіроскопа; $\boldsymbol{\omega}$ – кутова швидкість обертання фігури гіроскопа. Оскільки $I = \text{const}$, то при заданій кутовій швидкості ω модуль вектора моменту імпульсу гіроскопа не змінюється. У результаті прецесії змінюється лише його напрямок і, як наслідок, вісь фігури гіроскопа змінює свою орієнтацію в просторі.

Розглянемо гіроскоп (рис. 7). Позначимо aa' вісь фігури гіроскопа, яка може обертатися навколо горизонтальної осі bb' та вертикальної осі cc' . Гіроскоп, фігура якого не обертається, поводить себе як

різноплечий важіль. Якщо підібрати положення тягарця 2 так, щоб вісь aa' зайняла горизонтальне положення, то точка закріплення гіроскопа C збігатиметься з центром підвісу. За визначенням, такий гіроскоп буде вільним, а отже, моменти сил тяжіння, які діють на фігуру гіроскопа масою m_1 $M_1 = m_1g \cdot |OC|$, та на тягарець масою m_2 $M_2 = m_2g \cdot |AC|$ компенсують один одного. $|OC|$ і $|AC|$ – плечі відповідних сил. Якщо фігуру гіроскопа привести у швидке обертання навколо осі aa' , то прецесії не буде. Якщо змістити тягарець m_2 вправо чи вліво від рівноважного положення на величину l , то зміниться плече сили m_2g – відрізок $|AC|$ і, відповідно, момент сили M_2 . Момент сили M_1 при переміщеннях тягарця залишається незмінним. Тоді моменти сил M_1 і M_2 не компенсують один одного і виникне прецесія.

Припустимо, що тягарець m_2 змістили вліво від точки C (рис. 8). Тоді $M_2 > M_1$ і в додатному напрямку осі bb' діятиме некомпенсований момент сил

$$M = M_2 - M_1 = m_2gl. \quad (3)$$

Нехай кутова швидкість фігури гіроскопа напрямлена вправо уздовж осі aa' . Згідно з (2), у той самий бік буде напрямлений і момент

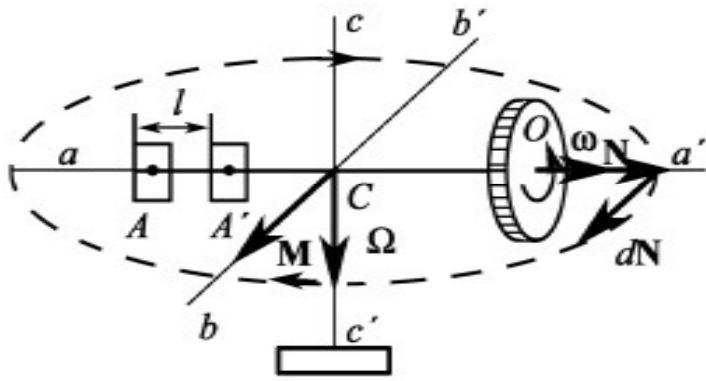


Рис. 8

імпульсу гіроскопа N . З (1) випливає, що $dN \uparrow \uparrow M$. Якщо момент M діє постійно, то вісь фігури гіроскопа буде обертатися навколо осі cc' . Це і буде прецесія. Кутова швидкість прецесії Ω у даному випадку буде напрямлена вниз уздовж осі cc' .

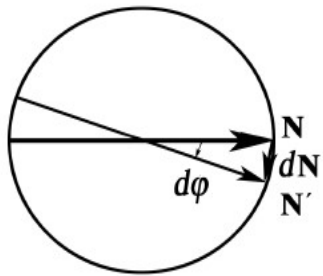


Рис. 9

Кінець вектора N опише в горизонтальній площині коло радіусом N . З рис. 9 видно, що

$$dN = Nd\varphi = I\omega \cdot d\varphi. \quad (4)$$

З рівняння (1)

$$dN = Mdt. \quad (5)$$

Прирівнявши праві частини рівностей (4) і (5), одержимо

$$\frac{d\varphi}{dt} \equiv \Omega = \frac{M}{I\omega}. \quad (6)$$

Ураховуючи (3), матимемо:

$$\Omega = \frac{m_2 gl}{I\omega}, \quad (7)$$

і для моменту інерції гіроскопа отримаємо вираз

$$I = \frac{m_2 gl}{\Omega\omega}. \quad (8)$$

Величину кутової швидкості прецесії можна знайти через кут повороту осі гіроскопа φ і час τ , протягом якого здійснюється цей поворот за співвідношенням

$$\Omega = \frac{\varphi}{\tau}.$$

Ураховавши, що $\omega = 2\pi\nu$, для моменту інерції гіроскопа остаточно отримаємо:

$$I = \frac{m_2 gl\tau}{2\pi\nu\varphi}. \quad (9)$$

Якщо $\nu = const$, то:

$$\frac{m_2 gl_1 \tau_1}{2\pi\nu\varphi} = \frac{m_2 gl_2 \tau_2}{2\pi\nu\varphi} = \frac{m_2 gl_3 \tau_3}{2\pi\nu\varphi}. \quad (10)$$

Хід роботи

1. Урівноважити гіроскоп за допомогою вантажу m_2 ($m_2=375$ г) так, щоб він мав горизонтальне положення. Позначити рівноважне положення вантажу.
2. Увімкнути електропривід гіроскопа і переконатись, що він не зазнає прецесії. Зчитати частоту обертання гіроскопа ν .
3. Змістити тягарець на відстань l від рівноважного положення в той чи інший бік і спостерігати явище прецесії гіроскопа.
4. Зчитати з табло кут повороту φ та час повороту τ . Вимірювання часу τ для заданого кута повороту провести не менше трьох разів і обчислити похибки прямих вимірювань.
5. За формулою (9) визначити момент інерції гіроскопа.
6. Пункти 3-5 виконати не менше трьох разів для різних значень l і перевірити правильність формули (10).
7. Похибки опосередкованих вимірювань моменту інерції I обчислити для одного зі значень l .

Контрольні запитання і завдання

1. Хід виконання роботи. Робочі формули. Похибки експерименту.
2. Що таке вільний гіроскоп? Що таке прецесія гіроскопа? Як знаходяться напрямки моменту сили, моменту імпульсу, кутової швидкості маховика та кутової швидкості прецесії гіроскопа? Де застосовуються гіроскопи?
3. Пояснити природу гіроскопічних сил.

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.170-176]; [4, с.457-466]; [2, с.287-314]; [3, с.239-247].
3. [1, с.179]; [3, с.247-249, с.254-256].

Лабораторні роботи з молекулярної фізики

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Визначення коефіцієнта поверхневого натягу методом горизонтального капіляра

Прилади і матеріали. Капіляр, U-подібний водяний манометр, вимірювальний мікроскоп, фільтрувальний папір, досліджувана рідина, сполучені посудини.

Теоретичні відомості та опис приладів. Капіляром називається посудина таких розмірів, що вплив її стінок поширюється на всю поверхню рідини. Залежно від того, змочує чи не змочує рідина стінки капіляра, її рівень у капілярі буде вищим чи нижчим від рівня рідини в посудині. Це пояснюється тим, що в капілярі поверхня рідини не плоска, а викривлена. Викривлення поверхні рідини призводить до виникнення додаткового тиску ΔP , який напрямлений до центра кривизни поверхні рідини (меніска) в капілярі і залежить від радіуса меніска та від коефіцієнта поверхневого натягу

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{r}, \quad (1)$$

де r – радіус меніска. Піднімання або опускання рідини в капілярі відбувається доти, доки додатковий тиск не буде зрівноважений гідростатичним тиском стовпчика рідини

$$\Delta P = \rho gh, \quad (2)$$

де ρ – густина рідини; h – висота її підняття чи опускання. Із (1) і (2) одержуємо

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho g r h. \quad (3)$$

Якщо в горизонтально розміщений капіляр ввести краплю досліджуваної рідини, то на торцях стовпчика рідини обидві поверхні будуть увігнуті. Підвищивши тиск з одного боку, можна підвести стовпчик до кінця капіляра і тим самим зробити поверхню одного меніска плоскою. Різницю тисків з обох боків стовпчика рідини визначають U-подібним манометром. Тоді коефіцієнт поверхневого натягу

$$\sigma = \frac{1}{4} \rho g d h, \quad (4)$$

де d – діаметр капіляра; g – прискорення вільного падіння; h – різниця висот рівнів рідини в колінах манометра; ρ – густина рідини у манометрі.

Зміна тиску здійснюється шляхом піднімання або опускання

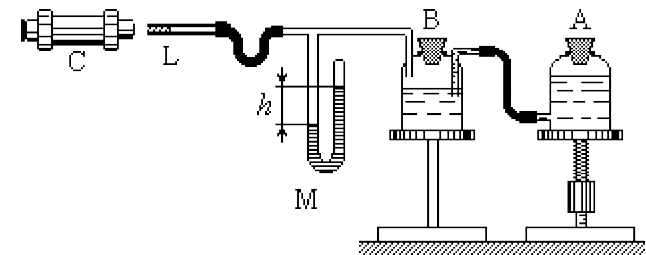


Рис. 10

посудини А з водою (рис. 10), яка з'єднана з іншою посудиною В, що також наповнена водою. Верхня частина посудини В з'єднана з капіляром L та манометром М. Для визначення h , при якій меніск у капілярі стає плоским, за допомогою мікроскопа С спостерігають за кінцем капіляра L. У цьому випадку меніск стає рівномірно освітленим. Вимірювання зводяться до відліку різниці рівнів рідини в манометрі М, коли переміщенням посудини А домагаються рівномірного освітлення меніска в капілярі.

Хід роботи

1. За допомогою мікроскопа виміряти діаметр капіляра. (При довжині тубуса 130 ціна поділки шкали мікроскопа становить **0,041 мм**).
2. Обчислити похибки прямих вимірювань.
3. Посудину А розмістити трохи вище від крайнього нижнього положення.
4. Змочити паличку досліджуваною рідиною і ввести краплю в капіляр. Опускаючи посудину А в крайнє нижнє положення, відвести



краплю від краю капіляра.

5. Добре висушити торець капіляра фільтрувальним папером. (Поверхню води в мікроскоп не видно, оскільки різкість наведена на край капіляра).



6. Поступово піднімати посудину А. Крапля переміститься на край капіляра. У мікроскопі побачимо дзеркальну поверхню води, на якій видно спотворене зображення джерела світла.

Посудину А піднімати доти, доки зображення не зникне. Це означає,



що меніск став плоским.

7. Виміряти різницю рівнів рідини у манометрі h . Вимірювання виконати не менше тьох разів і обчислити похибки.
8. За формулою (4) обчислити σ .
9. Обчислити похибки непрямих вимірювань, вважаючи σ функцією двох аргументів $\sigma = \sigma(d, h)$.

Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Поясніть явища змочування та незмочування. Що таке крайовий кут?
3. Дайте визначення капіляра. Що є причиною піднімання чи опускання рідини в капілярах?
4. Що таке поверхнева енергія рідини? У чому полягає фізичний зміст коефіцієнта поверхневого натягу?
5. Виведіть формулу для додаткового тиску Лапласа.

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [2, с.329-333], [3, с.423-426], [5, с.418-420].
3. [2, с.336-339], [3, с.428], [5, с.428-430].
4. [1, с.262], [2, с.321-326], [5, с.408-410].
5. [4, с.238-240], [5, с.426-428], [8, с.313-318].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Визначення сталої Больцмана

Прилади і матеріали. Скляний балон місткістю **11,4 л**, медичний шприц $1 - 2 \text{ см}^3$, термометр, U-подібний водяний манометр, ефір.

Теоретичні відомості та опис приладів. Виходячи з молекулярно-кінетичного тлумачення поняття температури, її необхідно вимірювати в одиницях енергії. Проте це дуже незручно на практиці, оскільки необхідно оперувати досить малими числами:

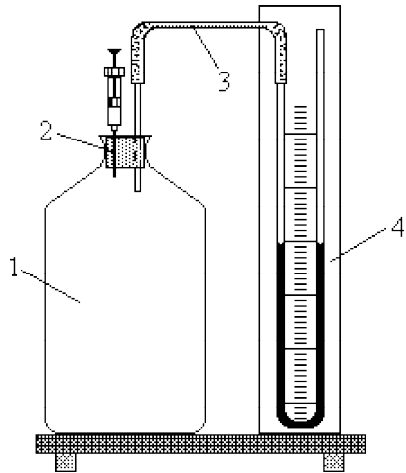


Рис. 11

температурі в 1 K відповідає енергія $1,38 \cdot 10^{-23}\text{ Дж}$. Множник k , який виражає співвідношення між одиницями енергії (джоулем) та температури (кельвіном), називають сталою Больцмана.

Прилад для визначення сталої Больцмана складається з товстостінного балона 1, що з'єднується через вивідну гумову трубку 3 з рідинним манометром 4 (рис. 11). У корку балона закріплено медичну голку 2 для введення через неї шприцом рідини, що легко випаровується (ефір). Після введення ефіру в балон та його

випаровування в балоні створиться надлишковий тиск, що відповідає парціальному тиску газоподібного ефіру. Величину цього тиску ΔP вимірюють манометром.

В основу визначення сталої Больцмана покладено рівняння стану

ідеального газу $\Delta P = \frac{\Delta m}{\mu} \frac{RT}{V}$, з якого можна отримати:

$$\Delta P = \frac{\Delta m}{\mu} \frac{RT}{V} = \frac{\Delta m}{\mu} \frac{kN_A T}{V} = kN_0 T, \quad (1)$$

де $\frac{\Delta m}{\mu}$ – кількість молів уведеного в балон ефіру, V – заданий робочий об'єм балона, T – температура газової суміші в балоні, N_A

– стала Авогадро, $N_0 = \frac{\Delta m N_A}{\mu V}$ – кількість молекул ефіру в одиниці об'єму балона (для ефіру $\mu = 76\text{ г/моль}$). Парціальний тиск пари ефіру в балоні зрівноважується різницею рівнів рідини Δh у манометрі

$$\Delta P = \rho g \Delta h, \quad (2)$$

де ρ – густина манометричної рідини (задається наперед при

відповідній температурі досліду).

З іншого боку, $\Delta m = \rho_e V_e$, де $\rho_e = 714\text{ кг/м}^3$ – густина ефіру, V_e – об'єм уведеного в балон ефіру. Отже, для N_0 маємо

$$N_0 = \frac{\rho_e V_e N_A}{\mu V}. \quad (3)$$

Підставивши (2) і (3) в (1), дістаємо:

$$k = \frac{\Delta P}{N_0 T} = \frac{\rho g \mu V}{\rho_e V_e N_A T} \Delta h = B \frac{\Delta h}{V_e T}, \quad (4)$$

де $B = \frac{\rho g \mu V}{\rho_e N_A}$ – сталий в умовах досліду коефіцієнт.

Хід роботи

1. Наповнити медичний шприц із голкою ефіром до об'єму V_e . Зняти зі шприца голку і вставити його у голку 2 балона. При цьому рівні рідини у колінах манометра повинні бути однаковими.
2. Натискаючи на поршень шприца, ввести в балон ефір і для збереження герметизації залишити шприц у голці 2.
3. Після випаровування ефіру зафіксувати стабільну різницю рівнів рідини у колінах манометра Δh при відповідній температурі.
4. За формулою (4) обчислити k та порівняти отримане значення з табличним.
5. Обчислити похибки.

Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Виведіть основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газу.
3. Запишіть закони в яких фігурує стала Больцмана.
4. Який фізичний зміст універсальної газової сталої?
5. Чому температура є енергетичним параметром стану газу?
6. Що таке внутрішня енергія ідеального газу? Як вона залежить від параметрів стану?

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.87], [2, с.19-24], [4, с.27-29].

4. [2, с.105].
 5. [1, с.95-102], [2, с.24-32], [3, с.14-18].
 6. [1, с.121-122], [2, с.95], [3, с.54-58], [5, с.104-110].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Вимірювання вологості повітря психрометричним методом і визначення сталої психрометра

Прилади і матеріали. Аспіраційний психрометр, дистильована вода, барометр.

Теоретичні відомості та опис приладів. Вологість повітря зумовлена наявністю в ньому водяної пари, маса якої може змінюватись як за абсолютною величиною, так і за станом насичення, що характеризується відповідно абсолютною й відносною вологістю.

Абсолютна вологість повітря m кількісно дорівнює масі водяної пари в грамах, що міститься в 1 м^3 повітря при даній температурі, тобто її густині. Коли температури невисокі і пара далека від стану насичення (у цьому разі до пари можна застосувати рівняння Клапейрона – Менделєєва), парціальний тиск водяної пари в повітрі пропорційний її густині. Тому абсолютну вологість визначають також через величину парціального тиску водяної пари і виражають її в одиницях тиску.

Під **відносною вологістю** φ розуміють відношення абсолютної вологості до максимальної. **Максимальна вологість** – це маса або парціальний тиск водяної пари, яка насичує повітря при даній температурі. Це відношення виражають у відсотках.

$$\varphi = \frac{P_C}{P_H}. \quad (1)$$

Метод психрометра – найбільш поширений метод вимірювання вологості. Суть його полягає в тому, що коли взяти два однакових нормальних термометри, кулька одного з яких неперервно змочується водою через батист, занурений у посудину з водою, то покази обох термометрів (“сухого” і “мокрого”) будуть різні.

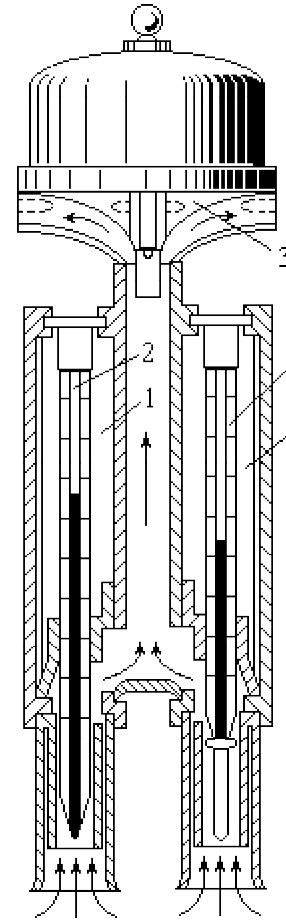


Рис. 12

Внаслідок випаровування води з батисту “мокрый” термометр показуватиме нижчу температуру, ніж “сухий”. Чим менша вологість повітря, тим інтенсивніше іде випаровування води з батисту і тим менші покази “мокрого” термометра. Значення показів “сухого” t_C і “мокрого” t_M термометрів дають можливість визначити вологість повітря.

Психрометричну формулу можна вивести з рівняння теплового балансу для кульки “мокрого” термометра. Кількість теплоти Q_1 , передана від повітря у стаціонарному стані (покази “мокрого” термометра уже встановились) і при відсутності тепловитрат, дорівнює кількості теплоти Q_2 , яка потрібна для випаровування води з поверхні батисту площею S , тобто:

$$\alpha(t_C - t_M)S = g_m \lambda S, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт теплообміну; λ – питома теплота випаровування; $g_m = \frac{dm}{d\tau}$ – швидкість випаровування з одиниці поверхні. Рівняння (2) віднесено до одиниці часу. З (2) матимемо

$$t_M = t_C - \frac{g_m \lambda}{\alpha}.$$

Швидкість випаровування можна визначити за законом Дальтона. Для випаровування води з вільної поверхні

$$g_m = \alpha_m \Delta P \frac{760}{H}, \quad (3)$$

де α_m – коефіцієнт випаровування; H – атмосферний тиск;

ΔP – різниця парціальних тисків водяної пари біля поверхні води та у навколишньому повітрі. Для заданого випадку $\Delta P = P_M - P_C$, де P_M – тиск насиченої водяної пари при температурі t_M ; P_C – тиск пари у навколишньому повітрі при температурі t_C . З (2) і (3) маємо рівняння психрометра

$$P_C = P_M - AH(t_C - t_M), \quad (4)$$

де $A = \frac{\alpha}{\alpha_m 760 \lambda}$ – стала психрометра. З (4) можна отримати

$$A = \frac{P_C - P_M}{(t_M - t_C)H}. \quad (5)$$

Величина A сильно залежить від швидкості руху повітря в області малих значень швидкості, а при великих швидкостях змінюється мало. Тому використовують психрометр із примусовим рухом повітря (рис. 12). Це так званий аспіраційний психрометр. Кулька правого термометра обгорнута батистом. Лівий термометр – сухий. По двох трубках 1, в які вміщено термометри 2, повітря зі швидкістю 3 – 5 м/с продувається вентилятором 3. Батист змочують дистильованою водою. За показами термометрів визначають температури t_C і t_M , коли вони встановляться при роботі вентилятора на повну потужність. Знаючи t_C і t_M і користуючись таблицями, визначають φ та m .

Хід роботи

1. Змочити батист “мокрого” термометра, звернувши увагу на те, щоб вода не потрапила на сухий термометр і на внутрішню поверхню трубки.
2. Увімкнути вентилятор і стежити за показами термометрів. Коли покази встановляться (через 5 – 6 хв), записати значення t_C і t_M .
3. За різницею $t_C - t_M$ і за температурою “сухого” термометра з таблиці 8 визначити відносну вологість φ .
4. З таблиці 6 визначити парціальний тиск насиченої пари P_H при температурі “сухого” термометра.
5. Користуючись формулою (1), визначити абсолютну вологість P_C .
6. За таблицею 6 визначити парціальний тиск насиченої пари при

температурі “мокрого” термометра P_M ; з допомогою барометра визначити атмосферний тиск H і за формулою (5) обчислити сталу психрометра.

7. Перевірити отримане значення A . Для цього підставити його у формулу (4) і знайти абсолютну вологість P_C . Порівняти це значення з отриманим із формули (1).

Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Поясніть явища випаровування та конденсації.
3. Яку пару називають насиченою? Що таке перенасичена пара? Де вона використовується?
4. Поясніть явище кипіння рідини. Що таке перегріта рідина? Де вона використовується?
5. Яка розмірність сталої психрометра?
6. Які існують методи вимірювання вологості?
7. Дайте визначення абсолютної та відносної вологості. В яких одиницях вони вимірюються?

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.271-278], [2, с.344-347], [5, с.442-462].
3. [1, с.271, 278], [3, с.472-474].
4. [1, с.271-278], [2, с.344-347, 356-361], [3, с.465-467, 472-476].
- 5, 6. [9, с.278-284], [10, с.220-224].
7. Інструкція до лабораторної роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Визначення критичної температури

Прилади і матеріали. Прилад Авенаріуса, електрична піч, термометр.

Теоретичні відомості та опис приладів. Аналізуючи ізотерми реального газу (рис. 13), можна зробити висновок, що з підвищенням температури довжини горизонтальних ділянок ізотерм

– ізобар, які відповідають станам рівноваги між рідиною та її насиченою парою, зменшуються. При певній температурі $T_{кр}$ і тиску $P_{кр}$ ці ділянки вироджуються в точку К, яку називають *критичною*. Ця точка відповідає стану речовини в якому зникає різниця між рідиною та її насиченою парою. Такий стан називається *критичним станом*, а температура, що йому відповідає – *критичною температурою*. Відповідно тиск і питомий об'єм речовини у критичному стані називаються *критичним тиском* і *критичним об'ємом*.

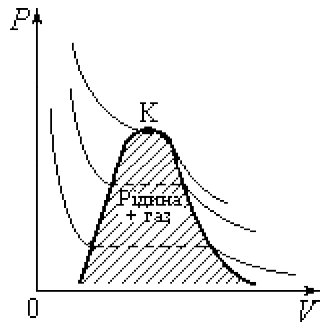


Рис. 13

Зобразимо рівновагу рідини і пари на діаграмі TV (рис. 14). Станам одночасного рівноважного співіснування рідини і газу відповідає заштрихована ділянка, а ділянки I і II відповідають рідкому та газоподібному станам відповідно. Перевести рідину з двофазного стану “а” в однорідний можна не змінюючи її маси в герметичній ампулі. Для цього досить повільно підвищувати температуру в ампулі доти, доки поверхня поділу рідини і пари (меніск), повільно піднімаючись, не досягне верхньої межі ампули. Тоді стан речовини в ампулі буде однорідним – кипляча рідина з питомим об'ємом V_1 і температурою T_1 (стан 1).

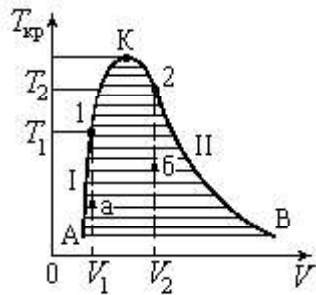


Рис. 14

Якщо при певній температурі кількість рідини і пари в ампулі відповідає стану “б”, то при нагріванні меніск зміститься вниз і при дотику до дна ампули речовина стає однорідною – насиченою парою з питомим об'ємом V_2 і температурою T_2 (стан 2).

Спостерігаючи переходи рідини в пару і пари в рідину в прозорій ампулі, можна визначити межі заштрихованої ділянки (рис. 14). Точка максимуму кривої АКВ є критичною точкою

речовини (точка К). В околі критичної точки – дуже розвинуті флуктуації густини (у різних точках об'єму густина речовини різна). Внаслідок цього речовина має каламутне білувато-сіре забарвлення через значне розсіювання світла в неоднорідному середовищі (критична опалесценція – назва від подібності розсіювання світла мінералом опалом).

З усіх величин, що характеризують критичну точку, найпростіше визначається критична температура. Для практичних потреб досить знати її з точністю $\pm(0,1 \div 0,2)K$. При цьому досить підтримувати речовину у квазірівноважних умовах, що дає змогу спостерігати зникнення (появу) меніска в запаяній скляній ампулі. Цей метод, запропонований М. П. Авенаріусом, найбільш простий та надійний.

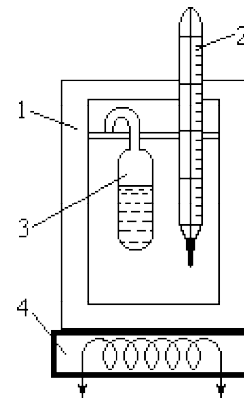


Рис. 15

Прилад Авенаріуса (рис. 15) являє собою металеву коробку 1 з двома отворами, через які здійснюється спостереження. У цю коробку також поміщено термометр 2. Якщо з допомогою плитки 4 нагрівати ампулу 3 з ефіром, то з підвищенням температури кривизна меніска зменшуватиметься і при критичній температурі він взагалі зникає. При цьому речовина в ампулі стає білувато-сірою. Спостерігати зникнення меніска в ампулі не вдається, якщо ефіру або мало, або багато. У першому випадку меніск, опускаючись, зникне раніше, ніж буде досягнута критична температура, оскільки весь ефір встигає випаруватись (стан 2, рис. 14). У другому випадку ефір, розширюючись, заповнить ампулу раніше, ніж буде досягнута критична температура (стан 1, рис. 14).

Хід роботи

1. Помістити прилад Авенаріуса на електроплитку та увімкнути її в мережу.
2. Спостерігаючи через скляне віконце за рідиною в ампулі, зафіксувати за термометром температуру зникнення меніска і появи критичної опалесценції.
3. Нагріти ампулу на 5 – 6 °С вище зафіксованої температури і вимкнути електроплитку.

4. Зафіксувати температуру появи меніска.
5. Дослід провести 3 – 5 разів. За критичну температуру взяти середнє арифметичне температур моментів зникнення та появи меніска. Обчислити похибки прямих вимірювань.
6. Знаючи критичний тиск ефіру $P_{кр} = 35 \text{ атм}$, за формулою

$$V_{кр} = \frac{3RT_{кр}}{8P_{кр}}$$

обчислити критичний об'єм ефіру ($R = 0,082 \frac{\text{л} \cdot \text{атм}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$).

7. За цими даними і критичною температурою знайти постійні Ван-дер-Ваальса для ефіру:

$$b = \frac{V_{кр}}{3}; \quad a = 27b^2 P_{кр}.$$

8. Перевірити рівняння Ван-дер-Ваальса для критичного стану

$$\left(P_{кр} + \frac{a}{V_{кр}^2} \right) (V_{кр} - b) = RT_{кр}.$$

Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Що таке критичний стан речовини, критична температура?
3. Запишіть та поясніть рівняння Ван-дер-Ваальса. Який фізичний зміст поправок a і b у цьому рівнянні?
4. Як пов'язані критичні параметри речовини зі сталими Ван-дер-Ваальса? Що таке метастабільні стани?
5. Поясніть ізотерми Ван-дер-Ваальса.
6. Виведіть зведене рівняння Ван-дер-Ваальса. Сформулюйте закон відповідних станів.
7. Що таке критична опалесценція?

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.228], [2, с.229], [3, с.383-384],[4, с.207-210].
3. [1,с.237-240,246-248],[2,с.221-225],[3,с.374-378],[4,с.203-204].

4. [1, с.243-244], [2, с.229], [3, с.384].
5. [1, с.240-243], [2, с.225-229], [3, с.383, 389].
6. [1, с.244], [2, с.236], [3, с.385].
7. [1, с.232], [4, с.210], [5, с.495-497].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

Визначення відношення теплоємностей газу

C_p/C_v методом Клемана–Дезорма

Прилади і матеріали. Прилад для визначення відношення $\gamma = C_p/C_v$ методом адіабатного розширення, ручний нагнітальний насос.

Теоретичні відомості та опис приладів. Відношення питомих або молярних теплоємностей газу $\gamma = C_p/C_v$ відіграє важливу роль при описі адіабатних процесів. Метод Клемана – Дезорма ґрунтується на адіабатному розширенні газів (у даному випадку повітря).

Основою приладу (рис. 16) є великий скляний товсто-стінний балон А, сполучений гумовими трубками з U-подібним манометром В і через кран K_2 з насосом С. Кран K_1 сполучає балон із навколишнім повітрям.

У балон А, який наповнений повітрям при атмосферному тиску P_0 , нагнітаємо повітря до деякого нового тиску. Тоді маса повітря в

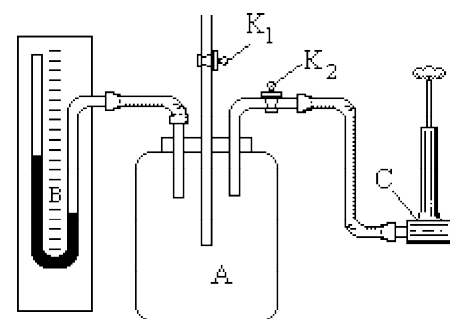


Рис. 16

балоні, що займала певний об'єм, стиснеться до тиску P_1 і займатиме об'єм V_1 . Одночасно при цьому стиснена маса повітря нагріється. Припинивши накачування, зачекаємо кілька хвилин, поки температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною T_1 (перший стан повітря). Остаточну різницю рівнів рідини, що встановилась у

манометрі, позначимо h_1 . Тоді $P_1 = P_0 + \rho g h_1$ (ρ – густина манометричної рідини).

Відкриваємо на короткий час кран K_1 . При цьому чути характерне шипіння, яке супроводжує витікання повітря через отвір у крані. Як тільки воно припиниться, швидко закриваємо кран K_1 . Тиск у балоні зрівнявся з атмосферним ($P_2 = P_0$).

Повітря в балоні швидко розширюється до об'єму V_2 (при цьому, зважаючи на короткий час розширення, помітного теплообміну між стінками балона й навколишнім повітрям не відбувається). Температура повітря в балоні зменшується до T_2 (другий стан повітря). Чекаємо, поки температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною T_1 . Об'єм V_2 залишається незмінним, тиск при нагріванні повітря збільшиться до P_3 . Різниця рівнів рідини в манометрі при цьому буде h_2 , тоді $P_3 = P_0 + \rho g h_2$ (третій стан повітря).

Перехід повітря з першого стану до другого – адіабатний. Отже, за рівнянням Пуассона

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma. \quad (1)$$

Температура повітря у першому та третьому станах однакова, тому за законом Бойля – Маріотта маємо

$$P_1 V_1 = P_3 V_2. \quad (2)$$

Прологарифмувавши (1) і (2) та розв'язавши їх відносно γ , маємо

$$\gamma = \frac{\lg P_1 - \lg P_2}{\lg P_1 - \lg P_3}. \quad (3)$$

Розкладемо $\lg P_1$ і $\lg P_3$ в ряд Тейлора і обмежимося двома першими членами розкладу. Тоді одержимо

$$\lg P_1 = \lg(P_0 + \rho g h_1) = \lg P_0 + \frac{\rho g h_1}{P_0} + \dots,$$

$$\lg P_3 = \lg(P_0 + \rho g h_2) = \lg P_0 + \frac{\rho g h_2}{P_0} + \dots$$

Підставивши ці результати в (3) і врахувавши, що $P_2 = P_0$, остаточно отримаємо:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (4)$$

Усі розглянуті процеси в балоні віднесені до сталої маси повітря, яке було в балоні до початку дослідів.

Хід роботи

1. Відкривши кран K_2 (кран K_1 закритий), насосом накачати в балон повітря, щоб у манометрі була значна різниця рівнів рідини. Зафіксувати різницю рівнів h_1 , що остаточно встановилася в манометрі після охолодження нагрітого при стискуванні повітря до температури навколишнього середовища.
2. Відкрити кран K_1 і закрити його в той момент, коли припиниться характерне шипіння (тиск у посудині дорівнюватиме атмосферному). Через 2 – 3 хв зафіксувати різницю рівнів h_2 .
3. За формулою (4) обчислити γ для повітря й порівняти з теоретично знайденим, вважаючи повітря двоатомним газом.
4. Дослід повторити не менше 10 разів при різних показках манометра. Отримані результати занести в таблицю, обчислити середнє значення γ і похибки вимірювань.

Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Дайте визначення теплоємності ідеального газу. Виведіть рівняння Майєра. Чому $C_p > C_v$?
3. Дайте визначення адіабатного процесу. Як його здійснити? Виведіть рівняння Пуассона.
4. Дайте визначення ідеального газу. Сформулюйте газові закони. Наведіть відповідні графіки.
5. Чому дорівнюють теплоємності ідеального газу при ізотермічному та адіабатному процесам?
6. У координатах PV накресліть діаграми термодинамічних процесів, які відбуваються під час експерименту.

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.

2. [1, с.132-140], [2, с.103-114], [3, с.67-76].
3. [1, с.142], [2, с.118-121], [3, с.75], [4, с.102-105].
4. [2, с.18, 35-39], [3, с.35-37], [5, с.42], [4, с.29-32].
6. [3, с.78].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

Визначення відношення питомих теплоємностей газу C_p/C_v за швидкістю поширення звуку в газі

Прилади і матеріали. Звуковий генератор ГЗ-18, телефон, електронний осцилограф, підсилювач низької частоти.

Теоретичні відомості та опис приладів. При поширенні звукової хвилі в газоподібному середовищі стискання й розрідження окремих його частин змінюють одне одного настільки швидко, що теплообмін між ними не встигає відбуватися. Такі процеси є адіабатними й описуються рівнянням Пуассона

$$PV^\gamma = \text{const}, \quad (\gamma = C_p/C_v). \quad (1)$$

Швидкість поширення звукової хвилі у газах залежить від показника адіабати γ . Ця залежність визначається за формулою

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}},$$

з якої

$$\gamma = \frac{v^2 \mu}{RT}, \quad (2)$$

де $\mu=29$ г/моль – молярна маса повітря; T – абсолютна температура; R – універсальна газова стала.

Швидкість поширення звуку в повітрі можна також визначити за його частотою ν та довжиною хвилі λ

$$v = \lambda \nu. \quad (3)$$

Для визначення λ використовується метод стоячої хвилі. Якщо взяти заповнену повітрям трубу діаметром $d < \lambda/2$, закрити з одного кінця і в якій поширюється звукова хвиля, то при накладанні падаючої та відбитої від закритого кінця труби хвиль утвориться стояча хвиля з таким розподілом зміщень:

$$\xi = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t, \quad (4)$$

де A – амплітуда падаючої хвилі; x – координата точки середовища, до якої за час t дійшли коливання. Амплітуда стоячої хвилі

визначається виразом $2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$, який доводить, що вона залежить

від координати x точок середовища. Точки середовища, в яких амплітуда коливань часток найбільша, називають пучностями.

Положення пучностей, як видно з (4), визначається умовою

$$\frac{2\pi x_n}{\lambda} = \pm \pi n, \quad n \in Z,$$

або в іншому вигляді

$$x_n = \pm n \frac{\lambda}{2}. \quad (5)$$

Із (5) випливає, що відстань між двома сусідніми пучностями дорівнює половині довжини хвилі

$$L = x_{n+1} - x_n = \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Отже,

$$\lambda = 2L. \quad (7)$$

Підставляючи (7) у (3), одержуємо

$$v = 2L\nu. \quad (8)$$

Робоча формула для знаходження γ набуває вигляду

$$\gamma = \frac{4L^2 v^2 \mu}{RT} . \quad (9)$$

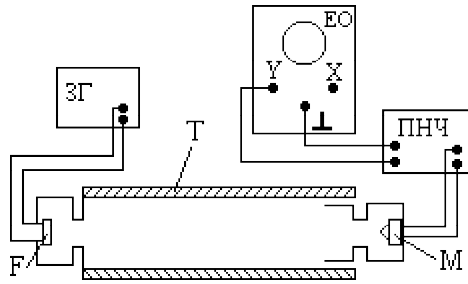


Рис. 17

Установка (рис. 17) складається з кварцової труби Т, джерелом звуку в якій є телефон Ф, що живиться від звукового генератора ЗГ. Звукові коливання сприймаються мікрофоном М, перетворюються в електромагнітний сигнал і після підсилення підсилювачем низької частоти (ПНЧ) подаються на

блок вертикально відхилаючих пластин осцилографа ЕО. При вимкненому блоці розгортки на екрані осцилографа спостерігається вертикальна лінія.

Хід роботи

1. Увімкнути ЗГ, осцилограф та ПНЧ і дати їм можливість прогрітися протягом 2 – 3 хв.
2. При частоті 2,5 кГц домогтися чіткого зображення на екрані осцилографа вертикальної лінії (при вимкненому блоці розгортки осцилографа).
3. Пересуваючи мікрофон уздовж осі труби, знайти таке його положення, при якому лінія на екрані осцилографа матиме максимальну довжину. Це означає, що положення мікрофона відповідає пучності зміщення.
4. Продовжуючи пересувати мікрофон уздовж труби, знайти положення сусідньої пучності. Відстань між цими пучностями L дорівнює половині довжини хвилі. Знайти положення не менше чотирьох пучностей.
5. Обчислити похибки прямих вимірювань L .
6. За формулою (9) обчислити γ . Температуру T визначити за допомогою лабораторного термометра.

7. Обчислити похибки непрямих вимірювань.
8. Змінити частоту звукової хвилі. Виконати пп. 3, 4, 6. Показати, що γ не залежить від частоти хвилі, що поширюється.

Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Дайте визначення теплоємності ідеального газу. Виведіть рівняння Майєра. Чому $C_p > C_v$? Чому дорівнюють теплоємності ідеального газу при ізотермічному та адіабатному процесах?
3. Дайте визначення адіабатного процесу. Як його здійснити? Виведіть рівняння Пуассона.
4. Дайте визначення ідеального газу. Сформулюйте газові закони. Наведіть відповідні графіки.

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.132-140], [2, с.103-114], [3, с.67-76].
3. [1, с.142], [2, с.118-121], [3, с.75], [4, с.102-105].
4. [2, с.18, 35-39], [3, с.35-37], [4, с.29-32], [5, с.42].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16

Визначення швидкості випаровування рідини

Прилади і матеріали. Торсійні терези, секундомір, штангенциркуль, термометр, циліндрична посудина з етиловим спиртом, піпетка, різноважки.

Теоретичні відомості та опис приладів. Випаровуванням називається перехід речовини з рідкого стану в газоподібний із вільної поверхні рідини. Покидаючи з поверхню рідини, молекули повинні перебороти сили молекулярного притягання і виконати роботу проти зовнішнього тиску. Це здатні зробити лише ті молекули, які мають достатню кінетичну енергію. Тому перехід молекул у пару супроводжується охолодженням рідини. Щоб випаровування

відбувалося без зміни температури, до рідини треба підводити тепло. Кількість теплоти, яка необхідна для ізотермічного випаровування одиниці маси речовини, називається питомою теплою пароутворення. Для етилового спирту вона становить $r=855 \cdot 10^3$ Дж/кг.

Процес випаровування можна характеризувати швидкістю випаровування. Вона чисельно дорівнює масі рідини, що випарувалася з одиниці площі вільної поверхні за одиницю часу:

$$U = \frac{4m}{\pi D^2 t}, \quad (1)$$

де m – маса рідини, яка перейшла у пару за час t , D – діаметр циліндричної посудини з досліджуваною рідиною.

Перехід речовини з однієї фази в іншу (плавлення, кристалізація, випаровування, конденсація) називається фазовим переходом. Фазові переходи бувають першого і другого роду. При фазових переходах першого роду термодинамічні функції, такі як вільна енергія, внутрішня енергія, ентальпія, ентропія, змінюються стрибкоподібно. Для фазових переходів I роду (у даному випадку випаровування) зміну ентропії можна обчислити за формулою

$$\Delta S = \frac{rm}{T}, \quad (2)$$

де ΔS – зміна ентропії; T – абсолютна температура переходу; r – питома теплота випаровування; m – загальна маса рідини, що випарувалася.

Швидкість випаровування етилового спирту настільки значна, що з допомогою торсійних терезів можна прослідкувати за зменшенням маси рідини з часом і виміряти масу рідини, що випарувалася за час t .

Хід роботи

1. За допомогою штангенциркуля виміряти внутрішній діаметр посудини та обчислити похибки прямих вимірювань.
2. Легенько повернути ліву ручку терезів і переконатися, що шкала вільно рухається. Визначити ціну поділки шкали.
3. За допомогою піпетки помістити в посудину 2-3 краплі спирту.
4. Привести терези в робочий стан. Для цього потрібно перемикач, розміщений справа, поставити в положення “0”. (Якщо перемикач

знаходиться у положенні “Z” – терези вимкнені).

5. Повільно повертаючи ліву ручку, добитися, щоб чорна рухома стрілка розмістилася навпроти червоної риски. У цей момент увімкнути секундомір і зчитати покази M_1 на основній шкалі.
6. Повертаючи ліву ручку втримують рухома стрілку навпроти червоної риски. Вимірювання M_2 виконати в той момент, коли секундомір покаже 60 с.
7. Визначити масу спирту, що випарувалася за хвилину $m = M_1 - M_2$.
8. Вимірювання m виконати три рази і обчислити похибки прямих вимірювань.
9. За формулою (1) визначити швидкість випаровування.
10. Похибки непрямих вимірювань знайти для величини $U=U(m, D, t)$, узявши при цьому для часу t систематичну абсолютну похибку.
11. За допомогою лабораторного термометра визначити температуру T і обчислити зміну ентропії за формулою (2).
12. Обчислити кількість молекул, що випарувалися би при даній швидкості випаровування з 1 м^2 за 1 с

$$N = \frac{m}{\mu} N_A,$$

де μ – молярна маса спирту (C_2H_5OH); N_A – число Авогадро.

Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Вивести нерівність Клаузіуса. Дати визначення ентропії.
3. У чому полягає фізичний зміст ентропії? Дати пояснення того, що ентропія є мірою знецінення теплової енергії.
4. Вивести формули для зміни ентропії в різних процесах. Розглянути ізопроцеси в газах, адіабатний процес, політропний процес, нагрівання та охолодження речовини, фазові переходи I та II роду.
5. Що таке термодинамічна ймовірність макростану? Як вона пов'язана з ентропією? Запишіть формулу Больцмана. Чому ентропію можна характеризувати як міру неупорядкованості системи?
6. Поясніть статистичний характер II начала термодинаміки.

Сформулюйте третє начало термодинаміки.

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.173-175], [2, с.271-275], [3, с.119-121, 126-128], [4, с.127-130], [5, с.176-177].
3. [3, с.149-151], [4, с.127-129].
4. [3, с.128-129], [4, с.293], [5, с.177-179].
5. [2, с.290-297], [4, с.139-145], [5, с.183-191].
6. [1, с.177], [2, с.301], [3, с.316-318], [4, с.142-145], [8, с.291-298].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 18

Градування термопар

Прилади і матеріали. Хромель–алюмелева термопара, електрична піч, тиглі, олово, свинець, дистильована вода, парафін, мілівольтметр, міліметровий папір.

Теоретичні відомості та опис приладів. Теоретичні

відомості та опис приладів. Термоелектричний метод вимірювання температури базується на відкритому в 1821 р. Зеєбеком явищі термоелектрики (ефект Зеєбека). Якщо два провідники, виготовлені з різних металів, з'єднати так, щоб утворився замкнений контур, а місця спайки помістити у середовища з різними температурами T_1 і T_2 , то в контурі виникне електричний струм. Два провідники, які є термоелектродами, утворюють термопару. Один зі спайв, поміщений у середовище з вимірюваною

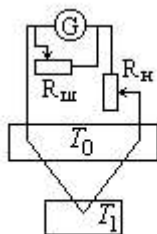


Рис. 18

температурою, називається робочим (гарячим) кінцем термопар, другий, який перебуває при постійній відомій температурі, називається вільним (холодним). Як правило, вимірюється не значення струму, а різниця потенціалів, тобто термоелектрорушійна сила \mathcal{E} (термоерс) між розімкненими холодними кінцями провідників, або у розриві між частинами одного з термоелектродів.

Термопара, складена з однієї пари провідників, називається простою і *служить для вимірювання різниці температур* між гарячим і холодним спаями. Схема під'єднання простої термопар до вимірювального пристрою зображена на рис. 18.

Експериментальне знаходження залежності термоерс, що виникає в термопарі, від різниці температур на її кінцях, називається градуванням термопар. Градування термопар здійснюють шляхом порівняння її показів з еталонними термопарами або за реперними точками. Як *реперні точки* використовують *температури* плавлення або кипіння чистих речовин, які є постійними при заданих умовах (зазвичай, нормальних). У даній роботі як реперні точки використовують температури кипіння води ($100\text{ }^\circ\text{C}$), плавлення олова ($231,9\text{ }^\circ\text{C}$) та свинцю ($327,3\text{ }^\circ\text{C}$). Для градування термопар треба знати, яка термоерс відповідає заданим реперним точкам. В її визначенні й полягає мета даної роботи.

Хід роботи

1. Помістити в електричну піч тиглі з дистильованою водою, оловом і свинцем та увімкнути піч в електричну мережу.
2. Коли вода закипить, занурити в неї робочий спай термопар і з допомогою мілівольтметра виміряти термоерс, що виникає у термопарі – \mathcal{E}_{H_2O} .
3. Спеціальним пінцетом **обережно** вийняти тигель з оловом із печі. Помістити гарячий спай термопар в тигель і переконатися, що мілівольтметр показує не менше 10 mV . Це означає, що олово нагрілося вище температури плавлення.
4. Зняти кінетику охолодження. Для цього через кожні 10 с записувати покази мілівольтметра, поки вони не стануть такими, що дорівнюють 5 mV .
5. За отриманими даними побудувати криву охолодження (залежність термоерс від часу).
6. Виконати пп. 3 – 5 для свинцю в межах від 15 до 9 mV . За положенням горизонтальних ділянок на кривих охолодження олова та свинцю визначити значення термоерс, що відповідають різниці між температурами кристалізації (плавлення) цих металів та

кімнатною температурою ($t_{nl} - t_k$).

7. Знаючи температури кристалізації олова, свинцю, температуру кипіння води та термоерс, що їм відповідають, побудувати графік залежності термоерс від різниці температур ($\varepsilon=f(\Delta T)$). Кімнатну температуру виміряти термометром.

8. Нагріти в печі тигель з аморфною речовиною (парафін) і зняти для неї кінетику охолодження, здійснюючи вимірювання кожні 20 с, поки парафін повністю не затвердне. Побудувати криву охолодження парафіну.

Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Пояснити процеси кристалізації та плавлення.
3. Що таке прихована теплота плавлення (кристалізації)?
4. Дати визначення фазових переходів I та II роду. Навести приклади.
5. Вивести рівняння Клапейрона – Клаузіуса. Пояснити залежність температури фазового переходу від зовнішнього тиску.
6. Пояснити криву охолодження парафіну.

Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2,3,4. [1, с.334-343], [2, с.436-449], [3, с.449-453, 476-478], [4, с.284, 314-315], [5, с.506-508], [8, с.364-368].
5. [1, с.234-235].
6. [4, с.312-313].

ДОДАТОК 1

Порядок обробки результатів прямих вимірювань

У випадку, коли кількість вимірювань $N \geq 2$, результати вимірювань заносяться у **другу** колонку спеціальної таблиці, а розрахунок похибок і подальше заповнення таблиці виконують у такій послідовності:

1. За формулою

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

обчислюють середнє арифметичне значення величини x з N вимірювань.

2. За формулою

$$\Delta x_i = \bar{x} - x_i \quad (2)$$

обчислюють похибки окремих вимірювань.

3. Обчислюють відповідні Δx_i^2 .

4. За формулою

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \Delta x_i^2} \quad (3)$$

обчислюється стандартне відхилення від середнього арифметичного значення, яке характеризує серію вимірювань у цілому.

5. Задається надійність α в межах від 0,9 до 0,99 (див. таблицю 1).

6. Визначають коефіцієнт Стюдента $t(\alpha, N)$. Він знаходиться на перетині стовпчика, який відповідає вибраній надійності α і рядка, що відповідає кількості вимірювань N .

7. За формулою

$$\Delta x_{\text{вип}} = t(\alpha, N) S_{\bar{x}} \quad (4)$$

знаходять абсолютну похибку вимірювань, яка зумовлена випадковими чинниками.

8. За формулою

$$\Delta x_{\text{сист}} = t(\alpha, \infty) \frac{\delta}{3} \quad (5)$$

знаходять систематичну похибку, де $t(\alpha, \infty)$ – коефіцієнт Стюдента для нескінченної кількості вимірювань (береться з таблиці 1), δ – величина похибки приладу (визначається або класом точності, або вибирається такою, що дорівнює половині ціни найменшої поділки шкали). Для цифрових приладів як похибка береться одиниця найменшого розряду дисплея. За цією ж формулою визначається похибка *одного прямого виміру*.

9. Визначається повна похибка. Якщо величини $\Delta x_{\text{сист}}$ і $\Delta x_{\text{вип}}$ порівняльні, то повна похибка обчислюється за формулою

$$\Delta x_{\text{повн}} = \sqrt{\Delta x_{\text{сист}}^2 + \Delta x_{\text{вип}}^2} \quad (6)$$

Якщо ж похибки відрізняються щонайменше на порядок, то як повна похибка вибирається більша.

10. За формулою

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_{\text{повн}}}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (7)$$

знаходять відносну похибку вимірювань.

11. Нижче заповненої таблиці записується кінцевий результат $x = \bar{x} \pm \Delta x_{\text{повн}}$ і в дужках *обов'язково* вказується розмірність даної величини в одиницях SI.

Приклад 1. Заповнення таблиці при обчисленні похибок прямих вимірювань

Припустимо, що вимірюється відстані, яку проходить маятник Максвелла від верхнього положення до нижньої “мертвої” точки з допомогою лінійки, що має міліметрові поділки. У результаті вимірювань отримали такі дані: $h_1=39,3$ см; $h_2=39,4$ см; $h_3=39,2$ см. Ці числа заносяться у *другу* колонку таблиці. У *першій* колонці таблиці ставиться номер вимірювання. У другій колонці зверху записується розмірність величини, для якої розраховуються похибки вимірювань. Усі розрахунки записуються під таблицею.

№	h_i (см)	\bar{h}	Δh_i	Δh_i^2	$S_{\bar{h}}$	α	$t(\alpha, N)$	$\Delta h_{\text{вип}}$	$\Delta h_{\text{сист}}$	$\Delta h_{\text{повн}}$	$\varepsilon, \%$
1	39,3		0	0							
2	39,4	39,3	-0,1	0,01	0,058	0,95	4,3	0,25	0,03	0,2	0,51
3	39,2		0,1	0,01							

1. За формулою (1) обчислюємо середнє арифметичне значення:

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3} = \frac{39,3 + 39,4 + 39,2}{3} = 39,3$$

і записуємо в *третю* колонку таблиці.

2. За формулою (2) обчислюємо абсолютні похибки кожного виміру

Δh_i :

$$\Delta h_1 = \bar{h} - h_1 = 39,3 - 39,3 = 0;$$

$$\Delta h_2 = \bar{h} - h_2 = 39,3 - 39,4 = -0,1;$$

$$\Delta h_3 = \bar{h} - h_3 = 39,3 - 39,2 = 0,1$$

і записуємо в *четверту* колонку таблиці.

3. Обчислюємо відповідні Δh_i^2 :

$$\Delta h_1^2 = 0;$$

$$\Delta h_2^2 = 0,01;$$

$$\Delta h_3^2 = 0,01$$

і записуємо в *п'яту* колонку таблиці.

4. За формулою (3) обчислюємо стандартну похибку середнього арифметичного $S_{\bar{h}}$, яка характеризує серію вимірювань у цілому:

$$S_{\bar{h}} = \sqrt{\frac{\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2 + \Delta h_3^2}{3 \cdot 2}} = \sqrt{\frac{0 + 0,01 + 0,01}{6}} = 0,057735 \cong 0,058$$

і записуємо в *шосту* колонку таблиці.

Звертаємо увагу на те, що даний проміжний результат заокруглюється, і в ньому залишається “запасна” цифра 8, яка буде відкинута пізніше при записуванні остаточного результату.

5. Вибираємо надійність $\alpha = 0,95$ і записуємо в *сьому* колонку таблиці.

6. За таблицею коефіцієнтів Стюдента знаходимо $t(0,95;3) = 4,3$ і записуємо у *восьму* колонку таблиці.

7. За формулою (4) обчислюємо випадкову похибку:

$$\Delta h_{\text{вип}} = S_{\bar{h}} \cdot t(\alpha, N) = 0,058 \cdot 4,3 = 0,2494 \cong 0,25$$

і записуємо в *дев'яту* колонку таблиці.

8. Оцінюємо систематичну похибку. Для цього за таблицею коефіцієнтів Стюдента в останньому рядку колонки, яка відповідає надійності 0,95, знаходимо $t(0,95; \infty) = 2$. Лінійка є приладом поза класами точності, тому інструментальну похибку беремо такою, що дорівнює половині найменшої поділки, тобто $0,5 \text{ мм} = 0,05 \text{ см}$. Далі за відповідною формулою (5) отримуємо:

$$\Delta h_{\text{сист}} = t(\alpha, \infty) \frac{\delta}{3} = 2 \cdot \frac{0,05}{3} = 0,03(3) \cong 0,03$$

і записуємо в *десяту* колонку таблиці.

9. За формулою (6) обчислюємо повну похибку, яка визначає межі довірчого інтервалу

$$\Delta h_{\text{повн}} = \sqrt{\Delta h_{\text{сист}}^2 + \Delta h_{\text{вип}}^2} = \sqrt{0,03^2 + 0,25^2} = 0,25179 \cong 0,2$$

і записуємо в *одинадцятую* колонку таблиці.

Як бачимо, повна похибка при вимірюваннях визначається в основному випадковими похибками (систематична похибка менша на порядок). У даному випадку систематичною похибкою порівняно з випадковою можна знехтувати. *Звертаємо увагу на те, що значення повної похибки заокруглюється до точності вимірювань.*

10. За формулою (7) обчислюємо відносну похибку

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h_{\text{повн}}}{\bar{h}} \cdot 100\% = \frac{0,2}{39,3} \cdot 100\% = 0,5089\% \cong 0,51\%$$

і записуємо у *дванадцятую* колонку таблиці.

11. Записуємо остаточний результат

$$h = 39,3 \pm 0,2 \text{ (см)}.$$

Розмірність у кінцевому записі результату вказується обов'язково. У проміжних розрахунках її можна не вказувати.

ДОДАТОК 2

Порядок обробки результатів непрямих вимірювань

1. Здійснити статистичну обробку результатів прямих вимірювань аргументів за схемою наведеною у додатку 1. При цьому треба пам'ятати, що для всіх аргументів задається одне й те саме значення надійності α .

2. Обчислити середнє значення функції за формулою $\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N)$, тобто щоб отримати середнє значення функції N аргументів, потрібно підставити в неї їх середні значення.

3. Оцінити абсолютну похибку непрямих вимірювань за формулою

$$\Delta y = \pm \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|, \quad (1)$$

якщо функція зручна для логарифмування (аргументи входять до функції у вигляді добутків і часток степенів із відповідними показниками), або середньоквадратичну похибку за формулою

$$S_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}, \quad (2)$$

якщо функція логарифмується погано (аргументи входять до функції у вигляді доданків або від'ємників). Нагадаємо, що похідні обчислюються при середніх значеннях аргументів і беруться за абсолютним значенням.

4. Записати кінцевий результат у вигляді

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \pm \Delta y.$$

5. Прологарифмувати функцію, якщо вона логарифмується, і за формулою

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{y} \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial(\ln f)}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (3)$$

визначити відносну похибку опосередкованих вимірювань. У тому разі, коли функція логарифмується погано і межі довірчого інтервалу визначаються за допомогою середньоквадратичної похибки, відносну середньоквадратичну похибку обчислюють за формулою

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{y}, \quad (4)$$

скориставшись для цього значенням середньоквадратичної похибки, яке обчислюється за формулою (2).

Отже, на практиці для знаходження ε_y функцію зручно спочатку прологарифмувати, а потім знайти частинні похідні від натурального логарифма функції за кожним із N аргументів. Якщо функція зручна для логарифмування, то обчисливши попередньо відносну похибку і скориставшись співвідношенням (4), можна обчислити середньоквадратичну похибку, яка є оцінкою довірчого інтервалу опосередкованих вимірювань:

$$S_y = \varepsilon_y \cdot \bar{y}. \quad (5)$$

У всіх вищезгаданих формулах частинні похідні обчислюються при середніх значеннях усіх аргументів.

Приклад 2. Обчислення похибок непрямих вимірювань у випадку, коли шукана фізична величина є функцією двох аргументів

Нехай потрібно визначити об'єм циліндричного тіла з допомогою штангенциркуля, точність ноніуса якого дорівнює 0,05 мм. Безпосередньо можна виміряти висоту h та діаметр основи циліндра d , а об'єм V обчислити за формулою

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h. \quad (6)$$

Припустимо, що в результаті прямих вимірювань діаметра і висоти після статистичної обробки результатів отримали такі дані:

$$d = 16,24 \pm 0,93 \text{ мм}, \varepsilon_d = 0,057 (5,7\%);$$

$$h = 36,45 \pm 0,91 \text{ мм}, \varepsilon_d = 0,025 (2,5\%).$$

1. Підставляючи середні значення d і h у (6), знаходимо середнє значення об'єму

$$\bar{V} = \frac{3,14 \cdot (16,24)^2}{4} \cdot 36,45 = 7546,3898 \cong 7546,39 \text{ мм}^3.$$

2. Для обчислення абсолютної похибки вимірювання об'єму знаходимо частинні похідні

$$\frac{\partial V}{\partial d} = \frac{\pi d}{2} h; \quad \frac{\partial V}{\partial h} = \frac{\pi d^2}{4}$$

і за формулою (1) обчислюємо абсолютну похибку ΔV :

$$\begin{aligned} \Delta V &= \pm \left(\frac{\partial V}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial V}{\partial h} \Delta h \right) = \pm \left(\frac{\pi \bar{d}}{2} \bar{h} \Delta d + \frac{\pi \bar{d}^2}{4} \Delta h \right) = \\ &= \pm \frac{\pi \bar{d}^2}{2} \bar{h} \left(\frac{2 \Delta d}{d} + \frac{\Delta h}{h} \right) = \pm V (2 \varepsilon_d + \varepsilon_h) = \end{aligned}$$

$$= \pm 7546,39 \cdot (2 \cdot 0,057 + 0,025) = \pm 1048,94821 \cong 1048,95 \text{ мм}^3.$$

3. Виведемо формулу для відносної похибки. Спочатку прологарифмуємо (6):

$$\ln V = \ln \left(\frac{\pi d^2}{4} h \right) = \ln \pi + 2 \ln d + \ln h - \ln 4.$$

Візьмемо частинні похідні

$$\frac{\partial(\ln V)}{\partial d} = \frac{2}{d}; \quad \frac{\partial(\ln V)}{\partial h} = \frac{1}{h}.$$

За формулою (3) знаходимо відносну похибку

$$\varepsilon_V = \sqrt{\left(\frac{\partial(\ln V)}{\partial d} \Delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial(\ln V)}{\partial h} \Delta h \right)^2} =$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{\left(\frac{2 \Delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h} \right)^2} = \sqrt{(2 \varepsilon_d)^2 + (\varepsilon_h)^2} = \\ &= \sqrt{(2 \cdot 0,057)^2 + (0,025)^2} = 0,117. \end{aligned} \quad (7)$$

У відсотках даний результат становитиме 11,7%.

Проаналізуємо формули (6) і (7) більш детально. Формула (6) добре логарифмується, оскільки аргументи входять до функції у вигляді добутку степенів. У цьому випадку відносна похибка функції дорівнює кореню квадратному із суми квадратів відносних похибок аргументів із відповідними коефіцієнтами. З формул (6) і (7) легко бачити, що коефіцієнтами біля відносних похибок аргументів виступають показники степенів, в яких аргументи входять до вихідної функції. Цей факт дозволяє у багатьох випадках досить легко знайти відносну похибку функції, а потім за формулою (5) визначити її середньоквадратичну похибку.

Оцінимо середньоквадратичну похибку вимірювання об'єму за формулою (5):

$$S_{\bar{V}} = \varepsilon_V \cdot \bar{V} = 0,117 \cdot 7546,39 = 882,92763 \cong 882,93 \text{ мм}^3.$$

Із отриманих результатів видно, що середньоквадратична похибка менша за абсолютну.

Результат записуємо у вигляді

$$V = 7546,46 \pm 1048,95 \text{ (мм}^3\text{)}$$

у випадку, коли межі довірчого інтервалу визначаються абсолютною похибкою, або

$$V = 7546,46 \pm 882,93 \text{ (мм}^3\text{)},$$

коли межі довірчого інтервалу визначаються середньоквадратичною похибкою.

ДОДАТОК 3

Таблиця похідних

Функція	Похідна
<i>const</i>	0
$x^a, a \in R$	ax^{a-1}
a^x	$a^x \ln a$
e^x	e^x
$\log_a x$	$\frac{1}{x \ln a}$
$\ln x$	$\frac{1}{x}$
$\sin x$	$\cos x$
$\cos x$	$-\sin x$
$\operatorname{tg} x$	$\frac{1}{\cos^2 x}$
$\operatorname{ctg} x$	$-\frac{1}{\sin^2 x}$
$\arcsin x$	$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\arccos x$	$-\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\operatorname{arctg} x$	$\frac{1}{1+x^2}$
$\operatorname{arcctg} x$	$-\frac{1}{1+x^2}$

Правила диференціювання

$$(c \cdot u(x))' = c \cdot u'(x)$$

$$(u(x) \pm v(x))' = u'(x) \pm v'(x)$$

$$(u(x)v(x))' = u'(x)v(x) + u(x)v'(x)$$

$$\left(\frac{u(x)}{v(x)}\right)' = \frac{u'(x)v(x) - u(x)v'(x)}{(v(x))^2}$$

Якщо $y = g(f(x))$, то $y' = g'(f(x)) \cdot f'(x)$

Властивості логарифмів

$$a^{\log_a M} = M$$

$$\log_a a = 1 \quad (a > 0, a \neq 1)$$

$$\log_a (a^k) = k \quad (a > 0, a \neq 1)$$

$$\log_a (M_1 \cdot M_2) = \log_a M_1 + \log_a M_2 \quad (M_1 > 0, M_2 > 0)$$

$$\log_a \left(\frac{M_1}{M_2}\right) = \log_a M_1 - \log_a M_2 \quad (M_1 > 0, M_2 > 0)$$

$$\log_a (b^c) = c \log_a b; \quad \log_a c = \frac{\log_b c}{\log_b a}; \quad \log_a c = \frac{1}{\log_c a}$$

ТАБЛИЦІ

Таблиця 1. Коефіцієнти Стюдента $t_\alpha(n)$

n	α					
	0,6	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	1,38	3,08	6,31	12,70	31,80	63,70
3	1,06	1,89	2,92	4,30	6,96	9,92
4	0,98	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,94	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,92	1,48	2,02	2,57	3,36	4,03
7	0,90	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,90	1,42	1,89	2,36	3,00	3,50
9	0,90	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,88	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
12	0,87	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11
14	0,87	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01
16	0,87	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
18	0,86	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90
20	0,86	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86
25	0,86	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80
30	0,85	1,31	1,70	2,05	2,46	2,75
35	0,85	1,31	1,69	2,04	2,45	2,73
40	0,85	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70
45	0,85	1,30	1,68	2,02	2,41	2,69
50	0,85	1,30	1,68	2,01	2,40	2,68
60	0,85	1,30	1,67	2,00	2,39	2,67
70	0,85	1,30	1,67	1,99	2,38	2,66
80	0,85	1,30	1,67	1,99	2,37	2,65

Таблиця 2. Фундаментальні фізичні константи

Константа	Позначення	Числове значення
Швидкість світла	c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала	G	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м ² ·кг ⁻²
Стала Авогадро	N_A	$6,022 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Стала Лошмідта	L	$2,69 \cdot 10^{25}$ м ⁻³
Універсальна газова стала	R	8,314 Дж/(моль·К)
Стандартний об'єм газу	V_m	$22,42 \cdot 10^{-3}$ м ³ /моль
Елементарний заряд	e	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Маса спокою електрона	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Питомий заряд електрона	e/m_e	$1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Стала Фарадея	F	$9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль
Атомна одиниця маси	а.о.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Електрична стала	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Стала Планка	h	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Таблиця 3. Густина речовин ρ , кг/м³

Гази при нормальних умовах ($T=273,15$ К, $P=1,01 \cdot 10^5$ Па)

Азот	1,250	Кисень	1,429
Водень	0,089	Метан	0,717
Вуглекислий газ	1,977	Неон	0,900
Гелій	0,178	Повітря	1,293

Рідини

Бензол ($t=20$ °C)	879	Скипидар ($t=16$ °C)	858
Вода ($t=4$ °C)	1000	Спирт етиловий ($t=0$ °C)	789
Вода ($t=100$ °C)	958	Спирт метиловий ($t=0$ °C)	792
Гас ($t=0$ °C)	800	Толуол ($t=18$ °C)	870
Гліцерин ($t=0$ °C)	1260	Ртуть ($t=0$ °C)	13596

Тверді тіла при 293 K (ρ , 10^3 кг/м^3)

Алюміній	2,69	Олово лите	7,23
Залізо	7,86	Сталь лита	7,7 - 8,0
Латунь	8,3 - 8,7	Свинець	11,22 - 11,44
Лід ($t=0 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,91	Срібло	10,42 - 10,57
Мідь	8,88 - 8,96	Цинк	6,86 - 7,24

Таблиця 6. Тиск і густина насиченої водяної пари при різних температурах (тиск P у гПа ; m – маса пари у г в 1 м^3)

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	P	m	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	P	m	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	P	m
0	6,11	4,84	18	20,64	15,4	36	59,41	41,8
1	6,57	5,22	19	21,97	16,3	37	62,76	44,0
2	7,05	5,60	20	23,65	17,3	38	66,25	46,3
3	7,59	5,98	21	24,87	18,3	39	69,91	48,7
4	8,13	6,40	22	26,44	19,4	40	73,75	51,2
5	8,72	6,48	23	28,93	20,6	45	95,83	65,4
6	9,35	7,3	24	29,84	21,8	50	123,32	83,0
7	10,01	7,8	25	31,68	23,0	55	157,32	104,3
8	10,73	8,3	26	33,61	24,4	60	199,18	130
9	11,48	8,8	27	35,65	25,8	65	249,98	161
10	12,28	9,4	28	37,80	27,2	70	311,57	198
11	13,12	10,0	29	40,05	28,7	75	385,43	242
12	14,03	10,7	30	42,42	30,8	80	473,43	293
13	14,97	11,4	31	44,93	32,1	85	578,08	354
14	15,99	12,1	32	47,54	33,9	90	701,00	424
15	17,05	12,8	33	50,30	35,7	95	845,13	506
16	18,17	13,6	34	53,20	37,6	100	1013,25	598
17	19,37	14,5	35	56,24	39,6			

Таблиця 4. Швидкість звуку в газах при ($t=0 \text{ }^\circ\text{C}$)

Середовище	$v, \text{ м/с}$
Азот	333,63
Водень	1286
Вуглекислий газ	260,3
Гелій	970
Кисень	314,84
Повітря (сухе)	331,46

Таблиця 5. Деякі фізичні характеристики рідин

Коефіцієнт поверхневого натягу на межі “рідина – повітря” σ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 10^{-3} Н/м ; коефіцієнт внутрішнього тертя η при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$; коефіцієнт об’ємного розширення β при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 10^{-6} К^{-1} ; точка кипіння t_k при $P=1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$; питома теплота пароутворення при точках кипіння r , 10^5 Дж/кг ; питома теплоємність c при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Рідина	σ	η	β	t_k	r	c
Вода	72,6	1,005	21	100,0	22,6	4190
Гліцерин	66	1480	50	290	-	2390
Ртуть	500	1590	18	356,7	2,85	138
Спирт	22,0	1,2	110	78,3	8,57	2470

Таблиця 7. Постійні Ван-дер-Ваальса для деяких речовин

Речовина	$a, \text{ Н}\cdot\text{м}^3/\text{моль}$	$b, \text{ см}^3/\text{моль}$
Азот	0,135	38,6
Аргон	0,134	32,2
Вода	0,545	30,4
Водень	0,024	26,6
Гелій	0,003	23,6
Кисень	0,136	31,7
Вуглекислий газ	0,36	42,8
Етиловий спирт	1,2	84

Таблиця 8. Психрометрична таблиця відносної вологості φ , %

Покази сухого термометра, °C	Різниця показів сухого і мокрого термометрів										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100	81	63	45	28	11					
2	100	84	68	51	35	20					
4	100	85	70	56	42	28	14				
6	100	86	73	60	47	35	23	10			
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7		
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	9
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	15
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	20
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	24
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	28
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	31
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	34
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	37
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	39
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

До лабораторних робіт з механіки

1. Матвеев О. М. Механіка і теорія відносності / Матвеев О. Н. – К. : Вища школа, 1993. – 288 с. : ил.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1 [Механика] / Д. В. Сивухин – М. : Наука, 1989. – 576 с. : ил. – Предм. указ. : с. 570.
3. Стрелков С. П. Механика / Стрелков С. П. – М. : Наука, 1975. – 560 с. : ил.
4. Хайкин С. Э. Физические основы механики / Хайкин С. Э. – М. : Физматгиз, 1962. – 772 с. : ил. – Предм. указ. : с. 768.
5. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1 [Механика. Молекулярная физика] / И. В. Савельев – М. : Наука, 1982. – 432 с. : ил. – Предм. указ. : с. 429.
6. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2 [Электричество и магнетизм. Волны. Оптика] / И. В. Савельев – М. : Наука, 1982. – 496 с. : ил. – Предм. указ. : с. 493.
7. Фриш С. Э. Курс общей физики. Т. 1 / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева – М. : ГизТТЛ, 1956. – 464 с. : ил. – Предм. указ. : с. 457.
8. Белянкин А. Г., Мотулевич Г. П., Четверикова Е. С., Яковлев И. А. Физический практикум [Механика и молекулярная физика] / А. Г. Белянкин, Г. П. Мотулевич, Е. С. Четверикова, И. А. Яковлев ; под. ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1967. – 352 с. : ил., табл.
9. Загальна фізика [Лабораторний практикум] / [В. М. Барановський, П. В. Бережний та ін.] ; під. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1996. – 509 с. : ил., табл. – Бібліогр. : с. 502 – 503.
- 10.2. Обчислення похибок прямих та опосередкованих вимірювань. Методичний посібник. Укл.: Курек І. Г., Курек Є. І., Олійнич-Лисюк А.В., Струк Я. М. – Чернівці: 2021. – 48 с. (<https://archer.chnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/3217>)

До лабораторних робіт з молекулярної фізики

1. Матвеев А. Н. Молекулярная физика / Матвеев А. Н. – М. : Высшая школа, 1981. – 400 с. : ил. – Предм. указ. : с. 399.
2. Кикоин А. К. Молекулярная физика / А. К. Кикоин, И. К. Кикоин – М. : Наука, 1976. – 480 с. : ил. – Предм. указ. : с. 479.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 2 [Термодинамика и молекулярная физика] / Д. В. Сивухин – М. : Наука, 1975. – 552 с. : ил. – Предм. указ. : с. 544.
4. Телеснин Р. В. Молекулярная физика / Телеснин Р. В. – М. : Наука, 1973. –

- 360 с. : ил. – Предм. указ. : с. 354.
5. Радченко І. В. Молекулярна фізика / Радченко І. В. – Харків : Видавництво Харківського університету, 1960. – 540 с. : іл. – Предм. показ. : с. 527.
6. Дутчак Я. Й. Молекулярна фізика / Дутчак Я. Й. – Львів : Видавництво Львівського університету, 1972. – 364 с. : іл. – Предм. показ. : с. 362.
7. Савельев І. В. Курс общей физики. Т. 1 [Механика. Молекулярная физика] / И. В. Савельев – М. : Наука, 1982. – 432 с. : ил. – Предм. указ. : с. 429.
8. Фриш С. Э. Курс общей физики. Т. 1 / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева – М. : ГизТТЛ, 1956. – 464 с. : ил. – Предм. указ. : с. 457.
9. Белянкін А. Г., Мотулевич Г. П., Четверикова Е. С., Яковлев І. А. Физический практикум [Механика и молекулярная физика] / А. Г. Белянкін, Г. П. Мотулевич, Е. С. Четверикова, І. А. Яковлев ; под. ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1967. – 352 с. : ил., табл.
10. Загальна фізика [Лабораторний практикум] / [В. М. Барановський, П. В. Бережний та ін.] ; під. ред. І. Т. Горбачука. – К. : Вища школа, 1996. – 509 с. : іл., табл. – Бібліогр. : с. 502 – 503.
11. Майсова Н. Н. Практикум по курсу общей физики / Майсова Н. Н. – М. : Высшая школа, 1970. – 448 с. : ил.
12. Булкин П. С., Попова И. И. Общий физический практикум [Молекулярная физика] / П. С. Булкин, И. И. Попова – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 216 с. : ил., табл.

ЗМІСТ

Лабораторні роботи з механіки

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1	3
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3	8
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5	11
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6	14
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7	17
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14.	20
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16.	24

Лабораторні роботи з молекулярної фізики

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.	28
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4.	31
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5.	34
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6.	37
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8.	41
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9.	44
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16.	47
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 18.	50
ДОДАТОК 1.	53
ДОДАТОК 2.	58
ДОДАТОК 3.	62
ТАБЛИЦІ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.	69

Навчальне видання

Механіка і молекулярна фізика

Фізичний практикум для студентів
інженерних спеціальностей

Укладачі: *Курек Ігор Геннадійович*

Курек Єлена Ігорівна

Олійнич-Лисюк Алла Василівна

Федорцова Ірина Василівна