Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

В.М.Костенко,
В.Ф.Соломіна,
В.Н.Тулупенко

МЕХАНІКА
МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

Методичний посібник
до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика»

Видання друге, перероблене і доповнене

Затверджено
на засіданні вченої ради
Протокол № 2 від 30.10.2008

Краматорськ 2008

УДК 535
ББК 22.33
М 55

Рецензенти:

Левченко Г.Г., д-р фіз-мат. наук, зав. відділом фазових перетворень Фізико-технічного інституту НАН України, м. Донецьк;

Надточій В.А., д-р фіз-мат. наук, зав. кафедрою фізики Слов'янського державного педагогічного університету

Костенко, В.М.

М 55 Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка: методичний посібник до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика» (для студентів усіх спеціальностей вузу) / В.М.Костенко, В.Ф.Соломіна, В.Н.Тулупенко,. – 2-е вид., перероб. і доп. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – 92 с.

ISBN 978-966-379-305-4

Наведено стислі теоретичні відомості, описи установок, порядок виконання лабораторних робіт, рекомендації з обробки результатів вимірювань. Для самоконтролю наприкінці кожної роботи наведені контрольні питання.

УДК 535
ББК 22.33

ISBN 978-966-379-305-4

ЗМІСТ

ВСТУП

Лабораторний практикум відіграє велику роль у вивченні курсу загальної фізики. Можна зазначити три основні його мети:

1) ознайомлення із приладами і методами вимірювання різних фізичних величин;
2) експериментальне вивчення фізичних законів і явищ;
3) ознайомлення з методами обробки результатів вимірів.

Перед виконанням конкретної лабораторної роботи студент зобов'язаний заздалегідь уважно ознайомитися зі змістом методичних вказівок до неї; вивчити належний теоретичний матеріал. Особливу увагу приділити вивченню методу дослідження і принципу дії експериментальної установки, одержанню розрахункових формул, математичній обробці результатів експерименту і проконтролювати себе за допомогою контрольних запитань. Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно звернути увагу на хід виконання роботи і підготувати протокол дослідження.

Студент допускається до виконання лабораторної роботи, якщо він:

1) має протокол дослідження (див. нижче);
2) знає мету роботи, може розкрити зміст понять і законів, які описують досліджуване фізичне явище;
3) виявить розуміння того, як можна досягти мети цієї роботи, тобто знає суть експериментального методу дослідження, принцип дії експериментальної установки і хід виконання роботи.

Після одержання допуску до лабораторної роботи студент виконує її, заносячи відповідні результати вимірювань до протоколу дослідження, проводить відповідні обчислення і побудову графіків, одержує підсумковий результат і здає протокол дослідження викладачеві.

Протокол дослідження готується так: на титульній сторінці протоколу вказується номер і назва лабораторної роботи, прізвище, ім'я та по батькові виконавця, шифр академічної групи, дата виконання. На другій сторінці: мета роботи; схематичне зображення експериментальної установки або робоча схема; основні розрахункові формули; таблиці для результатів вимірів і розрахунків; формули для обчислення похибок і оцінки результатів.

Залишають місце для необхідних розрахунків і запису остаточного результату дослідження. Кінцевий результат записується в стандартній формі (див. нижче). Якщо необхідно подати результати вимірів у вигляді графічної залежності, то залишають місце для графіків. Побудова графіків виконується на міліметровому папері.

Звіт повинен бути написаний у гарному стилі, акуратним розбірливим почерком. При його оформленні не треба також зневажати і естетичною стороною оформлення. Схеми і графіки виконуються олівцем під лінійку, заголовки, висновки і формули доцільно виділяти пастою інших кольорів, підкреслити і т.п. Це полегшує читання звіту.

Для одержання заліку з поточної лабораторної роботи студент повинен також викласти теорію експериментального методу і теорію досліджуваного явища або відповідного розділу фізики (орієнтуючись на контрольні запитання).

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 11
ЗНАЙОМСТВО З ТЕОРІЄЮ ВИМІРІВ

Мета роботи: опанувати техніку вимірювання лінійних розмірів тіл, вивчити правила теорії вимірювань і придбати практичні вміння в оформленні й оцінці результатів вимірювань.

1.1 Стислі теоретичні відомості

Вимірювання фізичних величин. Похибки вимірювань

Фізика належить до числа фундаментальних наук, які складають основу теоретичної підготовки інженерів, і грає роль тієї бази, без якої неможлива успішна діяльність інженера в будь-якій галузі сучасної техніки. Фізика є точною наукою, тобто оперує кількісними співвідношеннями між фізичними величинами. Фізичні величини є кількісною мірою окремих якостей фізичного явища або фізичного тіла, числові значення яких визначаються за допомогою вимірювань.

Виміряти фізичну величину означає порівняти її з другою однорідною фізичною величиною, яка прийнята за одиницю вимірювання. Маса порівнюється з масою еталона маси – кілограмом, довжина – з довжиною спеціального еталона – метром, проміжок часу порівнюється з секундою.

Одиниці вимірювань групуються в системи одиниць: основні та похідні. Основні системи містять основні одиниці, для яких є природні або штучні еталони. Похідні системи одиниць містять похідні одиниці (наприклад, Ньютон, Джоуль, Ват та ін.), які визначаються за формулами через основні одиниці. Усі одиниці фізичних величин стандартизовані і згруповані в міжнародну систему одиниць **СІ.**

Основними одиницями в механіці є: метр (***м)***, кілограм (***кг)*** і секунда (***с)***; допоміжними – радіан (***рад***, стерадіан (***стер)***, інші одиниці – похідні.

Вимірювання величин поділяються на прямі і непрямі.

Прямими називаються вимірювання таких величин, значення яких одержують безпосередньо з досліду за допомогою вимірювальних приладів.

Непрямими називаються ті вимірювання, значення величин яких знаходять шляхом підстановки до формули відомої залежності між невідомою величиною і величинами, що визначаються прямими вимірюваннями (наприклад – визначення густини тіла за його масою та геометричними розмірами).

Вимірювання фізичних величин ніколи не дозволяє визначати їхні точні значення. Результат кожного вимірювання відрізняється від точного значення вимірюваної величини внаслідок появи похибок вимірювань. Похибки вимірювань за характером і причинами їх появи поділяються на випадкові, систематичні й промахи.

Систематичні похибки виникають через використання несправних вимірювальних приладів, неточних або спрощених методів вимірювань і приводять при всіх вимірюваннях до однакового відхилення вимірюваної величини від точного її значення.

Систематичні похибки можуть бути усунені заміною несправного чи неточного приладу або уточненням методу вимірювання.

Промахи характеризуються явним і позбавленим фізичного змісту відхиленням записаного значення від інших результатів вимірювань. Ці значення не повторюються при повторних вимірюваннях і після перевірки відкидаються.

Випадкові похибки зумовлені недосконалістю вимірювальних приладів і органів почуттів експериментатора, а також впливом випадкових факторів, врахувати які неможливо. Вони характеризуються однаковою ймовірністю зменшення або збільшення на одну і ту саму величину результату вимірювання відносно дійсного значення вимірюваної величини. Ці похибки неможливо повністю усунути, але можуть бути зменшені. Отже треба вміти їх враховувати.

Теорія похибок базується на допущенні, що похибки значно менші ніж самі величини і підкоряються законам теорії ймовірностей.

Завдяки тому, що випадкові похибки підкоряються законам імовірності, їх можна врахувати і визначити межі, в яких знаходиться дійсне значення вимірюваної величини. З цією метою прилади прямих вимірювань вибираються настільки чутливі, щоб вимірювання однієї і тієї ж величини при незмінних умовах досліду давали різні результати.

Нехай $a_1, a_2, a_3, \ldots, a$ – значення величини a, отримані в результаті серії вимірювань. Зробивши досить велику кількість вимірювань, можна переконатися, що ймовірності появи різних значень a відрізняються. Згідно з теорією ймовірності найбільш імовірним значенням величини є її середнє арифметичне значення:

$$\langle a \rangle = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \ldots + a_N}{N}. \tag{1.1}$$

Точність проведених вимірювань характеризується абсолютними похибками окремих вимірювань та абсолютною і відносною похибками вимірюваної величини.

Абсолютною похибкою даного вимірювання називається абсолютне значення різниці середнього значення вимірюваної величини і результату вимірювання даного досліду:

$$\left.\begin{array}{l} \Delta a_1 = \left|\langle a \rangle - a_1\right|, \\ \Delta a_1 = \left|\langle a \rangle - a_2\right|, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ \Delta a_1 = \left|\langle a \rangle - a_n\right|. \end{array}\right\} \tag{1.2}$$

Абсолютною похибкою вимірюваної величини називається середнє арифметичне значення абсолютних похибок всіх вимірювань:

$$\Delta a = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3 + \ldots + \Delta a_N}{N}. \tag{1.3}$$

Якщо виконано тільки одне вимірювання, або всі вимірювання дали однаковий результат, то абсолютною похибкою вважається та похибка, яку має даний прилад.

Похибка приладу визначається за класом точності приладу (електровимірювальні прилади) або прирівнюється до половини ціни найменшої поділки шкали приладу.

Відносною похибкою вимірюваної величини називається відношення абсолютної похибки цієї величини до її середнього значення:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\Delta \boldsymbol{a}}{\langle \boldsymbol{a} \rangle}. \qquad (1.4)$$

Відносну похибку у кінцевому результаті вимірювань прийнято виражати у відсотках, отже

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\Delta \boldsymbol{a}}{\langle \boldsymbol{a} \rangle} \boldsymbol{100\%}. \qquad (1.5)$$

Остаточний результат вимірювань записується у вигляді

$$a = \langle a \rangle \pm \langle \Delta a \rangle, \ \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\Delta \boldsymbol{a}}{\langle \boldsymbol{a} \rangle} \boldsymbol{100\%}, \qquad (1.6)$$

що є короткою формою запису числового проміжку, в якому заходиться числове значення величини, що вимірювалась:

$$\left(\langle a \rangle - \langle \Delta a \rangle\right) < a < \left(\langle a \rangle + \langle \Delta a \rangle\right).$$

Передбачається, що дійсне значення вимірюваної величини знаходиться в зазначеному інтервалі.

Описаний вище метод визначення абсолютної і відносної похибок застосовується також і при таких непрямих вимірюваннях, які проводяться в дослідах, в яких змінюються деякі умови дослідження.

Нехай деяка величина x обчислюється за формулою

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{f}\left(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c}, \ldots\right), \qquad (1.7)$$

де величини ***a*, *b*, *c*, ...** – величини, одержані при прямих вимірюваннях, довідкові дані або ж числові коефіцієнти. Ці величини, за винятком числових коефіцієнтів, є наближеними числами, тому і значення залежної від них величини ***x*** також є величина наближена. За найбільш ймовірне значення обчислюваної величини приймається значення функції від середніх значень вимірюваних величин:

$$\langle x \rangle = f\left(\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle, \ldots\right). \quad (1.8)$$

Похибка непрямого вимірювання Δx є наслідком впливу на результат обчислення похибок аргументів, тобто величин Δa, Δb, Δc,... .

При обчисленні похибок величин, отриманих у непрямих вимірюваннях, виходять із того, що вони значно менші ніж самі величини ($\Delta a \ll \langle a \rangle$, $\Delta b \ll \langle b \rangle$, $\Delta c \ll \langle c \rangle$,...), і тому вплив їх можна оцінювати за законами диференціального вирахування. Абсолютна похибка величини x визначається за формулою частинного диференціала функції $f(a,b,c,\ldots)$:

$$\Delta x = \left|\frac{\partial f}{\partial a}\right|_{\substack{a=\langle a \rangle \\ b=\langle b \rangle \\ c=\langle c \rangle}} da + \left|\frac{\partial f}{\partial b}\right|_{\substack{a=\langle a \rangle \\ b=\langle b \rangle \\ c=\langle c \rangle}} db + \left|\frac{\partial f}{\partial c}\right|_{\substack{a=\langle a \rangle \\ b=\langle b \rangle \\ c=\langle c \rangle}} + \ldots, \quad (1.9)$$

де знаки модулів ураховують неможливість взаємного ослаблення впливу випадкових похибок аргументів функції. Імовірність взаємного посилення впливу дорівнює ймовірності його взаємного ослаблення, і в теорії похибок визначається максимально можлива похибка.

Розглянемо важливі приклади застосування формули (1.9):

а) похибка суми

$$\left.\begin{aligned} x &= a + b, \\ \langle x \rangle &= \langle a \rangle + \langle b \rangle, \\ \Delta x &= \Delta a + \Delta b; \end{aligned}\right\}, \quad (1.10)$$

б)похибка різниці

$$\left.\begin{aligned} x &= a - b, \\ \langle x \rangle &= \langle a \rangle - \langle b \rangle, \\ \Delta x &= \Delta a - \Delta b; \end{aligned}\right\}, \quad (1.11)$$

в)похибка функції

$$\left.\begin{aligned} x &= \ln(a), \\ \langle x\rangle &= \ln(\langle a\rangle), \\ \Delta x &= \frac{\Delta a}{\langle a\rangle} = \varepsilon_a \,. \end{aligned}\right\} . \qquad (1.12)$$

Приклад з формулами (1.12) показує, що абсолютна похибка натурального логарифма дорівнює відносній похибці його аргументу. Це дозволяє використати вираз: логарифм добутку (або відношення) дорівнює алгебраїчній сумі логарифмів співмножників (або чисельника і знаменника) для знаходження за допомогою формул (1.10), (1.11) і (1.12) відносних похибок величин, що дорівнюють добутку і дробу в прикладах:

$$\left.\begin{aligned} x &= ab, \\ \langle x\rangle &= \langle a\rangle\langle b\rangle, \\ \varepsilon_x &= \frac{\Delta x}{\langle x\rangle} = \frac{\Delta a}{\langle a\rangle} + \frac{\Delta b}{\langle b\rangle} = \varepsilon_a + \varepsilon_b ; \end{aligned}\right\} \qquad (1.13)$$

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{a}{b}, \\ \langle x\rangle &= \frac{\langle a\rangle}{\langle b\rangle}, \\ \varepsilon_x &= \frac{\Delta x}{\langle x\rangle} = \frac{\Delta a}{\langle a\rangle} + \frac{\Delta b}{\langle b\rangle} = \varepsilon_a + \varepsilon_b \,. \end{aligned}\right\} \qquad (1.14)$$

Абсолютна похибка показує в якому розряді значення вимірюваної величини наступає похибка.

При записі результати вимірювань і обчислень варто округляти, залишаючи тільки ті цифри, які несуть інформацію т.т. є достовірними.

Значущими цифрами числа називаються всі відмінні від нуля цифри й всі нулі, ліворуч від яких є відмінні від нуля цифри.

Наприклад:

3,1416 - п'ять значущих цифр;

450 - три значущі цифри;

0,045 - дві значущі цифри;

0,0300 - три значущі цифри.

Значущі цифри результату вимірювання або обчислення розподіляються на достовірні, недостовірні й сумнівні. Сумнівна цифра стоїть в розряді, що відповідає старшому розряду абсолютної похибки. Достовірні цифри знаходяться ліворуч від неї, недостовірні – праворуч.

Правила заокруглення:

1) Кінцевий результат вимірювання або обчислення округляється до сумнівної цифри, недостовірні цифри відкидаються.

2) Якщо перші дві значущі цифри абсолютної похибки в сумі більше п'яти, вона округляється зі збільшенням до однієї значущої цифри. Якщо сума дорівнює п'яти або менше, округлення виконується зі збільшенням до двох значущих цифр.

3) Якщо округлення результату й абсолютної похибки повинне виконуватися до розряду старшого, ніж одиниці, то до запису варто ввести множник, тобто використати експонентну форму запису чисел. Показник ступеня N вибирається таким, щоб результат мав порядок одиниці. Результат і похибка повинні мати однаковий множник, винесений при записі за дужки.

4) Множник 10^N з від’ємним показником ступеня варто також використати, якщо результат за величиною менше одної сотої, щоб уникнути записування великої кількості нулів, що не є значущими цифрами.

5) При записі проміжних результатів обчислень кількість значущих цифр цього результату повинно перевищувати максимальну кількість значущих цифр у вихідних даних на дві, а інші повинні відкидатися.

6) Абсолютна похибку табличних значень фізичних і математичних величин уважається рівною половині одиниці молодшого розряду (наслідок правил округлення). Абсолютна похибка точно відомих коефіцієнтів уважається такою, яка дорівнює нулю.

Часто метою лабораторної роботи є дослідження залежності однієї фізичної величини від іншої, котру доцільно зобразити на графіку.

При побудові графіків необхідно дотримуватися ряду правил:

1) На аркуші паперу стандартного розміру окреслити поле графіка, залишивши ліворуч 15-20 мм, знизу – 20-25 мм. Обмежуюче поле графіка, лінії можуть служити координатними осями.

2) На осях необхідно нанести масштабну сітку, указати одиниці вимірювання й символи зображуваних величин. При цьому обов'язковим є вимога, щоб графік займав по можливості повністю координатне поле. Іноді для цієї мети буває зручно змістити уздовж осей початок відліку.

Масштаб за осями ***X*** і ***У*** може бути різним.

3) Відкласти на координатному полі всі точки, які відповідають експериментальним значенням. Точки варто наносити з максимальною точністю так, щоб вони чітко виділялися на полі графіка, не зливаючись із ним.

4) Побудувати плавну лекальну криву, що проходить максимально близько до всіх точок. Переконатися, що дана крива не суперечить фізичному закону.

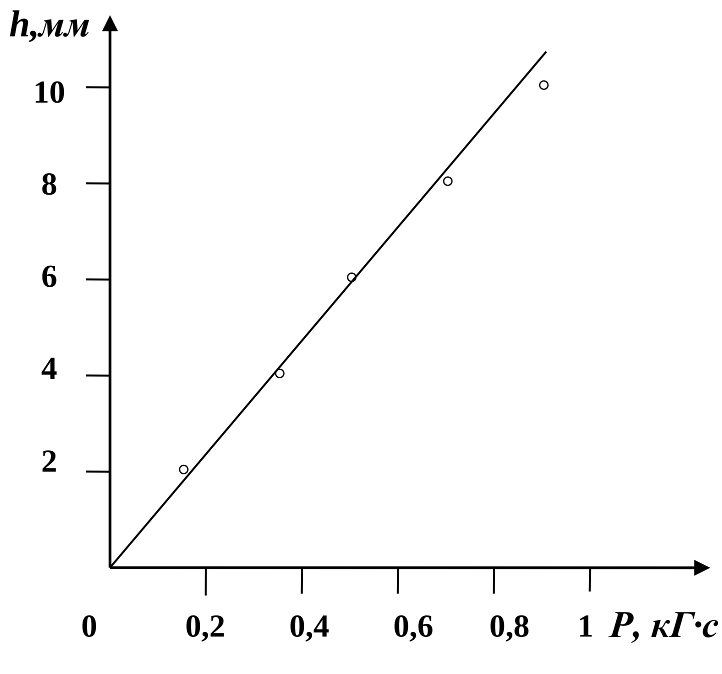


Рисунок 1.1 – Приклад побудови графіка за експериментальними точками

1.2 Вправи на закріплення навичок, умінь роботи з наближеними числами

Завдання 1. Правила роботи з наближеними числами

1) У таблиці 1.1 дані результати і похибки вимірювань. Вибравши свій варіант завдання, округлити результат вимірювань і зробити його запис у стандартному вигляді.

2) Скориставшись варіантом з таблиці 1.2, визначити похибку записаного числа і знайти наближене значення заданого виразу.

Таблиця 1.1

№	x_1	x_2	x_3	Δx_1	Δx_2	Δx_3
1	48,758	0,4897	5000	±0,57	±0,0065431	±898
2	57,396	0,2645	6000	±0,51	±0,0072241	±454
3	68,794	0,5678	7000	±0,73	±0,0015237	±391
4	59,904	0,6778	8000	±0,62	±0,0016371	±451
5	30,301	0,7891	9000	±0,31	±0,0037213	±991
6	42,944	0,9871	10000	±0,92	±0,0037313	±392
7	44,932	0,3456	1000	±0,63	±0,0038413	±464
8	53,919	0,4567	2000	±0,47	±0,0039141	±596
9	58,118	0,5781	3000	±0,42	±0,0039942	±696
10	10,009	0,5671	4000	±0,36	±0,0041444	±796
11	14,112	0,7764	5000	±0,24	±0,0056789	±888
12	19,384	0,6631	16000	±0,32	±0,0013456	±858
13	20,292	0,7131	17000	±0,44	±0,0024213	±799
14	25,901	0,3161	18000	±0,99	±0,0031414	±561
15	74,104	0,3269	19000	±0,47	±0,0031418	±459
16	82,202	0,3368	15000	±0,39	±0,0014148	±779
17	103,101	0,3468	14000	±0,05	±,0018191	±768
18	99,909	0,3596	13000	±0,74	±0,0019191	±661
19	109,901	0,5771	12000	±0,11	±0,0021901	±899
20	108,756	0,7157	11000	±0,94	±0,0010901	±669
21	107,944	0,7761	11500	±0,34	±0,0030133	±559
22	108,805	0,7651	11600	±0,29	±0,0017771	±668
23	13,001	0,6157	11700	±0,14	±0,0029193	±761
24	14,356	0,5731	11800	±0,91	±0,0031414	±999
25	19,319	0,5738	11900	±0,84	±0,0032122	±861
26	20,316	0,8167	12100	±0,77	±0,0016119	±558

Продовження таблиці 1.1

№	x_1	x_2	x_3	Δx_1	Δx_2	Δx_3
27	21,391	0,3391	13100	±0,39	±0,0091327	±341
28	21,391	0,7196	14100	±0,45	±0,0091327	±532
29	22,292	0,6671	15100	±0,39	±0,0027327	±339
30	26,396	0,7382	16100	±0,42	±0,0037372	±724
31	27,804	0,3776	17100	±0,37	±0,0029237	±560
32	39,919	0,6226	18100	±0,02	±0,0037129	±932

Таблиця 1.2

№	***Знайти похибку***	***Обчислити***
1	R=8,31 Дж/(мольК)	4·R·5,342·2,43≈
2	до=1,38 Дж/К	4k·6,824·1,43≈
3	F=9,65·10^7 Кл/моль	2F·6,07·1,277≈
4	e=1,60·10^{-19} Кл	2e·3,101·2,104≈
5	m_e=9,11·10^{-31} кг	2m_e·4,03·2,102≈
6	c=3,00·10^8 м/с	2з·11,103·14,02≈
7	σ=5,67·10^{-8} Вт/(м^2·К^2)	σ·1,102·10,3≈
8	b=2,90·10^{-3} м·К	2b·1,102·10,3≈
9	$З_1$=3,74 Вт·м^2	2C_1·3,144·9,31≈
10	G=6,67·10^{-7} м^3/(кг·с^3)	3G·5,894·1,104≈
11	h=6.63·10^{-34} Дж·с	4h·6,427·0,89≈
12	N_A=6,02·10^{23} моль	5N_A·9,148·0,191≈
13	ħ=1,05·10^{-34} Дж·с	ħ·2,794·1,883≈
14	R=2.07·10^{-18} с$^{-1}$	2R·9,199·1,01≈
15	a=5,29·10^{-11} м	6a·8,169·3,19≈
16	λ_c=2,43·10^{-12} м	6$\lambda_з$·9,919·1,101≈
17	e/m=1,76·10^{11} Кл/кг	2e/m·4,199·5,03≈
18	$\mu_Б$=9,27·10^{-24} Дж/Тл	7$\mu_Б$·9,144·5,67≈
19	ε_0=8,85·10^{-12} Ф/м	8ε_0·6,667·7,03≈
20	μ_0=4π·10^{-7} Гн/м	10μ_0·3,966·7,03≈
21	$v_з$=332 м/с	2$v_з$·6,293·1,101≈
22	n_a=2,42	2n_a·7,372·1,32≈
23	$n_в$=1,33	2$n_в$·8,974·1,92≈
24	$n_м$=1,60	3$n_м$·1,199·8,914≈
25	n_c=1,50	3n_c·2,199·10,9≈
26	$R_з$=6,37·10^6 м	2$R_з$·2,6·10,6≈

Продовження таблиці 1.2

№	***Знайти похибку***	***Обчислити***
27	$m_з$=5,98·10^{24} кг	2$m_з$·2,6·10,66≈
28	$R_{сол}$=6,95·10^{8} м	5$R_{сол}$·5,391·6,1≈
29	$m_{сол}$=1,98·10^{30} кг	7$m_{сол}$·2,01·3,111≈
30	$R_л$=1,74·10^{6} м	$R_л$·2,713·3,13≈
31	$m_л$=7,33·10^{22} кг	2$m_л$·7,824·3,13≈
32	$\varepsilon_в$=81	2$\varepsilon_в$·3,465·2,645≈

Завдання 2. Побудова графіків

Скориставшись правилами, наведеними вище, побудувати графік залежності ***I=f(U)***, що відповідає своєму варіанту завдання (абл... 1.3).

Таблиця 1.3

№	***Значення для побудови графіків***					
1	I (A)	5	7	10	12	16
	U (B)	30	37	50	67	80
2	I (A)	5,1	7,1	7,9	9,5	10
	U (B)	100	150	170	190	200
3	I (A)	25,5	40,2	45,2	53	60
	U (B)	50	80	90	110	120
4	I (A)	7	10	12	16	15
	U (B)	15	20	24	28	30
5	I (A)	10	12	15	16	18
	U (B)	20	26	30	31	36
6	I (A)	8	12	13	15	15
	U (B)	17	24	25	29	30
7	I (A)	5	5,6	6,2	6,5	7,3
	U (B)	100	110	125	130	145
8	I (A)	5	6	8,2	9	12,1
	U (B)	10	12	16	18	24
9	I (A)	5	6,5	8,8	10	12,5
	U (B)	11	13	17	20	25

Продовження таблиці 1.3

№	Значення для побудови графіків					
10	I (A)	6	6,5	11,5	12,5	14,7
	U (B)	12	13	22	24	29
11	I (A)	5	7,5	11,5	12,5	14,7
	U (B)	10	15	22	30	32
12	I (A)	7	9	9,1	14,5	20
	U (B)	14	18	19	29	40
13	I (A)	10,5	12	17	20	20
	U (B)	21	25	34	39	40
14	I (A)	10	13,5	20	23,5	28
	U (B)	20	27	40	47	55
15	I (A)	20	25	37	47	50
	U (B)	40	50	70	90	100
16	I (A)	35	38	40	42	46
	U (B)	70	76	80	84	90
17	I (A)	35	39	46	48,5	50
	U (B)	70	78	90	97	100
18	I (A)	5	6	7,8	8,6	10
	U (B)	10	12	15	17	20
19	I (A)	17	18	19	21	23
	U (B)	34	36	39	42	45
20	I (A)	23	25	28	31	33
	U (B)	47	50	57	63	65
21	I (A)	2,5	3	3,3	3,6	3,9
	U (B)	50	60	66	70	76
22	I (A)	5	8,5	13	19	20
	U (B)	10	17	27	37	40
23	I (A)	7,5	8	10	10,5	12,5
	U (B)	15	17	19	21	25
24	I (A)	5,6	7	13	15	25
	U (B)	11	15	25	30	50

Продовження таблиці 1.3

№	*Значення для побудови графіків*					
25	I (A)	3	6	7	8	10
	U (B)	7	12	15	17	20
26	I (A)	1,5	4	5	6	8
	U (B)	3	7	10	12	15
27	I (A)	5	6	8	8,5	9,5
	U (B)	100	120	150	170	180
28	I (A)	10	10,1	10,2	10,4	11
	U (B)	200	202	203	207	220
29	I (A)	5	5,5	6,7	6,8	7
	U (B)	106	110	130	135	140
30	I (A)	6,5	7	8	8,3	8,6
	U (B)	130	140	160	165	170
31	I (A)	8,5	9	10	10,3	10,5
	U (B)	170	180	200	205	210
32	I (A)	5	10,1	20,2	23	25
	U (B)	10	20	40	45	50

Завдання 3. Обчислення похибок прямих і непрямих вимірювань

Дано тіло у вигляді паралелепіпеда (рис. 1.2).

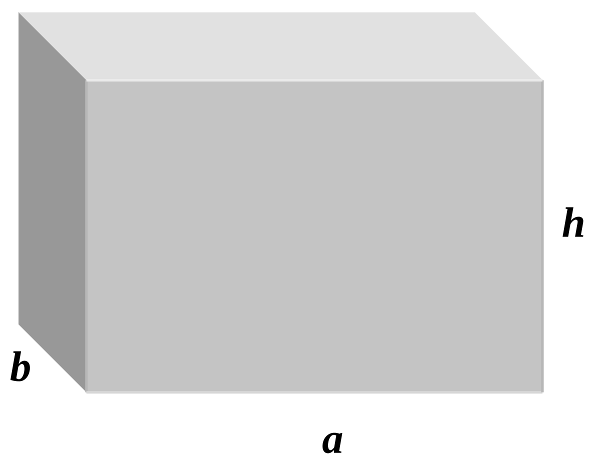


Рисунок 1.2

1) Виміряти його лінійні розміри за допомогою штангенциркуля. Отримані значення довжини ***a***, ширини ***b*** і висоти ***h*** занести до таблиці 1.4.

2) Обчислити середнє значення <***a***>:

$$\langle a \rangle = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3}$$

і результат занести до таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

№ п/п	***a***	***Δa***	***b***	***Δb***	***h***	***Δh***	***v***	***Δv***
1								
2								
3								
Середнє								

3) Розрахувати абсолютні похибки прямих вимірювань довжини:

4)

$$\Delta a_1 = \left| \langle a \rangle - a_1 \right|;$$
$$\Delta a_2 = \left| \langle a \rangle - a_2 \right|;$$
$$\Delta a_3 = \left| \langle a \rangle - a_3 \right|,$$

їхнє середнє значення:

$$\langle \Delta a \rangle = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3}{3}$$

і результати занести до таблиці 1.4.

5) Розрахувати відносну похибку:

6)

$$\varepsilon_a = \frac{\langle \Delta a \rangle}{\langle a \rangle}.$$

7) Аналогічно зробити обчислення для середніх значень ширини <***b***> і висоти <***h***>, записуючи результати обчислень у таблиці 1.4.

8) Записати результати прямих вимірювань у вигляді:

$$\boldsymbol{a}=<\boldsymbol{a}>\pm<\Delta \boldsymbol{a}>;\ \varepsilon_a=\dots\%\dots\dots$$

$$\boldsymbol{b}=<\boldsymbol{b}>\pm<\Delta \boldsymbol{b}>;\ \varepsilon_b=\dots\%\dots..$$

$$\boldsymbol{h}=<\boldsymbol{h}>\pm<\Delta \boldsymbol{h}>;\ \varepsilon_h=\dots\%\dots..$$

9) Обчислити значення об'єму паралелепіпеда:

$$\mathbf{v}=<\boldsymbol{a}>\ <\boldsymbol{b}>\ <\boldsymbol{h}>$$

і результат занести до таблиці 1.4.

10) Обчислити відносну похибку непрямих вимірювань об'єму:

$$\varepsilon=\frac{\Delta \boldsymbol{a}}{\boldsymbol{a}}+\frac{\Delta \boldsymbol{b}}{\boldsymbol{b}}+\frac{\Delta \boldsymbol{h}}{\boldsymbol{h}}.$$

11) Обчислити абсолютну похибку непрямого вимірювання об'єму:

$$\Delta\mathbf{v}=\varepsilon<\mathbf{v}>$$

і результат занести до таблиці 1.4.

12) Записати значення об'єму у стандартному вигляді, зробити необхідні заокруглення:

$$\mathbf{v}=<\mathbf{v}>\pm<\Delta\mathbf{v}>;\ \varepsilon=\dots\%\dots..$$

1.3 Контрольні питання

1 Сформулювати мету роботи.

2 Що таке фізична величина, і чи можливо виміряти її точне значення?

3 Які похибки вимірювань існують?

4 Які похибки вимірювань називають випадковими?

5 Що таке прямі і непрямі вимірювання і які величини вимірялися в роботі як прямі, а які – як непрямі?

6 Що таке абсолютні похибки вимірювань?

7 Що таке відносна похибка вимірювань?

8 Як визначаються абсолютна і відносна похибки в прямих і непрямих вимірюваннях?

9 Що таке стандартна форма запису результату і що вона відображає?

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 12 ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИНИ АТВУДА

Мета роботи: вивчити закони кінематики матеріальної точки, ознайомитися із будовою і принципом дії машини Атвуда, визначити шлях і швидкість рівномірного руху вантажів, визначити шлях, миттєву швидкість і прискорення при рівноприскореному русі вантажів машини Атвуда.

2.1 Стислі теоретичні відомості

Механічним рухом називають зміну із часом положення тіла або його частин відносно інших тіл. Визначення положення рухомого тіла в у будь-який момент часу, відносно інших тіл є основною задачею механіки.

При описуванні механічного руху, насамперед, необхідно вказати тіло відліку, тобто тіло, щодо якого розглядається зміна положення тіла, що рухається. Потім необхідно вибрати спосіб визначення положення тіла щодо тіла відліку. Для рішення цього завдання в механіку вводяться математичні моделі: матеріальна точка і абсолютно тверде тіло. ***Матеріальною точкою*** називають тіло, розмірами якого в даних умовах можна знехтувати (наприклад, у випадку, коли розміри тіла багато менші від відстаней до інших тіл). При цьому вважають, що вся маса тіла зосереджена в одній точці. ***Абсолютно твердим тілом*** називають тіло, для якого відстань між будь-якими двома точками залишається незмінною, тобто в цьому випадку нехтують деформаціями тіла в процесі руху.

Основною задачею кінематики є знаходження положення тіла в просторі в заданий момент часу без врахування причин, що спричинюють даний рух.

Положення матеріальної точки, що рухається, відносно точки відліку визначають за допомогою декартової системи координат, початок якої зв'язують із тілом відліку. Тоді сукупність трьох координат $\boldsymbol{x, y, z}$ (або радіус-вектор $\vec{\boldsymbol{r}}$) однозначно визначає положення матеріальної точки в просторі (рис. 2.1,а). Положення абсолютно твердого тіла задано, якщо відомі координати (або радіус-вектор $\vec{\boldsymbol{r}}$) однієї із точок тіла і орієнтація цього тіла відносно осей координат (кути α, β, γ на мал. 2.1,б).

Тіло відліку, пов'язана з ним система координат і прилад для вимірювання часу (годинник) утворять ***систему відліку***.

За допомогою системи відліку положення тіла, що рухається, визначається повністю. При подальшому розгляді механічного руху обмежимося вивченням руху матеріальної точки.

Уявна лінія, що описує матеріальна точка при русі, називається ***траєкторією***. Нехай матеріальна точка рухається з початкової точки $\boldsymbol{M_0}$ у кінцеву точку $\boldsymbol{M}$ кривою $\boldsymbol{M_0M}$. Відстань, пройдена матеріальною точкою її траєкторією, тобто довжину дуги $\boldsymbol{M_0M}$ називають ***пройденим шляхом,*** що позначається буквою $\boldsymbol{s}$. Вектор, проведений з початкової точки траєкторії в кінцеву, називається ***переміщенням***. На рисунку 2.1а вектор переміщення позначений як $\Delta\vec{\boldsymbol{r}}$. Неважко бачити, що переміщення дорівнює зміні радіуса-вектора:

$$\Delta\vec{\boldsymbol{r}} = \vec{\boldsymbol{r}} - \vec{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{o}} .$$

Довжина (модуль) вектора переміщення $|\Delta\vec{\boldsymbol{r}}|$ у загальному випадку не дорівнює пройденому шляху. Ці величини збігаються тільки для прямолінійного руху без зміни напрямку руху. З визначення вектора переміщення маємо вираз для радіуса-вектора:

$$\vec{\boldsymbol{r}} = \vec{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{o}} + \Delta\vec{\boldsymbol{r}} .$$

Отже положення матеріальної точки в даній системі відліку визначено, якщо відомі її початкове положення – вектор $\vec{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{o}}$ і переміщення

$\Delta\vec{r}$. Рівняння залежності радіуса-вектора від часу $\vec{r}(t)$ називають ***кінематичним рівнянням руху у векторному вигляді,*** а залежності координат від часу: $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ – називають ***кінематичними рівняннями руху в координатному вигляді*** або просто рівняннями руху.

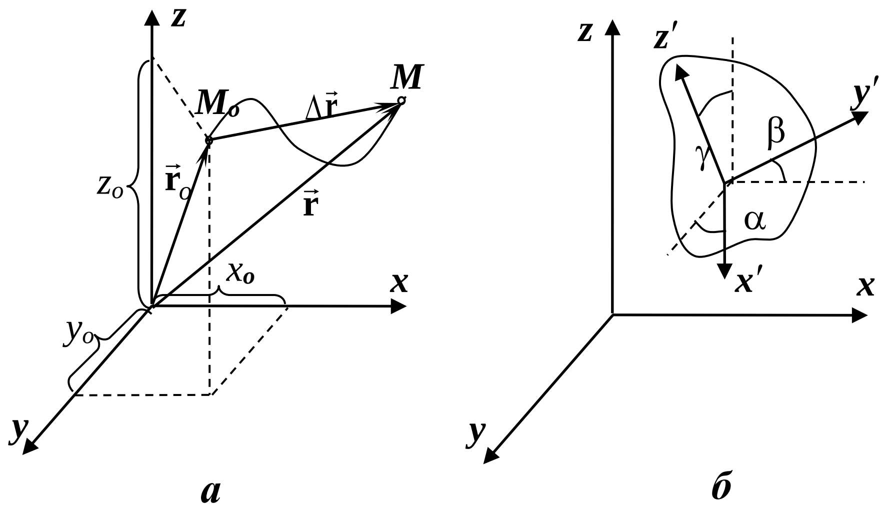


Рисунок 2.1

Зміну радіуса-вектора $\vec{r}$ із часом описують за допомогою векторної величини, що називається миттєвою швидкістю.

Миттєва швидкість – це межа, до якої прагне відношення переміщення $\Delta\vec{r}$ до проміжку часу Δt, за який це переміщення здійснене, при прагненні Δt до нуля:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}.$$

З курсу математики відомо, що така межа являє собою першу похідну функції $\vec{r}(t)$ за аргументом t. Тому

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}}. \tag{2.1}$$

Відзначимо, що векторне рівняння (2.1) являє собою векторний запис трьох скалярних рівнянь для проекцій вектора швидкості:

$$v_x = \frac{dx}{dt},\ v_y = \frac{dy}{dt},\ v_z = \frac{dz}{dt},$$

де ***x***, ***y***, ***z*** – координати матеріальної точки, т. е проекції радіуса-вектора $\vec{r}$ на осі декартової системи координат. Величину (модуль) вектора швидкості можна обчислити через проекції:

$$v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^{\ 2} + v_y^{\ 2} + v_z^{\ 2}} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} = \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}}{dt} = \frac{\sqrt{ds^2}}{dt} = \frac{ds}{dt},$$

або як похідну пройденого шляху від часу (для нескінченно малого переміщення $|\Delta\vec{r}| = ds$). Вектор $\vec{v}$ спрямований за дотичною до траєкторії руху.

Якщо відома залежність вектора швидкості від часу, то радіус-вектор матеріальної точки визначається з рівняння (2.1) шляхом інтегрування:

$$\vec{r} = \vec{r}_o + \int \vec{v}(t)dt. \qquad (2.2)$$

Для характеристики залежності швидкості від часу вводиться вектор ***прискорення***:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\dot{\vec{r}}\right) = \ddot{\vec{r}}, \qquad (2.3)$$

який показує, як швидко змінюється швидкість руху. За відомим прискоренням матеріальної точки можна знайти миттєву швидкість:

$$\vec{v} = \vec{v}_o + \int \vec{a}(t)dt, \qquad (2.4)$$

де $\vec{v}_0$ – швидкість на початку спостереження (початкова швидкість).

Формули (2.4), (2.2) розв’язують основне завдання механіки в рамках кінематики. Проілюструємо це на конкретних прикладах.

1) Рівномірний прямолінійний рух

Рівномірним прямолінійним рухом називається рух, при якому й величина, і напрямок вектора швидкості залишаються постійними: $\vec{v} = const$. Тоді з рівняння (2.2) одержуємо:

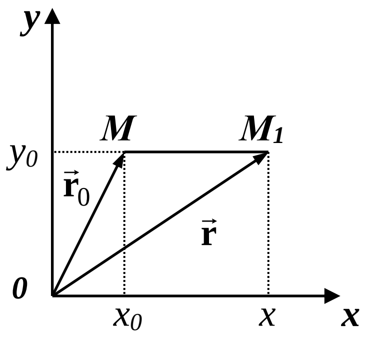


Рисунок 2.2

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}\int dt = \vec{r}_0 + \vec{v}t. \tag{2.5}$$

Відзначимо, що при прямолінійному русі напрямок однієї з координатних осей декартової системи координат зручно вибирати співпадаючою з напрямком руху. Тоді при русі тіла змінюється тільки одна координата, а дві інші залишаються постійними (рис. 2.2).

У проекціях на осі координат рівняння (2.5) набуде вигляду:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t, \\ y = y_0, \\ z = z_0. \end{cases} \tag{2.5a}$$

Формули (2.5а) вирішують основне завдання механіки у випадку рівномірного прямолінійного руху. З рівняння (2.5) знаходимо вектор переміщення:

$$\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_o = \vec{v}\,t,$$

а з формул (2.5а) – його проекції на осі координат:

$$\Delta x = x - x_o = v_x t.$$

Неважко бачити, що в цьому русі модуль вектора переміщення дорівнює пройденому шляху:

$$|\Delta\vec{r}| = |\Delta x| = v\,t = s.$$

2) Рівнозмінний прямолінійний рух *і* називають рух, при якому величина й напрямок вектора прискорення не змінюються з часом: $\vec{a} = const$. З рівняння (2.4) знаходимо залежність вектора швидкості від часу:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}\int dt = \vec{v}_0 + \vec{a}\,t \tag{2.6}$$

З формули (2.6) видно, що для того, щоб рух був прямолінійним, вектори $\vec{v}_0$ й $\vec{a}$ повинні бути спрямовані уздовж однієї прямої.

Якщо $\vec{v}_0$ й $\vec{a}$ спрямовані однаково, то модуль швидкості збільшується:

$$v = v_0 + at,$$

і рух називається ***рівноприскореним.*** При протилежному напрямку векторів $\vec{v}_0$ і $\vec{a}$ величина швидкості зменшується:

$$v = \left|\ v_0 - at\ \right|,$$

а рух називають ***рівносповільненим***.

Підставивши вираз (2.6) у формулу (2.2), одержимо залежність радіуса-вектора від часу:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \int(\vec{v}_0 + \vec{a}\,t)dt = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}\,t^2}{2}. \tag{2.7}$$

Формула (2.7) дає рішення основної задачі механіки для рівнозмінного руху. Переміщення матеріальної точки:

$$\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0 = \vec{v}_0 + \frac{\vec{a}\,t^2}{2}. \tag{2.8}$$

Модуль вектора переміщення збігається із пройденим шляхом, якщо не змінюється напрямок руху:

$$|\Delta\vec{r}| = s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2},$$

де знак «+» береться для рівноприскореного руху, а знак «-» – для рівносповільненого.

2.2 Опис установки і методу вимірювань

Для вимірювань параметрів руху в даній роботі використовується машина Атвуда (рис. 2.3).

Основою машини є корпус 1, на якому розміщена шкала із сантиметровими поділками. У верхній частині корпуса кріпиться блок 2, через який перекинута нитка з вантажами 3, що врівноважують одного. На вантажах зображені літери П – правий вантаж, і Л – лівий. Необхідно дотримуватися такого розташування вантажів. Маса правого вантажу трохи більше маси лівого, що дозволяє компенсувати дію сили тертя в блоці, завдяки чому вантажі рухаються рівномірно.

На корпусі перебуває рухливе кільце 4, що може бути закріплене в довільному місці шкали. На ньому вмонтований розімкнутий електричний контакт, включений в електричне коло електронного секундоміра.

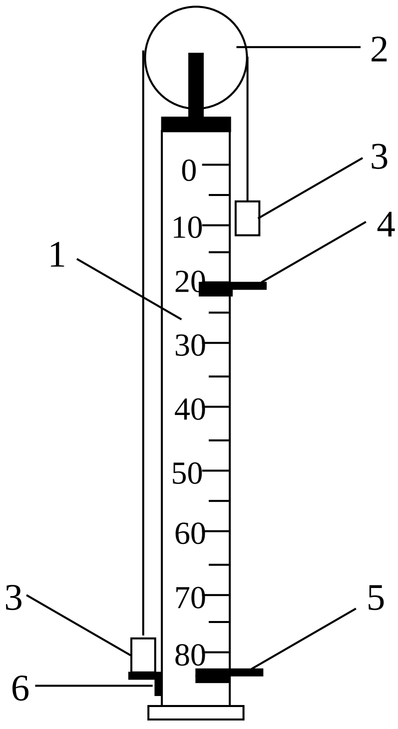


Рисунок 2.3

При замиканні контакту включається електронний секундомір, починаючи відлік часу. На корпусі закріплений також прийомний столик 5 і упор 6 для лівого вантажу. Прийомний столик може переміщатися уздовж шкали і фіксуватися в довільному місці шкали. У нього вмонтований вимикач електронного секундоміра, що спрацьовує від удару під час приймання вантажу. До установки додається перевантажень у вигляді латунного диска з розрізом. Цей диск розміщується на правому вантажі і під час проходження кільця 4 залишається на його поверхні, замикаючи контакт для включення електронного секундоміра.

Під дією перевантаження вантажі рухаються рівноприскорено. При проходженні кільця 4 перевантажень знімається, і вантажі продовжують рівномірний рух зі швидкістю, яку вони придбали за час прискореного руху. Одночасно включається секундомір, що вимірює час рівномірного руху між кільцем 4 і столиком 5.

Установка дозволяє вимірювати шлях s_1 прискореного руху від нульової поділки шкали до поділки, що відповідає положенню верхнього кільця 4. Шлях s_2 і час t_2 відповідають рівномірному руху між кільцем 4 і столиком 5. Відповідно обчислюється швидкість рівномірного руху:

$$v_2 = \frac{s_2}{t_2}. \qquad (2.9)$$

Ця швидкість є також максимальною швидкістю рівноприскореного руху на шляху s_1:

$$v_1 = v_2.$$

Тому що цей рух без початкової швидкості ($v_0=0$), то швидкість рівномірного руху на шляху s_2 дорівнює

$$v_1 = v_2 = at_1,$$

Тоді

$$s_1 = \frac{at_1^2}{2},$$

де t_1 – невідомий час на шляху s_1.

Із цих формул знаходимо:

$$t_1 = \frac{v_1}{a}, \qquad (2.10)$$

$$s_1 = \frac{av_2^{\ 2}}{2a^2} = \frac{v_1^{\ 2}}{2a},$$

або з урахуванням формули (2.9)

$$s_1 = \frac{s_2^{\ 2}}{2at_2^{\ 2}},$$

звідки виразимо прискорення

$$a = \frac{s_2^{\ 2}}{2s_1t_2^{\ 2}}. \qquad (2.11)$$

Формули (2.10) і (2.11) є розрахунковими для обчислення часу і прискорення в рівноприскореному русі.

2.3 Порядок виконання роботи

Завдання 1. Вивчення законів рівномірного руху

1 Закріпити рухоме кільце на відстані *0,10 м* від початку шкали.

2 Закріпити прийомний столик на відстані *0,23 м* від початку шкали і переконатися, що верхня грань вантажу, що стоїть на прийомному столику, перебуває на відстані *0,20 м* від початку шкали і *0,10 м* від рухливого кільця. Занести до таблиці 2.1 шлях рівномірного руху вантажу s=0,10 м.

3 Установити правий вантаж таким чином, щоб його верхня грань перебувала проти нульової поділки шкали. Збільшити його навантаження додатковим тягарем і припинити коливання вантажу. Включити електронний секундомір і підготувати його до роботи, скориставшись перемикачем з написом «сброс». Лівий вантаж утримується на упорі 6 (див. рис 2.3).

Таблиця 2.1

№ п/п	***s*, *м***	***t*, *з***	***v*, *м/с***	**Δ*v*, *м/с***
1				
2				
3				
4				
5				
Середнє				

4 Відпостити вантажі і спостерігати за рухом правого вантажу. Після проходження правого вантажу через кільце 5 повинен включитися секундомір, після удару вантажу об прийомний столик 5 секундомір повинен виключитися, зупиняючи відлік часу. Якщо не відбудеться нормального включення і вимикання секундоміра, перевірити контакти і повторити експеримент. Якщо секундомір спрацьовує нормально, занести час руху вантажу до таблиці 2.1.

5 Змістити вниз прийомний столик ще на *0,10 м* і, повторюючи дії пп. 2...4…4 відповідно для ***s*** = *0,30 м, 0,40 м, 0,50 м,* результати вимірювань записати у відповідні місця таблиці 2.1.

6 Обчислити за формулою (2.9) швидкості рівномірного руху для кожного з досліджуваних шляхів. Теоретично це повинен бути один і той самий результат. Знайти його середнє значення як середнє арифметичне отриманих значень швидкостей.

7 Обчислити абсолютні похибки для кожного зі значень швидкості, їхнє середнє значення і відносну похибку.

8 Записати результат вимірювання швидкості в стандартній формі.

9 Побудувати графік залежності шляху рівномірного руху від часу.

Завдання 2. Вивчення закономірностей рівноприскореного руху

1 У цьому випадку установити прийомний столик на відстані *0,83 м* від початку шкали, що відповідає відліку часу рівномірного руху до кінцевої точки шкали, верхньої грані вантажу. Перевірити справедливість цього.

2 Зафіксувати рухливе кільце на відстані *0,10 м* від початку шкали. Перевірити дію контактів. Занести до таблиці 2.2 відповідно значення шляхів $s_1 = 0{,}10$ *м*, пройденого при прискореному русі, і $s_2 = 0{,}70$ *м*, пройденого при рівномірному русі.

3 Зафіксувати упор 6 (див.рис. 2.3), таким чином, щоб при натисканні на нього лівого вантажу верхня грань правого перебувала на нульовій поділці шкали. Утримуючи лівий вантаж на упорі, збільшити навантаження на правому тягарі, додавши додатковий. Припинити коливання тягаря і скинути показання на електронному секундомірі.

Таблиця 2.2

№ п/п	s_2, м	t_2, с	V_2, м/с	s_1, м	t_1, с	a, м/с^2	Δa, м/с^2
1							
2							
3							
4							
5							
Середнє							

4 Звільнити вантажі і спостерігати їхній рух. По закінченні записати час t_2 рівномірного руху до таблиці 2.2.

5 Переміщаючи рухливе кільце, провести відповідні досліди для $s_1 = 0{,}20$ м, $s_2 = 0{,}60$ м; $s_1 = 0{,}30$ м, $s_2 = 0{,}50$ м; $s_1 = 0{,}40$ м, $s_2 = 0{,}40$ м. Відповідні дані і результати вимірювання часу t_2 рівномірного руху на шляху s_2 занести до таблиці 2.2.

6 Обчислити швидкість рівномірного руху v_2 (вона ж кінцева швидкість рівноприскореного руху) за формулою (2.9).

7 Обчислити прискорення a рівноприскореного руху за формулою (2.11). Теоретично ви повинні одержати однакові значення прискорення для всіх п'яти вимірів, тому що прискорювальний перевантажень у всіх дослідах один і той самий. Розрахувати середнє значення прискорення a як середнє арифметичне його значення. Дані занести до таблиці 2.2.

8 Обчислити абсолютні похибки вимірювання прискорення як похибки прямих вимірювань, середнє значення похибок і відносну похибку вимірювань.

9 Записати значення прискорення у стандартній формі.

10 Визначити час прискореного руху за формулою (2.10) і занести його до таблиці 2.2.

11 Побудувати графіки залежностей миттєвої швидкості $\boldsymbol{v_2}$ і шляху $\boldsymbol{s_2}$ від часу руху $\boldsymbol{t_2}$.

2.4 Контрольні питання

1 Сформулювати мету роботи.

2 Що називають механічним рухом?

3 У чому полягає основне завдання механіки і кінематики?

4 Що означає вивчити механічний рух з точки зору класичної механіки

5 У чому полягає принцип незалежності рухів, і в чому його цінність?

6 Що таке матеріальна точка? Як можна задати положення матеріальної точки в просторі?

7 Дати визначення радіуса-вектора, переміщення, швидкості і прискорення руху матеріальної точки. Як вони зв'язані між собою?

7 Який рух називають рівнозмінним? Запишіть формули, що описують рівнозмінний рух.

8 Поясниіть будову машини Атвуда. Як можна використати її для вивчення рівномірного і рівнозмінного рухів?

9 Виведіть розрахункові формули (2.9), (2.10) і (2.11).

10 Що таке абсолютна і відносна похибки вимірювань і чому, на ваш погляд, абсолютні похибки швидкості і прискорення обчислюються як похибки прямих вимірювань у проведених дослідженнях?

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 13

ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ СИЛИ УДАРУ

Мета роботи: вивчити закони динаміки, а також закони збереження імпульсу і енергії, познайомитися з теорією удару, визначити середню силу удару сталевої кульки об металеву плиту.

3.1 Стислі теоретичні відомості

З досліду відомо, що зміна швидкості тіла, тобто поява прискорення, завжди відбувається під впливом на дане тіло інших тіл. Для характеристики цих впливів вводиться поняття сили. Силою називають векторну величину, яка характеризує дію на дане тіло інших тіл, що приводить до появи прискорення й деформації тіла. При дії однакових сил на різні тіла швидкості цих тіл змінюються по-різному. Властивість тіла зберігати свою швидкість незмінної, якщо на нього не діють інші тіла або дія інших тіл скомпенсована, називається інертністю. Інертність тіл приводить до того, що миттєво змінити швидкість тіла неможливо – дія на нього іншого тіла повинна тривати певний час. Чим інертніше тіло, тим менше змінюється його швидкість за даний час. Кількісною мірою інертності є маса тіла.

Поняття маси тіла і сили, що діє на тіло, дозволяють кількісно описувати взаємодії різних тіл. Основою для такого описування є закони динаміки (закони Ньютона).

Перший закон. Існують такі системи відліку, які названі інерціальними, відносно яких тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, якщо на нього не діють інші тіла або дія інших тіл скомпенсована.

Другий закон. Сила, що діє на тіло, дорівнює швидкості зміни імпульсу цього тіла:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \tag{3.1}$$

Третій закон. Тіла взаємодіють із силами, рівними за величиною і протилежними за напрямком:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \tag{3.2}$$

Інерціальні системи відліку грають у механіці дуже важливу роль. По-перше, самі закони Ньютона справедливі тільки для інерціальних систем відліку. По-друге, для інерціальних систем відліку справедливий принцип відносності Галілея: всі механічні явища в інерціальних системах відліку протікають однаково. Перший закон Ньютона дає дослідний критерій, що дозволяє відповістити на запитання, чи є система відліку інерціальною чи ні.

Другий закон Ньютона є основним законом динаміки. Використовуючи визначення імпульсу тіла $\vec{p} = m\vec{v}$, рівняння (3.1) можна переписати у вигляді

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m\frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}$$

або

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \tag{3.3}$$

У рівнянні (3.3). прискорення, одержане тілом, є слідством дії на тіло (або на матеріальну точку) зовнішніх тіл (тобто сил) Це рівняння називають ***динамічним рівняннями руху***. Величина прискорення $\vec{a}$ залежить як від зовнішнього впливу (сили $\vec{F}$), так і від самого тіла (маси m). Тому що $\vec{a} = \ddot{\vec{r}}$, те рівняння (3.3) є диференціальне рівняння другого порядку відносно функції $\vec{r}(t)$. Рішення цього рівняння дає рішення основної задачі механіки – визначення положення тіла в будь-який момент часу. Якщо на дане тіло діють одночасно кілька інших тіл, тобто кілька сил, то під силою $\vec{F}$ в рівняннях (3.1), (3.3) треба розуміти рівнодіючу всіх цих сил:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i .$$

У даній роботі визначається сила, що діє на сталеву кульку при ударі об сталеву плиту. Ударом називається короткочасна взаємодія двох тіл. Якщо відома залежність імпульсу від часу $\vec{p}(t)$ хоча б для одного із тіл, то силу удару можна визначити з рівняння (3.1). Однак експериментальний метод, запропонований у роботі, не дає такої можливості. У роботі визначається повна зміна імпульсу $\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$ і час τ, за який ця зміна відбулася, тобто час удару.

За цими даними можна визначити середню силу удару:

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\tau} = \frac{\vec{p}_2 - \vec{p}_1}{\tau}\,. \tag{3.4}$$

Для знаходження зміни імпульсу кульки $\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$ розглянемо центральний абсолютно пружний удар кульки масою m об нерухоме тіло масою M (рис. 3.1).

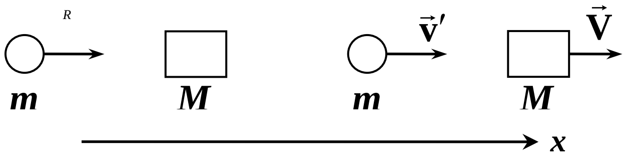


Рисунок 3.1

Удар називають центральним, якщо швидкості тіл що взаємодіють, спрямовані уздовж однієї прямої. Удар називається абсолютно пружним, якщо механічна енергія тіл не переходить в інші види енергії. При такому ударі кінетична енергія тіл, що стикаються, повністю або частково переходить у потенціальну енергію пружної деформації. Потім тіла повертають свою попередню форму, відштовхуючись одне від одного. При цьому потенціальна енергія пружної деформації знову переходить у кінетичну, і тіла розлітаються зі швидкостями, величина і напрямок яких визначаються двома умовами – збереженням повної енергії та імпульсу взаємодіючих тіл. Тому маємо два рівняння: закон збереження імпульсу (3.5) та закону збереження механічної енергії (3.6):

$$m\vec{v} = m\vec{v}' + M\vec{V}\,, \tag{3.5}$$

$$\frac{m\vec{v}^2}{2} = \frac{m(\vec{v}')^2}{2} + \frac{M\vec{V}^2}{2}\,, \tag{3.6}$$

де $\vec{v}$ й $\vec{v}'$ – швидкості кульки до зіткнення і після нього;

$\vec{V}$ – швидкість тіла масою M після удару об нього кульки. Рівняння (3.5) є закон збереження імпульсу, а рівняння (3.6) – закон збереження механічної енергії для ситуації, показаної на рисунку 3.1. Рішення рівнянь (3.5), (3.6) відносно змінних $\vec{v}'$ і $\vec{V}$ приводить до виразів:

$$\vec{v}' = \frac{(m - M)\vec{v}}{m + M}, \tag{3.7}$$

$$\vec{V} = \frac{2m\vec{v}}{m + M}. \tag{3.8}$$

За допомогою формул (3.7), (3.8) можна визначити швидкість кулі до удару об нерухоме тіло, яке можна розглядати як тіло нескінченно великої маси.

При $M \to \infty$ з виражень (3.7), (3.8) одержуємо:

$$\vec{v}' = -\vec{v}, \quad \vec{V} = 0, \tag{3.9}$$

тобто швидкість кулі змінюється за напрямком на протилежний, але не змінюється за величиною. Використовуючи рівності (3.9), знаходимо, що зміна імпульсу кулі після абсолютно пружного удару об нерухоме тіло дорівнює $\Delta\vec{p} = -2m\vec{v}$, і вираз (3.4) для середньої сили удару набуває вигляду:

$$\vec{F} = \frac{-2m\vec{v}}{\tau},$$

або в скалярному вигляді:

$$F = \frac{2mv}{\tau}. \tag{3.10}$$

Формула (3.10) є розрахунковою у даній лабораторній роботі.

3.2 Опис установки і методу вимірювань

Для реалізації методу використовується експериментальна установка, схематичне зображення якої наведене на рисунку 3.2. Досліджується удар між кулькою 1 (рис. 3.2, а) і масивним тілом у вигляді циліндра 2. Циліндр розташований на плиті 3. Сталева кулька підвішена шарнірно в точці ***A*** за допомогою гнучкого провідника на штативі 4. На цьому ж штативі закріплений електромагніт 5. При дотику кульки до електромагніта вона притягується, її центр ваги перебуває на рівні шарніра ***A*.**

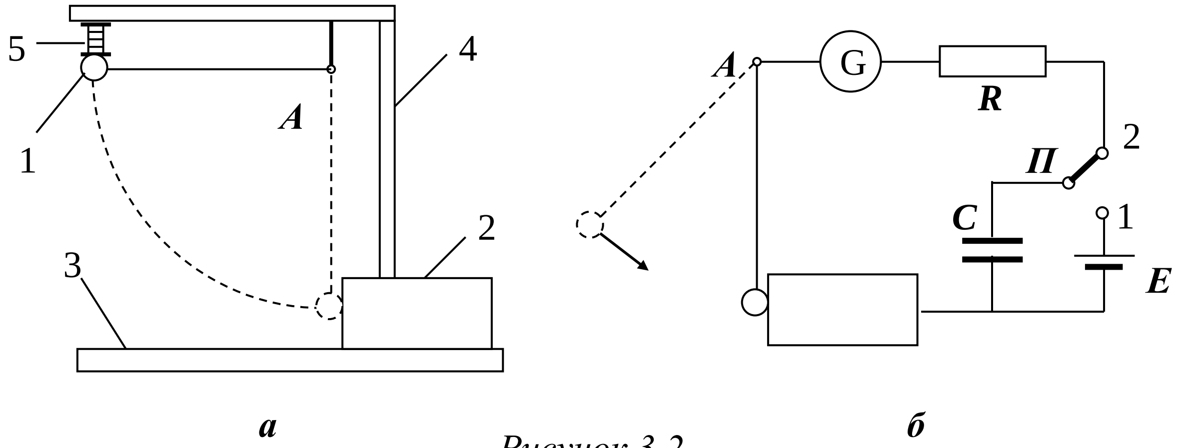


Рисунок 3.2

Електричне коло установки (див.рис. 2,б) призначене для визначення часу тривалості удару кульки об циліндр і для живлення магніту

Електричне коло живиться від батареї ***E*** (або від мережі змінного струму через випрямляч).

Час тривалості удару визначається як час розрядки конденсатора при зіткненні кульки з циліндром. Закон розрядки конденсатора дозволяє визначити час розрядки і тим самим час тривалості удару.

Конденсатор ***C*** включений паралельно батареї ***E***; його зарядка і розрядка здійснюються перемикачем ***П***, що має два положення, позначених на схемі цифрами 1 і 2. У положенні 1 конденсатор одержує деякий заряд ***Q***, причому одночасно включається електромагніт, що може втримувати кульку у верхньому положенні (див.рис. 3.2,а). Перемикання перемикача в положення 2 виключає живлення електромагніту і звільняє кульку, одночасно включаючи конденсатор в коло, що має крім конденсатора резистор опором ***R***, балістичного гальванометра ***G***, гнучкий провідник, кульку і циліндр. Це коло замикається тільки під час контакту кульки із циліндром, тобто під час удару.

Розряд конденсатора відбувається за законом

$$I = -\frac{dq}{dt} = \frac{U}{R},$$

де $U = q/C$ – напруга на конденсаторі. Швидкість зміни заряду на конденсаторі дорівнює:

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{RC}q. \tag{3.11}$$

Рівняння (3.11) являє собою диференціальне рівняння з роздільними змінними. Інтегрування дає такий результат:

$$\int_Q^{q'} \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC}\int_0^{\tau} dt \Rightarrow \tau = RC\, ln\frac{Q}{q'}, \tag{3.12}$$

де Q – початковий заряд конденсатора, що вимірюється за відхиленням стрілки балістичного гальванометра при повній розрядці конденсатора (кулька дотикається до циліндра, а перемикач ***П*** перебуває в положенні 2;

q' – заряд, що залишиться на конденсаторі після закінчення контакту кульки із циліндром при ударі. Заряд $q' = Q - q$, де q – заряд, що пройде через балістичний гальванометр під час удару.

Ціна поділки гальванометра (балістична постійна) – β, тому $Q = \beta n_0$, а $q = \beta n$, де n_0 і n – відповідні відхилення стрілки балістичного гальванометра при повній розрядці конденсатора і під час удару. Час удару кульки визначається за формулою

$$\tau = RC\, ln\frac{n_0}{n_0 - n}. \tag{3.13}$$

Якщо вважати, що удар кулі об плиту абсолютно пружний, то швидкість кулі, що рухається в полі сили тяжіння, можна визначити із закону збереження енергії:

$$mgh = \frac{mv^2}{2}. \tag{3.14}$$

З огляду на те, що в початковому стані (див.рис. 3.2,а) $h = l$, з рівняння (3.14) одержуємо формулу для визначення швидкості кулі:

$$v = \sqrt{2gl}. \tag{3.15}$$

3.3 Порядок виконання роботи

1 Вивчити експериментальну установку і записати в таблиці 3.1 значення маси кулі m, ємності конденсатора C і опору електричного кола R.

2 Виміряти за допомогою лінійки з міліметровою шкалою відстань від точки підвісу до центра кульки й результат занести до таблиці 3.1.

3 Включити установку в мережу на *220 В* і перевірити працездатність всіх її систем: електромагніт повинен притягати кульку в положенні перемикача “зарядка” і звільняти в положенні “розряд”; конденсатор повинен заряджатися і розряджатися, а гальванометр повинен давати відповідні відхилення стрілки.

4 Перемикач із положення “заряд” перевести в положення “розряд”, коли кулька перебуває в контакті із циліндром. Зафіксувати відхилення стрілки гальванометра n_0. Дослід повторити 5 разів, знайти середнє значення n_0 і записати його в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

L, м	*v, м/с*	*m, кг*	*C, Ф*	*R, Ом*	n_0

5 Установити перемикач у положення “заряд” і привести кульку в зіткнення з нижньою поверхнею сердечника електромагніта.

6 Перевести перемикач у положення “розряд” і зафіксувати максимальне відхилення ***n*** стрілки гальванометра. При цьому не можна допускати повторні удари кульки об циліндр. Дослід повторити 5 разів. Дані спостережень занести до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

№ досліду	***n***	τ, з	***F*, кН**	**Δ*F*, *кН***	**ε**
1					
2					
3					
4					
5					
Середнє:					

3.4 Обробка результатів дослідження

1 Розрахувати за формулою (3.15) значення швидкості кулі і записати в таблиці 3.2.

2 Розрахувати за формулою (3.13) тривалість удару τ,. занести до таблиці 3.2.

3 Розрахувати для кожного з п'яти випадків значення середньої сили удару за формулою (3.10). Визначити середнє значення сили для п'яти результатів як середнє арифметичне. Результати обчислень занести до таблиці 3.1.

4 Обчислити абсолютні похибки вимірювання середньої сили удару як похибки прямих вимірювань.

5 Обчислити відносну похибку вимірювань, скориставшись середніми значеннями сили F і абсолютної похибки ΔF .

6 Записати результат вимірювання в стандартній формі.

3.5 Контрольні питання

1 Сформулювати основні закони механіки Ньютона. Межі їхньої застосовності.

2 Що таке інерція тіла? Навести приклади використання інерції тіл.

3 Дати визначення сили і маси тіла. В яких одиницях вони вимірюються?

4 Що таке імпульс тіла?

5 Навести формулювання другого закону Ньютона, використовуючи імпульс тіла.

6 Сформулювати закон збереження імпульсу.

7 Дати визначення механічної, потенціальної та кінетичної енергії тіла. Навести приклади.

8 Що називається механічною роботою?

9 Сформулювати закон збереження і перетворення механічної енергії. В яких випадках його застосування не має сенсу?

10 Що являє собою експериментальна установка?

11 Чому в роботі визначається середня сила удару?

12 У чому полягає дослідницький метод?

13 Як визначається час удару?

14 Як визначається зміна імпульсу? Вивести відповідні розрахункові формули.

15 Чому при такій маленькій масі кульки ви одержали досить велике значення сили удару?

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 14

ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ МАХОВИКА

Мета роботи: вивчити закони кінематики і динаміки обертального руху, установити залежність кутового прискорення від моменту сили, визначити момент інерції маховика.

4.1 Стислі теоретичні відомості

Абсолютно твердим тілом називається тіло, деформацією якого в умовах даного завдання можна знехтувати. Відстань між будь-якими двома точками абсолютно твердого тіла не змінюється при його русі.

Поступальним рухом твердого тіла називається такий його рух, при якому будь-яка пряма, жорстко пов'язана з тілом, залишається паралельної самої собі. При поступальному русі вектори швидкості й прискорення всіх точок твердого тіла збігаються. Для опису поступального руху твердого тіла досить описати рух однієї його точки (звичайно вибирається центр мас).

Обертальним рухом твердого тіла називається такий його рух, при якому всі точки тіла рухаються дугами кіл, а центри всіх кіл лежать на одній прямій, що називається ***віссю обертання***.

Усякий складний рух твердого тіла можна розкласти на поступальний і обертальний. При цьому вісь обертання можна провести через будь-яку точку тіла (найчастіше вона проводиться через центр мас). Напрямок осі обертання при довільному русі може змінюватися, положення її в кожен момент часу називається ***миттєвою віссю обертання***.

Тверде тіло, що обертається навколо нерухомої осі, має один ступінь вільності його положення в просторі повністю визначається величиною ***кута повороту*** $\boldsymbol{\varphi}$ з початкового положення. У кінематиці обертального руху кут повороту тіла вважається вектором, з його допомогою задається напрямок осі обертання.

Зміна кута повороту при обертальному русі в кожен момент часу характеризується ***кутовою швидкістю***, що дорівнює першій похідній кута повороту за часом:

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{d\boldsymbol{\varphi}}{dt}. \tag{4.1}$$

Як і кут повороту, кутова швидкість вважається вектором, спрямованим уздовж осі обертання. Вектори кута повороту і кутової швидкості спрямовані уздовж осі так, щоб з їхніх кінців обертання тіла було видно проти руху годинникової стрілки, тобто відповідно до ***правила правого гвинта або буравчика***, (рис. 4.1).

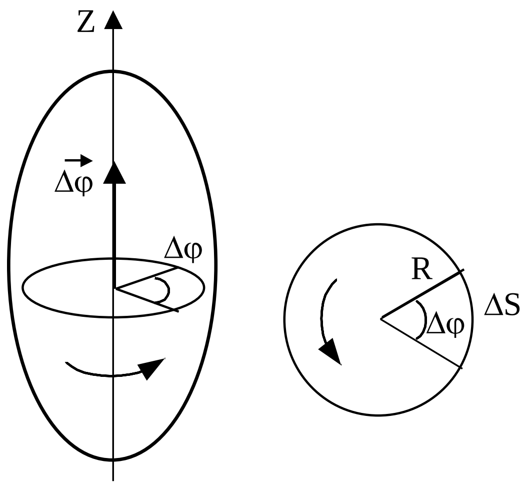


Рисунок 4.1

Рівномірне обертання тіла спостерігається, якщо чисельне значення його кутової швидкості не змінюється із часом, тобто ω=const. Тоді кут повороту лінійно залежить від часу:

$$\boldsymbol{\varphi = \omega t}. \tag{4.2}$$

Періодом обертання називається проміжок часу T, протягом якого тіло, рівномірно обертаючись із кутовою швидкістю ω, робить один повний оборот (φ=2π):

$$\boldsymbol{T = \frac{2\pi}{\omega}}. \tag{4.3}$$

Частота обертання

$$\boldsymbol{n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}} \tag{4.4}$$

показує кількість оборотів, здійснених тілом за одиницю часу при рівномірному обертанні.

При нерівномірному обертанні тіла навколо нерухомої осі його рух характеризується також ***кутовим прискоренням***

$$\boldsymbol{\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}}. \tag{4.5}$$

Кутове прискорення теж вважається вектором, спрямованим уздовж осі обертання. Його напрямок збігається з напрямком кутової швидкості, якщо вона збільшується, і протилежно, якщо кутова швидкість зменшується.

Рівнозмінне обертання тіла відбувається, якщо чисельне значення його кутового прискорення не змінюється з часом, тобто $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{const}$. У цьому випадку залежність від часу кутової швидкості і кута повороту задається формулами:

$$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega_0} + \boldsymbol{\varepsilon t}, \tag{4.6}$$

$$\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\omega_0 t} + \frac{\boldsymbol{\varepsilon t^2}}{\boldsymbol{2}}, \tag{4.7}$$

де $\boldsymbol{\omega_0}$ – значення кутової швидкості в початковий момент часу.

Величина лінійної швидкості довільної точки твердого тіла, що обертається навколо нерухомої осі, може бути визначена за формулою

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\omega R}, \tag{4.8}$$

де $\boldsymbol{R}$ – відстань від точки до осі обертання.

Швидкість спрямована за дотичною до кола, що описує точка при обертальному русі тіла. Величини тангенціального і нормального прискорень визначаються за формулами:

$$\boldsymbol{a_\tau} = \boldsymbol{\varepsilon R}, \tag{4.9}$$

$$\boldsymbol{a_n} = \boldsymbol{\omega^2 R}. \tag{4.10}$$

Моментом сили $\vec{\boldsymbol{F}}$ відносно нерухомої точки (початку відліку) називається векторна величина $\vec{\boldsymbol{M}}$, що дорівнює векторному добутку радіуса-вектора, проведеного в точку прикладання сили $\vec{\boldsymbol{F}}$ на цю силу.

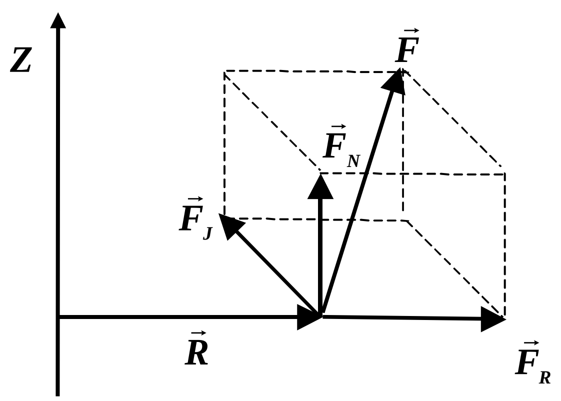


Рисунок 4.2

Моментом сили $\vec{\boldsymbol{F}}$ відносно нерухомої осі $\boldsymbol{Z}$ називається скалярна величина $\boldsymbol{M_Z}$, що дорівнює проекції на цю вісь вектора $\vec{\boldsymbol{M}}$ моменту сили $\vec{\boldsymbol{F}}$ відносно довільної точки осі. Значення моменту $\boldsymbol{M_Z}$ не залежить від вибору положення точки на осі. Величина моменту сили відносно осі визначається формулою

$$\boldsymbol{M_Z = RF_\tau}, \tag{4.11}$$

де $\boldsymbol{R}$ – відстань від осі до точки прикладання сили,

$\boldsymbol{F_\tau}$ – складова сили, перпендикулярна осі і відрізку $\boldsymbol{R}$ (рис. 4.2).

Моментом імпульсу матеріальної точки відносно нерухомої точки (початку відліку) називається векторна величина $\vec{\boldsymbol{L}}$, що дорівнює векторному добутку радіуса-вектора $\vec{\boldsymbol{r}}$, що визначає положення матеріальної точки, на її імпульс.

Моментом імпульсу системи матеріальних точок відносно нерухомої точки (початку відліку) називається векторна сума моментів імпульсів всіх матеріальних точок системи відносно цієї точки.

Моментом імпульсу системи матеріальних точок відносно нерухомої осі $\boldsymbol{Z}$ називається скалярна величина $\boldsymbol{L_Z}$, що дорівнює проекції на цю вісь вектора $\vec{\boldsymbol{L}}$ моменту імпульсу системи матеріальних точок відносно довільної точки осі. Значення моменту $\boldsymbol{L_Z}$ не залежить від вибору положення точки на осі.

Похідна моменту імпульсу системи матеріальних точок за часом дорівнює сумарному моменту зовнішніх сил, що діють на систему.

$$\boldsymbol{\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}}. \tag{4.12}$$

Векторне співвідношення (4.12) зберігає свою силу і для проекцій векторів момента імпульсу і момента сили на вісь обертання $\boldsymbol{Z}$.

$$\frac{dL_z}{dt} = M_z.$$

Абсолютно тверде тіло при описуванні його обертального руху розділяється подумки на настільки малі частини, що їх можна вважати матеріальними точками. Рух його описується як рух системи матеріальних точок, всі відстані між якими залишаються незмінними. Для такої системи можна визначити ***момент інерції*** відносно нерухомої осі обертання $\boldsymbol{Z}$ за формулою

$$\boldsymbol{J_Z = \sum_{i=1}^{N} m_i R_i^2}, \tag{4.13}$$

де $\boldsymbol{m_i}$ – маса ***і-й*** частини системи; $\boldsymbol{R_i}$ – відстань від частинки до осі обертання.

У випадку твердого тіла сума перетвориться на інтеграл за об'ємом тіла:

$$\boldsymbol{J_Z = \int_{(V)} R^2 \rho \, dV}, \tag{4.14}$$

де $\boldsymbol{\rho}$ – густина речовини. Момент інерції тіла відносно довільної осі можна виразити через його момент інерції відносно осі, що проходить через центр мас і паралельно даній осі, за допомогою ***теореми Штейнера:***

$$\boldsymbol{J_z = J_c + md^2}, \tag{4.15}$$

де $\boldsymbol{J_C}$ – момент інерції відносно осі, що проходить через центр мас;

$\boldsymbol{m}$ – маса тіла;

$\boldsymbol{d}$ – відстань між осями.

У таблиці 4.1 наведені формули визначення моментів інерції ряду симетричних тіл, розрахованих за формулою (4.14).

Через момент інерції може бути виражений момент імпульсу твердого тіла, що обертається відносно осі обертання $\boldsymbol{Z}$:

$$\boldsymbol{L_z = J_z \omega}. \tag{4.16}$$

Підстановка виразу (4.16) у формулу (4.12) дозволяє одержати ***основний закон динаміки обертального руху:***

$$\varepsilon = \frac{M_z}{J_z}, \qquad (4.17)$$

відповідно другому закону Ньютона для поступального руху.

Таблиця 4.1

Тіло	***Положення осі Z***	***Момент інерції J_z***
Порожній тонкостінний циліндр радіуса R і маси m	Вісь циліндра	mR^2
СуМетаний циліндр (диск) радіуса R і маси m	Вісь циліндра	$\frac{1}{2}mR^2$
Куля радіуса R і маси m	Вісь, що проходить через центр кулі	$\frac{2}{5}mR^2$
Тонкостінна сфера радіуса R і маси m	Вісь, що проходить через центр сфери	$\frac{2}{3}mR^2$
Прямий тонкий стрижень довжини l і маси m	Вісь, перпендикулярна стрижню й минає через його середину	$\frac{1}{12}ml^2$
Прямий тонкий стрижень довжини l і маси m	Вісь, перпендикулярна стрижню й минає через його кінець	$\frac{1}{3}ml^2$

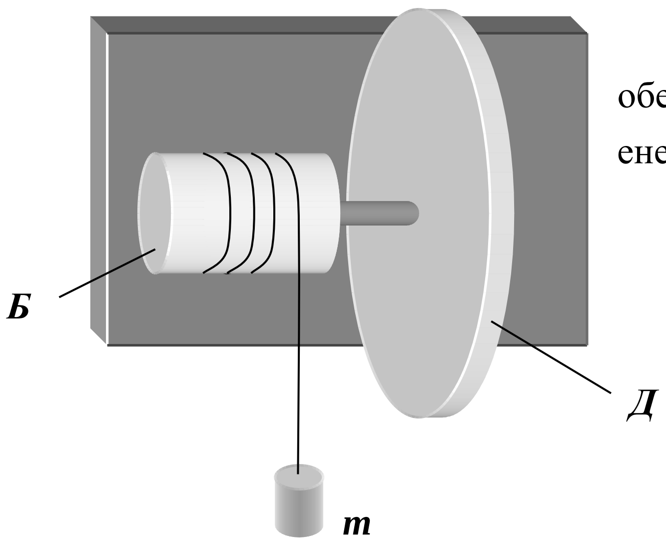


Рисунок 4.3

Тверде тіло, що здійснює обертальний рух, має кінетичну енергію:

$$T = \frac{J_z \omega^2}{2}. \qquad (4.18)$$

4.2 Опис установки та методу вимірювань

Маховик (рис. 4.3) являє собою металевий диск ***Д***, що щільно сидить на валі. Кінці вала проходять через підшипники в спеціальних опорах, завдяки чому вал може обертатися з дуже малим тертям. Центр мас маховика перебуває на осі обертання. На осі обертання закріплений пустотілий барабан ***Б***, на який намотується нитка. Один кінець нитки прикріплюється до барабана, до іншого кінця підвішується вантаж масою ***m***, що приводить всю систему в рівноприскорений рух. Величина кутового прискорення маховика визначається основним законом динаміки обертального руху (4.17).

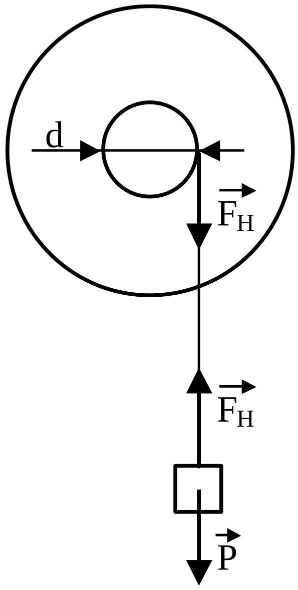


Рисунок 4.4

Безпосередньо на барабан (рис. 4.4) діє сила натягу $\boldsymbol{F_H}$ нитки, момент якої відносно осі обертання дорівнює:

$$\boldsymbol{M_H = F_H\, R = \frac{F_H\, d}{2}}\ , \tag{4.19}$$

де $\boldsymbol{d}$ – діаметр барабана. Крім того, у підшипниках діє сила тертя, момент якої $\boldsymbol{M_{TP}}$ спрямований у протилежний бік стосовно $\boldsymbol{M_H}$. Сумарний момент сил відносно осі обертання:

$$\boldsymbol{M_Z = M_H + M_{TP}}. \tag{4.20}$$

З виразів (4.20) і (4.17) можна одержати формулу для визначення моменту інерції

$$\boldsymbol{J_Z = \frac{M_H - M_{TP}}{\varepsilon}}. \tag{4.21}$$

Вантаж рухається з прискоренням $\boldsymbol{a}$, яке можна визначити, вимірюючи час опускання $\boldsymbol{t}$ вантаж з висоти $\boldsymbol{h}$:

$$\boldsymbol{a = \frac{2h}{t^2}}. \tag{4.22}$$

За другим законом Ньютона маємо:

$$\boldsymbol{ma} = \boldsymbol{mg} - \boldsymbol{F_H},$$

де $\boldsymbol{mg}$ – величина сили тяжіння вантажу. Звідси визначимо величину сили натягу:

$$\boldsymbol{F_H} = \boldsymbol{m}\,(\boldsymbol{g} - \boldsymbol{a}).$$

Момент цієї сили визначається за формулою

$$\boldsymbol{M_H} = \frac{\boldsymbol{m\,(g-a)d}}{\boldsymbol{2}}. \qquad (4.23)$$

Прискорення вантажу $\boldsymbol{a}$ дорівнює за величиною тангенціальному прискоренню всіх точок поверхні барабана, на який намотана нитка. Це дозволяє за формулою (4.9) знайти кутове прискорення барабана і маховика:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\boldsymbol{a}}{\boldsymbol{R}} = \frac{\boldsymbol{2a}}{\boldsymbol{d}}. \qquad (4.24)$$

4.3 Порядок виконання роботи

1 Виміряти штангенциркулем і записати величину діаметра барабана $\boldsymbol{d}$.

2 Прикріпити до вільного кінця нитки вантаж масою *0,050 кг* і установити його на висоті $\boldsymbol{h}$ = *1,00 м* від підлоги. Виміряти час $\boldsymbol{t}$ опускання вантажу із цієї висоти, включаючи секундомір у момент звільнення вантажу й виключаючи його в момент торкання підлоги або стільця. Результат записати в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

№	m, *кг*	t, *с*	a, *м/с*^{2}	M_H,*Н·м*	ε, *рад/с*^{2}	J_z, *кг·м*^{2}	ΔJ_z, *кг·м*^{2}
1	0,050						
2	0,100						
3	0,150						
4	0,200						
5	0,250						
6	0,300						
Середні значення							

3 Описані в пункті 2 вимірювання повторити для вантажів з масами, заданими в таблиці 4.2. Отримані значення часу руху t кожного з них записати в таблиці 4.2.

4 За формулою (4.22) обчислити значення прискорення вантажів і записати їх у таблиці 4.2.

5 За формулою (4.23) обчислити значення моментів сили натягу M_H і записати їх у таблиці 4.2.

6 За формулою (4.24) обчислити значення кутових прискорень маховика ε і записати їх у таблиці 4.2.

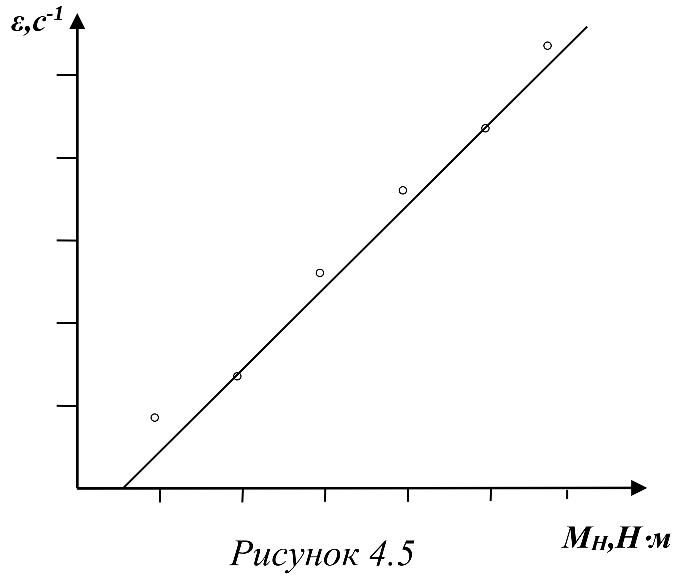


Рисунок 4.5

7 Побудувати графік залежності кутового прискорення $\boldsymbol{\varepsilon}$ від моменту сили натягу $\boldsymbol{M_H}$ (зразок наведений на рис. 4.5). Продовжити пряму графіка до перетину з віссю $\boldsymbol{M_H}$, точка перетину відповідає величині моменту сили тертя $\boldsymbol{M_{TP}}$. Записати його значення.

8 За формулою (4.21) обчислити значення моментів інерції обертальної системи $\boldsymbol{J_Z}$, записати їх у таблиці 4.2.

9 Закінчити заповнення таблиці 4.2 , обчисливши і вписавши в неї середнє значення моменту інерції $\boldsymbol{J_Z}$, абсолютні похибки вимірювань моменту інерції, середню абсолютну похибку.

10 Обчислити відносну похибку визначення моменту інерції $\boldsymbol{J_Z}$, записати остаточний результат визначення $\boldsymbol{J_Z}$ у стандартній формі.

11 Виміряти діаметр і товщину маховика, обчислити його момент інерції за формулою з таблиці 4.1. Густина сталі маховика дорівнює

$$\rho = 7{,}85\cdot 10^3\, 7{,}85\cdot 10^3 \ \boldsymbol{кг/м^3}.$$

Порівняти результат обчислення з результатом вимірювань.

12 Записати результат вимірювання моменту інерції у стандартній формі.

4.4 Контрольні запитання

1 Що називається абсолютно твердим тілом?

2 Які рухи може здійснювати абсолютно тверде тіло?

3 Який рух називається обертальним?

4 Які кінематичні величини характеризують обертальний рух?

5 Що називається кутом повороту?

6 Що називається кутовою швидкістю?

16 Чим відрізняється кутова швидкість від середньої кутової швидкості?

17 Як залежить кут повороту від часу при рівномірному обертальному русі?

18 Що називається кутовим прискоренням?

19 Від чого залежать кутова швидкість і кут повороту при рівнозмінному обертальному русі?

20 Як зв'язані лінійні величини з кутовими?

21 Що називається моментом сили?

22 Що називається моментом імпульсу відносно початку координат? Який зв'язок між моментом сили і моментом імпульсу?

23 Що називається моментом сили і моментом імпульсу відносно осі обертання?

24 Що таке момент інерції матеріальної точки? Як виражається момент імпульсу для матеріальної точки?

25 Як визначається момент інерції твердого тіла відносно осі обертання? Від чого він залежить?

26 Як визначити момент інерції відносно осі, що не проходить через центр мас?

27 Сформулювати основний закон динаміки для обертального руху твердого тіла. Порівняти його з законом динаміки для поступального руху.

28 Чому дорівнює кінетична енергія тіла, що здійснює обертальний рух?

29 Чому сила натягу, що розкручує маховик, відрізняється від тяжіння вантажу?

30 Які зміни енергії відбуваються у процесі розкручування маховика?

31 За якими формулами визначається абсолютна похибка окремого вимірювання, середня абсолютна похибка, відносна похибка вимірюваної величини?

32 Скільки значень відносної похибки варто обчислити?

33 Сформулювати правила заокруглення і запису кінцевого результату вимірювань і його абсолютної похибки.

5 ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 21

ВИЗНАЧЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ ГАЗОВОЇ ПОСТІЙНОЇ

Мета роботи: ознайомитися із законами ідеального газу, рівнянням Менделєєва-Клапейрона і основним законом молекулярно-кінетичної теорії газів, дослідним шляхом визначити універсальну газову постійну.

5.1 Стислі теоретичні відомості

Механіка вивчає рухи тіл, які відбуваються через різні впливи на них. Але зовнішні впливи викликають також зміни властивостей тіл, тобто зміни їхніх станів. Ці властивості і їхні зміни вивчаються в рамках молекулярної фізики і термодинаміки.

Молекулярна фізика, базується на законах статистики і молекулярно-кінетична теорії. Усі тіла складаються із дрібних, невидимих оком частинок – молекул. Молекула зберігає фізичні властивості тіла. В основі МКТ лежать основні положення: молекули рухаються безперервно і хаотично; швидкість їх руху залежить від температури; Молекули взаємодіють між собою з силами притягання і відштовхування; взаємодія така, що на більших відстанях, ніж радіус молекулярної дії, вони притягаються, а на малих відстанях порівняно з радіусом молекулярної дії відштовхуються. На відстані радіуса молекулярної дії молекули не взаємодіють між собою. Молекули перебувають також у стані безперервного теплового руху. До таких висновків фізиків привело спостереження багатьох фізичних явищ, з яких можна згадати розчинення твердих тіл, випаровування рідин, дифузію, броунівський рух малих, але спостережуваних через мікроскоп частинок звішених у рідинах і газах.

Унаслідок того, що молекули мають малі розміри і маси, то для характеристики кількості речовини, (позначається вона грецькою буквою ν) вводиться поняття моля речовини. Одиниця вимірювання кількості речовини – моль. Кількість молекул в одному молі називається ***числом Авогадро***. Його величина $\boldsymbol{N_A}$=6,07· 10^{23} моль$^{-1}$. Маса одного моля в грамах чисельно дорівнює масі молекули кожної речовини в атомних одиницях маси і називається відносною молярною масою. Позначається маса моля ***М.***

У рамках ***термодинаміки або термодинамічного методу*** вводиться система величин, які задають стан тіла за допомогою параметрів стану. До параметрів стану відносяться, насамперед, ***маса тіла m***, його ***об'єм V***, ***тиск P***, що чисельно дорівнює відношенню сили $\boldsymbol{dF_n}$, яка діє на елементарну (нескінченно малу) ділянку поверхні тіла перпендикулярно до її площини до величини цієї ділянки *dS*:

$$\boldsymbol{P = \frac{dF_n}{dS}}. \tag{5.1}$$

Тиск вимірюється у паскалях (Па). Він дорівнює дії сили в один Ньютон на один квадратний метр поверхні тіла.

Найважливішим параметром стану є ***температура***. Зміна температури супроводжується зміною практично всіх характеристик тіла, зокрема змінюються розміри твердих і об'єми рідких і газоподібних тіл. Саме ці зміни покладені в основу вимірювання температури. При цьому робоче тіло термометра, приладу для вимірювання температури, приводиться в контакт із досліджуваним тілом. У термодинаміці встановлено, що тіла, які перебувають у контакті, обов'язково приходять у стан теплової рівноваги, тобто температури тіл вирівнюються.. Зміна об'єму рідкого робочого тіла особливо наочно проявляється в зміні рівня рідини в капілярі, з'єднаному з повністю заповненою рідиною маленькою посудиною. З вільної від рідини частини капіляра видаляється повітря і верхній кінець його запаюється.

У побуті для вимірювання температури використовується шкала Цельсія. У цій шкалі за нуль градусів приймається температура танення льоду при атмосферному тиску ($1{,}013\cdot10^5$ Па). Температура кипіння води при тому самому тиску дорівнює ста градусам Цельсія (100^0 С). Температура, виміряна в градусах Цельсія, позначається t^0.

У фізиці для вимірювання температури використовується шкала Кельвіна, одиниця вимірювання називається кельвін (К). За величиною кельвін збігається із градусом Цельсія, але нуль шкали припадає на температуру $-273{,}15^0$С. Ця температура називається абсолютним нулем температур, а шкала Кельвіна – абсолютною шкалою температур. Температура, виміряна в кельвінах, позначається T, її величина

$$\boldsymbol{T = t + 273{,}15}. \tag{5.2}$$

В основі термодинамічного методу лежить використання експериментально встановлених співвідношень між параметрами стану різних тіл і сформульованих на їхній основі загальних принципів. Вивчаються процеси перетворення енергії в різних термодинамічних системах. При цьому не враховується внутрішня будова досліджуваних тіл і рух складових їхніх частинок. Тільки доповнюючи один одного, термодинамічний і молекулярно-кінетичний методи можуть дати повне уявлення про зміни станів тіл.

Стан тіла називається рівноважним, якщо воно при незмінних зовнішніх умовах може залишатися незмінним як завгодно довго. Перехід тіла з одного стану в інший називається процесом. Якщо перехід здійснюється досить повільно і у кожен момент переходу стан тіла можна вважати рівноважним, то і процес називається рівноважним.

Розглянемо як приклади, експериментально отримані співвідношення між параметрами стану ідеального газу – закони Бойня-Маріота, Гей-Люсака, Шарля. Вони є також рівняннями, що зв'язують параметри стану газу при ізотермічному, ізобаричному й ізохоричному рівноважних процесах.

Ідеальним називається газ, молекули якого не взаємодіють між собою на відстані і мають малі власні об'єми. У реальних газів молекули відштовхуються на малих відстанях і притягаються на більших. Але притягання швидко зменшується при збільшенні відстані, при атмосферному тиску і температурі близькій до 300 К середня відстань між молекулами досить велика, щоб взаємодію вважати дуже малою для більшості реальних газів. Відповідно для них виконуються закони ідеального газу.

Закон Бойля-Мариотта: при незмінних температурі та масі газу добуток його тиску і об'єму не змінюється, тобто при $\boldsymbol{T=const, m=const,}$

$$\boldsymbol{PV=const}.$$

Закон Гей-Люссака: при незмінних тиску і масі газу відношення його об'єму до абсолютної температури не змінюється, тобто при ***P=const, m=const,***

$$\frac{V}{T} = const$$

Закон Шарля: при незмінних об'ємі і масі газу відношення його тиску до абсолютної температури не змінюється, тобто при ***V=const, m=const,***

$$\frac{P}{T} = const$$

Наведені закони ідеального газу доповнює ***закон Авогадро***: при однакових зовнішніх умовах молі всіх ідеальних газів займають однакові об'єми. Нормальним умовам (атмосферний тиск і температура 273,15 К) відповідає об'єм моля 22,4 літри.

Усі три закони ідеального газу і закон Авогадро поєднує ***рівняння Менделєєва-Клапейрона***:

$$\boldsymbol{PV = \frac{m}{M}RT}, \tag{5.3}$$

де $\boldsymbol{R}$ – універсальна газова постійна, $\boldsymbol{R}=8{,}31\,\frac{Дж}{моль \cdot К}$ Неважко переконатися, що при відповідних умовах це рівняння перетворюється в кожне з наведених вище співвідношень. З рівняння Менделєєва-Клапейрона можна виразити тиск газу через температуру і кількість молекул в одиниці об'єму n:

$$\boldsymbol{P = \frac{N}{V}kT = nkT}, \tag{5.4}$$

де $\boldsymbol{N = \frac{m}{M}N_A}$ – повне число молекул газу;

$\boldsymbol{k = R / N_A}$ – постійна Больцмана ($\boldsymbol{k}$ = 1,38· 10^{-23} Дж / К).

Тиск газу на стінки посудини створюється зіткненнями молекул зі стінками. Зіткнення молекул ідеального газу між собою і зі стінками можна вважати абсолютно пружними. У проміжках між зіткненнями молекули рухаються рівномірно і прямолінійно, при зіткненнях міняються напрямок руху і величина швидкості. У цілому рух молекул ідеального газу хаотичний, середнє число молекул, що рухаються в кожному зазначеному напрямку, однаково. Оцінка імпульсу, переданого молекулами ділянці поверхні $\boldsymbol{dS}$ за час $\boldsymbol{dt}$, дозволяє виразити тиск газу через кількість молекул в одиниці об'єму s середню кінетичну енергію теплового руху молекули $\langle \varepsilon \rangle$:

$$\boldsymbol{P = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon \rangle} \quad . \qquad (5.5)$$

Формула (5.5) називається ***основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії газів***. З формул (5.4) і (5.5), визначається середня кінетична енергія теплового руху молекули

$$\boldsymbol{\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT} \ . \qquad (5.6)$$

Таким чином, температура є мірою енергії теплового руху молекул. Абсолютний нуль температури відповідає повному припиненню теплового руху, що пояснює його назву.

5.2 Опис установки і методу вимірювань

Установка для вимірювання універсальної газової постійної складається із трьох блоків – робочого, приладового і насосного (Р, ВМ і ВН на рис. 5.1)

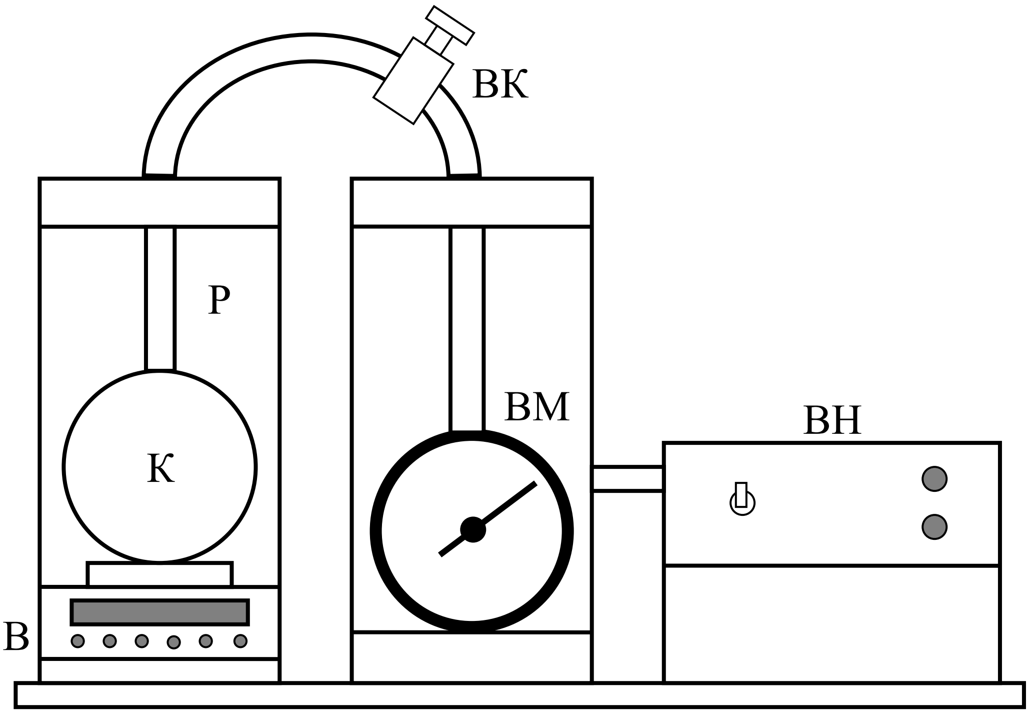


Рисунок 5.1

У нижній частині робочого блоку перебувають лабораторні ваги **В**. На передній панелі ваг розташовується цифровий індикатор, що показує вагу, і кнопки керування. Перед початком роботи необхідно переконатися, що ваги підключені до джерела живлення, про що свідчить палаюча сигнальна лампочка зеленого кольору на передній панелі. Потім варто нажати праву крайню кнопку і переконатися, що на індикаторі з'явилися цифри. Варто відразу ж перевірити правильність настроювання ваг, про неї свідчить латинська буква «g» праворуч від цифр. Якщо ж праворуч від цифр є інші букви, варто сповістити про це викладача.

На чашці ваг закріплена скляна колба **К**. До колби приєднується вакуумна трубка, що вільно проходить через отвір у кришці робочого блоку. Ця трубка з'єднує колбу з вимірювальним блоком, усередині якого перебуває вакуумметр. На трубці є вакуумний кран **ВК**, що дозволяє заповнити систему повітрям після завершення вимірювань. Вакуумметр показує зменшення тиску в закріпленій на вагах колбі в частках атмосферного тиску, який дорівнює $1{,}013 \cdot 10^5$ Па. Крім того, у вимірювальному блоці є термометр, показання якого виводяться на цифровий індикатор.

У насосному блоці знаходиться вакуумний насос, який відкачує повітря із закріпленої на вагах колби. На передній панелі блоку перебуває тумблер, що включає напругу, яка подається на електричну систему блоку. Електромотор, що обертає вакуумний насос, приводиться в дію кнопкою, що є на передній панелі і працює тільки доти, поки кнопка залишається натисненою.

Для визначення універсальної газової постійної проводиться вимірювання маси колби при двох значення тиску: $\boldsymbol{P_1}$ і $\boldsymbol{P_2}$. Відповідні значення маси $\boldsymbol{m_1}$ і $\boldsymbol{m_2}$ зв'язані зі значеннями тиску рівнянням Менделєєва-Клапейрона (5.3):

$$\boldsymbol{P_1 V = \frac{m_1}{M} RT};$$

$$\boldsymbol{P_2 V = \frac{m_2}{M} RT}.$$

Віднімаючи з першого рівняння друге, одержимо робочу формулу для обчислення універсальної газової постійної:

$$\boldsymbol{R = \frac{MV(P_1 - P_2)}{T(m_1 - m_2)}}. \quad (5.7)$$

Температура повітря визначається за допомогою термометра, який розташований у вимірювальному блоці. Молярна маса повітря вважається *M=29 г/моль*, об'єм використовуваної при вимірюваннях колби V = 1,026 л· = 1,026 10^{-3} м^3.

5.3 Порядок виконання роботи

1 Включити електроживлення насосного блоку і ваг, переконатися в правильному настроюванні ваг. Відкривши вакуумний кран **ВК**, заповнити колбу повітрям, після чого закрити кран, зробивши

систему герметичною. Записати в таблицю 5.1 масу колби, що відповідає атмосферному тиску. Окремо записати абсолютну температуру повітря *T*.

Таблиця 5.1

№	***ΔP 1,013·10^5, Па***	***P 1,013·10^5, Па***	***m, г***
1	0	1	
2	0,2	0,8	
3	0,4	0,6	
4	0,6	0,4	
5	0,8	0,2	

2 Натиснути кнопку, що включає вакуумний насос, тримати її натиснутою, поки стрілка вакуумметра не дійде до показання 0,2, і потім відпустити. Записати в таблиці 5.1 масу колби, що відповідає тиску, який становить 0,8 від атмосферного.

3 Знову натиснути кнопку, що включає вакуумний насос, тримати її натиснутою, поки стрілка вакуумметра не дійде до показання 0,4 і потім відпустити. Записати в таблиці 5.1 масу колби, що відповідає тиску, який становить 0,6 від атмосферного.

4 Продовжувати відкачку повітря з колби до одержання показань вакуумметра 0,6 і 0,8. Записати в таблиці 5.1 маси колби, що відповідають тискам, і становлять 0,4 і 0,2 від атмосферного.

5.4 Обробка результатів вимірювань

1 Обчислити величини $\boldsymbol{P_1 - P_2}$, $\boldsymbol{m_1 - m_2}$, використовуючи дані дослідів №1 – 5 з таблиці 5.1. Записати результати обчислень у перший рядок таблиці 5.2.

2 Повторити обчислення величин $\boldsymbol{P_1 - P_2}$, $\boldsymbol{m_1 - m_2}$ ще п'ять разів, використовуючи дані дослідів з номерами, зазначеними в першому стовпці таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Пари вимірювань	***$P_1 - P_2$, $10,^5$ Па***	***$m_1 - m_2$, г***	***R, Дж/(моль·К)***	***ΔR, Дж/(моль·К)***
1 – 5				
1 – 4				
2 – 5				
1 – 3				
2 – 4				
3 – 5				
Середні значення				

3 За формулою (5.7) обчислити і вписати в таблицю 5.2 шість значень універсальної газової постійної ***R***. Обчислити і вписати в таблицю 5.2 середнє значення <***R***>**.**

4 Розрахувати абсолютні похибки ***ΔR*** для кожного з вимірювань і їхнє середнє значення ***<ΔR>***. Дані занести до таблиці 5.2.

5 Розрахувати відносну похибку проведених вимірювань, використовуючи середні значення <***R***> і ***<ΔR>***.

6 Записати результат у стандартній формі:

$$\boldsymbol{R} = \langle \boldsymbol{R} \rangle \pm \langle \Delta \boldsymbol{R} \rangle$$

5.5 Контрольні питання

1 На яких уявленнях базується молекулярно-кінетична теорія? Спостереження яких явищ викликало появу цих уявлень?

2 Що таке кількість речовини, один моль речовини, число Авогадро?

3 Як задається стан тіла в термодинамічному методі? Які параметри стану тіла найбільше часто використовуються?

4 Що таке тиск ? В яких одиницях вимірюється тиск?

5 Що таке температура? У яких одиницях виміряються ця величина? Яка шкала температур називається абсолютною?

6 Що таке термодинамічний процес? Які процеси називаються рівноважними?

7 Які співвідношення лежать в основі термодинамічного методу? Навести як приклад закони ідеального газу.

8 Що являє собою ідеальний газ з точки зору молекулярно-кінетичної теорії?

9 Як пояснює молекулярно-кінетична теорія тиск газу на стінки посудини? Сформулювати основний закон молекулярно-кінетичної теорії газів.

10 Як зв'язані між собою енергія теплового руху молекул тіла і його температура? У чому полягає фізичний зміст абсолютного нуля температур?

11 У чому полягає сутність використовуваного методу визначення універсальної газової постійної? Вивести розрахункову формулу.

6 ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 22

ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ДЮЛОНГА І ПТІ

Мета роботи: ознайомитися з основними законами термодинаміки, теорією теплоємності твердого тіла, визначити питому і молярну теплоємності різних металів, дослідним шляхом перевірити закон Дюлонга і Пті.

6.1 Стислі теоретичні відомості

Внутрішня енергія тіла містить у собі кінетичну енергію теплового руху молекул, потенціальну енергію взаємодії між всіма молекулами внутрішню молекулярну енергію всіх молекул. Остання складається з кінетичної енергії руху частин молекули одна відносно іншої, потенціальної енергії їхньої взаємодії. Позначається внутрішня енергія буквою $\boldsymbol{U}$. Вона є функцією стану тіла, це означає, що вона залежить тільки від стану і не залежить від способу, яким тіло приведене до цього стану.

Відповідно до законів механіки зміна внутрішньої енергії $\boldsymbol{\Delta U}$ дорівнює роботі всіх сил, що діють на тіло. Робота ж розподіляється на роботу сил, що діють на тіло в цілому і на роботу зміни його об'єму, (позначається $\boldsymbol{\Delta A'}$) і роботу сил, що діють на молекули тіла з боку молекул навколишніх тіл. Остання не супроводжується якими-небудь макроскопічними рухами і називається кількістю тепла, переданого тілу (позначається $\boldsymbol{\Delta Q}$). Якщо перейти до роботи, яку виконує дане тіло над зовнішніми тілами, $\boldsymbol{\Delta A = -\Delta A'}$, то

$$\boldsymbol{\Delta Q = \Delta U + \Delta A}, \qquad (6.1)$$

т.т. отримане тілом тепло витрачається на зміну його внутрішньої енергії і на виконання ним роботи. Формула (6.1) називається першим законом термодинаміки, що, по суті, є законом збереження енергії в термодинаміці.

Дослід показує, що передача тілу або одержання від нього тепла супроводжується зміною його температури, пропорційно до переданої або отриманої кількості теплоти:

$$\Delta \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{C} \Delta \boldsymbol{T}, \qquad (6.2)$$

де $\Delta \boldsymbol{T} = \boldsymbol{T_2} - \boldsymbol{T_1}$ – різниця кінцевої і початкової температур;

С* – *теплоємність тіла, дорівнює кількості теплоти, необхідної для нагрівання його на *1 К*.

Для однорідного тіла теплоємність прямо пропорційна його масі $\boldsymbol{m}$:

$$\boldsymbol{C = c\, m}, \qquad (6.3)$$

де ***c* – *питома теплоємність тіла***. Вона дорівнює кількості теплоти, що необхідно надати тілу, щоб нагріти одиницю маси речовини на *1 К*.

Теплоємність одного моля речовини називається ***молярною теплоємністю*** (позначається $\boldsymbol{C_M}$):

$$\boldsymbol{C_M = c\,M = \frac{\Delta Q\,M}{\Delta T\,m}}, \tag{6.4}$$

де $\boldsymbol{M}$ – маса одного моля речовини.

Ця маса в грамах чисельно дорівнює масі молекули в атомних одиницях маси, тобто вона пропорційна масі молекули. Відношення маси моля до маси молекули, дорівнює кількості молекул в одному молі, однаково для всіх речовин. Воно називається числом Авогадро і дорівнює:

$$\boldsymbol{N_A}=6{,}07\cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1}.$$

При обчисленні внутрішньої енергії кристалічного твердого тіла можна використати принцип рівнорозподілення енергії за ступенями вільності руху складових його атомів. Число ступенів вільності атомів – це число незалежних координат, якими можна задати положення атома в просторі. На кожен класичний ступінь вільності атома припадає середня кінетична енергія теплового руху, яка дорівнює

$$\langle \boldsymbol{\varepsilon_K} \rangle = \frac{\mathbf{kT}}{\mathbf{2}}, \tag{6.5}$$

де $\boldsymbol{k = R / N_A}$ – постійна Больцмана, $\boldsymbol{k} = 1{,}38\cdot 10^{-23}$ Дж / К.

Тепловий рух атомів у кристалічному твердому тілі являє собою гармонічні коливання атомів відносно положень рівноваги, які є вузлами кристалічної гратки. Коливання можуть здійснюватися в трьох перпендикулярних напрямках незалежно один від одного, відповідно для задання положення атома в просторі потрібно мати три незалежні координати.

Кожен атом кристала має три коливальних ступені вільності, і формула (6.5) визначає середню кінетичну енергію теплового руху, що припадає на кожну з них. Але атоми кристала мають також потенціальну енергію взаємодії один з одним, при характерних для кристала відстанях між атомами зневажати нею не можна. У випадку гармонічних коливань відбувається перехід кінетичної енергії в потенціальну і навпаки, причому сумарна повна механічна енергія не змінюється. Отже характер змін згодом в кінетичній і потенційній енергіях повинен збігатися, то виходить, повинні збігатися і їхні середні значення. Тоді середня теплова енергія, що припадає на один коливальний ступінь вільності атома

$$\langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle = \boldsymbol{k\, T}. \tag{6.6}$$

Для одержання внутрішньої енергії кристалічного твердого тіла досить середню енергію $\langle \varepsilon \rangle$ помножити на число атомів тіла $\boldsymbol{N = N_A \frac{m}{M}}$ і число коливальних ступенів вільності атома:

$$\boldsymbol{U = 3\,N\,k\,T = 3\,\frac{m}{M}\,N_A\,k\,T = 3\,\frac{m}{M}\,R\,T.} \tag{6.7}$$

Очевидно, що внутрішня енергія одного моля речовини $\boldsymbol{U_M}$ однакова для всіх кристалічних тіл і дорівнює:

$$\boldsymbol{U_M = 3\,R\,T}. \tag{6.8}$$

Зміна внутрішньої енергії кристалічного твердого тіла може бути зв'язана тільки зі зміною його температури $\boldsymbol{\Delta T}$. Врахуємо також той факт, що робота, виконувана тілом, дорівнює

$$\boldsymbol{\Delta A = \int_{V_1}^{V_2} PdV}.$$

Тоді за першим законом термодинаміки маємо:

$$\boldsymbol{\Delta Q = 3\,R\,\Delta T + \int_{V_1}^{V_2} PdV}. \tag{6.9}$$

Зміна об'єму кристалічного твердого тіла при зміні температури настільки мала, що нею можна знехтувати і вважати об'єм постійним, а процес ізохорним. Це означає, що другий доданок у формулі (6.9) вважається рівним нулю і отримана молем кількість тепла дорівнює

$$\Delta Q = 3\,R\,\Delta T.$$

Підставляємо цей вираз у формулу для молярної теплоємності тіла (6.4) і одержуємо ***закон Дюлонга і Пті*** – молярні теплоємності всіх кристалічних тіл однакові і дорівнюють

$$C_M = 3\,R. \tag{6.10}$$

6.2 Опис установки і методу

Установка для вимірювання питомої і молярної теплоємностей металевих зразків складається із двох блоків – робочого і приладового (**РБ** і **ПБ** на рис. 6.1).

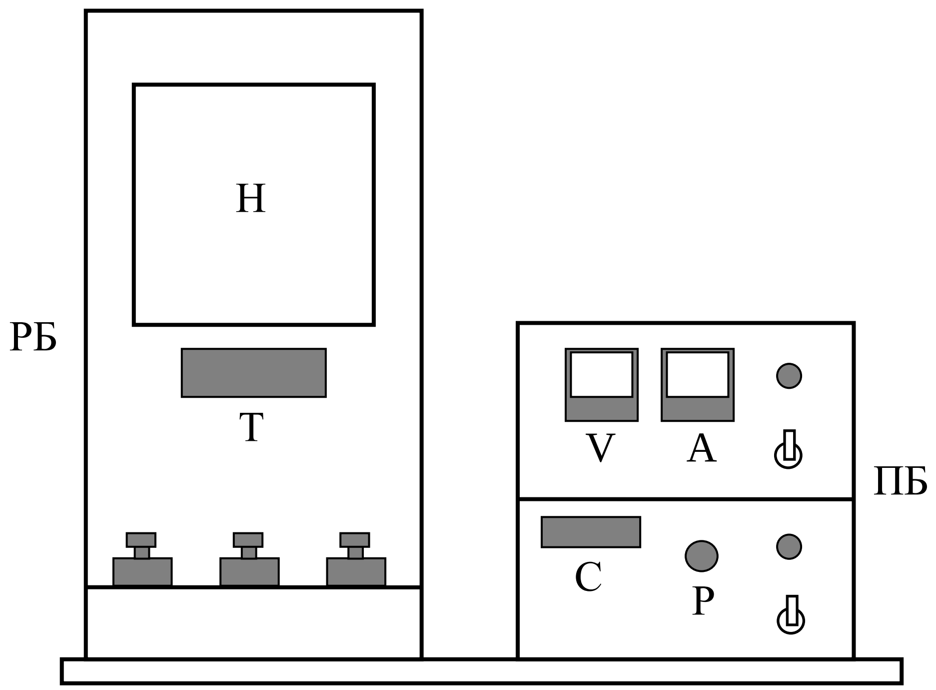


Рисунок 6.1

У верхній частині робочого блоку знаходиться нагрівач **Н**. Зверху нагрівач має кришку, що закриває гніздо для установки зразка. Зразки у формі усіченого конуса перебувають у гніздах в нижній частині робочого блоку. Досліджується три зразки – залізний, алюмінієвий і латунний. За допомогою спеціального пристрою вони повинні по черзі вийматися зі своїх гнізд і установлюватися в гніздо нагрівача.

Якщо при вийманні зразка із гнізда нагрівача виникнуть труднощі, зразок можна видавити із гнізда за допомогою спеціального гвинта, розташованого знизу. Після цього варто повернути гвинт у вихідне положення.

У таблиці 6.1 наведені параметри зразків.

Таблиця 6.1

№	*Матеріал*	*Маса одного моля речовини, кг/моль*	*Маса зразка, кг*
1	Залізо	0,056	0,133
2	Алюміній	0,027	0,046
3	Латунь	0,064	0,152

Нижче нагрівача на стінці робочого блоку перебуває цифровий контролер **Т**, що показує температуру нагрівача. Вимірювання температури здійснюється за допомогою електронного датчика.

При проведенні вимірювань, коли здійснюється перехід від одного зразка до наступного, виникає необхідність у швидкому охолодженні нагрівача. Для цього в його гніздо варто вставляти холодний зразок, після його нагрівання заміняти зразок на інший, охолоджений за межами нагрівача. Ці дії варто продовжувати до досягнення температури, що дозволяє продовжити вимірювання.

Лицьова панель приладового блоку розділена на дві частини. У верхній знаходяться вольтметр **V** і амперметр **A**. Вони вимірюють напругу на нагрівальному елементі і силу струму, що протікає через нього. У цій же частині знаходяться тумблер й індикаторна лампочка включення сіткової напруги. У нижній частині лицьової панелі знаходяться тумблер і індикаторна лампочка включення нагрівача, регулятор струму через нагрівальний елемент **Р** та секундомір **С**. Нижня кнопка секундоміра призначена для приведення секундоміра в робочий режим, верхня кнопка запускає і зупиняє рахунок часу, середня кнопка скидає показання секундоміра.

6.3 Порядок виконання роботи

1 Відкрити доступ до зразків і нагрівача, знявши захисний кожух з робочого блоку. Включити установку в мережу і привести секундомір у робочий стан (при цьому цифровий індикатор секундоміра повинен показувати 0,00).

2 Не відкриваючи нагрівач і не встановлюючи зразок, включити електричний струм. Установити значення напруги на нагрівачі, зазначене викладачем. Записати значення напруги U і сили струму I у таблиці 6.2, обчислити й записати значення потужності нагрівача

$$P=UI.$$

Таблиця 6.2

U, В	***I, А***	***P, Вт***

3 У момент початку нагрівання, коли вдруге з'явиться наступна цифра на індикаторі температури, включити секундомір. Виключити його із появою наступної цифри, що відповідає температурі, на *5 К* більше. Значення часу нагрівання записати в другий стовпець таблиці 6.3, у рядок, позначений буквою Н.

Таблиця 6.3

№	$t_{нагр}$, с	$t_{охолодж}$, с	$\Delta Q_{повн}$, Дж	η	$\Delta Q_{зраз.}$, Дж
1					
2					
3					

4 Виключити нагрівач. Зробити скидання секундоміра і включити його при початку охолодження нагрівача. Виміряти час охолодження нагрівача на *1 К* і записати його в третій стовпець того ж рядка таблиці 6.3.

5 Повторити вимірювання, вставляючи по черзі в нагрівач три зразки. Результати вимірювань записати в таблиці 6.3.

6.4 Обробка результатів вимірювань

1 За формулою $\Delta Q_{повн} = P\, t$ обчислити і записати в таблиці 6.3 значення кількості теплоти, що виділилася в нагрівачі.

2 Обчислити і записати в таблиці 6.3 значення коефіцієнта корисної дії для процесів нагрівання зразків за формулою

$$\eta = 1 - t_{нагр}/(5\, t_{охол}).$$

3 Обчислити і записати в таблиці 6.3 значення кількостей теплоти, отриманих зразками при нагріванні на кожні *5 К* за формулою

$$\Delta Q_{зраз.} = (\eta\, \Delta Q_{повн} - \Delta Q_{нагр}).$$

4 Обчислити і записати в таблиці 6.4 значення теплоємностей зразків за формулою

$$C = \Delta Q_{зраз} / 5.$$

Таблиця 6.4

№	C, Дж/К	c Дж,/(К·кг)	C_M, Дж/(К·моль)	C_M / R
1				
2				
3				

5 Обчислити і записати в таблиці 6.4 значення питомих теплоємностей матеріалів за формулою

$$c = C / m.$$

6 Обчислити і записати в таблиці 6.4 значення молярних теплоємностей матеріалів зразків за формулою

$$C_M = c\,M$$

7 Обчислити і вписати в таблицю 6.4 значення відношення молярних теплоємностей зразків до універсальної газової постійної Тобто відношення

$$C_M / R.$$

Зробити висновок про виконання закону Дюлонга і Пті.

6.5 Контрольні запитання

1 Що таке внутрішня енергія твердого тіла

2 Що називають кількістю теплоти? Назвіть способи передачі теплоти?

3 Дати визначення теплоємності, питомої теплоємності і молярної теплоємності речовини?

4 Сформулювати і записати перший закон термодинаміки.

5 Як читається теорема про розподіл енергії за ступенями вільності тіла?

6 Який характер має тепловий рух атомів у кристалі?

7 Яка середня теплова енергія припадає на один ступінь вільності атома в кристалі?

8 Як визначити внутрішню енергію кристалічного тіла довільної маси і одного моля речовини цього тіла.

9 Сформулювати закон Дюлонга і Пті.

10 Що являє собою дослідницька установка?

11 У чому полягає сутність методу дослідження закону Дюлонга і Пті?

7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 23

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ПИТОМИХ ТЕПЛОЕМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ ЗА МЕТОДОМ КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА

Мета роботи: ознайомитися з теорією теплоємності ідеального газу, з методом Клемана-Дезорма, визначити відношення питомої теплоємності при постійному тиску до питомої теплоємності при постійному об'ємі для повітря.

7.1 Стислі теоретичні відомості

Ідеальним називається газ, молекули якого не взаємодіють між собою на відстані і мають нескінченно малі власні об'єми. У реальних газів молекули відштовхуються на малих відстанях і притягаються на більших ніж радіус молекулярної дії. Але притягання швидко зменшується при збільшенні відстані, при атмосферному тиску і температурі близько 300 К середня відстань між молекулами досить велика, щоб взаємодію не враховувати для більшості реальних газів. Відповідно для них виконуються закони ідеального газу.

Стан ідеального газу характеризується наступними параметрами стану: масою газу m, об'ємом $\boldsymbol{V}$, тиском $\boldsymbol{P}$, температурою $\boldsymbol{T}$. Параметри стану ідеального газу пов’зані ***рівнянням Менделєєва-Клапейрона***

$$\boldsymbol{PV} = \frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{M}}\boldsymbol{RT}\ , \qquad (7.1)$$

де $\boldsymbol{R}$ – універсальна газова постійна, $\boldsymbol{R}=8{,}31\,\frac{Дж}{моль \cdot К}$;

$\boldsymbol{M}$ – маса одного моля газу. Ця маса в грамах чисельно дорівнює масі молекул в атомних одиницях маси, тобто вона пропорційна масі молекули. Виходить, що відношення маси моля до маси молекули, дорівнює кількості молекул в одному молі речовини і є однаковим для всіх речовин. Воно називається числом Авогадро і дорівнює: $\boldsymbol{N_A}=6{,}07\cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

Змінити стан газу можливо шляхом передачі кількості теплоти або здійсненням роботи над газом. Кількість теплоти, отримана газом, пропорційна зміні його температури:

$$\Delta\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{C}\Delta\boldsymbol{T}\,, \qquad (7.2)$$

де $\Delta\boldsymbol{T}=\boldsymbol{T_2} - \boldsymbol{T1}$ – різниця кінцевої і початкової температур;

С – теплоємність газу, що дорівнює кількості теплоти, необхідній для нагрівання його на *1 К*.

Для однорідної речовини теплоємність прямо пропорційна його масі $\boldsymbol{m}$:

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{c}\ \boldsymbol{m}, \qquad (7.3)$$

де ***с – питома теплоємність речовини***, дорівнює кількості теплоти, що необхідна для нагрівання одиниці маси речовини на *1К*.

Теплоємність одного моля речовини називається ***молярною теплоємністю*** (позначається C_M):

$$C_M = c\,M = \frac{\Delta Q\,M}{\Delta T\,m}. \tag{7.4}$$

Кількість теплоти, що надана газу, витрачається на зміну внутрішньої енергії газу і на здійснення роботи газом проти зовнішніх сил:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A, \tag{7.5}$$

де $\Delta U = U_2 - U_1$ – зміна внутрішньої енергії ідеального газу;

$\Delta A = \int_{V_1}^{V_2} P\,dV$ – робота, виконана газом проти зовнішніх сил.

Рівняння (7.5) називається ***першим законом термодинаміки***.

При обчисленні внутрішньої енергії ідеального газу застосовується принцип рівнорозподілу енергії за ступенями вільності молекули. На кожен класичний ступінь вільності молекули припадає середня кінетична енергія теплового руху, що дорівнює

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{kT}{2}, \tag{7.6}$$

де $k = R / N_A$ – постійна Больцмана, $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К.

Внутрішня енергія тіла містить у собі кінетичну енергію теплового руху молекул, потенціальну енергію взаємодії між всіма молекулами і внутрішню молекулярну енергією всіх молекул. Остання складається з кінетичної енергії руху частин молекули одна відносно іншої і потенціальної енергії взаємодії молекул між собою.

Внутрішня енергія ідеального газу складається тільки з кінетичної енергії теплового руху молекул. Потенціальна енергія міжмолекулярної взаємодії нехтовно мала, частинки молекул при температурах порядку сотень Кельвінів одна відносно одної не зміщуються. Для одержання внутрішньої енергії ідеального газу досить середню енергію $\langle \varepsilon_i \rangle$ помножити на число молекул газу

$$N = N_A \frac{m}{M} .$$

Враховуючи число ступенів вільності молекул газу, тобто число незалежних координат, якими можна задати положення молекули в просторі (позначимо це число ***i*)**, одержимо вираз зміни внутрішньої енергії ідеального газу

$$\Delta U = \frac{i}{2} N k \Delta T = \frac{i}{2} \frac{m}{M} N_A k \Delta T = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T. \quad (7.7)$$

Двоатомні молекули, з яких в основному складається повітря (N_2, O_2, H_2, CO), мають 5 ступенів вільності. Двоатомну модель можна подати у вигляді твердого диполя. Центр мас цієї системи має 3 ступеня вільності поступального руху і 2 ступеня вільності обертального руху. Момент інерції молекули відносно осі ***OX*** дорівнює нулю (I_x=0), тому шостим ступенем вільності зневажаємо (рис. 7.1).

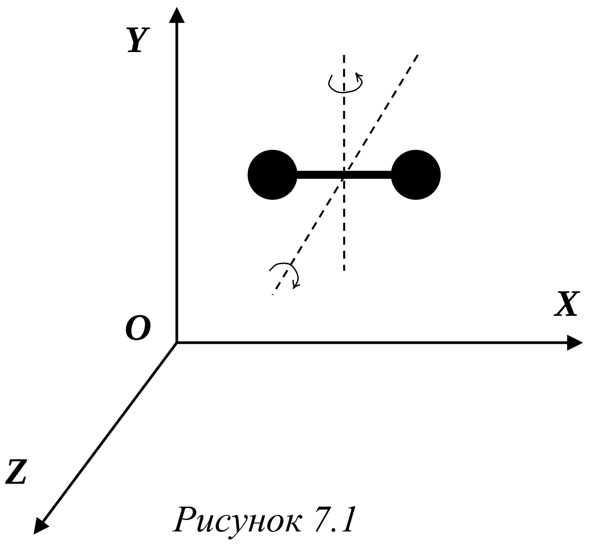


Рисунок 7.1

Якщо газ складається з одноатомних молекул (інертні гази), то цим молекулам доступні тільки поступальні рухи, вони мають три ступені вільності (***i***=3).

Рівняння (7.5) можна подати у вигляді

$$\Delta Q = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T + \int_{V_1}^{V_2} P dV . \quad (7.8)$$

В ізохорному процесі об'єм газу залишається незмінним ($V=const$, $\Delta V=0$), робота газом не виконується:

$$A=\int_{V_1}^{V_2} PdV=0.$$

Отже, в ізохорному процесі вся теплота, передана газу, іде на зміну його внутрішньої енергії:

$$\Delta Q=\Delta U=\frac{i}{2}\frac{m}{M}R\,\Delta T. \tag{7.9}$$

Молярна теплоємність у цьому процесі називається ізохорною, з формули (7.4) вона дорівнює

$$C_M^V=\frac{iR}{2}. \tag{7.10}$$

Якщо процес протікає при постійному тиску ($P=const$), то він називається ізобарним. У цьому процесі відбувається зміна внутрішньої енергії газу і виконується робота газом проти зовнішніх сил:

$$\Delta Q=\frac{i}{2}\frac{m}{M}R\,\Delta T+P(V_2-V_1). \tag{7.11}$$

Використовуючи закон Менделєєва-Клапейрона (7.1), знайдемо вираз для роботи газу в ізобарному процесі:

$$A=P\Delta V=\frac{m}{M}R\,\Delta T. \tag{7.12}$$

Перший закон термодинаміки для ізобарного процесу з урахуванням рівнянь (7.7) і (7.12) записується у вигляді

$$\Delta Q=\frac{i}{2}\frac{m}{M}R\,\Delta T+\frac{m}{M}R\,\Delta T=\left(\frac{i}{2}+1\right)\frac{m}{M}R\,\Delta T. \tag{7.13}$$

Молярна теплоємність у цьому процесі також визначається формулою (7.4) і дорівнює:

$$C_M^P = \left(\frac{i}{2}+1\right) R. \tag{7.14}$$

Порівнюючи вирази (6.10) і (6.14), зауважимо, що молярні теплоємності залежать від числа ступенів вільності молекули. Відношення молярних теплоємностей для повітря дорівнює:

$$\gamma = \frac{C_M{}^p}{CM^v} = \frac{(i+2)R2}{2iR} = \frac{i+2}{i},$$

$$\gamma = \frac{5+2}{5} = 1{,}4. \tag{7.15}$$

У практичній частині лабораторної роботи пропонується визначити відношення γ питомих теплоємностей повітря експериментально і порівняти його з теоретичним значенням.

7.2 Опис установки й методу вимірювань

Для виконання лабораторної роботи необхідно познайомитися ще із двома ізопроцесами – ізотермічним і адіабатичним.

Ізотермічним називається процес, що відбувається при постійних температурі та масі газу, описується процес ***законом Бойля-Мариотта***

$$P_1V_1=P_2V_2. \tag{7.16}$$

Адіабатичним називається процес, що відбувається над газом без теплообміну з навколишнім середовищем. Процес описується ***рівнянням Пуассона***

$$P_1V_1^{\gamma}=P_0V_2^{\gamma}. \tag{7.17}$$

Графіки ізопроцесів газів подані на рисунку 7.2, де ***AC*** – ізотерма в координатах ***P-V***, ***AB*** – адіабата в координатах ***P-V.***

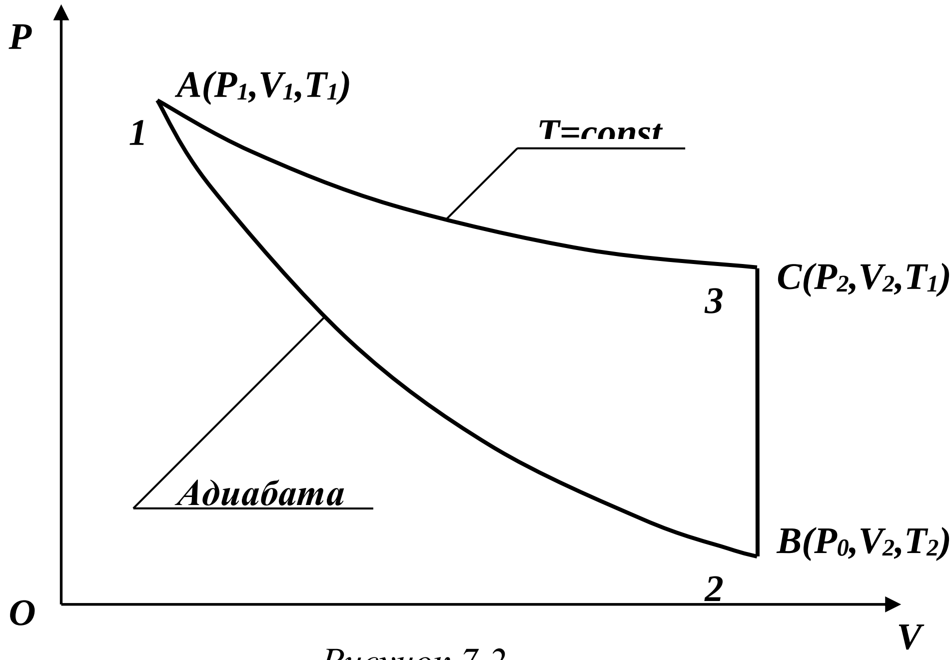


Рисунок 7.2

В адіабатичному процесі тиск падає швидше, ніж в ізотермічному, при однаковій зміні об'єму в обох процесах. Для визначення відношення теплоємностей газу γ реалізується адіабатичний процес за допомогою приладу Клемана-Дезорма.

Сутність методу Клемана-Дезорма полягає в тому, що деяку масу газу, близького за властивостями до ідеального газу, шляхом адіабатичного розширення (адіабата ***AB*** на рис. 7.2) і ізохоричного нагрівання (ізохора ***BP***, ***V=const***) переводять із одного стану ($P_1V_1T_1$, точка ***A*** на рис. 6.2) в інший стан ($P_2V_2T_1$, т. ***C***). Але стан газу з параметрами $P_2V_2T_1$ характеризує і розширенню газу по ізотермі зі стану $P_1V_1T_1$ (т. ***A***).

Таким чином, у стан ***C*** можна перевести газ двома ізопроцесами:

1) ізотермою $P_1V_1=P_2V_2$;

2) адіабатою $P_1V_1^{\gamma}=P_0V_2^{\gamma}$ з ізохорою .

Рівняння ізотерми підносимо до степеня γ:

$$P_1^{\gamma}V_1^{\gamma}=P_2^{\gamma}V_2^{\gamma}. \tag{7.18}$$

Розділивши рівняння (7.18) на рівняння (7.17), одержимо:

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\gamma} = \frac{P_1}{P_0}. \qquad (7.19).$$

Таким чином, вимірюючи тиску газу, можна визначити шукану величину γ.

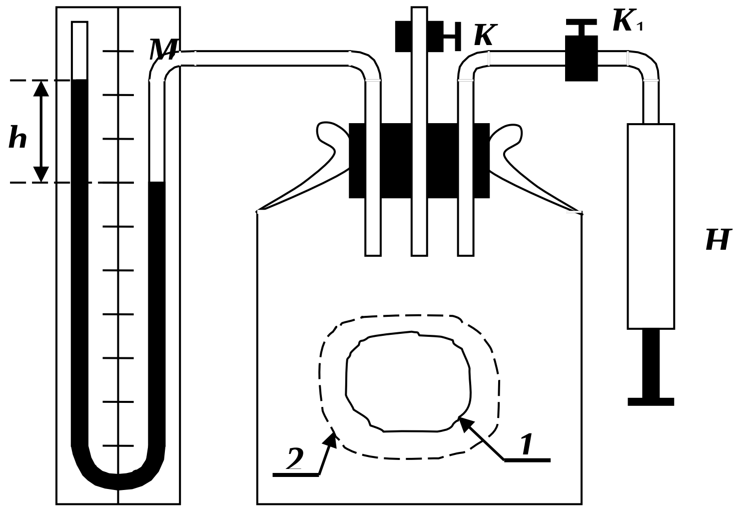


Рисунок 7.3

Для практичної реалізації методу адіабатичного розширення використається балон великої емності. Горловина балона закрита пробкою із трьома отворами, у яких розміщені три трубки із кранами (рис. 7.3). Кран K з'єднує балон з атмосферою, кран K_1 – з насосом H. Третя трубка зв'язує балон з водяним манометром M.

За допомогою насоса в балон накачують повітря. Кран K повинен бути закритим. Накачування повітря відбувається досить швидко, тому повітря в насосі і, звичайно, у балоні нагрівається.

Через деякий час надлишкова кількість теплоти перейде до повітря кімнати і установиться теплова рівновага, що характеризується кімнатною температурою T_1 і тиском $P_1=P_0+h_1$, де P_0 – тиск повітря в кімнаті, а h_1 – різниця рівнів водяних стовпів у манометрі. Виділивши подумки деякий досліджуваний об'єм газу V_1 (стан **1** зображений лінією **1** на рис. 7.3), одержимо його стан, що зображено точкою $A(P_1, V_1, T_1)$ на діаграмі (див. рис. 7.2).

Відкриваючи кран K, з'єднуємо балон з повітрям кімнати. Процес розширення газу відбувається швидко, що приблизно відповідає адіабатичному процесу. Виділений об'єм газу перейде в стан **2** (на діаграмі рис. 7.2 точка ***B***). Його об'єм V_2 (стан ***2*** зображений пунктирною лінією ***2*** у балоні на рис. 7.3) газ виконав роботу адіабатичного розширення.

Після закінчення процесу адіабатичного розширення кран ***К*** перекривається і газ у балоні нагрівається, одержуючи тепло з кімнати. Через деякий час температура газу в балоні стане такою ж самою як в кімнаті, виділений об'єм перейде в стан 3 (на рис. 7.2 точка $C\,(P_2, V_2, T_1)$).

Цей об'єм стане рівним об'єму в стані ***2***, а тиск дорівнюватиме

$$P_2=P_0+h_2,$$

де h_2 – різниця рівнів у колінах манометра після досягнення рівноважного стану газу в балоні.

Використовуючи рівняння (7.19), одержуємо:

$$\left(\frac{P_0+h_1}{P_0+h_2}\right)^{\gamma}=\frac{P_0+h_1}{P_0}\;. \qquad (7.20)$$

Після перетворення рівняння (7.20), одержимо:

$$P_0^{\gamma-1}\left(1+\frac{h_1}{P_0}\right)^{\gamma-1}=P_0^{\gamma-1}\left(1+\frac{h_2}{P_0}\right)^{\gamma}.$$

Після скорочення на $P_0^{\gamma-1}$ і логарифмування одержимо:

$$(\gamma-1)\ln\left(1+\frac{h_1}{P_0}\right)=\gamma\ln\left(1+\frac{h_2}{P_0}\right). \qquad (7.21)$$

Відношення $\dfrac{h}{P_0}$ – мала величина, бо h_1 h_2 – біля десятка сантиметрів водяного стовпа, а P_0 має близько ***760 мм*** ртутного стовпчика, або ***760·13,6=10366 мм*** водяного стовпа. Тому при розкладанні в ряд логарифмів можна обмежитися величинами першого ступеня малості:

$$\ln\left(1+\frac{h_1}{P_0}\right)=\frac{h}{P_0}-\frac{1}{2}\left(\frac{h}{P_0}\right)^2+\frac{1}{3}\left(\frac{h}{P_0}\right)^3-\ldots\cong\frac{h}{P_0},$$

що дасть можливість переписати рівняння (7.21) у вигляді

$$(\gamma - 1)\frac{h_1}{P_0} = \gamma \frac{h_2}{P_0}.$$

Звідки
$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \qquad (7.22)$$

Значення h_1 і h_2 піддаються прямим вимірам, і формула (7.22) є розрахунковою для визначення відношення теплоємностей повітря при постійному тиску і об’ємі

7.3 Порядок виконання роботи

1 Закрити кран K (див. рис. 7.3) і, відкривши кран K_1, обережно нагнітати насосом повітря в балон доти, поки різниця рівнів води в манометрі не стане 10...15 см.

2 Закрити кран K_1 і через 2...3 … 3 хв, якщо водяний стовпчик припинить рух, зафіксувати значення h_1 і занести його до таблиці 7.1.

3 Відкрити кран K, що з'єднує балон з повітрям кімнати, і дати можливість повітрю швидко вийти з балона. Коли рівні водяного стовпа встановляться на нульовій поділці (або стовпчики зрівняються на довільній поділці), перекрити кран K. Відповідні дії необхідно виконувати якнайшвидше.

4 Дати 2...3 хвилини витримки і спостерігати за рухом водяного стовпчика. Після припинення руху водяного стовпчика, зафіксувати значення h_2 і занести його в таблицю 7.1.

7.4 Обробка результатів дослідження

1 Розрахувати значення γ за формулою (7.22) для кожного з дослідів і визначити середнє значення величини $<\gamma>$ як середнє арифметичне отриманих результатів.

2 Розрахувати абсолютні похибки $\Delta\gamma_i$ для кожного з вимірювань і їхнє середнє значення $<\Delta\gamma>$. Дані занести до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1

№ п/п	h_1**, мм**	h_2 **, мм**	h_1**-** h_2 **,мм**	γ	$\Delta\gamma$	***E,%***
1						
2						
3						
4						
5						
			Середнє			

3 Розрахувати відносну похибку проведених вимірювань, використовуючи середні значення $<\gamma>$ і $<\Delta\gamma>$, записати результат у стандартній формі

7.5 Контрольні запитання

1 Який газ називається ідеальним?

2 Перелічите параметри стану ідеального газу і запишіть рівняння стану.

3 Яким чином може змінюватися стан газу?

4 Як змінюється стан газу при передачі йому теплоти?

5 Що таке теплоємність тіла, молярна і питома теплоємності речовини? Як вони зв'язані між собою?

6 Що таке внутрішня енергія тіла, з яких енергій вона складається? У чому полягає особливість визначення внутрішньої енергії ідеального газу?

7 Як визначається внутрішня енергія довільної маси ідеального газу.

8 Від яких параметрів залежить внутрішня енергія ідеального газу?

9 Якою загальною формулою визначається робота, виконувана газом при розширенні? Від якого параметра вона залежить?

10 Сформулювати і записати перший закон термодинаміки.

11 Як читається теорема про рівний розподіл енергії за ступенями вільності молекули?

12 Який вид має рівняння першого закону термодинаміки для ізохоричного й ізобарного процесів?

13 Який процес називається ізотермічним? Записати рівняння ізотерми. Застосувати перший закон термодинаміки до ізотермічного процесу.

14 Який процес називається адіабатичним? Записати рівняння Пуассона. Застосувати перший закон термодинаміки до адіабатичного процесу.

15 В якому ізопроцесі не змінюється внутрішня енергія термодинамічної системи при передачі їй теплоти?

16 В якому ізопроцесі термодинамічна система не виконує роботу при передачі їй теплоти?

17 Чому дорівнює відношення теплоємностей при постійному тиску і постійному об'ємі для ідеальних газів і конкретно для повітря? Чи можна вважати повітря ідеальним газом?

18 У чому полягає ідея методу адіабатичного розширення, запропонована Клеманом і Дезормом для визначення відношення теплоємностей газу при постійному тиску і постійному об'ємі? Які ізопроцеси лежать в його основі?

19 Опишіть прилад Клемана-Дезорма, призначений для визначення відношення теплоємностей газу при постійному тиску і постійному об'ємі?

20 Вивести розрахункову формулу для визначення відношення теплоємностей газу при постійному тиску і постійному об'ємі?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 **Бушок, Г.Ф**. Курс фізики: навчальний посібник: У 2 кн. Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм / Г.Ф. Бушок, В.В. Левандовський, Г.Ф. Півень. – 2-ге вид. – К.:Либидь, 2001. – 448 с. – ISBN 966-060084-4.

2 **Детлаф, А.А.** Курс физики: учебное пособие/ А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 3-е узд.,испр. – М. : Висшая шк., 2001. – 718 с. – ISBN 5-06-003556-5

3 **Савельєв, И.В.** Курс общей физики: учебное пособие: В 3 т. Т.1. Механіка. Молекулярная физика. – М. : Наука. 1989 . – 350 с.

4 **Яворский, Б.М.** Справочник по физике. – 3-е изд. испр. – М.: Наука, 1990. – 624 с. – ISBN 5-02-014508-4.

5 **Евграфова, Н.Н**. Руководство к лабораторным работам по физике/ Н.Н. Евграфова, В.Л. Коган. – М.: Высш. шк., 1970. – 348 с.

6 **Гольдин, Л.Л.** Руководство к лабораторным работам по физике / Л.Л.Гольдин. – М.: Высш. шк., 1973. – 688 с.

ДОДАТОК А
ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАКЕТА “MATHCAD”

Пакет «MATHCAD» поєднує можливості математичного процесора, текстового і графічного редакторів і є зручним засобом для обробки результатів вимірювань та їхнього оформлення. Нижче викладаються основні прийоми роботи із цією програмою.

Виконання простих обчислень

Пакет «MATHCAD» є потужним калькулятором, за допомогою якого можна легко обчислити громіздкі математичні вирази, що містять як елементарні, так і спеціальні функції. Для цього досить за допомогою клавіатури ввести числа і позначення функцій, розділені знаками математичних операцій, і нажати клавішу “=”. Після чого ви відразу одержите результат:

$$\boldsymbol{2\cdot 4+3\cdot(5-9)=-4} \qquad \boldsymbol{a\cos\left(\frac{1}{2}\right)\cdot 3=3{,}142}$$

$$\boldsymbol{\frac{2\cdot 4+3\cdot(5-9)=-4}{a\cos\left(\frac{1}{2}\right)\cdot 3}=-1{,}273}$$

Для введення складних виразів зручно використати панелі інструментів і кнопку вставки функції (рис. А. 1).

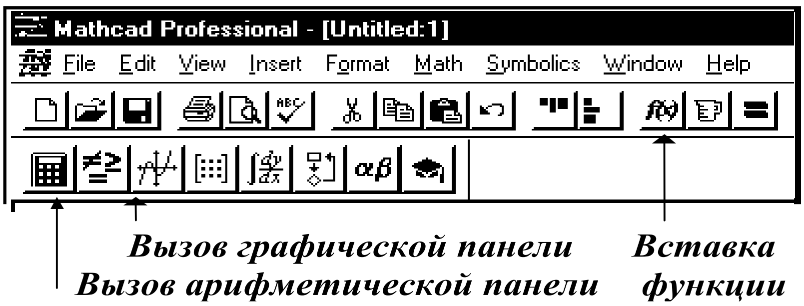


Рисунок А.1

При натисканні кнопки розвертається відповідна панель (рис. А.2), і ви одержуєте можливість вводити складні математичні вирази. При натисканні на кнопку «Вставка функції» з'являється діалогове вікно, у якому ви можете вибрати потрібну функцію. На рисунку А.2 показана арифметична панель у розгорнутому вигляді.

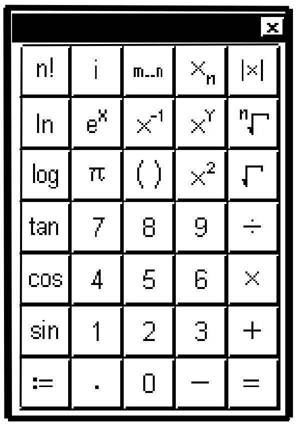


Рисунок А.2

Для виконання часто повторюваних виразів зручно задати функцію користувача. Для цього необхідно: 1) задати ім'я функції; 2) потім у дужках через кому, як це прийнято в математиці, указати аргументи функції; 3) поставити знак присвоювання “**:**=” (в MATHCADі для цього необхідно нажати клавішу із символом двокрапки “**:**” при натиснутій клавіші **Shift** або скористатися арифметичною панеллю інструментів); 4) ввести символи математичних операцій і функцій. Наприклад:

$$\boldsymbol{f(x, y) := \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}}\,.$$

Щоб одержати значення функції, тепер досить ввести її ім'я, а в дужках указати фактичні значення аргументів функції:

f(1, 0,5) =0,894 f(0,1, 5,6) =0,018.

Як аргументи функції можна використати і параметри, але їхні значення повинні бути визначені або обчислені до виклику функції, інакше ви одержите повідомлення, що функція або змінні не визначені:

f(X,Y)=.. X:=2 Y:=4 This variable or function is not defined above

При роботі в MATHCADе варто пам'ятати, що програма переглядає документ ліворуч, праворуч, а потім зверху вниз. У попередньому прикладі значення функції не обчислюється саме із цієї причини. Визначимо параметри X і Y до звертання до функції:

X: =2   Y:=4   f(X,Y)=0,447

Тепер порядок – функція обчислюється.

Робота з масивами

Масив – це впорядкована безліч однотипних елементів. Надалі ми обмежимося розглядом одномірних масивів, елементи яких є дійсними числами. Елемент масиву характеризується своїм чисельним значенням і номером, що прийнято записувати у вигляді індексу, наприклад: a_5. Результати багаторазових вимірювань якої-небудь фізичної величини – природний приклад одномірного масиву. У цьому випадку індекс елемента відповідає номеру вимірювання, а значення елемента – результату вимірювання.

При роботі з масивами в MATHCADі варто мати на увазі, що початкове значення індексу за замовчуванням має значення 0. (Початкове значення індексу можна зробити і ненульовим, перевизначивши вбудовану змінну MATHCADу «ORIGIN» у меню **Math-Options**.)

Розглянемо тепер питання, пов'язані з введенням елементів масивів, і операції з масивами. Масив можна вводити поелементно. Для цього необхідно ввести ім'я масиву (рис. А. 3), індекс (номер) елемента і після оператора присвоювання (**:=**) вести значення елемента масиву.

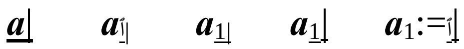


Рисунок А.3

Для ведення індексу необхідно нажати клавішу [, після чого маркер введення опуститься вниз (див. рис. А.3), увести значення індексу і клавішею ((клавіша управління курсору) повернути маркер у нормальне положення. Наприклад:

$$\boldsymbol{a_0:=1 \qquad a_1:=2 \qquad a_2:=3 \qquad a_3:=4}$$

Якщо тепер набрати ім'я масиву й натиснути клавішу =, то одержимо:

$$a = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix}$$

Тобто MATHCAD розглядає одномірний масив як вектор-стовпець. Інший спосіб введення масиву – це використання панелі інструментів або головного меню. Водимо ім'я масиву, потім у меню **Insert** (Вставка) вибираємо пункт **Matrix**, після чого з'являється діалогове вікно (рис. 4,а), у якому необхідно вказати розмірність масиву. Якщо необхідно ввести одномірний масив, то задаємо число стовпців (Columns), яке дорівнює 1, а число рядків (Rows) дорівнює числу елементів масиву. Після виконання зазначених дій ми одержимо маску уведення масиву (рис.4,б), у яку необхідно послідовно ввести елементи масиву.

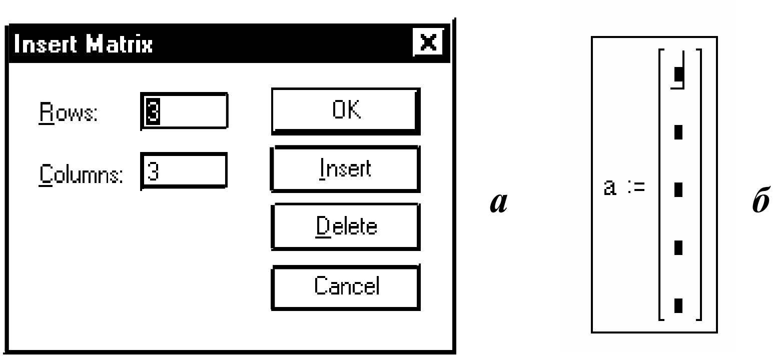


Рисунок А.4

Розглянемо на конкретних прикладах операції з масивами:

$$b := 2a \qquad c := a + 2b \qquad d := b + 2a^2$$

$$b = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \\ 8 \end{bmatrix} \qquad c = \begin{bmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 20 \end{bmatrix} \qquad d = \begin{bmatrix} 4 \\ 12 \\ 24 \\ 40 \end{bmatrix}$$

Для цього використаємо масив ***a***, визначений вище.

Наведені приклади в особливих поясненнях не мають потреби. Відзначимо деякі статистичні функції MATHCADу зручні для обробки результатів вимірювань:

mean(a) – повертає середнє арифметичне значення елементів масиву, обчислене за формулою

$$\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1} a_i \ ;$$

var(a) – повертає середньоквадратичне відхилення елементів масиву ***a*** від середнього арифметичного (дисперсія величини ***a***):

$$\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1} \left| a_i - mean(a) \right| \ ;$$

stdev(a) – повертає квадратний корінь дисперсії елементів масиву ***a***:

$$stdev(a) = \sqrt{var(a)} \ .$$

В MATHCADує ще один тип масивів – так називані ранжирувані змінні зручні для обчислення функцій, побудови графіків і т.д. Для завдання ранжируваної змінної необхідно ввести ім'я змінної, знак присвоювання, після якого вводиться початкове значення змінної, потім після коми вводиться наступне значення, змінене на величину кроку, і після символу “**..**” (дві точки, які вводяться натисканням клавіші “**;**”) – кінцеве значення змінної:

x :=0, 0.1,1 – змінна ***x***, що змінюється від 0 до 1 із кроком 0,1.

Якщо друге значення змінної не задане, то за замовчуванням крок зміни приймається дорівненим 1. Якщо тепер задати функцію від ранжируваної змінної, ввести її ім'я і натиснути клавішу “**=**”, то одержимо таблицю значень функції:

$$z := 0..3 \qquad u(z) = z^2$$

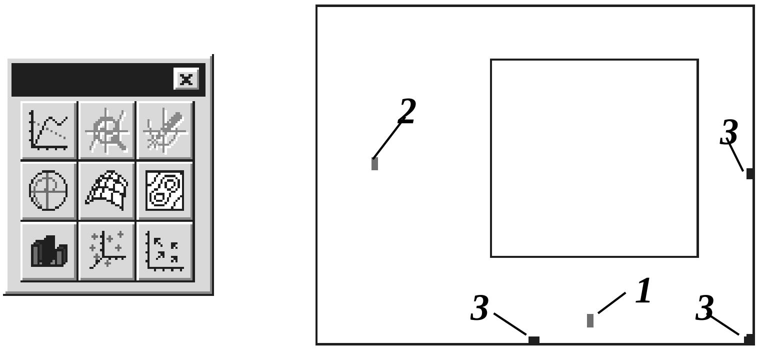
z - 0,1,2,3

u(z) - 0,1,4,9

Відзначимо, що до ранжируваної змінної незастосовні матричні і векторні операції.

Побудова графіків

Для побудови графіка функції необхідно розкрити графічну панель, що у розгорнутому вигляді показана на рисунку А.5. Далі вибираємо (щигликом миші на відповідній піктограмі) тип графіка і одержуємо заготівлю для побудови графіка. До заготівлі графіка вводимо ім'я змінної і ім'я функції, після чого клацаємо мишею поза полем графіка і одержуємо графік. Якщо необхідно змінити розмір графіка, то підводимо покажчик миші до точок зміни розмірів (покажчик при цьому набуває форми двосторонньої стрілки) і розтягуємо або стискаємо графік до потрібних розмірів. Подвійний щиглик миші на графіку викличе діалогове вікно, за допомогою якого можна вибрати потрібний масштаб осей координат, масштабну сітку, тип і кольори ліній, вид точок і т.д.



1 – маркер вводу імені змінної; 2 – маркер вводу імені функції; 3 – точки зміни размеру графіка

Рисунок А.5

Розглянемо конкретний приклад. Нехай нам необхідно визначити опір ділянки ланцюга постійного струму. Для цього виконуються вимірювання сили струму на цій ділянці при заданих значеннях напруги:

$i := 0..5$ – номер вимірювання (i – ранжирувана змінна);

$\Delta U = 0{,}2$ – крок зміни напруги;

$U_i := i\Delta U$ – значення напруги в i – му вимірюванні;

$I_0 := 0$, $I_1 := 0{,}11$, $I_2 := 0{,}19$, $I_3 := 0{,}23$, $I_4 := 0{,}41$, $I_5 := 0{,}48$ – результати вимірювання сили струму.

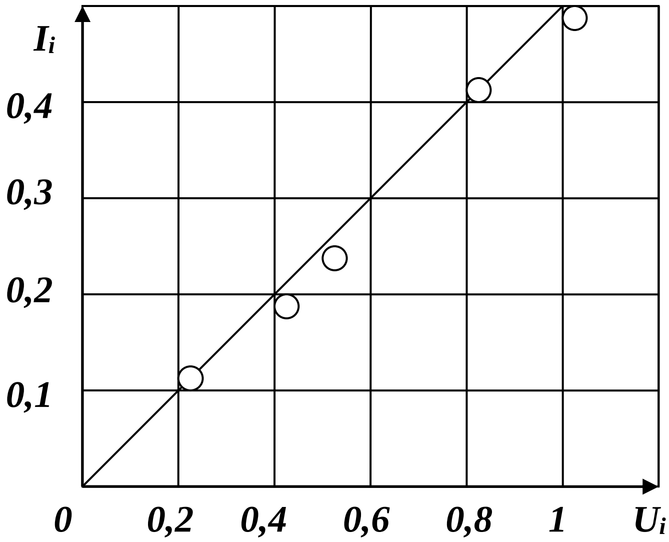


Рисунок А.6

Експериментальні результати подані на рисунку А.6 кружечками. Добре відомо, що залежність сили струму від напруги для однорідної ділянки ланцюга лінійна. Використаємо для обробки експериментальних результатів метод лінійної регресії. В MATHCADі для цього є цілий ряд функцій:

slope(vx,vy) – повертає скаляр: тангенс кута нахилу прямої, що щонайкраще наближає набір даних, поданих у векторах **vx** і **vy**, у змісті найменших квадратів;

intercept(vx,vy) – повертає скаляр: зсув віссю ординат прямій, що щонайкраще наближає набір даних, поданих у векторах ***vx*** і ***vy***, у змісті найменших квадратів.

Аргументи цих функцій: ***vx*** – речовинний вектор, елементи якого повинні йти в порядку зростання, вони відповідають значенням ***x***; ***vy*** – речовинний вектор однієї розмірності з ***vx***, його елементи відповідають значенням ***y***.

Наступний фрагмент ілюструє знаходження лінійної регресії:

$$\mathbf{a := slope\ (U,I),\ a = 0,477;\ R := \frac{1}{a},\ R = 2,026;}$$

$$\mathbf{b := intercept(U,I),\ b = -1,905 \cdot 10^{-3}.}$$

У цьому прикладі ***U*** і ***I*** – імена наведених вище одномірних масивів значень сили струму і напруги, а величина ***R*** – опір ділянки ланцюга, що потрібно було визначити. Графік лінійної функції $\boldsymbol{aU_i + b}$ зображений на рисунку А.6 суцільною прямою лінією. Для відображення на одному графіку декількох функцій потрібно послідовно ввести їхні імена в поле введення імені функції, використовуючи як роздільник кому.

На закінчення відзначимо, що MATHCAD містить багатий арсенал убудованих функцій для статистичної обробки експериментальних результатів, а також для їхнього графічного відображення. Докладну інформацію про вбудовані функції можна знайти у файлах Допомоги (Help), а приклади використання цих функцій – у Шпаргалках (QuickSheets).

Навчальне видання

КОСТЕНКО Володимир Михайлович
СОЛОМІНА Вікторія Федорівна
ТУЛУПЕНКО Віктор Миколайович

Механіка. Молекулярна фізика
та термодинаміка
Методичний посібник
до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика»

Редактор І.І.Дьякова

Комп'ютерна верстка О.П.Ордіна

227/2007. Підп. до друку 24.11.08. Формат 60х84/16.
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 5,35. Обл.-вид. арк. 3,48.
Тираж 200 прим. Зам. № 266.

Видавець і виготівник
«Донбаська державна машинобудівна академія»
84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
серія ДК № 1633 від 24.12.2003