

Міністерствоосвіти і науки України

Сумськийдержавнийуніверситет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з курсу «Фізика»

для студентів2-го курсу

факультету електроніки та інформаційних технологій

денноїформинавчання

Розділ «**МЕХАНІКА**»

Суми

Вид-во СумДУ

2019

Міністерствоосвіти і науки України

Сумськийдержавнийуніверситет

До друку та в світ дозволяю на підставі

«Єдиних правил» п.2.6.14

Заступник першого проректора – начальник організаційно-методичного

управління В.Б. Юскаєв

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторнихробіт з курсу «Фізика»

для студентівфакультету електроніки та інформаційних технологій

денноїформинавчання

Розділ «МЕХАНІКА»

Усіцитати, цифровий та фактичнийматеріал, бібліографічнівідомостіперевірені, записодиниць

відповідає стандартам

Укладачі: Ю.О.Шкурдода

Відповідальний за випуск

Декан факультету ЕлІТ

Суми

Вид-во СумДУ

2019

**ЗМІСТ**

[ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ 6](#_Toc14725956)

[1 СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ 8](#_Toc14725957)

[1.1 Похибки вимірювань 8](#_Toc14725958)

[1.2 Статистична обробка результатів прямих вимірювань 10](#_Toc14725959)

[1.3 Статистична обробка результатів непрямих вимірювань 21](#_Toc14725960)

[1.4 Графічне зображення результатів експерименту 25](#_Toc14725961)

[1.5 Абсолютні та відносні похибки результату математичних операцій 33](#_Toc14725962)

[1.6 Наближені обчислення 35](#_Toc14725963)

[1.7 Запис результатів.Точність розрахунків 38](#_Toc14725964)

[2 МЕХАНІКА 40](#_Toc14725965)

[2.1 Лабораторна робота «ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ ВЕЛИЧИН ТА ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ТІЛ ПРАВИЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ» 40](#_Toc14725966)

[2.2 Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИНИ АТВУДА» 55](#_Toc14725967)

[2.3 Лабораторна робота «Визначення прискорення вільного падіння за допомогою МАТЕМАТИЧНОГО ТА оборотного маятникІВ» 60](#_Toc14725968)

[2.4 Лабораторна робота «Визначення коефіцієнта тертя кочення за допомогою похилого маятника» 67](#_Toc14725969)

[2.5 Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО УДАРУ ДВОХ КУЛЬОК» 74](#_Toc14725970)

[2.6 Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ СУЦІЛЬНИХ ЦИЛІНДРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА» 82](#_Toc14725971)

[2.7 Лабораторна робота «Визначення моменту інерції маятника Максвела» 86](#_Toc14725972)

[2.8 Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В’ЯЗКОСТІ РІДИН МЕТОДОМ СТОКСА» 94](#_Toc14725973)

[2.9 Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ КОЛИВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ТА ПРУЖИНОГО МАЯТНИКІВ» 99](#_Toc14725974)

[2.10 Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯ ЗГАСАЮЧИХ КОЛИВАНЬ ТА ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ ПРИ ВИМУШЕНИХ КОЛИВАННЯХ» 104](#_Toc14725975)

[2.11 Лабораторна робота «ВИКОРИСТАННЯ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ» 117](#_Toc14725976)

[3 МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА 124](#_Toc14725977)

[3.1 Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯ СПОСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ» 124](#_Toc14725978)

[3.2 Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯ СПОСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ» 128](#_Toc14725979)

[3.3 Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ПОВІТРЯ» 137](#_Toc14725980)

[3.4 Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ ТА ЇХ ЕФЕКТИВНОГО ДІАМЕТРУ» 140](#_Toc14725981)

[3.5 Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИФУЗІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ В ПОВІТРІ» 146](#_Toc14725982)

[3.6 Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ» 152](#_Toc14725983)

[3.7 Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ БОЛЬЦМАНА» 160](#_Toc14725984)

[3.8 Лабораторна робота №3.8 164](#_Toc14725985)

[3.9 Лабораторна робота № 3.9 180](#_Toc14725986)

[3.10 Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ФРЕОНУ» 190](#_Toc14725987)

[3.11 Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНІСТІ МЕТАЛІВ МЕТОДОМ ОХОЛОДЖЕННЯ» 195](#_Toc14725988)

[3.12 Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕССУ ЕЛЕКТРОВІДКАЧКИ» 202](#_Toc14725989)

[СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ 210](#_Toc14725990)

# ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

На першому занятті кожному студенту треба ознайомитися з правилами поводження і технікою безпеки під час роботи в лабораторії й розписатися в журналі, засвідчивши свої зобов’язання виконувати ці правила. За порушення правил безпеки студент несе адміністративну відповідальність.

У лабораторії студенти виконують роботи згідно з варіантом завдання і графіком. Студент, який з будь-яких причин не виконав роботу, виконує її індивідуально за графіком відпрацювань в лабораторії.

Виконання кожної лабораторної роботи складається з таких етапів:

* підготовці до виконання роботи;
* проведенні експериментів;
* обробці результатів вимірювань та оформлення звіту;
* захисті роботи.

***Підготовка до виконання роботи*** проводиться до початку лабораторних занять у час, відведений для самостійної роботи, і полягає в наступному:

* вивченні теоретичного матеріалу за підручниками і конспектами лекцій;
* вивченні методики проведення лабораторної роботи.

На початку заняття викладач перевіряє виконання цього етапу і допускає студента до виконання лабораторної роботи.

Результати експериментальних вимірювань заносять до таблиць і подають викладачеві для їх затвердження.

Обробка результатів вимірювань полягає в обчисленні значень фізичних величин у кожній конкретній лабораторній роботі, у побудові потрібних графічних залежностей згідно зі завданням та в оформленні звіту.

***Захист роботи.***Під час захисту роботи студент має підтвердити знання основних фізичних законів, які описують досліджуване явище, методику визначення основних величин, обґрунтувати отриманий результат експерименту, кількісно оформити звіт. Незахищена з будь-яких причин робота не зараховується.

# СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

## Похибкивимірювань

Під ***вимірюванням*** розуміють експериментальне визначення певної фізичної величини. Виміряти будь-яку величину – означає дізнатися, скільки разів міститься в ній однорідна з нею величина, прийнята за одиницю вимірювання.

Безпосередньо виміряти дану величину можна лише в окремих випадках – за наявності відповідних приладів (лінійка, амперметр, секундомір тощо). Такі вимірювання дістали назву ***прямих вимірювань***. однак вимірюють безпосередньо, як правило, не шукану величину, а деякі інші величини, що, у свою чергу, пов’язані з нею певними співвідношеннями (наприклад, визначення густини тіла за його геометричними розмірами і масою; визначення опору за величиною напруги та сили струму тощо). Такі вимірювання дістали назву ***непрямих вимірювань***.

Жодна фізична величина, у принципі, не може бути виміряна точно, а лише з певною похибкою. Різниця між результатом вимірювання та істинним значенням вимірюваної величини називається ***абсолютною похибкою***вимірювання.

Вона визначається за формулою:

, (1.1)

де ∆*xi*– абсолютна похибка *i*-го вимірювання;

*хi* – результат *i*-го вимірювання;

*Х* – істинне значення вимірюваної величини.

Поряд з абсолютною похибкою ∆*x* використовуєтьсявідносна похибка ε, яка дорівнює відношенню абсолютної похибки до істинного значення вимірюваної величини:

. (1.2)

Відносна похибка може бути виражена у відсотках.

За характером впливу на результати вимірювання похибки поділяються на три види: систематичні, випадкові та промахи.

**Систематичні похибки.** Систематичні похибки діють „в один бік”, даючи під час повторних вимірювань або завжди завищене, або завжди занижене значення вимірюваної величини. Вони можуть бути обумовлені як несправністю приладів (зокрема, збитий нуль відліку), так і неврахуванням якогось чинника у формулі (якщо шукана величина розраховується за цією формулою) або методом вимірювання та ін.

Зведення до мінімуму систематичних похибок вимагає вживання спеціальних заходів, а саме:

1. своєчасний ремонт і систематична перевірка приладів;
2. використання спеціальних способів вимірювання (наприклад, подвійне зважування для виключення нерівностей плечей ваг, використання охоронних кілець під час вимірювання об’ємного опору провідників, що дозволяє виключити вплив їх поверхні);
3. внесення відповідних виправлень на вплив зовнішніх чинників.

**Випадкові похибки.** Випадковими називаються похибки, величина і знак яких змінюється непередбачено під час повторних вимірювань даної величини за тих самих умов. Випадкові похибки можуть бути спричинені дією різних неконтрольованих чинників: поштовхів, повітряних потоків, порошин тощо. Джерелом випадкових помилок може бути й сам експериментатор через недосконалість його органів чуттів. Так, результати повторних вимірювань періоду коливань математичного маятника за допомогою дуже точного секундоміра обов’язково будуть щораз дещо відмінними внаслідок того, що моменти знаходження маятника у відповідних фазах відхилення фіксуються неточно: під час пуску секундоміра експериментатор може трохи забаритися, під час його зупинки, навпаки, поспішити. Випадкові похибки відхиляють результат то в один, то в інший бік від істинного значення вимірюваної величини, тому результати (*хi*) великої кількості вимірювань симетрично розташовуються відносно *Х*.

Вплив випадкових похибок можна значно зменшити усередненням результатів великої кількості вимірювань. Справді, нехай *x1*, *x2*, *x3*,*…*, *xn* – результати окремих вимірів, а

, , . . .; (1.3)

їх абсолютні похибки ∆*xn*, де *n* – повна кількість вимірювань. Додавши ліві і праві частини рівності (1.3), одержимо:

Звідси

(1.4)

Величина

(1.5)

називається ***середнім арифметичним результатом серії вимірювань***. Середнє арифметичне значення абсолютної похибки якщо *n* → ∞, прямує до нуля. Тому за великої кількості вимірювань можна вважати, що . Чим більшим є *n*, тим точніше виконується ця рівність.

**Промахи. *Промах*** – це груба похибка, викликана, як правило, неуважністю експериментатора (неправильний відлік показів приладу, описка під час запису показів тощо). Промахи виявляютьcя в процесі ґрунтовного аналізу результатів вимірювань, що дає змогу повторити їх у відповідних точках.

## Статистична обробка результатів прямих вимірювань

Раніше було показано, що усередненням результатів досить великої кількості вимірювань *n* можна значною мірою зменшити вплив випадкових похибок. Однак на практиці *n* невелике, тому й відрізняється від *Х*. Постає завдання оцінки ступеня відхилення середнього значення від істинного *Х*.

### Нормальний закон розподілу випадкових похибок

Нехай *х1*, *х2* … *хn* – результати окремих вимірювань. Приймемо, що *n* досить велике, і під час оцінки похибок будемо вважати, що

(1.6)

Визначивши абсолютні похибки ∆*xi*, відсортуємо їх за величиною. Для цього весь діапазон отриманих значень ∆*xi* поділимо на однакові малі інтервали ∆ε і підрахуємо, скільки разів величина помилки попадає в кожний інтервал. Якщо в інтервал за номером *k* попали ∆*nk* значень похибки, то ймовірність попадання похибки в цей інтервал становить



Рис. 1.1. Гістограма ймовір­ності абсолютних похибок

. (1.7)

Якщо значення ймовірності для кожного інтервалу відкласти по осі ординат, то одержимо ступінчату діаграму, зображену на рис. 1.1, яка називається ***гістограмою***.

Оскільки ω*k* залежить від Δε, то по осі ординат зручніше відкладати не ω*k*, а величину , яка називається ***густиною розподілу ймовірностей***. Очевидно, *f*(∆*xi*) = ω*k*, якщо ∆ε = 1. Це означає, що *f*(∆*xi*) є ймовірність, віднесена до одиничного інтервалу ∆ε. Вигляд гістограми *f*(∆*xi*) буде таким самим, як і вигляд гістограми ω*k*(∆*xi*).

Якщо збільшити кількість вимірювань *n* (*n* → ∞) і будувати гістограми для все більш малих інтервалів Δε, то за Δε → 0 середини верхніх площадок прямокутників зіллються в плавну криву розподілу ймовірностей.

Досвід показує, що в більшості випадків розподіл похибок відповідає так званому ***нормальному закону розподілу випадкової величини***, знайденому Гауссом. Згідно з гауссовим розподілом, густина ймовірності *f*(∆*xi*) і величина похибки Δ*xi* пов’язані співвідношенням

(1.8)

де σ2 – дисперсія розподілу (деякий постійний параметр, зміст якого з’ясовується далі).

З формули густини ймовірності можна одержати ймовірність ω(∆*xk*) того, що величина похибки лежить в інтервалі від ∆*xk* до ∆*xk*+∆ε:ω(∆*xk*)=f(∆*xk*)∙∆ε.

Чисельно ця ймовірність дорівнює площі зображеного прямокутника на рис. 1.2 з основою ∆ε. Імовірність того, що модуль похибки не перевіщуватиме деякого значення ∆*xk*, зобразиться заштрихованою площею з основою 2∆*xk*. Цю ймовірність можна одержати, обчислюючи інтеграл

Рис. 1.2. Розподіл імовірностей випадкових похибок



 (1.9)

На рис. 1.3 подані криві розподілу, що відповідають різним σ. Видно, що зі збільшенням σ максимум кривої розподілу знижується, а її „крила” розширюються. Відповідно до сказаного раніше про геометричний зміст імовірності це означає, що зі зростанням σ імовірність малих похибок зменшується, а ймовірність більших збільшується. Отже, чим ***більшою є дисперсія*** розподілу σ2, тим ***менша точність*** вимірів.

Слід зазначити, що крива *f*(∆*xi*) характеризує не якусь серію вимірювань, а деяку уявну сукупність нескінченної кількості вимірювань даної величини в тих самих умовах. Така сукупність називається ***генеральною***. Усяка ж кінцева серія вимірів дістала назву ***випадкової*** вибірки з генеральної сукупності.



Рис. 1.3. Криві розподілу випадкових похибок з різними дисперсіями

### Середньоквадратична похибка

Нехай *х1*, *х2* … *хn* – результати деякої серії *n* вимірів, проведених в однакових умовах. Охарактеризуємо похибки окремих вимірів даної серії деякою середньою величиною. У теорії похибок за таку характеристику беруть так звану ***середньоквадратичну похибку***вибірки *Sn*:

. (1.10)

*Sn* називають також ***вибірковим стандартним відхиленням***.

Можна показати, що за досить великої кількості вимірювань *Sn* ≈ σ, а отже, дисперсія розподілу

(1.11)

Таким чином, дисперсія розподілу приблизно дорівнює середньому квадрату похибки окремих вимірів, знайденому за досить великого значення *n*. Для генеральної сукупності (*n* → ∞) рівність (1.11) виконується точно.

### Середньоквадратична похибка середнього

Припустимо, що ми провели серію *n* вимірів деякої величини *х*, результати яких становлять *х1*, *х2*, … *хn*. Найкращим наближенням до істинного значення є величина яку ми назвемо ***середнім вибірковим значенням вимірюваної величини***. Якщо серію по *n* вимірювань у кожній повторити *m* разів, то ми одержимо *m* значень , які дещо відрізняються одне від одного та від істинного значення *Х* вимірюваної величини. Похибки є випадковими і так само, як похибки окремих вимірів Δ*xi*= *xi*- *Х*, відповідають гауссовому розподілу, але з іншою дисперсією . Величина , яка називається ***дисперсією середнього***, є мірою похибки середнього значення, знайденого в серії з *n* вимірів. У теорії похибки доводиться, що .

Це означає, що на відміну від σ залежить від кількості проведених вимірювань:

. (1.12)

Таким чином, середньоквадратична похибка середнього результату *n* вимірів в *n*1/2 разів менша за середньоквадратичну похибку окремих вимірювань. З формул (1.11) і (1.12) одержуємо, що за великого значення *n*

.

Величина

(1.13)

називається ***вибірковою середньоквадратичною похибкою середнього***.

### Довірчий інтервал і довірча ймовірність

Як уже наголошувалося, для будь-якої скінченної вибірки . Практично дуже важливо оцінити можливу величину відхилення середнього значення від істинного *Х*, тобто Інтервал , у який із заданою ймовірністю α попадає істинне значення *Х* вимірюваної величини, називається ***довірчим*** інтервалом, що відповідає ймовірності α. Імовірність α називається також ***довірчою ймовірністю***, або ***надійністю***. Величина Δ*Х* характеризує точність оцінки. Чим меншою є різниця , тим вища точність.

Надійність, що відповідає заданій точності Δ*Х*, можна обчислити теоретично, скориставшись гауссовим розподілом, якщо відома дисперсія

. (1.14)

Величина α дорівнює площі заштрихованої фігури, що опирається на відрізок 2Δ*Х* (рис 1.4). Із співвідношення зрозуміло, що надійність, яка відповідає заданій точності ∆*Х*, підвищується зі збільшенням кількості вимірювань і величини додаткового інтервалу.

Можна показати, що α є функцією величини . Графік функції F(*k*) наведений на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Графік функції



Рис. 1.4. Крива розподілу ймовірнос­тей випадкових похибок середнього

Як бачимо, зі збільшенням *k* зростає й довірча ймовірність α. Так, α = 0,68 для k = 1; α = 0,95 для k = 2; α = 0,997 для k = 3. Результати розрахунків F для різних *k* наведені в табл. 1.1.

Якщо *n* мале (*n* < 30), то і для розрахунку розподілом Гаусса користуватися не можна. У цьому разі використовують розподіл, виведений англійським математиком і хіміком Госсетом (псевдонім – Стьюдент).



Рис. 1.6. Розподіл Стьюдента для вибірок різних об’ємів

У розподілі Стьюдента густина розподілу ймовірностей розглядається як функція величини названа ***коефіцієнтом Стьюдента***(середньоквадратична похибка середнього арифметичного визначається за формулою (1.13)).

Розподіл Стьюдента залежить від *n* і, якщо *n* → ∞, переходить у розподіл Гаусса.

На рис. 1.6 наведені криві F(*t*) за різних значень *n*. Обчисливши за результатами вимірів і задавши величину Δ*X*, можна знайти *t* і α, що відповідають даному n. Навпаки, задавши надійність α, можна обчислити *t*α,*n* і відповідну точність Δ*X*= *t*α,*n*· заданного значення *n*.

Значення α і *t*α,*n* для різних *n* наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнт Стьюдента *t*α,*n* залежно від довірчої ймовірності та кількості вимірювань *n*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *n* |  |  | *n* |  |  | *n* |  |  |
| 2 | 1,963 | 12,71 | 6 | 1,156 | 2,57 | 10 | 1,100 | 2,26 |
| 3 | 1,336 | 4,30 | 7 | 1,134 | 2,45 | 30 | 1,055 | 2,04 |
| 4 | 1,250 | 3,18 | 8 | 1,119 | 2,36 | 60 | 1,046 | 2,00 |
| 5 | 1,190 | 2,77 | 9 | 1,108 | 2,31 | 120 | 1,041 | 1,98 |

Статистична обробка прямих вимірювань подається у вигляді інтервалу

,або . (1.15)

На практиці задання величини Δ*X* визначається конкретними умовами. Припустимо, що деяке підприємство виготовляє резистори певного номіналу. Природно, що завдяки дії різних випадкових чинників величини опорів *R* відхилятимуться від їх номінальних значень. Вимірявши *R* для великої партії резисторів (*n*>>30), можна побудувати криву *y*(Δ*R*) і знайти дисперсію . Якщо взяти Δ*Х*= σ, то ймовірність того, що величина опору виготовленого резистора попаде в довірчий інтервал, дорівнюватиме 0,69.

Якщо за умовами роботи приладів, у яких використовуються ці резистори, довірчий інтервал повинен бути малим, то для збереження великої надійності необхідно поліпшити технологію їх виробництва.

Точність електровимірювальних приладів визначається класом їх точності й відповідає надійності α = 0,997 (). У лабораторних умовах можна задовольнитися надійністю α = 0,69 (), або α = 0,95 ().

Для оцінки довірчого інтервалу прямих вимірювань пропонується такий порядок:

1. Провести серію вимірювань досліджуваної величини *Х* та оцінити середнє вибіркове :
2. Знайти абсолютну похибку одиничних вимірювань Δ*хi*: .
3. Визначити середньоквадратичну помилку середнього арифметичного:

.

1. Визначити точність вимірювання Δ*X* за заданих *n* і α:

.

1. Записати довірчий інтервал для істинного значення вимірюваної величини: або .

***Приклад* 1**

Нехай проведено шість вимірювань товщини пластинки штангенциркулем за незмінних умов, результати яких є такими: *d*1= 30,12 мм, *d*2= 30,0 мм, *d*3= 30,1 мм, *d*4= 29,8 мм, *d*5= 29,9 мм, *d*6= 30,1 мм.

Ціна найменшої поділки штангенциркуля дорівнює 0,1 мм, тобто похибка приладу становить Δ*dпр*= 0,05 мм.

Обчислимо середнє арифметичне значення товщини пластинки: *dср*= (*d*1+ *d*2+ ... + *d*6)/5 = 30,0 мм.

Абсолютні похибки окремих вимірювань: Δ*d*1= 30,1 – 30,0 = 0,1 мм; Δ*d*2= 0 мм, Δ*d*3= 0,1 мм, Δ*d*4= -0,2 мм, Δ*d*5= -0,1 мм, Δ*d*6=0,1 мм.

Стандартне відхилення:

Довірчий інтервал для ймовірності σ = 0,95: Δ*d*0,95;6= 2,6*S* = 0,1 мм.

Повна абсолютна похибка:

Відносна похибка:Δ*d*/*dср*= 0,03 (3%).

Результати вимірювань й обчислень для безпосередньо вимірюваних величин зручно подати у вигляді таблиці, записавши поряд і кінцевий результат.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| n | *d*i | *d*ср | Δ*d*i | S | *t*0,95,6 | Δ*d*0,95,6 | Δ*d*пр | Δ*d* | Δ*d*/*d*ср |
| 1 | 30,1 | 30,0 | 0,1 | 0,05 | 2,6 | 0,1 | 0,05 | 0,1 | 3% |
| 2 | 30,0 | 0,0 |  |  |  |  |
| 3 | 30,1 | 0,1 |  | | | |
| 4 | 29,8 | -0,2 |  | | | |
| 5 | 29,9 | -0,1 |
| 6 | 30,1 | 0,1 |  |  |  |  |

### Урахування систематичної і випадкової похибки

У загальному випадку оцінка систематичної похибки є важким завданням. Однак якщо систематична похибка обумовлена точністю приладу, то можна оцінити верхню межу можливих помилок, знаючи клас його точності. Якщо точність обумовлена випадковою похибкою -Δ*Х*, а величина систематичної похибки -δ, то величина сумарної точності Δ*Х*\* визначається за формулою:

, (1.16)

де *k*α= *t*α(∞) – коефіцієнт Стьюдента, якщо *n*= ∞.

Під час досить грубих вимірювань простими приладами (штангенциркуль, секундомір) за похибку приладу Δ*Хпр* приймається половина ціни найменшої поділки його шкали (або точність ноніуса): Δ*Хпр*= 0,5 ціни найменшої поділки.

Повна абсолютна похибка безпосередньо виміряної величини обчислюється за формулою:

. (1.17)

Якщо одна із похибок становить менше 0,2 другої, тоді у формулі (1.17) нею можна знехтувати, оскільки її відносний вклад у повну похибку становитиме менш ніж 2%.

## Статистичнаобробкарезультатівнепрямихвимірювань

### Два способи оцінки похибки непрямих вимірювань

Нехай *x*, *y*, *z* – безпосередньо вимірювані величини, а *W = f*(*x*, *y*, *z*) – їх функція, тобто величина, вимірювана посередньо. Розглянемо два способи оцінки похибки величини *W*.

*I спосіб*. Якщо непрямі вимірювання проводяться у невідтворюваних умовах, то значення *Wi*обчислюються для кожного окремого випадку, а потім обробляються як прямі вимірювання.

*II спосіб* дозволяє обчислити похибки непрямого вимірювання як функцію похибок прямих вимірювань. Далі розглянемо детальніше цей спосіб.

### Часткові похибки та загальна похибка непрямого вимірювання

Обробляючи прямі вимірювання величин *x*, *y*, *z*, …, ми знаходимо їх вибіркові середні значення …, які є випадковими величинами. Очевидно, що й величина – вибіркове середнє шуканої функції – буде також випадковою величиною. Завдання полягає в тому, щоб визначити, з якою ймовірністю шукана величина *W* попаде в деякий заданий інтервал *W*± Δ*W*. У загальному випадку це завдання досить складне, і ми обмежимося лише його наближеним розв’язком.

Якщо формула *W*= *f*(*x*, *y*, *z*) незручна для логарифмування, тобто вона є сумою або різницею, тоді простіше спочатку визначити абсолютну похибку Δ*W*.

Розглянемо спочатку випадок, коли *W* є функцією тільки однієї змінної, тобто *W*= *W*(*x*). Розкладемо функцію *W*(*x*) у ряд Тейлора в околі точки *х = Х* (*Х* – істинне значення *х*). У випадку, коли похибка прямого вимірювання досить мала, можна обмежитися лише лінійним членом і вважати, що

Звідси

(1.18)

З (1.18) випливає

, (1.19)

де і – середні квадратичні похибки величин і .

Довірчий інтервал величини *W*, що відповідає надійності α, визначається як

, (1.20)

де Δ*W* – точність величини *х*, що відповідає тій самій надійності α.

Якщо результат непрямого вимірювання *W* є функцією багатьох змінних, тобто *W*= *W*(*x*, *y*, *z*), то за формулою (1.20) можна обчислити похибки Δ*Wx*, Δ*Wy*, Δ*Wz,* обумовлені кожним аргументом і названі ***частиннимипохибками***. Вони дорівнюють:

, ,

, (1.21)

де – частинні похідні функцій *W.*

Загальна похибка непрямого вимірювання в цьому разі обчислюється за формулами:

(1.22)

і

(1.23)

***Приклад* 2**

Потрібно визначити, яку початкову швидкість надає кулі деякий стріляючий пристрій, якщо є можливість виміряти деяку проміжну висоту *h* і відповідний їй час підйому кулі *t*.

Із відомої формули отримаємо формулу для початкової швидкості кулі: .

Нехай у результаті вимірювань одержали такі середні значення *h*, *t* та їх похибок: *h =*(2,457 ± 0,05) м, Δ*h*/*h*= 2,2%; *t*= (0,483 ± 0,011) c, Δ*t*/*t*= 2,3%.

Значення g знаходимо із довідника: g = (9,81 ± 0,005) м/с2.

Визначимо середню (найбільш імовірну) швидкість, підставивши у формулу для *V*cередні значення *h* і *t*:

*V*= 2,457/0,483 + 9,81·0,483/2 = 7,4560715 м/c.

Для оцінки похибки швидкості виведемо формули для частинних похідних *V* по *h*, *t* і g, розглядаючи *V* як функцію тієї змінної, за якою проводиться диференціювання, а дві інші вважаючи постійними:

d*V*/d*h*= 1/*t*,

d*V*/d*t*= -*h*/*t*2+ g/2,

d*V*/dg = *t*/2.

Знаходимо вклади до похибки *V*, обумовлені похибками *h*, *t* і g:

(Δ*Vh*)2= (d*V*/d*h*·Δ*h*)2= Δ*h*2/*t*2= (0,05)2/(0,483)2= 0,483·0,0107 м2/с2;

(Δ*Vt*)2= (d*V*/d*t*·Δ*t*)2= (-*h*/*t*2+g/2)2·(Δ*t*)2 = (-2,457/0,4832-9,81/2)2·0,0112 = = 0,00383 м2/с2;

(Δ*V*g)2 = (d*V*/dg·Δg)2 = *t*2/4·(Δg)2 = 0,4832/4·0,0052 = 0,0000015 м2/с2.

Потім знаходимо повну абсолютну похибку, округливши кінцевий результат до двох значущих цифр:



відносну похибку: Δ*V*/*V*= 0,016.

Кінцевий результат: *V =*(7,46 ± 0,12) м/c, Δ*V*/*V*= 1,6%.

### Відносна похибка непрямих вимірювань

У більшості випадків робоча формула зручна для логарифмування, тобто в ній переважають дії множення, ділення і піднесення до степеня, а суми і різниці якщо і присутні, то лише у вигляді окремих множників. Тоді більш простим є „логарифмічний метод”, коли спочатку визначають не абсолютну, а відносну похибку .

На підставі відомої формули можна сформулювати таке правило розрахунку відносної похибки. Припустимо спочатку, що *W*= *W*(*x*) – функція однієї змінної. Тоді відносна похибка

(1.24)

тобто для знаходження η*W* необхідно спочатку прологарифмувати вираз *W*(*x*), а потім продиференціювати його по *х*.

У випадку багатьох змінних можна, як і для абсолютних похибок, ввести частинні відносні похибки

(1.25)

Тоді загальна відносна похибка визначиться як у (1.22):

.

***Приклад* 3**

Нехай , де А – константа. Прологарифмуємо *W*.

.

За формулою (1.25) знайдемо частинні відносні похибки:

,

й остаточно

.

У цій формулі *x* i *y* – середні значення за результатами прямих вимірювань, а ∆*х* і ∆*y* – їх відповідні похибки.

Визначивши відносну похибку η*W*, можна розрахувати абсолютну похибку за формулою:

.

## Графічнезображеннярезультатівексперименту

### Задачі графічного зображення і врахування похибок

У багатьох випадках під час обробки результатів фізичного експерименту використовують графічний метод, який дає можливість наочно подавати результати експерименту – залежність функції *y* (величина, закономірність якої вивчається) від аргументу *x* (величина, від якої залежить значення функції), а також знаходити величини y*Y* для таких значень *x*, які безпосередньо вимірюванням не досліджувалися, наприклад, для значення *x*, проміжного між двома вимірюваннями *x*1 і *x*2(інтерполяція).

Мова може йти також про знаходження значень функції *y*= *f(x)* для значень аргументу *x*, менших (або більших), ніж найменше (найбільше) з вимірюваних – екстраполяція. Звичайно, при цьому має бути тверда впевненість у тому, що характер залежності *y*= *f(x)* зберігається для областей, де вимірювання не виконувалися.

Для побудови графіків (рис. 1.7) слід насамперед раціонально вибрати масштаб, тобто щоб на графіку цього розміру (аркуш міліметрового паперу) розмістився весь діапазон експериментальних значень фізичних величин, які відкладають на координатних осях, і щоб ціна однієї поділки виражалася, по можливості, цілим числом. Одночасно під час вибору масштабу доцільно підпорядковувати точність вимірювання точності відліку за графіком. Крім того, необхідно зосередити увагу на чіткому вираженні експериментальних даних (експериментальна крива має бути не дуже крутою і не дуже пологою, бо на таких кривих важко робити відліки). Потрібно, по можливості, використати всю площу графіка (якщо дослідні дані величин *x* і *y* набагато відрізняються від нуля, відлік поділок потрібно починати на осях з деяких значень, які дещо менші від одержаних під час досліду). Після нанесення на шкали міток біля них пишуть необхідні цифри. На кінцях координатних осей (шкал) наносять позначення відкладуваних величин, а одиниці їх вимірювання відокремлюють комою; якщо напис має більше п’яти знаків, то його розміщують уздовж осі, посередині.



Рис. 1.7. Приклад побудови графіка залежності *F*(*T*)

Потрібно звернути увагу на те, що числа, знайдені шляхом вимірювання фізичних величин, є наближеними. Тому замість числа *y* слід писати *x*+ ∆*x*, замість *y*– число *y*+ ∆*y*. Звідси випливає, що замість точок на графіках треба було б зображати експериментальні дані маленькими прямокутниками, з основами 2∆*x* і висотами 2∆*y*, усередині яких і містяться справжні дані, знайдені в результаті ідеального експерименту. Відповідно до цього можна було б провести дві граничні криві, між якими проходить крива, що зображає, який насправді вигляд має функція *y*= *f(x)*.

Під час фізичного практикуму звичайно обмежуються нанесенням точок, а потім за допомогою лекал креслять плавну криву так, щоб вона проходила якомога ближче до всіх експериментальних точок і щоб приблизно однакова кількість точок була по обидва боки лінії. Крива повинна, як правило, лежати в межах похибок вимірювання. Чим меншими є ці похибки, тим краще крива збігається з експериментальними точками.

Похибки значень функції, як правило, більші від похибок аргументу, тому на графіках подають лише похибку функції у вигляді відрізка прямої, довжина якої дорівнює подвоєній похибці в певному масштабі. При цьому експериментальна точка міститься всередині цього відрізка, який з обох кінців обмежується рисками (рис. 1.7).

Точки перетину, максимуму, мінімуму на експериментальних кривих відповідають якісним змінам у системах, наприклад появі нової фази тощо. У таких точках порушується рівномірність зміни всіх властивостей системи. В областях, близьких до цих сингулярних точок, необхідно проводити вимірювання значно частіше. Будуючи графіки плавних залежностей, не варто брати багато точок.

Якщо окремі точки значно відхиляються від кривої, то це може свідчити про великі похибки вимірювання або очевидні промахи. Це, у свою чергу, свідчить про потребу підвищення в цих областях якості вимірювання.

Оскільки нанесення на графіки похибок вимагає додаткових витрат часу і призводить до ускладнення графіків, їх слід наносити лише в разі потреби. Доцільність нанесення похибок на графіку можна продемонструвати на такому прикладі. Нехай потрібно провести криву через експериментальні точки, зображені на рис. 1.8. З’єднати точки графіка ламаною лінією А (рис. 1.8а) не можна, бо це означало б, що за зміни однієї величини інша змінюється стрибками, що малоймовірно. Як саме з’єднати точки, яку саме криву провести – пряму лінію чи плавну криву, – визначають межі похибок вимірювань. Якщо вони такі, як на рис. 1.8а, то через точки графіка треба провести плавну криву Б; якщо ж похибки такі, як на рис. 1.8б, тоді слід провести пряму лінію С, бо вона є найпростішою функціональною залежністю. Експериментальні значення задовольняють і рівняння кривої (рис. 1.8б) графіка Б, але за таких великих похибок через експериментальні точки можна провести багато різних кривих, що відповідатимуть великій кількості функціональних залежностей. Тому через експериментальні точки, що на рис. 1.8б, найкраще провести пряму лінію.



б

а

Рис. 1.8. Приклади проведення кривої через експериментальні точки

### Визначення параметрів лінійної залежності

Існують математичні методи, що дозволяють за експериментальними точками провести лінію, яка якнайкраще відповідає реальній функціональній залежності *y*= *f*(*x*). Обмежимося лише прикладом лінійної функціональної залежності:

*y*= a*x*+ b. (1.26)

Лінійна залежність досить поширена у фізиці. Навіть якщо залежність нелінійна, звичайно намагаються перетворити її так, щоб звести до лінійної. Наприклад, залежність *y*= Aeα/*x* логарифмуванням перетворюється до виду ln *y*= ln A + α/*x*, і на графіку будується залежність:

ln*y*= *f*(1/*x*).

Нижче наведені два методи знаходження найбільш імовірних параметрів лінії (коефіцієнтів *а* і *b* рівняння (1.26)), що проходить через набір експериментальних точок.

**Метод парних точок.** Метод парних точок є найбільш простим і застосовується переважно для визначення лише нахилу прямої, тобто коефіцієнта *а*.



Рис. 1.9. Метод парних точок

Припустимо, що в нас є вісім точок, які лежать на одній прямій. Потрібно знайти найкраще значення тангенса кута нахилу *а* і його похибку. Пронумеруємо точки від 1 до 8 (рис. 1.9). Візьмемо точки 1 і 5; ними визначиться деяка пряма й кут її нахилу. Так само визначається кут нахилу для інших парних точок 6 і 2, 7 і 3, 8 і 4. Як найкраще значення *а* вибирається його середнє значення і звичайним способом знаходиться середньоквадратична похибка і довірчий інтервал.

Отже, отримана пряма лінія буде мати кутовий коефіцієнт і проходити через точку, що відповідає середнім значенням змінних *х* та *y*  
(див. наступний параграф).

Такий метод дає задовільні результати лише тоді, коливеличини (*x*5 – *x*1), (*x*6 – *x*2), (*x*7 – *x*3), (*x*8 – *x*4) приблизно однакові.

**Метод найменших квадратів (МНК).** Сутність методу полягає в такому. Припустимо, що є *n* обмірюваних значень величин *x* і *y*; (*x*1, *y*1), (*x*2, *y*2)…(*x*n, *y*n). Припустимо, що похибки містять лише величини *y*. (На практиці це припущення часто виправдовується). За результатами вимірювань необхідно побудувати пряму лінію.

В основі методу лежить положення, відповідно до якого найкращим наближенням буде **така пряма лінія**, **для якої сума квадратів відстаней по вертикалі від точок до прямої** (сума квадратів похибок величини *y* (рис. 1.10)) **є мінімальною**, тобто найбільш імовірні значення параметрів *а* і *в* (1.26) обираються так, щоб сума

(1.27)

була мінімальною. Це означає, що

,

. (1.28)



Рис. 1.10. Метод найменших квадратів

Таким чином, шукані величини *а* та *у* можуть бути знайдені із системи рівнянь:

, (1.29)

. (1.30)

З рівняння (1.30) випливає, що оптимальна пряма проходить через точку з координатами: (У цьому можна легко переконатися, поділивши рівність (1.30) почленно на *n*).

З рівнянь (1.29) і (1.30) знаходимо:

, (1.31)

. (1.32)

У лабораторному практикумі звичайно буває досить оцінити похибку коефіцієнта . Формула для середньоквадратичної помилки величини *а* має вигляд:

, (1.33)

де

, (1.34)

, (1.35)

. (1.36)

Інтервал, в якому з установленою ймовірністю α може перебувати коефіцієнт *а*, записується у вигляді:

, (1.37)

де визначається формулою (1.31); – формулою (1.33); *t*α,*n-*2 – коефіцієнт Стьюдента для надійності α і кількості вимірювань; *n* – кількість пар точок.

У процесі використанні методу найменших квадратів рекомендується такий порядок дій:

1. Скласти таблицю.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № вим. | *xi* | *yi* | *xiyi* | *xi2* |
| 1  2  n |  |  |  |  |
|  | Σ*xi* | Σ*yi* | Σ*xiyi* | Σ*xi2* |

1. Розрахувати: а); б); в); г); д); е).
2. Розрахувати найкращі значення кутового коефіцієнта *а* за формулою (1.31).
3. Знаючи коефіцієнти *а* та *b*, провести оптимальну пряму: вона повинна проходити через точку з координатами та .
4. Для розрахунку похибки величини *а* за формулами (1.33)–(1.36) скласти таблицю.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № пор. |  |  |  |  | Sx | Sy | r |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

## Абсолютні та відносніпохибки результату математичнихоперацій

Розглянемо, як знаходиться абсолютна і відносна похибка результату, який є **сумою** (або **різницею**) двох величин: *n*= *а*± *b*.

Нехай абсолютна похибка вимірювання величини *а* дорівнює Δ*а*, а величини *b –*Δ*b*. Тоді очевидно, що

*n*± Δ*n*= (*а*± Δ*а*) ± (*b*± Δ*b*)

Похибки Δ*а* і Δ*b* можуть мати будь-який знак, але потрібно розглядати найбільш невигідний випадок. Вимірюючи суму двох величин, ми отримаємо найбільшу похибку, коли похибки вимірювання величин *а* і *b* матимуть однаковий знак (для різниці – якщо їх похибки матимуть різні знаки). Тобто в обох випадках абсолютна похибка Δ*n* зміни величини *n* дорівнює сумі абсолютних похибок вимірювань величин *а* і *b*:

±Δ*n*= ± (Δ*а*+ Δ*b*).

Обчислену в такий спосіб середню похибку вимірювань називають ***граничною*** або ***максимальною похибкою***. Відносні похибки вимірювань виражаються формулами:

–для суми Δ*n*/*n* = (Δ*а*+ Δ*b*)/(*а* + *b*);

–для різниці Δ*n*/*n* = (Δ*а*+ Δ*b*)/(*а* – *b*).

Отже, якщо ми вимірюємо будь-яку величину, яка дорівнює різниці двох величин, тоді відносна похибка вимірювань тим більша, чим ближчі значення вимірюваних величин.

Розглянемо абсолютну і відносну похибки **тригонометричних величин**.

Нехай *n* = sіn *a*, тоді очевидно *n* + Δ*n*= sіn(*a* + Δ*а*), деΔ*а* – абсолютна похибка вимірювання кута. Оскільки Δ*а*мале, приймаємо, що cos Δ*а*= 1 і sіn Δ*а*= Δ*а*, тоді

*n* + Δ*n*= sіn a + cos *a* · Δ*а.*

Звідси

Δ*n*= cos *a*·Δ*а*; Δ*n*/*n* = ctg*a* · Δ*а*.

Аналогічно можна визначити абсолютні й відносні похибки інших тригонометричних функцій. Якщо шукана величина є складною функцією тригонометричних величин, то можна використати аналогічно виведені формули (табл. 1.2), але потрібно стежити за тим, щоб був правильно врахований знак похибки.

Таблиця 1.2 – Абсолютні і відносні похибки математичних операцій і тригонометричних величин

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №  пор. | Математична операція | Абсолютна похибка | Відносна похибка |
| 1 | *n* = *a* + *b* + *c* +... | ±(Δ*a*+ Δ*b*+ Δ*c*+...) | ±(Δ*a*+ Δ*b*+ Δ*c*+...)/(*a + b + c*) |
| 2 | *n* = *a* – *b* | ±(Δ*a*+ Δ*b*) | ±(Δ*a*+Δ*b*)/(*a – b*) |
| 3 | *n* = a∙b | ±(*a*∙Δ*b*+ *b*∙Δ*a*) | ±(Δ*a*/*a*+Δ*b*/*b*) |
| 4 | n = a∙b∙c | ±(*bc*Δ*a*+ *ac*Δ*b*+ + *ab*Δ*c*) | ±(Δ*a*/*a*+Δ*b*/*b*+Δ*c*/*c*) |
| 5 | *n* = *an* | ± *nan*-1∙Δ*a* | ± *n*(Δ*a*/*a*) |
| 6 | n = a/b | ±(*b*∙Δ*a*+ *a*∙Δ*b*)/*b*2 | ±(Δ*a*/*a* + Δ*b*/*b*) |
| 7 | *n* = sіn *a* | ± cos*a*∙Δ*a* | ± ctg*a*∙Δ*a* |
| 8 | *n* = cos*a* | ± sіn*a*∙Δ*a* | ± tg*a*∙Δ*a* |
| 9 | *n* = tg*a* | ± Δ*a*/cos 2*a* | ±(2Δ*a*/sіn 2*a*) |
| 10 | *n* = ctg*a* | ± Δ*a*/sіn 2*a* | ±(2Δ*a*/sіn 2*a*) |
| 11 | *n*=ln*a* | ± Δ*a*/*a* | ± Δ*a*/*a*∙ln*a* |

Слід відзначити, що шукана гранична похибка фактично виявляється завищеною, оскільки ми розглядаємо найбільш невигідний випадок. Тому потрібно, повторивши експеримент кілька разів, оцінити похибку вимірювання безпосередньо за вимірюваннями окремих величин.

## Наближені обчислення

Точність обчислень результатів вимірювання має відповідати точності вимірювань. Виконуючи обчислення з точністю більшою, ніж це дозволяють експериментальні дані, нераціонально.

Обчислення, які виконуються в процесі математичної обробки результатів вимірювань фізичних величин, є наближеними. Загальновживаний запис десяткових чисел називається ***природною формою запису*** чисел. Досить часто у фізиці числа записують як добуток двох співмножників, перший з яких – деяке число в природній формі, а другий – відповідний степінь десяти.

*Наприклад*: 299 792 458(30) м/с – швидкість світла у вакуумі; 6,6260755(40)∙10-34 Дж∙с – стала Планка. Тут цифри в дужках означають абсолютну похибку, виражену в десяткових частках, і відповідають двом останнім знакам числового значення константи. Отже, постійна Планка записується як (6,6260755 ± 0,0000040)∙10-34 Дж∙с. Такі записи спрощують природну форму запису „довгих” чисел.

У зв’язку із застосуванням обчислювальних машин використовується нормалізована форма запису чисел у вигляді добутку правильного десяткового дробу (із відмінною від нуля першою цифрою після коми) і степеня десяти.

*Наприклад*: 4,925 і 0,4925 ∙ 101; -925,43 і -0,92543 ∙ 103.

За наближених обчислень записи 25,4 і 25,400 відрізняються один від одного. У числа 25,4 правильні лише цифри цілих і їх десяті частини, а в числа 25,400 – також соті і тисячні частини.

Прийнято вважати, що *k*-та цифра наближеного числа *а* правильна, якщо абсолютна похибка цього числа не перевищує половини одиниці *k*‑го розряду. Усі цифри, які стоять лівіше від правильної, також правильні. У противному разі цифру *k*-го розряду називають ***сумнівною***. Сумнівна цифра стоїть безпосередньо за крайньою справа цифрою.

Усі правильні цифри числа, починаючи з першої зліва, відмінної від нуля, і включаючи першу сумнівну, називають ***значущими***. Усі інші – ***незначущі***. Наприклад, у числа 0,0705 три значущі цифри; перші дві незначущі, нуль між сімкою і п’ятіркою – значущий.

Записуючи остаточний результат наближених обчислень, незначущі цифри числа відкидають. У числа 3 600 – чотири значущі цифри (нулі – значущі цифри, тому що точно відомо, що одиниць і десятків у числа 3 600 немає). Запис 5 730∙103 або 0,57300∙108 означає, що в числа 57 300 000 три останні цифри незначущі, а всі інші – значущі.

Запис результатів також має відповідати точності вимірювання. Наприклад, якщо обчислена товщина пластинки становить 4,5568 мм за абсолютної похибки вимірювання 0,02 мм, то такий запис числа не відповідає теорії похибок вимірювання. Тому середнє арифметичне товщини необхідно заокруглити до 4,56 мм.

Узагалі під час округлення наближеного або точного числа *а* до *n* значущих цифр за правилом доповнення числа, *а* заміняють числом *а*1 із *m* значущими цифрами так, щоб похибка заокруглення не перевищувала одиниці розряду, який зберігається, тобто щоб

│*а*1 – *а*│ < 1/2 ∙ 10*m-n*+1.

При цьому прийнято, що будь-яке додатне наближене число *а* у довільній системі числення можна подати у вигляді скінченого дробу:

*а* = *d*1∙10*m* + *d*2∙10*m-*1 + ... + *dn*∙*10m-n*+1,

де символом 10 зображено основу *g* системи числення 0 < *dі* < *g* (*і*= 1, 2, ...). У десятковій системі (*g* = 10) коефіцієнти *dі* зображуються символами 0, 1, 2, ..., 9.

Якщо із наближеними числами ще проводитимуться обчислення, тоді в них потрібно залишити одну або дві сумнівні цифри.

У процесі виконання математичних операцій над наближеними числами, слід дотримуватися таких правил:

* 1. Наближені числа потрібно заокруглювати, виконуючи відповідні математичні операції за наведеним вище правилом, до розряду найменш точного числа, залишаючи в числах одну або дві запасні цифри. Це дає змогу цілком правильно округлити кінцевий результат. Зрештою, у результаті ці „зайві” цифри відкидають.
  2. Під час додавання і віднімання наближених чисел кінцевий результат необхідно заокруглювати так, щоб у ньому не було значущих цифр у тих розрядах, яких немає хоча б в одному із наближених чисел.

*Наприклад*:

5,962 + 2,49 + 7,18376 + 6,1468 = 5,962 + 2,49 + 7,184 + 6,147 = = 21,783 ≈ 21,78.

* 1. Під час множення і ділення наближених чисел у кінцевому підсумку слід залишити стільки значущих цифр, скільки їх є в наближеному числі із найменшою кількістю значущих цифр.

*Наприклад*: 3,624 ∙ 2,4 ∙ 5,1127 ≈ 3,62 ∙ 2,4 ∙ 5,11 = 8,688 ≈ 8,7.

* 1. Під час піднесення до степеня в кінцевому підсумку необхідно залишити стільки значущих цифр, скільки їх має наближене число, яке підносять до степеня.

*Наприклад*: 1,262 = 3,276 ≈ 3,28.

* 1. Під час добування коренів у кінцевому підсумку потрібно залишити стільки значущих цифр, скільки їх має підкореневе наближене число.

*Наприклад*: .

* 1. Знаходячи логарифм наближеного числа, потрібно брати із таблиць для мантиси стільки значущих цифр, скільки їх має це число.

*Наприклад*: lg 77,23 = 2,8878 ≈ 2,888.

Правильним є й протилежне твердження: число, яке знаходять за логарифмом, повинно мати стільки значущих цифр, скільки їх у мантиси (за довільної характеристики).

* 1. Слід пам’ятати такі наближені рівності (*а*<<1):

(1 ± *а*)2 = 1 ± 2*а*;

(1 ± *a*)3 = 1 ± 3*а*;

;

.

## Запис результатів.Точністьрозрахунків

Результат вимірювання записують у вигляді (1.15). Запис *m*= (0,876 ± 0,008) г означає, що під час вимірювання маси тіла одержали значення 0,87 г із стандартною похибкою 0,008 г. У процесі обчислення стандартної похибки враховують як випадкові, так і систематичні похибки. Записуючи похибку, необхідно округляти її величину до двох значущих цифр, якщо перша з них є одиницею, і до однієї в усіх інших випадках. Так, ***правильно писати***: ±3; ±0,2; ±0,08; ±0,14; і ***неправильно***: ±3,2; ±0,23; ±0,084.

Не варто також заокруглювати ±0,14 до ±0,1. пояснимо це правило. оскільки похибку експерименту рідко вдається визначити з точністю, кращою ніж 20%, то якщо в результаті обчислення стандартної похибки одержали 0,14, тоді заокруглення 0,14 до 0,1 змінює величину похибки на 40%, водночас заокруглення до 0,3 числа 0,26 або 0,34 змінює похибку менш ніж на 15% , тобто несуттєво.

Під час запису виміряного значення останньою має бути вказана цифра того десяткового розряду, який використано для запису похибки. Так, один і той самий результат, залежно від похибки можна записати у вигляді: 1,2 ± 0,2; 1,24 ± 0,003; 1,243 ± 0,012. Отже, остання з наведених цифр (або навіть дві з них, як в останньому прикладі) є сумнівною, а решта – правильними.

Сформульоване правило необхідно застосовувати й тоді, коли деякі із цифр є нулями. Якщо в процесі вимірювання одержали результат: *m*= (0,900 ± 0,004) г, то необхідно писати нулі у кінці числа 0,900. Запис 0,9 означав би, що про наступні значущі цифри нічого не відомо, тоді як вимірювання показали, що вони дорівнюють нулю. Аналогічно, якщо маса тіла 5,83 кг (із похибкою в десяті частини кілограма), не варто писати 5830 г, оскільки б це означало, що тіло зважене з точністю до кількох грамів. Якщо результат вимірювання потрібно виразити в грамах, тоді для нашого випадку потрібно записати 5,83 ∙ 104 г.

# МЕХАНІКА

## Лабораторна робота «ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ ВЕЛИЧИН ТА ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ТІЛ ПРАВИЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ»

**Мета роботи:** навчитися користуватися приладами для вимірювання лінійних величин, визначити густину тіл правильної геометричної форми.

**Обладнання:** штангенциркуль; штангенглибиномір; мікрометр; вимірювальна лінійка, вимірювальний мікроскоп; деталі для вимірювання; технічні ваги.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Для вимірювання лінійних величин застосовують найрізноманітніші способи, вибір яких визначається заданою точністю та умовами експерименту.

Для безпосередніх вимірювань довжини широко використовуються такі міри, як масштабна лінійка, металеві вимірювальні лінійки, рулетки без стабілізуючої основи. Точність вимірювання довжини цими мірами невисока. Ціна поділки, наприклад, масштабної лінійки становить 1 мм. Отже, точність вимірювання масштабною лінійкою не перевищує половини ціни поділки і дорівнює 0,5 мм.

Для більш точних вимірювань користуються приладами з ноніусом, який побудовано за принципом методу збігів. Ноніуси (у такому вигляді, як вони застосовуються тепер) винайшов у 1631 р. у Франції директор Монетного двору Ц. Верньє. Тому їх правильно було б назвати верньєрами, як в геодезії. У фізиці та техніці їх прийнято називати ноніусами за ім’ям португальця П. Нуніша (Nunes, латинізоване ім’я Nonius), який у 1542 р. винайшов подібне, але менш зручне пристосування, що нині не застосовується.

Метод лінійного ноніуса. ***Ноніусом*** називається невелика додаткова шкала до звичайного масштабу, яка дає змогу підвищити точність вимірювання в 10-20 разів. Ноніус переміщується по основній шкалі. Розглянемо лінійний ноніус штангенциркуля. Ноніус для вимірювання з точністю до 0,1 мм являє собою шкалу довжиною 9 мм, поділену на десять рівних частин (рис. 2.1.1,а). Тому одна поділка ноніуса дорівнює 0,9 мм, тобто менша від поділки основної шкали масштабної лінійки. Коли нульова мітка (штрих) шкали ноніуса буде між певними мітками основної шкали штангенциркуля (рис. 1, б), то це означатиме, що до цілого числа міліметрів треба додати певне число х десятих часток міліметра. Будова ноніуса ґрунтується на тому, що людське око легко розрізняє, чи є два штрихи продовженням один одного, чи вони дещо зсунуті.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |
| Рис. 2.1.1 Зображення ноніуса (а) та штангенциркуля (б) | |

Для визначення числа знаходимо мітку шкали ноніуса, яка збігається з якоюсь міткою основної шкали (на рис. 2.1.1,б це друга відмітка ноніуса) Нехай такою міткою буде *n*-на по порядку мітка шкали ноніуса. Оскільки вимірювана дробова частина міліметра дорівнює різниці між цілим числом міліметрів за основною шкалою штангенциркуля ( мм) і відстанню по шкалі ноніуса від нульової до мітки, що збігається (0,9 мм), можна записати , тобто.

Отже, порядковий номер збіжної мітки ноніуса безпосередньо дає число десятих часток міліметра.

Шкала ноніуса для вимірювання з точністю до 0,05 мм має 20 однакових поділок на довжині 19 мм, а шкала ноніуса для вимірювання з точністю до 0,02 мм має 50 однакових поділок на довжині 49 мм. Мітка цих ноніусів, яка збігається з штрихом основної шкали, показує відповідно числа двадцятих або п'ятдесятих часток міліметра.

Отже, поділки на основній шкалі і шкалі ноніуса наносять так, що поділка основної шкали дорівнює за довжиною поділкам ноніуса. Якщо і відповідно ціни поділок ноніуса і основної шкали, то

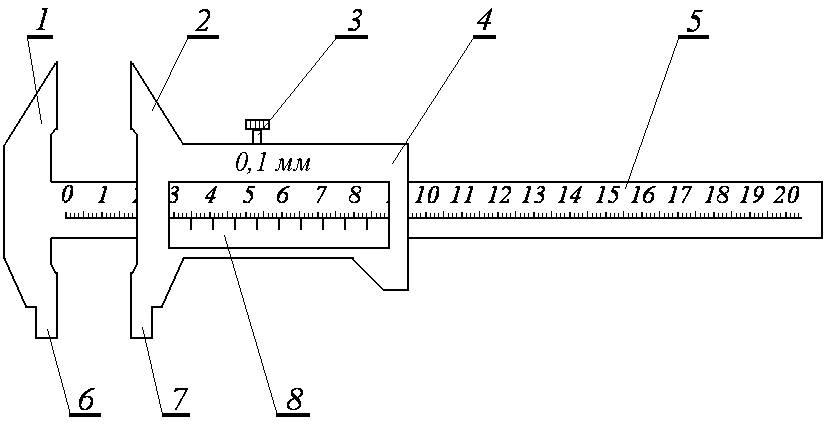
, (2.1.1)

звідки різниця цих поділок (тобто точність ноніуса)

, (2.2.2)

***Точністю ноніуса***називають величину , яка дорівнює відношенню ціни найменшої поділки основної шкали до числа поділок ноніуса. Під точністю відліку за ноніусом розуміють ціну його поділки.

***Штангенциркуль***(рис. 2.1.2) - це прилад для вимірювання лінійних розмірів з точністю від 0,1 до 0,02 мм. Штангенциркуль складається із стальної лінійки (штанги) 5 з міліметровими поділками, відносно якої переміщується рамка 4 з ноніусом, і двох пар губок (ніжок) - нерухомих 1 і рухомих 2. При зімкнутих губках відлік за ноніусом дорівнює нулю. Між губками затискують вимірювану деталь. Щоб точно визначити розмір деталі, рухому губку штангенциркуля переміщують у момент дотику її до деталі за допомогою мікрометричного пристрою 6, щоб запобігти надмірному натисканню губок на деталь. Закріплюють рухому губку на штанзі стопорним гвинтом 3 (при відповідних навичках роботи з штангенциркулем гвинт 3 можна не закріпляти) і роблять відлік за ноніусом. Для вимірювання внутрішніх розмірів деталі є калібровані губки 6, 7. Загальна ширина їх при зведених губках найчастіше дорівнює 10 мм; цей розмір треба додавати до відліку за шкалою. Деякі штангенциркулі мають також висувні лінійки для вимірювання глибини не наскрізних отворів.



|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2.1.2. Схематичне зображення штангенциркуля: 1 – нерухома ніжка, 2 – рухома ніжка, 3 – стопорний гвинт, 4 – рамка, 5 - стальна лінійка (штанга). 6- мікрометричний пристрій6, 7 – нижні губки; 8 – ноніус |

***Штангенглибиномір***(рис.2.1.3) побудований подібно до штангенциркуля, але пристосований для вимірювання глибини отворів і висоти виступів деталей. У штангенглибиномірі рамка 1 з ноніусом 2має опорну площину 2з загостреним вимірювальним наконечником, якщоякимприлад спирається на край отвору, а штанга 14 опускається в отвір. Глибину отвору вимірюють по основній шкалі на штанзі і по ноніусу рамки так само, як і штангенциркулем.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1.3. Схематичне зображення штангенглибиномір: 1 – штанга, 2 – опорна площина, 3 – рамка з ноніусом |

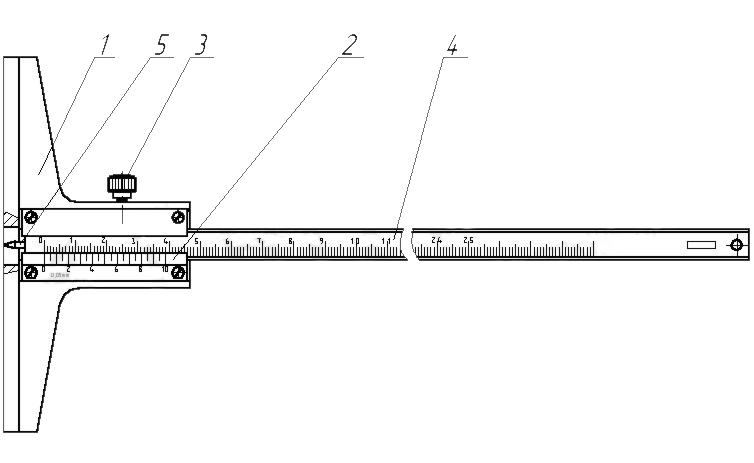


Рис.2.1.3. Схематичне зображення штангенглибиноміра: 1 – рамка, 2 – ноніус, 3 – стопорний гвинт, 4 – штанга, 5 – загострений вимірювальний наконечник.

***Мікрометр*** (рис. 2.1.4) – це інструмент для вимірювання лінійних розмірів з точністю до 0,01 мм. Він складається із стальної скоби 81, що має нерухому опорну п’яту 12, стебла 8втулки з міліметровою шкалою 5, мікрометричного гвинта 23 і стопорного гвинта 7.

Мікрометричний гвинт переміщується всередині спеціальної гільзи з різьбою, закріпленою в стеблі 3у втулці 5. Крок гвинта 0,5-1,0 мм. На зовнішній поверхні втулкинанесено дві поздовжні шкали, зсунуті одна відносно одної на 0,5 мм. Зовні стебловтулкаохоплює барабан 46, з’єднаний з мікрометричним гвинтом. Таким чином, при обертанні барабана обертається і гвинт; при цьому переміщується його вимірю­вальна поверхня 23. Дія мікрометра ґрунтується на властивості гвинта здійснювати при повороті його поступального переміщення, пропор­ційне куту повороту. Скошений обід 6 барабана поділено на 50 (або 100) однакових поділок. На правому кінці барабана є особливий фрикційний пристрій - тріскачка 57. При вимірюванні слід обертати барабан тільки за головку тріскачки. Деталь при вимірюванні затискається між п’ятою і мікрометричним гвинтом. Після того, як досягнуто певного ступеня натиску на деталь (5-6 Н), фрикційна головка починає проковзувати, даючи характерний тріск. Завдяки цьому затиснута деталь деформується порівняно мало (її розміри не спотворюються) і, крім того, це запобігає псуванню мікрометричного гвинта.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1.4. Схематичне зображення мікрометра: 1 – опорна п’ята, 2 - мікрометричного гвинта, 3 – стебль, 4 – барабан, 5 – пристрій – тріскачка, 6 –скошений обід, 7 – стопорний гвинт, 8 – стальна скоба  Рис. 2.1.4. Схематичне зображення мікрометра:1 – скоба; 2 – нерухома п'ята; 3 – торець мікрометричного гвинта; 4 – стопорний гвинт; 5 – втулка з міліметровою шкалою; 6 – барабан зі шкалою ноніуса; 7 – тріскачка |

Для відлічування показів мікрометра по шкалі стебла визначають ціле число (нижня шкала) і половини (верхня шкала) міліметрів. Для відлічування сотих часток міліметра користуються поділками на барабані (крок мікрометричного гвинта визначається заздалегідь).

***Вимірювальний мікроскоп МИР-1***(рис. 1.5) складається з корпусу 2, висувного тубуса 3 (з нанесеними на ньому поділками від 130 до 200), об'єктива 1 і окуляра 4. Мікроскоп установлюють на вертикальному штативі 9. Головка кремальєри 11 призначена для переміщення мікроскопа при його фокусуванні в напрямі вимірюваного об’єкта. Шарнір із затискним гвинтом 5 дає можливість установлювати мікроскоп під певним кутом до горизонтального напряму.

Гвинтом 6 фіксується поворот мікроскопа навколо вертикальної осі. Вертикальне переміщення мікроскопа здійснюється поворотом кремальєри 7. Його вимірюють за допомогою міліметрової шкали з ноніусом 10. Від звичайного мікроскопа вимірювальний відрізняється тим, що, по-перше, фокусна відстань об’єктива порівняно велика (замість кількох міліметрів вона становить кілька сантиметрів) і, по-друге, всередині окуляра в площині, в якій розміщено зображення предмета, що його дає об’єктив, розміщується окулярний мікрометр (скляна пластинка - шкала з дрібними поділками). Око спостерігача бачить у полі зору мікроскопа зображення шкали, суміщене із зображенням предмета. Для вимірювання розмірів предмета потрібно знати ціну поділки шкали окуляра. Ціною поділки шкали називається довжина такого об’єкта, зображення якого закриває одну поділку шкали. Вона залежить від відстані між об’єктивом і окуляром мікроскопа.

|  |
| --- |
| http://www.mbs10.ru/images/instr/instr_mir-2/1.png |
| Рис. 1.4. Схематичне зображення вимірювального мікроскопа МИР -1: |

При вимірюванні малих відстаней (3 - 5 мм), які не виходять за межі шкали окуляра, користуються тільки шкалою окуляра. Для вимірювання великих вертикальних відстаней користуються ноніусом і шкалою на штативі. Штатив установлюють вертикально за допомогою гвинтів 8.

Густиною (ρ) є величина, що визначається для однорідної речовини (тіла) її масою в одиниці об'єму. Тобто для однорідного тіла знаходимо

, (2.1.1)

де *m* – масатіла; *V –* йогооб'єм.

Для обчислення густини тіла правильної геометричної форми проводимо вимірювання: маси тіла, його лінійних розмірів.

Далі обчислюємо об’єм за виміряними значеннями лінійних розмірів та відповідною формулою для тіла правильної геометричної форми. Нижче наведено формули об'ємів найпростіших геометричних фігур:

а) об’ємпаралелепіпедазі сторонами *a*, *b*, *c*

; (2.1.2)

б) об’ємциліндра з висотою*h* та діаметромоснови*D*

. (2.1.3)

Обчисливши об’єм та вимірявши масу, можна знайти густину тіла за допомогою визначення (2.1.1). Значення густини для деяких металів і сплавів наведено в табл. 2.1.1

Таблиця 2.1.1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Речовина | Алюміній | Сталь | Бронза | Мідь | Золото |
| Густина,  103 кг/м3 | 2,7 | 7,7–7,9 | 7,5–8,8 | 8,9 | 19,3 |

У лабораторній роботі визначають густину тіла з трьох серій експериментів. У першій із них використовують для вимірювань лінійних розмірів лінійку, в другій – штангенциркуль, у третій – мікрометр. Точність вищезгаданих інструментів різна. Тому в різних серіях експериментів повинна бути різною і точність вимірювання густини тіла. Найменшу абсолютну похибку потрібно очікувати у вимірюваннях, де застосовується мікрометр, найбільшу – де застосовується лінійка. Розрахунок похибок вимірювань у трьох серіях експериментів, їх порівняння між собою є основним завданням цієї лабораторної роботи.

Найпростішим інструментом для вимірювання лінійних розмірів є лінійка. Її найменша поділка дорівнює 1 мм. Точність вимірювання за допомогою лінійки буде дорівнювати половині ціни поділки, тобто 0,5 мм.

Для вимірювань із більш високою точністю використовують штангенциркуль та мікрометр. Підвищення точності досягається завдяки використанню допоміжної шкали – ноніуса.

### Порядок виконання роботи

1. Вивчити конструкцію та технічні характеристики штангенциркуля і штангенглибиноміра. Засвоїти метод лінійного ноніуса. Навчитися читати на штангенінструменті довільно поставлений розмір. Провести вимірювання розмірів тіла за завданням викладача. Зробити ескіз деталі і проставити після усереднення всі її розміри, виміряні в 6 -10 різних місцях.
2. Вивчити конструкцію та технічні характеристики мікрометра. Засвоїти метод мікрометричного гвинта. Перевірити встановлення мікрометричного гвинта па нуль. Навчитися читати на мікрометрі довільно поставлений розмір.

Виміряти мікрометром товщину металевої пластинки в центрі, поблизу кожного з чотирьох її кутів і діаметри різних електричних проводів (в 6 - 10 різних місцях). За істинне значення взяти середнє арифметичне. Записати кінцеві результати.

1. Вивчити конструкцію та технічні характеристики індикатора годинникового типу. При цьому особливу увагу звернути на кінематичну схему індикатора. Навчитися читати довільні розміри.
2. Вивчити конструкцію та технічні характеристики вимірювального мікроскопа МИР-1. Ціну поділки мікроскопа прирізних положеннях тубуса взяти із заводського паспорта. Самостійно для фіксованого положення тубуса визначити ціну поділки. Для цього мікроскоп наводять на предмет, розміри якого наперед відомі (дві-три поділки міліметрової шкали штангенциркуля або логарифмічної лінійки). Підрахувати число поділок, які розглядаються в мікроскоп. Ціна поділки дорівнюватиме відношенню числа поділок до довжини предмета в міліметрах.
3. Використовуючи штангенциркуль визначити розміри циліндричної деталі та визначити її *V.* Розрахувати похибку непрямих вимірювань.

**Визначення маси тіла**

**1**Врівноважтетерези.

**2**Зважтедосліджуванетілоспочатку на правому, потім на лівомуважелітерезів.

**3**Визначитьсереднєзначеннямаситіла.

= ()

**4**Визначитьпохибкутерезів.

**∆***m*= ()

**5**Значення і **∆***m*запишіть до таблиць 1,2,3.

**Визначення густини матеріалуциліндру**

**І Вимірювання за допомогоюлінійки**

**1**Виміряти за допомогоюлінійкитричі в різнихмісцяхвисоту*h* і діаметр*D*циліндру. Результати занести в табл. 1

**2**Підрахуватипохибкипрямихвимірюваньвисоти∆*h* і діаметру∆*D*, для лінійки вони співпадають з приладовими.

**3.**Підрахуватизначеннягустиниматеріалуциліндра за формулою ρ = =

Результати занести у таблицю 1.

**4**Підрахуватиабсолютну і відноснупохибкувимірюваннягустини за формулами:

∆ρ = , δ = ·100%

Результатиобчислень занести в табл. 1.

**10** Записати результат у вигляді = , де - густинатіла, яка визначається з використаннямлінійки.

***ТАБЛИЦЯ 1***

***Результативимірювань за допомогоюлінійки***

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| = ∆*m* = | | | | *Форма - циліндр* | | |
| *№*  *досліду* | *Висота*  *h, мм* | *Похибка*  ∆*h, мм* | *Діаметр*  *D, мм* | *Похибка*  ∆*D, мм* | *Густина*  , | *Похибка*  ∆ρ, |
| 1 |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |
| *Середнє* |  |  |  |  |  |
| *Похибка*  *приладу* | х | 0,5 | х | 0,5 | х | х |

**ІІ Вимірювання за допомогою штангенциркуля**

**11**Виміряти за допомогою**штангенциркуля**тричі в різнихмісцяхвисоту*h* і діаметр*D*циліндру, результати занести в табл. 2

**12**Підрахуватипохибкипрямихвимірюваньвисоти∆*h* і діаметру∆*D*, результати занести в табл.2.

**13**Визначитиприладовупохибку штангенциркуля, результати занести в табл.2.

**14**Підрахуватизначеннягустиниматеріалуциліндра за формулою ρ = = .

Результати занести у таблицю 2.

***ТАБЛИЦЯ 2***

***Результативимірювань за допомогою штангенциркуля***

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| = ∆*m* = | | | | *Форма - циліндр* | | |
| *№*  *досліду* | *Висота*  *h, мм* | *Похибка*  ∆*h, мм* | *Діаметр*  *D, мм* | *Похибка*  ∆*D, мм* | *Густина*  , | *Похибка*  ∆ρ, |
| 1 |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |
| *Середнє* |  |  |  |  |  |
| *Похибка*  *приладу* | х | 0,5 | х | 0,5 | х | х |

**15** Підрахуватиабсолютну і відноснупохибкувимірюваннягустини за формулами:

∆ρ = , δ = ·100%

Результатиобчислень занести в табл. 2

**16**Записати результат у вигляді = ,

- густина тіла, визначена з використанням штангенциркуля.

**ІІІ Вимірювання за допомогоюмікрометра**

**17**Виміряти за допомогою**мікрометра**тричі в різнихмісцяхвисоту*h* і діаметр*D*циліндру, результати занести в табл. 3

**18**Підрахуватипохибкипрямихвимірюваньвисоти∆*h* і діаметру∆*D*, результати занести в табл.3.

**19**Визначитиприладовупохибкумікрометра, результати занести в табл.3.

**20**Підрахуватизначеннягустиниматеріалуциліндра за формулою ρ = = .

***ТАБЛИЦЯ 3***

***Результативимірювань за допомогоюмікрометра***

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| = ∆*m* = | | | | *Форма - циліндр* | | |
| *№*  *досліду* | *Висота*  *h, мм* | *Похибка*  ∆*h, мм* | *Діаметр*  *D, мм* | *Похибка*  ∆*D, мм* | *Густина*  , | *Похибка*  ∆ρ, |
| 1 |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |
| *Середнє* |  |  |  |  |  |
| *Похибка*  *приладу* | х | 0,5 | х | 0,5 | х | х |

**21**Підрахуватиабсолютну і відноснупохибкувимірюваннягустини за формулами:

∆ρ = , δ = ·100%

Результатиобчислень занести в табл. 3

**22**Записати результат у вигляді = , - густина тіла, визначена з використанням мікрометра.

**23** Порівнятирезультати, отримані за допомогоюрізнихприладів (лінійки, штангенциркуля, мікрометра). Зробитивисновок.

### Контрольні питання

1 Що називають густиною тіла?

2 Поясніть, у чому полягає процес вимірювання за допомогою ноніуса?

3 Яку будову має штангенциркуль? Розкажіть, як виконувати вимірювання за допомогою штангенциркуля?

4 Яку будову має мікрометр? Розкажіть, як виконувати вимірювання за допомогою мікрометра.

5 Для чого використовують у мікрометрі тріскачку?

6 Яку будову мають технічні ваги? Поясніть правила зважування за допомогою технічних ваг? Як знайти абсолютну похибку вимірювання маси технічними вагами?

7 Яка мета лабораторної роботи? Поясніть порядок виконання роботи.

8 Чому в лабораторній роботі потрібно проводити вимірювання діаметра, висоти одним і тим самим інструментом у різних місцях тіла щонайменше п’ять разів?

9 Доведіть формулу (2.1.11).

10 Див. також контрольні питання до розділу “Вимірювання фізичних величин та їх оброблення”.

**Контрольні запитання**

1. Прямі і непрямі вимірювання.
2. Класифікація похибок вимірювання.
3. Розрахунок випадкових похибок при прямих і непрямихвимірюваннях.
4. Будова та принцип дії вимірювальних приладів, щовикористовуються в даній роботі.

## Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИНИ АТВУДА»

**Мета роботи:** визначити прискорення вільного падіння за допомогою машини Атвуда

**Обладнання:** машина Атвуда, додаткові змінні тягарці

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Прискорення вільного падіння тіла експериментально можна визначити за допомогою машини Атвуда, яка схематично зображена на рис.2.2.1. Машина Атвуда складається з платформи 1, на якій змонтована вертикальна колона 2 і пульт керування 15. До колони 2 прикріплений нерухомий 3 та два рухомих - 4 і 5 кронштейни. На верхньому кінці колони 2 закріплена втулка 6, на якій змонтовані електромагніт 7 та легкий алюмінієвий шків 8, що обертається з мізерно малим тертям навколо горизонтальної осі. Через паз на ободі шківа перекинута тоненька нитка 9 з прикріпленими до її кінців вантажами 10 і 11 однакової маси .

Кронштейни 4 і 5 можна переміщувати вздовж колони 2, на яку нанесені сантиметрові поділки, що дає змогу змінювати та вимірювати шлях рівноприскореного і рівномірного рухів відповідно.

До кронштейна 5 прикріплені фотоелектричний датчик 13 і додатковий кільцеподібний кронштейн 12, який знімає з падаючого вантажу 10 додатковий тягарець масою .

Кронштейн 3 оснащений двома гумовими амортизаторами 16, які пом’якшують падіння вантажів 10 і 11, та електричним датчиком 14.

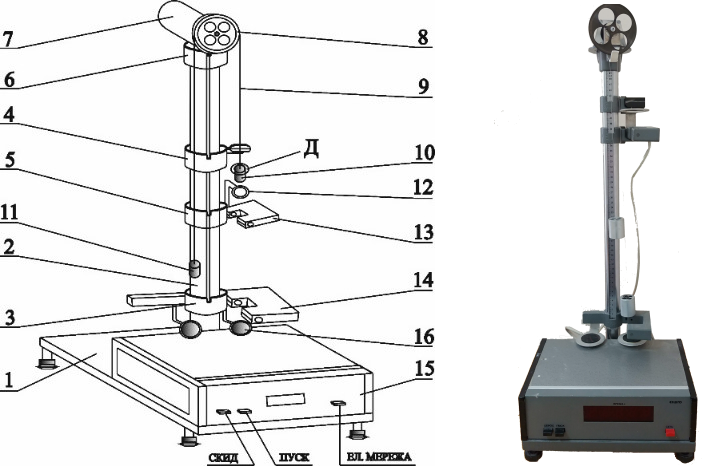


Рисунок 2.2.1 –Зображення машини Атвуда:1 – платформа, 2 – вертикальна колона, 3 – нерухомий кронштейн, 4 і 5 – рухомі кронштейни, 6 – втулка, 7 – електромагніт, 8 – шків, 9 – нитка, 10 і 11 –вантажі однакової маси, 12 – кільцеподібний кронштейн, 13 та 14 – фотоелектричні датчики, 15 – пульт керування, 16 – гумові амортизатори.

Кронштейни 4 і 5 мають покажчики розташування, а кронштейн 4 - ще й риску для точного розміщення нижньої частини вантажу 10 у початковому положенні, в якому за відтиснутої клавіші «Пуск» електромагніт 7 утримує вантаж 10 у стані спокою.

**Опис методу досліджень**

У початковому положенні до вантажу 10 масою (рис.2.2.1) додають додатковий тягарець масою . Вимкненняелектромагніту 7 звільняє вантаж 10, що призводить до його падіння з прискоренням на шляху (між кронштейнами 4 і 5). Проходження вантажу 10 повз кронштейн 12 супроводжується зняттям з нього додаткового тягарця і надалі він від датчика 13 до датчика 14, тобто нашляху, буде рухатися рівномірно. Час цього рухувимірюється секундоміром, який автоматично вмикається в момент перетину вантажу 10 світлового променя, що падає на фотоелемент датчика 13, і вимикається при перетині вантажу 10 променя, спрямованого на фотоелемент датчика 14.

На кожний з вантажів 10 і 11 діють сили тяжіння

і відповідно та сили натягу нитки, під дією яких вони розпочнуть рівноприскорений рух після розмикання кола електромагніта.

Пишучи рівняння руху вантажів,будемо вважати:

* нитку «невагомою», що дає змогу її вилучити з розгляду під час написання рівнянь руху;
* силу тертя повітря мізерно малою у порівнянні з силою тяжіння;
* нитку«нерозтяжною», а блок «невагомим», тобто вважаємо, що виконується нерівність ( - момент інерції шківа, діаметр якого дорівнює ); у цьому разі сили натягу ниток вантажів 10 і 11 збігаються за величиною ,внаслідок чого вони будуть рухатися з однаковими прискореннями, після зняття кронштейном додаткового тягарця з вантажу 10, які рівні за абсолютною величиною та протилежні за знаком.

Спрямувавши вісь координат у напрямку руху системи «вантаж + додатковий тягарець»,запишемо рівняння її руху:

, (2.2.1)

та рівняння руху для вантажу 11:

. (2.2.2)

Розв’язавши спільно рівняння (2.2.1) і (2.2.2), для прискорення системи одержимо:

. (2.2.3)

Оскільки , одиницею в знаменнику формули (2.3) можна знехтувати у порівнянні з множником , і вираз (2.3) наближено запишемо у вигляді:

. (2.2.4)

Звідси випливає, що в міру мализни множника прискорення системи «вантаж + додатковий тягарець» буде все меншим, у порівнянні з прискоренням вільного падіння .

В момент зняття кронштейном 12 додаткового тягарця, система досягає швидкості

, (2.2.5)

йнадалі на шляху вантаж рухаєтьсярівномірно зі швидкістю, яка з одного боку визначається формулою (2.2.5), з іншого боку вона дорівнює:. З останньої формули з урахуванням виразу (2.2.5), для часу рівномірного руху системи отримаємо таку формулу:

. (2.2.6)

Звідси прискорення вільного падіння дорівнює:

. (2.2.7)

### Порядок виконання роботи

1. За шкалою на колоні 2 (або за допомогою лінійки) виміряйте шляхрівноприскореного і шлях рівномірного майбутнього рухів.
2. Підійміть вантаж 10 так, щоб його нижня частина збігалася з рискою на кронштейні 4 і натисніть клавішу «Мережа».
3. Покладітьодин з додаткових тягарців на вантаж 10.
4. Натисніть клавішу «Пуск» і після завершення руху запишіть в зошит час рівномірного руху.
5. За формулою (2.2.7) розрахуйте прискорення вільного падіння.

### Контрольні питання

1. Який рух називається рівномірним, а який рівнозмінним? Запишіть рівняння зазначених рухів.
2. Сформулюйте другий закон Ньютона.
3. Запишіть та обґрунтуйте рівняння руху тягарців.
4. Який рух називається вільним падінням?
5. Запишіть вираз для прискорення вільного падіння і обґрунтуйте чому прискорення вільного падіння різне в різних точках земної поверхні.

## Лабораторна робота «Визначення прискореннявільного падіння за допомогою МАТЕМАТИЧНОГО ТА оборотного маятникІВ»

**Мета роботи:**ознайомлення з математичним, фізичним і оборотним маятниками; визначення прискорення вільного падіння за допомогою зазначених маятників.

**Обладнання:** універсальний маятник F РМ-04

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Загальний вигляд універсального маятника FРМ-04 представлений на рис. 3.1. Підставка 1 оснащена регульованими ніжками 2, які дозволяють провести вирівнювання приладу. У підставі закріплена колонка 3, на якій зафіксований верхній 4 та нижній 5 кронштейни з фотоелектричним датчиком 6.

По обидва боки від кронштейна 4 знаходяться математичний 7 та оборотний 8 маятники.

Довжину математичного маятника можна регулювати за допомогою воротка 9 та визначити за шкалою, нанесеною на колоні 3.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2.3.1. Загальний вигляд універсального маятника F РМ-04: 1 – підставка, 2 – ніжки, для регулювання приладу у горизонтальній площині, 3 – колонка, 4 - верхній кронштейн, 5 - нижній кронштейн, 6 – фотоелектричний датчик, 8 - математичний маятник, 8 – оборотний маятник, 9 – вороток, 10 – секундомір, 11 - вороток |

Оборотний маятник виготовлений зі стального стержня, на якому зафіксовані два ножі та два ролики. На стержні через кожні 10 мм нанесені кільцеві позначки, які слугують для точного визначення довжини оборотного маятника (відстані між ножами). Ножі та ролики можна переміщувати вздовж вісі стержня та фіксувати у будь-якому положенні.

Нижній кронштейн разом із фотоелектричним датчиком можна переміщувати вздовж колонки та фіксувати у довільному положенні.

Фотоелектричний датчик з’єднаний з секундоміром 10.

Верхній кронштейн можна повертати навколо колонки та фіксувати у будь-якому, довільно обраному положенні, відгвинчуючи вороток 11.

**Опис методу досліджень**

Період математичного маятника дорівнює

, (2.3.1)

звідки можна визначити прискорення вільного падіння:

, (2.3.2)

де - довжина математичного маятника.

У разі використання оборотного маятника, його період можна визначити за формулою:

, (2.3.3)

а прискорення вільного падіння у даному випадку можна визначити так:

. (2.3.4)

Експериментально періоди математичного та оборотного маятників визначаються за допомогою наступного виразу:

, (2.3.5)

де - кількість повних коливань математичного або оборотного маятників за час .

### Порядок виконання роботи

**Визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника**

1. Нижній кронштейн разом з фотоелектричним датчиком встановити у нижній частині колонки, звертаючи увагу на те, щоб верхня грань кронштейна показувала на шкалі довжину трохи менше 50 см. Затягнути вороток, фіксуючи фотоелектричний датчик в обраному положенні.

2. Повертаючи верхній кронштейн,помістити над датчиком математичний маятник.

3. Обертаючи вороток на верхньому кронштейні встановити довжину математичного маятника. Звертати увагу на те, щоб риска на кульці була продовженням лінії на корпусі фотоелектричного датчика.

4. Привести математичний маятник у рух, відхиляючи кульку на 4-5° від положення рівноваги.

5. Натиснути кнопку «СКИД».

6. Після підрахунку вимірником близько 10 коливань натиснути клавішу СТОП.Виміряти час t десяти повних коливань маятника.Результатизаписати у Таблицю 1.

7. За формулою (2.3.5) визначити період математичного маятника.Результатизаписати у Таблицю 1.

8. На шкалі приладу прочитати довжину маятника.

9 За формулою (2.3.2) визначити прискорення вільного падіння . Результатизаписати у Таблицю 1.

Таблиця 1.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | t, с | n | T, с | lr, м | gcер, м/с2 | δ |
| 1 |  | 10 |  |  |  |  |
| 2 |  |
| 3 |  |
| 4 |  |
| 5 |  |
| <t> |  |

**Визначення прискорення вільного падіння за допомогою оборотного маятника**

1. Повернути верхній кронштейн на 180о, щоб фіксувати ролики на стрижні не симетрично, таким чином, щоб один з них знаходився поблизу кінця стрижня, а інший поблизу його середини.

2. Ножі маятника закріпити по обидва боки від центру маси, отриманої системи таким чином, щоб вони були повернені один до одного лезами. Один з них помістити поблизу вільного кінця стержня, а другий на половині відстані між роликами. Перевірити, чи відповідають межі лез ножів нарізуванням на стрижні.

4. Закріпити маятник на вкладиші верхнього кронштейна на ножі, що знаходиться поблизу кінця стержня.

5. Нижній кронштейн разом з фотоелектричним датчиком перемістити таким чином, щоб стрижень маятника перетинав оптичну вісь.

6. Відхилити маятник на 4-5від положення рівноваги і відпустити.

7. Натиснути кнопку «СКИДАННЯ».

8. Після підрахунку вимірником близько 10 повних коливань натиснути кнопку СТОП.Виміряти час t1 десяти повних коливань маятника.Результатизаписати у Таблицю 2.

9. За формулою (2.3.5) визначити період оборотного маятника.

10. Зняти маятник і закріпити його на другому ножі.

11. Нижній кронштейн з фотоелектричним датчиком перемістити таким чином, щоб маятник перетинав оптичну вісь.

12. Відхилити маятник на 4-5° від положення рівноваги, заміряти діапазон і порівняти результат з отриманою раніше величиною .

Якщо , то другий шкір перемістити в напрямку ролика, що знаходиться в кінці стержня, якщо ж , тоді в напрямку середини стрижня.

Розміщення роликів і першого ножа не міняти.

13. Повторно виміряти період і порівняти з величиною . Змінювати положення другого ножа до моменту отримання рівноваги з точністю до 0,5 %.

14. Визначити приведену довжину оборотного маятника , підраховуючи кількість нарізування на стрижні між ножами, які нанесені через кожні 10 мм.Після підрахунку вимірником близько 10 повних коливань натиснути кнопку СТОП.Виміряти час t2 десяти повних коливань маятника.Результатизаписати у Таблицю 2.

15. За формулою (2.3.4) визначити прискорення вільного падіння . Результатизаписати у Таблицю 2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | t1, с | T1, c | t2, с | T2, c | lr, м | gcер, м/с2 | δ |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |
| 4 |  |  |
| 5 |  |  |
| <t> |  |  |

**Перевірка точності і правильності роботи приладу**

Перевірка точності проводиться на підставі вимірювання робочої похибки визначення земного прискорення. Ця похибка визначається за формулою:

, (2.3.5)

де: та - прискорення вільного падіння, яке отримане в результаті вимірювань та його середнє теоретичне значення.

### Контрольні питання

* + 1. Розповісти про гармонічні коливання та їх основні характеристики. Як перетворюється енергія при гармонічних коливаннях?
    2. Від чого залежить період коливань математичного маятника?
    3. Як залежить період коливань математичного маятника від його довжини?
    4. Який маятник називається оборотним? Які основні властивості оборотногомаятника?
    5. Як теоретично підрахувати момент інерції оборотного маятника? Які параметриустановки для цього потрібно знати?
    6. Як виміряти прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника?
    7. Як виміряти прискорення вільного падіння за допомогою оборотного маятника?

## Лабораторна робота «Визначення коефіцієнта тертя кочення за допомогою похилого маятника»

**Мета роботи:** вивчення законів тертя, визначення коефіцієнта тертя та дослідження його залежності від різних факторів.

**Обладнання:**експериментальна установка, набір кульок різного розміру та матеріалу.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Похилий маятник FPM - 07, що застосовується в даній роботі, зображено на рис.4.1. На основі 11 розміщено секундомір 1, колонка 8, фотоелектричний датчик 2, шкали 5 та 9 для відрахунку кутів відхиленняікульки 10 від положення рівноваги кутів нахилу колонки. Зверху колонки закріплена нитка з кулькою на кінці. Довжину маятника можна змінювати за допомогою гвинта , звільнивши перед цим стопорний гвинт 7. Кулька котиться по площині пластини 4.

При коченні кульки в момент перетину воротком 3 світового променю датчика спрацьовує секундомір і на індикаторах 12 ведеться підрахунок числа коливаньі часу кочення. Згідно цих даних можна додатково визначити період коливань маятника. Перша клавіша приладу вмикає і вимикає напругу живлення, а друга – кінець процесу підрахунку. Третя – викликає виключення схеми секундоміра і готовність його реагувати на повний сигнал датчика.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2.4.1. Похилий маятник FPM – 07: 1 – секундомір, 2 – фотоелектричний датчик, 3 – вороток, 4 – пластина, 5 та 9 – шкали, 7 - стопорний гвинт, 8 – колонка, 10 – кулька, 11 – основа приладу, 12 – індикатор **ДЕ 6** |

**Опис методу досліджень**

Під час руху одного тіла по поверхні іншого виникають сили тертя, які називаються силами зовнішнього тертя. Вони зумовлені, в основному атомною та молекулярною взаємодією тертьових поверхонь рухомих тіл. Тертя супроводжується втратами енергії, які зв`язані з переходом механічної енергії в інші види: теплову, електричну, енергію коливального руху і т.д.

При коченні тіла циліндричної або сферичної форми по поверхні твердого тіла виникає тертя кочення або тертя 2-го роду. Втрати енергії при коченні, як правило, значно менші, ніж при ковзанні рухомих тіл.

Природу тертя кочення можна наочно уявити собі таким чином. Коли куля (циліндр) котиться по поверхні іншого тіла, то вона трохи втискується в поверхню, а сама трохи зменшується в розмірах (пружна та пластична деформація). Таким чином, тіло, що котиться весь час ніби рухається вгору (рис.2.4.2).

|  |
| --- |
| https://studfiles.net/html/2706/378/html_lVUtonUQoY.CPrf/img-disFNt.png |
| Рис. 2.4.2. Схематичне зображення кочення кулі по поверхні |

Разом з тим відбувається відрив ділянок однієї поверхні від іншої, а сили зчеплення між поверхнями протидіють цьому (явище адгезії). Розглянуті фізичні явища зумовлюють тертя кочення. Чим твердіша поверхня, тим менша сила тертя кочення. Величина сили тертя кочення залежить від геометричної форми тіла, навантаження, якості обробки поверхонь. Знання коефіцієнта тертя кочення необхідно для визначення впливу перелічених факторів на енергетичні втрати при терті.

Розглянемо простий випадок, коли твердий циліндричний каток радіусом R під дією активної сили F рівномірно котиться по поверхні, яка пластично деформується. При цьому точка прикладення нормальної реакції і сили тертяз точки В переміститься в деяку точку А. Прискорення центру мас катка дорівнює нулю, звідки

. (2.4.1)

Проектуючи рівняння (2.4.1) координатній вісі, отримаємо:

, (2.4.2)

Таким чином, рівномірний рух катка радіусом забезпечують дві пари сил: перша пара з моментом(деформація поверхні вважається незначною), і друга параз плечем , яка створює момент опору при коченні. Плече цієї пари (плече тертя) називається коефіцієнтом тертя кочення. Він має розмірність довжини і має порядок .

При рівномірному русі тіла можна наближено можна вважати, що або. З останнього рівняння знайдемо :

, (2.4.3)

Одержане співвідношення виражає основний закон тертя кочення (закон Кулона-Амонтона): сила тертя кочення прямо пропорційна силі нормального тиску і обернено пропорційна радіусу поверхні тіла, що котиться. При русі каткароботу не виконує, бо фактично є силою тертя зчеплення і кожний момент часу руху прикладена в точці, швидкість якої. Мірою переходу механічної енергії в теплову є від’ємна робота моменту тертя опору. Якщо точка виконала переміщення, то робота моменту опору дорівнює:

, (2.4.4)

де ‑ кут обертання катка і, відповідно, формула (2.4.3) перепишеться у вигляді:

, (2.4.5)

В даній роботі коефіцієнт тертя кочення кулі по поверхні твердого тіла визначається за допомогою похилого маятника.

Похилий маятник – це маятник, який складається із металевої кульки, підвішеної на нитці, що котиться по плоскій поверхні. Затухання коливань маятника зумовлено, головним чином, тертям кочення.

Якщо при коливанні похилого маятника знехтувати втратами енергії на компенсацію сили опору повітря, тертям в підвісі та деформацією закручення нитки, то можна вважати, що потенціальна енергія піднятого маятника масоюпри коливаннях переходить в роботу сил тертя кочення. Тоді на основі закону збереження і перетворення енергії маємо:

, (2.4.6)

де ‑зміна висоти центра тяжіння маятника, - кут нахилу маятника, ‑довжина шляху, що проходить кулька заколивань.

Комбінуючи співвідношення (2.4.5) і (2.4.6), для коефіцієнта тертя кочення отримуємо:

, (2.4.7)

Тут .

Після математичних перетворень одержуємо вираз для розрахунку коефіцієнта тертя кочення кульки діаметром :

, ПЕРЕРОБИТИ (2.4.8)

де‑кут відхилення маятника в початковий момент часу, - амплітуда значення кута відхилення маятника черезколивань. Зауважимо, що формула (2.4.8) виконується для невеликих кутів відхилення.

### Порядок виконання роботи

1. Встановити задану викладачем довжину маятника, прослідкувати, щоб вороток 3 при коченні кульки перетинав світловий промінь датчика і не зачіпав датчик.
2. Поставити за допомогою опорних гвинтів 14 маятник в таке положення, щоб його нитка знаходилась проти нульової поділки шкали 5.
3. Встановити заданий нахил колонки за допомогою маховика на шкалі 9, звільнивши стопорний гвинт на маховику, занести значення кута до таблиці. Провести вимірювання штангенциркулем діаметра кульки маятника3-5 разів. Встановити кут .
4. Включити прилад в мережу живлення. Натиснути клавішу «ЖИВЛЕННЯ» і встановити індикатори 12 вимірювальних приладів на нуль.
5. Відхилити кульку від положення рівноваги на кут по шкалі 5. Без поштовху відпустити маятник, одночасно натиснувши клавішу «СКИД». З цього моменту починається підрахунок i. Після того, як маятник зробитьповних коливань, зафіксувати (візуально) кут.
6. Результати досліду занести у Таблицю 1. Дослід повторити 3 - 5 разів. Клавішу «СКИД» секундоміра натиснути після того, як кулька маятника відведена на кут.
7. Досліди 4-5 повторити по черзі для кутів та .
8. Обчислити коефіцієнт тертя кочення по формулі 2.4.8.
9. Обчислити похибку вимірювань по формулі:

, (2.4.9)

де - коефіцієнт тертя кочення, - середнє значення коефіцієнта тертя кочення, для кількості дослідів.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | *β =*30о | | *β =*45о | | *β =*60о | |
| № |  | t |  | t |  | t |
| 1 |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |  |
| Середнє значення |  |  |  |  |  |  |

### Контрольні питання

1. Вивести робочу формулу для розрахунку коефіцієнта тертя кочення та пояснити його фізичний зміст.
2. Тертя. Типи тертя. Природа сили тертя.
3. Сформулювати та пояснити закони тертя.
4. Що називається коефіцієнтом тертя кочення і від чого він залежить?
5. Яка розмірність коефіцієнта тертя кочення?

## Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО УДАРУ ДВОХ КУЛЬОК»

**Мета роботи:** визначення середньої сили співударяння двох кульок і коефіцієнта відновлення приїх центральному ударі.

**Обладнання:** експериментальна установка ЕРМ-08 для дослідження пружного співударяння кульок.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Схема установки ЕРМ-08, яка призначена, зокрема, для вивчення пружного удару двох кульок однакової маси , зображена на рис.2.1. Масивна платформа 1 спирається на регулювальні ніжки 2, за допомогою яких платформу 1 можна розмістити паралельно відносно поверхні робочого стола.

На платформі 1 закріплений блок керування з кнопками «Скид», «Пуск», «Мережа» і секундоміром 3, за допомогою якого вимірюється час зіткнення кульок в мікросекундах .

На блок керування встановлена колона 4 на якій закріплені кронштейни 5 і 6. До верхнього кронштейна 5 прикріплені гнучкі ізольовані дроти 7, що одночасно відіграють роль і підвісів для кульок 8, і провідників струму від електричного секундоміра до кульок. Відстань між центрами кульок можна змінювати пересуванням підвісу лівої кульки в горизонтальному напрямку гвинтом 9. Зауважимо, що кульки, які виготовлені з немагнітних матеріалів, мають спеціальні накладки для їх утримання електромагнітом та покажчик положення у вигляді вістря.

На нижньому кронштейні 6 закріплені вимірні шкали 10, які дають змогу вимірювати кутові відхилення кульок від їх положення рівноваги. Права вимірна шкала 10 закріплена нерухомо так, що в положенні рівноваги покажчик правої кульки знаходиться над нульовою позначкою шкали. Ліва шкала також може пересуватися в горизонтальній площині так, щоб її нульова позначка збігалася з покажчиком лівої кульки.

На нижньому кронштейні 6 закріплені вимірні шкали 10, які дають змогу вимірювати кутові відхилення кульок від їх положення рівноваги. Права вимірна шкала 10 закріплена нерухомо так, що в положенні рівноваги покажчик правої кульки знаходиться над нульовою позначкою шкали. Ліва шкала також може пересуватися в горизонтальній площині так, щоб її нульова позначка збігалася з покажчиком лівої кульки.

|  |
| --- |
| Рисунок 4 |

Рисунок 2.5.1 – Схематичне зображення установки ЕРМ-08: 1 – платформа, 2 – регулювальні ніжки, 3 – секундомір, 4 – колона, 5 і 6 – кронштейни, 7 – ізольовані дроти, 8 – кульки, 9 – гвинт для регулювання відстані між кульками, 10 – вимірні шкали, 11 - електромагніт

На правій вимірній шкалі 10 закріплений електромагніт 11, причому він може фіксуватися на будь-якій ділянці шкали 10, що дає змогу змінювати початковий кут відхилення правої кульки 8.

**Опис методу досліджень**

Розглянемо систему, яка складається з двох кульок однакової маси, підвішених на нерозтяжних дротах 7. Відведемо праву кульку 8 від положення рівноваги на кут та закріпимо її за допомогою електромагніта 11. Натиснувшиклавішу «Пуск», коло електромагніта розмикається, і кулька під дією сили тяжіння розпочне рух до положення рівноваги уздовж прямої, яка з’єднує центри мас двох кульок (центральний удар). В момент часу, що передує пружному зіткненню двох кульок, кулька 8 набуває швидкості .Зазначена швидкість , відповідно до закону збереження імпульсу та її квадрат, згідно зі законом збереження енергії, відповідно, дорівнюють (врахуємо, що в розглядуваному випадку числові значення мас кульок збігаються,тобто , і їх можна скоротити):

, (2.5.1)

, (2.5.2)

де та - швидкості кульок після їх зіткнення.

Зазначені рівняння виконують тоді і лише тоді, коли подвійний добуток швидкостей кульок після їх стикання дорівнює нулю:

. (2.5.3)

Оскільки під дією удару ліва кулька розпочне свій рух, тоді рівність (2.5.3) виконується лише за умови, що

. (2.5.4)

Врахувавши рівність (2.5.4) у формулі (2.5.1),отримаємо:

. (2.5.5)

Таким чином, коли маси двох кульок рівні, а одна з них нерухома, в момент зіткнення права рухома кулька повністю передає імпульс нерухомій (лівій) кульці, і зупиняється, а ліва кулька набуває швидкості . Кулькиніби обмінялися швидкостями.

Для визначення середньої сили співударянь кульок скористаємося другим законом Ньютона в інтегральній формі (врахуємо, що початковий момент часу ):

. (2.5.6)

Згідно з формулою (2.5.4) та, виключно для простоти, виконавши перепозначення

, (2.5.7)

для середньої сили зіткнення двох кульок отримаємо такий вираз:

. (2.5.8)

Швидкість правої кульки в момент зіткнення можна знайти з таких міркувань. Відведена на кут від положення рівноваги права кулька 8, яка підвішена на дротині довжиною , підіймається на висоту (рис.2.5.2)

, (2.5.9)

та набуває потенціальної енергії

, (2.5.10)

яка в момент стикання кульокповністю переходить в кінетичну енергію:

(2.5.11)

З останнього виразу для швидкості лівої кульки отримаємо таку формулу:

. (2.5.12)

Підставивши вираз (2.5.12) у формулу (2.5.8) для сили співударянь двох кульок, отримаємо:

. (2.5.13)

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2.5.2 – До розрахунку висоти підіймання кульки |

Зазвичай для кута відхилення правої кульки 8 виконується нерівність . У цьому разі формулу (5.13) можна спростити. Записавши кут в радіанах , функцію можна розкласти в ряд та обмежитися першим доданком, тобто . З урахуванням останнього виразу формула (2.5.13) набуває вигляду:

. (2.5.14)

Звідси випливає, що середня сила удару двох кульок тим більша, чим більша їхня маса, довжина дроту підвісу і кут відхилення, та чим менший час зіткнення кульок.

Зауважимо, що у випадку, коли маса кульки невідома, її можна обчислити за відомою густиною матеріалу кульки та експериментально виміряному її діаметра:

. (2.5.15)

Абсолютно пружний удар є ідеалізованою моделлю реального процесу стикань двох пружних кульок. В дійсності же у разі зіткнення реальних макроскопічних тіл їхня механічна енергія зберігається лише частково внаслідок втрат, пов’язаних з утворенням залишкових деформацій, нагріванням тіл тощо. Ці процеси зазвичай характеризують коефіцієнтом відновлення , який визначається як відношення відносної швидкості кульок після удару до їх відносної швидкості до зіткнення , тобто

. (2.5.16)

З урахуванням рівностей і , формула (2.5.16) набуває вигляду:

. (2.5.17)

Оскільки згідно з формулою (2.5.5) , тоді у разі абсолютно пружного удару коефіцієнт відновлення дорівнює 1; якщо ж удар абсолютно непружний - .

У межах розглядуваного експериментального дослідження швидкість рухомої кульки в момент стикання кульок, визначається формулою (2.5.12). Повторивши вище зазначений хід міркувань, можна показати, що ліва кулька після співударяння набуває швидкості:

, (2.5.18)

де - кут відхилення лівої кульки. У цьому разі для коефіцієнта відновлення (2.5.17), з урахуванням наближених рівностей і , можна записати таку формулу:

. (2.5.19)

### Порядок виконання роботи

1. За допомогою лінійки виміряйте довжину підвісу правої кульки (довжину ізольованого провідника 7).
2. Відведіть підвіс правої кульки на кут так, щоб накладка кульки дотикалася електромагнітата натисніть клавішу «Мережа» (кулька буде утримуватися електромагнітом) та запишіть її значення.
3. Натисненням клавіші «Пуск» вимкніть живлення електромагніта внаслідок чого права кулька вивільниться і через час зіткнеться з нерухомою лівою кулькою яка відхилиться на кут .
4. Визначте кут відхилення лівої кульки, а за шкалою секундоміра - час зіткнення кульок і запишіть зазначені результати вимірювання.
5. За формулами (2.5.14) і (2.5.19) розрахуйте силу удару двох кульок і коефіцієнта відновлення відповідно.

### Контрольні питання

1. Що називають кінетичною енергією? Перелічіть її властивості та сформулюйте теорему про кінетичну енергію.
2. Які сили називаються консервативними? Запишіть математичну умову консервативності сил і наведіть приклади консервативних сил.
3. Яку енергію називають потенціальною? Від чого вона залежить? Запишіть вирази потенціальної енергії для сили пружності та сили всесвітнього тяжіння (сили тяжіння).
4. Якийзв’язок між консервативною силою та потенціальною енергією?
5. Сформулюйте закони збереження імпульсу та механічної енергії. Чи завжди вони виконуються?
6. Що таке удар? Який удар називається абсолютно пружним, а який абсолютно непружним? В чому полягає відмінність між зазначеними ударами з енергетичної точки зору?
7. Дайте визначення коефіцієнта відновлення. Що він характеризує?

## Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ СУЦІЛЬНИХ ЦИЛІНДРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА»

**Мета роботи:** визначення моменту інерції чотирьох суцільних циліндрів.

**Обладнання:** прилад Обербека FPM – 06, набір суцільних циліндрів, штангенциркуль, лінійка.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Прилад Обербека, який схематично зображений на рис. 2.6.1.Зазначений прилад являє собою маховик, що складається зі шківа 1 діаметром , до якого під прямим кутом приєднані чотири стрижні, вздовж яких можна переміщувати чотири суцільні циліндри, маса кожного з яких дорівнює . Хрестовина (хрестовина з циліндрами) утримується в стані спокою за допомогою електромагніта, що знаходиться за шківом 1, який буде увімкненим у разі затисненої клавіші «Пуск».

Висота падіння тягарця масою вимірюється від риски на датчику 3 до риски на датчику 4 по шкалі 2 (або за допомогою лінійки). Час падіння тягарця вимірюється автоматично секундоміром, що вмикається і вимикається за сигналами від фотоелектричних датчиків 3 і 4.

На передній панелі приладу окрім екрана секундоміра 5 знаходяться клавіші «Мережа», «Пуск» та «Скид». При натисненні клавіші «Мережа» всі індикатори секундоміра будуть висвічувати нульові покази, і ввімкнуть освітлювачі фотоелементів 3 і 4. Натиснення клавіші «Пуск» призводить до вимкнення електромагніта, внаслідок чого тягарець розпочне свій рух.

|  |
| --- |
|  |

Рисунок 2.6.1 – Зображення приладу Обербека FPM – 06:

1 – шків, 2 – шкала, 3 і 4 – датчики, 5 –секундомір, А – шків, Р – тягарці

Після натиснення клавіші «Скид» на всіх індикаторах секундоміра знову будуть висвічуватися нулі.

**Опис методу досліджень**

На падаючий тягарець масою діють сила тяжіння і сила натягу нитки . Вибравши напрямок осі уздовж руху тягарця, рівняння його руху набуває вигляду (вважаємо, що опір повітря мізерно малий, а нитка є «невагомою» і «нерозтяжною»):

. (2.6.1)

З формули (2.3.1) для сили натягу нитки отримаємо:

, (2.6.2)

де - маса тягарця; - середнє значення прискорення вільного падіння, - прискорення, з яким тягарець падає.

Момент сили, що діє на шків радіусом , на який намотана нитка, дорівнює:

. (2.6.3)

Підставляючи формулу (2.6.3) в основне рівняння обертального руху навколо нерухомої осі (- кутове прискорення) одержимо рівняння руху

, (2.6.4)

звідки момент інерції шківа дорівнює:

. (2.6.5)

Оскільки рух тягарця рівноприскорений, його прискорення можна подати у вигляді

. (2.6.6)

Якщо нитка з тягарцем змотується зі шківа без ковзання, тоді лінійне прискорення точок, що лежать на ободі шківа, збігаютьсяз прискоренням падаючого тягарця, а кутове прискорення шківа дорівнює:

. (2.6.7)

Розв’язуючи сумісно рівняння (2.6.5), (2.6.6) і (2.6.7), одержимо вираз для моменту інерції шківа (маятника Обербека):

. (2.6.8)

Якщо на стрижнях закріпити суцільні циліндри так, щоб віддаль від їхцентра мас до уявної осі обертання строго дорівнювала , то час падіння тягарцябуде дорівнювати:

. (2.6.9)

Підставивши формулу (2.6.9) у вираз (2.6.8), для моменту інерції системи «шків+тягарці» отримаємо таку формулу:

. (2.6.10)

Враховуючи, що момент інерції є адитивною величиною, тоді з формули (2.6.10) для моменту інерції чотирьох циліндрів отримаємо:

. (2.6.11)

У разі коли лінійні розміри циліндрів значно менші у порівнянні з віддаллю від уявної осі обертання шківа до центра мас циліндрів, тобто виконується нерівність , тоді їх можна розглядати як матеріальні точки. У цьому випадку теоретичне значення моменту інерції чотирьох циліндрів можна обчислити за формулою

, (2.6.12)

а результат обчислення порівняти з експериментально знайденим моментом інерції, який розраховується за формулою (2.6.11).

### Порядок виконання роботи

1. Штангенциркулем виміряйте діаметршківа, на який намотано нитку та запишіть отриманий результат.
2. По шкалі виміряйте та запишіть віддаль між рисками на корпусах датчиків 3 і 4, тобто висоту падіння тягарця.
3. Підійміть тягарець так, щоб його нижня частина збігалася з рискою на корпусі датчика 3 та натиснітьклавішу «Мережа», зафіксувавши тим самим тягарець.
4. Натисніть клавішу «Пуск».Після зупинки тягарця запишітьпокази секундоміра.
5. Закріпіть на стрижнях чотири циліндри на однакових віддалях від їх центру мас до осі обертання,і відповідно до пункту 4виміряйте та запишіть час падіння тягарця зі закріпленими на стрижнях циліндрами.
6. За формулою (2.6.11) обчислітьекспериментальне значення моменту інерції чотирьох суцільних циліндрів.
7. За формулою (6.12) обчисліть теоретичне значення моменту інерції чотирьох циліндрів, а отриманий результат порівняйте з експериментально знайденим результатом (пункт 6).

### Контрольні питання

1. Дайте визначення обертального руху АТТ навколо нерухомої осі. Які кінематичні величини характеризують обертальний рух?
2. Дайте визначення моменту інерції матеріальної точки, системи матеріальних точок та тіла з неперервним розподілом маси. Якою є роль моменту інерції при обертальному русі?
3. Що називається моментом сил і моментом імпульсу відносно нерухомої точки та відносно нерухомої осі?
4. Запишіть основний закон обертального руху навколо точки та навколо нерухомої осі.
5. Порівняйте кінематичні та динамічні характеристики при поступальному та обертальному рухах і прокоментуйте їх аналогію.

## Лабораторна робота «Визначення моменту інерції маятника Максвела»

**Мета роботи:** Визначити експериментально і розрахувати теоретично момент інерції маятника Максвелла.

**Обладнання:** маятник Максвелла, штангенциркуль, секундомір.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Маятник Максвелла використовується для дослідження закону збереження енергії та визначення на цій основі моменту інерції залізних кілець. Маятник Максвелла – масивний диск, який висить на двох нитках намотаних на вісь диска.

Основу 1 обладнано регульованими гвинтами 2, які дозволяють вирівняти прилад. В основі кріпиться колонка 3, до якої підводиться нерухомий верхній кронштейн 4 і рухомий нижній кронштейн 5. На верхньому кронштейні знаходиться електромагніт 6, перший фотоелектричний датчик 7 та гвинт 8 для закріплення та регулювання довжини біфілярного підвісу маятника. Нижній кронштейн разом із прикріпленим до нього другим фотоелектричним датчиком 9 можна рухати вздовж колонки та фіксувати в довільному положенні. Маятник приладу – це ролик 10, який кріпиться на осі і підвішується біфілярним способом до верхнього кронштейну. На ролик накладають різні по масі кільця 11, які змінюють момент інерції маятника (ролика та кільця). Маятник у верхньому положенні фіксує електромагніт. Довжину маятника визначають по шкалі на колонці приладу 3. З метою полегшення цього вимірювання нижній кронштейн було обладнано червоним покажчиком, розміщеним на висоті оптичної осі нижнього фотоелектричного датчика.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2.7.1. Зображення маятника Максвелла: 1 – основа, 2 – регульовані гвинти, 3 – колона, 4 і 5 – нерухомий та рухомий кронштейни відповідно, 6 - електромагніт, 7 – перший фотоелектричний датчик, 8 – гвинт для закріплення та регулювання довжини підвісу маятника, 9 –другий фотоелектричний датчик, 10 – ролик, 11 – кільце, 12 –блок (На передній панелі блоку знаходяться: секундомір, клавіші скидання, пуск, мережа) |

**Опис методу досліджень**

Рух ролика такий, що він опускається вниз і піднімається вверх з направленим вниз постійним прискоренням, яке є деякою складовою прискорення сили тяжіння (так якби він котився з недуже похилої гори, а потім підіймався вверх на таку ж саму гору). Рух маятника Максвелла – це один із простих випадків плоского руху твердого тіла.

Коли маятник рухається прискорення ролика тим менше, а натяг нитки тим більше, чим більший момент інерції ролика. Доходячи до нижнього положення, коли нитка геть розкрутиться, диск знову починає підійматися вверх з тією ж початковою швидкістю, яку він мав у нижньому положенні. Прискорення у ньому буде таким же і направлене вниз. Рух будь-якої точки диска ми можемо зобразити як поступальний рух зі швидкістю , яка дорівнює швидкості центра ваги, та обертання навколо геометричної осі з кутовою швидкістю .

У верхньому положенні маятник має потенціальну енергію*.* Якщо маятник з такого положення відпустити, то він, опускаючись вниз, здійснює складний поступально-обертальний (плоский) рух. Під час руху вниз потенціальна енергія маятника зменшується і перетворюється у кінетичну енергію поступального руху , кінетичну енергію обертального руху . Якщо знехтувати тертям, то згідно з законом збереження енергіїзапишемо:

. (2.7.1)

Знаючи кінцеву лінійну швидкість точок ободу валу маятника та кутову швидкість можна з формули (2.7.1) визначити момент інерції маятника Максвелла.

Лінійну швидкість точок ободу валу маятника можна визначити, знаючи висоту , на яку піднятий маятник, і час опускання його з цієї висоти

, . (2.7.2)

Виключивши з рівнянь (2.7.2) лінійне прискорення , з яким опускається маятник, отримаємо:

. (2.7.3)

Лінійна швидкість точок ободу валу маятника, його кутова швидкість і радіус зв’язані між собою співвідношенням

. (2.7.4)

На основі формул (2.7.3) і (2.7.4) одержимо:

. (2.7.5)

де – діаметр валу маятника.

Підставляючи значення з виразу (2.7.3) і з формули (2.7.5) у вираз (2.7.1), для моменту інерції маятника Максвелла отримаємо:

. (2.7.6)

Врахувавши, що загальна маса маятника , де m0 – маса валу маятника; mр – маса ролика;mк – маса кільця та d = d0 + 2\*dn, де dn – діаметр нитки, вираз (2.7.6) можна записати у вигляді:

. (2.7.7)

**АБСОЛЮТНО НЕ РОЗУМІЮ ДАЛІ НЕ ПРАВЛЮ**

. (7)

Момент інерції маятника Максвелла, як тіла правильної ґеометричної форми, можна також обчислити теоретично за формулою:

, (2.7.8)

де J0– момент інерції валу маятника, Jк – момент інерції кільця, Jр – момент інерції ролика.

Значення моментів інерції окремих складових маятника визначаються за формулами:

;; (2.7.9)

Отже:

,**?????????????** (10)

### Порядок виконання роботи

Прилад дозволяється експлуатувати тільки при застосуванні заземлення.

1. Вирівняти прилад горизонтально.
2. Записати маси.
3. Закріпити осі маятника, ролика та кільця.
4. Закріпити нижній кронштейн на заданій висоті і відрегулювати довжину підвісу (край кільця повинен бути на 2-3 мм нижче оптичної осі).
5. Включить прилад.
6. Накрутити нитку підвісу на вісь маятника (рівномірно).
7. Зафіксувати маятник у верхньому положенні за допомогою електромагніту. При цьому прорізь на кільці повинна співпадати з оптичною віссю (світовим променем) верхнього фотоелектричного датчика. Повернути маятник в напрямку його руху на кут приблизно 5° (прорізь повинна лежать на одній лінії з горизонтальними штрихами, накресленими на вертикальній площині корпуса фотоелектричного датчика).
8. Натиснути клавішу «СКИД».
9. Натиснути клавішу «ПУСК». В цей момент електромагніт відключається і включається секундомір. В нижньому поло­женні маятника секундомір виключається. На табло світиться час падіння маятника. Коливання маятника зупинити рукою.
10. Дії, зазначені в пунктах 3, 4 повторити 5 разів.
11. Використавши прикріплену до стояка міліметрову лінійку, визначити висоту падіння маятника **h**, як відстань між крайніми нижніми точками допоміжного кільця у верхньому і нижньому положеннях маятника.
12. Результати вимірювань, записати у Табл.1
13. Заповнити Табл.2 (величини відповідних мас подані на валу і маховику).
14. Виміряти штангенциркулем діаметри валу, маховика. Вимірювання здійснити по 3 рази в різних напрямах а результати записати у Табл.3.
15. Перевівши результати вимірювань всіх величин в одиниці СІ,згідно з формулою (2.7.7) визначити величину J, а за формулою (2.7.8) розрахувати Jt.
16. Результати розрахунків п.10 занести у Табл.4
17. Порівняти одержані значення J і Jtі, використавши (2.7.9), оцінити розбіжність результатів

(2.7.9)

Таблиці результатів вимірювань і розрахунків

Таблиця 1

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| t1, с | t2, с | t3, с | t4, с | t5, с | tсер., с | h, мм |
|  |  |  |  |  |  |  |

#### Таблиця 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| m0, кг | mp, кг | mk, кг |
|  |  |  |

#### Таблиця 3

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | d0, м | dp, м | dк, м | dn, м |
|  |  |  |  |  |

#### Таблиця 4

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| J, кг м2 | J0, кг м2 | Jр, кг м2 | JК, кг м2 | Jt, кг м2 |
|  |  |  |  |  |

### Контрольні питання

1. Що називається моментом інерції тіла?
2. Як визначається момент інерції тіла ?
3. Вивести формулу для знаходження моменту інерції суцільного диску відносно його геометричної осі.
4. Вивести формулу для розрахунку моменту інерції маятника Максвелла на основі закону збереження механічної енерґії.
5. Вивести формулу для теоретичного розрахунку моменту інерції маятника Максвелла.

## Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В’ЯЗКОСТІ РІДИН МЕТОДОМ СТОКСА»

**Мета роботи:** визначити коефіцієнт в’язкості рідини методом Стокса

**Обладнання:** трубки з в’язкими рідинами, набір металевих кульок, мікрометр, масштабна лінійка, секундомір

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Прилад Стокса являє собою циліндричну скляну трубку діаметром ( - радіус трубки), яка строго вертикально закріплена на підставі та заповнена рідиною, в’язкість якої потрібно визначити (рис. 2.8.1). На зовнішніх стінках трубки нанесені дві мітки, відстань між якими становить .

Для того щоб на початку свого руху кулька знаходилася в середині трубки і подалі вона рухалася б уздовж осі трубки, трубку закривають воронкою, через яку опускають кульку.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2.8.1. Зображення сил, що діють на кульку при її русі у в’язкій рідині |

**Опис методу дослідження**

При русі тіла у в’язкому середовищі шар рідини, який прилягає безпосередньо до кульки прилипає до його поверхні та повністю захоплюється ним. Наступний шар рідини захоплюється вже з меншою швидкістю і т.д. Між шарами в’язкої рідини, які рухаються з різними швидкостями, виникають сили внутрішнього тертя - сила в’язкості.

І. Ньютон встановив, що сила в’язкості , яка виникає між двома суміжними шарами дорівнює:

, (2.8.1)

де - коефіцієнт в’язкості, - градієнт швидкості, який показує бистроту зміни швидкості у напрямку осі , який перпендикулярний до напрямку руху шарів рідини, - площа, на яку діє сила .

У разі, коли тіло має форму сферичної кульки і рухається в безмежному в’язкому середовищі, Д. Стокс встановив, що сила тертя , що діє на кульку з боку рідини дорівнює:

, (2.8.2)

де - радіус кульки, - її швидкість у в’язкій рідині.

Якщо кулька у в’язкій рідині падає строго вертикально, то на неї діють три сили, які прикладені до центру мас кульки (рис.2.8.1):

* сила тяжіння, яка спрямована вертикально вниз і дорівнює:

, (2.8.3)

де - середнє значення прискорення вільного падіння, - об’єм кульки, - густина матеріалу кульки;

* виштовхуюча сила Архімеда , яка спрямовано вертикально вверх і дорівнює:

, (2.8.4)

де - густина рідини, в якій рухається кулька;

* сила внутрішнього тертя (сила Стокса), яка спрямована вертикально вверх у протилежний бік руху кульки і визначається формулою (2.8.1).

З урахуванням вище зазначеного рівняння руху кульки, згідно з другим законом Ньютона, має вигляд (напрямок координатної осі обираємо у напрямку руху кульки):

, (2.8.5)

розв’язком якого є функція

, (2.8.6)

у чому можна переконатися безпосередньо підстановкою виразу (2.8.6) у формулу (2.8.5).

З наведеної формули (2.8.6) видно, що швидкість кульки у в’язкій рідині спочатку зростає. Однак з плинністю часу експоненційний множник у формулі (2.8.6) дуже швидко зменшується і через відносно малий проміжок часу кулька в рідині буде рухатися практично зі сталою швидкістю, яка наближено дорівнює:

. (2.8.7)

З іншого боку швидкість кульки можна визначити, якщо виміряти відстань між мітками на трубці та час, за який кулька пройде цю відстань, тобто

. (2.2.8)

Порівнюючи між собою формули (2.8.7) та (2.8.8), з отриманого виразу для коефіцієнта в’язкості отримаємо наступну формулу:

, (2.8.9)

де - діаметр кульки.

Здійснити падіння кульки у безмежному середовищі практично неможливо, оскільки рідина завжди знаходиться в обмеженому середовищі, зокрема в обмеженій стінками трубці. Урахування наявності стінок, дна трубки і верхньої поверхні в’язкої рідини при русі кульки уздовж циліндричної трубки діаметром призводить до наступного виразу для коефіцієнта в’язкості:

. (2.8.10)

Однак, для приладу Стокса, який застосовується у даній роботі, виконується нерівність і для розрахунку коефіцієнта в’язкості можна скористатися наступною наближеною формулою:

. (2.8.11)

### Порядок виконання роботи

1. Виміряйте діаметр циліндричної трубки і діаметр кульки.
2. Опустіть кульку в рідину. В момент, коли кулька порівняється з верхньою міткою на трубці, увімкніть секундомір, а при досягненні кулькою нижньої мітки зупиніть його і запишіть час проходження шляху кулькою.
3. Повторіть пункт 2 для іншої в’язкої рідини.
4. 3а формулою (2.8.11) обчисліть коефіцієнти в’язкості для кожної з досліджуваних рідин (густини цих рідин та матеріалу кульки вказані на робочому місці).

### Контрольні питання

1. Які процеси мають назву процесів (явищ) переносу і чому?
2. Поясніть механізм внутрішнього тертя як переносу імпульсу в газах та рідинах.
3. Чим визначаються значення та напрям сили внутрішнього тертя?
4. Дайте визначення коефіцієнта динамічної в’язкості. В яких одиницях він вимірюється?
5. Які сили діють на кульку, що падає в рідині? Чому рух кульки з часом стає рівномірним?
6. Поясніть суть методу Стокса визначення коефіцієнта в’язкості.

## Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ КОЛИВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ТА ПРУЖИНОГО МАЯТНИКІВ»

**Мета:** Перевірити експериментально формули для періоду коливань математичного та пружинного маятників.

**Прилади і матеріали:** математичний і пружинний маятники, секундомір, лінійка

9.2. Опис методу дослідження та послідовність виконання роботи

9.2.І. Математичний маятник

Математичний маятник являє собою матеріальну точку, підвішену на довгій невагомій і нерозтяжній нитці. Хорошим наближенням до математичного маятника є невелика важка куля підвішена на довгій металевій проволоці.

Для невеликих відхилень від положення рівноваги період коливань такого маятника визначається виразом:

(9.1)

де *Т* - період коливань;*l* - довжина нитки маятника;*g* - прискорення вільного падіння.

Безпосередній розрахунок періоду коливань за формулою (9.1) виконати важко, так як не точно визначається довжина нитки підвісу (важко визначити положення центра мас маятника). Тому користуються наступним методом.

Нехай для деякої довжини *l*1, період коливань маятника

. (9.2)

Замінимо довжину нитки маятника до. Тоді

, (9.3)

або

і . (9.4)

Виконавши віднімання, отримаємо:

(9.5)

Співвідношення (9.5) можна перевірити на досліді.

**9.2.2. Послідовність виконання роботи**

1. Визначити період коливань маятника Для цього за допомогою секундоміра виміряти час повних коливань маятника з ниткою даної довжини.
2. Змінити довжину нитки на та знову аналогічно виміряти період коливань маятника . Провести по 3 серії кожного вимірювання.
3. Розрахуйте експериментально виміряну різницю та порівняйте її з розрахованою величиною.
4. Зміну провести 3 рази. Дані вимірювань та розрахунків занести до таблиць 1 і 2.

Таблиця 1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| l1 | | | l2 | | | l3 | | |
| *n* | *t* | *T*1 | *n* | *t* | *T*2 | *п* | *t* | *T*3 |
| 20 З0  40 |  |  | 20  30  40 |  |  | 20 З0 40 |  |  |
| *Т*1 |  |  | *T*2 |  |  | *Т*З |  |  |

Таблиця 2.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |  | |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |

9.2.3. Пружинний маятник.

Мета

Обладнання

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Прикладом системи, яка виконує гармонічні коливання може бути тіло масою *т,* підвішене на невагомій пружині. При невеликих зміщеннях пружини її деформація підлягає закону Гука:

(2.9.6)

де - пружна сила;*k -* коефіцієнт жорсткості пружини; *х* - зміщення пружини.

З другого закону Ньютона для вантажу масою можна записати:

, (2.9.7)

або

. (2.9.8)

Нехай *-* статистична деформація пружини під дією вантажу масою ,маємо:

. (2.9.9)

Виконавши перепозначення, враховуючи що величина не змінюється з часом, а ,, де - циклічна частота. З урахування вище зазначеного запишемо однорідне диференціальне рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтом

, (2.9.10)

розв’язком якого є функція:

або (2.9.11)

Таким чином зміщення вантажу на пружині відносно положення рівноваги підлягає гармонічному закону з періодом

, (2.9.12)

Оскільки період коливань вантажуна пружині може бути виміряний експериментально по вимірюваннях часу декількох повних коливань, то вираз (2.9.12) можна перевірити.

### Порядок виконання роботи

1. Підвісити на пружину вантаж масою і виміряти її зміщення .
2. По формулі розрахувати циклічну частоту коливаньданої системи, оскільки з умови в положенні рівноваги.
3. Вивести систему з положення рівноваги та виміряти час повних коливань . Визначити період коливань пружинного маятника.
4. По формулі визначити . Порівняти отримане значення.
5. Провести аналогічні вимірювання та розрахунки для другого вантажу.
6. Провести аналогічні вимірювання та розрахунки для іншої пружини, з другим коефіцієнтом жорсткості*.* Дані оформити у вигляді таблиць та зробити відповідні висновки.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| І –а пружина | | | | | | |
| *m* |  |  | *n* | *t* | *T* |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ІI –а пружина | | | | | | |
| *m* |  |  | *n* | *t* | *T* |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

### Контрольні питання

1. Математичний і пружинний маятники.
2. Диференціальне рівняння вільних затухаючих та вимушених коливань математичного та пружинного маятників.
3. Від чого залежить прискорення вільного падіння?
4. Експериментальне визначення прискорення вільногопадіння за допомогою математичного та пружинного маятників.

## Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯЗГАСАЮЧИХ КОЛИВАНЬ ТАЯВИЩА РЕЗОНАНСУПРИВИМУШЕНИХКОЛИВАННЯХ»

**Мета роботи:**Ознайомитися ззатухаючимиколиваннями із явищемрезонансупривимушенихколиваннях та обчислитикоефіцієнтжорсткостіпружини; фазувласних коливаньмаятника; коефіцієнт опору; енергію,розсіянумаятником; період коливаньмаятника.Побудуватиамплітуднурезонанснукриву.

**Обладнання:**установка з пружинниммаятником; установказ двомамаятниками: маятник-вібратор і маятник-резонатор

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

*Вивченнязатухаючихколивань іявища резонансупривимушенихколиваннях*

Сукупність пов’язанихміж собоютіл,здатнихздійснювати коливання, називають коливальною системою. Розглянемо найпростішуколивальну систему- пружинниймаятник(рис.2.10.1). Він являє собоювантаж масою, підвішений напружнійпружині. Будемо вважати, що маса пружинимала в порівнянніз масоювантажу.Якщопочатковадовжинапружинибезвантажу -,топрипідвішуваннівантажувонарозтягнетьсянавеличину, що називаєтьсястатичнимвидовженнямпружини.Колимаятникзнаходитьсявстані рівноваги,вага вантажуврівноважується силоюпружностіпружини:

. (2.10.1)

Змістимовантажз положення рівновагивнизнавідстань . Якщо при цьомувидовженняпружинине надто великеібудевиконуватисязаконГука,торезультуючасила, яка дієнавантаж, що знаходитьсявцьому положенні, дорівнюватиме:

. (2.10.2)

**2

•

-x

0

x

*l*0+ Δ*l*

Δ*l*0

*l*0

*m*

*m*

k∆l

Рис. 2.10. 1

З урахуванням співвідношення (2.10.1) ??????????????

. (2.10.3)

Знак«мінус»вказує на те,що зміщенняісиламають протилежнінапрямки.

Такимчином,результуючасилапризміщеннівантажуз положення рівновагипропорційна величинізсуву ізавжди спрямованадо положення рівноваги. Так як цясилапрагне завждиповернутивантажв положеннярівноваги,тоїї називаютьповертаючоюсилою,акоефіцієнт пропорційності у формулі(2.10.2),відповідаєвеличині силипризміщенні, рівному одиниці,називають коефіцієнтомповертаючої сили.

Вочевидь,впружинномумаятникурольповертаючої силиграєсилапружностіпружини,аролькоефіцієнтаповертаючої сили-коефіцієнтжорсткостіпружини.

Коефіцієнтжорсткостіпружиничисельно дорівнюєсилі, що викликаєдеформаціюпружини,при якійїї довжиназмінюєтьсянаодиницю.

Відзначимо, що сили, прямопропорційнізміщеннюіспрямовані протизсуву, але які за своєю природоюне єпружними,називаютьквазіпружними.

Якщовантаж,відтягнутийвнизз положення рівновагинаневелику відстань , відпустити, то вінбудездійснювати коливанняу вертикальному напрямку.Замалий проміжокчасу (наприклад,закількасекунд)опором повітрярухувантажу можназнехтувати.Тоді рівнянняруху вантажузадругим закономНьютонабуде:

. (2.10.4)

Прицьому зміщення*х*від положення рівновагибудезмінюватисяз часом за законом:

. (2.10.5)

де-амплітуда; - кутова(циклічна) частотаколивань; -період коливань.

Звичайною підстановкоюневажко переконатися, щовираз (2.10.5) є загальнимрозв’язком рівняння (2.10.4), яке має назву диференціальне рівнянняпростихгармонійних коливань.

Щоб надативантажузміщення, потрібно виконати протипружної силипружинироботу

. (2.10.6)

Цяробота йдена створеннязапасупотенційної енергіїколивальної системи. Тому,якщо вважатипотенційну енергіювположенні рівновагирівною нулю, то призсувівантажу на відстань*х*системабудематипотенційну енергією

. (2.10.7)

Найбільшупотенційну енергієюколивальнасистемабудемативмомент найбільшогозміщеннявантажувід положеннярівноваги, коли,тобто

. (2.10.8)

Вмомент,коли вантажпроходить черезположеннярівноваги, система має найбільшукінетичну енергію . Прицьому швидкістьруху вантажубудетакожнайбільшою.Їїможна обчислити, скориставшись формулою(2.10.5):

. (2.10.9)

Звідсинайбільша швидкістьбуде тоді, коли , тобто

. (2.10.10)

Згідно зі законом збереженняенергії, колисиламитертяможна знехтувати:

, (2.10.11)

абоз урахуваннямвиразу (2.10.10)

. (2.10.12)

Звідси

, (2.10.13)

або

, (2.10.14)

Отже

. (2.10.15)

Такимчином,періодколиваннятіла,підвішеногонапружній пружині, не залежить від амплітуди йвід ваги тіла, а залежитьвід його масиі коефіцієнтажорсткостіпружини. Якщопроміжок часувеликий (більше декількохсекунд), то на коливальний рухвантажу істотнимчиномбудевпливатиопір повітряіамплітуда коливаньбуде з часомзменшуватися.Такі коливанняназиваються***згасаючими***. Якщозгасання коливань відбуваєтьсяповільно,тонаближеноїх можна розглядати якперіодичні.

Припорівняно повільнихрухахвантажу, що коливається, можнавважати, щосилаопорупропорційна швидкостірухувантажу:

. (2.10.16)

Знак«мінус»вказує на те, що опір (тертя) спрямований протизсуву,авеличинаявляє собоюкоефіцієнт опору(тертя).

Томудлязатухаючих коливаньрівнянняруху вантажубуде:

. (2.10.17)

Амплітуда коливаньбуде спадатизаекспоненціальним закономідлямоментучасубуде:

. (2.10.18)

де-початкова амплітуда; *е*-основа натуральних логарифмів, -коефіцієнт згасання, який дорівнює .

Відношення двохамплітуд, віддалених на період, називають декрементомзатухання:

. (2.10.19)

Беручи логарифм від виразу (2.10.18), отримаємо логарифмічнийдекрементзгасання:

. (2.10.20)

Амплітуди коливань, віддалені наодинперіод, маловідрізняються одна від одної, і тому длябільш точного визначеннякоефіцієнта затухання зазвичай вимірюютьамплітуди,віддалені одна від одноїза часомнаперіодів.

Рівністьвідношень

, , …. , (2.10.21)

дозволяєзаписати:

. (2.10.22)

Отже

. (2.10.23)

Очевидно, чим більше , тим точніше можна визначити за формулою(9)показникзатухання.

Для підтримкиколивального процесунеобхідно поповнюватиспад енергіївсистеміза рахунокроботи, що здійснюєтьсязовнішньою силою. Коливаннясистеми,які вчиняютьсяза рахунок роботиперіодичнозмінної зовнішньоїсили,називаютьвимушеними.

Якщоколивальнасистемазнаходитьсявстані спокою, то під дієюзовнішньої сили, щоколиваєтьсяза величиною,системабудепоступоворозгойдуватися.Прицьому частинаенергії,що надаєтьсясистемі, буде витрачатисянаподолання опорів. Втратаенергії в системізбільшуєтьсяіз зростанням швидкості тіла, яке коливається, швидкістьвсвоючергузростає із збільшеннямамплітуди.Такяквтрати енергіїзростають швидше, ніж робота зовнішньої сили, то в кінці кінцівнастане момент, коливтрати енергіїстануть рівнимироботізовнішньої сили. З цього моментуподальше наростанняколиваньвсистеміприпинитьсяіколивання будуть сталими.

Якщозовнішня силазмінюється з часом загармонічним законом, то сталі вимушені коливаннясистеми такожбудутьгармонійнимиіперіод їхбудедорівнює періодуколиваньзовнішньої сили.

Рівняннярухутіла, яке коливається буде:

. (2.10.24)

де- круговачастотаколиваньзмушуючої сили, a -амплітудне значеннязмушуючої сили. Прицьому зміщеннявід положення рівновагибудезмінюватисяз часом за законом

. (2.10.25)

деφ -зсув фазміжколиваннямисистемиі коливаннямизовнішньої сили.  
Якщо підставитивираз (2.10.25) в рівняння(2.10.24), отримаємо рівняння яке буде виконуватися при довільних значеннях часу тоді і лише тоді, коли коефіцієнти при гармонічних функціях у лівій та правій частинах рівняння збігаються. В результати отримаємо систему лінійних рівнянь відносно амплітуди вимушених коливань та фази . Розв’язуючи отриману систему рівнянь, зокрема, для амплітуди отримаємо наступний вираз

. (2.10.26)

де- круговачастотавласних коливаньсистеми.

Отже,дляколивальноїсистеми, що маєданувласну частотуі даний показникзатухання, амплітуда вимушених коливаньзалежить від частотизмушуючої сили.

Явищерізкого зростання амплітудивимушених коливаньпринаближеннічастотизмушуючої силидо частоти власнихколивань системиотримало назву***резонансу***. Відповідно,частотузмушуючої сили, при якій виникаєрезонанс, називають резонансною частотою, яку можна знайти розв’язавши рівняння :

. (2.10.27)

З цієї формуливипливає, щовсистемах, дляяких згасання ємалим ,резонанснастаєпричастотізмушуючої сили, близької до власної частотисистеми.

Підставившизначеннярезонансної частоти(2.10.27) вформулу (2.10.26), отримаємо значення резонансноїамплітуди:

. (2.10.28)

де - добротність коливальної системи.

З формули(2.10.28) випливає, щопри відсутностізгасання всистемірезонанснаамплітудаповиннаобертатисьвнескінченність.Однак, такийвисновок є невірним, оскільки зі зростаннямамплітудиколиваннястаютьнастількивеликими, що до них незастосовнарозглянута вищетеорія. Отже,резонанснастаєпричастотізмушуючої сили, близької до власної частотисистеми,або, інакше кажучи, при наближенніперіодузмушуючої силидо періодувласних коливаньсистеми.

### Опис приладу та послідовність виконання роботи при вивченні згасаючих коливань

Для вивченнязгасаючих коливань використовується пружинниймаятник(рис.2.10.2). Пружинниймаятникскладається зциліндричноїспіральної пружиниз підвішенимдо неївантажем масою (значення якої вказанонапідставціштатива). Амплітуда коливаньвантажувимірюєтьсяповертикальній шкаліза допомогоювізира.

Длявизначення коефіцієнтажорсткостіпружинистатичним методомпотрібно вимірятиза шкалоюподовженняпружиниприпідвішуваннідо неїдодатковоговантажу.Знаючиподовженняпружиниі масудодатковоговантажу(вона вказана насамому вантажі), за формулою (1)можна обчислитикоефіцієнтжорсткостіпружини.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2.10.2. Пружинний маятник |

Вимірюванняпотрібнопровестидлятрьох різнихдодатковихвантажів іобчислити середнєзначення коефіцієнтажорсткостіпружини. Потімвимірюєтьсяперіодвласних коливаньпружинногомаятника.Дляцього, знявши додатковийвантаж,потрібно відтягнутиосновний тягарнакілька сантиметріввниз(3-4см)і вимірятисекундоміромчас, протягом якого маятник здійснить10повних коливань. Періодвласних коливаньможнавизначити з співвідношення.

Цівимірювання слідповторитине менше трьох разіві по нихобчислитисереднє значенняперіоду.

Длявизначення показниказатуханняілогарифмічногодекрементазатуханняпотрібно виконати наступнівимірювання. Відтягнувшивантаж (на 6-8 см)внизвід положеннярівноваги іутримуючи йогов цьому положенні,вимірятиза шкалоюпочатковуамплітуду.

Після цього, відпустивши вантаж іодночасновключившисекундомір,визначити час, протягом якого відбувається*п*повних коливань(*п*= 150-200).Крімтого,за шкалоювимірюєтьсяостання зцьогочислаколиваньамплітуда, коли вантаж рухаєтьсявниз. Знаючиамплітудиі, віддалені одна від одноїза часомна*п*періодів, час, протягомякого скоєно*п*повних коливань, а також періодвласних коливаньмаятника(з попередніх вимірювань), за формулами(8) і(9)можна обчислитипоказникзатуханняілогарифмічний декрементзатухання.

Всі цівимірювання слідповторитидлятрьох різнихзначеньпочатковоїамплітуди(6,7,8 см)і обчислитисередні значенняпоказниказатуханняілогарифмічногодекремента.

### Порядок виконання роботи

1. Знаючиперіодвласних коливаньпружинногомаятникаі масупідвішеногодо пружинивантажу, обчисліть, використовуючи формулу (6)коефіцієнтжорсткостіпружиниі порівняйте йогоз отриманимстатичнимметодом.
2. Обчислітьза отриманимиданими вимірівфазу*ωt*власних коливаньмаятникаі зсуввантажу*х*через 3свідпочатку відлікучасу.
3. Використовуючиотримане значеннякоефіцієнта затуханняі знаючимасувантажу*т*, визначте коефіцієнт опору.
4. Обчислітьенергію,розсіянумаятникомза*п*коливань, і знайдитьїїзначення у відсотках відйогопочаткової енергії.
5. За часом,заякий було скоєно*п*коливань, обчисліть період коливаньмаятникаі порівняйте йогоз періодомвласних коливаньмаятника.
6. Обчислітьвідносну помилкузначення коефіцієнтажорсткостіпружини ікоефіцієнта опору.

**Опис приладу та послідовність виконання роботи при вивченні явища резонансу при вимушених коливаннях**

Ця частина роботи виконується на установці з двома маятниками (рис. 2.10.3). Один з них, важкий, з великим запасом енергії і постійним періодом коливань *T*0, використовується в якості задаючого вібратора. Інший, легкий маятник, служить резонатором і розгойдується під дією поштовхів маятника-вібратора.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2.10.3. Прилад з двома маятниками |

Маятник-вібратор являє собою алюмінієву трубку з важким вантажем, укріпленим у її нижнього кінця. З верхньою частиною трубки скріплене широке кільце О. Для зменшення тертя при хитанні маятника на осі укріплена агатова призма. У верхній частині маятника-вібратора укріплений якір Я, за допомогою якого коливання передаються нитці маятника-резонатора.

Маятник-резонатор являє собою невеликий вантаж Г, підвішений на нитці. Ця нитка проходить через канал в осі маятника вібратора, і на іншому кінці її підвішена противага П. Противага і тертя нитки об стінки каналу осі дозволяють досить надійно забезпечувати задану довжину маятника-резонатора. У той же час це дозволяє легко змінювати довжину маятника-резонатора, підтягуючи за нитку або за вантаж на одному кінці її, або за противагу на іншому кінці нитки.

Таким чином, період коливань маятника-резонатора можна плавно змінювати, змінюючи його довжину. Періоди коливань маятника-резонатора при різній довжині його вказані на вертикальній шкалі. На цій же шкалі нанесені поділки, відповідні відношенню , де *T*0 - період коливань маятника-вібратора. Відлік періоду коливань і значення відношення - для даної його довжини проводиться по положенню верхнього краю противаги.

Горизонтальна шкала , встановлена паралельно площини хитання маятника-резонатора, призначена для визначення амплітуди його коливань.

Метою роботи є побудова амплітудної резонансної кривої. Ця крива графічно зображує залежність амплітуди коливань маятника-резонатора від відношення його періоду коливань до періоду коливань маятника-вібратора .

Вимірювання починають з установки довжини маятника-резонатора, що відповідає найменшому значенню відношення на вертикальній шкалі. Потім, відхиливши маятник-вібратор до упору, відпускають його. Поштовхи якоря маятника-вібратора розгойдують маятник-резонатор. Коли амплітуда його коливань перестає зростати, роблять відлік її значення по горизонтальній шкалі по найбільшому відхиленню нитки маятника.

Щоб уникнути помилок за рахунок паралакса очей в момент відліку потрібно розташовувати по нормалі до шкалою. Вимірювання повторюють при різній довжині маятника-резонатора. Амплітуда коливань маятника-резонатора буде, очевидно, найбільшою при резонансі, коли відношення

Для побудови амплітудної резонансної кривої, крім значення резонансної амплітуди, потрібно визначити ще не менше трьох значень амплітуди для різних відношень і не менше трьох значенні амплітуди, коли відношення .

### Порядок виконання роботи

Побудуйте амплітудну резонансну криву, відкладаючи по осі абсцис значення , а по осі ординат відповідні амплітуди.

### Контрольні питання

1. Чому дорівнюєчас, за якийамплітудазатухаючих коливань зменшуєтьсяв*е*разів? (Розрахуйте цей часза данимилабораторної роботи.)
2. Який вигляд маєграфікзатухаючих коливань?
3. Чим викликанийзсув фазміжколиваннямисистемиі коливаннямизовнішньої сили? Чому дорівнюєцей зсувфазприрезонансіі яка йогорольвцьому явищі?
4. Як змінюєтьсявидамплітудноїрезонансної кривоїпризбільшенні іпризменшенніпоказниказатухання?
5. Чиє поняття«період» і «амплітуда» строгимидля затухаючих коливань?

## Лабораторна робота «ВИКОРИСТАННЯ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ»

**Мета роботи:** вивчити режим утворення стоячих хвиль у твердих тілах обмежених розмірів; експериментально визначити основну резонансну частоту, швидкість поздовжніх хвиль і модуль пружності.

Обладнання:генератор електричних коливань звукової частоти; осцилограф; платформа з утримувачем стержня й двома телефонами на мікрометричних гвинтах; стержні з сталі, алюмінію, латуні.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Загальний вигляд приладу наведено на рис. 2.11.1: Для збудження поздовжніх коливань у стержні використовують «звуковий генератор» і телефон 8, а для вимірювання амплітуди коливань –телефон 5 і осцилограф. Для забезпечення взаємодії електромагнітів телефонів зі стержнем з телефонів видаляють мембрани, а їх роль виконує сам стержень. На кінці стержнів з немагнітних матеріалів (алюміній, латунь) приклеєні сталеві пластини.

Під час утворення в стрижні стоячої хвилі на екрані осцилографа спостерігається різке підвищення амплітуди сигналу.

|  |
| --- |
| **4** |
| Рис. 12.1 – Схема експериментальної установки: 1 – генератор; 2 – платформа з утримувачем 6 стержня 7 і двома електромагнітними телефонами 5 і 8; 3 – осцилограф; 4,9 – мікрометричні гвинти. |

**Опис методу дослідження**

Відповідно до того, що фізична природа коливань може бути різною, хвилі бувають різної природи (механічні, електромагнітні). Механічні хвилі являють собою процес поширення, механічних коливань у пружному середовищі, а електромагнітні – процес розповсюдження електромагнітних коливань у просторі. Якщо хвиля випромінюється гармонічним осцилятором і втрати енергії відсутні, то для механічних коливань справедливо таке хвильове рівняння:

, (2.11.1)

де – зміщення довільної точки середовища на відстані в момент часу , – швидкість хвилі.

Розв’язуючи рівняння (2.11.1), є такі функції:

;, (2.11.2)

де – хвильове число, – довжина хвилі.

Як видно із (2.11.2), важливою ознакою рівняння хвилі є залежність X нетільки від часу, а й від координати.

Дві плоскі хвилі однакових періодів і амплітуд (пряма й відбита), що рухаються назустріч одна іншій в, одному й тому ж середовищі, при накладанні утворюють стоячу хвилю, що описується рівнянням

. (*2.*11.3)

При цьому в середовищі виникає особливий коливальний стан. Амплітуда коливань в різних ділянках простору має різні значення. При виникають вузли (зміщення частинок дорівнює 0), при –пучності (зміщення частинок максимальне). Розподіл вузлів і пучностейвизначаються розмірами коливальної системи й обмежуючими умовами.

Розглянемо вплив обмежуючих умов на розподіл вузлів і пучностей на прикладі стоячих хвиль у стержні довжиною , закріпленому на кінцях або в центрі. В першому випадку на кінцях стержня утворюються вузли, у другому – пучності. Виходячи з того, що на довжині стержня повинні укладатись ціле число стоячих хвиль () та відстань між вузлами та пучностями дорівнює , зв’язок між довжиною стержня і довжиною хвилі виражається наступними співвідношеннями: (), () відповідно для закріплення на кінцях і в центрі стержня. Можливі значення довжини хвиль і частот (які називають власними), для розглянутих випадків наведені в табл. 2.11.1

Таблиця 2.11.1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характер закріплення стрижня | Довжина хвилі  , м | Власна частота  , Гц |
| На кінцях |  |  |
| У центрі |  |  |

Як видно з таблиці, принциповою відмінністю результатів порівняно з коливанням маятника (система із зосередженими параметрами) є наявність в стержні (система із розосередженими параметрами) безлічі власних частот коливань. Мінімальна з цих частот називається основною, решта – гармоніками. Таким чином, в суцільному стержні скінченного розміру утворюються стоячі хвилі, які мають дискретні значення частот.

Як у випадку маятника, що коливається, в стержні можна створити вимушені коливання за рахунок енергії, підведеної зовні. Очевидно, що амплітуда стоячої хвилі буде максимальною при резонансі, тобто завжди, коли частота вимушуючої сили буде рівною одній із власних частот.

У даній роботі визначають динамічний модуль пружності для стержнів, виготовлених з різних металів.

Якщо, діючи на кінець стержня, викликати в ньому періодичні стиснення і розтягнення, тоді в стержні виникають поздовжні коливання, поширення цих коливань вздовж стержня являє собою поздовжню хвилю. Її швидкість заложить від модуля пружності і густини матеріалу стержня:

. (*2.*11.4)

Отже, якщо відома густина матеріалу і швидкістьпоздовжніх хвиль (швидкість звуку) у ньому, то можна знайти модуль пружності матеріалу за такою формулою:

. (2.11.5)

У даній роботі поздовжня хвиля в стержні створюється за допомогою генератора електричних коливань звукової частоти. Швидкість хвилі знаходиться методом звукового резонансу. Пряма хвиля, дійшовши до кінця стержню, відбивається від нього. У результаті накладання прямої й зустрічної (відбитої) хвиль у стержні виникає стояча хвиля. Стержень закріплений посередині, отже, в цьому місці утворюється вузол стоячої хвилі (зміщення частинок дорівнює 0). На незакріплених кінцяхстержня в місцях відбиття хвилі від середовища меншої густини, ніж густина стержня, утворюються пучності (зміщення частинок максимальне). Амплітуда коливань в різних місцях і буде найбільшою в момент резонансу, коли частота вимушуючоїсили, яка намагається періодично стиснути або розтягнути стержень, дорівнює одній із власних частот його коливань (див. табл.2.11.1).

На основній власній частоті укладається одна півхвиля . Тоді швидкість поздовжніх звукових хвиль у стрижні, згідно з табл. 2.11.1, дорівнює:

. (2.11.1)

Таким чином, для визначення швидкості поздовжніх звукових хвиль у стержні необхідно знати його довжину й основну резонансну частоту . Визначивши швидкість звуку в досліджуваному матеріалі й знаючи його густину, за формулою (4.5) можна розрахувати модуль пружності. Цей метод називається динамічним. Він є одним з найточніших методів визначення модуля пружності-характеристики властивості матеріалу чинити опір деформації стиснення або розтягу.

### Порядоквиконання роботи

1. Увімкніть в електричну мережу осцилограф і генератор. На генераторі установіть діапазон частот 2...20 кГц, на осцилографі – максимальне підсилення.
2. Закріпіть в утримувачі досліджуваний стержень точно посередині, використовуючи для цього нанесену на ньому мітку. Телефони за допомогою мікрометричних гвинтів спочатку потрібно відвести, щоб не заважали установці стержня.
3. Повільним обертанням мікрометричного гвинта приведіть один з телефонів у легке дотикання з стрижнем, яке супроводжується слабким клацанням за рахунок притягання стрижня магнітом телефону. Потім повільно обертайте мікрометричний гвинт у протилежному напрямку до відриву телефону від стержня. Ці самі операції виконайте з іншим телефоном. Різниця показань мікрометричного гвинта визначає ширину повітряного зазору. Вона не повинна виходитиза припустиму межу – 0,1...0,2 мм (ціна поділки кругового ноніуса 0,01 мм).
4. Плавно обертаючи ручку настройки частоти генератора, досягнути виникнення резонансу та, визначивши по шкалі генератора значення основної резонансної частоти, занесіть його до таблиці. Діапазони частот, в яких необхідно шукати , указані в табл.2.11.2. Для кожного, з металів там же наведено значення їх густини.
5. Виконайте пп. 2 – 4 для стержня з інших матеріалів.
6. Користуючись формулами (2.11.6) і (2.11.5), розрахуйте швидкість поздовжніх звукових хвиль і модуль пружності для кожного з досліджуваних матеріалів. Довжина стержнів – 63,2 см.

Таблиця 2.11.2

Таблиця для занесення даних експериментальних вимірювань

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Діапазон частот  *Δν*, кГц | Резонансна частота  *ν*, Гц | Густина  , кг/м3 | Швидкість поздовжніх звукових хвиль , м/c | Модуль Юнга  *Е* , Па |
| Сталь | 3,5-4,5 |  | 7,9 ·103 |  |  |
| Алюміній | 3,5-4,5 |  | 2,6 ·103 |  |  |
| Латунь | 2...3 |  | 8,4 ·103 |  |  |

Вказівка. При виконанні роботи стежте, щоб стержень не вдавлювався в корпус телефону.

### Контрольні питання

1. Що називається модулем пружності? Як його визначити експериментально? (Опишіть статистичний і динамічний методи).
2. Що являє собою власна частота коливань стрижня? Чому дорівнює число власних частот для коливальної системи с розподіленими пірометрами?
3. Що називається біжучою хвильою? Запишіть рівняння біжучої хвилі.
4. Які умови виникнення стоячих хвиль? Запишіть рівняння стоячої хвилі.
5. Чому дорівнює амплітуда стоячої хвилі? Як впливають на неї граничні умови?
6. Які особливості біжучої та стоячої хвиль?
7. За яких умов виникає резонансна частота вимушених коливань стрижня, закріпленого: а) посередині; б) на кінцях?
8. Що називається резонансною кривою? Які дослідні дані потрібні для її побудови?

# МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

## Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯ СПОСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ»

**Мета роботи:** Ознайомитися з методами і приладами для вимірюваннятемператури.

**Обладнання:** Термометр на терморезисторі, ртутний та спиртовийтермометри, термопара, мілівольтметр.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

***Інструкція по використанню.Термометр на терморезисторі.***

Приладпризначений для вимірюваннятемператури в діапазоні 0-300оС, датчик термометра – термістор КМТ-14.

Датчик являє собою терморезистор типу КМТ-14, до виводівякогонапаянімідніпровідники з штекерами на виході.

Для захисту терморезистора відмеханічнихпошкоджень і зручностівикористаннявиробу, терморезистор і частинаізольванихпровідниківзнаходяться в металічнійтрубці, яка зісторони терморезистора закритазахиснимметалічним наконечником, зєднаним з нею різьбою через втулку. На виходізєднувальнихпровідників на трубку навернута втулка, виготовленаізізоляційногометеріалу. Вона слугує ручкою датчика при вимірюваннітемператури.

Термрезистор КМТ-14 складаєтьсяізробочоготіла – терморезистора з виводами, змонтованого в склянійтрубцідіаметром 4мм. Саметіловпаяне в скло з одного кінця трубки, а з іншогокінцянапаянівиводи. Цимдосягаєтьягерметизаціяробочоготіла і виводіввідбезпосередньго контакту з середовищем, температуру якого ми вимірюємо. Робочетіло терморезистора складаєтьсяізкобальто-нікеловоїсуміші.

Вимірюванняопрорутермістора проводиться за допомогою цифрового омметра.

### ЗАСТЕРЕЖЕННЯ:

НЕ допускаєтьсяексплуатація датчика при температурівище +300оС, перегріванняприведе до порушенняелектричнихвластивостей терморезистора.

НЕ тримати датчик в середовищі при температурівище +100оС довше 10хв.

НЕ підключати датчик в коло змінного струму, при вимірюванняхкористуватисялише омметром.

### Порядок виконання роботи:

Опрацюватитеоретичнийматеріал по літературі (Физический практикум, підредакцієюДущенкоВ.П., роботи №35, №36, стр.165-175).

1. Ознайомитися з будовою ртутного і спиртового термометрів, виміряти температуру кипіння води обома термометрами.
2. Ознайомитися з будовоютермопари. Провести градуюваннятермопари в діапазоні 0-100оС використовуючиртутний термометр як еталонний. Намалюватиградуйованийграфікдиференційнойтермопари. Користуючисьграфікомвиміряти за допомогоютермопари точку плавлінняречовин, вказанихвикладачем.
3. Ознайомитись з будовою термометра на терморезисторі. Провести градуювання терморезистора в діапазоні 0-100оС використовуючи в якостієталонногортутний термометр. Користуючись таблицею градуювання (графіком), визначити за допомогою терморезистора точку плавленняречовин, вказанихвикладачем. Визначититемпературнийкоефіцієнт опору терморезистора.

Таблиця1 „градуюваннятермопари”.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Т,С |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| mV |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

### Контрольні питання

1. Поняття температури.
2. Шкали температур, зв'язок між ними.
3. Методи вимірювання температури.

## Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯ СПОСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ»

**Мета роботи**: Ознайомитися з методами і навчитисякористуватисяприладами для вимірюваннятиску.

**Обладнання:** Механічний манометр, рідинний манометр, трубчастий манометр, електроннийіонізаційний манометр.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

1. **Механічні (деформаційні) манометри.**

Механічніманометри широко використовуються для вимірюваннятисків в діапазонівід атмосферного тиску до 10-1Па. Принцип діїцихприладівгрунтується на використанніявищадеформаціїчутливогоелемента при діїприкладеної до ньогорізницітисків. Перевагоюцихманометрів є те, щоїхпокази не залежатьвід виду газу. Найбільшогопоширеннянабули два типиманометрів: трубчаті і мембранні.

а) трубчастіманометри.

Чутливимелементом таких приладів є пустотіласпіралеподібнаметалева трубка (трубка Бурдона). Відкритийкінець трубки приєднується до вимірювальноїсистеми. Запаянийкінець через систему важелівз’єднанийіззубчастим сектором, якийобертаєстрілку манометра. На зовнішнюповерхню трубки завждидієтиск атмосферного повітря.

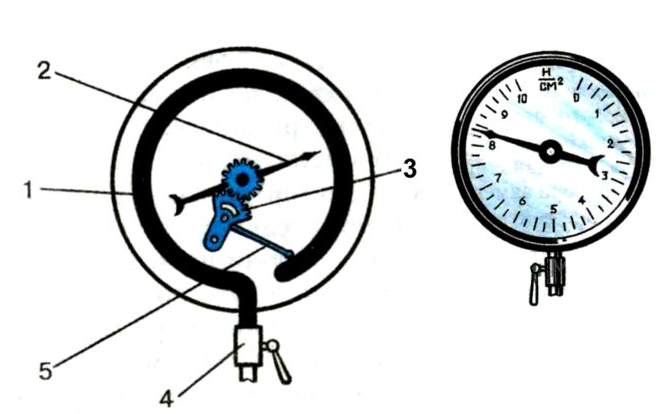


Рисунок3.2.1Загальна схема трубчатого манометра: 1 – трубка Бурдона; 2 – стрілка; 3 – зубчатий сектор; 4 – штуцер приєднання до вимірювальної камери; 5 – важіль.

Якщоатмосфернеповітрязнаходиться в середині трубки (різницятисківрівна нулю), то стрілка манометра стоїть на нульвійподілцішкали. При цьомудеформація трубки відсутня. Змінатиску і відкачуваному (накачуваному) об’ємі приводить до появирізницітисків за трубкою і в серединіїї.цевикликаєвигинання трубки і поворот стрілки. Поділкашкалинапротиякоїзупинитьсястрілка манометра, показуєочевидно, різницюміжатмосфернимтиском і тискомвсередині трубки.

б) мембранний манометр.

В мембраннихманометрах(Рис. 3.2.2) такожвикористовуєтьсяпрогинаннячутливогоелементапіддієюрізницітисків.

Основнимелементом такого приладу є чутлива мембрана (3), яка поділяє камеру манометра на двічастини. З мембраною зв’язаниймеханізм повороту стрілки (2), якийперетворюєпоступальнийрухсерединимембрани в обертальнийрухстрілки.

Принцип роботи манометра легко зрозуміти з приведеногомалюнку. На відмінувідтрубчатихманометрів не залежитьвідзовнішнього атмосферного тиску (повітря в лівійкамерімаєсталийтиск).

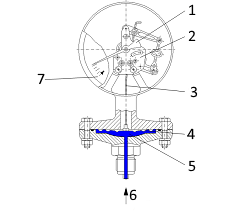


Рисунок 3.2.2. Загальна схема мембранного манометра: 1 – стрілка; 2 – механізмпередачіруху; 3 – тяга; 4 – мембрана; 5 – вимірювальна камера; 6 – подача тиску; 7 – циферблат.

2. **Рідинніманометри.**

Рідинніманометри конструктивно найбільшпрості і тому вони булиісторично першими приладами для вимірюваннятиску.

Найбільшпоширеними є так званіUподібнірідинніманометри. Вони, в основному, служать для вимірювання абсолютного тиску в діапазонівід атмосферного до 1Па. Існуютьтакожскладніспеціальніконструкціїрідиннихманометрів для вимірюваннятисків до 10-3Па.

Принцип діїUподібногорідинного манометра грунтується на переміщеннірівніврідини в лівому і правому колініUподібної трубки піддієюрізницітисків (Рис.3.2.3).

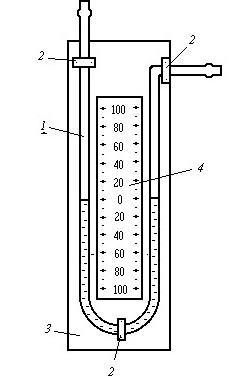


Рисунок 3.2.3. Загальна схема рідинного U подібного манометра: 1 – U подібна скляна трубка; 2 – кріпильні скоби; 3 – основа; 4 – шкала.

Коли в резервуарітискрівний атмосферному, то рівніробочоїрідини в лівому і правому колінаходнакові. При змініробочоготиску в камері, рівень буде відрізнятися - ∆h, пропорційнорізницітисків, яка буде рівна:

(3.2.1)

де ρ – густинаробочоїрідини.

Таким чином, покази манометра залежатьвід атмосферного тиску. Якщовін не відомий, то тиск в резервуарі буде рівний:

(3.2.2)

3. **Тепловіманометри.**

Тепловіманометри широко використовуються для вимірюваннятисківвід 103 до 10-2Па. Принцип дії таких приладівгрунтується на залежностітеплопровідності газу відйоготиску. При низьких тисках (в молекулярному режимі) теплопровідністьгазу пропорційнатиску, а при високих тисках (в’язкий режим) теплопровідність газу не залежитьвідтиску. В перехідних режимах передача тепла не лінійнозростаєіззростаннямтиску і, починаючи з деякогозначеннятиску, незалежитьвіднього. Причиною таких змінтеплопровідності є залежністьдовжинивільногопробігу молекул відтиску газу.

Всітепловіманометрискладаються з двохчастин: датчика-перетворювача, якийбезпосередньоз’єднаний з вимірювальною системою і електронноговимірювального блоку.

Корпус датчика перетворювача є відрізкомметалевоїчискляної трубки. Всерединіякоїзнаходитьсяактивнийелемент – перетворювачзмінитиску газа в яку небутьелектричну величину (опір, термо- ЕРС).

Найбільшогопоширеннянабули так званітермопарнітепловіманометри (Рис.3.2.4).

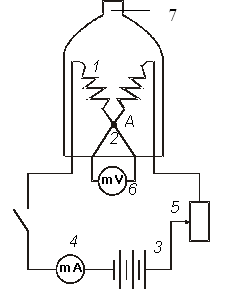


Рисунок 3.2.4. Загальна схема термопарного манометра: 1 – нитка розжарення; 2 – термопара, приварена до нагрівника у точці А; 3 – джерело живлення нитки; 4 – міліамперметр; 5 – реостат; 6 – мілівольтметр; 7 – трубка для приєднання до вакуумної системи.

Манометричний датчик перетворювач (манометрична лампа) складається з скляногоабометалевого корпусу, в якомузмонтованонагрівник (1) та термопару (2), щоз’єднаніміж собою тонким провідником (3).

Електричний струм відджерелапротікає через спіральнагрівника і розігріваєїї до деякоїтемператури. Теплота віднагрівникапередається через перемичку до термопари, а та генеруєпевну ЕРС, щовимірюєтьсямілівольтметром.

Доки тиск в манометричнійлампірівний атмосферному, теплопровідність газу, щозаповнює лампу, велика і майже вся теплота розсіюється молекулами газів. Внаслідокчоготермопарнийкінецьперемичкихолодний і мілівольтметрпоказує ЕРС близьку до нуля. При зменшеннітиску в лампітеплопровідність газу зменшується. Внаслідокцьогозростає температура термопарногокінцяперемички і мілівольтметрпоказуєзбільшеннятермо-ЕРС.

Кожнатермопарна лампа потребуєпопередньгоградуювання на підприємствіщоїхвиготовляє. Правильністьпоказів ПМТ досягається при цілкомпевномузначеннісили струму, що проходить через нагрівник. Приєднавшиперетворювач до вакумноїсистеми, необхідно реостатом (5) встановити за показами міліамперметра (4) силу струму, вказану на балоні ПМТ.

Такітепловіманометри є приладами не прямого вимірюваннятиску. Їхпоказизалежатьвід типу газу.

4. **Електроднііонізаційніманометри.**

Для вимірюваннятиску в межах 10-1 – 10-8Па використовуютьсяіонізаційніманометри. Ціприлади як і тепловіманометрискладаютьсятакож з двохчастин – манометричногоіонізаційногоперетворювача (ПМІ) та електронного блоку, який живить перетворювач та вимірюєтиск. Конструкція ПМІ представлена схематично на мал2.5. В скляномубалоні (манометрична лампа) змонтованатрьохелектродна система, щоскладається з катоду (1), анодноїсітки (2) та колектораіонів (3). На аноднусіткувідносно катоду подаєтьсядодатнійпотенціал, а на циліндрколектора – від’ємний. Вольфрамовий катод прямого розжареннявипромінюєелектрони, якілетять до додатньоїсітки. Цясіткадоситьрідка, а тому більшістьелектронівїїпролітають. Далі вони гальмуються в поліколектора і повертаються назад до сітки. Перш ніж остаточно осісти на ній, електрониздійснюють 4-5 коливань в просторіміжсіткою і колектором.

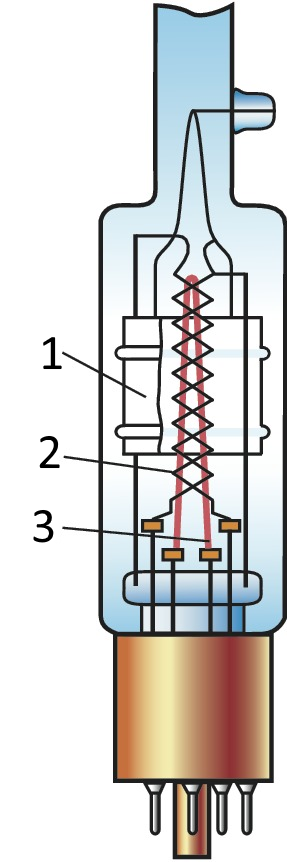


Рисунок 3.2.5Загальна схемаіонізаційного манометра: 1-колекторіонів; 2- анодна сітка; 3- катод прямого розжарення

Під час цьогопроцесуелектрони, зустрічаючись з атомами газу, щозаповнює лампу, іонізуєїх. Створеніпід час таких зіткненьіонипопадають на від’ємнийколекторізумовлюють в йогоколііонний струм, щовимірюється гальванометром. В результатіцілого ряду дослідів з такими лампами, буловстановлено, що при тисках менших 10-1Па, величина іонного струму пропорційнатиску.

(3.2.3)

Провівшипопереднєградуюваннялампи, по величинііонного струму можнавизначититиск газу.

Конструкціяреальнихелектронноіонізаційнихманометрівдосить складна, боіонніструминадзвичайномалі, і для вимірювання, їхпотрібнопідсилити у тисячуразів. Як і у випадкутепловихманометрівелектронно –іонізаційнітакожявляютьсяприладаминепрямоїдії, їхпоказизалежатьвід виду газу.

### Контрольні питання

1. Тиск.
2. Способивимірювання.
3. Одиницівимірювання.
4. Видиманометрів:

а) трубчатий; б) мембранний; в) тепловий; г) іонний.

## Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ПОВІТРЯ»

**Мета роботи**: користуючисьрівнянням стану ідеального газу, експериментальновизначитигустинуповітря.

**Обладнання: с**кляна колба, посудина ізсірчаною кислотою, манометр, вакуумний насос, ваги.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Повітря при тисках близьких до нормального атмосферного та кімнатнійтемпературіможнадосить точно вважатиідеальним газом.

Нехай в колбіоб’ємом**V** при атмосферному тиску**Р** та температурі**Т**знаходитьсядеякамасаповітря**m**. СкориставшисьрівняннямМенделеєва-Клапейронамаємо:

(3.3.1)

де μ – молярнамасаповітря, R – універсальнагазова стала.

За допомогою вакуумного насоса відкачаємо з колбидеякумасуповітря∆m. При цьомутискповітря в колбі стане Р1.Вважаючипроцесвідкачкиізотермічним, для повітря, щозалишилося в колбі, можназновузаписати:

 (3.3.2)

ізспіввідношень (3.3.1) і (3.3.2) одержимо, що

відповідно для густиниповітря ρ, маємо:

(3.3.3)

В довідникахгустинаповітря в більшостівипадків приводиться для т.з. нормальних умов, тобто при Ро=1,01\*105 Па та То=273,15 К. СкориставшисьзновурівняннямМенделеєва-Клапейрона, маємо:

 та

або та

звідки:

(3.3.4)

таким чином урахувавши формулу (3.3.3) маємо

(3.3.5)

### Порядок виконання роботи

1. Відкачатиповітря з колбивакуумним насосом до максимального можливогорозрідження. Обережнонаповнити колбу сухим повітрям, пропустивши його через банку з сірчаною кислотою. Відокремити колбу і зважитиїї. Приєднати колбу до вакуумного насосу, відкачати з неїповітря до тискур1=0,1-0,5\*105 Па і зновузважити. Знайти∆m.
2. Вимірятиатмосфернийтискр та температуру Т в лабораторії. По цимданимобчислитигустинуповітря – ρо.
3. Вимірюванняповторити 3-5 разів при різних тисках. Обчислитиабсолютну і відноснупохибки. Результативимірювань та обчислень занести в таблицю:

Таблиця1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | V,  м3 | р1,  Па | m,  кг | Т,  К | ρ,  кг/м3 | ρо,  кг/м3 | ∆ρо | р,  Па | Δρо% |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

### Контрольні питання

1. Маса, густина, молярнамаса, тиск газу, абсолютна температура.
2. Газовізакони, рівняння стану ідеального газу.
3. Похибки.

## Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ ТА ЇХ ЕФЕКТИВНОГО ДІАМЕТРУ»

**Метароботи:**Експериментальновимірятикоефіцієнтвнутрішньготертяповітря, використавшиосновніформули молекулярно-кінетичноїтеоріїгазів. Визначитисереднюдовжинувільногопробігу молекул повітря та їхефективнийдіаметр.

**Обладнання:**Прилад для вимірюваннякоефіцієнтавнутрішньоготертягазів, секундомір, вимірювальний стакан, барометр, термометр.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Для газів, як і для рідин, у випадкуламінарноїтечії через капіляркористуючись формулою Пуазеля, яка визначаєоб’ємпротікаючої через капіляррідини за час τ можнавизначитикоефіцієнтвнутрішньоготертя:

(3.4.1)

звідки:

(3.4.1')

l- довжина капіляра; ∆Р- різниця тисків на кінцях капіляра, що зумовлює протікання газу; τ – час на протязі якого через капіляр проходить об’єм газу V.

Всівеличини в правійчастиніформули (3.4.1) можнавиміряти λ і таким чином обчислитикоефіцієнтвнутрішньоготертя η.

Молекулярно-кінетичнатеоріягазіввстановлюєзв’язокміжкоефіцієнтомвнутрішньоготертя газу, середньоюдовжиноювільногопробігу молекул λ та їхсередньоїшвидкості і хаотичного руху молекул - û.

(3.4.2)

де ρ - густина газу.

В свою чергу, середняшвидкість хаотичного рухугазових молекул визначаєтьсяспіввідношенням:

(3.4.3)

де R-універсальнагазова стала; Т – абсолютна температура газу; μ – молярнамаса газу.

Таким чином, знаючи û, ρ та визначившиекспериментально η за формулою (3.4.2) можнаобчислитисереднюдовжинувільногопробігугазових молекул – λ.

(3.4.4)

Густина газу (в даномувипадкуповітря) визначається при тих же умовах (Т.Р) що й η.

Вважаючиповітря при кімнатнійтемпературі Т та атмосферному тиску Р ідеальним газом, з рівнянняМенделеєва-Клапейрона:

(3.4.5)

маємо:

(3.4.6)

де μ – молярнамаса (для повітря μ=29\*103кг/моль).

Знаючиспіввідношенняміж λ та ефективнимдіаметроммолекулиd:

(3.4.7)

де δ=πd2-ефективнийперерізмолекули, n – концентрація (кількість молекул в одиниціоб’єму) газових молекул. Можна, за знайденимзначенням λ, обчислитиефективнийдіаметрмолекулиповітря.

Невідому величину nзнаходимовикориставшизначення числа Лошмідта:

no=2.69•1025м-3



Так як no – це число молекул в одиниціоб’ємуповітря при нормальнихумовах(То=273,15К, Ро=1,01•105Па (760 мм рт.ст.), а n – число молекул в одиниціоб’ємуповітря в умовахлабораторії при тискуР та температуріТ.

Скориставшисьтимщо

р=nkT (3.4.8)

Маємо Ро=nokToiP=nkT, звідки маємо

або (3.4.9)

Таким чином, виміряємо коефіцієнт в’язкості повітря η (3.4.1') і знайдемо середню довжину вільного пробігу молекули повітря λ (3.4.4) та їх ефективний діаметр d.(3.4.7, 3.4.9)

### Порядок виконання роботи

Схема установки для проведеннявимірювання представлена на Рис.3.4.1

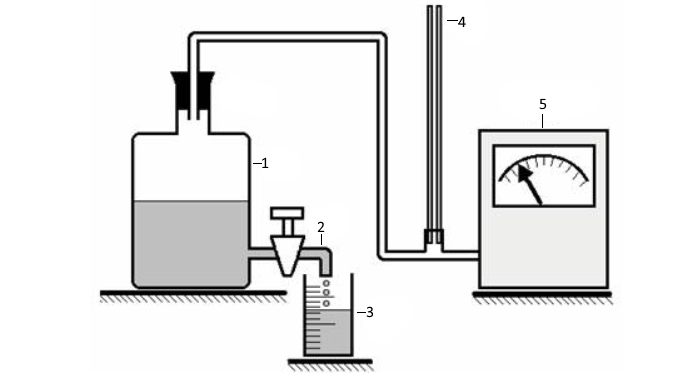


Рисунок 3.4.1.Схема установки для вимірюваннякоефіцієнтавнутрішньоготертяповітря: 1-посудина з водою; 2-кран; 3-мірний стакан; 4-капіляр;5- манометр.

1. Відкрити кран (2), вода буде виливатисявнаслідокчогоповітря буде втягуватися в посудину (1) з водою через капіляр(4).

Внаслідок того, щопропускназдатністькапілярамаєпевну величину, через деякий час установиться динамічнарівновагаміжкількістюповітря, яке проникає в посудину через капіляр(4) і кількістю води, щовиливається з посудини(1) через кран. При цьому вода буде витікатисерією капель і тискповітря в посудиніР буде меншим атмосферного Ра.Різницятисків∆Р =(Ра-Рн)виміряється манометром 5.

1. Дочекавшись такого витікання води з посудини, підставитипід кран мірний стакан і включитисекундомір. При цьомунеобхіднозаписатипокази манометра. Виміряти час Ј, протягомякоговитечеоб’єм води V=50-100см3. в кінцівимірюваннязаписатиновіпокази манометра h2. тодісереднєзначеннярізницітисків на кінцяхкапіляра∆Рбуде рівним:
   * + 1. (3.4.10)

де ρ – густинаповітря в манометрі (ρ=103кг/м3), g=9,8м/с2 – прискореннявільногопадіння. Одержанірезультатипідставити в формулу (3.4.1) і розрахуватизначення η для повітря (параметрикапіляра – r і l приведені на установці).

1. Знайшовши η, обчислити λ та d за формулами (3.4.4) та (3.4.7).

Результативимірювань та обчислень занести в таблиці:

Таблиця 1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | r,  м | L,  м | h1,  мм | h2,  мм | P, Па | V,  м3 | τ,  с | η,  Па·с | δ,  % |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Таблиця 2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | η,  Па·с | Т,  К | ρ,  кг/м3 | û,  м/с | Р,  Па | λ,  м | n,  1/м3 | d,  m |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |

### Контрольні питання

1. Внутрішнєтертя, коефіцієнттертя, довжинавільногопробігугазових молекул.
2. Суть методу вимірювання на данійустановці.

## Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИФУЗІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ В ПОВІТРІ»

**Мета роботи:** Познайомитись з одним ізметодіввизначеннякоефіцієнтадифузії. Обчислитикоефіцієнтдифузіїводяної пари в розрідженомуповітрі.

**Обладнання:** Склянийковпак з тарілкою для одержаннярозрідженогоповітря, насос Комовського, манометр, відліковиймікроскоп, посудина з кислотою, стакан з водою та скляна палочка, термометр.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Якщо в сумішігазівокремікомпонентирозподіленінерівномірно, то буде спостерігатисявзаємнепроникнення молекул одного газу в середовище молекул іншого. Цеявищеназиваютьвзаємноюабоконцентраційноюдифузією.

В лабораторнійроботідосліджуєтьсяявищедифузіїводяної пари в розрідженеповітря. Джереломводяної пари є крапля води, підвішена на дротянійстойціпідсклянимковпаком з якого насосом Комовськоговідкаченеповітря. Підковпакомзнаходитьсятакожвідкрита посудина з концентрованоюсірчаною кислотою, яка поглинаєводяні пари. Таким чином в ціломупідковпакомконцентраціяводяної пари низька. А поблизуповерхні води вона висока. В наслідокцьоговідбуваєтьсядифузіяводяної пари повітря в різні боки відповерхнікраплі. В результатірівновагаміжрідиною і паром білякраплі буде порушуватися, щопризводить до випаровування води і зменшенняоб’ємукраплі. На протязі коротких проміжків часу спостереженьціпроцесиможнавважатилінійними і внаслідокцьогоїхможнадосить легко розрахувати.

За законом Фіка для дифузіїможназаписати:

(3.5.1)

де dm– масаречовинищопродифузіювала за час dt, вздовжосіх, градієнтгустиниdρ/dx нормально до площадки ∆S, D – коефіцієнтдифузії.

Якщонавколоводяноїкраплівиділитисферичнуповерхню будь-якогорадіусах, то масаречовини, щопродифунувала за одиницю часу через поверхню∆S=4πx2,буде сталою.

(3.5.2)

безпосередньобіляповерхнікрапліводяна пара буде насиченою і їїгустина ρ при данійтемпературі буде також величиною сталою. Таким чином густинаводяної пари буде змінюватисявідρо. При х=Rкр до 0 при х - ∞.

Вважаючиградієнтгустиниdρ/dxвеличиною сталою, можна в рівнянні (3.5.2) зробитиперетворення і отримати:

(3.5.3)

Інтегруємовираз (3.5.3) в межах відRкрап=R до **∞**, та ρ=ρо до 0маємо:

(3.5.4)

або

(3.5.5)

таким чином:

(3.5.6)

з другого боку, масаводяної пари, щодифундує, можнавизначити по зменшенніоб’ємукрапліV (внаслідоквипаровування):

(3.5.7)

де ρ – густинакраплі, V=4/3πR2, то:

(3.5.8)

маємо:

(3.5.9)

підставившивираз (3.5.9) в формулу (3.5.6), отримаємо:

(3.5.10)

або

(3.5.11)

Проінтегрувавшицейвиразотримаємо:

(3.5.12)

або

(3.5.13)

Таким чином, шукаютькоефіцієнтдифузії:

(3.5.14)

де ∆t=t2-t1 – час на протязіякогорадіускраплізмінюєтьсявідR1 до R2.

### Порядок виконання роботи

1. На тарілціпідсклянимковпаком на дротянійстійціпідвіситикраплю води. Сюди ж поставити посудину з сірчаною кислотою. Обережнопоставитиковпак і відкачати з підньогоповітря до тиску0,2-0,4атм. Післяцьогозакрити кран, що з’єднуєковпак з насосом.
2. Зфокосувативідліковиймікроскоп на краплю воду і визначитиїїрадіусR1. Вимірюванняповторити через деякийпроміжок часу ∆t (∆t – зручнішевибирати такими, за якимидіаметркраплізмінюється на одну поділкумікроскопа). Результати занести в таблицю.

Таблиця 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № п/п | ∆t, с | R2,м | D, м2/с |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

Згідноформули (3.5.14) графіком(15) повинна бути пряма лінія, де тангенс:

звідки:

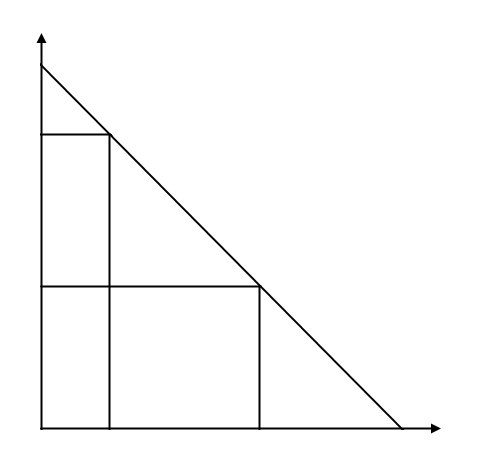


Рисунок 3.5.1.ЗалежністьR2відt.

Значенняρо – густининасиченої пари знайти в таблиці, вимірявши температуру повітря в кімнаті.

Таблиця 1.

|  |  |
| --- | --- |
| to,C |  |
| ρ,г/см2 |  |

1. Визначити температуру повітря в лабораторії. Скориставшись таблицею, знайтизначеннягустининасиченоїводяної пари ρо для даноїтемператури.

### Контрольні питання

1. Явище переносу. ЗакониФіка, Фур’є, Н’ютона.
2. Коефіцієнтдифузії.
3. Вивестиробочу формулу для коефіцієнтадифузії.

## Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІПОВІТРЯ»

**Мета роботи**: визначитиабсолютну та відноснувологість методом гігрометра та психрометра.

**Обладнання**: гігрометр Ламбрехта, психрометр, ефір, термометр.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Атмосферне повітря має в своєму складі деяку кількість водяної пари, що обумовлює вологість повітря. Кількістьводяної пари в повітрі при данихумоваххарактеризується абсолютною та відносноювологістю.

Абсолютна вологістьцекількістьводяної пари, щознаходиться в одиниціоб'ємуповітря. Як правило їївиражають в г/м3.

З рівняння стану ідеального газу густинуповітря при нормальнихумовахможнапредставити так:

(3.6.1)

(позначеннязагальноприйняті).

Аналогічно для густиниводяної пари, далекоївіднасичення, при будь-якихтиску і температурімаємо:

(3.6.2)

З (3.6.1) та (3.6.2) маємо

звідки

(3.6.3)

Враховуючи, , а густина повітря при нормальних умовах , одержимо

(3.6.4)

якщоPвимірювати у мм ртутного стовпа. В формулі (3.6.4) α=1/273K, t - температура в ºС.

З (3.6.4), кількістьводяної пари m у грамах в одному м3,тобто абсолютна вологість, виражається:

(3.6.5)

Формула (3.6.5) дає змогу визначити абсолютну вологість повітря, якщо відома пружність (парціальний тиск) водяної пари P. З цієї формули також видно, що при малих значеннях t величина абсолютної вологості m практично пропорційна парціальному тискові водяної пари P, виміряної в мм рт. ст. Тому, на практицінайчастіше абсолютна вологістьвизначається не за кількістюводяної пари m в грамах, щоміститься в 1 м3повітря, а за їїпружністю (парціальномутиску) P, вираженою в мм рт. ст.

**Відноснавологість**характеризуєступіньнасиченняповітря парою. Відносноювологістюrназиваєтьсявідношенняабсолютноївологості m до кількості пари μв 1 м3, яка насичуєповітря при данійтемпературі t:

(3.6.6)

Беручи до увагинаведеневище, можемозаписати:

(3.6.7)

де Pt – парціальнийтискнасиченоїводяної пари при температурі t. Відноснувологістьзвичайновиражаютьв процентаху відсотках.

Отже, відноснувологістьможназмінювати, абозмінюючичисельниквиразу (3.6.6), абознаменник. Якщо температуру у кімнатізбільшувати, то μ буде такожзбільшуватися, отжевідноснавологістьзменшиться.

Вологістьповітрявизначається за допомогою психрометра, абогігрометра (з використаннямвідповіднихтаблиць).

**Частина 1. Визначенняабсолютної і відносноївологості методом точки роси за допомогоюгігрометра.**

Точкою росиназивається температура, при якійводяна пара, що є в повітрі, стаєнасиченою, тобтопочинаєконденсуватися.

Гігрометр (рис. 3.6.1) складається з металевоїпосудини А, закріпленої на підставці. Одна сторона посудиниполірована і оточена такою ж полірованоюрамкою В, щоізольованавід резервуара А. Для охолодженнярезервуара в ньогоналиваютьневеликукількістьефіру и за допомогоюгумовоїгрушіпропускають через ефірповітря. При достатньомуохолодженні, коли температура в резервуарі А і температура прилеглого до нього шару повітрядосягне точки роси, на відполірованійстороні резервуара почнез'являтися роса з водяної пари оточуючогоповітря. При цьомувиникаєпотускнінняполірованоїповерхнігігрометра в порівнянні з рамкою. Температуру t', при якійвиникаєпотускніннявизначаютьпо термометру, щовставляється в резервуар А. Післяприпинення прокачки повітря, знаходятьтемпературу t", при якій роса зникає. За точку росиtPприймаютьсереднєзначення з одержаних величин.

Рисунок 3.6.1. Гігрометр

Користуючись таблицею 1, за точкою росивизначаютьтискнасиченоїводяної пари при tр, тобтотискненасиченоїводяної пари при кімнатнійтемпературі, абоабсолютнувологість. За цією ж таблицею визначаютьтискнасиченоїводяної парипри кімнатнійтемпературі і за формулою (3.6.7) розраховуютьвідноснувологість.

Таблиця 1. Пружність та густинанасиченоїводяної пари

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| toC | Pt,  мм.рт.ст. | m2  г/м3 | toC | Pt,  мм.рт.ст. | m2  г/м3 | toC | Pt,  мм.рт.ст. | m2  г/м3 |
| 0 | 4,58 | 4,84 | 11 | 9,84 | 10,0 | 22 | 19,83 | 19,4 |
| 1 | 4,93 | 5,22 | 12 | 10,52 | 10,7 | 23 | 21,07 | 20,6 |
| 2 | 5,29 | 5,60 | 13 | 11,23 | 11,4 | 24 | 22,38 | 21,3 |
| 3 | 5,60 | 5,98 | 14 | 11,99 | 12,1 | 25 | 23,76 | 23,0 |
| 4 | 6,10 | 6,40 | 15 | 12,79 | 12,8 | 26 | 25,21 | 24,4 |
| 5 | 6,54 | 6,84 | 16 | 13,63 | 13,6 | 27 | 26,74 | 25,8 |
| 6 | 7,01 | 7,30 | 17 | 14,53 | 14,5 | 28 | 28,35 | 27,2 |
| 7 | 7,51 | 7,80 | 18 | 15,48 | 15,4 | 29 | 30,04 | 28,7 |
| 8 | 8,05 | 8,30 | 19 | 16,48 | 16,3 | 30 | 31,82 | 30,3 |
| 9 | 8,61 | 8,80 | 20 | 17,54 | 17,3 |  |  |  |
| 10 | 9,21 | 9,40 | 21 | 18,65 | 18,3 |  |  |  |

**Частина ІІ. Визначенняабсолютної і відносноївологостіповітря за допомогою психрометра.**

Психрометр є найбільшпоширений приклад для визначеннявологостіповітря.

Рисунок 3.6.2. Психометр

Якщо два однаковихтермометризнаходяться в однакових потоках повітря, показицихтермометрівповинні бути однаковими. Якщо ж балончик одного з термометрів буде весь час зволоженим, наприклад, обгорнутий мокрою тканиною, то показитермометрівбудутьрізними. Завдякивипаровуванню води з тканини так званий "мокрий" термометр буде показуватибільш низку температуру, ніжсухий. Чим меншавологістьоточуючогоповітря, тимінтенсивнішим буде випаровування і тимнижчимибудутьпокази "мокрого" термометра. Різниця температур, вимірянацими термометрами, буде характеризувативологістьповітря.

За законом тепловіддачі Ньютона кількістьтеплоти Q1, яка виділяється в оточуючесередовище через поверхнюсистеми S1 за одиницю часу виражається так:

, (3.6.8)

де α - так званий коефіцієнттепловіддачісистеми, t - температура системи, t1 - температура оточуючогосередовища. В методі психрометра (t -t1) - це максимальна різниця температур сухого і мокрого термометрів.

З другого боку, масу води, щовипаровується за одиницю часу, можнапредставити за формулою Дальтона так:

,

де S2 - площаповерхні, з якоївідбуваєтьсявипаровування, Н - тискповітря, Pн - пружністьнасиченоїводяної пари при температурірідини, щовипаровується, тобто при температурі t1, P - пружністьводяної пари, щознаходиться в повітрі, k - коефіцієнтпропорціональності, щозалежитьвідшвидкості потоку повітря.

Кількістьтеплоти Q2, яка йде на випаровуваннямаси m води, очевидно виражається так:

(3.6.9)

де λ - питома теплота пароутворення води. При стаціонарномурежимі, тобто при незмінних температурах t і t1, Q1 = Q2. Враховуючи, що S1 = S2, з (3.6.8) та (3.6.9) одержимо

звідки

, (3.6.10)

де стала системи. Величина цієїсталоїзалежить, в основному відшвидкості потоку повітря и знаходитьсяекспериментально.

**Опис психрометра і виміри.**

Будову стандартного аспіраційного психрометра показано на рис. 3.6.2. Вінскладається з двохтермометрів А. Балончик правого термометра огорнутий тканиною. Аспіратор психрометра маєелектричний вентилятор. Шлях повітрянихпотоків в приладі показаний стрілками. Над балонамитермометрівобидва потоки з'єднуються в один.

Змочуваннятканини термометра проводять за допомогоюгумовоїгруші G з піпеткою u (рис. 3.6.1). Грушу наповнюютьдистильованою водою. Невеликим натиском груші воду в піпетціпіднімають, але не вищеніж на 1 см відкінцяпіпетки. Такеположеннярівняфіксуєтьсязатискачем F. Піпеткаобережно вводиться в трубку з термометром для зволоженнятканини. Післяцьогозатискачвідкривають, щоб вода опустилась в грушу. Вмикають вентилятор психрометра іпочинаютьслідкувати за показами термометрів. Через 4 - 5 хвилинпоказитермометріввстановлюються, і різниця t - t1може бути виміряна.

Абсолютна вологість по стандартному психрометру визначається за формулою (3.6.10), при сталійданого прикладу А = 0,0006 град-1. Величину pн, що входить в формулу (3.6.10)знаходять по таблиці 1, а атмосфернийтисквимірюють барометром. Якщо з таблиці 1 знайтитакожтискнасиченоїводяної пари при температуріоточуючогоповітря t, то по формулі(3.6.7)можнарозрахувативідноснувологість r.

За психрометричноюрізницею t - t1відноснувологістьможнавизначититакож, користуючись таблицею 2 . В ційтаблиці наводиться відноснавологість в залежностівідтемпературиоточуючогосередовища t і різниці t - t1.

Таблиця 2. Психометричнатаблицявідносноївологостіповітря, %.

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

### Порядок виконання роботи

1. За описомчастини 1 провести вимірювання точки роси та визначитиабсолютну та відноснувологістьповітря.
2. За описомчастини 2 провести вимірювання температур сухого та „мокрого” термометрів та розрахуватиабсолютну та відноснувологість за формулою (10) та використовуючитаблицю 2.

**Примітка**: Вимірювання в пунктах 1 та 2 проводити 3-4 рази. Кінцевірезультатиодержувати за середнімивимірами.

### Контрольні питання

1. Щотакеявищевологість?

2. Щоназивається абсолютною вологістю?

3. На підставічогоабсолютнувологістьможнавимірюватипарціальнимтиском?

4. Щоназиваєвідносноювологістю?

5. Як можназмінювативологістьповітря у кімнаті?

6. В чомуполягаєвизначеннявологості методом точки роси?

7. В чомуполягаєвизначеннявологості методом психрометра?

8. Яківеличинивходять у розрахункову формулу (3.6.10)?

## Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ БОЛЬЦМАНА»

**Мета роботи:** визначити експериментально сталу Больцмана й обчислити універсальну газову сталу.

**Обладнання:** 1) термостатованийсклянийбалонмісткістю15—20 л; 2) медичний шприц на 1—2 см3; 3) лабораторний термометр; 4) U-noдібнийводяний манометр; 5) ефір.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Виходячи з молекулярно-кінетичноготлумаченняпоняттятемператури, їїслідвимірювати в одиницяхенергії. Протецедуженезручно на практиці (необхідністьоперуватидоситьмалими числами: сама процедура вимірювання при цьомузначноутруднюється). Множник к, якийвиражаєспіввідношенняміжодиницямиенергіїта температури (кельвіном), називаютьсталою Больцмана. Їїчисловезначеннявимірюєтьсяекспериментальнорізними методами. Стала Больцмана фігурує в усіх законах, якімістятькласичніабоквантовіфункціїрозподілучастинокза енергіями. Найточнішезначеннясталої Больцманадістаємо з рівності,

де R — універсальнагазовастала; Na — число Авогадро.

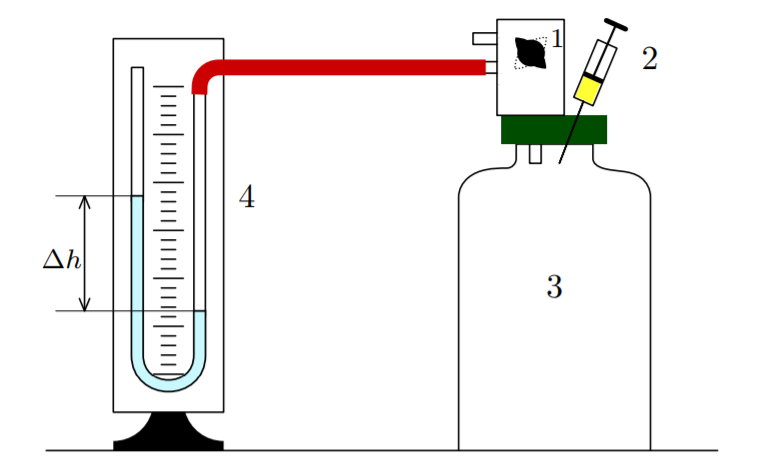


Рисунок3.7.1. Загальна схема установки для визначення сталої Больцмана: 1- кран; 2- шприц; 3- балон об’ємом V; 4- манометр.

В роботівизначеннясталої Больцмана ґрунтуєтьсяна використаннірівняннястану ідеального газу Менделєєва — Клапейрона.

Прилад для визначеннясталої Больцмана k (рис. 3.7.1)складовимичастинамимаєсклянийтовстостіннийбалон(3), щоз'єднується через вивіднугумову трубку з рідинним манометром (4). В корку балоназакріп­леномедичнуголку(2) для введення через неї шприцом рідини, щолегковипаровується (ефір). Післявведенняефіру в балоні створиться надвишоктиску на величину парціальноготискуΔргазоподібногоефіру. Величину Δрвизначають манометром.

В основу дослідноговизначеннясталої Больцмана покладенорівняння стану ідеального газу , з якого дістаємо

(3.7.1)

де — число молів введеного в балон ефіру; V — заданий робочий об'єм балона; — кількість молекул ефіру в одиниціоб'єму балона; Т — температура газової суміші в балоні (для ефіру μ=76 кг/моль).

Парціальний тиск парів ефіру в балоні визначається різницею рівнів стовпчиків рідини Δһ в манометрі:

(3.7.2)

де ρ — густинаманометричноїрідини (задається наперед при від­повідних температурах досліду).

Noможнавизначитиізспіввідношення, де m0 — масамолекулиефіру. З іншого боку, , де ре —густинаефіру (ре=714 кг/м3); Ve — об'ємвведеногоефіру. ТеперVeмаємо:

(3.7.3)

Підставивши (3.7.2) і (3.7.3) в (3.7.1), дістаємо

, де — сталий в умовах досліду коефіцієнт.

### Порядок виконання роботи

1. Забезпечитинадійнетермостатуваннябалонапрозоримтеплозахиснимекраном.
2. Наповнитимедичний шприц з голкою одним-двомакубічними сантиметрами ефіру. Зняти з шприца голку і вставитийого в голку(2)балона; при цьомурівніманометричноїрідини в колінахманометра повинні бути однаковими.
3. Натискуючи на поршень шприца, ввести н балонефіроб'ємомVe; для збереженнягерметизаціїзалишити шприц у голці(2).
4. Післявипаровуванняефірузафіксуватистабільнурізницюрівніврідини в колінах манометра Δһ при відповіднійтемпературі.
5. Дослідповторити 3—5 разів, кожний раз дозуючирізніоб'ємиефіру, який вводиться в балон.
6. Знайденесереднєзначення величин kпорівняти з табличним.
7. Зробитивисновкивідносно методики та результатіввимірювань.

### Контрольні питання

1. Який фізичний зміст універсальної газової сталої?
2. Опишітьвідомі Вам методивизначеннясталої Больцмана.
3. Наведітьзакони, в якихфігурує стала Больцмана.
4. Якіджерелапохибок в ційроботі?

## Лабораторна робота №3.8

Частина 1.

**Визначення Ср/Сv по швидкості звуку в повітрі**

**Мета**

**Обладнання:**Звуковий генератор, електроннийосцилограф, мікрофон,телефон, вимірювальна лава.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Поширеннязвуковоїхвилі в газіпроходитьідіабатно. Стиснення і розрідження в газізмінюютьодненастількишвидко, щотеплообмінміж слоями газу, щомаютьрізнітемператури не встигаєвідбутися. ТакіпроцесиописуєрівнянняПуасона:

(3.8.1)

Швидкістьпоширеннязвуковоїхвилі в газізалежитьвідпоказникаадіабату γ. На вимірюванішвидкості звуку оснований один з найбільшточнихметодіввизначенняпоказникаадіабату.

Швидкість звуку в газах визначається за формулою:

(3.8.2)

де R – газова стала, Т – температура газу, μ – йогомолярнамаса. Звідкиотримаємо:

(3.8.3)

Таким чином, для визначенняпоказникаадіабатудостатньовиміряти температуру газу і швидкістьпоширення звуку.

В стоячійхвилізміщенняколиваньдвохточок, щознаходяться на відстаніl друг від друга, і здвинуті по фазі на:

(3.8.4)

де с – швидкістьпоширенняхвиль в упругому середовищі, ν,λ – частота і довжинахвилі.

Вираз (3.8.4) може бути використано для експериментальноговизначенняшвидкості звука в повітрі по вимірянимзначенням величин φ,ν,l.

Описекспериментальної установки:

Гучномовець Г – джерелозвуковиххвиль, живиться від звукового генератора ЗГ. Звуковахвиля, досягшимікрофона М породжує в йогоколізмінний струм. Міжзмінноюнапругою на виході звукового генератора і напругою в колімікрофонавиникаєздвиг фаз, щозалежитьвідвзаємногорозміщеннямікрофона і гучномовця. При переміщеннімікрофона по вимірювальнійлаві на відстаньl=λn, включаючиціле число хвиль, різниця фаз змінюється на 2πn.

Здвиг фаз ∆φ визначається по форміеліпса, описуваного на екраніосцилографаелектроннимпроменем, якщовертикальніпластиниосцилографаз’єднати з виходом звукового генератора, а горизонтальні з мікрофоном. Так при різниці фаз φ=2πnеліпсвироджується в пряму, що проходить черезпершу і третючверті, а при φ=π(2n+1) – в пряму, що проходить через другу і четвертучверті.

### Порядок виконанняроботи

Зібравелектричну схему приладу, телефон і мікрофонрозміщують у краю вимірювальноїлави і подаютьнапругу. Повільнопереміщуютьмікрофон до протилежногокінцявимірювальноїлави, відмічаючиположеннямікрофона, при якомуспостерігається пряма лінія. Продовжуючипереміщатимікрофон, рахують число nповторнихпоявтакоїжпрямої на екраніосцилографа.

Кожнеповторенняпочатковоїкартинивідповідаєзмінірізниці фаз на 2π радіан. Змінюючипереміщеннямікрофонаl при nповторенняхкартини на екраніосцилографа і використовуючирівняння (3.8.4), знаходятьшвидкість звуку – с (значення ν відраховують по шкалі генератора).

Для порівнянняотриманого результату з табличнимиданимиобчислюютьшвидкість с при умовахдосліду, користуючисьспіввідношенням:

(3.8.5)

де Θ – температура повітря в кімнаті (кельвін), со – швидкістьповітря при 0оС (з таблиці).по отриманимданимшвидкості звуку в повітрівизначаютьпоказникадіабати γ, використовуючи формулу (3.8.3).

### Контрольні питання

1. Адіабатнийпроцес, рівнянняадіабати.

2. Робота в адіабатномупроцесі.

3. Отримати формулу, щопов’язуєшвидкість звуку з показникомадіабату.

**Частина 2.**

**ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЭМНОСТЕЙ ГАЗІВ  
 МЕТОДОМ КЛЕМАНА - ДЕЗОРМА**

**Мета роботи:**Визначитивідношеннятеплоэмностей при постійномутиску Ср і постійномуоб'єміСvдля повітря.

**Обладнання**: склянийбалон, U-образнийводяний манометр.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

1. **Ступенівільності**

Класичнатеоріятеплоємностейгазівбуларозроблена Больцманом і Максвеллом. В основу теоріїпокладена теорема про рівномірнийрозподілкінетичноїенергії за ступенями вільності, яка зтверджує: якщо система молекул перебуває в тепловійрівновазі при температурі Т, то середнякінетичнаенергіярівномірнорозподіляєтьсяміжвсімаступенями вільностімолекули й для кожноїступенівільності вона дорівнюєкТ/2 (к = 1,38 10-23 Дж/К - постійна Больцмана). Звідсивипливає, щообчисленняенергіїмолекули газу, а отже, і визначенняйоготеплоємності, зводиться до визначення числа ступеніввільностігазовоїмолекули.

Числом ступеніввільностімеханічноїсистеминазивається число незалежнихзмінних (координат), що однозначно визначаєїїположення й конфігурацію у просторі.

Матеріальна точка, щорухається у просторімає три ступенівільності (їїкоординати, x, y, z). При переміщенніцієї точки по поверхні число їїступеніввільностідорівнюєдвом, а уздовжпевногонапрямку - однієї.



Рис.3.8.112ю.ю

Молекула, щоскладаєтьсяіздвохатомів, зв'язаних твердим зв'язком L, володієп'ятьома ступенями вільності. Дійсно, із шести координат, щовизначаютьположеннядвохатомів у просторі - п'ятьвиявляютьсянезалежними, а шоставизначається з рівняння

Триступенівільності з п'яти тут зв'язуютьізпоступальнимрухом, а дві з обертальнимрухоммолекулищодо осей ox і oy (Рис. 3.8.1) (обертаннянавколоосі, що проходить через обидваатоми, позбавленозмісту при не дужевисоких температурах). Трьох і більшеатомнімолекулимаютьшістьступеніввільності - три зв'язують з поступальнимрухом центра мас, і три зв'язуютьізобертальнимрухомщодо осей ох, оy, oz.

1. **Внутрішняенергія**

Важливою характеристикою термодинамічноїсистеми є її**внутрішняенергія** U - енергія хаотичного (теплового) рухумікрочастиноксистеми (молекул, атомів, електронів і т.д.) і енергіявзаємодіїцихчасток. Залежновід характеру руху й взаємодіїмікрочастиноксистеми, внутрішняенергіямістить у собі:

1. кінетичнуенергію хаотичного рухумікрочастинок (наприклад, молекул газу);
2. потенціальнуенергіювзаємодіїміж молекулами;
3. кінетичну й потенціальнуенергіюколивальногорухуатомів у молекулах;
4. внутрішньоатомн.у енергію.

У багатьох фізичних явищах, розглянутих на рівні молекулярної фізики, внутрішньоатомна енергія не змінюється й тому, визначаючи внутрішню енергію U з точністю до константи, її можна не враховувати.

Внутрішняенергія - однозначна функція стану термодинамічноїсистеми, тобто в кожному стані система маєцілкомпевнезначеннявнутрішньоїенергії. У термодинаміціінтересмає не сама внутрішняенергія U системи, а їїзмінаdU, щоспостерігається при переходітермодинамічноїсистеми з одного стану в інший, до того ж цязміназавждидорівнюєрізницізначеньвнутрішньоїенергії в цих станах

, (3.8.6)

незалежновід виду процесу, у результатіякоговідбувавсяперехід. Це значить, що у випадку кругового процесузмінавнутрішньоїенергіїдорівнює нулю:

Виконанняцієїрівностіозначає, що U є функцією стану системи (U=f(V,T)), а dU є повнимдиференціаломфункції U і можерозглядатися як збільшеннявнутрішньоїенергії при переходісистеми з одного стану в інший.

Якщо число ступеніввільностімолекули i, то їїсередняенергіядорівнює (КТ/2) ∙ i, а внутрішняенергія одного моля ідеального газу (молекулиміж собою не взаємодіють) буде дорівнюєдобутку числа Авогадро NА на середнюенергіюоднієїмолекули:

(3.8.7) Внутрішняенергіядовільноїмаси m буде дорівнюєвнутрішньоїенергії одного моля, помноженої на число молів газу ν = , щовтримуються в масі m:

, (3.8.8)

де μ - молярна маса газу.

Внутрішня енергія термодинамічної системи може бути збільшена за рахунок двох процесів: здійснення над системою роботи (-δА) і підведення до неї кількості тепла (δQ).

dU = δQ + (-δА) (3.8.9)

Прийнято вважати, що δQ> 0, якщо тепло передається розглянутій системі, і δQ< 0, якщо система віддає тепло навколишньому середовищу.

Якщо сама система виконує роботу, то δА> 0, і δА<0, якщозовнішнісиливиконують роботу над розглянутою системою.

Рівняння (3.8.9) можнапредставити у вигляді

δQ = dU + δА (3.8.10)

Воно являє собою зміст першого закону (началу) термодинаміки для елементарного термодинамічного процесу: кількість тепла, що надається системі, іде на збільшення внутрішньої енергії системи й на виконання нею роботи.

Для кінцевоготермодинамічногопроцесу переходу системизі стану 1 у стан 2:

Q12 = (U2 - U1) + A12 (3.8.11)

Вираз для елементарноїроботисистемимаєвигляд:

δА = рdv, (3.8.12)

де dv - змінаоб'ємусистеми, р - тиск. Повна робота системи при кінцевихзмінахїїоб'єму, обчислюється як сума елементарнихробіт, тобто

А12 = рdv (3.8.13)

На відміну від внутрішньої енергії теплота Q, отримана системою, і виконана нею робота А залежать не тільки від початкового й кінцевого станів системи, але й від характеру процесу переходу термодинамічної системи з одного стану в інший (ізотермічно, ізобарично, ізохорично, адиабатично, і т.д.).

1. **Теплоємністьідеального газу**

Теплоємністюсистеми (тіла) називаєтьсяфізична величина, рівнакількостітеплоти, яку потрібнонадатисистемі, щобпідвищитиїї температуру на один Кельвін (К):

С= δQ / dТ, (3.8.14)

де δQ – наданасистемікількістьтеплоти, dТ – змінатемпературисистеми.

Теплоємністьодиницімасиречовининазиваєтьсяпитомоютеплоємністю Суд:

Суд = = δQ / mdТ (3.8.15)

Одиниця вимірювання питомої теплоємності - Дж/кг К (джоуль на кілограм - кельвін).

Теплоємність моля речовининазивається молярною теплоємністю См:

См  = δQ / νdТ

Одиниця вимірювання молярної теплоємності - Дж/моль K (джоуль на моль - кельвін).

Між молярною та питомоютеплоємністямиречовини є очевиднеспіввідношення:

См = Судμ (3.8.16)

Теплоємність залежить від роду речовини, виду термодинамічного процесу при якому вимірюєтся теплоємність і температури. Ці твердження вимагають короткого пояснення:

1. Дійсно, при всіх інших рівних умовах, теплоємності реальних систем різні. Наприклад, добре відомо, що вода має дуже велику теплоємність, тому її часто використовують як охолоджуючу рідину або як теплоносій.
2. При експериментальному визначенні теплоємності, системі треба передати певну кількість теплоти та виміряти при цьому, на скільки змінилася її температура . Оскільки кількість теплоти, передана термодинамічній системі для досягнення однієї й тої ж різниці температур залежить від характеру процесу, то й теплоємність тіла визначається цим процесом. Тому теплоємність тієї самої речовини різна при різних процесах переходу її в новий стан, отже теплоємність, не можна вважати характеристикою тільки самої речовини. Про теплоємність має сенс говорити тільки у зв'язку з конкретним термодинамічним процесом.
3. Експериментальні дослідження показують, що зі збільшенням температури теплоємність речовини зростає. Це значить, що при всіх інших рівних умовах нагрівання системи , наприклад, від 100 градусів до 101 вимагає більшої кількості теплоти, ніж нагрівання її від 20 градусів до 21. У класичній теорії теплоємності ця залежність відсутня, що є недоліком цієї теорії.

Найбільшийпрактичнийінтереспредставляєтеплоємність для випадків, коли нагріваннявідбувається при постійномуоб'ємі (изохоричнийпроцес, СV) або при постійномутиску (ізобаричнийпроцес, СР).

Нехай газ нагрівається при постійномуоб'ємі. Тодімолярнатеплоємність:

СV = δQ / νdТ (3.8.17)

Оскільки при изохоричному процесі (V = const) газ не виконує роботи над зовнішніми тілами (dА = 0), тa, згідно I закону термодинаміки (3.8.10), уся надана газу кількість теплоти йде тільки на збільшення його внутрішньої енергії: dQ = dU.

Отже,

СV = (3.8.18)

Оскільки внутрішня енергія ідеального газу (молекули між собою не взаємодіють) є лише функцією його температури й не залежить від його об'єму, тo, поклавши ν = 1 і продиференцювавши рівняння (3.8.7) dU = RdT, одержимо для СVнаступний вираз:

СV = (3.8.19)

Якщо нагрівання газу відбувається при постійному тиску, то підведене до газу кількість теплоти витрачається в цьому випадку не тільки на збільшення його внутрішньої енергії, але й на роботу dА, чинену газом над зовнішніми тілами (проти зовнішніх сил). Отже,

Сp= (3.8.20)

Продиференццювавши рівняння Менделєєва - Клапейрона при Р = const, одержимо:

P d = ν R d (3.8.21)

C урахуванням (3.8.21) рівняння (3.8.20) запишеться:

СР = СV + R (3.8.22)

Використовуючи (3.8.19), вираз (3.8.22) (рівняння Майера) можназаписати у вигляді:

СP = (3.8.23)

Поділивши (3.8.23) на (3.8.19), знайдемокоефіцієнт Пуассона:

 = (3.8.24)

Як випливає з (3.8.24), величина γ визначаєтьсятільки числом ступеніввільності молекул.

Знаючи γ, можнавизначити число ступеніввільності молекул; він входить у рівняння, щоописуєадіабатичну (без теплообмінуіззовнішнімсередовищем) змінуоб'єму газу:

PVγ = const ;TVγ-1 = const (3.8.25)

Нарешті, їм визначається швидкість поширення звуку в газах:

v =

Опис установки i методу визначення коефіцієнта Пуассона

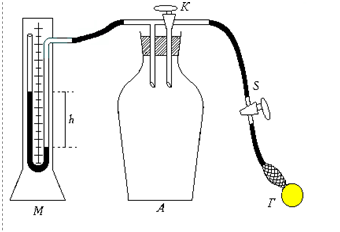
Установка для визначення γ складається з великої товстостінної посудини А (рис.3.8.2), яка з’єднується гумовою трубкою з відкритим рідинним манометром М. За допомогою крана К посудина може з'єднатися з атмосферою; другий кран S з'єднує посудину із грушеюГ.

Рисунок 3.8.2. Схема установки для визначення коефіцієнта Пуассона:А - скляна посудина; М - манометр; К, S - крани; Г - гумова груша.

Розглянемо термодинамічні процеси, що відбуваються з газом у ході досліду. Нехай первісний тиск повітря в посудині, об'єм якого V1, дорівнює атмосферному тиску Р1, а його температура дорівнює температурі навколишнього середовища Т1. Представимо цей стан на діаграмі в координатах Р-V точкою I (рис. 3.8.3).

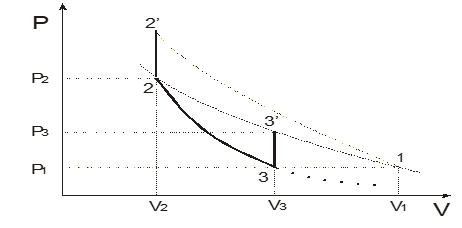
Збільшимотиск, накачавши в посудину А за допомогоюгрушідодатковоневеликукількістьповітря. Процес (1 - 2′) - адіабатичний. Первіснамасаповітряmo, щозаймала в стані 1 всю посудину, теперстиснеться й займе об'єм V2 (стан 2′). Стан 2′нестійкий, тому що температура повітря в посудинізавдякитеплопровідностістінок буде зменшуватися до кімнатної. Цейпроцесохолодження буде ізохоричним (2′→2) Новийстійкий стан 2 відповідаєкімнатнійтемпературі Т1 і тиску Р2:

Рисунок 3.8.3

Р2 = Р1 + ρgh1, (3.8.26)

де ρ - густинарідини в манометрі, h1 - різницярівнів у колінах манометра післяізохоричногоохолодження.

Відкривши кран К, надамоможливістьповітрю в посудинірозширитися до атмосферного тиску Р1 (2 - 3′). Якщоотвір у кранідосить великий, то вирівнюваннятисківвідбуваєтьсянастількишвидко, щорозширенняможнавважатиадіабатичним. У результаті стан повітря в посудині (3) буде характеризуватисятиском P1 і температурою Т3< Т1внаслідокохолодженняповітря при адіабатичномурозширенні.

Якщотепер по досягненні атмосферного тиску (стан 3) закрити кран K, то внаслідокізохоричногонагріванняповітрявідтемператури Т3 до первісноїтемператури Т1тиск у посудинізростевід Р1 до Р3 (процес 3 – 3’).

Р3 = Р1 + ρgh2, (3.8.27)

де h2 - різницярівнів у колінах манометра післяізохоричногонагрівання до кімнатноїтемператури.

У результаті здійснення досліду, стани повітря в посудині, що відповідають точкам 1, 3 і 2 характеризуються однаковою температурою Т1, тобто пунктирна крива (1 – 3 - 2) - ізотерма.

Відповідно до сказаного, рівняння, щозв'язуютьпараметри стану в різнихпроцесах, маютьвигляд:

Р2V2 = P3V3 - ізотерма - ( 2-3)

P2 = P1V3γ - адіабата - (2 -3’)

Звідси:

 =  (3.8.28)

 (3.8.29)

Поділившиобидвічастиницієїрівності на  одержимо:

 (3.8.30)

З урахуванням формул (3.8.26) і (3.8.27) останнярівністьперепишеться у вигляді:

 (3.8.31)

Оскількинадлишкові тиски ρgh1 і ρgh2малі в порівнянні з атмосфернимтиском P1, то, розклавшиобидвадвочлени в рівності (3.8.31) у ряд і зневажаючи членами другого порядку малості, одержимо:

\* (3.8.32)

Звідсизнайдемо γ:  (3.8.33)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

\* 

Видно, що для визначення γ необхідно знати надлишковий (над атмосферним) тиск у балоні до адіабатичного розширення газу і його надлишковий тиск після ізохоричного нагрівання. Обидві ці величини повинні вимірятися в стані термодинамічної рівноваги, тобто після припинення теплообміну.

### Порядок виконання роботи

1. Закрити кран К і за допомогоюгруші Г накачатиповітря в посудину А. Коли різницярівнів у манометрідосягне 20-25 см, закрити кран S. Нагнітанняповітряпотрібноробитидужеакуратно, увесь час стежачи за тим, щобрідина не булавикинута з манометра.
2. Почекати, поки температура усерединіпосудини стане рівноютемпературінавколишньогосередовища. Цевідбувається за 3-5 хв., коли різницярівніврідини у манометріперестанемінятися (стан 2), виміряти h1.
3. Відкрити на короткий проміжок часу кран К, щоз’єднує посудину А с атмосферою. Зачас, протягомякого кран Kвідкритий, тиск у посудинізрівняється з атмосферним, а температура повітрязнизиться. Тому кран потрібнозакривативідразу ж, як тількиприпинитьсяшипінняповітря.
4. Після того, як тиск у посудинізновувстановиться, за рахунокпідвищеннятемпературі до температуринавколишньогосередовища, (стан 3), виміряти h2.
5. По знайденим h1 і h2розрахуватиγ по формулі (27).
6. Відкрити кран К на такий час, щобвсіпараметри газу прийняливихіднізначення (стан 1). Повторитидослід 7 - 8 разів, знайти γ і провести статистичнуобробкурезультатіввимірів.

### Контрольні питання

1. Поясніть, що такеступенівільності.
2. Скількиступеніввільностімає :

а) матеріальна точка;

б) абсолютно твердетіло;

в) одно-, двох-, трьох-, багатоатомнамолекули?

1. Яка середняєнергіяприпадає на одну ступіньвільностіпоступального, обертального та коливальногорухівмолекули?
2. Одержите вираз для внутрішньоїенергіїідеального газу.
3. Якими способами термодинамічна система обмінюєтьсяенергієюіззовнішнімсередовищем?
4. Виведіть формулу елементарноїроботи газу з означеннямеханічноїроботи.
5. Сформулюйте й запишіть I закон термодинаміки.
6. З якимипроцесамивимали справу в данійроботі? Дайте їхвизначення та зобразитеіхграфічно в координатах p -V.
7. Запишіть I закон термодинаміки для цихпроцесів і вирази для їх же теплоємностей.
8. Дайте визначеннятеплоємностітермодинамічноїсистеми. Одиницівиміру. Відчогозалежитьтеплоємністьгазовоїсистеми?
9. Щотакекоефіцієнт Пуассона? Як розрахуватийоготеоретичнезначення?
10. Виведітьекспериментальну формулу (27) для розрахунку .
11. Порівняйтеодержанірезультативашогоексперименту з теоретичнимзначенням γ для двохатомних молекул. Якщо є суттевірозходження, то пояснітьіх причини.

## Лабораторна робота № 3.9

Частина 1

Визначеннякоефіцієнтаповерхневого натягу

рідини методом відривукаплі.

Мета

**Обладнання:**Бюретка, мікробюретка, штатив, вимірювальний мікроскоп, аналітичні терези, скляний кристалізатор, еталонна рідина (дистильованавода), досліджувані рідини.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Вільнаповерхнятіл яка є межею фаз, є причиною особливого типу явищ, так званихповерхневихявищ. Молекулиповерхневого шару перебувають в особливому енергетичномустаніпорівняно з молекулами обэ’ємурідини. Справді, щоб перенести молекулирідини з їїоб’єму на поверхню (для збільшенняповерхнірідини), потрібновиконати роботу проти сил внутрішньоготиску. В станістійкоїрівновагинадмірнаповерхневапотенціальнаенергіярідинимає бути мінімальною. Тому рідина на яку не діютьзовнішнісили, при умовіїїпрактичної не стисливості повинна набирати форму сфери. Отжесилиповерхневого шару повиннізумовлюватитенденціюрідини до зменшеннясвоєїповерхні. Зрозумілощоцісилимають бути направлені по дотичні до поверхнірідини.

На практиці одним з поширенихметодіввимірюваннякоефіцієнтаповерхневого натягу є метод відриву капель. При порівнянноневеликійшвидкостівитіканнярідини з вузької трубки утворюютьсякраплімайжесферичноїформи. Перед розривомутворюється нитка, по якій і відбуваєтьсярозрив. Нехай діаметр нитки в момент відривукраплідорівнює2r, а вага краплі, щовідривається – Р.Тоді справедлива рівність2πrα=P.Звідси.

(3.9.1)

для більш точного визначеннякоефіцієнта α знаходять вагу певноїкількостікрапель, а потімсереднєзначення ваги окремоїкраплі. Використовуєтьсятакожваріантпідрахунку числа крапельnпевногооб’ємуVвитікаючоїрідини. Розрізняютьабсолютний і відноснийспосібвизначеннякоефіцієнта α.

Абсолютнийспосіб.

Полягає у заміні у формулі (3.9.1) ваги крапліРїїзначенням через об’єм, визначений по шкалі бюретки, V,густинурідини і кількістькрапельn:

(3.9.2)

Відноснийспосіб.

Полягає у порівняннікоефіцієнтівповерхневого натягу досліджуваноїрідини α і еталонної αо. Записавши (3.9.2) для однаковихоб’єміврідин, дістанемо:

(3.9.3)

де ρо, nо, rо – відповідно густина, кількість крапель, радіус шийки краплі еталонної рідини, ρ, n, r – аналогічні параметри досліджуваної речовини. Еталонноюрідиноюрекомендуютьбратидистильовану воду. Густинурідинслідвизначитипікнометричним методом.

На мал.3 наведено схему приладу для визначеннякоефіцієнтаповерхневого натягу α рідини методом відривукраплі. Рідининаливають у бюретку 3, закріплену в штативі 2. Рідину, щовитікає з бюретки збирають в скляномукристалізаторі 4. Радіусшийкикраплівимірюютьвідліковиммікроскопом 1.

### Порядок виконанняроботи

1. У чисту бюретку, промиту хромовою сумішшю (5%-ийрозчин) та дистильваною водою, налитиприблизно 10см3досліджуваноїрідини, відкрити кран і заповнитирідиноювузькучастину бюретки нижче крану.

2. Зважити на аналітичнихтерезахсклянийкристалізатор.

3. Відкривши кран забезпечитиповільневитіканнякрапель. Відрахувати 50-100 крапель. Одночасновизначитимікроскопомрадіусшийки 10-15 крапель.

4. Зважитикристалізатор і обчислитисередню вагу однієїкраплі. Обчислитисереднєзначеннярадіусашийкикраплі**r**.

5. За формулою (3.9.1) обчислити α.

6. Дослідповторити 5-6 разів.

7. Оцінититочністьрезультатіввимірювання.

### Контрольні питання

1. Шотакекоефіцієнтповерхневого натягу?
2. Які вам відоміметодивизначеннякоефіцієнтаповерхневого натягу рідини?
3. Чому при відсутностізовнішніх сил краплярідининабуваєформисфери?

Частина2

**Визначеннякоефіцієнтуповерхневого натягу**

**рідини методом капілярниххвиль.**

**Мета роботи**:Познайомитися з одним ізметодіввизначеннякоефіцієнтуповерхневого натягу рідин.

**Обладнання**:Установка для спостереженнякапілярниххвиль, лінійка, аркушпаперу.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Розглянемоповерхнюріини в озерічидоситьширокійпосудині. В спокійномустані вона плоска. Якщо в деякомумісцівивестирідинузі стану спокію, то по їїповерхніпочнутьпоширюватисяхвилі: кругові (від кинутого камінця, плосківідпоривувітру), абобільшскладні по формі.

Повертають в початковий стан систему силитяжіння та силиповерхневого натягу. Тому хвилі на поверхнірідинназиваютьгравітаційно-капілярними. Детальнийрозглядмеханізмупоширенняхвильпоказує, щофазовашвидкістьциххвильСвизначається за формулою:

(3.9.4)

де g – прискорення вільного падіння, λ – довжина поверхневої хвилі, ρ – густина рідини, σ – коефіцієнт поверхневого нятягу рідини.

Так як швидкість хвилі залежить від її довжини λ то при різних значеннях λ величини доданків gλ/2π (гравітаційна сила), та 2πσ/ρλ (сила поверхневого натягу) будуть різними. Для води (σ =0,073Н/м при t=20oC) внесоквідгравітаційних сил та сил поверхневого натягу буде однаковим при λ1=1,71см. При значенняхλ<<λ1внескомгравітаційних сил можназнехтувати, при цьому формула (3.9.4) спрощується і набираєвигляд:

(3.9.5)

Такіхвиліназиваютьсякапілярними. Таким чином, знаючи ρ, та вимірявшиС та λ, можнаобчислитикоефіцієнтповерхневого натягу води за формулою:

(3.9.6)

Експериментальна установка.

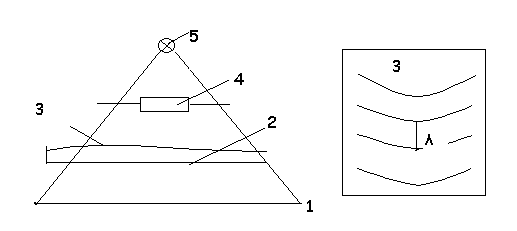
Схема установки для дослідженнякапілярниххвиль приведена на Рис.3.9.2.

Рисунок 3.9.2 Схема будови утановки для досліження капіярних хвиль, та вигляд хвильвої картини на екрані: 1-екран; 2-кюветка з прозорим дном; 3-вібратор; 4-рухома шторка; 5-освітлювач.

На деякійвисотівідбілогоекрану(1)розташована кювета з прозорим дном (2), в яку налита досліджуванарідина. За допомогоювібратора(3) (невелика металева кулька) на поверхнірідинистворюютькруговіхвилі. Хвильва картина за допомогоюосвітлювачапроектується на екран з коефіцієнтомзбільшення(3).

Так як швидкістьпоширеняхвилідоситьзначна, то безпосередньо на хвильовійкартині при звичайномуосвітленнідовжинухвилівимірятинеможливо. Щобзупинити картину біжучиххвильвикористовуютьстробоскопічнийефект. При цьомуповерхнюрідиниосвітлюютьпереривчастимсвітлом за допомогоюнепрозорої шторки (4). Неважкозрозуміти, що коли освітлювати картину через проміжки часу, за якіхвилявстигнепересунутися на λ, то картина біжучиххвиль буде здаватисянерухомою. При цьомуспостерігач буде бачитихвилю в одному і тому стані (стробоскопічнийефект).

Вібратор(3) та шторка (4)приводяться в рух за допомогоюелектродвигуна. Синхронністьхвиль та перериваннясвітладосягаєтьсятим, щообидварухомихелементи (вібратор та шторка) знаходяться на одному валу двигуна.

В установцірозміщенафотоелектронна схема для вимірюваннячастотиколиваньвібратора. Значеннячастотивисвітлюється на табло частотоміра.

### Порядок виконанняроботи

1. Налитидосліджуванурідину в кюветку до необхідногорівня.
2. Вввімкнути установку і підібрати регулятором частоту вібрації, при якійспостерігаєтьсячіткахвильва картина.
3. Накласти на екранаркушпаперу і відмітитиположення 5-10 максимумівхвильвоїкартиниолівцем.
4. Користуючисьодержаниммалюнкомвизначитидовжинухвилі λ. Для більшоїточностівимірювати не відстаньміжсусудніми максимумами, а між 5-10 максимумами. Одержанезначеннянеобхіднорозділити на k=3, бо картина на екранізбільшена в 3 рази.
5. Скориставшись результатом виміру λ, та значеннямчастотивібрації ν, обчислити σ2 (по формулі 3.9.6.). Так як с=λ/Т=λν>0 то:
6. Вимірюванняпроводити 3-5 разів при різних частотах (не забуваючи при цьму, що частота повинна бути такою, щоб λ<1,71см). Результати занести в таблицю:

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № п/п | ρ, кг/см2 | ν, Гц | λ, м | σ, Н/м | ∆σ, Н/м | δ, % |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

Частина3

Визначеннякоефіцієнтаповерхневого натягу

методом підняттярідини в капілярах.

**Мета**

**Обладнання:**Набір капілярних трубок діаметром 0,2-1мм, тримач капілярних трубок, скляна посудина для досліджуваних рідин, відліковий мікроскоп, висок, досліджувані рідини.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Висота h піднімання рідини в циліндричній капілярній трубці постійного радіуса **r**, яку вміщено в широку посудину, для випадку повного змочування визначається формулою Жюрена:

(3.9.7)

де а і ρ – коефіцієнтиповерхневого натягу і густинарідини; g –прискореннявільногопадіння.

В роботі для визначеннякоефіцієнтаповерхневого натягу використовуютьодночасно два капілярирадіусамиr1 і r2. У цьомуразі:

(3.9.8)

Оскільки∆h=h1-h2, то ,звідки

(3.9.9)

### Порядок виконання роботи

1. Вимірятирадіусикапілярів (за допомогоюмікроскопаабо методом зважуваннярідини).
2. Капіляристаранопромитирозчиномдвохромокислогокалію в сірчанійкислоті, а потімдистильваною водою.
3. Закріпити на штативізанурені в досліджуванурідину на глибину 1-2см промитікапілярирадіусамиr1 і r2.
4. За допомогоюмікроскопавимірятирізницірівніврідин в капілярах∆h.
5. За формулою (3.9.9) обчислитикоефіцієнта.Дослідповторити 3-5 разів при різномузануреннікапілярів у досліджуванурідину. Зафіксувати температуру досліду.
6. Оцінитирезультативимірювань.
7. Зробитивисновки про методику і результативимірювань.

### Контрольні питання

1. Чому в роботікращеодночасновикористовувати два капіляра.
2. Що є причиною підняттязмочуючихрідин у капілярах.
3. Чому в роботі велика увагаприділяєтьсячистотікапілярів.
4. Яке практичнезначеннякапілярнихявищ.

## Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ФРЕОНУ»

**Мета**

**Обладнання:** 1) термостат з прозорими стінками; 2) уль­тратермостат ТС-16; 3) скляні ампули з досліджуваною речовиною (фреон-13); 4) лабораторні термометри; 5) темний екран.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Аналізуючи ізотерми реального газу (рис. 3.10.1), можна зробити висновок, що з підвищенням температури області співіснування га­зу і рідини зменшуються. При певній температурі Ткр і тиску ркрділянки ізотерм — ізобар, що зменшуються, переходять у точку К, яку називають критичною.

**Критична точка** — це точка на термодинамічній діаграмі, яка відповідає критичному стану. Температура речовини в критичному стані називається **критичною**

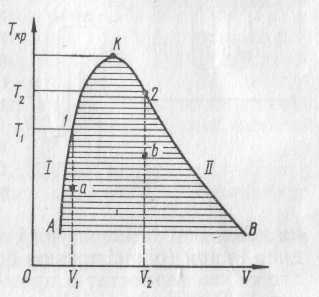


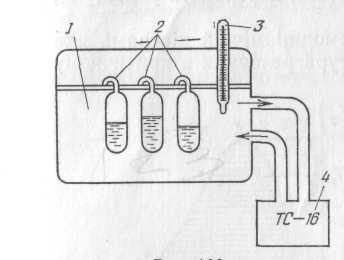
Рисунок 3.10.1 Рисунок 3.10.2

**температурою**, відповідно тиск р і пи­томий об'єм речовини в критичному стані — критичним тиском і об'ємом.

У точці К зникає різниця між фазами — рідиною і парою (кри­тичний стан).

Подамо рівновагу рідини і пари на діаграмі Т—V(рис. 3.10.2). Станам одночасного рівноважного співіснування рідини і газу від­повідає заштрихована область, а області І і ІІ відповідають рідкому і газоподібному станам.

Перевести рідину з двофазного стану а в однорідний можна, не змінюючи його маси в герметичній ампулі. Для цього досить по­вільно підвищувати температуру речовини в. ампулі доти, поки по­верхня розділу рідини і пари, повільно піднімаючись, не досягне верхньої межі ампули. Тоді стан речовини в ампулі буде однорід­ним -— кипляча рідина з питомим об'ємом V1і температурою Т1 — (стан 1).

Якщо при певній температурі кількість рідини і пари в ампулі відповідає стану «b», то при нагріванні поверхня розділу фаз піде вниз, і при дотику дна ампули в об'ємі ампули речовина стане одно­рідною — насиченою парою з питомим об'ємом У2 і температурою Т2 — (стан 2).

Спостерігаючи переходи рідини в пару і пари в рідину в прозо­рій ампулі, можна визначити межі заштрихованої області на рис. 2. Точка максимуму кривої АКВ є критичною точкою речо­вини (точка К).

Окіл критичної точки — область дуже розвинутих флуктуацій. Речовина має каламутне біле забарвлення через значне розсіювання світла в неоднорідному середовищі (критична опалесценція; назва від подібності розсіяння світла мінералом опалом).

З усіх величин, які характеризують критичну точку, найпростіше визнача­ється критична температура. Для прак­тичних потреб досить знання її з точ­ністю ±0,1'—0,2°С. При цьому досить підтримувати речовину в квазірівно-важних умовах, що дає змогу візуаль­но спостерігати зникнення (появу) ме­ніска в запаяній скляній ампулі.

Цей метод, запропонований київським фізиком М. П. Авенаріусом, є най­більш простим, наочним, надійним іточним.

Установка (рис. 3.10.3) для визначен­ня критичної температури і двох точок на кривій співіснування рі­дини і пари (однієї точки з боку пари і однієї — з боку рідини) яв­ляє собою термостат з прозорими стінками /, в якому підвішеноскляні ампули 2 з досліджуваною речовиною. В термостат з ультра­термостата ТС-16 (4) .подається вода (термостатуюча рідина). Швидкість нагрівання задається регулятором напруги. Температу­ра в термостаті /, а отже, в ампулах вимірюється калориметричним термометром 3. В ампулах густина речовини близька до критичної. Для дослідження застосовується фторхлорпохідна найпростіших насичених вуглеводнів — фреон-13 (CC1F3), який використовується в техніці як холодоагент. Для фреонів характерні хімічна стійкість, не токсичність, негорючість, вибухобезпечність, відсутність вза­ємодії з конструкційними матеріалами (при £<200°С). Нижче на­ведено деякі фізичні характеристики для фреону-13:

Відносна молекулярна маса 104,47

Температура кипіння(при атм. тиску),°С 81,4

Потрійна точка, °С 181

Критичний тиск, кгс/см2 (39,0±1,0)

Критична густина, г/см3 (0,579±0,0О1)

Критичний питомий об'єм, см3 (1,727±0,003)

Критична температура потрібно визначити

### Порядок виконання роботи

1. Закріпити в термостатній ванні 1 (рис. 3.10.3) три ампули зфреоном-13. Закріпити термометр 3.
2. Покажчик контактного термометра ультратермостата виставити на 29,5°С і через регулятор напруги ввімкнути ультратермостат на повільне нагрівання.
3. При температурі 26°С особливу увагу звернути на положенняменіска рідини в ампулах. При температурі 28°С позаду термостатапоставити темний екран. Звернути увагу на появу критичної опалесценції. Дальше повільне нагрівання приводить до повільного розмивання меніска, зникнення опалесценції. Критична температурабуде в інтервалі початку і кінця опалесценції. Зафіксувати ці температури.
4. При температурі 29,5°С вимкнути нагрівач ультратермостата.Під час охолодження речовини в ампулах уважно стежити за її станом (фіксувати появу критичної опалесценції голубувато-сірого кольору в місцях зникнення меніска; вона поступово стає інтенсивнішою і максимальною при критичній температурі). При 29°С поста­вити темний екран. Періодично забирати екран і стежити за появоюменіска. Виміряне значення температури в момент появи меніскавідповідатиме критичній температурі.
5. Результати занести в таблицю. Досліди виконати 3—5 раз.За критичну температуру взяти середнє арифметичне температур-моменту зникнення і появи меніска.
6. Провести оцінку результатів вимірювання і зробити висновок-відносно методики і результатів вимірювання.

### Контрольні питання

1. Що таке критичний стан речовини? критична температура?
2. Назвіть основні методи вимірювання критичної температури, у тому числіі для непрозорих рідин.
3. Як пов'язані критичні параметри речовини з сталими рівняння Ван дерВаальса?

## Лабораторна робота «ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНІСТІ МЕТАЛІВ МЕТОДОМ ОХОЛОДЖЕННЯ»

**Мета роботи** - визначити теплоємність твердих тіл при різних температурах.

**Обладнання**: досліджувані зразки, піч, термопара, секундомір

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Теплоємність - це фізична величина, яка показує, яку кількість теплоти надопотрібнонадати системі, щоб збільшити її температуру на 1°К. Теплоємність не є - термодинамічним параметром системи, оскількі залежить не тільки від роду речовини та температури, а й від виду термодинамічного процесу при якому надається системі теплота при вимірюванні теплоємності.

Вивчення теплоємності речовин є одним із способів визначення як їх будови, так і особливостей молекулярного руху.

В 1819р. Дюлонг і Пті експериментально визначили, що молярні теплоємності простих (одноатомних) твердих речовин приблизно однакові і дорівнюють . Це положення одержало назву правила, або закону Дюлонга і Пті. З правила Дюлонга і Птіє виключення – алмаз,берилій, бор теплоємність яких набагато менша. **Класична теорія теплоємності твердих тіл**, в основі якої покладена теорема Больцмана про рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності молекул, приводить до висновку, що молярна теплоємність простих твердих тіл повинна дорівнювати 3R, або . Це легко показати. Відомо, що теплоємність при постійному об’ємі дорівнює першій похідній від внутрішньої енергії по температурі.

(3.11.1)

Отже, перш за все, треба визначити внутрішню енергію одного моля твердого тіла. В класичній фізиці розглядається така модель твердого тіла: атоми речовини знаходяться в узлах кристалічної решітки, де здійснюють коливальний рух. З кожним атомом можна зв’язати три незалежні осцилятори, які здійснюють коливання вздовж трьох взаємно перпендикулярних осей. За теоремою про рівнорозподіл енергії за ступенями вільності, на кожний осцилятор припадає енергія кТ. Тому внутрішня енергія 1 молю твердого тіла буде дорівнювати

(3.11.2)

Беручи похідну по Т одержуємо молярну теплоємність твердого тіла

(3.11.3)

Отже теоретичний результат погоджується з експериментальними даними одержаними Дюлонгом і Пті при кімнатних температурах. Але експериментальні дані свідчать про те, що теплоємність твердих тіл залежить від температури за законом ~Т3, а теоретичний результат зовсім не містить температури. Отже, класичні уявлення про тепловий рух частинок твердого тіла не зовсім вірні.

**Квантова теорія теплоємності твердих тіл** була розроблена Ейнштейном. У своїй основі квантова теорія теплоємності твердого тіла базується на тих самих класичних уявленнях про будову твердого тіла і характер руху молекул. Але тут систему з N атомів замінюють системою із 3N не класичних, а квантових осциляторів з однією ступеню вільності. Енергія, що надається тілу розподіляється між осциляторами цілими квантами. При цьому одні осцилятори одержують по одному кванту, другі – по два, треті-по три і т.д. Цей розподіл відбувається за законом Больцмана. , де N кількість осциляторів, що одержали по і квантів енергії , - постійна Планка, - частота коливань, яка тут для всіх осциляторів однакова.

З таких уявлень була підрахована середня енергія, що припадає на одну ступінь вільності молекули у вигляді

(3.11.4)

і, остаточно, теплоємність твердого тіла

(3.11.5)

Аналіз одержаної формули показує, що при великих температурах Т теплоємність прямує до значення 3R, а при температурах що наближаються до абсолютного нуля, теплоємність прямує до нуля. Зауважимо, що такі самі результати дає експеримент. Разом з тим, недоліком теорії Ейнштейна є те, що при низьких температурах залежність теплоємності від температурі не відповідає експериментальної ~Т3 .

В 1950 г. Індійській вчений Раман удосконалив теорію Ейнштейна вважаючи що коливання атомів не є незалежними, а є пов’язаними. Раманом була одержана формула для теплоємності твердого тіла, яка має гарний збіг з експериментом у всьому інтервалі температур від 0оК до високих температур.

**Опис методу.**Металевий зразок, температура якого вища за кімнатну температуру Т0, вільно охолоджується. Кількість теплоти q, яку зразок втрачає за інтервал часу dT, може бути виражена формулою:

, (3.11.6)

де С - теплоємність металу, ρ - його густина, V- об’єм зразка. Оскільки величини С, ρ, — не залежать від просторових координат,

(3.11.7)

Ця теплота виділяється через поверхню зразка S і може бути обчислена за рівнянням теплопровідності :

, (3.11.8)

де α- коефіцієнт тепловіддачі. Враховуючи, що величини α, Т-Т0 також не залежать від просторових координат, останній інтеграл легко обчислюється :

(3.11.9)

Прирівнюючи вирази (3.11.7) та (3.11.9), отримуємо:

(3.11.10)

(3.11.11)

Інтегруючи останнє диференційне рівняння, визначаємо вираз для кривої охолодження :

, (3.11.12)

у виразі (3.11.12) Тпоч - початкова температура досліджуваного зразка.

Рівняння (3.11.12) фіксує лінійну залежність (Т-Т0) від часу. При цьому –це тангенс кута нахилу цієї прямої до осі часу.

Слід зауважити, що при інтегруванні рівняння (3.11.11) була припущенанезалежність величини від температури.

Для визначення теплоємності досліджуваного металевого зразка беруть два зразки однакової форми та розмірів. При цьому теплоємність та маса одного з зразків відома.

Експериментально одержуючи криві охолодження (3.11.12) визначають з з графіків функцій які мають (у відповідності до теорії методу) вигляд прямих, тангенси кутів нахилу цих прямих до вісі часу, тобто величини:



Припускаючи, що коефіцієнти тепловіддачі α для обох зразків однакові, отримуємо:

(3.11.13)

Звідси

(3.11.14)



Рис.3.11.1 Схема установки для визначення теплоемності твердих тіл.

1- пічь; 2-зразок; 3 термопара.

### Порядок виконання роботи

Схему установки подано на рис.3.11.1. Зразки мають форму циліндрів висотою 50 мм та діаметром 10мм. З висвердленим з одного торця каналом для термопари. Зразки насаджуються безпосередньо на термопару. Термоелектрорушійна сила (е.р.с.) вимірюється мілівольтметром.

1. На початку досліду зразок з термопарою вміщують в центр нагрівача 1.
2. Нагрівач підключають до джерела змінного струму 220B.
3. Після нагрівання зразка до ~400 °С пічь знімають з нагрівача.(підіймають угору).
4. Нагрітий зразок охолоджується в нерухомому повітрі, температура якого Т0, до температури ~100°С. Через кожні 10-15 сек. вимірюють покази мілівольтметру.
5. З градуювального графіку термопари, який додається, визначають відповідні температури досліджуваного зразка T.
6. За отриманими в досліді даними будують залежності для трьох зразків: міді, заліза, алюмінію.

Одержані криві розбивають на прямолінійні відрізки. Для кожного з таких відрізків визначаютьі знаходять значення теплоємності заліза та алюмінію при різних температурах за формулою (3.11.14), вважаючи теплоємність міді відомою. При цьому слід мати на увазі, що в формулі (3.11.14) значення теплоємностей С1 та С2  відповідають однаковим температурам.

Значення питомої теплоємності міді при різних температурах приведені у таблиці

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| T, K | 273 | 373 | 473 | 573 | 673 |
| кДж/кг·К | 0,381 | 0,394 | 0,408 | 0,422 | 0,435 |



7. Визначають температурну залежність теплоємкостей заліза та алюмінію.

### Контрольні питання

1. Дати означення теплоємності.

2. Від чого залежить теплоємність?

3. У чому полягає закон Дюлонгга і Пті ?

4. Як одержати теплоємність твердого тіла на основі класичних

уявлень про будову та характер руху частинок у твердому тілі?

5. В чому полягає квантовий характер коливального руху части нок (молекул, атомів) твердого тіла? Які недоліки теорії Ейнштейна?

6. Одержати розрахункову формулу (3.11.14).

7. Розповісти порядок виконання роботи та порядок обробки експериментальних даних.

## Лабораторна робота «ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕССУ ЕЛЕКТРОВІДКАЧКИ»

**Мета**

**Обладнання:**Лампа ЛМ-2 або ПМИ-2, вакумометр, самописець.

### Опис експериментальної установки та методу дослідження

Для видалення газу ізоб’ємівзастосовуютьвакумні насоси. Тисквище 10-3Тор зазвичайдобувається за допомогоюмеханічнихнасосів. Для отриманнябільшвисокогорозрідження до останнього часу використовувалидифузійні насоси, в якихмолекули газу витягувалисяізвикачуємогооб’ємуструєю пару кип’ячого масла. При цьомувикористовуютьспеціальні масла, пари яких при нормальнійтемпературімають невеликий тиск (<10-7Тор).

Останнім часом все більшерозповсюдженняотримуютьновіметодивідкачування – сорбіційний та іонний. В насосах сорбіційного типу молекули газу зв’язуютьсяпідходящими сорбентами – речовинами з розвитоюповерхнеюабо атомами металу (титану), випаровуємого, а потімкондесуючого в насосі. В іонних насосах атоми газу спочаткуіонізуються, а потімприскорюютьсяелектричним полем, яке притягуєїх до катода. Часто використовуєтьсякомбінованийваріант.

На данійроботідосліджуютьсяявищащовиникають при іоннійвідкачці газу (електровідкачування). В якості насоса і манометра використовується лампа іонізаційного манометра. Єлектрони, щовилітаютьізрозпеченого вольфрамового катоду, прискорюються полем анода, щомає форму спіралі, пролітають через їїрідкі витки, але не можутьдосягтициліндраколектора, так як йогопотенціалнижче за потенціал катода. Не доходячи до колектора, електрониповертають назад, зновупроскакують через витки спіралі, тормозятьсяелектричним полем в просторіміжспіраллю і катодом і зновуповертають до спіралі. В результатіелектрониможутьіонізуватимолекули газу.

Якщоіонізаціявиникає в просторіміжспіраллю і колектором, то електричне поле притягує позитивно зарядженііони до колектора. Іонний струм пропорційнийкількості молекул в одиниціоб’єму:

(3.12.1)

де q – заряд іона. Майжезавждивідмолекуливідщеплюєтьсятільки один електрон, тому можнавважатищоq=1.6\*10-19Кл. Множникwзалежитьвід виду молекул, геометріїелектродів і прикладенихпотенціалів.

Впровадженняіона в матеріалколектора схоже на мікровибух. Порівняємоенергіюіона≃200еВ з енергієювипароввання атому матеріалуколектора (нікель) ≃0,4еВ. При цьомувипаровуєтьсязвичайно не 200/0,4=500 атомів, тому щоосновначастинаенергіїіонурозсіюється. Середнякількістьатомів, щовилітаютьізмішені в розрахунку на один падаючийіонназиваєтьсякоефіцієнтом катодного розпилення α. Вінзалежитьвіденергіїіону, відспіввідношеннямасіону і атомівмішені, стану поверхні.

Є велика ймовірність того що разом кріммолекули катоду вилетить і молекула газу, що перед цим прилипла до нього в виглядііону і викликалавибух. Цепояснює те, чомукоефіцієнтіонногоприлипання βивідміннийвідодиниці.

Розпорошенівибухоматомизновуосідають. Вони мають велику хімічнуактивність і здатнізв’язуватичастинкивсіхгазів, крімінертних (так званегетернадія). Кількістьзахопленихатомів прямо пропорційнокількостіосівшихатомів, тобтоіонному струму. Коефіцієнтпропорційностіміжкількістюзахопленихатомів та іоннимструмомназиваютькоефіцієнтомгетерногоприлипання βг.

В міру того як поверхняколекторанасичується газом , виникаєщеоднеявище - десорбція газу піддієюіонного струму. Коли на колекторі буде N молекул газу, то за секунду в результатімікровибухів буде виділятися назад в об’ємлампиCNI/qчастинок газу, де С – деякийкоефіцієнтпропорційності.

Сумуючи, знайдемощокількість молекул, поглинутих за секунду, рівне:

 (3.12.2)

Перші два члени в дужках визначаютьефективністьприлипання, а останні – десорбцію газу. Ввімкнемо наш електронасос на тривалий час, в кінцікінціввстановитьсярівновага і N стане рівним нулю. Кількість молекул газу в стінціколектора нехай при цьому буде рівнеN**∞**. Згідно (3.12.2) маємо для t→∞:

βн+βг=СN∞

визначивши з останньоїрівностікоефіцієнтС і підставившийого в формулу (3.12.2), знайдемо:

(3.12.3)

Формули (3.12.1) і (3.12.3) не достатні для математичногоописанняпроцесувідкачування, оскільки в них входять три змінні – N, niI.Спробуємознайтищеоднеспіввідношенняміж ними. Якщо початкова густина молекул газу в об’ємі при добре очищенійповерхніколекторарівнаnо, а в ходіелектровідкачування на поверхнізбираєтьсяNмолекул, то:

N=V(no-n)

де V– об’ємлампи. Підставивши в цюрівністьзамістьnз (3.12.1), знайдемо:

(3.12.4)

Таким чином, ми знайшлиневистачаючірівняння. Система рівнянь (3.12.3) і (3.12.4) може бути проінтегрована, але при цьомувиникаютьскладнівирази. Замість того щобшукатицірішення, покажемо, як можназнайтикоефіцієнтиналипання βи+βг і N∞ізексперементальнихданих.

Перепишемо формулу (3.12.3) в вигляді:

N=εI/q (3.12.5)

де

ε=(βн+βг)(1-N/N∞) (3.12.6)

Як це видно із (3.12.6), **ε** в процесі відкачки зменшується. Напочаткудосліду в стінкахнемає газу (N=0):

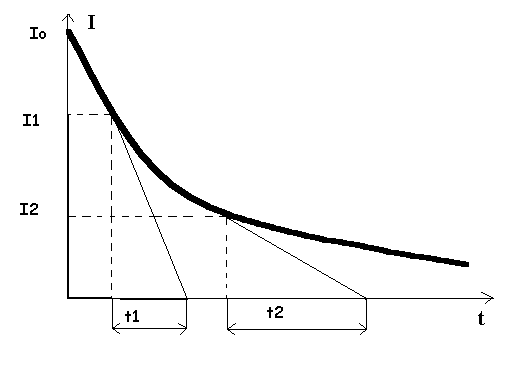
εо=βи+βг (3.12.7)

таким чином, величина повногокоефіцієнтаприлипаннярівна початковому значеннюε.Диференцюючи (3.12.6), знайдемо, що:

(3.12.8)

Виразимоε через струм ІійогопохіднуІ’. Для цьоговикористаєморівняння (3.12.5) і підставимо в ньогоN з (3.12.4).

(3.12.9)



Метод графічного диференціювання для двух точок кривої, що відповідають іонному струму І1 і І2.

ВиразимозалежністьІ(t) і знайшовшиІ за допомогоюграфічногодиференціювання, можна, таким чином, знайтиεо, потрібно для визначення βи+βг, і величину ε в любий момент часу. Метод графічногодиференціювання пояснений на малюнку. Використавшиприйнятіпозначення, знайдемо:

(3.12.10)

Розглянемо формулу (3.12.8). В неї входить величина dε/dN.Виразимоцю величину через залежність εвідІ, яка може бути знайдена по експерементальнимданим. За допомогоюформули (3.12.4) знайдемо:

Підставившидану величину в (3.12.8) і маючи (3.12.7), знайдемо:

(3.12.11)

Формула (3.12.11) дозволяєзнайтиN∞ по експерементальнимданим. Для того щобзнайтиdε/dІ,потрібнопобудуватиграфікε=ε(t). Цязалежність повинна мативиглядпрямоїлінії. Поділивши число N∞ на площуколектора (S=20см2), розрахуємокількість молекул, щоприходяться на одиницюповерхніколектора в кінцівідкачки.

### Порядок виконання роботи

1. Поставитиперемикач роду роботи в положення «Установка эмиссии». В такому положенніперемикачастрілочнийприладвідімкненийвідпідсилювачаіонного струму. Цеважливо, тому що при ввімкненні в електромережу в підсилювачівиникаєсильнийвикид струму, якийможевивести з ладу мікроамперметр.
2. Ввімкнутиприлад ВИТ-2 тумблером „Сеть-220В”.
3. Ввімкнення тумблера з надписом «Прибор» на панелісамописця подайте напругу на самописець. На ВИТ-2 перемикач «Множитель шкалы» поставте в положення «1».
4. Ввімкнітьнакаленняманометричноїлампи, поставивши тумблер «Накал» в верхнєположення. Регулятором емісіївстановітьстрілкуприлада на середину шкали. При вимірюванніемісіїмікроамперметр в 10 разівзагрублюється і вказаневідхиленнявідповідаєстандартнійемісії а 0,5мА. Мможевиявитися, щоприладпокаже струм ще до ввімкнення накалу. Цевиникає по тійпричині, що при розпиленнінікелю з коллектора частинайоговилітаєізциліндру і встановлюємістокміжвпаями в скло. Якщоданий струм менший 0,1 нормального струму емісії, то емісіюслідзбільшити на відпоаідну величину. Якщопровідністьбільше то слідзамінити лампу.
5. Змінюючичутливістьіонного струму перемикачем „Множитель шкалы”, отримаетесуттєвезміщення каретки самописця. Перемикач роду роботиприлада ВИТ-2 поставте на „Измерение”. Слідпам’ятати, щосамописецьрегеструєіонний струм при любому положенніперемикача роду роботи, однак в положенні „Измерение” стрілковийприлад ВИТ-2 регеструєабсолютну величину струму. Ця величина рівнавідліку по шкаліприладу ВИТ-2, помноженому на множник, вказаний на перемикачі „Множитель шкалы”.
6. Вимкніть накал і ручкою установки нуля поставте перо самописця на нульвувідмітку. При цьому не слідпереводитиперемикач „Множитель шкалы” в положеннявстановлення нуля. В перемикачіможуть бути не достатньочистіконтакти, і явища, пов’язані з контактною різницеюпотенціалів, призведуть до замітногозміщення нуля при різнихположенняхперемикача.
7. Зновуввімкніть накал, ненадовгозапустітьзапис (ввімкніть на самописці тумблер з позначенням „Диаграмма”) і визначітьзалишковийвакум в лампі (знайдітьn по (1) і по ньмурозрахуйтетиск).
8. Вимкніть накал і поставтеперемикач роду роботи на „Обезгаживание”. Накалюючисьспіральпідігріваєколектор, більшачастина газу, що прилипла до йогоповерхні, при попередніхдослідах, виділяється в об’єм (5-10хв).
9. Зновупереведітьперемикач „Род работы” в положення „Измерение”. Поставтеперемикач „Множитель шкалы” в положення „10-2”. Ввімкненням тумблера „Диаграмма” почнітьзапис. Поправте, якщопотрібно, встановлення нуля. Ввімкнітьнакалення. Перемикач „Множитель шкалы” поставте в положення при якомувідлік по вимірюваномуприладу ВИТ-2 (відповідноположення пера самописця) доситьзначний. Якщо перо покажеменше ¼ шкалиабозашкале, швидковимкнітьнакалення (щоб не відкачатизанадто газу). Змініть в потрібну сторону чутливість і при необхідностіпоправте нуль.
10. Ввімкніть накал і запишітькривувідкачки. Потрібновпевнетись, щоемісіярівна 0,5мА. В схемівакумометра є стабілізаторемісії, який повинен міняти струм накалу катоду таким чином, щоб з часом при змінітискуемісіязалишаласясталою. Якщо вона дещозмінилася то краще не поправлятиїї (цезіб’єзапис), а ввести в розрахунки поправку:

w=(Iемісії/0,5мА)2см3/с.

1. Коли струм зменшиться в 10 раз(абоперестанезамітнозмінюватися), виключіть накал і пропишіть на протязідекількох секунд нульовулінію.
2. Вимкнітьживлення установки. Зробітьобробкурезультатівдосліду. Графічнедиференціюваннявиконайте прямо на кривійвідкачкиI(t).Дотичнідостатньопобудувати по 10 точкам. Знайдітьτ по формулі (3.12.10), побудуйтезалежністьε(І) яка повинна мативиглядпрямоїлінії. При проведенніпрямої по експерементальним точкам потрібноврахувати те, що точки, яківідповідають великим і малим струмам, можутьвипадати з лінійноїзалежності. По кутовомукоефіцієнтуdε/dIпрямоїε(І) і формулі (3.12.11) знайтиповнукількість молекул, якіможуть бути поглинутіколектором в процесіелектровідкачки. По знайденомуN∞розрахуватикількість молекул, на одиниціповерхніколектора в кінцівідкачки.

### Контрольні питання

1. Якийвакумможе бути отриманий в результатівідкачки в манометричнійлампі?
2. Покращитьсячипогіршитьсявакум, якщопроцеселектровідкачкипроводити при додатковомуохолодженніколекторалампи.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Основні одиниці фізичних величин міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та положення. – ДСТУ 3651.0-97, Київ, Держстандарт України, 1998. – 9 с.
2. Похідні одиниці фізичних величин міжнародної системи одиниць та позасистемні одиниці. Основні поняття, назви та позначення. – ДСТУ 3651.1 - 97, Київ, Держстандарт України, 1998. – 76 с.
3. Правила побудови, викладання, оформлення та вимоги до змісту нормативних документів. – ДСТУ 1.5:2003, Київ, Держспоживстандарт України, 2003. – 141 с.
4. Кушнір Р. М. Загальна фізика. Механіка. Молекулярна фізика. Навч. посібн. / Р. М. Кушнір. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. – 404 с.
5. Вакарчук С. О. Фізика:підручник/ С. О. Вакарчук, Т. М. Демків, С.В. Мягкота – Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. – 458с.
6. Зачек І.Р. Курс фізики. Навчальний підручник / І. Р. Зачек, І. М. Кравчук, Б. М. Романишин, В. М. Габа, Ф. М. Гончар – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2002. – 376 с.
7. Кармазін В. В. Курс загальної фізики / В. В. Кармазін, В. В. Семенець – К.: Кондор, 2009. – 786 с.
8. Пойда В. П. Загальна фізика: механіка: конспект лекцій / В. П. Пойда . – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2011. – 280 с.
9. Савельев И. В. Курс физики: Учеб. : В 3-х т. Т.1 : Механика. Молекулярнаяфизика / И. В. Савельев. – М.: Наука. – 1989. – 352 с.
10. Трофимова Т.И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 1998. – 542 с.
11. Курс фізики / за редакцією І.Є. Лопатинського / Львів: Бескид Біт. – 2002. – 376 с.
12. Загальна фізика. Лабораторний практикум : навч. посіб. : у 3 ч. Ч. 1. : Класична механіка. Термодинаміка і статистична фізика. Електрика та магнетизм / А. О. Мамалуй, М. В. Лебедєва, Т. І. Храмова та ін. ; за заг. ред. А. О. Мамалуя. – Х. : Підручник НТУ «ХПІ», 2012. – 352 с.
13. Венгер Є. Ф. Механіка. Лабораторний практикум : [навч. посібник] / Є. Ф. Венгер, Л. Ю. Мельничук, О. В. Мельничук. – Ніжин : Видавництво НДУ ім. М. Гоголя, 2011. – 250 с.
14. Гірка В. О. Фізичний практикум з механіки та молекулярної фізики : навчальний посібник / В. О. Гірка, І. О. Гірка, Р. І. Старовойтов. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 228 с.

Методичнівказівки

до лабораторнихробіт

з курсу «Фізика»

Розділ «Механіка»

для студентів2-го курсу всіхспеціальностей

денноїформинавчання

Відповідальний за випуск

Редактор

Комп’ютерневерстання

Підп. до друку 22.12.2006, поз.

Формат 60х84/16. Папірофс. ГарнітураTimesNewRomanCyr. Друкофс.

Ум. друк. арк. Обл.-вид. арк.

Тираж 150 пр. Собівартість вид.

Зам. №

ВидавництвоСумДУ при Сумському державному університеті

40007, м. Суми, вул. Р.-Корсакова,2

Свідоцтво про внесеннясуб”єктавидавничоїсправи до Державного реєстру

ДК № 2365 від 08.12.2005.

Надруковано у друкарніСумДУ

40007, Суми, вул. Р.-Корсакова,2.

**Навчальне видання**

Навчальний посібник «Лабораторний практикум по механіці» Для студентів усіх спеціальностей

Укладачі:Шкурдода Юрій Олексійович (Сумський держаний університет)

Дехтярук Леонід Васильович (Харківський державний університет будівництва та архітектури)

Відповідальний за випуск: І. Ю. Проценко

Редактор: \*\*\*\*\*\*\*

План 2018 р., поз. Формат 60х84 1/16. Папір друк. № 2

Підп. до друку Обл. – вид. арк. Безкоштовно.

Надруковано на ризографі. Умов. друк. арк.

Тираж 50 прим.Зам. №

ХНУБА, 61002, Харків, вул. Сумська, 40????

Підготовлено та надруковано \*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*