

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ ТА ФІЗИКИ

ФІЗИКА

Частина 3. Молекулярна фізика і термодинаміка

Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів спеціальностей
денної та заочної форми навчання

Затверджено
на засіданні кафедри інформатики,
прикладної математики та фізики
Протокол № 1 від 27.08.2016 р.

Кіровоград – 2016

Фізика: Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів спеціальностей 6.090101, 6.040106, 6.050503, 6.100102, 6.050503, 6.050504, 6.060101, 6.070106, 6.050201, 6.050701, 6.100101, 6.050502, 6.050205 денної та заочної форми навчання. / Укл.: Гур'євська О.М., В.І. Ковальчук, М.С. Якименко – Кіровоград: КНТУ, 2016.- 25 с.

Укладачі:

Гур'євська О.М. - к.п.н., доцент

Ковальчук В. І. – к. ф.- м. н., доцент

Якименко М. С. – к. ф.- м. н., доцент

ВСТУП

Вивчення фізики неможливе без лабораторних занять. Виконання лабораторних робіт сприяє більш глибокому засвоєнню теоретичного матеріалу

Робота в лабораторіях допоможе:

- краще зрозуміти суть фізичних явищ, величин та законів;
- відтворити фізичні явища, які вивчаються, на експериментальних установках;
- засвоїти основні методи вимірювання фізичних величин;
- навчитися обробляти результати вимірів;
- зрозуміти будову та принцип дії найбільш важливих фізичних приладів.

Для успішної реалізації усіх цих завдань необхідно ще до лабораторного заняття добре підготуватися до нього за допомогою методичних вказівок. Читаючи методичні вказівки, важливо усвідомити суть лабораторної роботи та розібратися у тому, як вона виконується. Малюнок чи схема лабораторної установки допоможе у цьому.

В методичних вказівках до кожної лабораторної роботи приведені короткі теоретичні відомості, в яких викладені необхідні визначення, сформульовані закони. Виведені потрібні формули. При недостатності цих відомостей необхідно звернутися до лекційного матеріалу чи прочитати відповідний параграф у підручнику.

У студента під час лабораторних занять, звичайно, повинен бути зошит для лабораторних робіт, лінійка, міліметровий папір.

Експериментальні результати необхідно представляти у вигляді таблиць та графіків. При оформленні звіту необхідно визначити похибку, з якою була виміряна та чи інша величина.

В опис кожної роботи входять контрольні запитання, які необхідно розглянути при підготовці до здачі лабораторної роботи

Лабораторна робота Т-1

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСИННИХ МОЛЯРНИХ ТЕПЛОЕМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ

Мета роботи – визначити відношення молярних теплоємностей повітря.

Короткі теоретичні відомості

Теплоємність газів залежить від умов нагрівання. Цю залежність для ідеального газу можна установити, скориставшись рівнянням Клапейрона – Менделєєва

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad (1.1)$$

і першим початком термодинаміки:

Кількість теплоти δQ , переданій системі, затрачається на збільшення її внутрішньої енергії dU і на роботу δA , виконану системою проти зовнішніх сил.

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (1.2)$$

де δA - елементарна робота $\delta A = p dV$.

За визначенням теплоємність - це кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання визначеної маси m газу на $1K$:

$$c = \frac{\delta Q}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{\delta A}{dT}; \quad (1.3)$$

Із рівняння (1.3) слідує, що теплоємність може мати різні значення у залежності від способу нагрівання газу, тому що одному і тому самому значенню dT можуть відповідати різні значення dU і δA .

Розглянемо основні процеси, що протікають в ідеальному газі, узятому в кількості 1 моль, при зміні температури. Кількість теплоти, необхідної для нагрівання 1 моль газу на $1K$, називається молярною теплоємністю:

$$C = \frac{dQ}{\frac{m}{\mu} dT}. \quad (1.4)$$

При ізохоричному процесі $V = \text{const}$, $\delta A = 0$, і з (1.1), (1.2) слідує, що молярна теплоємність

$$C_v = \frac{du}{dT}, \quad (1.5)$$

тобто молярна теплоємність визначається тільки зміною **внутрішньої енергії** при зміні температури.

При ізобаричному процесі $p = \text{Const}$, молярна теплоємність

$$C_p = \frac{dU}{dT} + P \frac{dV}{dT}, \quad (1.6)$$

тобто залежить не тільки від зміни внутрішньої енергії, але і від роботи, що виконується газом.

Виразимо роботу PdV через зміну температури газу. Диференціюючи рівняння газового стану, записане, для 1 моль, одержуємо:

$$PdV + VdP = RdT. \quad (1.7)$$

Оскільки $P = \text{const}$, $dP = 0$, тому

$$PdV = RdT. \quad (1.8)$$

Заміняючи dU у рівнянні (1.6) через $CVdT$ одержуємо

$$C_p = C_v + R. \quad (1.9)$$

З рівняння (1.8) видно, що універсальна газова стала чисельно дорівнює роботі, яку виконує 1 моль газу при ізобаричному нагріванні на 1 К.

При ізотермічному процесі $T = \text{const}$, тому в (1.2) уся теплота, що надається, витрачається на роботу, а внутрішня енергія газу залишається сталою: $\delta Q = \delta A$.

Адіабатичним називається процес, що протікає без теплообміну з навколишнім середовищем, тому $\delta Q = 0$, і перший початок термодинаміки для цього процесу буде мати наступний вигляд:

$$\delta A = -dU, \quad (1.10)$$

тобто в адіабатичному процесі при розширенні, чи стиску газу робота визначається зміною його внутрішньої енергії. Одержимо рівняння, що описує адіабатичний процес (рівняння Пуассона). Для цього замінимо в рівнянні (1.10) $\delta A = PdV$ $dU = CVdT$

$$PdV = -CVdT. \quad (1.11)$$

Розділивши рівняння (1.7) на (1.11) почленно, з врахуванням (1.9) одержимо:

$$1 + \frac{V}{P} \frac{dp}{dV} = -\frac{C_p - C_v}{C_v},$$

або

$$\frac{dP}{P} = -\gamma \frac{dV}{V}, \quad (1.12)$$

де γ - показник адіабати, $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

Інтегруючи і потенціюючи (1.12), одержуємо рівняння Пуассона:

$$PV^\gamma = \text{const}. \quad (1.13)$$

Показник адіабати $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ залежить від числа атомів у молекулі газу і може бути виражений

через число ступенів вільностей i . Тому що $C_p = \frac{i+2}{2}R$, а $C_v = \frac{i}{2}R$, то $\gamma = \frac{i+2}{i}$.

Опис установки та теорії методу визначення

Установка (мал.1.1) складається зі скляного балона, з'єднаного з манометром і насосом. Кран K_1 з'єднує балон з навколишнім середовищем.

У балон A накачується повітря до визначеного тиску за допомогою мікропроцесора, при цьому температура повітря в балоні трохи збільшується. У результаті теплообміну через 2-3 хв температура повітря в балоні зрівняється з температурою навколишнього середовища.

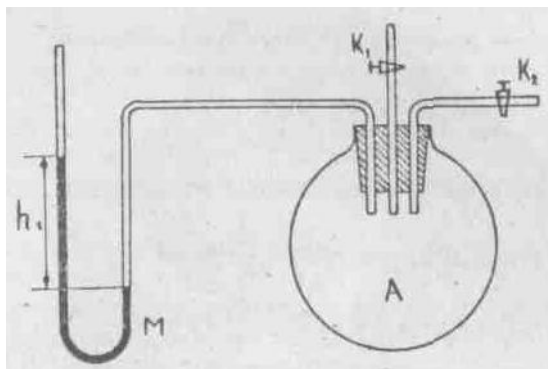


Рис.1.1

Стан повітря в балоні буде характеризуватися температурою T_1 і тиском P_1 , причому

$$P_1 = P_0 + h_1. \quad (1.14)$$

де P_0 - атмосферний тиск, мм рт.ст.;

h_1 - різниця рівнів у манометрі, мм рт.ст.

Якщо відкрити кран K_1 , то тиск повітря в балоні буде зменшуватися і стане рівним P_0 . Якщо цей процес провести досить швидко, то він буде близький до адіабатичного. При адіабатичному розширенні повітря охолodиться до температури T_2 . Це буде другий стан повітря.

Якщо закрити кран K_1 відразу по досягненні в балоні тиску P_0 , то тиск у судині надалі буде зростати доти, поки температура повітря не стане рівної T_1 . Третій стан буде характеризуватися температурою T_1 і тиском P_2 ;

$$P_2 = P_0 + h_2. \quad (1.15)$$

Тому що перехід із другого стану до третього відбувся без зміни об'єму, то можна застосувати закон Шарля:

$$\frac{P_2}{T_1} = \frac{P_0}{T_2} \quad (1.16)$$

Застосуємо рівняння Пуассона до переходу з першого в другий стан:

$$\left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma} \quad (1.17)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (1.15) і (1.16), одержуємо

$$\gamma = \frac{\lg P_1 - \lg P_0}{\lg P_1 - \lg P_2} \quad (1.18)$$

Разкладемо $\lg P_1$ і $\lg P_2$, у ряд Тейлора, обмежившись двома першими членами:

$$\lg P_1 = \lg(P_0 + h_1) = \lg P_0 + (h_1/P_0) \lg e + \dots$$

;

$$\lg P_2 = \lg(P_0 + h_2) = \lg P_0 + h_2/P_0 \lg e + \dots;$$

Підставляючи ці значення у формулу (1.18), одержуємо:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (1.19)$$

Порядок виконання роботи

1. Закрити кран K_1 і накачати в балон повітря за допомогою мікропроцесора.
2. Записати різницю тисків h_1 у обох колінах манометра.
3. Відкрити кран K_1 , і в той момент, коли рівні рідини в обох колінах манометра зрівняються, кран швидко закрити. Зачекавши 2-3 хв., вимірити надлишковий тиск h_2 (різницю рівнів рідини у обох колінах).
4. Дослід повторити 7-9 разів при різних значеннях h_1 . Результати вимірів занести в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

Тиск мм. вод. ст.	Номер досліджу							
h_1								
h_2								
γ								

5. За формулою (1.19) обчислити значення γ для кожного досліджу.
6. Обчислити абсолютну і відносну похибки вимірів.

Контрольні запитання

1. Який процес називається адіабатичним? Виведіть рівняння Пуассона.

2. Що називається молярною теплоємністю; питомою теплоємністю? Як зв'язані молярна і питома теплоємності?
3. Чому C_p більша C_v ? Який фізичний зміст універсальної газової сталої?
4. Як і чому змінюється температура газу в балоні під час досліду?
5. Що таке число ступенів вільностей? Як це число зв'язане з γ ? Враховуючи, що повітря - двохатомний газ, обчислити теоретичне значення γ та порівняти його з дослідним значенням.

Лабораторна робота Т-2

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКІСТИ І СЕРЕДНЯ ДОВЖИНА ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ МОЛЕКУЛ ГАЗА

Короткі теоретичні відомості

В усіх газах, а також рідинах, при русі одних шарів щодо інших виникають сили внутрішнього тертя (в'язкості).

Виникнення сил внутрішнього тертя можна пояснити на основі молекулярно-кінетичних уявлень.

Нехай один шар газу має швидкість v_1 , а інший - v_2 (рис.2.1) Молекули швидкого шару, переходячи в повільний шар, будуть його прискорювати. Навпаки, молекули повільного шару, переходячи у швидкий, будуть його гальмувати. Таким чином, між шарами виникають сили внутрішнього тертя, що обумовлені переносом імпульсу окремими молекулами газу.

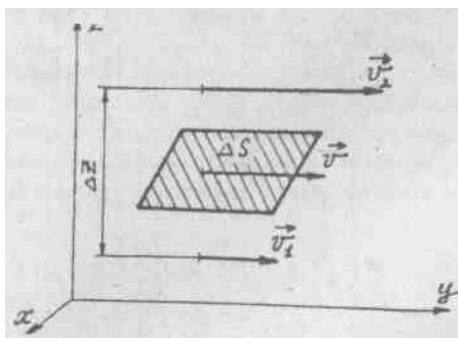


Рис.2.1

Теорія і дослід показують, що сила внутрішнього тертя визначається:

$$F = \eta \left(\frac{\Delta v}{\Delta Z} \right) \Delta S, \quad (2.1)$$

де η - коефіцієнт динамічної в'язкості (внутрішнього тертя);

$\Delta v = v_2 - v_1$ - різниця швидкостей двох шарів газу;

ΔZ - відстань між шарами; ΔS - площа зіткнення шарів газу;

$\frac{\Delta v}{\Delta Z}$ — градієнт швидкості - величина, що показує, як швидко міняється швидкість газу при переході від шару до шару.

Якщо у формулі (2.1) прийняти $\frac{\Delta v}{\Delta Z} = I$; $\Delta S = 1$ то $|F| = \eta$, тобто коефіцієнт динамічної в'язкості чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, що виникає на кожному одиницю площі поверхні дотику двох шарів, що рухаються відносно один одного з градієнтом швидкості, рівним одиниці.

У системі СІ розмірність $\eta = \text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$; $[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$. У системі СГС в'язкість вимірюється в пуазах (1 пуаз = 0,1 Па·с).

Крім коефіцієнта динамічної в'язкості, часто використовують кінематичну в'язкість

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (2.2)$$

де ρ - густина газу;

Одиниця кінематичної в'язкості в СІ.- квадратний метр на секунду [$\text{м}^2/\text{с}$].

Якщо газ (чи рідина) протікає через капіляр, то об'єм газу, що пройшов за час t , визначається формулою Пуазейля:

$$V = \frac{1}{\eta} \frac{\pi r^4}{8l} \Delta P t, \quad (2.3)$$

де r - радіус капіляра; l - довжина капіляра; ΔP - різниця тиску на кінцях капіляра.

Формула (2.3) використовується в даній роботі для визначення коефіцієнта в'язкості повітря.

Молекули повітря, знаходячись у стані безупинного хаотичного руху, зіштовхуються між собою. Відстань, що проходить молекула між двома послідовними зіткненнями, називається довжиною вільного пробігу. Відповідно до молекулярно-кінетичної теорії між в'язкістю і середньою довжиною вільного пробігу існує залежність:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle, \quad (2.4)$$

де $\langle v \rangle$ - середньоарифметична швидкість молекул; $\langle \lambda \rangle$ - середня довжина вільного пробігу молекул.

Більш детальний вивід формули (2.4), який враховує, що розподіл швидкостей молекул відповідає закону Максвелла, приводить до того ж виразу, але множник $\frac{1}{3}$ замінюється іншим коефіцієнтом. Для повітря цей коефіцієнт дорівнює $\frac{1}{2}$. Отже, формула (2.4) набуває вигляду:

$$\eta = \frac{1}{2} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \quad (2.4a)$$

З формули (2.4a) витікає, що:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{2\lambda}{\rho \langle v \rangle} \quad (2.5)$$

Формула (2.5) використовується для визначення довжини вільного пробігу молекул повітря. Якщо відома температура, то швидкість молекул можна визначити за формулою:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}, \quad (2.6)$$

де R - універсальна газова стала ($R \approx 8,31$ Дж/(моль. К))

μ - молекулярна маса газу.

Опис методу та установки для визначення в'язкості повітря

Установка для визначення динамічної в'язкості повітря схематично зображена на рис.2.2.

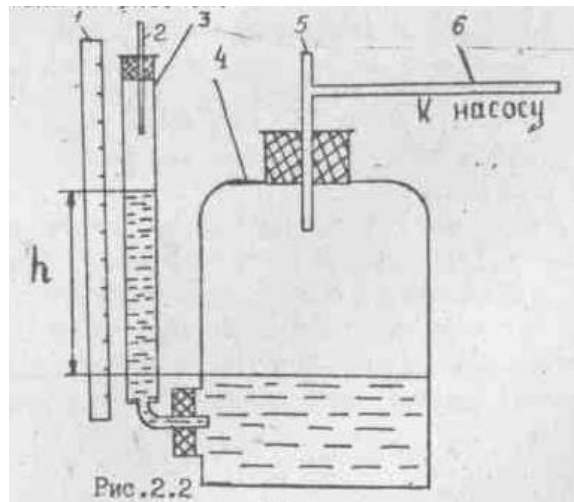


Рис. 2.2

У верхній частині бюретки 3 герметично закріплений вузький капіляр 2, через який протікає повітря. Поруч з бюреткою встановлена шкала I, по якій визначається висота рівня рідини. Унизу бюретка з'єднана гумовим шлангом із широкою посудиною 4, у який наливається вода. Через трійник посудина з'єднана з насосом 6 і атмосферою (отвір 5).

За допомогою насоса при закритому отворі 5 можна перегнати воду в бюретку. Якщо відкрити отвір, то вода буде витікати з бюретки в посудину. На місце води через капіляр буде надходити повітря. Об'єм повітря, що надходить, буде дорівнювати об'єму води, що витікає.

При рівномірному витіканні води сумарний тиск повітря і води в бюретці на рівні рідини в посудині повинен бути рівним атмосферному:

$$P_1 + \rho_1 g h = P_{\text{атм}}, \quad (2.7)$$

де P_1 - тиск газу в бюретці; $\rho_1 g h$ - тиск стовпа води.

З формули (2.7) витікає, що $P_1 = P_{\text{атм}} - \rho_1 g h$.

Різниця тисків на кінцях капіляра:

$$\Delta P = P_{\text{атм}} - P_1 = P_{\text{атм}} + \rho g h - P_{\text{атм}} = \rho g h, \quad (2.8)$$

де ρ - густина води ($\rho = 10^3$ кг/м³); h - висота рівня води в бюретці.

Оскільки при витіканні води висота рівня змінюється, варто взяти середню висоту рівнів на початку і кінці досліду.

Визначивши за формулою (2.8) різницю тисків на кінцях капіляра, можна за формулою (2.3) обчислити коефіцієнт в'язкості повітря. Потім за формулі (2.5) знайти довжину вільного пробігу молекул повітря.

Порядок виконання роботи

1. Закрити отвір 5 (див.рис.2.2) і за допомогою насоса перегнати частину води із судини в бюретку так, щоб рівень води в бюретці досяг висоти 45 см за шкалою 1. При цьому необхідно стежити, щоб вода не потрапила в капіляр.

2. Відкрити отвір 5 і при проходженні рівня води через вибрану поділку бюретки пустити в хід секундомір. Вимірити час витікання 2 см^3 води. За шкалою лінійки визначити середню висоту рівня в бюретці під час досліду. Наприклад, якщо секундомір був пущений у момент проходження рівня через 12-у поділку бюретки, а зупинений при проходженні через 14-у поділку, необхідно взяти висоту, що відповідає 13-ій поділці бюретки.

3. Дослід повторити тричі для трьох різних висот. Результати вимірів занести в таблицю 2.1

Таблиця 2.1

Номер досліду	$h_1, \text{м}$	$h_2, \text{м}$	$h_3, \text{м}$	$\langle h \rangle, \text{м}$	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$\langle t \rangle, \text{с}$	$\eta, \text{Па}$	$\langle \eta \rangle, \text{м}$	$\langle v \rangle, \text{м/с}$
1											
2											
3											
Сер.											

4. Обчислити середній час витікання 2 см^3 води від того самого рівня: $\langle t \rangle = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$, та за

формулою (2.8) визначити різниця тисків на кінцях капіляра $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$, для відповідних висот рівнів води h_1, h_2, h_3 .

5. За формулою (2.3) обчислити коефіцієнт в'язкості повітря η_1, η_2, η_3 та $\langle \eta \rangle$. Порівняти з табличним значенням.

6. Визначити за формулою (2.6) середню арифметичну швидкість молекул повітря, взявши молярну масу повітря $\mu = 0,029 \text{ кг/моль}$.

7. За формулою (2.5) визначити середню довжину вільного пробігу молекул повітря. Густина повітря при кімнатній температурі вважати рівною $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Контрольні запитання

1. Як пояснити виникнення сил внутрішнього тертя з погляду молекулярно-кінетичної теорії?

2. Від чого залежить сила внутрішнього тертя? Одержати одиницю коефіцієнта в'язкості у СІ.

4. Яким методом визначається коефіцієнт в'язкості в лабораторній роботі?

5. Що таке довжина вільного пробігу? Записати залежність між коефіцієнтом в'язкості та довжиною вільного пробігу молекул.

6. Вивести формулу для визначення різниці тисків на кінцях капіляра.

Лабораторна робота Т-3

ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ЕНТРОПІЇ В НЕІЗОЛЬОВАНІЙ СИСТЕМІ

Мета роботи - визначити збільшення ентропії при плавленні олова.

Короткі теоретичні відомості

Відношення теплоти Q , отриманої тілом в ізотермічному процесі, до температури T "джерела теплоти" називають приведеною кількістю теплоти:

$$Q^* = \frac{Q}{T}$$

(3.1)

Приведена кількість теплоти, надана тілу на нескінченно малій ділянці процесу, дорівнює

$$\frac{dQ}{T}$$

Теоретичний аналіз показує, що для будь-якого оборотного кругового процесу сума приведених кількостей теплоти дорівнює нулю:

$$\oint \left(\frac{dQ}{T} \right) = 0 \quad (3.2)$$

З рівності нулю інтеграла (3.2), взятого по замкнутому контуру, випливає, що подінтегральний вираз в (3.2), тобто приведена кількість теплоти на малій ділянці процесу, є повний диференціал деякої функції, що визначається тільки станом системи і не залежить від шляху, по якому система перейшла в цей стан:

$$\frac{dQ}{T} = dS.$$

Функція стану, диференціалом якої є $\frac{dQ}{T}$, називається **ентропією** і позначається S .

З формули (3.2) випливає, що для оборотних процесів зміна ентропії

$$\Delta S = 0 \quad (3.3)$$

Можна довести, що ентропія системи, що робить необоротний цикл, зростає:

$$\Delta S > 0. \quad (3.4)$$

Вирази (3.3) і (3.4) справедливі тільки для замкнутих (ізолюваних) систем. Якщо ж система обмінюється теплотою із зовнішнім середовищем, то величина S може бути як позитивною, так і негативною, у залежності від характеру теплообміну з навколишнім середовищем.

Якщо система робить рівноважний перехід зі стану 1, що характеризується параметрами P_1, V_1, T_1 у стан 2 з параметрами P_2, V_2, T_2 , то зміна ентропії системи може бути обчислена за формулою:

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (3.5)$$

Опис методу та установки для вивчення зміни ентропії в неізольованій системі

У даній роботі визначається зміна ентропії, що спостерігається при нагріванні і плавленні легкоплавкої речовини (олово, свинець, індій).

Якщо початкова температура речовини дорівнює кімнатній T_k , то при підведенні теплоти речовина спочатку нагрівається до температури плавлення T_n . Зміна ентропії на цьому етапі процесу:

$$\Delta S_1 = cm \ln \frac{T_n}{T_k}, \quad (3.6)$$

де c - питома теплоємність речовини; m - маса речовини.

На другому етапі (етапі плавлення) зміна ентропії

$$\Delta S_2 = \frac{\lambda m}{T}, \quad (3.7)$$

де λ - питома теплота плавлення речовини.

Повна зміна ентропії буде

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = cm \ln \frac{T_n}{T_k} + \frac{\lambda m}{T_n} \quad (3.8)$$

Оскільки розглянутий процес супроводжується припливом теплоти в систему, то зміна ентропії є величина додатня.

Установка для визначення зміни ентропії зображена на рис. 3.1.

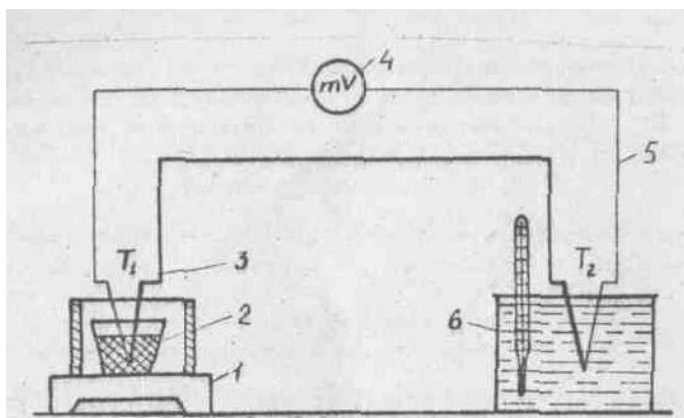


Рис.3.1

Досліджувана речовина закладається в тигель 2 і нагрівається лабораторною електропечкою 1.

Температура плавлення речовини (олово, свинець, індій) вимірюється диференціальною термопарою. Вона складається з двох термопар 3 та 5, включених "назустріч" так, що показання мілівольметра 4 дорівнюють різниці термо-е. р. с.

Температура T_2 повинна бути сталою і відомою величиною. Це досягається тим, що спай термопар 5 поміщується в посудину з олією (мастилом), температура якого контролюється ртутним термометром. Температури T_2 та T_1 термопар 5 враховується при визначенні термо-е.р.с. Температура співу T_1 визначається за допомогою градуювальної кривої диференціальної термопар.

Порядок виконання роботи

1. Після ознайомлення з установкою включити електропіч.
2. Установити на електропіч один з тиглів з досліджуваною речовиною і довести до рідкого стану.
3. Виключити електропіч, одночасно включивши секундомір. Зняти показання мілівольтметра через кожну хвилину і дані занести в таблицю.

Досліди	Результати вимірів	
Нагрів	$T, ^\circ\text{C}$	
	$t, \text{с}$	
Охолодження	$T, ^\circ\text{C}$	
	$t, \text{с}$	

Виміри варто робити доти, поки покази мілівольтметра, досягши спочатку деякого постійного значення, не почнуть зменшуватися.

4. Знову включити електропіч і зняти криву нагрівання речовини, довівши її до рідкого стану. Результати вимірів занести в таблицю.

5. Побудувати графіки $T = f(t)$ плавлення і кристалізації на одній координатній сітці. По горизонтальних ділянках обох кривих визначити середнє значення температури фазового переходу (плавлення або кристалізації) речовини.

6. За результатами дослідів і значенням C та λ (вказаним на табличці установки) за допомогою формули (3.7) обчислити зміну ентропії речовини в розглянутому процесі.

7. Повторити досліди за п. 2-5 для іншої речовини.

Контрольні запитання

1. Сформулювати другий початок термодинаміки.
2. Які процеси називають оборотними і необоротними, рівноважними і нерівноважними? •
3. Пояснити статистичний зміст ентропії.
4. Які перетворення називаються фазовими перетвореннями 1-го роду, 2-го роду?

ШВИДКОСТЯМИ

Мета роботи - дослідити розподіл електронів у вакуумі по швидкостях, а також визначити температуру електронного газу.

4.1. Короткі теоретичні відомості

Молекули газу знаходяться в стані безупинного хаотичного руху. При цьому вони рухаються з різними швидкостями. Закон розподілу молекул за швидкостями був вперше отриманий Максвеллом.

Користаючись теорією ймовірностей, він знайшов вираз для числа молекул Δn , швидкості яких лежать в інтервалі від деякої заданої швидкості v до $v + \Delta v$.

Закон Максвелла для розподілу молекул за швидкостями має вигляд:

$$f(v) = \frac{\Delta n}{n \Delta v} = \left(\frac{m}{2\pi k T} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} 4\pi^2 v^2,$$

де m - маса молекули; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; (k - стала Больцмана)

T - абсолютна температура; v - швидкість молекули.

Величина $f(v) = \frac{\Delta n}{n \Delta v}$ називається функцією розподілу.

График розподілу молекул по швидкостях зображений на рис.4.1

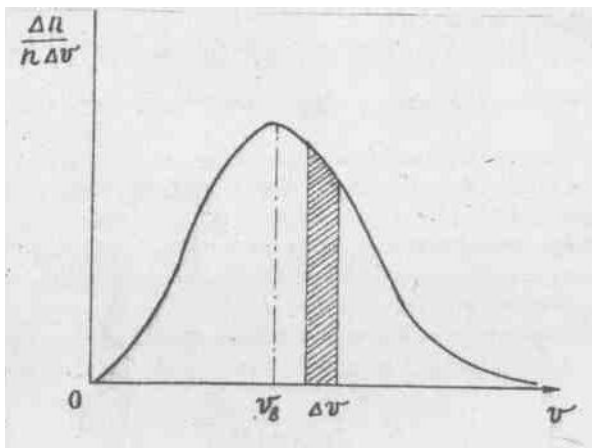


Рис. 4.1

Частка молекул газу $\frac{\Delta n}{n}$, швидкості, яких лежать в інтервалі від v до $v + \Delta v$, чисельно дорівнює площі заштрихованої криволінійної трапеції. Уся площа, обмежена кривою розподілу і віссю абсцис, чисельно дорівнює частці молекул, швидкості яких мають значення від 0 до ∞ . Тому що цій умові задовольняють усі n молекул, то розглянута площа повинна дорівнювати одиниці.

Швидкість, що відповідає максимуму кривої розподілу, називається найбільш ймовірною швидкістю. Ця швидкість визначається виразом:

$$v_u = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}},$$

де R - універсальна газова стала; μ - маса одного моля газу.

Знаючи найбільш ймовірну швидкість, можна обчислити абсолютну температуру:

$$T = \frac{mv_u^2}{2k} = \frac{\mu v_u^2}{2R} \quad (4.3)$$

Опис методу та установки для дослідження розподілу електронів за швидкостями

Розподіл Максвелла (4.1) справедливий не тільки для молекул звичайного газу, але і для газу вільних електронів.

Для виміру швидкостей електронів використовується метод затримуючого потенціалу. Суть методу полягає в наступному. В електронній лампі розпечений катод випускає електрони, що летять до анода. При цьому виникає електричний струм. Якщо між анодом до катодом створити гальмуюче поле, то при збільшенні напруги струм буде зменшуватися.

Очевидно, досягати анода будуть тільки ті електрони, у яких кінетична енергія перевищує (чи дорівнює) роботі сил гальмуючого поля:

$$\frac{mv_x^2}{2} \geq eU, \quad (4.4)$$

де m - маса електрона ($m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг); v - швидкість електрона;

e - заряд електрона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); U - гальмуюча напруга.

З формули (4.4) слідує:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (4.5)$$

За формулою (4.5) визначають мінімальну швидкість електронів, які ще можуть досягти анода. Поступово збільшуючи напругу, можна гальмувати більш швидкі електрони. Якщо при цьому вимірювати зменшення сили струму, то можна визначити відносне число електронів, швидкість яких менше величини, обумовленою формулою (4.5).

Схема установки: для дослідження розподілу електронів за швидкостями приведена на рис. 4.2.

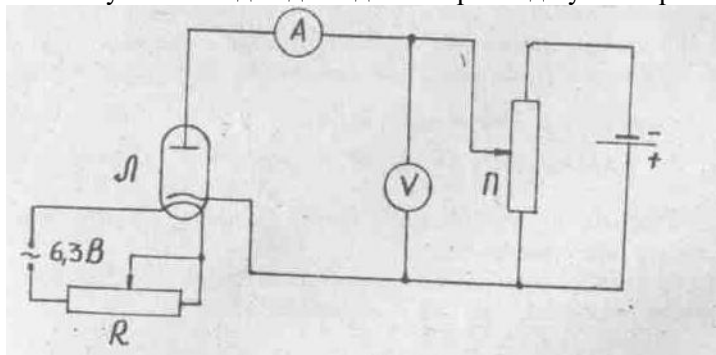


Рис. 4.2

Катод електронної лампи Л з'єднаний з позитивним полюсом джерела постійного струму, тому між катодом і анодом створюється гальмуюче поле.

Напруга між катодом і анодом регулюється потенціометром P і вимірюється мілівольтметром V . Анодний струм вимірюється мікроамперметром A . Температура катода може бути змінена реостатом R , який регулює струм розжарення.

Порядок виконання роботи

1. Включити установку.
2. Потенціометром установити напругу, рівну нулю.
3. Установити за допомогою реостата силу струму в ланцюзі розжарення 100 мкА.
4. Потенціометром по чергові встановити напруги: 0; 0,01; 0,04; 0,09; 0,16; 0,25; 0,36; 0,49; 0,64 В.

Вимірити відповідні цим напругам струми анода. Результати вимірів записати в наступну таблицю:

Номер досліду	U, В	I, мкА	ΔI , мкА	$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$, м/з
1	0			
2	0,01			
3	0,04			
...	...			

5. Обчислити зменшення сили струму:

$$\Delta I_1 = I_0 - I_1; \Delta I_2 = I_1 - I_2; \Delta I_3 = I_2 - I_3; \text{ і т.д.}$$

6. За формулою (4.5) обчислити швидкості електронів, що відповідають заданим напругам. Результати обчислень записати в таблицю.

7. Побудувати графік залежності зменшення сили струму (кількості електронів, що приходять в одиницю часу на анод) від швидкості. Масштаб, який рекомендується: 1 мкА - 2 мм; $6 \cdot 10^3$ м/с - 1 мм.

8. За графіком визначити найбільш ймовірну швидкість електронів.
9. За формулою (4.3) обчислити температуру електронного газу.

Контрольні запитання

1. Що таке найбільш ймовірна швидкість? Як вона залежить від температури?
2. Накреслити на одному малюнку криві розподілу Максвелла для двох різних температур.
3. У скільки разів найбільш ймовірна швидкість молекул азоту менше швидкості електронів при тій же температурі?

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

Короткі теоретичні відомості

При русі рідини між її шарами виникають сили внутрішнього тертя (в'язкості).

Нехай швидкість рідини в одному шарі дорівнює U_1 (рис.5.), а в іншому шарі - U_2 , відстань між шарами ΔZ , площа дотику шарів рідини ΔS . У цьому випадку сила внутрішнього тертя визначається за формулою:

$$F_{Tp} = \eta \left(\frac{\Delta v}{\Delta Z} \right) \Delta S, \quad (5.1)$$

де η - коефіцієнт динамічної в'язкості; $\frac{\Delta v}{\Delta Z}$ - градієнт швидкості.

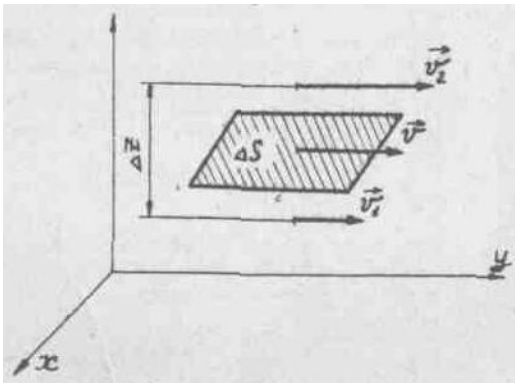


Рис.5.1

Якщо у формулі (5.1) покласти $\Delta S = 1$, $\frac{\Delta v}{\Delta Z} = 1$ то $|F| = |\eta|$, тобто коефіцієнт динамічної в'язкості чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, що виникає на кожній одиниці поверхні дотику двох шарів, що рухаються відносно один одного, із градієнтом швидкості, рівним одиниці.

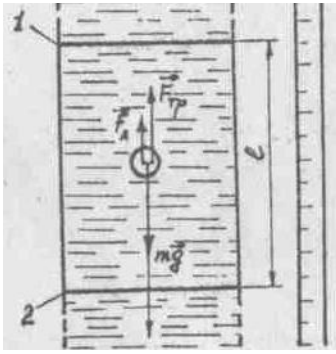
Формула (5.1) є вихідної для одержання виразу сили внутрішнього тертя в кожній конкретній задачі. Для випадку кулі малого діаметра (поперечний розмір середовища, у якому рухається куля, більший діаметра кулі) Стоксом отриманий вираз (закон Стокса):

$$F_{тер} = 6\pi\eta r v, \quad (5.2)$$

де η - коефіцієнт динамічної в'язкості; r - радіус кульки; v - швидкість руху.

Опис методу та установки для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості рідини

У даній роботі для визначення в'язкості використовується метод Стокса. Метод полягає в наступному. Якщо маленька куля падає в посудині із в'язкою рідиною, то неї діють три сили: сила тягіння $\vec{P}$, спрямована вниз, архімедова сила $\vec{F}_A$, спрямована вгору, і сила внутрішнього тертя $\vec{F}_{тер}$, спрямована проти руху кульки (рис.5.2)



Відповідно з другим законом Ньютона рівняння руху кульки в проекції на вісь x :

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{\sum F_{ix}}{m} = \frac{mg - F_A - F_{TEP}}{m} \quad (5.3)$$

З огляду на те, що $v_x = v$ і врахувавши вираз (5.2) для сили внутрішнього тертя, одержуємо:

$$m \frac{dv}{dt} + 6\pi\eta r v = mg - F_A \quad (5.4)$$

Рівняння (5.4) легко проінтегрувати. Використовуючи позначення: $\alpha = 6\pi\eta r$; $mg - F_A = F$, маємо:

$$m \frac{dv}{F - \alpha v} = dt; \quad \int_0^v \frac{dv}{F - \alpha v} = \frac{1}{m} \int_0^t dt, \quad \text{тому}$$

$$-\frac{1}{\alpha} \ln F - \alpha v \Big|_0^v = \frac{1}{m} t, \quad \text{або} \quad \ln \frac{F - \alpha v}{F} = -\frac{\alpha}{m} t.$$

Потенціюючи, одержуємо

$$v = \frac{F}{\alpha} \left(1 - e^{-\frac{\alpha}{m} t} \right) \quad \text{або} \quad v = \frac{mg - F_A}{6\pi\eta r} \left(1 - e^{-\frac{6\pi\eta r t}{m}} \right) \quad (5.5)$$

З (5.5) видно, що швидкість кульки зростає до деякого сталого значення, яке потім вже не змінюється під час руху (усталена швидкість):

$$v_{уст} = \frac{mg - F_A}{6\pi\eta r}, \quad (5.6)$$

при цьому має місце рівновага сил:

$$mg = F_A + F_{TEP} \quad (5.7)$$

У даній лабораторній роботі для рідини і діаметра кульки, які використовуються, процес встановлення швидкості відбувається дуже швидко, і на відстані $x \approx 10$ мм від верхнього рівня рідини $v = v_{уст}$ із точністю $\approx 0,1\%$.

Використовуючи (5.7), можна знайти коефіцієнт динамічної в'язкості. Для цього силу тяжіння і силу Архімеда необхідно виразити через густину матеріалу кульки і рідини.

Для сили тяжіння маємо:

$$P = mg = \rho V g = \rho \frac{4}{3} \pi r^3 g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g,$$

де g - прискорення вільного падіння; ρ - густина матеріалу кульки.

Для Архімедової сили, рівній вазі рідини в об'ємі кулі, маємо:

$$F_A = m_1 g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g,$$

де ρ_1 - густина рідини.

Підставляючи у формулу (5.7) значення сили внутрішнього тертя (5.2), Архімедової сили і сили тяжіння, одержуємо

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

Звідси коефіцієнт динамічної в'язкості

$$\eta = \frac{2 \rho + \rho_1 r^2 g}{9v}$$

З огляду на те, що при рівномірному русі $v = \frac{l}{t}$

де l - пройдений шлях; t - час, одержуємо:

$$\eta = \frac{2 \rho + \rho_1 r^2 g t}{9l} \quad (5.8)$$

де ρ, ρ_1 - густина відповідно кульки і рідини, кг/м³;

r - радіус кульки, м; g - 9,8 м/с²; t - час, с; l - шлях, пройдений кулькою, м.

Установка для визначення в'язкості за методом Стокса зображена на рис.5.2.

Установка складається з високого скляного циліндра, наповненого досліджуваною рідиною і яка має дві горизонтальні мітки 1 і 2, розташовані одна від одної на відстані l . Верхня мітка розташована на 8-10 см нижче рівня рідини, де рух кульки стає рівномірним.

У верхній частині циліндра розташований отвір, через який кидають кульку. Відстань між мітками виміряється лінійкою, час падіння кульки - секундоміром.

Порядок виконання роботи

1. Визначити температуру досліджуваної рідини.
2. Вимірити мікрометром діаметр кульки в різних місцях. Для кожної кульки виміри необхідно виконати не менше трьох разів і записати середнє значення радіуса кульки.
3. Опустити кульку в циліндр і виміряти час падіння кульки між двома мітками. Дослід повторити три рази з різними кульками.
4. лінійкою вимірити відстань між мітками l . Результати вимірів записати в наступну в таблицю 5.1.

Номер досліду	Відстань між мітками на циліндрі l , м	Час руху кульки між мітками t , с	Діаметр кульки d , м	Радіус кульки r , м
1				
2				
3				

5. За формулою (5.6) визначити коефіцієнт в'язкості для кожного досліду. Визначити середнє значення в'язкості для трьох дослідів:

$$\langle \eta \rangle = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3}{3},$$

а також середні абсолютну і відносну похибки.

Контрольні запитання

1. У яких одиницях вимірюється коефіцієнт в'язкості?
2. Які сили діють на кульку, що падає у в'язкій рідині? Записати другий закон Ньютона для руху кульки.
3. Як залежить сила внутрішнього тертя від швидкості руху кульки?
4. Вивести формулу (5.8).
5. При падінні кульки її потенційна енергія зменшується, а кінетична залишається постійною, тому що кулька рухається рівномірно. У яку енергію переходить потенціальна енергія кульки?

ЛІТЕРАТУРА

1. Савельєв И.В. Курс загальної фізики. - М.: Наука, 1977.-Т.І: Механіка. Молекулярна фізика. - 415 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс фізики. -М.: Высш.шк., 1973.-Т.І. - 384 с. .
3. Трофимова Т.Н. Курс фізики. - М.: Высш.шк., 1965. - 432 с.
4. Сивухин Д.В. Загальний курс фізики. - У.: Наука, 1974. - Т.І: Механіка. - 519 с.
5. Сивухин Д.В. Загальний курс фізики. - М.: Наука, 1978. - Т.2: Термодинаміка і молекулярна фізика. - 551 с.
6. Фізичний практикум. Механіка і молекулярна фізика /Під ред. В.И.Ивероной. - М.: Наука, 1967. _ 352 с.
7. Лабораторний практикум із загальної фізики /Під ред. Е.М.Гершензона, Н.Н.Малова. - М.: Освіта, 1965. - 351 с.
8. Евграфова Н.Н., Каган В.Л. Посібник до лабораторних робіт з фізики. - М.: Высш.шк., 1970. - 363 с.