

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФІЗИКА

Частина III. Молекулярна фізика і термодинаміка

Методичні вказівки до лабораторних робіт
для здобувачів вищої освіти
денної та заочної форми навчання

Затверджено
на засіданні кафедри вищої математики та
фізики
Протокол №2 від 31.08.2021 р.

Кропивницький - 2021

Фізика: Методичні вказівки до лабораторних робіт для здобувачів вищої освіти денної та заочної форми навчання/ Укл.:Гур'євська О.М., Якименко М.С. – Кропивницький: ЦНТУ, 2021.-26 с.

Укладачі:

Гур'євська Олександра Миколаївна – к.п.н., доцент;

Якименко Микола Сергійович – к.ф.- м.н., доцент.

Зміст

Лабораторна робота Т-1 ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСИНИ МОЛЯРНИХ ТЕПЛОЕМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ	4
Лабораторна робота Т-2 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКІСТИ І СЕРЕДНЯ ДОВЖИНА ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ МОЛЕКУЛ ГАЗА	8
Лабораторна робота Т-3 ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ЕНТРОПІЇ В НЕІЗОЛЬОВАНІЙ СИСТЕМІ	12
Лабораторна робота Т—4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОНІВ ПО ШВИДКОСТЯХ	15
Лабораторна робота Т-5 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА	18
Лабораторна робота Т-6 ВИВЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ БОЛЬЦМАНА НА МЕХАНІЧНІЙ МОДЕЛІ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗА	22
Література	26

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

Лабораторна робота Т-1 ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСИНИ МОЛЯРНИХ ТЕПЛОЕМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ

1.1. Короткі теоретичні зведення

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 d і на роботу δA , чинену системою проти зовнішніх сил:

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

де δA - елементарна робота, $\delta A = pdv$.

По визначенню теплоємність - це кількість теплоти, необхідне для нагрівання визначеної маси M газу на 1ДЮ :

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

З рівняння (1.3) видно, що теплоємність може мати різні значення, у залежності від способу нагрівання гага, тому що тому самому значенню d можуть відповідати різні значення d і δA .

Розглянемо основні процеси, що протікають в ідеальному газі, узятому в кількості 1 моль, при зміні температури. Кількість теплоти, необхідне для нагрівання 1 моль газу на 1ДЮ , 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) випливає, що молярна теплоємність

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

т.е. молярна теплоємність визначається тільки зміною внутрішньої енергії при зміні температури.

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

$$C_p = \frac{du}{dT} + p \frac{dv}{dT} \quad (1.6)$$

т.е. залежить не тільки від зміни внутрішньої енергії, але і від роботи, чиненої газом. Виразимо pd через зміну температури газу. Диференціюючи рівняння газового стану, записане для 1 моль, одержуємо

$$Pd + Vdp = Rd \quad (1.7)$$

Тому що $p = \text{const}$, $dp = 0$, тому

$$Pd=Rd \quad (1.8)$$

Заміняючи d у рівнянні (1.6) через Cvd , одержуємо

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

З рівняння (1.8) видно, що універсальна газова постійна чисельно дорівнює роботі, що робить 1 моль газу при ізобаричному нагріванні на 1 ДО.

При ізотермічному процесі $T=const$, тому в (1.2) усі підводима теплота витрачається на роботу, внутрішня енергія газу залишається постійної: $\delta Q = \delta A$.

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

$$\delta A = -du \quad (1.10)$$

тобто в адіабатичному процесі при чи розширенні стиску газу робота визначається зміною його внутрішньої енергії. Одержимо рівняння, що описує адіабатичний процес (рівняння Пуассона). Для цього заменим в рівнянні (1.10) $d = pd$ і $du=Cvd$

$$pdv=-Cvd. \quad (1.11)$$

Розділивши рівняння (1.7) на (I.II) почленно, з обліком (1.9) одержимо

$$1 + \frac{v}{p} \frac{dp}{dv} = - \frac{C_p - C_v}{C_v}$$

чи

$$\frac{dp}{p} = -\gamma \frac{dv}{v} \quad (1.12)$$

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

Інтегруючи і потенціюючи (1.12), одержуємо рівняння Пуассона:

$$p^\gamma=const. \quad (1.13)$$

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

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

$$\gamma = \frac{i+2}{i}.$$

1.2. Опис приладу і теорії методу визначення

Прилад (мал.1.1) складається зі скляного балона 4, з'єднаного з манометром і насосом. Кран DO_1 з'єднує балон з навколишнім середовищем.

У балон А накачується повітря до визначеного тиску, при цьому температура повітря в балоні небагато збільшується. У результаті теплообміну через 2-3 хв температура повітря в балоні зрівняється з температурою навколишнього середовища.

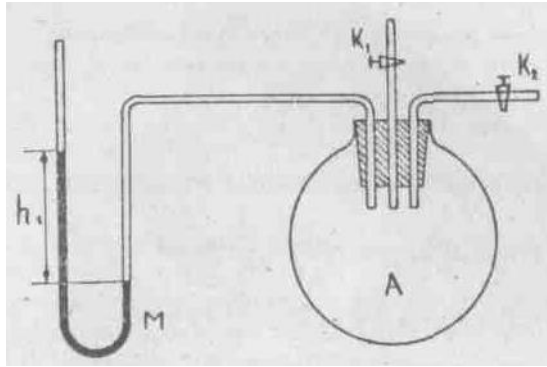


Рис.І.І

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, він буде близький до адіабатичного. При адіабатичному розширенні повітря остидне 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 обсягу, 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:

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

Вирішуючи спільно рівняння (1.15) і (1.16), одержуємо

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

Разложим $\lg P_1$ і $\lg P_2$, у ряд Тейлора, обмеживши двома першими членами:

$$\lg P_1 = \lg(P_0 + h_1) = \lg P_0 + \frac{h_1}{P_0} \lg e + \dots;$$

$$\lg P_2 = \lg(P_0 + h_2) = \lg P_0 + \frac{h_2}{P_0} \lg e + \dots;$$

Підставляючи ці значення у формулу (1.18), одержуємо.

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

Прилади і принадлежності: установка для визначення C_p/C_v ; насос.

1.3. Порядок виконання роботи

1. Відкрити кран K_2 (кран K_1 закритий), накачати в балон повітря, коли різниця рівнів у манометрі h_1 (у міліметрах водяного стовпа).

2. Відкрити кран K_1 , і в той момент, коли рівні рідини в обох колінах манометра зрівняються, кран бістро закрити. Виждавши 2-3 хв, вимірити надлишковий тиск h_2 .
- 3. Досвід повторити 7-9 разів при різних значеннях h . Дані занести в таблицю.

Обумовлені величини	Номер досліду							
h_1								
h_2								
γ								

4. По формулі (1.19) обчислити значення γ для кожного досвіду.
 5. Обчислити абсолютну і відносну погрішності вимірів.

1.4. Контрольні питання

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 більше C_v ? Фізичний зміст універсальної газової постійної.
4. Як і чому міняється температура газу в балоні при проведенні досвіду?
5. Що таке число ступенів волі? Як це число зв'язане з γ ? Вважаючи, що повітря - двоатомний газ, обчислити теоретичне значення γ порівняти з досвідченим значенням.

[1; 2; 5]

Лабораторна робота Т-2
 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКІСТИ І СЕРЕДНЯ
 ДОВЖИНА ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ МОЛЕКУЛ ГАЗА

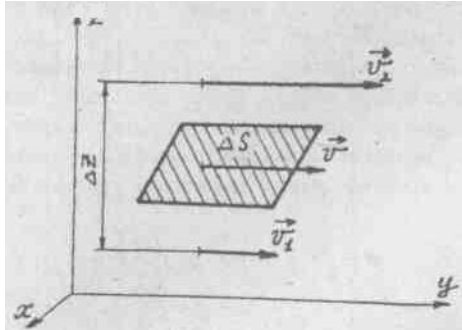
2.1. Короткі теоретичні зведення

В усіх газах /і рідинах/ при русі одних шарів щодо інших виникають сили внутрішнього тертя /в'язкості/.

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

Нехай один шар газу має швидкість V_1 , а іншої - V_2 /мал.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 досвід показують, що сила внутрішнього тертя

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

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/ покласти $\frac{\Delta V}{\Delta Z} = 1$; $\Delta S = 1$ то $|F| = \eta$, тобто коефіцієнт динамічної в'язкості чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, що виникає на кожній одиниці площі поверхні зіткнення двох шарів, що рухаються відносно

один одного з градієнтом швидкості, рівним одиниці.

У СИ розмірність $dim \eta = ML^{-1}T^{-1}$; $[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$. 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 - щільність газу;

Одиниця кінематичної в'язкості в СИ.- квадратний метр на секунду $[m^2/s]$, у СГС - стоці.

Якщо газ /чи рідина/ протікає через капіляр, то обсяг газу, що пройшов за час t , визначається формулою Пуазейля:

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

Формула 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 молекул 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.

Більш строгий висновок формули /2.4/, що враховує, що розподіл швидкостей молекул відповідає закону Максвелла, приводить до того ж вираження, але множник $\frac{1}{3}$ замінюється іншим коефіцієнтом. Для повітря цей коефіцієнт дорівнює $\frac{1}{2}$. Отже, формула /2.4/ примет вид

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

З формули /2.4a/ випливає, что

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

Формула /2.5/ використовується для визначення довжини вільного пробігу молекул повітря. Якщо відома температура, то ~ 57321 швидкість молекул можна визначити по формулі

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

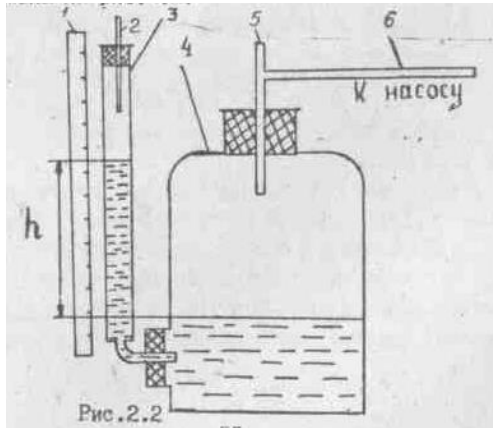
де R - універсальна газова постійна, $R \approx 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$

μ - молекулярна маса газу.

Прилади і приналежності: установка для визначення в'язкості повітря: секундомір.

2.2. Опис методу й установки для визначення в'язкості повітря

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



У верхній частині бюретки 3 герметично закріплений вузький капіляр 2, через який протікає повітря. Поруч з бюреткою встановлена шкала 1, по якій визначається висота рівня рідини. Унизу бюретка з'єднана гумовим шлангом із широкою судиною 4, у якій наливається вода. Через трійник судина з'єднана з гумовою грушею 6 і атмосферою /отвір 5/.

За допомогою насоса при закритому отворі 5 можна перегнати воду в бюретку. Якщо відкрити отвір, то вода буде випливати з бюретки в судину. На місце води через капіляр буде надходити повітря. Обсяг повітря, що надходить, „ буде дорівнює обсягу води, що випливає.

При сталому плинні сумарний тиск повітря і води в бюретці на рівні рідини в судині повинне бути дорівнює атмосферному:

$$P_1 + \rho_1 gh = P_{\text{атм}} \quad /2.7/$$

де P_1 - тиск газу в бюретці» $\rho_1 gh$ - тиск стовпа води.

З формули /2.7/ випливає, що $P_1 = P_{\text{атм}} - \rho_1 gh$ Різниця тисків на кінцях капіляра

$$\Delta P = P_{\text{атм}} - P_1 = P_{\text{атм}} - (P_{\text{атм}} - \rho_1 gh) = \rho_1 gh \quad /2.8/$$

де ρ_1 - щільність води, $\rho_1 = 10^3 \text{ кг/м}^3$; h - висота рівня води в бюретці.

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

Визначивши по формулі /2.8/ різниця тисків на кінцях капіляра, можна по формулі /2.3/ обчислити коефіцієнт в'язкості повітря. Потім по формулі /2.5/ знайти довжину вільного пробігу молекул повітря.

2.3. Порядок виконання роботи

1. Закрити отвір 5 (див. мал.2.2) і за допомогою насоса перегнати частина води із судини в бюретку так, щоб рівень води в бюретці досяг висоти 45 див по шкалі 1. При этом необхідно стежити, щоб вода не потрапила в капіляр.

2. Відкрити отвір 5 і при проходженні рівня води через намічений розподіл

бюретки пустити в хід секундомір. Вимірити час витікання 2 див³ води. По шкалі визначити середню висоту рівня в бюретці під час досвіду. Наприклад, якщо секундомір був пушений у момент проходження рівня через 12-і розподіл бюретки, а зупинений при проходженні через 14-і розподіл, варто узяти висоту відповідну 13-му розподілу бюретки.

Дослід повторити три рази, дані занести в таблицю.

Номер дослід у	h ₁ ,м	h ₂ ,м	h ₃ ,м	<h>,м	t ₁ ,с	t ₂ ,с	t ₃ ,с	<t>,с	η,Па с	<λ>,м	<υ>,м с ⁻¹
1											
2											
3											

Обчислити середній час витікання 2 див³ води від того самого рівня:

$$\langle t \rangle = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}.$$

3.. По формулі /2.8/ визначити різниця тисків на кінцях капіляра ΔP , а потім по формулі /2.3/ обчислити коефіцієнт в'язкості повітря. Порівняти з табличним значенням.

4. Приймавши молярну масу повітря $\mu = 0,029$ кг/моль, по формулі /2.6/ визначити середньоарифметичну швидкість молекул газу.

6. По формулі /2.5/ визначити середню довжину вільного пробігу молекул газу. Щільність повітря при кімнатній температурі вважати рівної 1,2 кг/м³.

2.4. Контрольні питання

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

2. Від чого залежить сила внутрішнього тертя? . 3. Одержати одиниці коефіцієнта в'язкості в СГС і СИ.

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

5. Що таке довжина вільного пробігу? Залежність між коефіцієнтом в'язкості і довжиною вільного пробігу молекул.

Г. Вивести формулу для визначення різниці тисків на кінцях капіляра,

[1;3]

Лабораторна робота Т-3 ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ЕНТРОПІЇ В НЕІЗОЛЬОВАНІЙ СИСТЕМІ

Цель роботи - визначити збільшення ентропії при плавленні олова.

3.1. Короткі теоретичні зведення

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

$$Q^* = \frac{Q}{T} \quad /3.1/$$

Приведена кількість теплоти, повідомлена тілу на нескінченно малій ділянці процесу, равно $\frac{dQ}{T}$.

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

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad /3.2/$$

З рівності нулю інтеграла /3.2/, узятого по замкнутому контурі, випливає, що подинтегральне вираження 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 прийшла 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

$$\Delta S = 0 /3.3$$

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

$$\Delta S > 0. \quad /3.4/$$

Вираження /3.3/ і /3.4/ справедливі тільки для замкнутих (ізолюваних) систем. Якщо ж система обмінюється теплотою з 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 обчислене по формулі:

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

3.2. Опис методу й установки для вивчення зміни ентропії в неізолюваній системі

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

Якщо первонаначально температура речовини раина кімнатної 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 величиною позитивною.

Установка для визначення зміни ентропії зображена на мал.3.1.

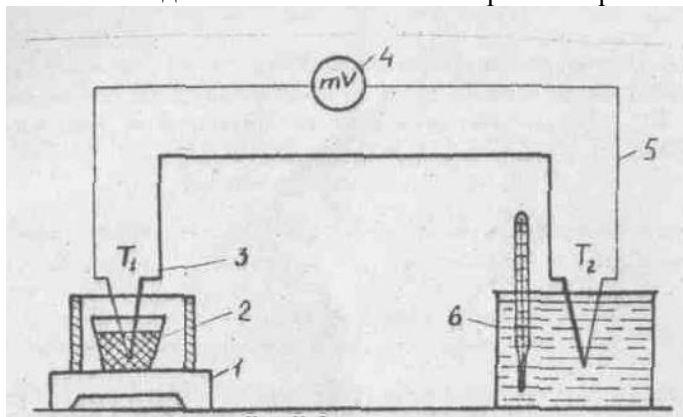


Рис.3.1

Досліджувана речовина поміщається в тигель 2 і нагрівається лабораторною електропічю 1.

Температура плавлення речовини (олово, свинець, індій) вимірюється диференціальною термопарою. Вона складається з двох термопар 3, 5, включених "назустріч" так, що показання мілівольметра 4 равно різниці термоЕДС. Температура T_1 повинна бути постійною і відомою величиною. Це досягається тим, що спай термопари 5 міститься в судину з олією, температура якого контролюється ртутним термометром. Температура T_2 спаю термопари 5 враховується при визначенні температури T_1 за допомогою градуировочної кривої диференціальної термопари.

3.3. 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 мілівольметра через щохвилини і дані занести в таблицю.

Досвіди	Результати вимірів	
Нагрев	$\theta, ^\circ\text{C}$	
	t, c	
Охлажден	$\theta, ^\circ\text{C}$	

ие	t,с	
----	-----	--

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

4. Знову включити електропіч і зняти кривую нагрівання речовини, доводячи його до первісного стану. Результати вимірів занести в таблицю.

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

6. За даними досвідів і значенням λ (зазначеним на табличці установки) за допомогою формули /3.8/ обчислити зміна ентропії речовини в розглянутому процесі.

7. Повторити досвіди по пп. 2-5 для іншої речовини.

3.4. Контрольні питання

1. Сформулювати другий початок термодинаміки.

2. Які процеси називають оборотними і необоротними, рівноважними і нерівноважними? •

3. Роз'яснити статистичний зміст ентропії.

4. Привести приклад діаграми рівноваги (фазової діаграми) речовини в координатах pT ,

5. Які перетворення називаються фазовими перетвореннями 1-го роду, 2-го роду?

[1; 5; 8]

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ
ЕЛЕКТРОНІВ ПО ШВИДКОСТЯХ

Ціль даної роботи - досліджувати розподіл електронів у вакуумі по швидкостях, а також визначити температуру електронного газу.

4.1. Короткі теоретичні зведення

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

Користаючись теорією імовірностей, він знайшов вираження для числа молекул Δn , швидкості яких лежать в інтервалі від деякої заданої швидкості V до $V + \Delta V$.

Закон Максвелла для розподілу молекул по швидкостях має вид:

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

де m - маса молекули; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/ДО; k - постійного 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 мал.4.1

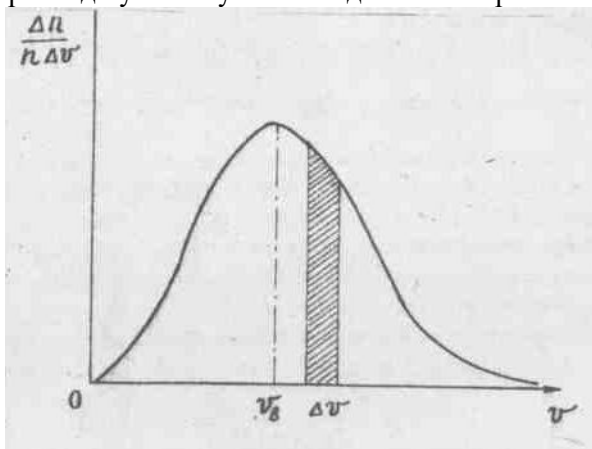


Рис. 4

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 усілякі значення від 0 до ∞ . Тому що цій умові задовольняють усі n молекул, то розглянута площа повинна бути рівній одиниці.

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

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

де R - універсальна газова постійна; μ - маса 1 моль газу.

Знаючи найбільш ймовірну швидкість, можна обчислити абсолютну температуру:

$$T = \frac{mv_B^2}{2k} = \frac{\mu v_B^2}{2R} \quad /4.3/$$

4.2. Опис методу й установки для дослідження розподілу електронів по швидкостях

Розподіл Максвелла /4.1/ справедливо не тільки для молекул звичайного газу, але і для газу вільних електронів.

Для виміру швидкостей електронів використовується метод затримуючого потенціалу. Суть методу складається в наступному. В електронною лампою розпечений катод випускає електрони, що летять до анода. При цьому виникає електричний струм. Якщо між анодом до катодом створити гальмуюче порожню, 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 - гальмуюче напруга. З формули /4.4/ випливає: ___ -

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

З формули /4.5/ визначають мінімальну швидкість електронів, що ще можуть досягти анода. Поступово збільшуючи напругу, можна гальмувати більш швидше 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 по швидкостях показана на мал. 4.2.

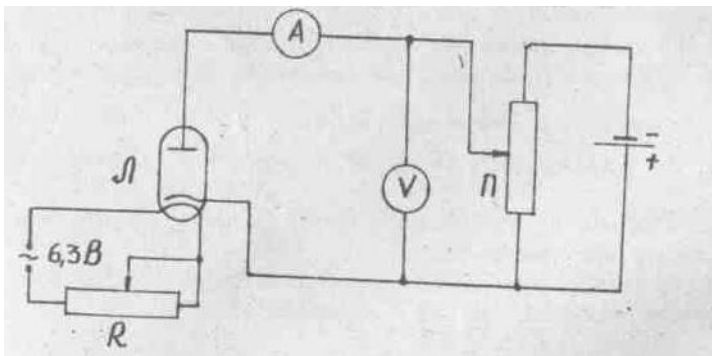


Рис. 4.2

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

Напруга між катодом і анодом регулюється потенціометром П і вимірюється

мілівольтметром V . Анодний струм виміряється мікроамперметром A . Температура катода може бути змінена реостатом R , що регулює струм розжарення.

4.3. Порядок виконання роботи

1. Включити установку.
2. Потенціометром установити напруга, рівна нулю,
3. Установити за допомогою реостата силу струму в ланцюзі розжарення такий, щоб мікроамперметр показував 100 мкА.
4. Потенціометром установити 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 досвіду	U, В	I, мкА	ΔI , мкА	$V = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$ м/з
1	Про			
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. По формулі /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, що рекомендується: 1 мкА - 2 мм; 6(103 м/с - 1 мм).

8. За графіком визначити найбільш ймовірну швидкість електронів.

9. По формулі /4.3/ обчислити температуру електронного газу.

4.4. Контрольні питання

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

[3;5;6]

Лабораторна робота Т-5
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ
РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

5.1. Короткі теоретичні зведення

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

Нехай швидкість рідини в одному шарі дорівнює V_1 /мал.5.1/, а в іншому шарі - V_2 , відстань між шарами ΔZ , площа зіткнення шарів рідини ΔS . У цьому випадку сила внутрішнього тертя визначається 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.

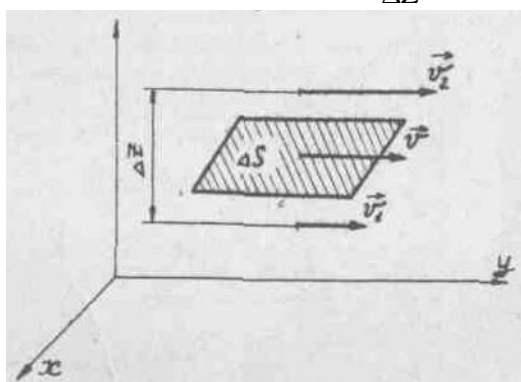


Рис.5.1

Якщо у формулі /5.1/ покласти чисельно

$$\frac{\Delta V}{\Delta Z} = 1, \text{ то } |F| = |\eta|, \text{ тобто коефіцієнт динамічної в'язкості чисельно}$$

дорівнює силі внутрішнього тертя, що виникає на кожній одиниці поверхні зіткнення двох шарів, що рухаються относительно один одного, із градієнтом швидкості, рівним одиниці.

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

У системі СГС в'язкість вимірюється в паузах; $1 \text{ пауз} = 0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Формула /5.1/ є вихідної для одержання вираження сили внутрішнього тертя в кожній конкретній задачі. Для випадку кулі малого діаметра (поперечний розмір середовища, у якій рухається куля більше діаметра кулі) Стоксом отриманий вираження (закон Стокса)

$$F_{Tp} = 6\pi\eta r v \quad /5.2/$$

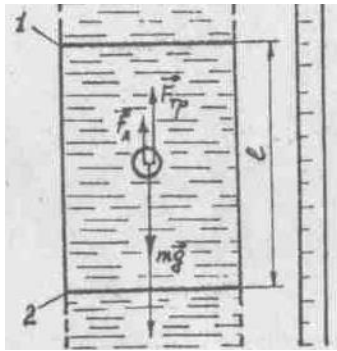
де η - коефіцієнт динамічної в'язкості) r - радіус кульки;

v - швидкість руху.

5.2. Опис методу й установки для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості рідини

У даній роботі для визначення в'язкості використовується метод Стокса. Истод складається в наступному. Якщо маленька куля падає в судині з грузлою рідиною,

на нього діють три сили: сила ваги \vec{P} , спрямована вниз, архімедова сила \vec{F}_A , спрямована нагору, і сила внутрішнього тертя \vec{F}_{TP} , спрямована проти руху кульки /МАЛ.5.2/



Відповідно до другого закону Ньютона прискорення кульки в проекції на вісь x

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{\sum F_{ix}}{m} = \frac{mg - F_A - F_{TP}}{m} \quad /5.3/$$

З огляду на, що $V_x = \dot{x}$ і вираження /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. Уводячи позначення: $\alpha = 6\pi\eta r$; $mg - F_A = F$, маємо:

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

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

Потенціюючи, одержуємо

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

З /5.5/ видно, що швидкість кульки зростає до деякого сталого значення:

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

при цьому має місце рівновага сил:

$$mg = F_A + F_{TP} \quad /5.7/$$

У даній лабораторній роботі для використовуваної рідини і діаметра кульки процес установлення швидкості відбувається дуже быстро, і на відстані $x \approx 10$ мм від рівня рідини $V = V_{уст}$ із точністю $\approx 0,1\%$.

Використовуючи /5.7/, можна знайти коефіцієнт динамічної в'язкості. Для цього силу ваги і силу Архімеда необхідно виразити через щільність матеріалу кульки і рідини.

Для сили ваги 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 - щільність кульки.

Для архімедяної сили, рівній силі ваги рідини в обсязі кулі, маємо:

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

Підставляючи у формулу /5.7/ значення сили внутрішнього тертя /5.2/, архімедяної сили і сили ваги, 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, що при рівномірному русі $V = l/t$, 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 - щільність соответственно кульки і рідини, кг/м³;

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

Установка для визначення в'язкості по методу Стокса зображена на мал.5.2.

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

У верхній частині розташоване отвір, через яке кидають кульку. Відстань між мітками вимірюється лінійкою, час падіння кульки - секундоміром.

Прилади і приналежності: установка для визначення в'язкості рідини; дрібні кульки; лінійка; секундомір; мікромметр.

5.3. Порядок виконання роботи

1. Визначити температуру досліджуваної рідини.
2. Вимірити мікрометром діаметр кульки в різних місцях. Для кожної кульки виміру необхідно проробити не менш трьох разів і - узяти середнє значення.
3. Спустити кульку в циліндр і в момент проходження кульки через мітку зупинити секундомір. Досвід повторити три рази з різними кульками.
4. лінійкою вимірити відстань між мітками l . Результати вимірів записати в наступну таблицю.

Номер досвіду	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. По формулі /5.6/ визначити коефіцієнт в'язкості для кожного досвіду. Визначити середнє значення в'язкості для трьох досвідів:

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

середні абсолютну і відносну погрішності.

5.4. Контрольні питання

1. У яких одиницях вимірюється коефіцієнт в'язкості?

2. Які сили діють на кульку, що падає в густій 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 його потенційна енергія зменшується, а кінетична залишається постійною, тому що кулька рухається рівномірно. У який вид енергії переходить потенційна енергія кульки?

[2;4]

Лабораторна робота Т-6
ВИВЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ БОЛЬЦМАНА НА МЕХАНІЧНІЙ
МОДЕЛІ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Ціль роботи - перевірити розподіл Больцмана на механічній моделі ідеального газу.

6.1. Короткі теоретичні зведення

При відсутності зовнішніх сил середня концентрація молекул газу в стані термодинамічної рівноваги усюди однакова. Однак на практиці часто приходиться мати справу з газом, що знаходиться у внесшем поле сил, наприклад, у гравітаційному. У цьому випадку розподіл молекул ідеального газу підкоряється статистиці Больцмана, що є часткою випадку розподілу імовірностей Максвелла-Больцмана:

$$d\omega = \left[\frac{1}{(2\pi mkT)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2mkT}} dp_x dp_y dp_z \right] e^{-\frac{u(x,y,z)}{kT}} \int e^{-\frac{u}{kT}} dv \quad /6.1/$$

де $d\omega$ - імовірність того, що молекула газу з потенційною енергією $U(x,y,z)$ знаходиться в даному обсязі d і має імпульс, що лежить у межах від P до $P+d$.

Перший множник у /6.1/ називається розподілом Максвелла і характеризує розподіл імовірностей по компонентам імпульсу. Другий множник залежить тільки від координат молекули і визначається видом її потенційної енергії $U(x,y,z)$ у зовнішнім полі сил. Саме він являє собою розподіл Больцмана.

Відповідно до статистичної термодинаміки імовірність того, що молекула має даний імпульс P , зовсім не залежить від положення молекули і, навпаки, імовірність положення молекули не залежить від її імпульсу. Якщо газ знаходиться в однорідному гравітаційному полі, то потенційна енергія молекул залежить тільки від координати Z :

$$U(x,y,z) = mgz. \quad /6.2/$$

У площині $Z = const$ молекули розподіляються рівномірно. Тоді з обліком /6.2/ другий множник вираження /6.1/, що представляє собою розподіл Больцмана, примет вид

$$d\omega_B = \frac{e^{-\frac{mgz}{kT}} dz}{\int e^{-\frac{mgz}{kT}} dz} \quad /6.3/$$

Інтеграл у /6.3/ повинний бити узятий за всіма значеннями Z , тому

$$\int_0^{\infty} e^{-\frac{mgz}{kT}} dz = \frac{kT}{mg}$$

Тому що $d\omega_B$ - імовірність того, що молекула знаходиться в інтервалі від Z до $Z+d$, то, переходячи до числа молекул в одиниці об'єму для рівнів $Z=0$ і dz , имеем

$$d\omega_B = \left| \frac{-dn}{n_0} \right|$$

де n_0 - число часток в одиниці об'єму на рівні $Z=0$. Підставляючи це вираження в /6.3/, маємо

$$-dn = \frac{mg}{kT} n_0 e^{-\frac{mgz}{kT}} dz \quad /6.4/$$

Інтегруємо /6.4/:

$$n_0 - n = -\int_0^h n_0 e^{-\frac{mgz}{kT}} d\left(-\frac{mgz}{kT}\right) = n_0 - n_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}$$

чи

$$n = n_0 - e^{-\frac{mgh}{kT}} \quad /6.5/$$

З формули /6,5/ видно, що концентрація газу в гравітаційному полі убиває по експонентному закону. Вона зменшується в e раз при зміні висоти h на величину

$$\delta = \frac{kT}{mg} \quad /6.6/$$

Величину δ називають характеристичною довжиною розподілу часток у поле ваги. Для водню $\delta = 3 \cdot 10^5$ м, а для повітря (20% N_2 + 80% O_2) $\delta = 10^4$ м.

Для постійної температури T на усіх висотах розподіл молекул по швидкостях відповідає максвелловському.

З розподілу концентрації молекул газу з висотою впливає: зі збільшенням маси молекул їхня концентрація з висотою в однорідному гравітаційному полі, повинна убивати швидше, тому буде відбуватися зміна атомно-молекулярної сполуки атмосфери зі зміною висоти молекули газу, що знаходяться в гравітаційному полі, мають деяку середню потенційну енергію, надлишкової в порівнянні із середньою енергією газу у відсутності силового поля, тому його теплоємність повинна бути більше. У дійсності виміру сполуки атмосфери на різних висотах це не підтверджують. Не постійна також і температура на різних висотах (зниження температури зі збільшенням висоти). Ці й другі факти показують, що атмосфера не знаходиться в стані статичної рівноваги.

З огляду на зв'язок між тиском газу і концентрацією молекул $p = nkT$, а також допускаючи сталість температури з висотою, від розподілу Больцмана по щільності можна перейти до розподілу по тиску:

$$p = P_0 e^{-\frac{mgh}{kT}} = P_0 e^{-\frac{\mu gh}{RT}} \quad /6.7/$$

де m - маса однієї молекули; μ - молярна маса газу; k - постійна Больцмана.

Останнє вираження називається барометричною формулою.

6.2. Опис установки і методу дослідження розподілу Больцмана

Установка для вивчення розподілу Больцмана /мал.6.1/ складається з електромагнітного поршневого вібратора (1), розташованого в нижній частині високої прямокутної судини 2. Ідеальний газ у судині моделюється невеликими ($d = 1 \dots 1,5$

6.4. Обробка результатів вимірів

Утрати світлового потоку при проходженні світла через судину з кульками визначаються вираженням

$$\Delta\phi = \phi_{\max} - \phi(h) ,$$

де ϕ_{\max} - світловий потік, що проходить через судину при відсутності кульок; $\phi(h)$ - світловий потік, що проходить через судину з кульками на висоті h .

Вони прямо пропорційні середньому числу кульок у горизонтальному перетині на висоті h . Тому що потік, вимірюваний мікроамперметром,

$I \sim \phi$, то $\Delta I \sim \Delta\phi$.

У такий спосіб $\Delta I = I_{\max} - I(h)$

де I_{\max} - сила струму при відсутності кульок на висоті h ; $I(h)$ - сила струму при наявності кульок на висоті h .

Тому графік залежності $\Delta I = f(h)$ буде відповідати залежності середнього числа кульок у горизонтальному перетині на висоті h .

За даними таблиці побудувати залежність $\Delta I = f(h)$, а також залежність $\ln(\Delta I) = f(h)$. Якщо зазначена залежність лінійна, то і $\Delta I = f(h)$ є експонентної, що підтверджує рівняння /6.5/

6.5. Контрольні питання

1. Записати і пояснити розподіл Больцмана.
2. Сутність методу дослідження розподілу Больцмана.
3. Які наслідки випливають з розподілу Больцмана?
4. записати і пояснити барометричну формулу.
5. Привести інші приклади прояву розподілу Больцмана.

[5; 6]

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, 197В. - Т.2: Термодинаміки 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 по загальній фізиці /Під ред. Е.М.Гершензона, Н.Н.Малова. - М.: Освіта, 1965. - 351 с.
8. Евграфова Н.Н., Каган В.Л. Посібник до лабораторних робіт по фізиці. - М.: Высш.шк., 1970. - 363 с.