

М.О. Галушак, А.Г. Калугін, С.А. Татарина

**ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА
МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА
ТА ТЕРМОДИНАМІКА**

Лабораторний практикум

Частина II

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**
**Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу**
Кафедра загальної та прикладної фізики

М.О. Галушак, А.Г. Калугін, С.А. Татарина

ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА
МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА
ТА ТЕРМОДИНАМІКА

Лабораторний практикум

Частина II

НТБ
ФОНТУНГ



m47532

м. Івано-Франківськ
2012

УДК 531/534+539.19+536
ББК 22.2+22.36+22.317
Г-16

*Рекомендовано методичною радою університету
(протокол № 14 від 20.10.2011 р.)*

Упорядники:

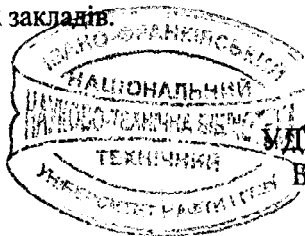
М.О. Галушак, А.Г. Калугін, С.А. Татарина

Галушак М.О.

Г-16 Загальна фізика. Молекулярна фізика та термодинаміка. Лабораторний практикум. Частина 2. – Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2012. – 86 с.

МВ 02070855-3632-2011

Лабораторний практикум містить методичні вказівки для виконання лабораторних робіт з розділу курсу загальної фізики – «Молекулярна фізика та термодинаміка». До кожної роботи подаються короткі теоретичні відомості, методика і послідовність виконання роботи. Значна увага приділяється з'ясуванню природи та практичному застосуванню фізичних явищ. Лабораторний практикум відповідає чинній навчальній програмі й призначений для студентів технічних спеціальностей та викладачів фізики вищих навчальних закладів.



УДК 531/534+539.19+536
ББК 22.2+22.36+22.317

МВ 02070855-3632-2011

©ІФНТУНГ, 2012

ЗМІСТ

Передмова	5
Вимірювання фізичних величин. Запис і опрацювання результатів. Оцінка похибок	7
Лабораторна робота №20.....	20
<i>Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя в рідинах методом Стокса</i>	
Лабораторна робота № 21	23
<i>Визначення динамічної в'язкості рідини капілярним віскозиметром</i>	
Лабораторна робота № 22.....	28
<i>Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя і середньої довжини вільного пробігу молекул повітря</i>	
Лабораторна робота № 23.....	33
<i>Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом відриву краплі</i>	
Лабораторна робота № 24.....	38
<i>Визначення відношення C_p/C_v повітря методом Клемана - Дезорма</i>	
Лабораторна робота № 25.....	44
<i>Визначення показника адіабати повітря за допомогою стоячих хвиль</i>	
Лабораторна робота № 26.....	49
<i>Визначення коефіцієнта в'язкості повітря капілярним методом</i>	
Лабораторна робота № 27.....	57
<i>Визначення коефіцієнта теплопровідності методом нагрітої нитки</i>	
Лабораторна робота № 28.....	65
<i>Визначення відношення теплоємностей повітря за сталих тиску й об'єму резонансним методом</i>	

Лабораторна робота № 29	74
<i>Визначення зміни ентропії в процесі нагрівання і плавлення олова</i>	
Лабораторна робота № 30	78
<i>Визначення молекулярної маси і густини газу методом відкачування</i>	
 Перелік літературних джерел	 84
 Додаток А	 85

ПЕРЕДМОВА

Фізика є базовою дисципліною фундаментальної підготовки фахівців інженерних спеціальностей. Запорукою формування у студентів теоретичної бази для вивчення спеціальних дисциплін повинна стати точність та глибина розуміння фізичних явищ і процесів, основних понять і законів фізики.

Описані нижче лабораторні роботи з курсу молекулярної фізики та термодинаміки виконуються фронтальним методом. Кожна лабораторна робота розрахована на дві академічні години занять у лабораторії.

До лабораторного заняття студент повинен підготувати практичне керівництво до лабораторної роботи, вивчивши відповідний теоретичний матеріал.

Під час заняття студенти отримують допуск до виконання лабораторної роботи на основі перевірки викладачем знань теорії та послідовності виконання роботи, після чого проводять необхідні виміри та виконують попередні розрахунки. Результати попередніх розрахунків обговорюються з викладачем і затверджуються.

Повністю оформлений звіт з результатами виконаної роботи потрібно подати викладачу до наступного заняття. Він повинен містити: номер лабораторної роботи та її назву, перелік приладів і приладдя, мету роботи, схему установки, розрахункові формули, таблицю результатів вимірів і розрахунки, висновки за результатами роботи. Креслення, рисунки у звіті повинні бути виконані за нормами технічного креслення, а графіки – на міліметровому папері.

Лабораторна робота вважається виконаною після успішно проведеного захисту шляхом співбесіди студента з викладачем.

До складу практикуму увійшло дев'ять лабораторних робіт з методичними вказівками щодо їх виконання та

методики проведення вимірювань, запису і опрацювання експериментальних результатів, оцінки похибок.

При підготовці даного посібника були використані методичні вказівки до п'яти лабораторних робіт, підготовлених у 2005 році викладачами кафедри фізики В.В. Омелянцем, В.І. Пустоговим, А.Г. Калугіним, З.В. Петрук, а також практичне керівництво до чотирьох лабораторних робіт, що виконуються на експериментальних установках ДП «Дніпропетровське спеціальне конструкторське бюро».

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН. ЗАПИС І ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. ОЦІНКА ПОХИБОК

Математичне опрацювання результатів вимірювань

Експериментальна фізика займається вимірюванням фізичних величин і з'ясуванням взаємозалежностей та співвідношень між ними. Тому головним моментом фізичного дослідження є *процес вимірювання*.

Виміряти фізичну величину означає порівняти її з однорідною їй фізичною величиною, прийнятою за одиницю. Наприклад, довжину тіла порівнюють з метром, масу – з кілограмом, тривалість процесу – з секундою тощо.

Вимірювання фізичних величин поділяють на *прямі* і *непрямі* (посередні).

Якість вимірювань визначена їхньою точністю. У разі прямих вимірювань точність визначають з аналізу точності методу і приладів, а також із повторюваності результатів вимірювань. Точність непрямих (посередніх) вимірювань залежить від надійності даних, які використовують для розрахунку, та від структури формул, які пов'язують ці дані з шуканою величиною. Під час вимірювань неминуче виникають похибки. Похибки поділяють на *систематичні* та *випадкові*. Окремо розглядають так звані *промахи* або невдалі вимірювання, які потрібно просто відкинути.

Систематичні похибки виникають унаслідок несправності вимірювального приладу або помилки в методиці вимірювання. Їх можна позбутися, якщо усунути причину виникнення. Зазначмо, що систематичними іноді називають *похибки приладу*.

Випадкові похибки виникають внаслідок різних причин, які неможливо усунути повністю: недосконалість приладу, недосконалість методу вимірювання, органів зору людини

і т.п. Випадкові похибки необхідно звести до мінімуму і врахувати після завершення вимірювань фізичної величини.

Обчислення похибок у разі прямих вимірювань

Пряме вимірювання виконують тоді, коли фізичну величину порівнюють з одиницею (еталоном) безпосередньо за допомогою приладу. Наприклад: вимірювання розмірів тіла штангенциркулем або лінійкою, часу – секундоміром, напруги – вольтметром тощо.

Під час прямого вимірювання можливі два випадки:

1) повторні вимірювання дають різні, але близькі результати;

2) повторні вимірювання дають один і той же результат або умови досліду не дають змоги виконати повторні вимірювання. В другому випадку похибкою вимірювання треба вважати похибку приладу.

Нехай у першому випадку вимірювання фізичної величини x дало числа $x_1, x_2, \dots, x_n$. Зазначимо, що число n рекомендують брати непарним. У найпростішому випадку $n = 3$. Будемо вважати, що найближчим до істинного значення вимірюваної величини є середнє арифметичне

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1)$$

Відхилення від середнього $\Delta x_i = |x_c - x_i|$ називають абсолютною похибкою першого вимірювання, відповідно, $\Delta x_2 = |x_c - x_2|$ – абсолютною похибкою другого вимірювання і т.д. Величина

$$\Delta x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (2)$$

називається середньою абсолютною похибкою вимірювання.

Величину

$$\varepsilon(x_c) = \frac{\Delta x_c}{x_c}, \text{ або } \varepsilon(x_c) = \frac{\Delta x_c}{x_c} \cdot 100\% \quad (3)$$

називають *середньою відносною похибкою* вимірювання.

Якість вимірювань визначається саме відносною, а не абсолютною похибкою. Наприклад, одна й та ж похибка в 1 °С у разі вимірювання температури зірки не суттєва, у випадку вимірювання температури кипіння води може бути більш суттєва, а під час визначення температури тіла хворої людини абсолютно недопустима. Це виникає тому, що відносна похибка вимірювань у трьох випадках є різною.

Похибку приладу $\Delta x_{\text{пр}}$ для електровимірювальних приладів визначають на підставі класу точності приладу або беруть такою, що дорівнює половині найменшої поділки приладу:

$$\Delta x_{\text{пр}} = \frac{(\text{клас точності}) \cdot (\text{межа приладу})}{100} \quad (4)$$

У загальному випадку абсолютна похибка вимірюваної величини

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_c^2 + \Delta x_{\text{пр}}^2}, \quad (5)$$

а відносна похибка –

$$\varepsilon(x) = \frac{\Delta x}{x} \quad \text{або} \quad \varepsilon(x) = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Опрацювання результатів у разі непрямих (посередніх) вимірювань

На практиці часто фізичну величину не можна виміряти прямим способом. У такому разі використовують співвідношення, за допомогою якого цю величину можна обчислити через значення інших фізичних величин, які можна виміряти прямим способом. Наприклад, молярну масу повітря

μ можна виміряти, якщо скористатися рівнянням стану ідеального газу

$$\mu = \frac{RT_m}{pV},$$

усі параметри якого, за винятком $R = 8,314$ Дж/моль·К, легко виміряти прямим способом і за допомогою попередньої формули обчислити μ . У цьому випадку постає запитання, як знайти абсолютну і відносну похибки величини μ , якщо відомі похибки ΔT , Δp і ΔV . Зазначмо, що в похибку $\Delta \mu$ буде внесена також похибка числа R , яке неможливо точно визначити.

Є спосіб, який дає змогу вирішити цю проблему для будь-якого функціонального зв'язку між фізичними величинами. Він ґрунтується на методі диференціального числення, зокрема, на обчисленні повного диференціала (нескінченно малого приросту) функції багатьох змінних.

Нехай маємо функцію

$$f(x, y, z, u, \dots), \quad (7)$$

повний диференціал цієї функції:

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{\substack{y=\text{const} \\ z=\text{const}}} + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)_{\substack{x=\text{const} \\ z=\text{const}}} + \dots \quad (8)$$

За допомогою цього виразу отримують формулу для обчислення абсолютної похибки фізичної величини в разі непрямого вимірювання:

$$\Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y + \dots \quad (9)$$

Як бачимо, всі частинні похідні беруть зі знаком плюс, а диференціали змінних замінюють на абсолютні похибки

величин, вимірюваних прямим способом. У такому випадку формула (9) дає максимально можливу похибку величини f .

На практиці зручніше користуватися таб.1, яка дає правила обчислення похибок Δf і $\varepsilon(f)$ у найчастіших випадках.

Зазначимо, що абсолютну похибку Δf зручно обчислювати першою, коли робоча формула є адитивною (додавання і віднімання), а відносну похибку $\varepsilon(f)$ – коли формула мультиплікативна (множення, ділення, піднесення до степеня).

Таблиця 1.

Правила обчислення абсолютної та відносної похибок

Формула	Абсолютна похибка Δf	Відносна похибка $\varepsilon(f)$
$f = x + y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	$\varepsilon(f) = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
$f = x - y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	$\varepsilon(f) = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
$f = x \cdot y$	$\Delta f = x\Delta y + y\Delta x$	$\varepsilon(f) = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} = \varepsilon(x) + \varepsilon(y)$
$f = \frac{x}{y}$	$\Delta f = \frac{x\Delta y + y\Delta x}{y^2}$	$\varepsilon(f) = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} = \varepsilon(x) + \varepsilon(y)$
$f = x^n$	$\Delta f = nx^{n-1}\Delta x$	$\varepsilon(f) = n \frac{\Delta x}{x} = n\varepsilon(x)$

У робочій формулі для обчислення фізичної величини f можуть бути табличні величини ($\pi, g, k, R \dots$). Вони впливають на значення похибки вимірюваної величини f і тому їхні похибки необхідно враховувати. Абсолютною похибкою таблично заданого значення (якщо вона не зазначена прямо) вважають число, що дорівнює половині одиниці останнього розряду цього значення.

Наприклад, для $\pi = 3,14$ $\Delta\pi = 0,005$; для $\pi = 3,142$ $\Delta\pi = 0,0005$; для $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ $\Delta g = 0,05 \text{ м/с}^2$; для $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ $\Delta g = 0,005 \text{ м/с}^2$.

Правила заокруглення у випадку математичних операцій над числами

Обчислення певних фізичних величин, особливо якщо їх виконують за допомогою калькуляторів, потребують заокруглення сумарного числа. Необхідна точність розрахунків визначена тим, що розрахунок не повинен вносити у вимірювання додаткової похибки.

Заокруглення в разі додавання і віднімання всіх чисел виконують до розряду на одиницю меншого, ніж розряд найменш точного числа. В результаті потрібно зберігати стільки десяткових знаків, скільки їх у наближеному заданому числі з найменшою кількістю десяткових знаків:

$$23,2 + 0,442 + 7,247 \approx 23,2 + 0,44 + 7,25 = 30,89 \approx 30,9$$

У результаті множення і ділення потрібно зберігати стільки значущих цифр, скільки їх має наближене задане число з найменшою кількістю значущих цифр:

$$30,9 \cdot 1,8364 \approx 30,9 \cdot 1,84 = 56,856 \approx 56,9.$$

У разі піднесення до степеня в кінцевому результаті потрібно зберігати стільки значущих цифр, скільки їх має число, яке підносять до степеня:

$$(11,38)^2 = 129,5044 \approx 129,50 = 129,5.$$

У випадку знаходження коренів у результаті потрібно зберегти стільки значущих цифр, скільки їх має число, яке стоїть під коренем:

$$\sqrt{2,97} \approx 1,724 \approx 1,72 .$$

Під час обчислення проміжних результатів потрібно брати на одну цифру більше, ніж задано в заокругленнях у разі виконання математичних дій над числами. В кінцевому підсумку цю “запасну” цифру відкидають:

$$\begin{aligned} \frac{(23,2 + 0,442 + 7,247) \cdot 1,8364}{2,412} &\approx \frac{(23,2 + 0,44 + 7,25) \cdot 1,84}{2,41} \approx \\ &\approx \frac{30,89 \cdot 1,84}{2,41} \approx \frac{56,838}{2,41} \approx 23,58 \approx 23,6 . \end{aligned}$$

Запис результатів

Результат вимірювань записують у вигляді

$$f = f_{cp} \pm \Delta f, \quad \epsilon(f) = \dots$$

Наприклад, запис $m = (1,23 \pm 0,02)$ кг означає, що в результаті вимірювань для маси тіла знайдено значення 1,23 кг з абсолютною похибкою 0,02 кг і відносною похибкою

$$\epsilon(f) = \frac{\Delta m}{m} \cdot 100\% = \frac{0,02}{1,23} \cdot 100\% = 1,6\% .$$

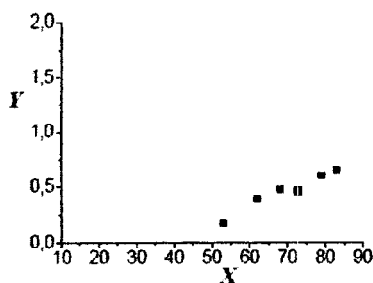
У записі виміряного значення останньою повинна бути цифра того десяткового розряду, який використовують у разі зазначення похибки. Наприклад, один і той же результат залежно від похибки, може мати вигляд

$$1,2 \pm 0,2; 1,24 \pm 0,03; 1,234 \pm 0,012 \text{ і т.д.}$$

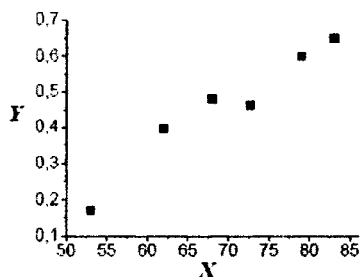
Зображення експериментальних результатів на графіках

Результати експериментів відображають у вигляді не тільки таблиць, а й графіків. Для графіків ліпше використовувати спеціальний папір, наприклад, міліметровий або в клітинку.

У разі побудови графіків потрібно розумно вибирати масштаб, щоб виміряні точки розташувались на всій площині аркуша. На рис. 1 зображені приклади правильної і неправильної побудови графіків. На лівому (неправильно побудованому) графіку експериментальні точки займають нижню праву частину рисунка. Щоб цього уникнути, потрібно вибрати більший масштаб по осі Y і змістити нуль абсцис, як це зроблено на правому графіку.



Неправильно



Правильно

Рис. 1. Вибір масштабу та початку відліку в разі побудови графіків

Масштаб повинний бути зручним. Клітинка графіка чи міліметрового паперу може відповідати 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0 одиницям величини, яку вимірюють, але не 2,5; 3,0; 4,0; 7,0 і т.д. Якщо масштаб незручний, то нанесення

експериментальних точок на графік і використання графіка потребують багато часу, що часто призводить до помилок.

Графічне зображення результатів дає змогу швидко зрозуміти характерні особливості залежності, яку спостерігають і виявити помилкові результати. Наприклад, з графіка на рис. 1 видно, що крива $Y = Y(X)$ за збільшення X стає пологішою. Третя ліворуч точка випала. Очевидно, під час її вимірювання була допущена помилка. Якщо це не так, то в інтервалі біля цієї точки шукана залежність має різко виражену особливість. Такі особливості становлять великий інтерес. Тому потрібно уважно виміряти область, розташовану поблизу точки, що випала, і намагатись детально вивчити форму кривої в інтервалі знайденої особливості.

Точки, які наносяться на графіки, треба зображати чітко. Їх необхідно позначати олівцем, бо інакше помилково нанесену точку не можна буде видалити з графіка, не зіпсувавши його. Ніяких ліній і міток, які пояснюють побудову точок, на графік наносити не можна, оскільки вони заважають аналізувати результати.

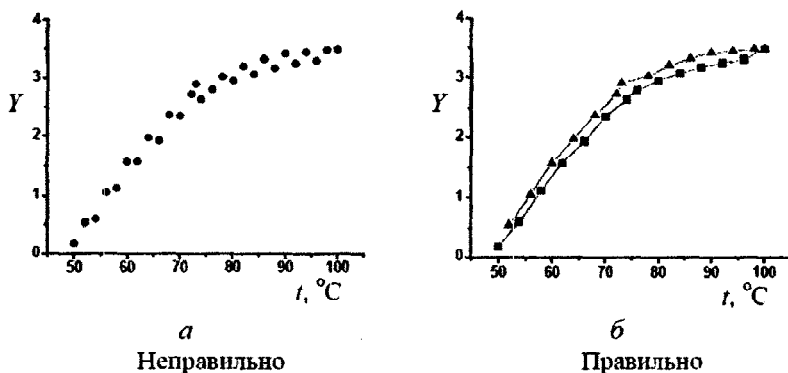


Рис. 2. Графічне зображення результатів, отриманих за різних умов

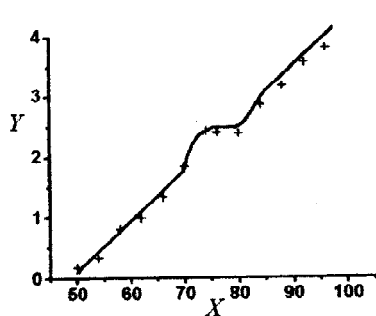
Точки, отримані за різних умов (під час нагрівання й охолодження, збільшення чи зменшення навантаження, у різні дні тощо, корисно наносити різними кольорами чи різними значками. Це допомагає побачити нові явища. Наприклад, на графіках рис. 2, *а* і *б* – один і той самий набір точок. На рис. 2, *а* всі ці точки нанесені однаково, а на рис. 2, *б* точки, отримані під час нагрівання й охолодження, зображені по-різному (трикутниками і квадратами). На першому з графіків видно тільки розкид точок, а другий свідчить, що розкид насправді невеликий, однак точки, виміряні під час нагрівання і під час охолодження, лежать на різних кривих. Очевидно, що тільки рис. 2, *б* містить необхідну інформацію для аналізу і побудований правильно.

Спосіб зображення на графіку експериментальних результатів залежить від того, чи відома їхня випадкова похибка. Якщо вона не відома (що частіше всього буває), то результати зображають крапками, а якщо відома, то ліпше зображати їх не крапками, а хрестиками. Піврозмір хрестика по горизонталі повинен дорівнювати стандартній похибці по осі абсцис, його вертикальний піврозмір – похибці по осі ординат. У цьому випадку, якщо одна з помилок – через свою малу величину – не може бути зображена графічно, результати зображають рисочками, які витягнуті на $\pm \Delta$ в тому напрямі, де похибка немала. Важливість такого способу відображення результатів видно з рис. 3 *а, б*, де показано одні й ті ж експериментальні точки за різних похибок вимірювань. Графік 3, *а* безсумнівно, свідчить про нерегулярний хід залежності, яку вивчають. Ця залежність зображена на рис. 3, *а* кривою лінією. Ті ж дані за великих похибок дослідів (див рис.3, *б*) з успіхом описує пряма лінія, оскільки лише одне вимірювання відступає від кривої більше, ніж на стандартну похибку (і менше, ніж на дві такі похибки). Та обставина, що в разі похибок рис. 3, *а* дані потребують проведення кривої, а

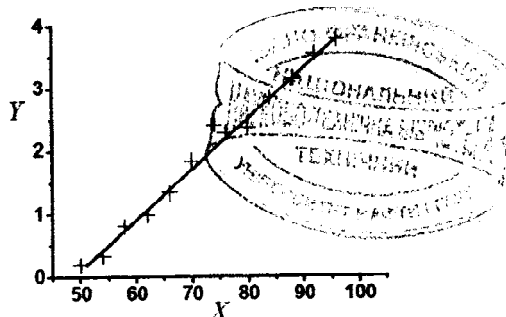
на рис. 3, б цього – ні стає очевидною лише в разі зображення експериментальних результатів у вигляді хрестика похибок.

Зі сказаного не випливає, що, зображаючи результати дослідів не хрестиками похибок, а крапками, ми завжди робимо помилку. Якщо значення похибок уже відомі під час побудови графіка, то потрібно, звичайно, їх зображати. Однак переважно ці похибки в момент побудови графіка невідомі і їх треба визначати з розкиду точок на графіку. В таких випадках експериментальні дані ліпше зображати крапками.

Лінії, проведені через експериментальні крапки на рис. 3, а і б, не тільки полегшують обстеження даних, а й слугують прикладом опрацювання результатів дослідів. Зазначимо, що криві на графіках не завжди проводять через експериментальні точки. Нерідко криві зображають залежність, отриману не з експерименту, а з теоретичних міркувань (чи з інших дослідів). У випадку побудови таких кривих виникає потреба попередньо нанести на графік декілька розрахованих точок. Ці точки треба наносити ледь помітно, щоб не сплутати з чіткими точками (чи хрестиками), які зображають експериментальні дані. Найліпше, щоб розраховані точки взагалі були не помітні.



а



б

Рис. 3. Проведення кривої через експериментальні точки в разі різних похибок вимірювань. Права частина кривої (а) проведена неправильно – вище експериментальних точок

Осі графіка повинні мати виразні, чіткі позначення. Поряд з поділками на зручних проміжках повинні бути нанесені цифри, які відповідають поділкам шкали. Цифри прийнято розташовувати по краях сітки. На рис. 1, 2 цифри стоять не біля кожної вертикальної лінії, а через одну.

На графіках повинно бути позначено, яка фізична величина і в якому масштабі відкладена на осі, як, наприклад, на рис. 1 і 2.

Проведення кривих через експериментальні точки

Через експериментальні точки завжди потрібно проводити найпростішу криву, яка сумісна з цими точками, тобто криву, від якої експериментальні дані відхиляються не більше, ніж на стандартну похибку. Приклад таких кривих зображено на рис. 3. Не потрібно надавати кривим ніяких згинів, якщо експериментальні дані у межах похибок.

У разі проведення кривої потрібно стежити за тим, щоб на кожній достатньо великій її ділянці експериментальні точки були розташовані як вище, так і нижче кривої. Наприклад, на рис. 3, а ліва частина кривої проведена правильно, а права – неправильно: жодна з точок не лежить вище цієї кривої. Під час графічного опрацювання результатів потрібно пам'ятати, що “на око” можливо точно провести через експериментальні точки тільки пряму лінію. Тому, будуючи графік, потрібно намагатись, щоб очікувана залежність мала вигляд прямої лінії. Зокрема, вивчаючи залежність в'язкості рідини від температури, масмо право очікувати, що результати описуватиме закон

$$\eta = Ae^{\frac{u}{kT}}.$$

Якщо відкласти на осях графіка η і T , то точки ляжуть на експоненту, яку провести на око майже неможливо. Однак якщо відкласти на осях $\ln \eta$ і $1/T$, то графік набуде вигляду прямої лінії. Під час вимірювань потрібно завжди старатись, щоб точки на графіку, який потім буде побудований, розташувались достатньо рівномірно. У нашому прикладі для побудови графіка в координатах $\ln \eta$ і $1/T$ потрібно вибирати температуру так, щоб точки лежали на однакових проміжках у шкалі $1/T$, а не в T .

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ В РІДИНАХ МЕТОДОМ СТОКСА

Мета роботи: визначити коефіцієнт внутрішнього тертя касторового або іншого масла. Порівняти одержане значення з табличним і зробити відповідні висновки.

Обладнання: скляний циліндр з маслом, мікромметр, секундомір, кульки, масштабна лінійка.

Теоретичні відомості

Внутрішнє тертя (одне з явищ переносу) полягає у виникненні сил взаємодії між шарами рідини чи газу, що рухаються паралельно один одному з різними, за модулем, швидкостями.

Зі сторони шару, що рухається швидше, на шар, що рухається повільніше, діє прискорююча сила, і навпаки, шар, що рухається з меншою швидкістю, гальмує шар, що рухається з більшою швидкістю. Сили тертя, що виникають при цьому, направлені по дотичній до поверхні дотику шарів.

Згідно із законом Ньютона сила внутрішнього тертя

$$F_{\text{тер}} = -\eta \left(\frac{dv}{dx} \right) S, \quad (20.1)$$

де $F_{\text{тер}}$ – сила тертя; η – коефіцієнт внутрішнього тертя (динамічної в'язкості);

$\frac{dv}{dx}$ – градієнт швидкості; S – площа дотику шарів.

Коефіцієнт внутрішнього тертя, як видно з формули (20.1), чисельно рівний силі внутрішнього тертя, що діє на одиницю площі дотику шарів при одиничному градієнті швидкості. Вимірюється коефіцієнт динамічної в'язкості рідин у $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Одним з експериментальних методів визначення коефіцієнта динамічної в'язкості є метод Стокса (метод падаючої кульки).

Якщо кулька, що змочується рідиною, падає в рідині і не залишає за собою ніяких завихрень (стала швидкість падіння, незначний радіус кульки), то, як показав Стокс, сила опору рівна:

$$F_{\text{тер}} = 6\pi\eta r v, \quad (20.2)$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя рідини; v – швидкість кульки; r – радіус кульки.

Між шаром рідини, що прилип до кульки, і сусіднім шаром виникає сила тертя, яка заставляє його зміщуватись в напрямку руху. Швидкість наступних шарів буде тим меншою, чим далі вони знаходяться від кульки. Якщо радіус r кульки набагато менший за радіус посудини R , то поблизу стінок посудини швидкість руху шарів буде рівна нулю.

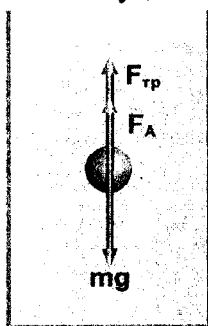


Рисунок 20.1

На кульку, що падає в рідині (рис. 20.1), діють три сили: $\vec{F}_{\text{тер}}$ – сила тертя; $\vec{F}_A$ – виштовхувальна сила Архімеда, $m\vec{g}$ – сила тяжіння. Якщо кулька рухається рівномірно то

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тер}} + \vec{F}_A = 0. \quad (20.3)$$

Рівняння (20.3) в проекціях на вертикальний напрям запишеться так:

$$mg - F_{\text{тер}} - F_A = 0 . \quad (20.4)$$

Враховуючи, що $F_{\text{тер}} = 6\pi\eta r v$, $m = \rho_m V$, а об'єм кульки $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ рівняння (20.4) набере вигляду:

$$\rho_m g \frac{4}{3}\pi r^3 - 6\pi\eta r v - \rho_p g \frac{4}{3}\pi r^3 = 0 .$$

Тоді

$$\eta = \frac{2gr^2(\rho_m - \rho_p) \cdot t}{9vl} , \quad (20.5)$$

де ρ_m – густина речовини кульки, ρ_p – густина рідини,
 v – швидкість кульки, яка дорівнює $\frac{l}{t}$, r – радіус кульки.

Так як $r = \frac{d}{2}$, том робоча формула матиме вигляд:

$$\eta = \frac{gd^2(\rho_m - \rho_p) \cdot t}{18 \cdot l} . \quad (20.6)$$

Порядок виконання роботи

- 1 З допомогою мікрометра визначити діаметри кульок.
- 2 Почергово опускати кульки в досліджувану рідину і визначати швидкість їх проходження між мітками 1 і 2. Відстань l між мітками 1 і 2 вимірюють лінійкою, час – секундоміром.
- 3 Для кожної кульки визначають η за формулою (20.6).
- 4 Знаючи η , визначити похибки за загально прийнятою методикою.

Контрольні запитання

- 1 Дати означення коефіцієнтів динамічної і кінематичної в'язкості.
- 2 Які одиниці вимірювання коефіцієнтів динамічної і кінематичної в'язкості?
- 3 Записати і пояснити закон Ньютона для внутрішнього тертя.
- 4 Чому дорівнює сила внутрішнього тертя за Стоксом?
- 5 Які сили діють на кульку при русі в рідині?
- 6 Вивести робочу формулу.
- 7 Вивести формулу для обчислення похибки.
- 8 Сформулювати закон Архімеда.

Лабораторна робота №21

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ КАПЛЯРНИМ ВІСКОЗИМЕТРОМ

Мета роботи: визначити коефіцієнт динамічної в'язкості рідини.

Обладнання: віскозиметр, насос з колбою, секундомір, термометр.

Теоретичні відомості

При взаємному переміщенні шарів рідини або газу виникають сили внутрішнього тертя. Ці сили залежать від величини поверхні дотику шарів і від того, як швидко змінюється швидкість руху при переході від одного шару рідини до другого. Зміна швидкості Δv в напрямі, перпендикулярному до напрямку переміщення, віднесена до

віддалі між рухомими шарами Δx , носить назву градієнта швидкості:

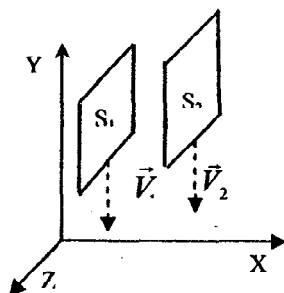


Рисунок 21.1

$$\text{grad} v = \frac{\Delta v}{\Delta x}.$$

Сила внутрішнього тертя, за законом Ньютона, пропорційна градієнту швидкості $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ і площі S дотику шарів:

$$F_m = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} S, \quad (21.1)$$

де η – постійна для кожної рідини або газу, яка носить назву коефіцієнта динамічної в'язкості. Коефіцієнт внутрішнього тертя (в'язкості) чисельно рівний силі внутрішнього тертя, що діє на одиницю площі дотику шарів рідини при градієнті швидкості рівному одиниці.

Вимірюється коефіцієнт динамічної в'язкості в Па·с.

Кінематичною в'язкістю ν називається відношення динамічної в'язкості η до густини рідини або газу:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (21.2)$$

У даній роботі коефіцієнт динамічної в'язкості η визначається дослідним шляхом на основі формули Пуазейля, яка дає можливість визначити об'єм рідини, що протікає крізь капіляр:

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 \eta \ell}, \quad (21.3)$$

де r – радіус капіляра; ℓ – довжина капіляра; Δp – різниця тисків на кінцях капіляра; t – час протікання об'єму V рідини або газу через капіляр; η – коефіцієнт динамічної в'язкості.

Якщо рідина витікає з капіляра тільки під дією власної ваги, то різниця тисків Δp рівна гідростатичному тиску

$$\Delta p = \rho g h, \quad (21.4)$$

де ρ – густина рідини; h – висота рідини у віскозиметрі. У віскозиметрі рідина протікає через капіляр під дією власної ваги, тому формула Пуазейля для капілярного віскозиметра запишеться так:

$$V = \frac{\pi^4 \rho g h t}{8 \eta \ell}. \quad (21.5)$$

Якщо через віскозиметр пропустити один раз воду, для якої коефіцієнт динамічної в'язкості відомий, а другий раз досліджувану рідину такого ж об'єму, то для обох випадків матимемо такі вирази:

$$V = \frac{\pi^4 \rho_1 g h t_1}{8 \eta_1 \ell}; \quad (21.6)$$

$$V = \frac{\pi^4 \rho_2 g h t_2}{8 \eta_2 \ell}. \quad (21.7)$$

Розділивши почленно рівняння (21.6) на рівняння (21.7), отримаємо:

$$1 = \frac{\rho_1 t_1 \eta_2}{\rho_2 t_2 \eta_1}. \quad (21.8)$$

Звідси одержимо робочу формулу для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості для досліджуваної рідини:

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1}, \quad (22.9)$$

де η_1 – коефіцієнт динамічної в'язкості води при температурі досліду; ρ_1 – густина води; ρ_2 – густина досліджуваної рідини; t_1, t_2 – час протікання води і досліджуваної рідини.

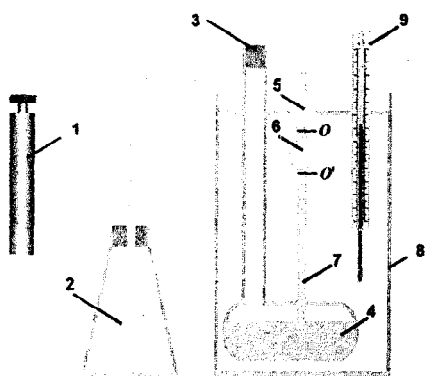


Рисунок 21.2

У даній роботі коефіцієнт динамічної в'язкості рідини вимірюється за допомогою капілярного віскозиметра, який зображено на рис. 21.2. Віскозиметр це U подібна скляна трубка, широке коліно якої знизу закінчується розширенням 4. Друге коліно – це капіляр 7, який зверху має два розширення 5 і 6.

Мітки O і O' обмежують певний об'єм рідини в розширенні 6, час витікання якого вимірюється в досліді. Заповнення розширення 6 рідиною здійснюється за допомогою насоса 1, з'єднаного через посудину 2 з віскозиметром. Посудина 2 запобігає попаданню в насос рідини і забезпечує плавне підвищення тиску в системі.

Порядок виконання роботи

- 1 Обережно виїняти віскозиметр з термостату, помити його декілька разів дистильованою водою і закріпити на штативі у вертикальному положенні. Віскозиметр повинен бути занурений в термостат з водою так, щоб рівень води був вищий мітки O.
- 2 З допомогою піпетки налити у широке коліно воду до заповнення розширення 4.
- 3 Закривши корок 3, ручним насосом 1 підвищити тиск в посудині 2 і слідкувати за повільним підняттям води в розширенні 5 через капіляр 7.
- 4 Як тільки вода підніметься до половини розширення 5, корок 3 виїняти, з'єднуючи, таким чином, віскозиметр з

атмосферою. Після цього рівень води в коліні з капіляром починає понижуватись.

- 5 У момент, коли рівень води проходить через мітку О, ввімкнути секундомір і вимкнути в момент проходження мітки М. Час витікання води t_1 занести в таблицю. Дослід повторити три рази.
- 6 Обережно вийняти віскозиметр з термостату, вилити воду і залити досліджувану рідину.
- 7 Вимірювання, описані в п. 2–5, повторити для досліджуваної рідини, і час її витікання t_2 занести в таблицю.
- 8 Середні значення з дослідів і табличні значення підставити в робочу формулу (21.9) і обчислити коефіцієнт динамічної в'язкості досліджуваної рідини.
- 9 Обчислити похибки вимірювань.

Контрольні запитання

- 1 Дати означення коефіцієнта динамічної і кінематичної в'язкості.
- 2 Які одиниці вимірювання коефіцієнтів динамічної і кінематичної в'язкості?
- 3 Записати і пояснити закон Ньютона для внутрішнього тертя.
- 4 Що таке градієнт швидкості і які одиниці його вимірювання?
- 5 Назвати і пояснити явища переносу.
- 6 Сформулювати і записати формулу Пуазейля.
- 7 Вивести робочу формулу.
- 8 Вивести формулу для обчислення похибок.

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ І СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ

- Мета роботи:** вивчити теорію явищ переносу в газах, визначити коефіцієнт внутрішнього тертя повітря і обчислити довжину вільного пробігу молекул повітря.
- Обладнання:** установка для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя і середньої довжини вільного пробігу молекул повітря.

Теоретичні відомості

Середня довжина вільного пробігу молекул $\langle \lambda \rangle$ – середня відстань, яку молекула проходить від одного зіткнення до другого.

Ефективний діаметр молекули d визначає мінімальну відстань, на яку можуть зблизитись центри двох молекул. Довжина вільного пробігу молекул залежить від ефективного діаметра молекул та концентрації:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} n d^2}, \quad (22.1)$$

де n – концентрація молекул, d – ефективний діаметр молекул.

До явищ переносу в газах належать: дифузія (пов'язана з переносом маси); внутрішнє тертя (пов'язане з переносом імпульсу); теплопровідність (пов'язана з переносом енергії молекул).

У даній лабораторній роботі вивчається явище внутрішнього тертя.

При русі шарів газу з різними швидкостями між ними виникають сили внутрішнього тертя. Сила внутрішнього тертя в газі, як і в рідинах, пропорційна площі дотику шарів S і градієнту швидкості $\frac{dv}{dx}$:

$$F = -\eta \left(\frac{dv}{dx} \right) S, \quad (22.2)$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя або коефіцієнт в'язкості.

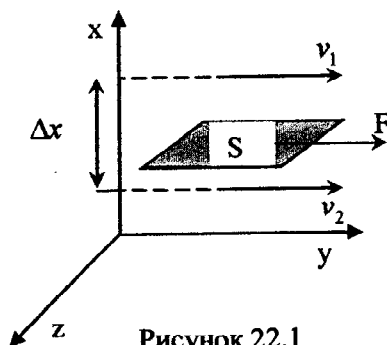


Рисунок 22.1

Градієнт швидкості $\frac{dv}{dx}$

характеризує зміну швидкості з відстанню при переході від одного шару до другого в напрямі, перпендикулярному до напрямку руху шарів (рис. 22.1). Коефіцієнт в'язкості чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, що діє на одиницю площі дотику шарів при градієнті

швидкості рівному одиниці.

Фізичний зміст коефіцієнта в'язкості в газах полягає в тому, що він кількісно дорівнює імпульсу, який переноситься за одиницю часу через одиницю площі при градієнті швидкості, рівному одиниці.

Молекулярно-кінетична теорія газів дає вираз для коефіцієнта в'язкості

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle, \quad (22.3)$$

де ρ – густина газу; $\langle v \rangle$ – середня арифметична швидкість молекул газу; $\langle \lambda \rangle$ – середня довжина вільного пробігу молекул. З рівняння (22.3) випливає, що в'язкість газів не залежить від тиску. Дійсно, з основного рівняння молекулярно кінетичної теорії маємо, що $p = nkT$, тобто тиск прямо пропорційний концентрації молекул, а густина ρ – також пропорційна концентрації, а значить і тиску.

Отже при сталій температурі $\langle \lambda \rangle \sim \frac{1}{p}$ (див. формулу (22.1)), а густина $\rho \sim p$. Середня арифметична швидкість від тиску не залежить, тому згідно (22.3) в'язкість газів не залежить від тиску. З іншого боку концентрація молекул від температури не залежить, а середня арифметична швидкість пропорційна $\sqrt{T}$. Тому в'язкість газів зростає з підвищенням температури. З формули (22.3) можна визначити середню довжину вільного пробігу молекул, якщо відомо η , ρ і $\langle v \rangle$. В'язкість η знаходять, користуючись формулою Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi^4 \Delta p r^4}{8V\ell}, \quad (22.4)$$

де V – об'єм рідини, що проходить крізь капіляр; r – радіус капіляра; Δp – різниця тисків на кінцях капіляра; ℓ – довжина капіляра.

Якщо різницю тисків вимірювати за допомогою водяного манометра, то $\Delta p = \rho_w g \Delta h$, де ρ_w – густина води; g – прискорення земного тяжіння; Δh – різниця висот в колінах манометра. Тепер формула (22.4) набуває вигляду:

$$\eta = \frac{\pi^4 \rho_w g h r^4}{8V\ell}. \quad (22.5)$$

Густину повітря знайдемо з рівняння Клапейрона-Менделєєва

$$\rho = \frac{p_{\text{ат}} \mu}{RT}, \quad (22.6)$$

де $p_{\text{ат}}$ – атмосферний тиск; μ – молярна маса повітря, яка дорівнює $29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура повітря. Тиск вимірюється за допомогою барометра в мм. рт. ст.. В паскалях це буде:

$$p = \rho_p g H, \quad (22.7)$$

де ρ_p – густина ртуті, рівна $13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; H – атмосферний тиск, виражений в метрах ртутного стовпа.

Підставивши рівняння (22.7) в (22.6), отримаємо:

$$\rho = \frac{\rho_p g H \mu}{RT}. \quad (22.8)$$

Середня арифметична швидкість, як відомо, дорівнює:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}. \quad (22.9)$$

Підставимо в формулу (22.3) вирази (22.8) і (22.9) і знайдемо $\langle \lambda \rangle$:

$$\langle \lambda \rangle = 3 \frac{\eta}{\rho_p g H} \cdot \sqrt{\frac{\pi R T}{8 \mu}}. \quad (22.10)$$

Порядок виконання роботи

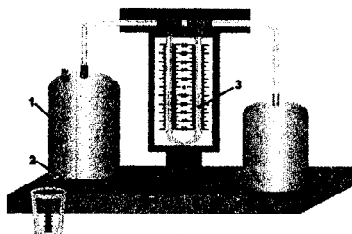


Рисунок 22.2

1. Заповнити балон 1 (рис. 22.2) водою. Найбільш точні результати одержимо при заповненні балона повністю.
2. Відкрити кран 2 на балоні і дочекавшись, коли різниця рівнів в колінах манометра 3 залишиться постійною, ввімкнути секундомір в

момент, коли рівень рідини співпадає з верхньою рисою на мірній скляній трубці. Коли рівень рідини дійде до другої мітки – секундомір вимкнути. Об'єм рідини, що витікла, становить 0,5 л. Записати час витікання і різницю висот води в колінах манометра.

3. Дослід повторити 3 рази для кімнатної температури. Записати в таблицю дані вимірювань.
4. Обчислити коефіцієнт в'язкості повітря за формулою (22.5) і середню довжину вільного пробігу молекул повітря згідно за формулою (22.10).
5. Обчислити похибки вимірювань.

Контрольні запитання

- 1 Які явища відносяться до явищ переносу?
- 2 Поясніть фізичну суть явищ переносу.
- 3 Дайте означення коефіцієнта динамічної і кінематичної в'язкості.
- 4 В яких одиницях вимірюються коефіцієнти динамічної і кінематичної в'язкості?
- 5 Як залежить коефіцієнт динамічної в'язкості газів від температури?
- 6 Що називають довжиною вільного пробігу молекул?

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ МЕТОДОМ ВІДРИВУ КРАПЛІ

- Мета роботи:** Визначити коефіцієнт поверхневого натягу невідомої рідини.
- Обладнання:** бюретка, досліджувана рідина.

Теоретичні відомості

Рідини за своїми властивостями займають проміжне місце між газами та твердими тілами і мають ознаки як газу, так і кристалічного тіла. Зокрема, для рідин, як і для кристалів, характерна наявність певного об'єму, і водночас рідини, як і газу, займають форму посудини, в якій вони знаходяться. Для кристалічних тіл характерно впорядковане розміщення частинок (дальній порядок). За даними рентгенографічних досліджень в рідинах спостерігається ближній порядок (впорядковане розміщення сусідніх частинок довкола даної на незначних віддальх). У зв'язку з відсутністю в рідинах дальнього порядку в них не виявлено анізотропії (залежності фізичних властивостей від напрямку), характерної для кристалів. У рідинах, з видовженими молекулами, спостерігається однакова орієнтація молекул у межах певного об'єму. В таких рідинах має місце анізотропія оптичних і інших властивостей. Рідини з такими властивостями одержали назву рідких кристалів.

Тепловий рух молекул має такий характер: молекула протягом певного часу коливається відносно тимчасового положення рівноваги, а потім стрибком переміщується в нове положення рівноваги. З підвищенням температури амплітуда і частота стрибків збільшуються.

Між молекулами рідини діють Ван-дер-Ваальсівські сили притягання, які швидко зменшуються із збільшенням відстані між молекулами ($F \sim \frac{1}{r^7}$).

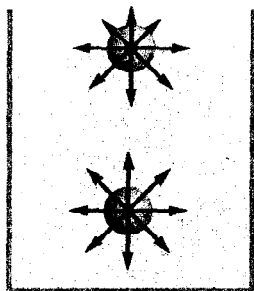


Рисунок 23.1

Ці молекулярні сили треба враховувати до певної відстані між молекулами, яка має назву радіуса молекулярної взаємодії. Кожна молекула в середині рідини (рис. 23.1) зазнає притягання з боку всіх тих молекул, які знаходяться в сфері радіуса молекулярної взаємодії r , центр якої співпадає з центром даної молекули. Рівнодійна всіх сил, в даному випадку, дорівнює нулю. Якщо ж молекула знаходиться на поверхні рідини або на відстані від поверхні, яка менша радіуса молекулярної взаємодії, то рівнодійна всіх сил не дорівнює нулю і напрямлена усередину рідини. При переході молекули з глибини рідини в поверхневий шар над молекулою виконується від'ємна робота і молекула набуває потенціальної енергії.

Таким чином, молекули в поверхневому шарі мають додаткову потенціальну енергію, величина якої пропорційна площі поверхні, тобто

$$W = \sigma \cdot S, \quad (23.1)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу. З механіки відомо, що положення рівноваги тіла відповідає мінімуму потенціальної енергії, тому за умови відсутності зовнішніх сил рідина приймає форму з мінімальною поверхнею, тобто форму кулі. Наявність поверхневої енергії зумовлює намагання рідини скоротити свою поверхню. Поверхневий шар рідини поводить себе як пружна плівка, яка намагається скоротитись. У ній діють сили поверхневого натягу.

З рівняння (23.1) коефіцієнт поверхневого натягу σ дорівнює додатковій енергії молекул поверхневого шару, віднесений до одиниці площі цієї поверхні, тобто

$$\sigma = \frac{W}{S} . \quad (23.2)$$

В системі SI коефіцієнт поверхневого натягу вимірюється в $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$ або $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

Коефіцієнт поверхневого натягу можна виразити і так:

$$\sigma = \frac{F}{\ell} , \quad (23.3)$$

тобто, як відношення сили поверхневого натягу до довжини межі поверхні, на яку діє ця сила.

Поверхневий натяг суттєво залежить від температури, так як з підвищенням температури збільшується віддаль між молекулами, а значить зменшуються сили взаємодії.

Поверхневий натяг залежить і від домішок, які є в рідині. Речовини, які послаблюють поверхневий натяг рідини, називаються поверхнево – активними речовинами (наприклад, по відношенню до води – мило). Є речовини, які збільшують поверхневий натяг води – цукор, сіль та інші. Збільшення чи зменшення поверхневого натягу пояснюється величиною сил взаємодії між молекулами рідини і молекулами рідини та домішок.

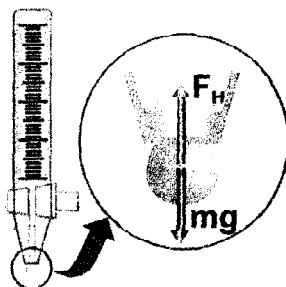


Рисунок 23.2

Є різні методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу: метод відриву краплі, відриву кільця, метод Ребіндера, метод підняття чи опускання рідини в капілярних трубках та ін..

Коли рідина витікає з капіляра, то на кінці капіляра утворюється крапля. Поверхня краплі розтягується під дією сили тяжіння, що діє на рідину. (рис. 23.2). Сила тяжіння тягне краплю вниз, збільшуючи розмір кулі – краплі, а сила поверхневого натягу намагається скоротити поверхню «плівки». В момент відриву краплі вага краплі – mg дорівнює силі поверхневого натягу, яка рівна $F = \sigma \cdot \ell$. Тоді $mg = \sigma \cdot \ell$, де ℓ – довжина шийки, по якій відбувається розрив «плівки» поверхневого шару.

Коефіцієнт поверхневого натягу для даної рідини можна визначити з рівняння $mg = \sigma \cdot \ell$, але довжина шийки краплі ℓ , по якій відбувається розрив, є невідомою. Можна обійтися без визначення довжини ℓ , застосувавши метод порівняння. Нехай в трубці знаходиться рідина об'ємом V_1 , густиною ρ_1 і відомим коефіцієнтом поверхневого натягу σ_1 . Якщо ця рідина витікає краплями в кількості n_1 , то очевидно

$$\frac{\rho_1 V_1 g}{n_1} = \pi \cdot \sigma_1 d, \quad (23.4)$$

де $\rho_1 V_1 g$ – вага рідини, πd – довжина шийки ℓ . Для рідини з невідомим коефіцієнтом поверхневого натягу σ_2 , об'ємом V_2 , густиною ρ_2 і кількістю утворених з цього об'єму крапель n_2 можна записати

$$\frac{\rho_2 V_2 g}{n_2} = \pi \cdot \sigma_2 d. \quad (23.5)$$

Виключивши з рівнянь (23.4) і (23.5) d , отримуємо:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 n_1 \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 n_2} . \quad (23.6)$$

Таким чином, визначивши об'єми V_1 і V_2 рідин, кількість крапель n_1 і n_2 та табличне значення σ_1 , можна визначити поверхневий натяг невідомої рідини. Якщо взяти об'єми однаковими, то в формулі (23.6) можна їх скоротити і вона набуде вигляду:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 n_1 \rho_2}{n_2 \rho_1} . \quad (23.7)$$

Порядок виконання роботи

- 1 Налити в бюретку з поділками води і відрегулювати гвинтовим затискачем швидкість витікання крапель (приблизно одна крапля за секунду).
- 2 Перед початком відліку крапель зафіксувати на якій поділці знаходиться рівень води.
- 3 Порахувати кількість крапель, що утворюються при витіканні 2 мл об'єму рідини. Дослід повторити 5 разів.
- 4 Одержані результати занести в таблицю.
- 5 Пункти 1,2,3,4 виконати з рідиною, поверхневий натяг якої потрібно визначити (рідину пропонує викладач).
- 6 Для кожного дослідів обчислити коефіцієнт поверхневого натягу.
- 7 Обчислити похибки вимірювань.

Контрольні запитання

- 1 Що таке поверхневий натяг і які причини його виникнення?
- 2 Що називається коефіцієнтом поверхневого натягу?
- 3 В яких одиницях вимірюють коефіцієнт поверхневого натягу?

- 4 Які речовини називаються поверхнево-активними і як вони впливають на поверхневий натяг?
- 5 Вивести робочу формулу.
- 6 Що таке змочування і крайовий кут?
- 7 Тиск Лапласа. Капілярність.

Лабораторна робота № 24

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ $\frac{C_p}{C_v}$ ДЛЯ ПОВІТРЯ

МЕТОДОМ КЛЕМАНА–ДЕЗОРМА

Мета роботи: вивчення адіабатного процесу і визначення показника адіабати повітря.

Обладнання: прилад Клемана–Дезорма.

Теоретичні відомості

Адіабатним процесом називається процес, який відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем.

Оскільки для адіабатного процесу $Q = 0$, то перший закон термодинаміки ($Q = \Delta U + A$) запишеться так: $\Delta U = -A$ або $A = U_1 - U_2$, тобто робота при адіабатному розширенні газу виконується за рахунок зменшення його внутрішньої енергії, а виконана робота при адіабатному стисненні газу іде на збільшення його внутрішньої енергії.

Адіабатний процес описується рівнянням Пуассона:

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (24.1)$$

де p - тиск; V об'єм; γ - показник адіабати. Показник

адіабати визначається відношенням $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, де C_p – молярна

теплоємність газу при сталому тиску, а C_v – молярна теплоємність газу при сталому об'ємі.

Якщо відомі температури і тиски, то рівняння адіабати можна записати так :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \quad (24.2)$$

Теплоємність тіла – фізична величина, чисельно рівна кількості теплоти яку необхідно надати, щоб нагріти тіло на один градус Кельвіна:

$$C = \frac{dQ}{dT}.$$

Для однорідних речовин розрізняють теплоємність молярну та питому.

Молярна теплоємність – фізична величина, чисельно рівна кількості теплоти, необхідної для нагрівання одного моля речовини на один градус Кельвіна:

$$C = \frac{dQ}{\nu dT} = \frac{\mu}{m} \frac{dQ}{dT}.$$

Питома теплоємність – фізична величина, чисельно рівна кількості теплоти, необхідної для нагрівання одиниці маси речовини на один градус Кельвіна:

$$c = \frac{dQ}{m dT}.$$

Питома теплоємність позначається малою літерою c , а молярна – великою (C_v , C_p). Між ними існує зв'язок – $C = \mu \cdot c$, де μ – молярна маса речовини.

Для газів різнять дві теплоємності: за сталого об'єму і за сталого тиску. Якщо нагрівання газу відбувається за сталого

об'єму, то вся підведена до тіла теплота іде на збільшення внутрішньої енергії. Якщо ж ту саму кількість газу нагрівають в тому ж інтервалі температур при сталому тиску, то газ розширюється, а це значить, що крім теплоти, яка йде на збільшення внутрішньої енергії, потрібна ще додаткова кількість теплоти для виконання роботи розширення газу. Тому $C_p > C_v$. Зв'язок між C_p і C_v описується рівнянням Мейєра

$$C_p = C_v + R, \quad (24.3)$$

де R – універсальна газова стала, чисельно рівна роботі ізобарного розширення одного моля газу при його нагріванні на 1К. Як відомо з молекулярно – кінетичної теорії газів

$$C_v = \frac{i}{2} R, \text{ а } C_p = \frac{i+2}{2} R,$$

де i – число ступенів вільності. Для одноатомних газів $i = 3$, для двоатомних $i = 5$ і для багатоатомних $i = 6$.

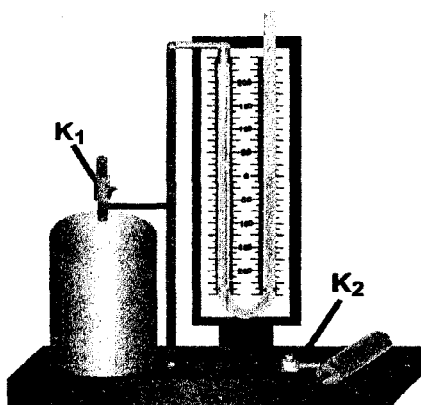


Рисунок 24.1

Одним із методів визначення

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \text{ є метод Клемана –}$$

Дезорма. Він полягає в наступному: кран K_1 з'єднує балон з насосом, а K_2 – з навколишнім середовищем (рис. 24.1).

При закритому крані K_2 в балон нагнітають деяку кількість повітря і закривають кран K_1 . Через деякий час внаслідок

теплообміну із зовнішнім середовищем температура повітря в балоні, яка зросла при накачуванні, знизиться до температури навколишнього середовища, а тиск стане вище атмосферного

на величину ρgh_1 , де h_1 – різниця висот рідини в колінах манометра, ρ – густина води.

Таким, чином повітря в балоні буде характеризуватись параметрами $p_1 = p_{\text{атм}} + \rho gh_1$, V_1 , T_1 , де V_1 – об'єм балона, T_1 – температура в балоні, яка дорівнює температурі навколишнього середовища. Відкриваємо кран K_2 . Повітря почне швидко розширюватися. Внаслідок того, що розширення відбувається дуже швидко, процес можна вважати адіабатним. Тиск в балоні почне падати. Коли він стане рівним атмосферному, на що вкаже рівність рівнів рідини в колінах манометра, закриємо кран K_2 .

Таким чином, в кінці адіабатного процесу повітря буде характеризуватись тиском $p_{\text{атм}}$ і температурою T_2 . Зв'язок між параметрами повітря на початку адіабатного процесу і в його кінці можна записати, використавши рівняння (24.2):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_{\text{атм}}}{p_{\text{атм}} + \rho gh_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \quad (24.4)$$

Відношення температур можна виразити через відношення тисків, виходячи із таких міркувань: нова маса повітря в балоні після закриття крану K_2 має температуру T_2 , об'єм V рівний об'єму балона і тиск $p_{\text{атм}}$. Внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем температура повітря підвищується до температури навколишнього середовища T_1 . Так як об'єм постійний, то тиск при цьому також зросте і стане вище атмосферного на величину ρgh_2 , де h_2 – різниця висот рідини в колінах манометра. Тобто відбувається ізохорний процес, для якого

$$\frac{p_{атм}}{T_2} = \frac{p_{атм} + \rho g h_2}{T_1} \quad (24.5)$$

або

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_{атм}}{p_{атм} + \rho g h_2} \quad (24.6)$$

З рівнянь (24.4) і (24.6) отримаємо:

$$\frac{p_{атм}}{p_{атм} + \rho g h_2} = \left(\frac{p_{атм}}{p_{атм} + \rho g h_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (24.7)$$

Прологарифмувавши рівняння (24.4) і, розв'язавши його відносно γ , одержимо вираз

$$\gamma = \frac{\ln(p_{атм} + \rho g h_1) - \ln p_{атм}}{\ln(p_{атм} + \rho g h_1) - \ln(p_{атм} + \rho g h_2)} \quad (24.8)$$

Розкладемо $\ln(p_{атм} + \rho g h_1)$ і $\ln(p_{атм} + \rho g h_2)$ в ряд Маклорена і обмежимося першими двома членами:

$$\ln(p_{атм} + \rho g h_1) = \ln p_{атм} + \frac{\rho g h_1}{p_{атм}} + \dots ;$$

$$\ln(p_{атм} + \rho g h_2) = \ln p_{атм} + \frac{\rho g h_2}{p_{атм}} + \dots$$

Підставивши одержані вирази у формулу (24.8), одержимо робочу формулу:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (24.9)$$

Порядок виконання роботи

1. Переконавшись, що кран K_2 , який з'єднує балон з атмосферою, закритий, а кран K_1 відкритий, повільно нагнітайте повітря поки різниця рівнів рідини в колінах манометра не досягне 10 – 20 см.
2. Закрийте кран K_1 і чекаємо, коли встановиться тиск в балоні. Показником цього служить припинення зміни рівня рідини в манометрі. Запишіть різницю висот h_1 .
3. Відкрийте кран K_2 і, як тільки рівні рідини в манометрі зрівняються, закрийте його. Чекайте деякий час.
4. Коли тиск остаточно встановиться, запишіть різницю рівнів h_2 .
5. Дослід повторіть 10 разів. Дані занесіть в таблицю.
6. За формулою (24.9) обчисліть γ .

Контрольні питання

- 1 Який процес називається адіабатним?
- 2 Запишіть рівняння адіабати (рівняння Пуассона).
- 3 Поясніть фізичний зміст показника адіабати.
- 4 Сформулюйте перший закон термодинаміки і поясніть його застосування до адіабатного процесу.
- 5 Що називається питомою і молярною теплоємністю, який зв'язок між ними?
- 6 Що таке ступені вільності? Скільки ступенів вільності мають одно-, дво- і багатоатомні молекули?
- 7 Поясніть, чому C_p більше C_v ?
- 8 Який фізичний зміст універсальної газової сталої R ?

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА АДІАБАТИ ПОВІТРЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ

Мета роботи: Ознайомитись з методикою визначення показника адіабаты за допомогою стоячих звукових хвиль.

Обладнання: Обладнання для одержання стоячих звукових хвиль, звуковий генератор.

Теоретичні відомості

У твердих тілах швидкість поширення поздовжньої хвилі

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (25.1)$$

де E - модуль Юнга (або модуль пружності), ρ - густина тіла. Якщо пружна хвиля поширюється в газі, який міститься в гладенькій прямій трубі сталого перерізу, то враховуючи, що в газі поширюються тільки поздовжні хвилі (опір зсуву в газах відсутній), формулу (25.1) можна використати для визначення швидкості звуку в газі (потрібно тільки знати модуль пружності E для газу).

Із закону Гука відомо, що

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l}. \quad (25.2)$$

Ця формула застосовується для випадку деформацій стиску і розтягу. Тут F/S - механічна напруга, $\Delta l/l$ - відносне видовження. У випадку газів $\frac{F}{S} = \Delta p$ можна розглядати як приріст тиску порівняно з тиском p в незбуреному газі. В

свою чергу $\frac{\Delta l \cdot S}{l \cdot S} = \frac{\Delta V}{V}$. Отже формула (25.2) набере вигляду

$$\Delta p = -E \cdot \frac{\Delta V}{V}, \text{ звідки одержимо:}$$

$$E = -\frac{dp}{dV} \cdot V. \quad (25.3)$$

Знак (-) показує, що збільшення тиску газу веде до зменшення об'єму.

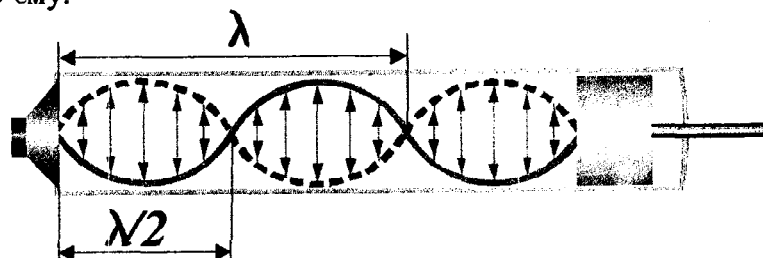


Рисунок 25.1

При поширенні в газі звукової хвилі стиск і розтяг в об'ємі газу відбуваються настільки швидко, що теплообмін між різними об'ємами газу не встигає відбутись. Тому процес стиску чи розширення газу при поширенні звукової хвилі можна вважати адіабатичним і застосовувати до нього рівняння Пуассона

$$pV^\gamma = \text{const} \quad (25.4)$$

Тут $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ показник адіабати, C_p і C_v відповідно теплоємності при сталому тиску і сталому об'ємі.

Продиференціювавши рівняння Пуассона матимемо $V^\gamma dp + \gamma p V^{\gamma-1} dV = 0$. Розділивши змінні, отримаємо

$$\frac{dp}{dV} = -\gamma \cdot \frac{p}{V}. \quad (25.5).$$

З рівнянь (25.3) і (25.5) знайдемо $E = \gamma \cdot p$. Підставивши цей вираз у формулу (25.1), будемо мати

$$v = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}. \quad (25.6)$$

З рівняння Клапейрона-Менделєєва $PV = \frac{m}{\mu} \cdot RT$ визначимо

$$\frac{p}{\rho} = \frac{RT}{\mu}. \quad (25.7)$$

Підставимо (25.7) в (25.6), тоді

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}. \quad (25.8)$$

Якщо швидкість поширення звуку відома, то показник адіабати γ знаходимо за формулою

$$\gamma = \frac{v^2 \mu}{RT}, \quad (25.9)$$

де μ – молярна маса газу (для повітря $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$), R – універсальна газова стала, T – абсолютна температура.

Швидкість звуку може бути визначена резонансним методом. В разі поширення звуку в трубі, обидва торці якої закриті і в одному з них поміщається джерело звуку, звукова хвиля буде багаторазово відбиватись від торців. (рис. 25.1) Кожна пара хвиль (падаюча і відбита) буде утворювати стоячу хвилю.

Якщо довжина газового проміжку між пучностями дорівнює цілому числу півхвиль, тобто

$$L = m \frac{\lambda}{2} \quad (m=1,2,3...),$$

то вузли (і пучності) кожної пари хвиль будуть в одних і тих же місцях. При цьому амплітуди коливань кожної пари хвиль в пучностях накладуться і результуюча амплітуда в пучностях буде максимальною. Настає резонанс. Голосність звуку при цьому буде максимальною. Слід зауважити, що на торці буде, в нашому випадку, вузол стоячої хвилі. Знаючи відстань між сусідніми вузлами (чи пучностями) l , можна визначити довжину хвилі $\lambda = 2 \cdot l$. За формулою $\lambda = \frac{v}{\nu}$ знайдемо

$$v = 2 \cdot l \cdot \nu, \quad (25.10)$$

де ν - частота звукових хвиль.

Підставивши (25.10) в (25.9), одержимо робочу формулу:

$$\gamma = \frac{4l^2 \nu^2 \mu}{RT}. \quad (25.11)$$

Схематично установка для вимірювання довжини хвилі резонансним методом представлена на рис. 25.2.

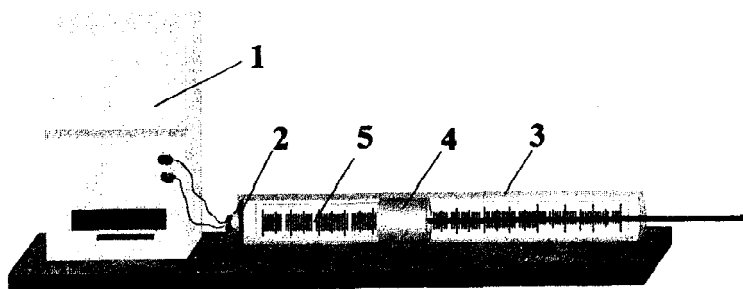


Рисунок 25.2

Звукова хвиля, частота якої задається звуковим генератором 1, поширюється від телефону 2 в скляній трубці 3 і відбивається від поршня 4, а відбита хвиля, в свою чергу, відбивається від поверхні телефону 2 і т.д.

Якщо відстань від телефону до поршня кратна $\lambda/2$, то голосність звуку буде максимальна.

Порядок виконання роботи

- 1 Ввімкнути генератор і встановити частоту 2000Гц (або ту, яку задасть викладач).
- 2 Присунути поршень до телефону.
- 3 Відсуваючи поршень від телефону, зафіксувати по шкалі 5 положення, для якого голосність звуку максимальна. Пересуваючи поршень далі, зафіксуємо наступне його положення, для якого голосність звуку буде максимальна.

Відстань між цими двома положеннями $l = \frac{\lambda}{2}$. Одержавши

4 максимуми звучання, знайдемо середнє значення $l_c = 1/3 (L_1 + L_2 + L_3)$, де $L_1 = X_2 - X_1$, $L_2 = X_3 - X_2$, $L_3 = X_4 - X_3$

- 4 Підставимо значення l у формулу (25.11) і одержимо остаточну розрахункову формулу

$$\gamma = \frac{4l_c^2 v^2 \mu}{RT} \quad (25.12)$$

по якій обчислюється показник адіабати.

- 5 Відносну похибку вимірювання знайти за формулою

$$\varepsilon = \frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \frac{2\Delta L}{L} + \frac{2\Delta v}{v} + \frac{\Delta \mu}{\mu} + \frac{\Delta T}{T} \quad (25.13).$$

- 6 Знаючи ε , знайти абсолютну похибку $\Delta \gamma$. Порівняти одержаний результат для γ з теоретичним значенням, вважаючи повітря двоатомним газом.
- 7 На вимогу викладача дослід повторити для інших частот.

Контрольні запитання

- 1 Який процес називається адіабатним?
- 2 Записати рівняння адіабати (рівняння Пуассона).
- 3 Який фізичний зміст показника адіабати?
- 4 Записати показник адіабати через число ступенів вільності.
- 5 Чому $C_p > C_v$?
- 6 Яка хвиля утворюється в трубі?
- 7 Що таке пучність і вузол?
- 8 Вивести робочу формулу.

Лабораторна робота № 26

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ ПОВІТРЯ КАПЛІЯРНИМ МЕТОДОМ

- Мета роботи:** вивчення внутрішнього тертя повітря як одного з явищ переносу в газах.
- Обладнання:** експериментальна установка ФПТ 1-1.

Теоретичні відомості

Явища переносу - це процеси встановлення рівноваги в системі шляхом переносу маси (дифузія), енергії (теплопровідність) та імпульсу молекул (внутрішнє тертя, або в'язкість). Усі ці явища обумовлені тепловим рухом молекул.

При явищі в'язкості спостерігається перенос імпульсу від молекул із шарів потоку, які рухаються швидше, до повільніших. Наприклад, у випадку протікання рідини або газу прямолінійною циліндричною трубою (капіляром) за малих швидкостей потоку течія є ламінарною, тобто потік газу рухається окремими шарами, які не перемішуються між

собою. У цьому випадку шари являють собою сукупність нескінченно тонких циліндричних поверхонь, вкладених одна в одну, які мають спільну вісь, що збігається з віссю труби.

Внаслідок хаотичного теплового руху молекули безперервно переходять із шару в шар і при зіткненнях з іншими молекулами обмінюються імпульсами спрямованого руху. При переході із шару з більшою швидкістю спрямованого руху в шар із меншою швидкістю молекули переносять у другий шар свій імпульс спрямованого руху. У "більш швидкий" шар переходять молекули з меншим імпульсом. У результаті перший шар гальмується, а другий - прискорюється. Дослід показує, що імпульс dP , що передається від шару до шару через поверхню площею S , пропорційний градієнту швидкості $\frac{dv}{dr}$, площі S та часу переносу dt :

$$dP = -\eta \cdot \frac{dv}{dr} \cdot S \cdot dt .$$

У результаті між шарами виникає сила внутрішнього тертя

$$F_T = \left| \frac{dP}{dt} \right| = \eta \cdot \left| \frac{dv}{dr} \right| \cdot S, \quad (26.1)$$

де η - коефіцієнт в'язкості. Для ідеального газу

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \langle \lambda \rangle \cdot \langle v_T \rangle ,$$

де ρ - густина газу; $\langle \lambda \rangle$ - середня довжина вільного пробігу молекул;

$\langle v_T \rangle$ - середня швидкість теплового руху молекул,
 $v_T = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot \mu}}$; μ - молекулярна маса газу; R - універсальна
 газова стала.

Виділимо в капілярі уявний циліндричний об'єм газу радіуса r і довжини l , як показано на рисунку 26.1.

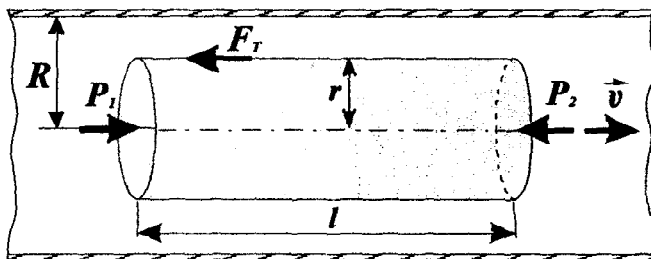


Рисунок 26.1 – До розрахунку об'ємної витрати газу в разі протікання його через капіляр

Позначимо тиски на його торцях P_1 і P_2 . При установленій течії сила тиску на циліндр $F = (P_1 - P_2) \cdot \pi r^2$ врівноважується силою внутрішнього тертя F_T що діє на бічну поверхню циліндра з боку зовнішніх шарів газу:

$$F - F_T = 0 . \quad (26.2)$$

Сила внутрішнього тертя визначається за формулою Ньютона (26.1). Зважаючи на те, що $S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$ і швидкість $v(r)$ зменшується при віддаленні від осі труби, тобто $\frac{dv}{dr} < 0$, можна записати:

$$F_T = -\eta \frac{dv}{dr} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l . \quad (26.3)$$

У цьому випадку умова стаціонарності (26.2) запишеться у вигляді:

$$(P_1 - P_2) \cdot \pi \cdot r^2 + \eta \frac{dv}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l = 0 . \quad (26.4)$$

Інтегруючи цю рівність, одержимо

$$v(r) = -\frac{P_1 - P_2}{4 \cdot \eta \cdot l} \cdot r^2 + C , \quad (26.5)$$

де C – стала інтегрування, яка визначається з граничних умов.

Для $r = R$ швидкість газу повинна дорівнювати нулю, оскільки сила внутрішнього тертя об стінку капіляра гальмує суміжний з нею шар газу.

Тоді

$$C = \frac{P_1 - P_2}{4 \eta l} R^2 . \quad (26.6)$$

Підставивши (26.6) у (26.5), одержимо

$$v(r) = \frac{P_1 - P_2}{4 \cdot \eta \cdot l} \cdot (R^2 - r^2) . \quad (26.7)$$

Обчислимо об'ємну витрату газу Q , тобто об'єм, що протікає за одиницю часу через поперечний переріз труби. Через кільцеву площадку з внутрішнім радіусом r і зовнішнім $r + dr$ щосекунди протікає об'єм газу $dQ = 2 \cdot \pi r \cdot dr \cdot v(r)$.

Тоді

$$Q = \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot r \cdot v(r) \cdot dr = \pi \cdot \frac{P_1 - P_2}{2 \cdot \eta \cdot l} \cdot \int_0^R (R^2 - r^2) \cdot r \cdot dr$$

або

$$Q = \pi \cdot \frac{P_1 - P_2}{8 \cdot \eta \cdot l} \cdot R^4 . \quad (26.8)$$

Формулу (26.8), яку називають формулою Пуазейля, можна використовувати для експериментального визначення коефіцієнта в'язкості газу.

Формулу Пуазейля було одержано в припущенні ламінарної течії газу або рідини. Однак із збільшенням швидкості потоку рух стає турбулентним і шари перемішуються. За турбулентного руху швидкість у кожній точці змінює своє значення та напрям і зберігається тільки середнє значення швидкості. Характер руху рідини або газу в трубі визначається числом Рейнольдса:

$$R_e = \frac{\langle v \rangle \cdot R \cdot \rho}{\eta}, \quad (26.9)$$

де $\langle v \rangle$ - середня швидкість потоку; ρ - густина рідини або газу, R - радіус труби.

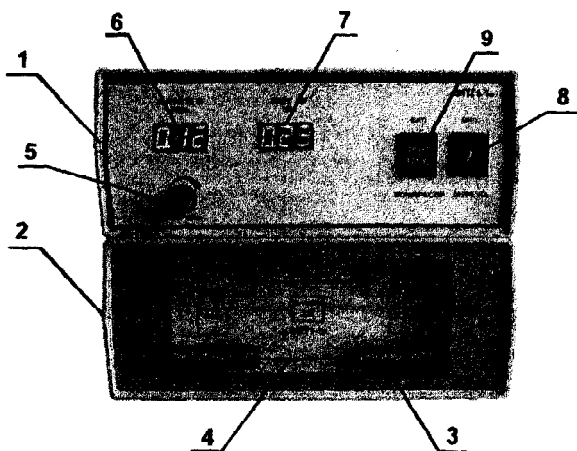
У гладких циліндричних каналах перехід від ламінарної течії до турбулентної відбувається при $R_e \approx 1000$. Тому в разі використання формули Пуазейля необхідно забезпечити виконання умови $R_e < 1000$. Крім того, експеримент необхідно ставити таким чином, щоб стисливістю газу можна знехтувати. Це можливо тоді, коли перепад тисків вздовж капіляра значно менший від самого тиску. У даній установці тиск газу дещо більший від атмосферного (10^3 см. вод. ст.), а перепад тисків становить від ~ 10 см. вод. ст., тобто приблизно 1 % від атмосферного.

Формула (26.8) справедлива для ділянки труби, в якій встановилась стала течія з квадратичним законом розподілу швидкостей (26.7) по перерізу труби. Така течія встановлюється на деякій відстані від входу в капіляр, тому для досягнення достатньої точності експерименту необхідно виконання умови $R \ll l$, де R - радіус; l - довжина капіляра.

Експериментальна установка

Для визначення коефіцієнта в'язкості повітря призначена експериментальна установка ФПТ 1-1, загальний вигляд якої зображений на рисунку 26.2.

Повітря в капіляр 4 нагнітається мікрокомпресором, розміщеним у блоці приладів 2. Об'ємна витрата повітря вимірюється датчиком витрати повітря АWM3300 ($0 \div 1$ л/хв.), а потрібне її значення встановлюється регулятором "ВИТРАТА", який знаходиться на передній панелі блоку приладів. Для вимірювання різниці тисків повітря на кінцях капіляра використовується датчик тиску МРХ5010 (до 10 кПА) і результати відображаються цифровим вимірювачем перепаду тиску.



- 1 – блок робочого елементу; 2- блок приладів; 3 – пневмокамера;
4 – капіляр; 5 – регулятор витрати; 6 – вимірник витрати;
7 – вимірник перепаду тиску; 8 – вмикач мережі; 9 – вмикач компресора

Рисунок 26.2 – Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ 1-1

Порядок виконання роботи

1. Подати на установку живлення, включивши в приладовому модулі перемикач «МЕРЕЖА». При цьому в модулі робочого елементу спалахує постійне підсвічування відсіку (зелене свічення), вказуючи на подачу живлення.

2. Включити в приладовому модулі перемикач «КОМПРЕСОР». При цьому відсік в модулі робочого елементу підсвічує миготливим червоним світлом, вказуючи на те, що мікрокомпресор почав прокачування капіляра з мінімально можливою витратою повітря.

3. Плавнo обертаючи за годинниковою стрілкою регулятор «ВИТРАТА» встановити за показанням витратоміру вибране значення об'ємної витрати повітря Q .

4. Зняти відповідні показання з вимірника різниці тиску ΔP у кПа. Значення Q і ΔP занести в таблицю 26.1.

Таблиця 26.1

№ виміру	Q , м ³ /с	ΔP , Па	η , кг/(м·с)

5. Повторити виміри по пп. 2-3-4 для 5 значень об'ємної витрати повітря в діапазоні від 0,1-1,0 л/хв.

6. Встановити регулятор витрати повітря на мінімум, після чого вимкнути установку тумблером "МЕРЕЖА".

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного режиму визначити за формулою Пуазейля коефіцієнт в'язкості повітря:

$$\eta = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot Q \cdot l} .$$

Знайти середнє значення коефіцієнта в'язкості.

2. За формулою $\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ обчислити середню швидкість

теплового руху молекул повітря, враховуючи, що молярна маса повітря $\mu = 29$ кг/кмоль, а універсальна газова стала $R = 8,31 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль·К).

3. За формулою $\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle v_T \rangle}$ обчислити середню довжину

вільного пробігу молекул. При цьому густину повітря знайти з таблиць для відомих значень температури й тиску в лабораторії в процесі виконання експерименту.

4. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні запитання

1. Розкажіть про явища переносу в газах.

2. Поясніть явище внутрішнього тертя в ідеальному газі з точки зору молекулярно-кінетичної теорії.

3. Напишіть і поясните формулу Ньютона для внутрішнього тертя.

4. Який фізичний зміст коефіцієнта в'язкості? В яких одиницях СІ вимірюється ця величина?

5. Запишіть формулу для коефіцієнта в'язкості ідеального газу.

6. Яка величина називається середньою швидкістю теплового руху молекул ідеального газу? Від яких фізичних величин вона залежить?

7. Яка величина зветься середньою довжиною вільного пробігу молекули? Від яких фізичних величин вона залежить?

8. У чому полягає капілярний метод визначення коефіцієнта в'язкості газів?

9. Виведіть формулу Пуазейля. За яких умов її можна застосовувати?

10. Як змінюється швидкість руху газу по радіусу каналу за ламінарного режиму течії?

11. Як оцінити середню довжину вільного пробігу та ефективний діаметр молекули газу, використовуючи явище внутрішнього тертя у газах?

12. Чому при будівництві магістральних газопроводів використовують труби великого діаметра, а не збільшують тиск газу, який транспортується.

Лабораторна робота № 27

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МЕТОДОМ НАГРІТОЇ НИТКИ

Мета роботи: вивчення теплопровідності повітря, як одного з явищ переносу в газах.

Обладнання: експериментальна установка ФПТ 1-3

Теоретичні відомості

Поширення теплоти у газах відбувається трьома способами: тепловим випромінюванням (перенос енергії електромагнітними хвилями), конвекцією (перенос енергії за рахунок переміщення шарів газу в просторі з областей з більш високою температурою в області з нижчою температурою) та теплопровідністю.

Теплопровідність - це процес передачі теплоти від більш нагрітого шару газу до менш нагрітого за рахунок хаотичного теплового руху молекул. При теплопровідності відбувається безпосередня передача енергії від молекул, що мають більшу енергією, до тих, що мають меншу. Для стаціонарного

процесу, за якого різниця температур у шарі газу не змінюється з часом, кількість теплоти δQ , яка переноситься внаслідок теплопровідності за час $d\tau$ через поверхню площею S , перпендикулярну до напрямку переносу енергії, в напрямі зменшення температури, визначається законом Фур'є:

$$\delta Q = -\chi \cdot \frac{dT}{dr} \cdot S \cdot d\tau, \quad (27.1)$$

де χ - коефіцієнт теплопровідності; dT/dr - градієнт температури.

Для ідеального газу

$$\chi = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \langle \lambda \rangle \cdot \langle v_T \rangle \cdot C_V, \quad (27.2)$$

де ρ - густина газу; $\langle \lambda \rangle$ - середня довжина вільного пробігу молекули; $\langle v_T \rangle$ - середня швидкість теплового руху молекул,

$\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$; C_V - питома теплоємність газу за сталого об'єму.

Розглянемо два коаксіальних циліндри, простір між якими заповнено газом. Якщо внутрішній циліндр нагрівати, а температуру зовнішнього циліндра підтримувати сталою, нижчою за температуру нагрівача, то в кільцевому шарі газу виникає радіальний потік теплоти, направлений від внутрішнього циліндра до зовнішнього. При цьому температури шарів газу, прилеглих до стінок циліндрів, дорівнюють температурі стінок. Виділимо у газі кільцевий шар радіусом r , товщиною dr і довжиною L . За законом Фур'є (27.1) тепловий потік $q = \delta Q/d\tau$, тобто кількість теплоти, що проходить через цей шар за одну секунду, можна записати у вигляді

$$q = -\chi \frac{dT}{dr} S = -\chi \frac{dT}{dr} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L . \quad (27.3)$$

Розділивши змінні, одержимо

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} dT .$$

Тоді

$$\int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} \int_{T_1}^{T_2} dT$$

або

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} \cdot (T_1 - T_2) . \quad (27.4)$$

В (27.4) T_1 , R_1 і T_2 , R_2 - відповідно температури поверхонь та радіуси внутрішнього і зовнішнього циліндрів.

З рівняння (27.4) одержуємо формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності газу:

$$\chi = \frac{q \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)} . \quad (27.5)$$

Формулу (27.5) одержано у припущенні, що теплота переноситься від внутрішнього до зовнішнього циліндра тільки завдяки теплопровідності. Це припущення є достатньо обґрунтованим, оскільки потік променистої енергії при невисоких температурах і малому діаметрі нагрівника становить незначну частину кількості теплоти, що переноситься, а конвекція усувається підбором діаметра зовнішнього циліндра та його вертикальним розміщенням в експериментальній установці.

Внутрішнім циліндром може служити тонка дротина (нитка), звичайно вольфрамова, яка нагрівається електричним струмом. Тоді після встановлення стаціонарного режиму тепловий потік можна прийняти таким, що дорівнює потужності електричного струму у дротині

$$q = J_H U_H ,$$

де J_H - струм через дротину; U_H - спад напруги на дротині.

Якщо послідовно з дротиною підключити еталонний резистор опору R_p , то

$$J_H = \frac{U_p}{R_p} ,$$

і тоді

$$q = \frac{U_p \cdot U_H}{R_p} , \quad (27.6)$$

де U_p - спад напруги на еталонному резисторі.

Використовуючи рівність (27.6) у формулі (27.5), одержимо

$$\chi = \frac{U_p \cdot U_H \cdot \ln \frac{D}{d}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot R_p \cdot \Delta T} , \quad (27.7)$$

де D і d - діаметри зовнішнього циліндра й дротини; $\Delta T = T_H - T_T$ - різниця температур дротини і зовнішнього циліндра (трубки).

Температуру трубки T_T можна взяти такою, що дорівнює температурі навколишнього повітря. Для обчислення різниці температур ΔT у шарі газу запишемо формули, що визначають опір дротини при температурі навколишнього повітря і у нагрітому стані:

$$R_{H0} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_0),$$

$$R_H = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t),$$

де R_0 - опір дротини при $t=0$ °C; α - температурний коефіцієнт опору матеріалу дротини.

Виключивши з цих рівнянь R_0 , знайдемо

$$\Delta T = t - t_0 = \frac{R_H - R_{H0}}{\alpha \cdot R_{H0}} (1 + \alpha \cdot t_0).$$

Враховуючи, що $R_H = \frac{U_H}{J_H}$, $J_H = \frac{U_p}{R_p}$, і $R_{H0} = \frac{U_{H0}}{J_{H0}}$,

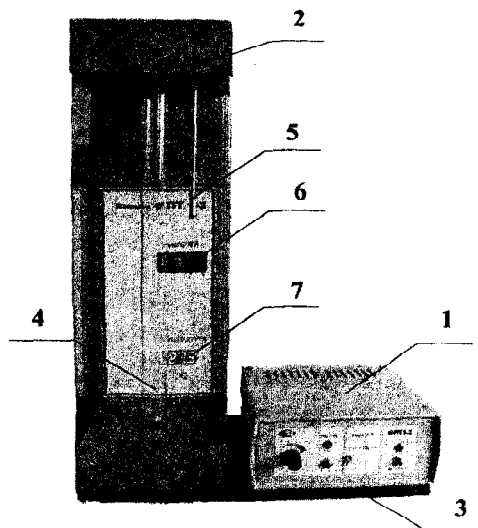
$J_{H0} = \frac{U_{p0}}{R_{p0}}$, отримаємо

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_H}{U_p} - \frac{U_{H0}}{U_{p0}} \right) \cdot (1 + \alpha \cdot t_0)}{\frac{U_{H0}}{U_{p0}} \cdot \alpha}, \quad (27.8)$$

де U_H , U_{H0} - спад напруги на дротині відповідно у нагрітому стані і при температурі навколишнього повітря t_0 ; U_p , U_{p0} - спад напруги на еталонному резисторі відповідно при нагрятій дротині і при температурі навколишнього повітря t_0 .

Експериментальна установка

Для визначення коефіцієнта теплопровідності повітря призначена експериментальна установка ФПТ1-3, загальний вигляд якої зображено на рисунку 27.1.



*1 – блок приладів; 2 – цифровий термометр; 3 – блок робочого елемента;
4 – вольфрамова дротина; 5 – стояк; 6 – датчик температури
(термопара); 7 – контролер для вимірювання температури*

Рисунок 27.1 - Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-3

Робочий елемент установки являє собою скляну трубку, заповнену повітрям, уздовж осі якої натягнута вольфрамова дротина 4. Температура трубки в ході експерименту підтримується сталою завдяки примусовій циркуляції повітря між трубкою і кожухом блоку робочого елемента 3, яка здійснюється за допомогою вентилятора, що знаходиться в блоці робочого елемента. Температура повітря навколо трубки вимірюється датчиком температури і реєструється цифровим контролером для виміру температури. Значення падінь напруги на сталонному резисторі U_p і на дротині U_H вимірюється цифровим контролером для виміру напруги. Значення напруги на дротині встановлюється регулятором "НАГРІВ", який знаходиться на передній панелі блоку приладів 1. Геометричні розміри робочого елемента - діаметр

трубки D , діаметр дротини d , довжина трубки L , температурний коефіцієнт опору матеріалу дротини α - вказані на робочому місці.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку тумблером "МЕРЕЖА". Включити тумблер "НАГРІВ".

2. Натиснути кнопку " U_p " (режим вимірювання спаду напруги на еталонному резисторі) і за допомогою регулятора "НАГРІВ" встановити спад напруги U_{p0} не більш 0,06 В, за якого температура дротини залишається практично незмінною ("ненагріваючий" струм).

3. Натиснути кнопку " U_H " (режим вимірювання спаду напруги на дротині) і зареєструвати значення напруги U_{H0} .

4. Повторити виміри за пп. 2-3 для 3 значень напруги U_{p0} . Обчислити середнє значення U_{p0} і U_{H0} . Усі результати занести до таблиці 27.1.

Таблиця 27.1

№ виміру	U_{p0} , мВ	U_{H0} , мВ	t_0 , °C	U_p , мВ	U_H , мВ	ΔT , К	χ , Вт/(м·К)

5. Натиснути кнопку " U_p " і за допомогою регулятора "НАГРІВ", встановити спад напруги на еталонному резисторі U_p у діапазоні 0,3...6,5 В.

6. Зачекавши 2 хвилини, що необхідно для стабілізації теплового режиму робочого елемента, натиснути кнопку " U_H " і визначити спадання напруги на дроті U_H .

7. Повторити вимірювання за пп. 5-6 для 3-5 значень спаду напруги U_p . Результати занести до таблиці 27.1.

8. Встановити ручку регулятора "НАГРІВ" на мінімум. Відімкнути тумблер "НАГРІВ", після чого відімкнути установку тумблером "МЕРЕЖА".

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного вимірювання за формулою (27.8) розрахувати різницю температур ΔT , а за формулою (27.7) - коефіцієнт теплопровідності χ і занести одержані значення до таблиці 27.1.
2. Знайти середнє значення коефіцієнта теплопровідності повітря $\langle \chi \rangle$.
3. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні запитання

1. Розкажіть про можливі способи передачі теплоти.
2. У чому суть явища теплопровідності? Яка величина переноситься при теплопровідності?
3. Яку величину називають тепловим потоком? У яких одиницях СІ вона вимірюється?
4. Якою формулою описується потік теплоти, перенесеної при теплопровідності?
5. Який фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності? У яких одиницях СІ вимірюється ця величина?
6. Запишіть формулу для коефіцієнта теплопровідності ідеального газу.
7. Поясніть поняття градієнта температури.
8. У чому полягає метод нагрітої нитки для визначення коефіцієнта теплопровідності газів?
9. Виведіть розрахункову формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності методом нагрітої нитки.
10. Поясніть призначення еталонного резистора у схемі експериментальної установки.
11. Як визначається різниця температур дротини і зовнішньої трубки у даній роботі?
12. Як оцінити середню довжину вільного пробігу та ефективний діаметр молекули газу, використовуючи явище теплопровідності?

**ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ
ПОВІТРЯ ЗА СТАЛИХ ТИСКУ Й ОБ'ЄМУ
РЕЗОНАНСНИМ МЕТОДОМ**

- Мета роботи:** вивчення процесу поширення звукової хвилі, вимірювання швидкості звуку у повітрі за різних температур та визначення відношення теплоємностей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$.
- Обладнання:** експериментальна установка ФПТ 1-7.

Теоретичні відомості

Пружними хвилями називають механічні збурення, які поширюються у пружному середовищі. Нехай вздовж однорідного циліндричного зразка з площею поперечного перерізу S поширюється пружна поздовжня хвиля. Отже, разом із швидкістю v поширюється відносна деформація $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ (рис. 28.1). Виділивши деяку частину зразка, знайдемо густину недеформованого середовища:

$$\rho = \frac{m}{Sl}, \quad (28.1)$$

де l - довжина виділеної частини зразка.

Стисканню відповідає збільшення густини, отже, густина в області стискання

$$\rho + \Delta\rho = \frac{m}{S \cdot (l - \Delta l)}. \quad (28.2)$$

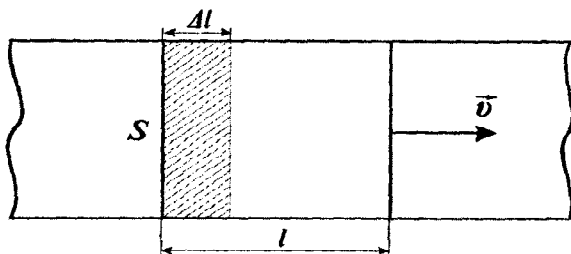


Рисунок 28.1 - Схема поширення збурення вздовж однорідного зразка

Тут ми врахували, що площа поперечного перерізу S зразка не змінюється при поширенні поздовжньої хвилі. У формулі (28.2) помножимо чисельник і знаменник на величину $(l + \Delta l)$:

$$\rho + \Delta\rho = \frac{m(l + \Delta l)}{S \cdot (l^2 - \Delta l^2)}.$$

Враховуючи, що $\Delta l^2 \ll l^2$, отримаємо:

$$\rho + \Delta\rho = \frac{m(l + \Delta l)}{S \cdot l^2} = \frac{m}{S \cdot l^2} + \frac{m \cdot \Delta l}{S \cdot l^2}.$$

Звідси, враховуючи формулу (28.1), маємо

$$\rho + \Delta\rho = \rho + \rho \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

або

$$\Delta\rho = \rho \epsilon. \quad (28.3)$$

Поширення збурення являє собою рух області стискання із швидкістю v вздовж зразка. За проміжок часу dt через поперечний переріз пройде ділянка стискання довжиною $dx = vdt$. Маса цієї ділянки $dm = \Delta\rho \cdot S \cdot dx$ або, враховуючи (28.3), $dm = \rho \cdot \epsilon \cdot S \cdot v \cdot dt$.

Маса dm рухається зі швидкістю v і має імпульс $v \cdot dm = \rho \cdot \epsilon \cdot S \cdot v^2 \cdot dt$. Записуючи силу пружності за законом Гука, отримаємо

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l}, \quad (28.4)$$

де E – модуль пружності, звідки

$$F = E \cdot \epsilon \cdot S.$$

Зміна імпульсу маси dm (оскільки до проходження збурювання ця маса перебувала у спокої) за другим законом Ньютона дорівнює добуткові діючої на неї сили пружності і часу її дії.

Отже

$$F \cdot dt = \rho \cdot \epsilon \cdot S \cdot v^2 \cdot dt$$

або

$$E \cdot \epsilon \cdot S \cdot dt = \rho \cdot \epsilon \cdot S \cdot v^2 \cdot dt,$$

звідки

$$v^2 = \frac{E}{\rho}$$

і швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (28.5)$$

Якщо пружна хвиля поширюється у газі, який міститься у гладенькій прямолінійній трубі зі сталим поперечним перерізом, то враховуючи, що на відміну від твердих тіл газу не чинять опору зсуву, в них можуть виникати тільки поздовжні хвилі, і, отже, швидкість поширення пружної хвилі в газі може обчислюватись за формулою (28.5). Визначимо величину E для газу. Якщо за дії сили F на деякий об'єм газу

тиск у ньому одержить приріст ΔP по відношенню до тиску газу P в незбуреному стані, то за аналогією з (28.4)

$$\Delta P = E \cdot \frac{\Delta V}{V}.$$

Вважаючи зміни тиску dP і об'єму dV нескінченно малими, можна записати, що

$$E = - \frac{dP}{\frac{dV}{V}}, \quad (28.6)$$

де знак мінус означає, що збільшення тиску відповідає зменшенню об'єму.

Нехай у газі поширюється звукова хвиля, яка являє собою пружну хвилю малої інтенсивності, здатну викликати відчуття звуку, з частотою від 16 до 20000 Гц. Коливання густини у звуковій хвилі відбуваються так швидко, що теплообмін між шарами газу, які мають різні температури, не встигає відбутися. Тому процес поширення звукової хвилі в газі можна вважати адіабатичним і до нього можна застосувати рівняння Пуассона (28.11). Диференціюючи це рівняння, отримаємо

$$V^\gamma \cdot dP + \gamma \cdot P \cdot V^{\gamma-1} \cdot dV = 0,$$

звідки

$$\frac{dP}{\frac{dV}{V}} = -\gamma \cdot P. \quad (28.7)$$

З (28.6) і (28.7) знайдемо

$$E = \gamma \cdot P. \quad (28.8)$$

Визначивши P з рівняння Клапейрона-Менделєєва і враховуючи, що густина газу $\rho = \frac{m}{V}$, отримаємо

$$P = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{\mu}.$$

Підставимо значення P у (28.8), тоді

$$E = \gamma \cdot \rho \cdot \frac{R \cdot T}{\mu}. \quad (28.9)$$

Підставивши співвідношення (28.9) у формулу (28.5), матимемо формулу Лапласа для розрахунку швидкості звуку в газі:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{\mu}}, \quad (28.10)$$

з якої

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{v^2 \cdot \mu}{R \cdot T}. \quad (28.11)$$

Таким чином, для визначення відношення теплоємностей газу γ достатньо виміряти його температуру T та швидкість поширення звуку v у цьому газі.

Швидкість звуку за даної температури може бути визначена резонансним методом. Під час поширення хвилі вздовж закритого каналу, вона багаторазово відбивається від торців, і звукові коливання в каналі є результатом накладання цих відбитих хвиль. Якщо довжина каналу L дорівнює цілому числу півхвиль $L = \frac{n \cdot \lambda}{2}$ (n - будь-яке ціле число, λ - довжина хвилі), то хвиля, відбита від торця каналу, повернувшись до його початку і знову відбиваючись, збігається по фазі з

прямою хвилею. Такі хвилі підсилюють одна одну, амплітуда коливань при цьому різко зростає - настає резонанс. Під час звукових коливань шари газу, прилеглі до торців каналу, не зазнають зміщення. У цих місцях утворюються вузли зміщення, які повторюються через $\lambda/2$ по всій довжині каналу. Між вузлами знаходяться максимуми зміщення (пучності). Швидкість звуку v зв'язана з частотою коливань ν і довжиною хвилі λ співвідношенням $v = \lambda \nu$, з урахуванням якого умову резонансу можна записати у вигляді

$$2 \cdot L \cdot \nu_0 = n \cdot v, \quad (28.12)$$

де ν_0 - резонансна частота.

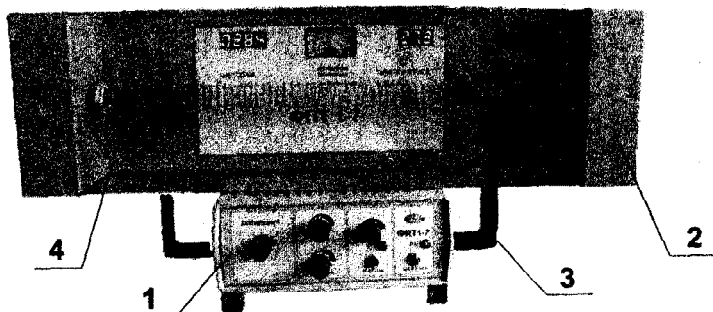
Залежність (28.12) резонансної частоти від числа n може бути перевірена експериментально. Змінюючи частоту коливань за сталої довжини каналу, необхідно побудувати графік залежності $\nu_0 = f(n)$, за кутовим коефіцієнтом якого

$$K_\alpha = \frac{v}{2 \cdot L} \text{ визначається швидкість звуку.}$$

Експериментальна установка

Для визначення відношення теплоємностей повітря $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ резонансним методом існує експериментальна установка ФПТ1-7, загальний вигляд якої показано на рисунку 28.2.

Робочий елемент установки являє собою скляну трубу довжиною L , на торцях якої розміщені телефон та мікрофон. Температуру повітря у трубі можна змінювати за допомогою нагрівальної спіралі, навитої на трубу. Потужність нагрівника установлюється регулятором "НАГРІВ", який знаходиться на передній панелі блоку приладів 1. Температура повітря у трубі вимірюється напівпровідниковим термометром і реєструється



1 – блок приладів; 2 – блок робочого елемента; 3 – стояк;
4 – труба з нагрівником

Рисунок 28.2 - Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-7

на цифровому індикаторі "ТЕМПЕРАТУРА". У блоці приладів розташований генератор звукових коливань, підключений до телефону, який збуджує звукові коливання в трубі. Частота коливань, які задаються звуковим генератором, регулюється ручками "ГРУБО" і "ТОЧНО" і реєструється на цифровому індикаторі "ЧАСТОТА". Сигнал від мікрофона вимірюється міліамперметром - "індикатором резонансу", чутливість якого регулюється ручкою "ПОСИЛЕННЯ". Максимальні значення струму, зареєстровані міліамперметром під час плавної зміни частоти коливань, відповідають появі резонансу на каналі. Довжину труби L вказано на робочому місці.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку тумблером "МЕРЕЖА".
2. Ручки "ГРУБО" і "ТОЧНО" встановити у крайнє ліве положення. Ручкою "ПОСИЛЕННЯ" відрегулювати чутливість "індикатора резонансу" (стрілка повинна бути приблизно на третині шкали).

3. Плавно збільшуючи за допомогою ручок "Грубо" і "Точно" частоту коливань, які задаються звуковим генератором, визначити частоту 1-го резонансу по найбільшому відхиленню стрілки на шкалі "індикатора резонансу". Результат вимірювання занести до таблиці 1.

4. Плавно збільшуючи частоту коливань за допомогою ручок "ГРУБО" і "ТОЧНО" і вибираючи потрібну чутливість системи індикації резонансу рукояткою "ПОСИЛЕННЯ", визначити частоту 2...6 резонансів. Роблячи виміри при зменшенні частоти, переконатися у повторюваності результатів. Результати вимірювань занести до таблиці 28.1.

5. Увімкнути тумблер "НАГРІВ" і регулятором температури нагріву досягти температури повітря в трубі $t_2=40...45$ °С. Після стабілізації температури повторити виміри за пп. 2-4.

6. Збільшуючи нагрів, досягти температури повітря в трубі $t_3=55...60$ °С. Після стабілізації температури повторити виміри по пп. 2-4.

7. Регулятор температури нагріву вивести в крайнє ліве положення, вимкнути тумблер "НАГРІВ", ручки "ПОСИЛЕННЯ", "ГРУБО" і "ТОЧНО" установити в крайнє ліве положення, після чого вимкнути установку тумблером "МЕРЕЖА".

Таблиця 28.1

№ резо- нансу	$t_1 = ^\circ\text{C}$			$t_2 = ^\circ\text{C}$			$t_3 = ^\circ\text{C}$		
	ν , Гц	ν , м/с	γ	ν , Гц	ν , м/с	γ	ν , Гц	ν , м/с	γ

Обробка результатів вимірювань

1. Побудувати графіки залежності резонансної частоти від номера резонансу $\nu_0 = f(n)$ для кожної з температур та визначити кутові коефіцієнти K_α для кожного графіка.

2. Для кожного значення температури повітря в трубці, використовуючи знайдені кутові коефіцієнти K_α визначити швидкість звуку v по формулі $v = 2 \cdot L \cdot K_\alpha$ та відношення теплоємностей за формулою (28.11), враховуючи, що молярна маса повітря $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

3. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні запитання

1. Що таке пружна хвиля? Охарактеризуйте процес поширення пружної хвилі в газі.

2. Виведіть формулу швидкості поширення пружної хвилі.

3. Сформулюйте I закон термодинаміки. Запишіть цей закон для ізобаричного, ізохоричного, ізотермічного та адіабатичного процесів.

4. Виведіть формулу Майєра.

5. Виведіть рівняння Пуассона.

6. Що таке адіабатичний процес? Чому процес поширення звукової хвилі в газі є адіабатичним?

7. Що таке звукова хвиля? Виведіть формулу швидкості звуку в газі.

8. У чому полягає резонансний метод визначення швидкості звуку в газі?

9. Чому при поширенні звуку в закритому каналі можуть утворюватись вузли та пучності? За якої умови вони утворюються?

10. Як змінюється швидкість звуку в повітрі зі зміною його температури?

Лабораторна робота № 29

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ ЕНТРОПІЇ В ПРОЦЕСІ НАГРІВАННЯ І ПЛАВЛЕННЯ ОЛОВА

- Мета роботи:** визначення зміни ентропії за фазового переходу першого роду на прикладі плавлення олова.
- Обладнання:** експериментальна установка ФПТ І-ІІ.

Теоретичні відомості

Фазовий перехід першого роду - це фазове перетворення, яке супроводжується поглинанням або виділенням деякої кількості прихованої теплоти та зміною питомого об'єму речовини; температура переходу залишається сталою і залежить від тиску. Отже, для розплавлення деякої маси m речовини, що знаходиться при температурі плавлення $T_{\text{пл}}$, необхідно витратити кількість теплоти

$$Q_{\text{п}} = \lambda \cdot m, \quad (29.1)$$

де λ - питома теплота плавлення даної речовини.

Ентропією зветься така функція стану термодинамічної системи, диференціал якої dS в оборотному процесі дорівнює відношенню нескінченно малої кількості теплоти δQ наданої системі, до термодинамічної температури T системи:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (29.2)$$

Ентропія завжди визначається з точністю до сталої величини, тому зміст має лише її зміна при переході системи зі стану 1 до стану 2:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (29.3)$$

Процес плавлення олова проходить за сталої температури $T=T_{\Pi}$ і, отже, є ізотермічним. Зміну ентропії у такому процесі можна знайти за формулою (29.3):

$$\Delta S_{\Pi} = \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot \int \delta Q_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi}}{T_{\Pi}}.$$

З виразу (29.3) випливає, що зміну ентропії при нагріванні і плавленні олова можна визначити як суму зміни ентропії при нагріванні його від початкової температури T_K до температури плавлення T_{Π} та при плавленні олова:

$$\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_{\Pi} = \int_{T_K}^{T_{\Pi}} \frac{\delta Q_H}{T} + \frac{Q_{\Pi}}{T_{\Pi}}.$$

Враховуючи, що $\delta Q_H = c \cdot m \cdot dt$, і беручи до уваги формулу (29.1), отримуємо

$$\Delta S = c \cdot m \cdot \int_{T_K}^{T_{\Pi}} \frac{dT}{T} + \frac{\lambda \cdot m}{T_{\Pi}}$$

або

$$\Delta S = c \cdot m \cdot \ln \frac{T_{\Pi}}{T_K} + \frac{\lambda \cdot m}{T_{\Pi}}, \quad (29.4)$$

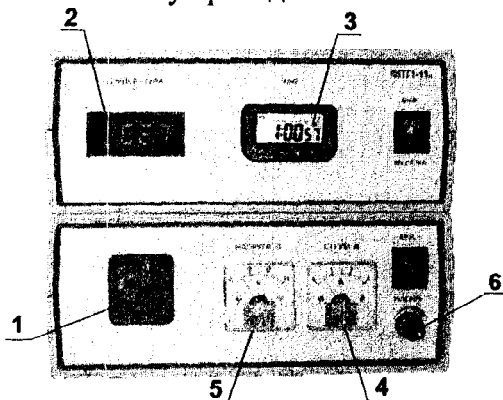
де c і λ - питома теплоємність та питома теплота плавлення олова.

Формула (29.4) може бути використана для експериментального визначення зміни ентропії при нагріванні та плавленні олова після вимірювання значень температур T_K і T_{Π} .

Експериментальна установка

Для визначення зміни ентропії при нагріванні і плавленні олова призначена експериментальна установка ФПТІ-11, загальний вигляд якої показано на рисунку 29.1.

Нагрівання олова відбувається в тиглі за допомогою електричного нагрівника. Температура олова вимірюється цифровим термометром 2. Час нагрівання вимірюється цифровим секундоміром 3. Секундомір приводиться в дію вмиканням живлення блоку приладів.



1 - стакан; 2 - цифровий контролер для виміру температури,
3 - секундомір; 4 - амперметр; 5 - вольтметр; 6 - регулятор нагріву

**Рисунок 29.1 - Загальний вигляд експериментальної установки
ФПТІ-11**

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку тумблером «МЕРЕЖА» та виміряти початкову температуру олова (T_K).

2. Одночасно увімкнути нагрівач та секундомір і через кожну хвилину вимірювати температуру олова. Вимірювання проводити до тих пір, доки температура після досягнення

сталой величини ($T_{\text{п}}$) не почне підвищуватись. Результати вимірювань позначити на графіку $T = f(t)$.

3. Вимкнути нагрівник і провести аналогічні виміри при охолодженні олова, позначаючи температуру на тому самому графіку, що і в п.2.

4. Вимкнути установку тумблером «МЕРЕЖА».

Обробка результатів вимірювань

1. За двома одержаними графіками визначити температури, які відповідають ділянкам, паралельним осі часу і за їх середнім значенням знайти температуру плавлення олова.

2. За формулою (29.4) визначити зміну ентропії під час нагрівання та плавлення олова. Питому теплоту плавлення та питому теплоємність олова знайти у довідниках.

3. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні запитання

1. Що таке фазовий перехід першого роду?

2. Що таке ентропія?

3. Чому дорівнює зміна ентропії за ізотермічного та адіабатичного процесів?

4. Виведіть основну розрахункову формулу, яка використовується у даній роботі.

5. У чому полягає метод визначення зміни ентропії за нагрівання та плавлення олова, який використано у даній роботі?

6. До якої температури слід нагрівати олово у тиглі при виконанні експерименту?

7. Які основні джерела похибок даного методу вимірювання?

ВИЗНАЧЕННЯ МОЛЕКУЛЯРНОЇ МАСИ І ГУСТИНИ ГАЗУ МЕТОДОМ ВІДКАЧУВАННЯ

Мета роботи: ознайомлення з одним із методів визначення молекулярної маси і густини газу.

Обладнання: експериментальна установка ФПТ 1-12

Теоретичні відомості

Молекулярною (молярною) масою зветься маса одного моля речовини. У системі СІ ця величина вимірюється в кілограмах на моль. Моль - кількість речовини, яка містить стільки ж структурних елементів (молекул, атомів і т.д.), скільки атомів міститься в ізотопі вуглецю ^{12}C масою 0,012 кг. Молярну масу газу можна визначити з рівняння газового стану.

При не дуже високих тисках, але досить високих температурах газ можна вважати ідеальним. Стан такого газу описується рівнянням Менделєєва-Клапейрона:

$$P \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T, \quad (30.1)$$

де P - тиск газу; V - об'єм газу; m - маса газу; μ - молярна маса газу; $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ - універсальна газова стала; T - абсолютна температура газу.

З рівняння (30.1) можна одержати формулу для молярної маси газу:

$$\mu = \frac{m \cdot R \cdot T}{P \cdot V}. \quad (30.2)$$

Якщо вимірювання тиску P , об'єму V , температури T газу, тобто параметрів газу, які входять до формули (30.2), не викликає особливих труднощів, то визначення маси газу виконати практично неможливо, тому що газ можна зважити тільки разом з колбою, в якій він знаходиться. Існує інший спосіб визначення μ , який дозволяє виключити невідоме значення маси колби m_0 . Це можна зробити, розглянувши рівняння стану двох мас m_1 і m_2 того самого газу при незмінних температурі T та об'ємі V .

Нехай у колбі об'ємом V знаходиться газ масою m_1 , під тиском P_1 і за температури T . Рівняння стану (30.1) для цього газу має вигляд

$$P_1 \cdot V = \frac{m_1}{\mu} \cdot R \cdot T . \quad (30.3)$$

Відкачаємо частину газу з колби, не змінюючи його температури. Після відкачування маса газу, що залишився у колбі, та його тиск зменшуються. Позначимо їх відповідно m_2 і P_2 і знову запишемо рівняння стану

$$P_2 \cdot V = \frac{m_2}{\mu} \cdot R \cdot T . \quad (30.4)$$

З рівнянь (30.3) та (30.4) отримаємо:

$$\mu = \frac{m_1 - m_2}{P_1 - P_2} \cdot \frac{R \cdot T}{V} . \quad (30.5)$$

Одержана формула (30.5) дає можливість визначити μ , якщо відома зміна маси газу (але не сама маса), а також зміна тиску, температура та об'єм газу.

У даній роботі досліджуванним газом є повітря, яке являє собою суміш азоту, кисню, аргону та інших газів.

Формула (30.5) придатна і для визначення μ суміші газів. Знайдене у цьому випадку значення і являє собою деяку середню або ефективну молярну масу суміші газів. Молярна маса суміші газів може бути розрахована і теоретично, якщо відомий процентний вміст та молярна маса кожного з газів, який входить до складу суміші, за формулою

$$\mu_c = \frac{1}{\frac{m_1}{m} \cdot \frac{1}{\mu_1} + \frac{m_2}{m} \cdot \frac{1}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{m} \cdot \frac{1}{\mu_n}}, \quad (30.6)$$

де $\frac{m_1}{m}, \frac{m_2}{m}, \dots, \frac{m_n}{m}$ - відносний зміст кожного газу; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ - молярні маси газів.

Якщо відома молярна маса газу, то можна легко визначити ще одну важливу характеристику газу - його густину ρ . Густина газу - це маса одиниці об'єму газу:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (30.7)$$

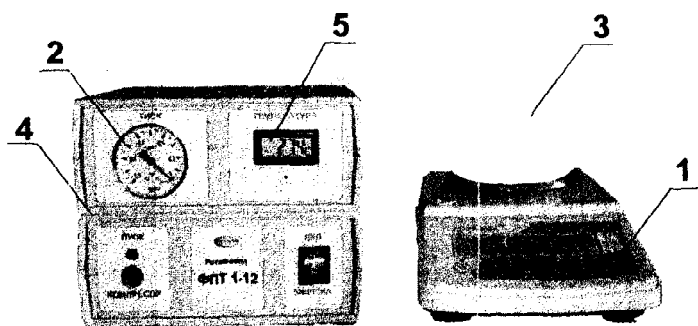
Виразивши m/V з рівняння Менделєєва-Клапейрона, отримаємо

$$\rho = \frac{P \cdot \mu}{R \cdot T}. \quad (30.8)$$

Густину суміші газів можна обчислити за формулою (30.8), розуміючи під μ ефективну молярну масу суміші.

Експериментальна установка

Для визначення молекулярної маси повітря призначена експериментальна установка ФПТ 1-12, загальний вигляд якої зображений на рисунку 30.1.



1 — ваги; 2 - вакуумметр; 3 - колба; 4 - вимірювальний блок;
5 - термометр

Рисунок 30.1 - Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-12

Робочий елемент установки являє собою скляну колбу 3, з'єднану із стрілочним вакуумметром 2, покази якого P відповідають різниці атмосферного тиску у лабораторії P_0 і тиску газу в колбі P_K . Колба має відросток з краном, який за допомогою гумової трубки з'єднується з вхідним патрубком компресора. Колбу встановлено на електронних вагах 1. Значення об'єму V колби вказано в паспорті.

Порядок виконання роботи

1. Подати напругу живлення на електронні ваги, ввімкнувши установку тумблером «МЕРЕЖА».

2. За допомогою електронних ваг визначити масу колби з повітрям ($m_0 + m_1$) при тиску P_1 .

3. Увімкнувши компресор тумблером «ПУСК» і, відкривши кран, відкачати повітря з колби до тиску P_2 , після чого, заклавши кран і вимкнувши компресор, визначити за допомогою ваг масу колби з повітрям ($m_0 + m_2$) за тиску P_2 . Одержані результати занести до таблиці 30.1

Таблиця 30.1

№ вимі- ру	m_0+m_1 , кг	m_0+m_2 , кг	m_1-m_2 , кг	P_1 , Па	P_2 , Па	P_1-P_2 , Па	T , К	μ , кг/моль	ρ , кг/м ³

- Повторити виміри по пп. 2-3 не менш як 3 рази.
- Виміряти температуру повітря в лабораторії.
- Вимкнути установку тумблером «МЕРЕЖА».

Обробка результатів вимірювань

- Для кожного виміру визначити масу відкачаного повітря ($m_1 - m_2$) та різницю тисків ($P_1 - P_2$).
- За формулою (30.5) обчислити для кожного виміру значення молярної маси повітря μ . Знайти середнє значення $\langle \mu \rangle$.
- За формулою (30.8) обчислити для кожного виміру густину повітря, використовуючи знайдене значення молярної маси μ .
- Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні запитання

- Що таке молекулярна маса речовини і в яких одиницях вона вимірюється?
- Запишіть і поясніть рівняння Менделєєва-Клапейрона. В яких випадках його можна використовувати для практичних обчислень?
- Як теоретично розрахувати молекулярну масу суміші газів?
- Що таке густина газу і як її можна визначити експериментально?

5. Виведіть розрахункову формулу для визначення молярної маси, що використовується в даній роботі.

6. Чому молярну масу газу не можна визначити безпосередньо, використовуючи рівняння Менделєєва-Клапейрона?

7. У чому полягає метод відкачування для визначення молярної маси газу?

8. Назвіть основні джерела похибок даного методу вимірювання.

Перелік літературних джерел

1. Галушак М.О. Курс фізики. Основи молекулярної фізики і термодинаміки. Навчальний посібник/ М.О. Галушак, Г.І. Антошук, Г.С. Подвальних, Д.М. Фреїк. –К.: ІСЛОУ, 1993. -272 с.
2. Кучерук І.М. Загальний курс фізики т.1 / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик. – К.: Техніка, 1999.
3. Лучицький Р.М. Фізика. Ч.ІІ. Молекулярна фізика і термодинаміка. Навчальний посібник/ Р.М. Лучицький. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 166 с.
4. Гапчин Б.М. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум/ Б.М. Гапчин, Я.Й. Дутчак, В.С. Френчко. – Львів, 1990.
5. Булкін П.С. Общий физический практикум. Молекулярная физика/ П.С. Булкін, Н.Н. Попова. – М., 1988.

Додаток А

Основні фізичні сталі

Гравітаційна стала	$\gamma = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$
Універсальна газова стала	$R = 8,314510 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Стала Больцмана	$k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Стала Авогадро	$NA = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Число Лошмідта	$NL = 2,686754 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
Маса спокою електрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Маса спокою протона	$m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Маса спокою нейтрона	$m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Елементарний електричний заряд	$e = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Атомна одиниця маси	$\text{а.о.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Швидкість поширення світла у вакуумі	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}$
Стала Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Число Фарадея	$F = 9,648456 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$

Коефіцієнт поверхневого натягу рідини при 20 °С, (Н/м)

Вода	0,073	Ртуть	0,500
Мильна вода	0,040	Спирт	0,022

Питома теплоємність, кДж/(кг·К)

Алюміній	0,88	Сталь	0,46
Латунь	0,38	Мідь	0,38
Лід	2,10	Вода	4,20

Густина речовин, (кг/м³)

Гази за нормальних умов

Азот	1,251	Кисень	1,429
Повітря	1,293	Вуглекислий газ	1,977
Водень	0,090	Гелій	0,18

Рідини

Спирт	$0,8 \cdot 10^3$	Гліцерин	$1,26 \cdot 10^3$
Гас	$0,8 \cdot 10^3$	Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$
Масло	$0,9 \cdot 10^3$	Вода	$1,0 \cdot 10^3$

Тверді тіла

Чавун	$7,0 \cdot 10^3$	Нікель	$8,8 \cdot 10^3$
Залізо	$7,8 \cdot 10^3$	Срібло	$10,5 \cdot 10^3$
Сталь	$7,8 \cdot 10^3$	Свинець	$11,3 \cdot 10^3$
Латунь	$8,4 \cdot 10^3$	Цинк	$7,0 \cdot 10^3$
Мідь	$8,9 \cdot 10^3$	Лід	$0,9 \cdot 10^3$

Модуль Юнга, ГПа

Алюміній	70
Мідь	110
Сталь	200

В'язкість рідин, кг/(м·с)

Вода	0,10
Ацетон	0,033
Бензин	0,065
Гліцерин	0,83
Повітря	0,0088