

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ ІНСТИТУТ



**МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З РОЗДІЛУ КУРСУ ФІЗИКИ
"МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА"
(ДЛЯ СТУДЕНТІВ АВТОТРАНСПОРТНИХ І АВТОДОРОЖНИХ
СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ ВСІХ ФОРМ НАВЧАННЯ)**

ЗАТВЕРДЖЕНО:
навчально-методична
лінії”
комісія факультету
"Автомобільні дороги"
Протокол № 2 від 20.10.2010

ЗАТВЕРДЖЕНО:
кафедра “Загальнонаукові дисцип-
ліни”
Протокол № 3 від 18.10.2010.

ЗАТВЕРДЖЕНО:
навчально-методична
комісія факультету
"Автомобільний транспорт"
Протокол № 3 від 16.11.2010

УДК 536.7(07)

Методичний посібник до виконання лабораторних робіт з розділу курсу фізики “Молекулярна фізика і термодинаміка ” (для студентів автотранспортних і автодорожніх спеціальностей) / укл. А. М. Галіахметов, М.П. Єфремова, О. І. Уколов. – Горлівка: ДВНЗ "ДонНТУ" АДІ, 2011. – 66 с.

Містить 8 лабораторних робіт, методику їхнього виконання, запитання і задачі для їх захисту. Наведено рекомендації для обробки експериментальних даних за допомогою ЕОМ.

Укладачі : Галіахметов А.М., зав. каф., доц.
 Єфремова М.П., старш. викладач
 Уколов О.І., асистент.

Відповідальний за випуск: Галіахметов А.М., зав. каф., доц.

Рецензент: Сирота В.М., к.т.н., доц.,
 каф. "Технічна експлуатація автомобілей"

Зміст

Загальні дидактичні рекомендації	4
Лабораторна робота 1. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом відриву краплі.....	5
Лабораторна робота 2. Визначення C_p / C_v для повітря методом Клемана – Дезорма.....	11
Лабораторна робота 3. Визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса.....	20
Лабораторна робота 4. Вивчення на механічній моделі розподілу молекул газу за компонентами швидкостей.....	28
Лабораторна робота 5. Дослідження залежності коефіцієнта поверхневого натягу від концентрації та від температури методом Ребіндра.....	33
Лабораторна робота 6. Визначення середньої довжини вільного пробігу і ефективного діаметра молекул повітря.....	40
Лабораторна робота 7. Визначення вологості повітря аспіраційним психрометром з електромотором М-34.....	48
Лабораторна робота 8. Визначення сталої Больцмана.....	60
Список рекомендованої літератури.....	64
Додаток А Обробка експериментальних даних за допомогою ЕОМ.....	65
Додаток Б Коефіцієнти Стюдента $t_{\alpha,n}$	66

Загальні дидактичні рекомендації

«Молекулярна фізика і термодинаміка» – один з важливих розділів фізики, знання якого необхідні спеціалістам багатьох галузей науки і техніки.

До виконання лабораторної роботи необхідно готуватися заздалегідь: вивчити теоретичний матеріал даної теми за вказаною літературою і конспектом лекцій; підготуватися до виконання експериментів – уважно вивчити методичні вказівки до лабораторної роботи, продумати її виконання і підготувати заготовку для оформлення звіту.

При виконанні роботи необхідно дотримуватися правил техніки безпеки, уміти визначити ціну поділки шкали вимірювальних приладів, орієнтовно оцінювати правильність одержаних експериментальних даних, розраховувати похибки вимірювань.

У заготівці для оформлення звіту вказують тему роботи, її мету, прилади та матеріали, теоретичні відомості й готують таблицю для записування результатів експерименту, враховуючи вказану кількість вимірювань. Заповнюється таблиця при проведенні дослідів.

Підготовку студента до лабораторної роботи перевіряє викладач і допускає до її виконання. Непідготовлений студент не допускається до виконання лабораторної роботи, замість цього він вивчає матеріал теми за підручником у лабораторії. Пропущена, таким чином, робота виконується в позаурочний час, що небажано.

Після виконання експериментальної частини необхідно упорядкувати своє робоче місце, оформити заготовку (заповнити таблицю, нижче таблиці записати похибки вимірювальних приладів, коефіцієнт Стюдента тощо) і підписати її у викладача. Решта часу лабораторного заняття використовується студентом для захисту роботи.

Робота вважається захищеною після подання викладачу звіту з експериментальної частини та з теорії.

Статистичну обробку результатів експерименту, студент виконує згідно з існуючими правилами.

Лабораторна робота 1

Тема. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом відриву краплі.

Мета. Визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідини методом відриву крапель, вивести розрахункові формули, використані в лабораторній роботі.

Прилади і матеріали. Штатив, бюретка, аналітичні терези, відома(еталонна) рідина (дистильована вода), досліджувана рідина (розчин гліцерину, етиловий спирт та ін.), посудина (тигельок).

Практичне значення. Знання властивостей рідин і їхньої будови, необхідних для розрахунку різних гідропневмоприводів, руху машин і їхніх частин у повітряному і рідкому середовищах.

Опис устаткування

Прилад для визначення коефіцієнта поверхневого натягу досліджуваної рідини методом відриву краплі (рис. 1.1) складається з бюретки, укріпленої на штативі. Нижній кінець бюретки з'єднаний зі скляним наконечником гумовою трубкою, в якій є тверда кулька.

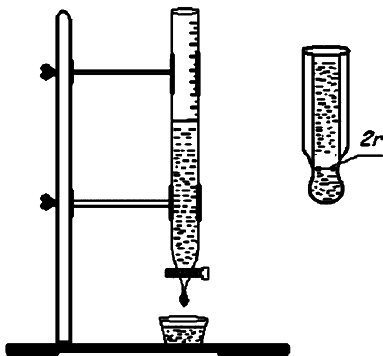


Рисунок 1.1 – Загальний вид установки для визначення коефіцієнта поверхневого натягу

Якщо гумку в місці перебування кульки стиснути пальцями, то рідина, що знаходиться в бюретці, починає просочуватися мимо і витікає краплями в тигельок (посудину).

Для точного зважування необхідно застосовувати аналітичні терези марки АДВ-200.

Короткі теоретичні відомості

Вільна поверхня тіл на межі фаз є причиною особливого типу явищ, так званих поверхневих явищ. Молекули поверхневого шару перебувають в особливому енергетичному стані порівняно з молекулами об'єму рідини. Справді, щоб перевести молекули рідини з її об'єму на поверхню (для збільшення поверхні рідини), потрібно виконати роботу проти сил внутрішнього тиску. У стані стійкої рівноваги надлишкова поверхнева потенціальна енергія рідини має бути мінімальною.

Тому рідина, на яку не діють зовнішні сили, за умови її практичної нестисливості, повинна набирати форму сфери. Отже, сили поверхневого шару повинні зумовлювати тенденцію рідини зменшувати свою поверхню. Зрозуміло, що ці сили мають бути напрямленими по дотичних до поверхні рідини.

Поверхневим натягом α (або коефіцієнтом поверхневого натягу) називають величину, яка чисельно дорівнює відношенню сили F , що діє на ділянку контура поверхні рідини, до довжини l цієї ділянки:

$$\alpha = F / \ell . \quad (1.1)$$

Поклавши в (1.1) $F = 1\text{Н}$, $\ell = 1\text{ м}$ дістанемо одиницю коефіцієнта поверхневого натягу $[\alpha] = \text{Н} / \text{м}$.

Можливий також енергетичний підхід до тлумачення коефіцієнта поверхневого натягу на межі двох фаз. Для збільшення поверхні рідини потрібно виконати роботу проти сил поверхневого натягу. Цю роботу ΔA при оборотному ізотермічному процесі можна виразити формулою :

$$\Delta A = \alpha \Delta S , \quad (1.2)$$

де α – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, ΔS – зміна площі поверхні рідини .

На практиці одним з поширених методів вимірювання α є метод відриву крапель.

При порівняно невеликій швидкості витікання рідини з вузької

трубки, утворюється крапля майже сферичної форми. Перед відривом краплі виникає “нитка”, по якій відбувається розрив. Нехай діаметр “нитки” в момент відриву краплі дорівнює $2r$ (на рис. 1.1 крапля зображена праворуч від приладу значно збільшеною).

Якщо рідина витікає з нижнього кінця вертикальної трубки, то лінією розриву поверхні рідини при відриві краплі буде периметр шийки краплі, що утвориться при цьому. Периметр дорівнює $2\pi r$, а r – радіус шийки краплі в найбільш вузькій частині. Крапля знаходиться під дією двох сил: її власної ваги P і протилежно спрямованої сили поверхневого натягу F , що прагне увігнати краплю у середину трубки. Сила поверхневого натягу дорівнює $F = 2\pi r \alpha$ із (1.1), де α – коефіцієнт поверхневого натягу. Зазначені вище сили в момент відриву краплі між собою рівні, тобто $P = F$ або

$$P = 2\pi r \alpha. \quad (1.3)$$

Таким чином, визначення коефіцієнта поверхневого натягу зводиться до визначення ваги краплі й радіуса її шийки в момент відриву.

Вага краплі обчислюється шляхом зважування в якій-небудь посудині деякого числа (50-100) крапель досліджуваної рідини. Якщо вагу цієї посудини позначити через P_0 , а її вагу з n_1 краплями досліджуваної рідини позначити через P_1 , то вага однієї краплі

$$p' = \frac{P_1 - P_0}{n_1}. \quad (1.4)$$

Приймаючи радіус шийки крапель, що відриваються, для досліджуваної і відомої рідини з достатнім ступенем точності однаковими, можна відносними визначеннями знайти коефіцієнт поверхневого натягу α_1 досліджуваної рідини. Беруть другу рідину з відомим коефіцієнтом поверхневого натягу α_2 (такою рідиною звичайно буває дистильована вода). Позначивши вагу тигелька P_0 з n_2 краплями води через P_2 , знайдемо вагу однієї краплі води

$$p'_B = \frac{P_2 - P_0}{n_2}. \quad (1.5)$$

Підставляючи у формулу (1.3) отримане вираження для ваги краплі досліджуваної (1.4), потім відомої рідини (1.5), одержимо рівняння:

$$\frac{P_1 - P_0}{n_1} = 2\pi r_1 \alpha_1 ; \quad \frac{P_2 - P_0}{n_2} = 2\pi r_2 \alpha_2 . \quad (1.6)$$

Із (1.6) виражаємо r_1 і r_2 :

$$r_1 = \frac{P_1 - P_0}{2\pi \alpha_1 n_1} ; \quad r_2 = \frac{P_2 - P_0}{2\pi \alpha_2 n_2} . \quad (1.7)$$

Вище було зазначено, що $r_1 = r_2$, тому

$$\frac{P_1 - P_0}{2\pi \alpha_1 n_1} = \frac{P_2 - P_0}{2\pi \alpha_2 n_2} . \quad (1.8)$$

Звідки одержуємо для коефіцієнта поверхневого натягу досліджуваної рідини формулу

$$\alpha_1 = \frac{(P_1 - P_0) n_2}{(P_2 - P_0) n_1} \cdot \alpha_2 . \quad (1.9)$$

Порядок виконання роботи

1. Попередньо, витерши насухо посудину, зважити її; вага нехай буде P_0 .

2. Промивши бюретку досліджуваною рідиною, наповнити її цією ж рідиною.

3. Відрахувати в посудину 50 - 100 крапель досліджуваної рідини. Зважити на тих же терезах посудину з відліченими краплями рідини. Нехай вага рідини з тигельком буде P_1 .

4. Замінити досліджувану рідину дистильованою водою і аналогічним образом відрахувати 50 - 100 крапель води і зважити її разом з тигельком. Нехай вага посудини і відлічених крапель води буде P_2 .

5. Заміряти кімнатну температуру. Знайти табличне значення коефіцієнта поверхневого натягу води при температурі дослідів $\alpha_2 = 73 \text{ Дин / см}$.

6. Результати вимірів, записати в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

№ досл.	Вага тигель- лька $P_0, \text{г}$	Вага тигелька і досліджу- ваної ріди- ни $P_1, \text{г}$	Вага тигелька і води $P_2, \text{г}$	Число крапель		Темпе- ратура $t^\circ \text{C}$
				Дослі- джуваної рідини n_1	Води n_2	
1						
2						
3						
Середнє значення						

Нижче таблиці запишіть систематичні (приладові) помилки вимірів:

Ваги посудини - $\Delta P_0 =$

Ваги посудини з досліджуваною рідиною - $\Delta P_1 =$

Ваги посудини з дистильованою водою (відомою рідиною) - $\Delta P_2 =$

Кількість дослідів - $n =$

Довірча імовірність - $\alpha =$

Коефіцієнт Стьюдента - $t_{\alpha, n} =$

Формула для розрахунку відносної систематичної помилки коефіцієнта поверхневого натягу досліджуваної рідини така :

$$E = \frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_{1(\text{пр})}} = \mp \left(\frac{\Delta P_1 + \Delta P_0}{P_1 - P_0} + \frac{\Delta P_2 + \Delta P_0}{P_2 - P_0} \right). \quad (1.10)$$

Цю формулу необхідно вміти одержати кожному студенту,

маючи розрахункову формулу (1.9).

Обробка результатів вимірів

1. Статистичну обробку результатів експериментів провести згідно з існуючими правилами.
2. Остаточний результат подати у вигляді:

$$\alpha = (\alpha_{\text{ср}} \mp \Delta\alpha_1) \text{ Дин / см}, \quad (1.11)$$

де

$$\Delta\alpha_1 = \sqrt{(\Delta\alpha_{1(\text{пр})})^2 + (\Delta\alpha_{1(\text{вип.})})^2}. \quad (1.12)$$

Контрольні запитання і завдання

1. Що називається коефіцієнтом поверхневого натягу? Його одиниці виміру в системі СІ.
2. Від чого залежить коефіцієнт поверхневого натягу?
3. Чому при відсутності зовнішніх сил краплина рідини набуває форму сфери?
4. Властивості рідини.
5. Опишіть характер теплового руху молекул у рідині. Поняття близького і далекого порядку.
6. Тиск Лапласа (додатковий тиск під скривленою поверхнею рідини).
7. Явище змочування. Його урахування в техніці.
8. Капілярні явища та де вони застосовуються.
9. Висота підняття рідини в капілярній трубці.
10. Що називається коефіцієнтом стиснення рідини? Його одиниці виміру.
11. Розв'язати задачі 7.41, 7.42, 7.43, 7.44 [5].

Лабораторна робота 2

Тема. Визначення $\frac{C_p}{C_v}$ для повітря методом Клемана – Дезорма.

ма.

Мета. Визначити відношення теплоємності повітря при постійному тиску до теплоємності повітря при постійному об'ємі методом Клемана-Дезорма, навчитися правильно користуватися манометром, насосом, вести розрахунок помилок.

Прилади і матеріали. Скляний балон, манометр, насос, клапан, термометр, барометр.

Практичне значення. Досліджувані процеси лежать в основі роботи двигунів внутрішнього згоряння.

Опис устаткування

Установка для досліду складається зі скляного балона С, з'єднаного з відкритим U-подібним манометром М, насосом Н, клапаном А (рис.2.1)

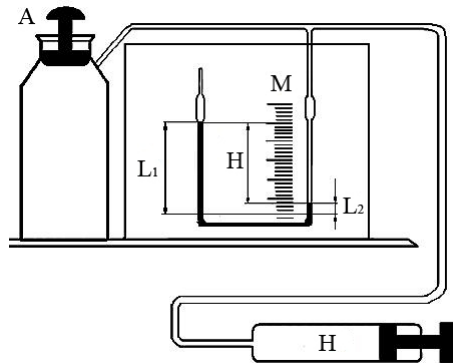


Рисунок 2.1 – Загальний вид установки для визначення C_p / C_v

Короткі теоретичні відомості

Газ, що міститься у балоні, проходить послідовно три стани. Перший – характеризується параметрами P_1, V_1, T_1 ; другий –

P_2, V_2, T_2 , третій – P_3, V_3, T_3 . Перехід з першого стану в другий відбувається шляхом адіабатного розширення і описується рівнянням Пуассона:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma. \quad (2.1)$$

Через 3 - 4 хв після закриття клапана повітря нагрівається ізохорно до кімнатної температури T_1 , причому тиск підвищується до величини P_3 , (стан 3 на рис. 2.2).

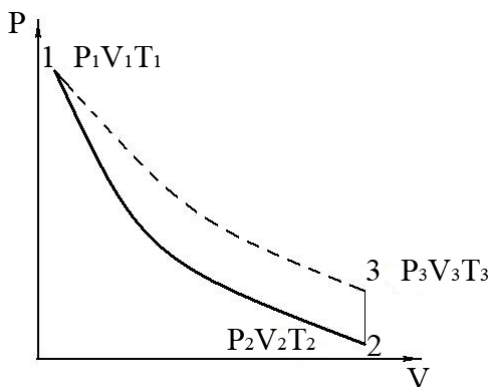


Рисунок 2.2 – Графік залежності P від V
(клапан A закривається в момент
закінчення адіабатного процесу 1-2)

Порівнюючи кінцевий стан газу з першим станом, можна побачити, що точки 1 і 3 лежать на одній ізотермі. Тому закон Бойля-Маріотта має вигляд:

$$P_1 V_1 = P_3 V_3, \quad (2.2)$$

причому $V_2 = V_3$.

З рівнянь (2.1) і (2.2) можна визначити γ . Для цього підносимо рівняння (2.2) у ступінь γ і поділимо його на рівняння (2.1):

$$\frac{P_1^\gamma V_1^\gamma}{P_1 V_1^\gamma} = \frac{P_3^\gamma V_3^\gamma}{P_2 V_2^\gamma} \quad \text{або} \quad \frac{P_1^\gamma}{P_1} = \frac{P_3^\gamma}{P_2},$$

відкіля

$$\left(\frac{P_3}{P_1} \right)^\gamma = \frac{P_2}{P_1}. \quad (2.3)$$

Логарифмуючи останній вираз, знаходимо шуканий коефіцієнт

$$\gamma = \frac{\lg(P_2 / P_1)}{\lg(P_3 / P_1)}. \quad (2.4)$$

Позначимо різницю рівнів рідини в манометрі в першому стані через H_1 і в третьому стані через h_0 . У такому випадку:

$$P_1 = P_2 + \alpha H_1; \quad P_3 = P_2 + \alpha h_0, \quad (2.5)$$

де α – перевідний коефіцієнт для переходу від різниці рівнів до тиску.

У кожному з цих виразів (2.5) другий доданок у правій частині малий в порівнянні з першим доданком.

З формул (2.5) одержуємо:

$$P_2 = P_1 - \alpha H_1, \quad P_3 = P_1 - \alpha(H_1 - h_0). \quad (2.6)$$

Підставивши (2.6) в (2.4), маємо

$$\gamma = \frac{\lg \left(1 - \frac{\alpha H_1}{P_1} \right)}{\lg \left[1 - \frac{\alpha (H_1 - h_0)}{P_1} \right]}. \quad (2.7)$$

Величини $a_1 = \frac{\alpha H_1}{P_1}$ і $a_2 = \frac{\alpha (H_1 - h_0)}{P_1}$ багато менше

одиниці. Для малих значень a_1 і a_2 справедливий наближений вираз: $\lg(1-a) = -a$. Застосовуючи його, одержуємо

$$\gamma = \frac{H_1}{H_1 - h_0}. \quad (2.8)$$

Величина γ , що входить у формулу (2.8), отримана в припущенні, що клапан А закривається в момент закінчення адіабатного процесу 1-2.

Якщо ж клапан закритий до завершення процесу 1-2, тобто в той момент, коли тиск у балоні знизиться до величини P_1' , але ще не досягне атмосферного P_2 , то, як видно з (рис. 2.3), що відповідна різниця рівнів у манометрі після здійснення процесу розширення і наступного ізохорного нагрівання визначається ординатою $2' - 3'$ замість ординати $2 - 3$. Це призводить до завищення величини γ в порівнянні з її дійсним значенням.

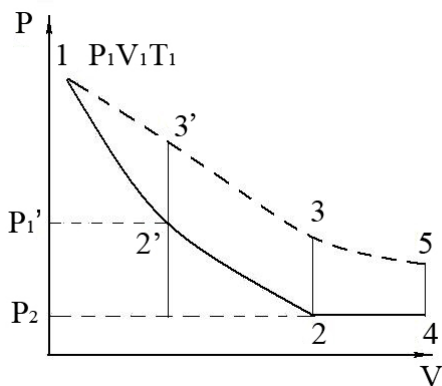


Рисунок 2.3 – Графік залежності P від V
(клапан А закритий до або після завершення процесу 1 – 2)

Якщо ж клапан закритий через деякий час після завершення процесу 1-2, то за цей час температура в балоні трохи підвищиться за рахунок теплообміну із зовнішнім середовищем (ізобарний процес 2 - 4, рис. 2.3). У цьому випадку відповідна різниця рівнів h_0 ,

обумовлена ординатою 4-5, виявиться заниженою, що призведе до зменшення значення γ .

Для одержання правильного результату виміру, клапан необхідно закрити в той момент, коли газ знаходиться в стані 2, що не представляється можливим. Через це ординату 2-3, що відповідає різниці рівнів h_0 , приходиться визначати непрямым методом.

Розглянемо з цією метою процес адіабатного розширення при відкритому клапані, з урахуванням теплообміну з навколишнім середовищем під час протікання ізобарного процесу 2-4.

Звернемося до рисунку 2.4. Нехай газ знаходиться в стані 1. Натисканням клапана А зробимо адіабатне розширення (процес 1-2). При цьому температура газу понизиться щодо кімнатної температури T_1 до величини T_2 , тиск стане рівним атмосферному P_2 .

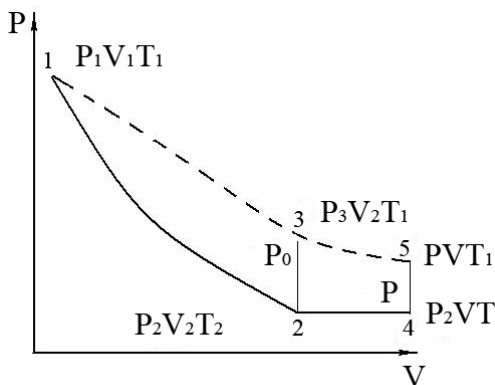


Рисунок 2.4 – Графік залежності P від V
(визначення h_0 непрямым методом)

Якщо клапан залишити відкритим протягом часу τ після закінчення процесу 1-2, то температура газу в балоні підвищиться за рахунок теплообміну до величини T (ізобарний процес 2-4).

Закриємо після цього клапан і залишимо балон на якийсь час, поки температура усередині балона не стане рівною температурі навколишнього середовища T_1 (ізохорний процес 4-5). При цьому тиск газу в балоні підвищиться на величину ΔP , що визначимо по відповідній різниці рівнів h рідинного U – подібного манометра. Тривалість адіабатного процесу 1-2 незначна в порівнянні з часом

відкриття клапана. Отже, τ можна розглядати як тривалість процесу вирівнювання температури повітря в балоні з навколишнім середовищем (процес 2-4).

Зі зменшенням часу τ величина $h(\Delta P)$, як це видно з рисунків 2.4 і 2.5, зростає і у граничному випадку при $\tau \rightarrow 0$ прагне до шуканого значення $h_0(\Delta P_0)$.

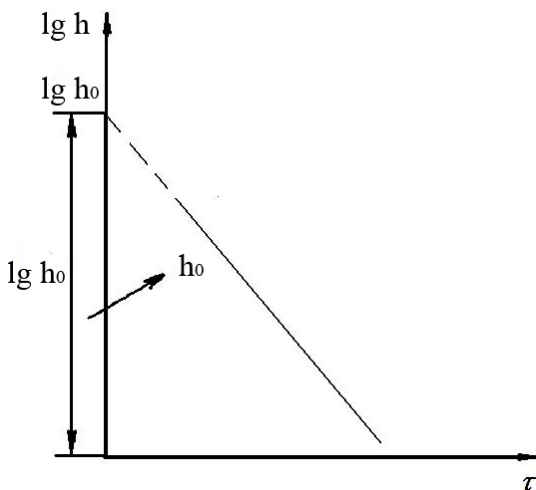


Рисунок 2.5 – Графік залежності $\lg h$ від τ (визначення h_0 графічним способом)

Тому величину h_0 можна визначити графічним способом, вимірявши ряд значень h_1 , що відповідають різним значенням τ_1 .

Дослід підтверджує лінійну залежність між величиною $\lg h$ і часом відкриття клапана τ , тобто

$$\lg h = \lg h_0 - \beta \tau, \quad (2.9)$$

де β – кутовий коефіцієнт прямої, що залежить від умов експерименту.

Побудувавши графік (рис.2.5), на якому по осі абсцис відкладається час відкриття клапана τ , по осі ординат – величина $\lg h$, ми екс-

траполоємо пряму, усереднюючу експериментальні точки, до значення $\tau \approx 0$ і знаходимо величину $\lg h_0$. Знайдене значення h_0

дозволяє визначити відношення теплоємностей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ повітря за формулою (2.8).

Порядок виконання роботи

1. Накачати в балон повітря так, щоб різниця рівнів рідини в манометрі стала рівною 25-30 см. Відлік варто робити по нижньому краю меніска.

2. Швидким натисканням відкрити клапан А, з'єднати балон з атмосферою й одночасно увімкнути секундомір. Витримати клапан відкритим 5 с і швидко закрити. При цьому тиск у балоні стане рівним атмосферному, а температура понизиться. Почекавши 3-4 хв, поки температура в балоні не стане знову рівною температурі навколишнього середовища (меніски в манометрі перестають переміщатися), відрахувати показання манометра.

3. Повторити пункти 1 і 2, витримавши клапан відкритим 10, 15, 20 с і т.ін. При цьому до відкривання клапана А рівень в одному з колін манометра обережно установити за допомогою крана В (після вирівнювання температур) на ту ж поділку, що і в першому досліді. Проробити не менш 6 таких вимірів і їх результати записати в таблицю 2.1.

Увага! При накачуванні повітря треба стежити за тим, щоб нижній рівень рідини в манометрі не знижувався до коліна трубки, тому що в цьому випадку вся рідина буде викинута з манометра тиском повітря і прилад вийде з ладу.

Результати вимірів

Температура $T = \dots \pm \dots$, тиск $P = \dots \pm \dots$

Кількість дослідів – $n =$

Довірча імовірність – $\alpha =$

Коефіцієнт Стюдента – $t_{\alpha, n} =$

Систематична помилка замірів часу – $\Delta \tau =$

Систематична помилка замірів H по манометру – $\Delta H_{11} = \Delta H_{12} = \Delta H_{13}$

Систематична помилка для h_0 : $\Delta h_0 =$

Таблиця 2.1

№ п/п	Час відкриття клапана τ_1 , с	$H_{1.1}$, мм	$H_{1.2}$, мм	$H_{1\text{серед.}}$ мм	$\lg H_{1\text{серед.}}$
1	5				
2	10				
3	15				
4	20				
5	25				

Обробка результатів вимірів

1. Побудувати графік $\lg h = f(\tau)$. Окремі експериментальні точки, що не уклалися на загальну пряму, необхідно перевірити шляхом повторних вимірів, (графік будується на міліметровому папері й обов'язково додається до робочого протоколу).

2. Графічним способом визначити значення величини $\lg h_0$, яке відповідне $\tau = 0$, і знайти значення h_0 .

3. Знайти експериментальне значення коефіцієнта Пуассона за формулою (2.8)

$$\gamma = \frac{H_1}{H_1 - h_0}.$$

4. Розрахувати відносну помилку виміру величини γ за формулою

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\Delta h_0}{H_1 - h_0} + \frac{h_0 \Delta H_1}{H_1(H_1 - h_0)}. \quad (2.10)$$

Величина Δh_0 , так само, як і ΔH_1 , може бути прийнята рівною 2 мм. Але можна знайти Δh_0 по розкиданню точок на графіку $\lg h = f(\tau)$.

Примітка. Вибір систематичної помилки Δh_0 проводиться за узгодженням з викладачем.

5. Розрахувати теоретичне значення коефіцієнта Пуассона для повітря за формулою

$$\gamma = \frac{i + 2}{i}. \quad (2.11)$$

6. Остаточні результати вимірів і розрахунків записати у формі :

$$\gamma = \gamma \pm \Delta\gamma.$$

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке теплоємність тіла , питома теплоємність, молярна теплоємність?

2. Що таке C_p і C_v та як вони визначаються через число ступенів свободи ? Як зв'язані між собою величини C_p і C_v ? Яка з величин більша і чому?

3. Запишіть рівняння Пуассона .

4. Перший закон термодинаміки і його застосування до ізопроцесів в ідеальних газах .

5. *Задача* . Який із зазначених газів при кімнатній температурі має найбільшу теплоємність? (N_2 , H_2 , CH_4 , H_2O) .

6. Зобразити графічно на діаграмі в координатах P, V процеси , послідовно здійснені в цій роботі.

7. *Задача*. Молекули двоатомного газу цілком дисоціювали. Як зміниться теплоємність ? Молекули газу вважати твердими.

8. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії газу на інтервалі температур $T_2 - T_1$ будь - якого процесу?

9. Який процес називають адіабатним? За рахунок чого виконується робота в цьому процесі?

10. Що таке оборотний процес? Чому процеси, здійснювані в даній роботі, необоротні?

11. Як знаходиться систематична помилка у визначенні γ ?

Необхідно кожному студенту одержати формулу (2.9), маючи розрахункову формулу (2.8).

Лабораторна робота 3

Тема. Визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса.

Мета. Ознайомитися з методом Стокса для визначення в'язкості рідини.

Прилади і матеріали. Скляна циліндрична посудина, досліджувана рідина (вода), набір кульок, мікромметр, лінійка, термометр.

Практичне значення. При конструюванні й розрахунку будь-яких транспортних засобів (літальних апаратів, морських і річкових суден, автомобілів і т.ін.), особливо призначених для руху з великими швидкостями, найважливіше значення має облік сил внутрішнього тертя в рідкому і газоподібному середовищах. Крім того, змащення різними мастилами тертьових поверхонь у всіх машинах і механізмах дозволяє замінити зовнішнє (сухе) тертя значно меншим – внутрішнім тертям мастил, що істотно подовжує час промислової експлуатації машин, що завжди важливо знати майбутнім інженерам.

Короткі теоретичні відомості

Метод Стокса полягає в спостереженні за падінням невеликої кульки в циліндричну посудину, заповнену досліджуваною рідиною (технічним вазеліном, трансформаторною олією й т.п.)

На кульку діють три сили (рис. 3.1):

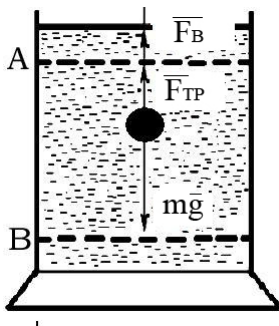


Рисунок 3.1 – Падіння невеликої кульки в циліндричний посуд

а) сила ваги:

$$mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g, \quad (3.1)$$

де ρ_1 – густина речовини кульки;

б) сила, що виштовхує тіло з рідини, визначається за законом Архімеда:

$$F_b = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2 g, \quad (3.2)$$

де ρ_2 – густина досліджуваної рідини;

в) сила опору, яка обумовлена силами внутрішнього тертя і визначається за законом Стокса:

$$F_{тр} = 6\pi\eta rV, \quad (3.3)$$

де η – коефіцієнт в'язкості рідини;

r – радіус кульки,

V – швидкість кульки при падінні;

2. Опушена у рідину кулька спочатку падає прискорено, але зі збільшенням швидкості зростає і сила тертя, у результаті чого прискорення кульки зменшується, і через якийсь час кулька починає рухатися з постійною швидкістю. Умовою рівномірного прямолінійного руху є рівновага діючих на тіло сил, або $\Sigma \vec{F}_k = 0$. На підставі другого закону Ньютона:

$$m(d\vec{V} / dt) = \Sigma \vec{F}_k, \quad (3.4)$$

де $m = (4/3) \pi r^3 \cdot \rho_1$ – маса кульки, що рухається;

$d\vec{V} / dt$ – прискорення кульки;

$\Sigma \vec{F}_k$ – векторна сума сил, що діють на кульку.

Спроектувавши (3.4) на напрямок руху з урахуванням (3.1), (3.2), (3.3), одержимо

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 \frac{dV}{dt} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_2 \cdot g - 6\pi \eta r V . \quad (3.5)$$

Розв'язуючи рівняння (3.5), знайдемо

$$V(t) = V_{\text{вст.}} - [V_{\text{вст.}} - V(0)] \cdot e^{-t/\tau} , \quad (3.6)$$

де $V(t)$ – швидкість кульки в момент часу t ;

$V(0)$ – швидкість кульки в момент початку його руху в рідині;

$V_{\text{вст.}}$ – встановлена швидкість,

$$V_{\text{вст.}} = \frac{2}{9}gr^2 \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\eta} , \quad (3.7)$$

де τ – час релаксації

$$\tau = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot \rho_1}{\eta} . \quad (3.8)$$

Як видно з (3.6), швидкість кульки експоненціально наближається до встановленої швидкості. Встановлена швидкість визначається величиною τ , що має розмірність часу і називається часом релаксації і якщо час падіння в кілька разів більше часу релаксації, процес установалення швидкості можна вважати завершеним.

Вимірявши на досліді встановлену швидкість падіння кульок і величини ρ_1 , ρ_2 , r , можна визначити коефіцієнт внутрішнього тер-тя рідини за формулою

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{V_{\text{вст.}}} . \quad (3.9)$$

Якщо врахувати вплив стінок посудини, то робоча формула для визначення коефіцієнта в'язкості η приймає вигляд:

$$\eta = \frac{1}{18}gd^2 \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2)t}{(1 + 2,4(d/D))H} , \quad (3.10)$$

де d, D – діаметри кульки і внутрішній діаметр посудини, відповідно;

H – відстань, яку проходить кулька з встановленою швидкістю (ділянка AB на рис. 3.1) ;

t – час проходження відстані H .

Необхідно підкреслити, що формула (3.9) вірна для кульок, які рухаються поблизу осрової лінії посудини.

При виведенні формули Стокса передбачалося, що обтікання кульки рідиною має ламінарний характер. Як відомо, характер обтікання визначається числом Рейнольдса:

$$R_e = \frac{VD\rho_2}{2\eta}. \quad (3.11)$$

Обтікання є ламінарним лише при не дуже великих значеннях R_e ($R_e < 1000$). Оскільки з умов проведення досліду $V(0) = 0$, то шлях релаксації S , після інтегрування (3.6) обчислюється за формулою

$$S = H \left[1 - \frac{\tau}{t} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]. \quad (3.12)$$

З формули (3.12) легко знайти, що $S \gg \frac{H}{t}$ при $t \gg \tau$.

При русі потоку рідини (або газу) у загальному випадку швидкість течії в різних місцях потоку різна.

Такий стан рідини не є рівноважним. У ній завдяки тепловому рухові молекул відбувається передача імпульсу від більш швидких ділянок потоку до менш швидких. Ці процеси, що приводять до вирівнювання швидкості течії різних шарів рідини, називаються внутрішнім тертям, або в'язкістю.

Усяка зміна швидкості може відбуватися лише під дією сили, отже, між шарами рідини, що рухається, по дотичній до цих шарів діє сила внутрішнього $F_{тр}$ тертя. Ця сила є однією з фундаментальних сил і в кінцевому рахунку зводиться до сил міжмолекулярної взаємодії, тобто до сил взаємодії заряджених частинок, що рухаються, з яких складаються молекули, до електромагнітних сил. Як показує дослід і розрахунки, $F_{тр}$ залежить від площі дотичних ша-

рів ΔS , від швидкості зміни величини $\frac{\Delta V}{\Delta x}$, від виду рідини і умов зовнішнього середовища.

$$F_{\text{тр}} = -\eta \frac{\Delta V}{\Delta x} \Delta S, \quad (3.13)$$

де $\frac{\Delta V}{\Delta x}$ – градієнт швидкості, що показує зміну швидкості на одиницю відстані в напрямку, перпендикулярному до швидкості;

η – коефіцієнт внутрішнього тертя, або в'язкості, чисельно дорівнює силі в'язкості, що виникала між шарами рідини при одиничному градієнті швидкості через одиничну площадку.

Вимірюється η в СІ : $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$; в СГС : $\frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}}$ = пуаз, причому

1 $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} = 10 \text{ пуз}$ (пуаз). Знак " – " показує, що сила в'язкості спрямована завжди проти зміни швидкості.

Коефіцієнт в'язкості, визначений за рівнянням (3.7), називається динамічною в'язкістю, на відміну від кінематичної в'язкості, рівної відношенню η / ρ , де ρ – густина рідини.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості вимірюється в СІ: в $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ у СГС : в $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$. Одиниця $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$ називається «стокс».

Коефіцієнт в'язкості рідини істотно залежить від температури: з підвищенням температури в'язкість зменшується, наприклад у гліцерину, при збільшенні температури на 10°C (від 20 до 30°C) величина η зменшується в 2,5 рази.

При русі в рідині (або газі) твердих тіл у безпосередній близькості до поверхні тіла утворюється тонкий шар рідини, названий примежовим шаром, в якому швидкість міняється від нуля до швидкості потоку, що набігає. Течія рідини (газу) може бути ламінарною (шаруватою), коли окремі шари рідини рухаються з паралельно спрямованими швидкостями, не перемішуючись, і турбулент-

ною, при якому виникає енергійне перемішування шарів.

Положення точки переходу ламінарної течії в турбулентну залежить від форми тіла, шорсткості його поверхні й від безрозмірного числа Рейнольдса.

Число Рейнольдса служить також критерієм схожості для течії у рідин у трубах, каналах або при русі твердих тіл у рідкому середовищі: характер течії або обтікання буде зовсім однаковий, якщо кожній течії відповідає те саме значення R_e . Це дозволяє при випробуваннях в аеро- і гідродинамічних трубах використовувати замість реальних транспортних засобів їхні зменшені моделі, при цьому швидкість продувки повинна бути збільшена в стільки разів, у скільки разів зменшені поперечні розміри тіл.

При русі тіл з великими швидкостями повне обтікання тіла стає неможливим: потік рідини відривається від поверхні тіла, у результаті чого за тілом виникають вихори, і тиск за тілом падає, тобто $P_A > P_B$ (рис. 3.2.).

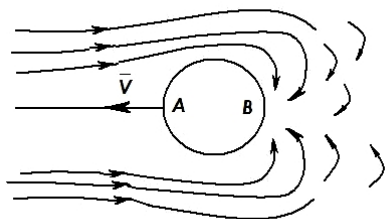


Рисунок 3.2 – Обтікання тіла, яке рухається з великою швидкістю

Таким чином, лобовий опір, якого зазнає тіло, складається з опору сил тертя і опору тиску. Найменшого опору сили тиску зазнають тіла добре обтічної каплевидної форми. Таку форму прагнуть надати фюзеляжеві й крилам літака, кузову автомобіля й т.ін. Співвідношення між цими двома видами опорів визначається значенням числа Рейнольдса: при малих R_e основну роль відіграє опір тертя, так що опором тиску можна знехтувати, при великих значеннях R_e у лобовому опорі переважають сили тиску.

Порядок виконання роботи

1. Внести дані про вимірювальні прилади лабораторної установки в таблицю 3.1

Таблиця 3.1

Прилад	Межа виміру	Ціна поділки	Приладова помилка
Лінійка Мікрометр Секундомір Штангенциркуль			

2. За допомогою лінійки виміряти відстань l між мітками АВ на посудині (рис. 3.1).

3. За допомогою ареометра визначити густину рідини ρ_2 або (якщо рідина відомого сорту) знайти її густину з таблиці довідника. Треба з'ясувати у викладача, з якого матеріалу виготовлено кульки, із таблиці IX [5] визначити їхню густину.

4. Виміряти час t проходження кулькою відстані АВ, для цього опустити кульку через лійку в посудину і в момент проходження нею позначки А увімкнути секундомір; при проходженні через позначку В зупинити секундомір.

5. Використовуючи мікрометр (або відліковий мікроскоп), виміряти діаметр кульки.

6. Повторити виміри пунктів 4 і 5 для п'яти різних кульок.

7. Виміряти внутрішній діаметр циліндричної посудини.

8. Дані експерименту занести в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2

№ п / п	d, м	t, с	ρ_1 , кг / м ³	ρ_2 , кг / м ³	l, м	D, м
1						
2						
3						
4						
5						
середнє значення						

Обробка результатів вимірів

1. Статистичну обробку результатів вимірів провести згідно з існуючими правилами.
2. Остаточний результат подати у вигляді:

$$\eta = (\eta_{\text{середнє}} \pm \Delta\eta) \text{ кг (м} \cdot \text{с)}^{-1},$$

де

$$\Delta\eta = \sqrt{(\Delta\eta_{(\text{гр})})^2 + (\Delta\eta_{(\text{вип.})})^2}.$$

3. За даними одного з вимірів (кожного) розрахувати за формулою (3.11) число Рейнольдса і зробити висновок про характер течії, що супроводжує рух кульки, і про співвідношення між силами тертя і тиску.

Контрольні запитання і завдання

1. У чому полягає суть методу Стокса для виміру коефіцієнта в'язкості?
2. Чи впливає матеріал кульки на силу тертя, коефіцієнт в'язкості?
3. У вимірі якої величини допускається основна помилка досліду? Чому?
4. Які причини виникнення і природа сил внутрішнього тертя?
5. Що таке коефіцієнт внутрішнього тертя (в'язкості)?
6. Які сили діють на кульку, яка падає в циліндричному посуді? Наведіть формули сил.
7. Поясніть, які з цих сил змінюються з часом і чому?
8. Поясніть, як рухається кулька у циліндричному посуді?
9. Чим пояснити збільшення коефіцієнта в'язкості рідини при зниженні температури? Чому взимку потрібно прогрівати двигун автомобіля перед рухом?
10. Як зміниться в'язкість газу при його нагріванні і чому?
11. Навіщо вводиться число Рейнольдса? Поясніть зміст символів, які входять в число Рейнольдса.
12. Поясніть зміст термінів: ламінарна течія та турбулентна течія.

Лабораторна робота 4

Тема. Вивчення на механічній моделі розподілу молекул газу за компонентами швидкостей.

Мета. Показати на математичній моделі, що розподіл великої кількості молекул по компонентах швидкостей підлягає статистичним законам.

Прилади і матеріали. Дошка Гальтона, лійка, кульки, лінійка.

Практичне значення. Ознайомлення з найбільш розповсюдженим у природі законом розподілу випадкових величин – законом нормального розподілу Гаусса, якому підпорядковуються випадкові явища, що часто зустрічаються в природі, у житті, у техніці.

Короткі теоретичні відомості

Випадкові явища зустрічаються досить часто. Пророчити окремі випадкові явища не можна, тому що на них позначається вплив дуже великого числа факторів, які не піддалися контролю. Наприклад, при стрілянині по мішені, під час виміру фізичних величин, у русі молекул, в азартних іграх і т.ін., у тому або іншому ступені спостерігаються елементи випадковості. При цьому жодне одиничне явище не характеризує загальної картини випадкових явищ. Приклад тому наступний: по одному випадковому отвору в мішені не можна судити про влучність стрільця, у той час як велика кількість пострілів дає поняття про точність стріляння. Велика сукупність випадкових явищ або величин підлягає статистичним законам, що дозволяють знайти імовірність, з якою здійснюється та або інша подія в серії випадкових однотипних подій, середні величини в серії вимірюваних величин, найбільш імовірні відхилення від середнього і т.ін.

Закон нормального розподілу (закон Гаусса) дає залежність імовірності появи даної величини від значення самої величини. Цей розподіл має місце в тому випадку, якщо випадкова величина залежить від великої кількості факторів, що вносять з рівною імовірністю позитивні й негативні відхилення.

Відповідно до закону Гаусса кількість вимірів ΔN , що дали відхилення від середнього значення вимірюваної величини в межах від x до $x + \Delta x$, пропорційно інтервалові Δx і повній кількості вимірів N

$$y = \frac{\Delta N}{N \Delta x} = f(x) \quad (4.1)$$

називається законом розподілу або густиною імовірності. Крива $y = f(x)$ називається кривою Гаусса або кривою нормального розподілу помилок (рис. 4.1.).

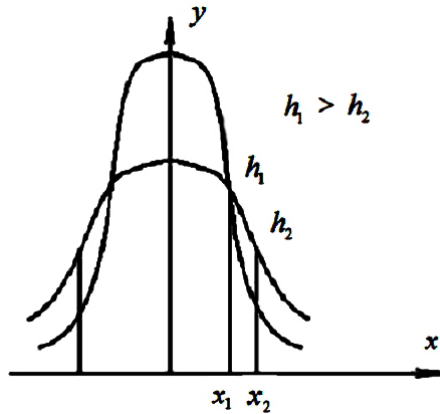


Рисунок 4.1 – Криві Гаусса

Закон Гаусса має вигляд:

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2}, \quad (4.2)$$

де x – відхилення вимірюваної величини від її середнього значення;

y – густина імовірності появи помилки величини x .

Крива Гаусса пронормована так, що

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1. \quad (4.3)$$

Величина h називається мірою точності й визначається зі співвідношення

$$y(x_0) = y(1/h) = \frac{1}{e} y_{\max} . \quad (4.4)$$

Чим більша міра точності h , тим менше розсіювання результатів вимірів щодо їхнього середнього значення і відповідно більша точність вимірів. Інші характеристики розсіювання – середня арифметична помилка $\bar{x}$ і середня квадратична помилка σ пов'язані з мірою точності h співвідношеннями

$$\bar{x} = \frac{1}{\sqrt{\pi h}} , \quad (4.5)$$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2h}} . \quad (4.6)$$

Розподіл молекул за компонентами швидкості підлягає наступному закону:

$$f(V_x) = A e^{-\frac{mV_x^2}{2kT}} , \quad (4.7)$$

де

$$A = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} . \quad (4.8)$$

Порівнюючи формули (4.7) з (4.2), бачимо, що вони адекватні. Таким чином, розподіл молекул газу за компонентами швидкості підлягає законові розподілу випадкової величини Гаусса.

Опис устаткування

Вивчення закону розподілу молекул за компонентами швидкості проводиться на механічній моделі, що відтворює картину випадкових відхилень від середнього положення частинок у результаті підсумовування великої кількості рівноімовірних елементарних помилок. У цій роботі використовується прилад (дошка Гальтона), в якому вертикально падаючий струмінь кульок (механічний аналог молекул газу) розсіюється у вертикальній площині (рис.

4.2). При зіткненні кульок з розсіювачами відбувається елементарне відхилення з рівною імовірністю вправо і вліво.

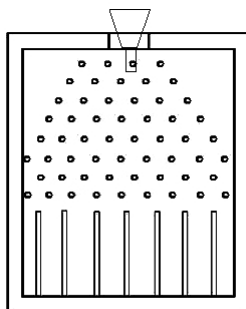


Рисунок 4.2 – Загальний вид дошки Гальтона

Розсіяні кульки, збираючись у шухляді з вузькими осередками, дають уявлення про характер розподілу випадкових відхилень від вертикалі. Якщо перевага лівих або правих відхилень від середнього напрямку падіння кульок відсутня, то одномірне розсіювання відбувається за законом Гаусса. Аналогічна картина спостерігається і при вивченні розподілу молекул газу за складовими швидкостями. Випадкові зіткнення молекул при хаотичному русі в газі приводять до випадкових змін їхніх швидкостей як за величиною, так і за напрямком.

Якщо розглядати розподіл молекул за швидкостями уздовж якого-небудь одного напрямку, то велика кількість випадкових зіткнень приводить до закону нормального розподілу уздовж цього напрямку.

Порядок виконання роботи

1. Взяти дошку Гальтона з меншою кількістю розсіювачів (мала кількість елементарних помилок). В отвір дошки вставити лійку, причому центральний розсіювач повинен знаходитися під щілиною лійки.

Через лійку сипати кульки доти, поки центральні осередки не заповняться майже повністю. Виміряти рівень кульок в кожному

осередку. Результати вимірів нанести на графік розподілу кульок за осередками

$$y_i = f(x_i). \quad (4.9)$$

Очевидно, що рівень кульок y в i -ому осередкові пропорційний кількості кульок, що потрапили в цей осередок. Величина відхилення x_i є відстань i -ого осередку від середньої, лежачої безпосередньо під щілиною, а інтервал між осередками Δx приймається за одиницю.

2. Відрахувати невелику кількість кульок (20-30). Висипати їх через лійку. Розподіл кульок за осередками у цьому випадку виміряти не за рівнем, а за числом кульок у кожному осередку. Результати вимірів нанести на аналогічний попередній графік

$$y_i = f(x_i)$$

3. Взяти іншу дошку Гальтона з великою кількістю розсіювачів. Проробити те ж, що й у п. 1,2.

4. Результати вимірів і обчислень звести в таблицю (4.1).

Таблиця 4.1

x	x^2	y	yx^2

Обробка результатів вимірів

1. Для серії експериментальних даних, зведених у таблицю, визначити міру точності за формулою

$$h = \sqrt{\frac{\sum y_i}{2 \sum (y_i x_i^2)}}. \quad (4.10)$$

2. Побудувати по точках теоретичну криву з даною мірою точності h .

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2}. \quad (4.11)$$

3. Зробити перевірку збігу експериментального розподілу $y_i = f(x_i)$ з обчисленням за формулою (4.11).

4. Пункти 1-3 виконати для обох дошок Гальтона.

5. Розрахувати за формулами (4.5) і (4.6) середню арифметичну $\bar{x}$ і середню квадратичну σ помилки.

Контрольні запитання і завдання

1. Подати вид кривої розподілу.

2. Укажіть на кривій розподілу найбільш імовірну, середню квадратичну і середню арифметичну швидкості.

3. Як змінюється вид кривої розподілу молекул одномірного газу за компонентами швидкості з ростом температури і чому?

4. Користуючись законом розподілу молекул одномірного ідеального газу за швидкостями, одержіть вираження для найбільш імовірної швидкості.

5. Користуючись графіком розподілу $f(V_x)$ визначте імовірність того, що швидкість молекули знаходиться в інтервалі швидкостей від V_x до $V_x + dV_x$.

6. Розв'яжіть задачі № 5.93, 5.94, 5.97 [5].

Лабораторна робота 5

Тема. Дослідження залежності коефіцієнта поверхневого натягу від концентрації та від температури методом Ребіндера.

Мета. Дослідити залежність коефіцієнта поверхневого натягу рідини від температури і від концентрації методом виміру надлишкового тиску в бульбашках.

Прилади та матеріали. Установка для цієї роботи, дистильована вода, набір пробірок з розчином гліцерину різної концентрації, термометр, термостат, електроплита.

Практичне значення. Ознайомлення з одним з найбільш розповсюджених методів визначення коефіцієнта поверхневого натягу α , що є основною величиною, яка характеризує властивості поверхні рідини.

Опис устаткування

Метод Ребіндера полягає у вимірі тиску, необхідного для створення бульбашки. Установка, використовувана в роботі (рис.5.1), складається з наповненого водою аспіратора, з'єднаного гумовими і скляними трубками з манометром і повітряним проміжком закритої скляної посудини, у нижній частині якої налита досліджувана рідина. Через отвір у гумовій пробці, якою закрита посудина, проходить трубка з капілярним наконечником. Під час дослідження капілярний наконечник занурюють у рідину так, щоб він трохи доторкався її поверхні.

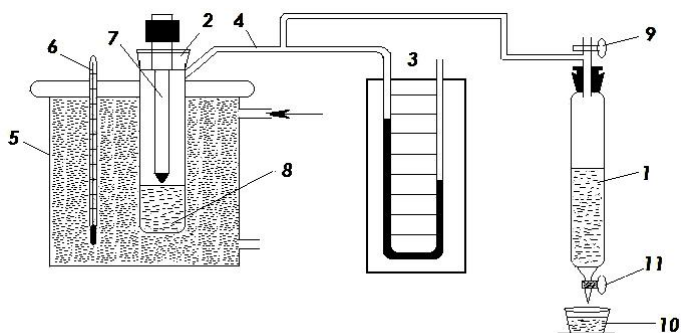


Рисунок 5.1 – Загальний вид установки для метода Ребіндера

Посудина, для підтримки і зміни температури поміщається в склянку з водою, що виконує роль термостата. Вода в склянці і рідина в посудині нагріваються на електроплиті, що увімкнена в мережу через ЛАТР. Температура в склянці з водою вимірюється термометром, причому вода в склянці постійно перемішується мішалкою.

Коли з аспіратора 1 при закритому відростку почне повільно витікати вода, то це означає, що у верхній частині посудини 2 і в лівому коліні манометра тиск зменшується. При певному розрідженні P , внаслідок дії атмосферного тиску P_0 , через капіляр у рідину продавлюються бульбашки повітря (різниця тисків ΔP вимірюється манометром). Це відбувається тоді, коли різниця тисків ΔP врівноважується тиском, обумовленим силами поверхневого

натягу досліджуваної рідини, що намагаються стиснути цю бульбашку. Тому в момент відриву бульбашки

$$\alpha = A \cdot h, \quad (5.1)$$

де h – різниця висот рідини в колінах манометра;

A – постійна приладу, що залежить від розмірів капілярного наконечника.

Для її визначення необхідно провести досліди з рідиною, коефіцієнт поверхневого натягу α якої відомий. Нехай при цьому $\alpha = \alpha_0$, $h = h_0$, тоді

$$A = \frac{\alpha_0}{h_0}. \quad (5.2)$$

Короткі теоретичні відомості

Поверхня рідини, що торкається іншого середовища, знаходиться в особливих умовах у порівнянні з іншою масою рідини. У середині об'єму рідини кожна молекула рідини зазнає притягання з боку всіх сусідніх з нею молекул, що знаходяться в межах сфери молекулярної дії, центр якої збігається з центром молекули, за якою спостерігають.

Радіус молекулярної дії r має величину порядку декількох ефективних діаметрів молекули. Рівнодіюча всіх цих сил притягання для молекули M_1 , що знаходиться від поверхні рідини на відстані r , у середньому дорівнює нулеві (рис. 5.2).

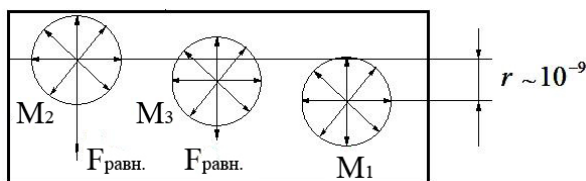


Рисунок 5.2 – Рівнодіючі всіх цих сил притягання для молекул M_1 , M_2 , M_3

Молекули межового шару M_2 і M_3 , на відміну від молекул на глибині, оточені сусідніми молекулами рідини не з усіх боків. Частина "сусідів" на поверхні – це частинки примежового середовища, що може відрізнятись від рідини як природою частинок, так і їхньою густиною, тому сили притягання, що діють на кожен молекулу рідини в поверхневому шарі, виявляються неврівноваженими. Наприклад, оскільки густина молекул у рідині багато більша, ніж, наприклад, у насиченій парі (значно меншою від критичної температури T_k), сила притягання, яку зазнає молекула поверхневого шару з боку молекул рідини більша, ніж з боку молекул пари. Тому рівнодіюча всіх сил притягання, що діють на поверхневу молекулу, відмінна від нуля і спрямована усередину рідини. Отже, перехід молекули з глибини рідини в поверхневий шар пов'язаний з необхідністю здійснення роботи проти цієї рівнодіючої, тобто вимагає витрати енергії.

Якщо при постійній температурі у зворотному шляху змінити поверхню рідини на величину ΔS , то необхідна для цього робота повинна бути

$$\Delta A = -\alpha \Delta S. \quad (5.3)$$

Коефіцієнт α називається коефіцієнтом поверхневого натягу (к.п.н.) ($\alpha > 0$). Таким чином, к.п.н. чисельно дорівнює роботі ізотермічного утворення одиниці площі поверхні рідини на межі з іншим середовищем. У СІ α вимірюється в Дж / м².

Оскільки робота ΔA , що необхідна для ізотермічного збільшення поверхневого шару рідини, йде на збільшення потенціальної енергії молекул, що переходять на поверхню, молекули в поверхневому шарі рідини володіють надлишковою потенціальною енергією в порівнянні з молекулами усередині об'єму рідини.

Зміна площі поверхні на величину ΔS спричинить за собою зміну потенціальної енергії молекул поверхневого шару на величину

$$\Delta U = \alpha \Delta S. \quad (5.4)$$

З іншого боку, якщо зміну поверхні рідини на величину ΔS здійснити ізотермічно і назад, то необхідна для цього робота по-

винна бути рівною зміні вільної енергії поверхні E , тобто

$$\Delta A = -\Delta E. \quad (5.5)$$

Отже, надлишкова потенціальна енергія молекул у поверхневому шарі рідини є вільною енергією поверхневого шару, тобто к.п.н. можна визначити як вільну енергію одиниці площі цієї поверхні:

$$\alpha = \frac{\Delta E}{\Delta S}. \quad (5.6)$$

Коефіцієнт поверхневого натягу α залежить від хімічного складу рідини і від її температури. Зі збільшенням температури α зменшується і приймає значення нуль при критичній температурі T_k , тому що при цій температурі зникає різниця між рідиною і її парою, а виходить, зникає і поверхня, що розділяє обидві фази. Приблизно для температур, далеких від T_k , залежність к.п.н., від температури

$$\alpha(T) = \alpha_0(1 - aT), \quad (5.7)$$

де α_0 – к.п.н. при температурі T_0 (наприклад при кімнатній);

a – температурний коефіцієнт поверхневого натягу.

Домішки сильно позначаються на величині поверхневого натягу. Наприклад, розчинення у воді мила зменшує її коефіцієнт поверхневого натягу майже в два рази. Розчинення у воді NaCl , навпаки, приводить до збільшення α .

Усе сказане вище про особливі умови, в яких перебувають молекули поверхневого шару, цілком відноситься також і до твердих тіл. Отже, тверді тіла, як і рідини, мають поверхневий натяг.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Дослідити залежність к.п.н. від температури.

1. У пробірку 2 (рис. 5.1) налити дистильовану воду, установити капіляр 7 так, щоб він трішки доторкувався отвором поверхні води.

2. Кран 9 відкрити і тримати доти відкритим, поки рідина в колінах манометра не установиться на одному рівні. Потім закрити кран 9.

3. Відкрити кран 11 так, щоб вода витікала краплями з аспіра-тора.

4. У той момент, коли в пробірці 2 проскочить бульбашка по-вітря, відзначити різницю тисків h по манометру і записати отри-маний результат. Зробити відліки h по манометру не менш, ніж для 10 бульбашок.

5. Узяти з таблиці VIII [5] α_0 для води при даній температурі, визначити постійну приладу A за формулою (5.2).

6. Замінивши в пробірці 2 воду досліджуваною рідиною, про-вести аналогічні виміри і визначити α при різних температурах за формулою (5.1).

7. Результати занести в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

№ п / п	Температура	h_1 , см	h_2 , см	h_3 , см	$\bar{h}$, см	α , Дин / см
1	Кімнатна					
2	$T_2 =$					
3	$T_3 =$					
4	$T_4 =$					
5	$T_5 =$					

Завдання 2. Дослідити залежність к.п.н. від концентрації

1. Приготувати розчини різної концентрації: 5, 10, 20, 30 %... (для приготування, наприклад 10 %-го розчину, необхідно в 90 г води розчинити 10 г речовини).

2. Проробити із зазначеними розчинами те ж, що зазначено в п. 2, 3, 4 завдання 1.

3. За формулою (5.1) визначити α для розчинів різної концент-рації.

4. Результати розрахунків занести в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

№ п / п	Концент- рація С%	h_1 , см	h_2 , см	h_3 , см	$\bar{h}$, см	α , Дин / см
1	вода					
2	10					
3	20					
4	40					
5	60					
6	80					
7	100					

Обробка результатів експериментів

1. За формулою (5.2) визначити постійну приладу.
2. За формулою (5.1) визначити α при різних температурах.
3. Побудувати графік залежності к.п.н. від температури $\alpha = f(T)$ та зробити висновок.
4. За формулою (5.1) визначити α при різних концентраціях .
5. Побудувати графік залежності к.п.н. від концентрації $\alpha = \phi(C)$ та зробити висновки.

Контрольні запитання та завдання

1. У чому полягає метод визначення коефіцієнта поверхневого натягу за виміром надлишкового тиску в повітряних бульбашках?
2. Що таке коефіцієнт поверхневого натягу (к.п.н.)?
3. Як залежить від температури к.п.н. рідини?
4. Як залежить від концентрації к.п.н. рідини?
5. Коли і чому к.п.н. приймає значення нуль?
6. Як пояснити той факт, що зі збільшенням температури коефіцієнт поверхневого натягу зменшується?
7. Чому краплі рідини малого об'єму приймають сферичну форму?
8. Чи зміниться к.п.н. рідини, якщо її поверхня буде межувати не з повітрям, а з іншою рідиною?
9. Чому вода піднімається по стінкам капіляра, які вона змачує?

Лабораторна робота 6

Тема. Визначення середньої довжини вільного пробігу і ефективного діаметра молекул повітря.

Мета. Вивчити основні закони гідроаеродинаміки (зокрема формулу Пуазейля). Усвідомити поняття ідеального газу, явище переносу в ньому і зв'язок між коефіцієнтами переносу. Визначити середню довжину вільного пробігу $\langle \lambda \rangle$ і ефективного діаметра d молекул повітря і зв'язок між ними.

Прилади і матеріали. Установка для визначення середньої довжини вільного пробігу і ефективного діаметру молекул повітря, секундомір, термометр, барометр.

Практичне значення. Основні поняття молекулярно-кінетичної теорії газів і рідин є теоретичним фундаментом для вивчення різних технічних питань, а саме: розрахунок гідро- і аеродинамічного опору різних машин і механізмів (поливні і розбризкуючі механізми, карбюратори в двигунах, аеродинамічні властивості сільськогосподарських машин, вакуумні установки і т.д.). Крім цього, вивчення термодинаміки неможливе без знання молекулярно-кінетичної теорії.

Короткі теоретичні відомості

Ідеальний газ описується рівнянням Менделєєва-Клапейрона

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (6.1)$$

яке зв'язує мікропараметри газу – тиск p , об'єм V і температуру T . Якщо врахувати, що маса газу m дорівнює добуткові числа молекул N у даному об'ємі V на масу однієї молекули m_0 ,

$$m = N \cdot m_0, \quad (6.2)$$

а маса одного моля

$$\mu = N_A \cdot m_0, \quad (6.3)$$

де N_A – число Авогадро; то рівняння (6.1) приймає вигляд:

$$pV = \frac{m_0 N}{m_0 N_A} RT, \quad p = \frac{N}{V} \frac{R}{N_A} T = nkT, \quad (6.4)$$

де $n = \frac{N}{V}$ – кількість молекул в одиниці об'єму,

$\frac{R}{N_A}$ – стала Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К).

Ці рівняння, однак, не містять фізичних величин, що характеризують властивості молекул, мікропараметри газу (масу молекули m_0 , середню квадратичну швидкість $\bar{u}$ або кінетичну енергію молекули E). У молекулярно-кінетичній теорії газу виводиться рівняння – основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії, що зв'язує мікро- і макропараметри газу:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \bar{u}^2}{2} = \frac{2}{3} nE, \quad (6.5)$$

де E – середня кінетична енергія молекул. Якщо порівняти (6.5) і (6.4), то одержимо $\frac{2}{3} nE = nkT$, або

$$E = \frac{3}{2} kT. \quad (6.6)$$

Ця формула справедлива для одноатомної молекули з трьома ступенями свободи, а в загальному випадку $E = \frac{i}{2} kT$, де i – кількість ступенів свободи. З (6.6) можна визначити середню квадратичну швидкість молекули

$$\frac{m_0 \bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} kT;$$

відкiля

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \quad (6.7)$$

Важливими мікропараметрами газу є ефективний діаметр молекул d і середня довжина вільного пробігу $\langle \lambda \rangle$ – відстань, що пролітає молекула, рухаючись прямолінійно між послідовними зіткненнями. Остання величина може бути знайдена як середнє арифметичне з відстаней між сусідніми зіткненнями λ_{ik} (рис. 6.1).

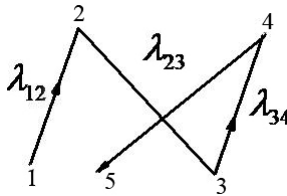


Рисунок 6.1 – Схема зіткнень молекул

Якщо за одну секунду молекула зазнає z зіткнень, то

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\lambda_{12} + \lambda_{23} + \lambda_{34} + \dots + \lambda_{ik}}{z},$$

а пройдений при цьому шлях $S = \bar{u}t = \bar{u}l = \bar{u}$, тоді

$$\langle \lambda \rangle = \frac{S}{z} = \frac{\bar{u}}{z}. \quad (6.8)$$

Число зіткнень z за секунду дорівнює кількості молекул, що потрапили усередину ламаної трубки радіусом, рівним діаметрові молекул d , причому заломі її відповідають точкам зіткнень молекул (рис 6.2). Площа перетину цієї трубки πd^2 , а довжина її при $t = 1\text{с}$ дорівнює $\bar{u}$. Тоді її об'єм утворений за 1 с, буде $\pi d^2 \bar{u}$, а кількість молекул, що потрапили усередину і зазнали зіткнення з нашою розглянутою центральною молекулою, дорівнює $z = n\pi d^2 \bar{u}$. Однак з урахуванням руху всіх молекул це число збільшується в

середньому в $\sqrt{2}$ раз і дійсне значення

$$z = \sqrt{2} n \pi d^2 \bar{u} . \quad (6.9)$$

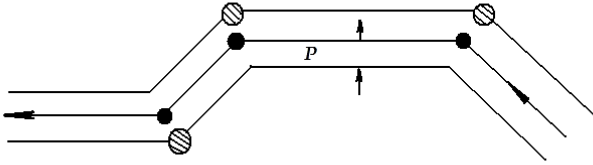


Рисунок 6.2 – Схема для розрахунку числа зіткнень z молекул за секунду

Підставивши (6.9) у (6.8), одержимо

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} , \quad (6.10)$$

а використовуючи (6.4),

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p} , \quad (6.11)$$

тобто $\langle \lambda \rangle \sim \frac{1}{p}$. Таким чином, зі зменшенням тиску p середня довжина вільного пробігу збільшується і при деякому тиску p для даного газу $\langle \lambda \rangle$ стане порівняною з розмірами l посудини, в якій знаходиться газ, тобто $\langle \lambda \rangle \sim l$.

У цьому випадку молекула може пролетіти від однієї стінки посудини до іншої без зіткнення з іншими молекулами; такий стан газу в фізиці називають станом середнього вакууму. Наприклад, при тиску $p = 1,5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. і розмірах посудини $l \approx 1$ м будемо мати середній вакуум. Якщо $\langle \lambda \rangle > l$, то говорять про високий ва-

куум, а при $\langle \lambda \rangle < 1$ – про низький.

З формули (6.11) можна визначити $\langle \lambda \rangle$, знаючи d і p , однак визначення дослідним шляхом d представляє відомі труднощі, і в даній роботі ми спочатку визначаємо $\langle \lambda \rangle$ з формули зв'язку між коефіцієнтом в'язкості η , густиною газу ρ , $\langle \lambda \rangle$ і $\bar{u}$.

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \bar{u}. \quad (6.12)$$

Це рівняння виходить при розгляді обміну кількістю руху між шарами газу, що рухаються. З (6.1) одержимо, що $\rho = \frac{\mu}{RT} p$ і остаточно, використовуючи (6.7) і (6.12), одержимо

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{\mu p}{RT} \langle \lambda \rangle \sqrt{3RT / \mu}. \quad (6.13)$$

З формули Пуазейля для об'єму V газу, що витікає трубкою довжиною z і радіусом r за час τ під дією різниці тисків на кінцях трубки Δp , можна виразити

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8Vz} \Delta p \tau. \quad (6.14)$$

Порівнюючи (6.14) і (6.13), одержимо

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\pi r^4}{8pz} \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \frac{\Delta p \tau}{V} = k \frac{\Delta p \tau}{V}, \quad (6.15)$$

де

$$k = \frac{\pi r^4}{8pz} \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \quad (6.16)$$

є сталою величиною в наших дослідженнях.

Використовуючи установку (рис. 6.3), можна визначити час τ витікання деякого об'єму рідини V у склянку C , що дорівнює об'єму повітря, що зайшло через трубку Tr радіусом r і довжиною z у балон B .

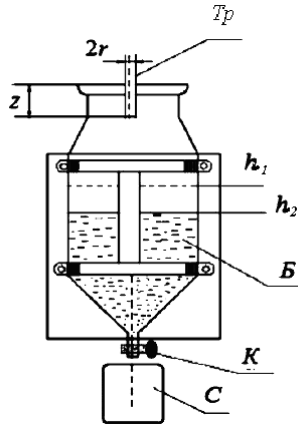


Рисунок 6.3 – Схема установки для визначення середньої довжини вільного пробігу

Різниця тисків між зовнішнім повітрям і усередині балона Δp знайдемо як середнє арифметичне між рівнем води С, і рівнем h_2 в момент зупинки секундоміра, тобто:

$$\Delta p = \rho_{\text{ж}} g \frac{h_1 + h_2}{2}. \quad (6.17)$$

При цьому в склянці С буде знаходитися $V_{\text{л}} \text{ м}^3$ води (відзначимо, що наповняти С треба з моменту, коли вода витікає з Б краплями).

Таким чином, розрахувавши k і $\langle \lambda \rangle$ експериментально, можна знайти з (6.10) ефективний діаметр молекул газу, враховуючи, що

$$p = nkT, \quad p_0 = n_0 kT, \quad n = n_0 \frac{pT_0}{p_0 T},$$

де $n_0 = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ – число Лошмідта

$$d = \sqrt{\frac{1}{\pi <\lambda> n \sqrt{2}}} = \sqrt{\frac{p_0 T}{\pi <\lambda> n_0 P T_0 \sqrt{2}}} . \quad (6.18)$$

Отже, використовуючи дані експерименту і формули (6.16), (6.17) і (6.18), знаходимо $<\lambda>$ і d .

Порядок виконання роботи

1. Наповнити балон B водою на $3/4$ і зафіксувати рівень води в ньому h' ($h' > h_1 = 50\text{см}$).

2. Відкрити кран K і, почекавши, коли вода буде витікати з B краплями, а рівень рідини зрівняється з міткою $h_1 = 0,5\text{м}$, увімкнути секундомір. За допомогою секундоміра виміряти час τ_1 після закінчення якого рівень води в B опуститься до мітки $h_1' = 0,4\text{м}$ (що відповідає $V_1 = 20\text{мл}$), потім послідовно до $h_2 = 0,3\text{м}$ ($V_2 = 40\text{мл}$), $h_3 = 0,2\text{м}$ ($V_3 = 60\text{мл}$). Дані занести в табл. 6.1. Очевидно, об'єми води відповідають об'ємам повітря, що зайшло в балон B .

3. Знаючи h_1 і h_i , визначити різницю тисків

$$\Delta p_i = \rho g \frac{h_1 + h_i}{2} ,$$

де ρ – густина води при температурі дослідів .

4. За формулою

$$k = \frac{\pi r^4}{8 p z} \sqrt{\frac{3 R T}{\mu}}$$

визначити величину k і знайти значення $<\lambda>$ за формулою $<\lambda> = k \frac{\Delta p \tau}{V}$ для кожного h_i окремо.

5. Дослідження повторити 3 рази, знайти статистичне математичне чекання

$$D^*(\langle \lambda \rangle), \quad \sigma^*(\langle \lambda \rangle),$$

для різних $\langle \lambda \rangle$ і довірчий інтервал $\langle \lambda \rangle \pm \Delta \langle \lambda \rangle$. Розрахунок робити як для випадку прямих вимірів (роль випадкових факторів дуже значна).

6. Визначити ефективний діаметр молекул повітря за формулою

$$d = \sqrt{\frac{p_0 T}{\sqrt{2} \pi n_0 p T_0 \langle \lambda \rangle}}.$$

Значення p і T визначити за допомогою барометра і термометра, що знаходиться в лабораторії. Результати вимірів і обчислень занести в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

№ п / п	h , м	h_i м	r , м	z , м	p , $\frac{H}{m^2}$	T , К	V_i , m^3	ρ , $\frac{кг}{m^3}$	T_0 , К	p_0 , $\frac{H}{m^2}$	τ , с
1											
2											
3											

Контрольні запитання і завдання

1. Що таке ідеальний газ і яке основне рівняння, що його описує?

2. Які явища переносу ви знаєте? Запишіть рівняння, що їх описують.

3. Який зв'язок між коефіцієнтами переносу?

4. Одержіть розрахункову формулу для визначення середньої довжини вільного пробігу $\langle \lambda \rangle$ молекул повітря в даній роботі.

5. Як пов'язана $\langle \lambda \rangle$ з ефективним діаметром молекули?

6. Що таке середній вакуум і від чого залежить цей стан?

7. Як визначається різниця тисків ΔP у даній роботі?
8. Яка температура і середня швидкість молекул кисню, якщо при густині $\rho = 1,4 \text{ кг/м}^3$ коефіцієнт в'язкості $\eta = 2 \cdot 10^{-4}$ пуаз, і довжина вільного пробігу молекул $\lambda = 10^{-7} \text{ м}$.
9. Чому дорівнює ефективний діаметр молекул d і середня кількість зіткнень у секунду для даного газу (див. п. 8)?

Лабораторна робота 7

Тема. Визначення вологості повітря аспіраційним психрометром з електромотором М-34.

Мета. Вивчити принцип дії аспіраційного психрометра з електромотором М - 34. Навчитись визначати вологість повітря.

Прилади і матеріали. Психрометр аспіраційний з електромотором М-34.

Практичне значення. Знання про вологість повітря дуже важливе тому, що від вологості повітря залежить погода, яка впливає на характер технічного обслуговування автомобілів, будівництво доріг, мостів, автомагістралей, а також на самопочуття людей.

Короткі теоретичні відомості

Стан заданої маси речовини визначається значеннями трьох параметрів: тиску P , об'єму V , температури T . Аналітичний зв'язок між цими параметрами у вигляді функції $f(p, V, T) = 0$ називається рівнянням стану. Перехід з одного стану (p_1, V_1, T_1) в інший стан (p_2, V_2, T_2) називається процесом.

Газ, для якого потенціальна енергія взаємодії молекул дуже мала в порівнянні з кінетичною енергією їхнього руху, називається ідеальним. Якщо ця умова не виконується, то газ буде реальним. Розглянемо процес стискання речовини при постійній температурі (рис.7.1). Припускаємо, що спочатку речовина газоподібна.

При зменшенні об'єму тиск газу буде рости (ділянка 1 – 2 рис 7.1). По досягненню об'єму V_r (точка 2) тиск перестає змінюватися, а речовина перестає бути однорідною – частина газу конденсується в рідину. Відбувається розшарування речовини на дві фази: рідинну і газоподібну. У міру подальшого зменшення об'єму все більша частина речовини переходить у рідинну фазу, причому пе-

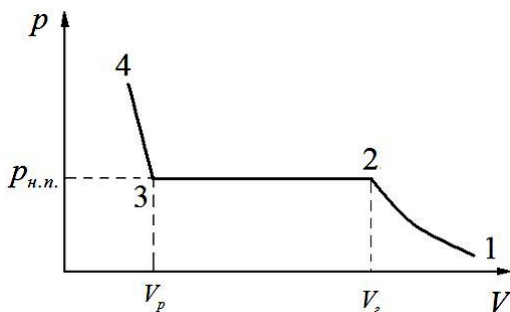


Рисунок 7.1 – Графік залежності p від V для стиснення речовини при постійній температурі

рехід здійснюється при постійному тиску $p_{н.п.}$ (тиск насиченого пару). Після того як процес конденсації речовини закінчується (це відбувається при досягненні об'єму V_p точка 3 рис.7.1) подальше зменшення об'єму супроводжується швидким збільшенням тиску (відрізок 3 – 4), оскільки рідина нестислива. Реальний газ, що знаходиться в термодинамічній рівновазі з рідиною (відрізок 2 – 3 рис. 7.1) називається насиченою парою цієї рідини. Експерименти показали, що тиск насиченої пари у різних речовин неоднаковий. Отже, тиск насиченої пари є однією з характеристик речовини. Експериментальне вивчення залежності тиску насиченої пари від температури показало, що зі збільшенням температури тиск насиченої пари росте.

У таблиці 7.1 наведено залежність тиску і густини насиченої пари H_2O від температури.

Якщо насичену пару охолоджувати, то при досягненні деякої температури T_p пара стане насиченою і подальше охолодження приводить до часткової конденсації. Температура T_p називається точкою роси.

Відзначимо, що при температурах далеких від критичної (при цій температурі горизонтальна ділянка ізотерми згортається в крапку), відмінність між обсягами рідини й пари буває набагато більше, ніж показано на рис 7.1. Наприклад, питомий обсяг насиченої водяної пари при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 1600 разів перевищує питомий обсяг рідкої води при тій же температурі.

Таблиця 7.1 – Тиск p і густина ρ насиченої водяної пари при різних $t^{\circ}\text{C}$

$t^{\circ}\text{C}$	p		ρ г/м^3	$t^{\circ}\text{C}$	p		p
	кПа	мм.рт.ст.			кПа	мм.рт.ст.	
20	0.103	0.772	0.88	16	1.817	13.63	13.65
-10	0.259	1.95	2.14	17	1.937	14.53	14.50
-5	0.401	3.01	3.25	18	2.062	15.47	15.39
-4	0.437	3.28	3.53	19	2.196	16.47	16.32
-3	0.463	3.47	3.83	20	2.337	17.53	17.32
-2	0.517	3.88	4.14	21	2.486	18.65	18.35
-1	0.563	4.22	4.49	22	2.642	19.82	19.44
0	0.611	4.58	4.85	23	2.809	21.07	20.60
1	0.656	4.92	5.20	24	2.984	22.38	21.81
2	0.705	5.59	5.57	25	3.168	23.76	23.07
3	0.757	5.68	5.95	26	3.361	25.21	24.40
4	0.813	6.10	6.37	27	3.565	26.74	25.79
5	0.872	6.54	6.80	28	3.780	28.35	27.26
6	0.935	7.01	7.27	29	4.005	30.04	28.7
7	1.005	7.54	7.70	30	4.242	31.82	30.3
8	1.072	8.04	8.28	40	7.376	55.32	51.2
9	1.148	8.61	8.83	50	12.333	92.51	83.2
10	1.227	9.20	9.41	60	19.915	149.38	130.5
11	1.312	9.84	10.02	70	31.158	233.71	198.4
12	1.401	10.51	10.67	80	47.302	355.12	354.1
13	1.497	11.23	11.37	90	70.093	525.76	424.1
14	1.597	11.98	12.08	100	101.325	760.00	598.0
15	1.704	12.78	12.84	200	1555	11664	7099

ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ

У повітрі завжди є водяна пара. Вона утворюється в результаті випаровування води з поверхні океанів, морів, озер, водоймищ, рік і т.ін. Від кількості водяної пари, що знаходиться в повітрі, залежить погода, самопочуття людини, функціонування багатьох його органів, життя рослин, а також збереження технічних об'єктів, архітектурних споруджень, творів мистецтва. Тому дуже важливо стежити за вологістю повітря, уміти вимірювати її.

Водяна пара, що знаходиться в повітрі, звичайно є ненасиче-

ною. Якби водяна пара в повітрі була насиченою, то поверхня Землі і все, що на ній знаходиться, було б покрите крапельками рідини і ніколи б не висихало.

Навпаки, чим далі водяна пара, що знаходиться в повітрі, від насичення, тим повітря сушіше.

Абсолютною вологістю повітря f називається маса водяної пари, що знаходиться в 1 м^3 повітря за даних умов. Значення f оцінюються густиною водяної пари в повітрі. Звичайно її виражають не в CI , а в $\text{г} / \text{м}^3$:

$$f = \rho_{\text{пара}} \quad (\text{г} / \text{м}^3). \quad (7.1)$$

У метеорології абсолютна вологість оцінюється тиском водяної пари, яка виражається в міліметрах ртутного стовпчика: $f = p$ (мм рт. ст.). При кімнатних температурах ($T \approx 300^\circ \text{K}$) p (мм рт. ст.) $\approx \rho$ ($\text{г} / \text{м}^3$) .

Тому, порівнявши тиск водяної пари, що є в повітрі, з тиском насиченої водяної пари при даній температурі, можна судити про вологість повітря. Для цієї мети введена особлива величина, що названа *відносною вологістю повітря*.

Відносною вологістю повітря ϕ називають виражене у відсотках відношення тиску водяної пари p , що знаходиться в повітрі, до тиску насиченої пари $p_{\text{н.п.}}$ при даній температурі:

$$\phi = \frac{p}{p_{\text{н.п.}}} \cdot 100\%. \quad (7.2)$$

Випаровування води з водоймищ, з предметів, що містять вологу, з рослин, з відкритих слизових оболонок організму, відбувається тим швидше, чим менше відносна вологість атмосферного повітря.

Для гарного самопочуття і здоров'я необхідно, щоб відносна вологість була в межах від 40 до 60%. Однак у наших будинках і школах у зимові місяці відносна вологість часто не перевищує 10 або 20 %. Такі умови викликають швидке випаровування і висихання слизових оболонок носа, гортані, легень, що призводить до простудних та інших захворювань.

Тому в зимовий час необхідно зволожувати повітря в житлових

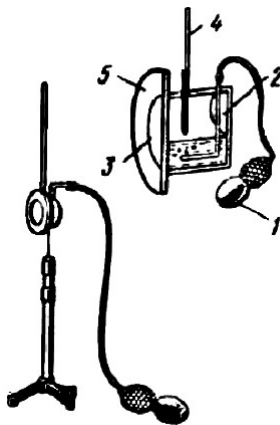
приміщеннях за допомогою спеціальних пристосувань (наприклад, за допомогою пористих зволожувачів, що прикріплюються на опалювальних елементах).

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ

Для того, щоб визначити відносну вологість повітря, необхідно:

- 1) вимірити температуру повітря і по таблиці 7.1 знайти тиск насиченої пари, що відповідає цій температурі;
- 2) визначити точку роси і по тій же таблиці знайти тиск водяної пари, що є в повітрі;
- 3) за формулою (7.2) обчислити відносну вологість.

Для визначення точки роси водяної пари, що є в повітрі, створені спеціальні прилади – *гігрометри*. Найбільш простим з них є гігрометр Ламбрехта (рис 7. 2).



Риснок. 7.2 – Загальний вид гігрометра Ламбрехта

Основною частиною цього приладу є металева посудина у формі циліндра 3, вісь якого займає горизонтальне положення. Одна основа циліндра зроблена зовні блискучою. Усередину циліндра входить трубка 2, що приєднується до якого-небудь повітрорудного пристрою, наприклад до гумової груші 1.

Усередину циліндра наливають ефір. Продуваючи через ефір

повітря, прискорюють його випаровування. При випаровуванні ефір охолоджується і охолоджує циліндр. Коли температура циліндра стає рівною температурі точки роси, його поверхня "запотіває". Для виміру температури усередину циліндра вставляють термометр 4; щоб момент випадання роси був помітніший, на циліндр надягають блискуче кільце 5, ізольоване від нього теплоізоляційною прокладкою.

Пояснимо сказане прикладом. Допустимо, що температура повітря 25 °С, а точка роси, що визначена за допомогою гігрометра, виявилася 10 °С. За таблицею 7.1 знаходимо, що цим температурам відповідають значення тиску насиченої пари 3168 і 1227 Па відповідно.

Тому відносна вологість

$$\phi = \frac{1227}{3168} \cdot 100\% \approx 39\%.$$

Відносну вологість можна знайти не тільки шляхом визначення точки роси, але і за допомогою спеціального приладу – *психрометра*. Психрометр складається з двох термометрів, кулька одного з них обгорнута тканиною, нижній кінець якої опущений в посудину з дистильованою водою (рис. 7.3).

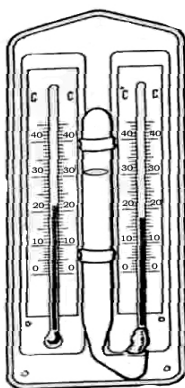


Рисунок 7.3 – Загальний вид психрометра

Сухий термометр реєструє температуру повітря, а вологий –

температуру води, що випаровується. Але при випаровуванні рідини її температура знижується. Чим сухіше повітря (менше його відносна вологість), тим інтенсивніше випаровується вода з вологої тканини і тим нижче її температура. Отже, різниця показань сухого і вологого термометрів (так названа психрометрична різниця) залежить від відносної вологості повітря. Знаючи цю різницю температур, визначають відносну вологість повітря за спеціальними психрометричними таблицями (табл. 7.2). Існують також прилади (гігрометри), за шкалою яких відносна вологість повітря у відсотках відраховується безпосередньо.

Таблиця 7.2 Психрометрична таблиця

Показання сухого термометра	Різниця показань сухого ат змоченого термометрів										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Відносна вологість, %										
0	100	81	63	45	28	11	-	-	-	-	-
2	100	84	68	51	35	20	-	-	-	-	-
4	100	85	70	56	42	28	14	-	-	-	-
6	100	86	73	60	47	35	23	10	-	-	-
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	-	-
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	-
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Розглянемо приклад на вологість: у приміщенні об'ємом 150 м³ вологість повітря при температурі 20 °С дорівнює 30%. Визначити масу водяної пари в приміщенні.

Аналіз умови. У приміщенні знаходиться ненасичена водяна пара. Масу пари можна знайти з рівняння Менделєєва - Клапейро-

на:

$$m = \frac{pV\mu}{TR}.$$

З формули відносної вологості

$$\phi = \frac{p}{p_{\text{н.п.}}}$$

виражаємо тиск пари, що є в повітрі.

Тиск насиченої пари при 20 °С знайдемо за таблицею 7.1 ($p_{\text{н.п.}} = 2337 \text{ Па}$).

Розв'язання. Оскільки $p = \phi p_{\text{н.п.}}$, то

$$m = \frac{\phi p_{\text{н.п.}} V \mu}{RT}.$$

Підставляючи значення величин

$$V = 150 \text{ м}^3; \quad T = 293 \text{ }^\circ\text{К}; \quad \phi = 30\% (\phi = 0,3);$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}; \quad R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}; \quad p_{\text{н.п.}} = 2337 \text{ Па},$$

одержуємо

$$m = \frac{0,3 \cdot 2337 \cdot 150 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 293} = 0,777 \text{ кг}.$$

Опис устаткування

1. Принцип роботи психрометра заснований на різниці показань сухого і змоченого термометрів у залежності від вологості навколишнього повітря.

2. Психрометр складається з двох однакових ртутних термометрів 4 (рис. 7.4) закріплених у термоутримувачі, який складається з трубок захисту 1, аспіраційної чашки 2, повітропровідної трубки 3 і термозахисту 5.

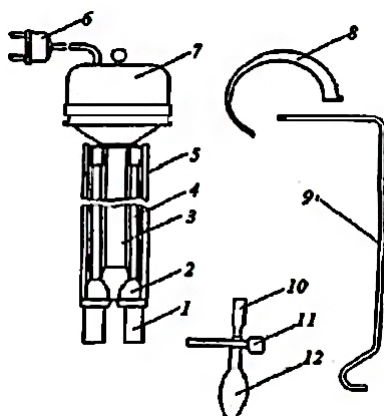


Рисунок 7.4 – Психрометр аспіраційний з електродвигуном М-34
 1-трубка захисту; 2-чашка аспіраційна; 3-трубка воздухопровідна;
 4-термометр ртутний; 5-термозахист; 6-вилка штепсельна;
 7-аспіраційна голівка; 8-вітрозахист; 9-крючок; 10-піпетка;
 11-затиск для гумових трубок; 12-балон

Резервуари термометрів розміщені в трубці захисту з повітряним зазором між ними. Призначення трубок захисту – захищати резервуари термометрів від нагрівання сонцем, для чого зовнішня поверхня трубок ретельно полірується і нікелюється. Самі трубки ізолювані одна від одної теплоізоляційними шайбами.

Трубки захисту з'єднані аспіраційною чашкою з повітропровідною трубкою, на верхньому кінці якої укріплена аспіраційна голівка 7. Аспіраційна голівка має електромотор і вентилятор. Для підключення до мережі психрометр оснащений шнуром з вилкою 6. Термометри захищені з боків від механічних ушкоджень термозахистами. До психрометра додається вітровий захист 8. Для підвищення психрометра є крючок 9, на одному кінці якого є крючок із прорізом. Крючок прибивають цвяхами до спеціального стовпа і на нього навішують психрометр. Перед роботою резервуар правого термометра обгортають батистом в один шар і змочують чистою дистильованою водою за допомогою гумового балона 12 з піпеткою 10.

ПОРЯДОК РОБОТИ І СПОСТЕРЕЖЕНЬ

1. Психрометр працює таким чином. При обертанні вентилятора в психрометр усмоктується повітря, яке, обтікаючи резервуари термометрів, проходить по повітропровідній трубці до вентилятора і викидається ним назовні через прорізи в аспіраційній голівці.

Завдяки протіканню потоку повітря навколо резервуарів термометрів, сухий термометр буде показувати температуру цього потоку, а показання змоченого термометра будуть менше через охолодження унаслідок випаровування води з поверхні батисту, що обгортає резервуар.

Вологість повітря визначається за показаннями сухого і змоченого термометрів по спеціальним психрометричним таблицям або психрометричному графікові (рис.7.5), а температура повітря – за показаннями сухого термометра.

Під час відліку необхідно суворо стежити за тим, щоб вітер дув у напрямку від психрометра на спостерігача.

2. Порядок спостереження за психрометром наступний:

а) змочують батист на резервуарі термометра. Для цього беруть гумовий балон з піпеткою, заздалегідь наповнений дистильованою водою, і з легким натиском доводять воду в піпетці до риски. Якщо риска відсутня, то доводять воду не ближче ніж на 1 см до краю піпетки й утримують її на цьому рівні за допомогою затиску 11. Після цього піпетку вводять до кінця у внутрішню трубу захисту і змочують батист на резервуарі термометра. Виждавши якийсь час, не виймаючи піпетки з трубки, розтискають затиск, прибираючи зайву воду в балон, після чого піпетку виймають;

б) вмикають електромотор;

в) через 4 хвилини після увімкнення електромотора знімають показання термометрів.

Обчислення вологості повітря (абсолютної і відносної) за показаннями психрометра проводиться по психрометричним таблицям. Крім того, визначення відносної вологості за показаннями психрометра можна робити по психрометричному графіку (рис. 7.5).

Визначення відносної вологості по психрометричному графіку виконується в наступному порядку:

– по вертикальним лініям відмічають показання сухого термометра, а по похилим – показання змоченого термометра;

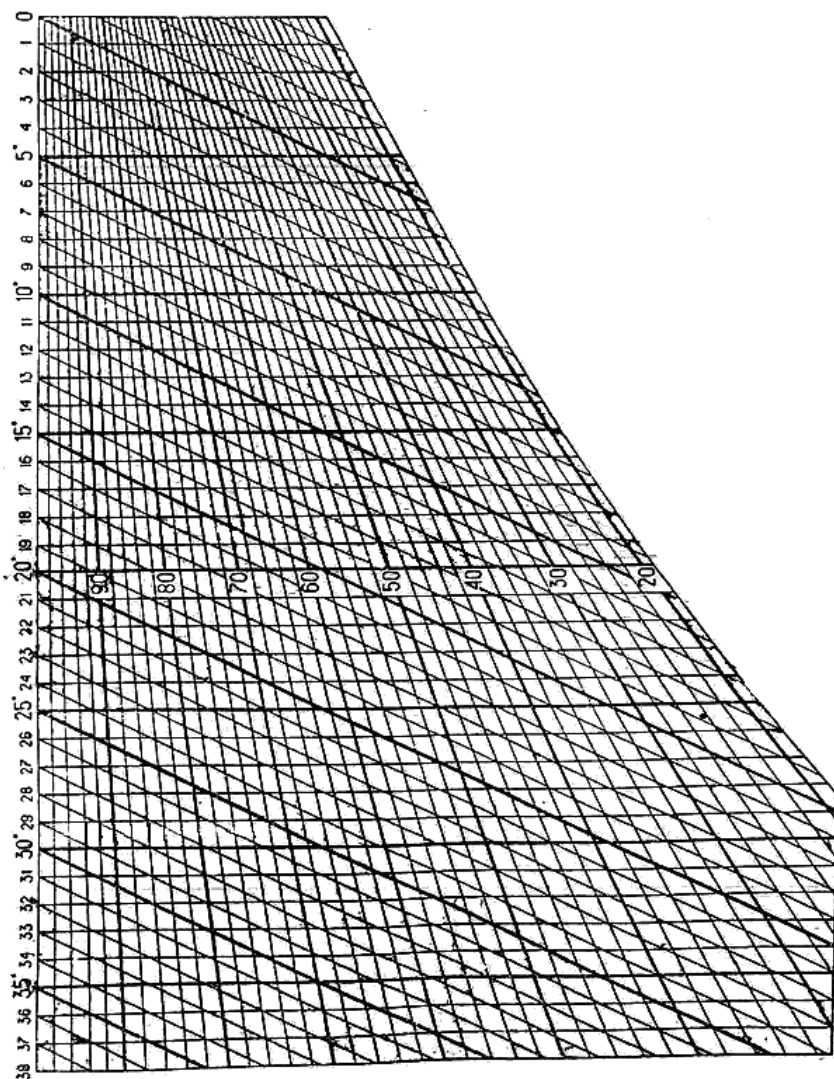


Рисунок 7.5 – Психрометричний графік

– на перетинанні цих ліній одержують значення відносної вологості, вираженої у відсотках. Лінії відповідні десяткам відсотків, позначені на графіку цифрами: 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 і 90.

Приклад. Температура сухого термометра $21,7^{\circ}\text{C}$, температура змоченого термометра $14,3^{\circ}\text{C}$. На графіку знаходимо точку перетину вертикальної і похилої ліній, що відповідають даним температурам; вона знаходиться вище 42, та нижче 44. Отже, відносна вологість буде приблизно 43%.

Користуватися психрометричним графіком зручно в тому випадку, якщо необхідно визначити тільки відносну вологість. Оскільки при визначенні абсолютної вологості приходиться користуватися психрометричними таблицями, то і всі обчислення простіше вести тільки за таблицями.

Результати спостережень заносимо в таблицю 7.3.

Таблиця 7.3

$t_{\text{сухого}}$	$t_{\text{вологого}}$	$\phi \%$	Помилка $\Delta \phi \%$

Помилку $\Delta \phi \%$ визначаємо за таблицею 7. 4.

Таблиця 7.4

Температура повітря $^{\circ}\text{C}$	Відносна вологість, %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Помилка, %									
-10	± 9	± 9	± 9	± 8	± 7	± 6	± 6	± 5	± 5	± 5
0	± 7	± 6	± 6	± 5	± 5	± 4	± 4	± 3	± 3	± 3
10	± 5	± 5	± 4	± 3	± 3	± 3	± 3	± 2	± 2	± 2
20	± 4	± 4	± 3	± 3	± 3	± 3	± 2	± 2	± 2	± 2
30	± 3	± 3	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2	± 1
40	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2	± 1	± 1	± 1	± 1

Завдання

1. Визначити вологість атмосфери, використовуючи результати спостережень (табл. 7.3) і психрометричну таблицю 7.2. Порівняти результати.

2. Визначити абсолютну вологість повітря:

а) густину пари в приміщенні;

- б) тиск водяної пари (газу).
3. Визначити масу водяної пари в приміщенні.
 4. Визначити точку роси.

Контрольні запитання і завдання

1. Яку пару називають насиченою?
2. Чи залежить тиск насиченої пари від об'єму, від температури від речовини?
3. Чи підлягає насичена пара газовим законам?
4. Що називається точкою роси?
5. Що називається абсолютною вологістю?
6. Що називається відносною вологістю ?
7. Як можна визначити відносну вологість?
8. Як улаштований психрометр і як ним користуватися?
9. Чому показання вологого термометра нижче сухого?
10. У кімнаті об'ємом 120 м^3 при температурі 15°C відносна вологість 60% . Визначте масу водяної пари в повітрі кімнати. Тиск насиченої водяної пари при 15°C дорівнює 1705 Па .

Лабораторна робота 8

Тема. Визначення сталої Больцмана.

Мета. Експериментально визначити сталу Больцмана.

Прилади і матеріали. Термостатований скляний балон місткістю $15\text{-}20 \text{ л}$, медичний шприц на $1\text{-}2 \text{ см}^3$, лабораторний термометр, U - подібний водяний манометр, ефір.

Практичне значення. У багатьох законах фізики фігурує стала Больцмана, тому потрібно вміти знаходити експериментально цю сталу різними способами.

Короткі теоретичні відомості

Виходячи з молекулярно-кінетичного тлумачення поняття температури, її слід вимірювати в одиницях енергії. Проте це дуже незручно на практиці (необхідність оперувати дуже малими числами: температурі в 1 К відповідає енергія $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}$, сама процедура вимірювання при цьому значно утруднюється). Множник k , який виражає співвідношення між одиницями енергії (джоу-

улем) та температури (кельвіном) , називають *сталою Больцмана*. Її числове значення встановлюється експериментально різними методами. Стала Больцмана фігурує в усіх законах, які містять класичні або квантові функції розподілу частинок за енергіями. Найточніше значення сталої Больцмана дістаємо з рівності $k = \frac{R}{N}$, де R – універсальна газова стала ; N – число Авогадро.

У роботі визначення сталої Больцмана ґрунтується на використанні рівняння стану ідеального газу Менделєєва – Клайперона.

Прилад для визначення сталої Больцмана k (рис. 8.1) складовими частинами має скляний товстостінний балон 1, що з'єднується через вивідну гумову трубку 3 з рідинним манометром 4. У пробці балона закріплено медичну голку 2 для введення через неї шприцом рідини, що легко випаровується (ефір).

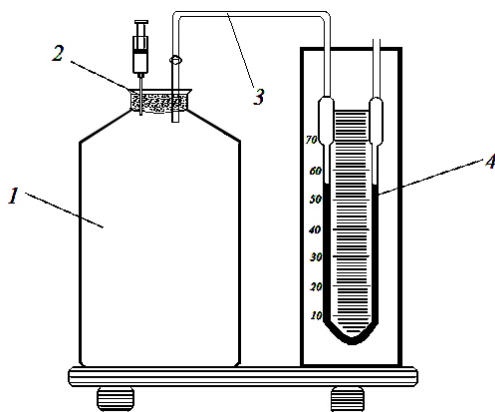


Рисунок 8.1 – Прилад для визначення сталої Больцмана

Після введення ефіру в балоні створиться надлишок тиску на величину парціального тиску Δp газоподібного ефіру. Величину Δp визначають манометром.

В основу дослідного визначення сталої Больцмана покладено рівняння стану ідеального газу $\Delta p = \frac{\Delta m}{\mu V} RT$, з якого дістаємо

$$\Delta p = \frac{\Delta m}{\mu} \frac{RT}{V} = \frac{\Delta m}{\mu} \frac{kNT}{V} = kN_0 T, \quad (8.1)$$

де число $\frac{\Delta m}{\mu}$ – число молів уведеного в балон ефіру ;

V – заданий робочий об'єм балона ;

T – температура газової суміші в балоні;

$N_0 = \frac{\Delta m N}{\mu V}$ – кількість молекул ефіру в одиниці об'єму балона

на (для ефіру $\mu = 76$ кг / кмоль).

Парціальний тиск парів ефіру в балоні зрівноважується різницею рівнів стовпчиків рідини Δh у манометрі:

$$\Delta p = \rho g \Delta h, \quad (8.2)$$

де ρ – густина манометричної рідини (задається наперед при відповідних температурах дослідів).

З іншого боку

$$\Delta m = \rho_e V_e, \quad (8.3)$$

де ρ_e – густина ефіру ($\rho_e = 714$ кг / м³);

V_e – об'єм уведеного ефіру.

Отже, для N_0 маємо

$$N_0 = \frac{\rho_e V_e}{\mu} \frac{N}{V}. \quad (8.4)$$

Підставивши (8.2) і (8.4) в (8.1), дістаємо

$$k = \frac{\Delta p}{N_0 T} = \frac{\rho g \mu V}{\rho_e V_e N T} \Delta h = B \frac{\Delta h}{V_e T}, \quad (8.5)$$

де $B = \frac{\rho g \mu V}{\rho_e N}$ – сталий в умовах дослідів коефіцієнт.

Порядок виконання роботи

1. Забезпечити надійне термостатування балона прозорим теплозахисним екраном.
2. Наповнити медичний шприц з голкою одним – двома кубічними сантиметрами ефіру. Зняти зі шприца голку і вставити його в голку 2 балона; при цьому рівні манометричної рідини в колінах манометра повинні бути однаковими .
3. Натискаючи на поршень шприца, увести в балон ефір об'ємом V_e ; для збереження герметизації залишити шприц у голці 2.
4. Після випаровування ефіру зафіксувати стабільну різницю рівнів рідини в колінах манометра Δh при відповідній температурі.
5. Дослід повторити 3-5 разів, кожного разу дозуючи різні об'єми ефіру, який вводиться в балон.
6. Знайти середнє значення величини k , порівняти з табличним.
7. Зробити висновки відносно методики та результатів вимірювань.

Контрольні запитання і завдання

1. Який газ називається ідеальним?
2. Рівняння стану ідеального газу.
3. Який фізичний зміст універсальної газової сталої ?
4. Опишіть відомі Вам методи визначення сталої Больцмана.
5. Наведіть закони, в яких фігурує стала Больцмана .
6. Які джерела похибок у цій роботі?

Список рекомендованої літератури

1. Загальна фізика : Лабораторний практикум: навч. посібник. / В.М. Барановський, П.В. Бережний, І.Т. Горбачук та ін. – К.: Вища школа, 1992. – 509 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики , Т.1. Механика. Молекулярная физика : учебн. пособ.[2-е изд.] / И.В. Савельев. – М.: Наука . Главная редакция физико- математической литературы, 1982. – 432с.
3. Трофимова Т. И. Курс физики: учебник для студентов вузов / Т. И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 1985. – 432с.
4. Детлаф А. А. Справочник по физике / А. А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980.
5. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. / В.С. Волькенштейн. – М.: Наука. Главная редакция физико - математической литературы, 1979. – 351с.
6. Физический энциклопедический словарь / [гл. ред. А.М. Прохоров; ред. кол. Д. М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др.]. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.
7. Руководство к лабораторным занятиям по физике. / Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. – М.: Наука, 1973. – 687 с.

Додаток А

Обробка експериментальних даних за допомогою ЕОМ

1. Увімкнути ЕОМ та принтер. Уставити папір.
2. Увійти в каталог TERMODINAMIKA.
3. Запустити потрібний файл:

Номер лабораторної роботи	Назва exe - файла
1т	1т. exe
2т	ml582 2.exe
3т	ml583 _2.exe
4т	
5т	
6т	
7т	
8т	

4. Ввести: прізвище, ім'я та по батькові, назву групи, дату виконання розрахунків.
5. Результати комп'ютерної обробки лабораторної роботи показати викладачу, а потім підклеїти їх в зошит.

Додаток Б
Коефіцієнт Стьюдента $t_{\alpha,n}$

Таблиця Б.1

n	α	
	0,9	0,95
2	6,31	12,7
3	2,92	4,3
4	2,35	3,18
5	2,13	2,78
6	2,02	2,57
7	1,94	2,45
8	1,90	2,37
9	1,86	2,31
10	1,83	2,26
11	1,81	2,23
12	1,80	2,20
13	1,78	2,18
14	1,77	2,16
15	1,76	2,15
16	1,75	2,13
17	1,75	2,12
18	1,74	2,11
19	1,73	2,10
20	1,73	2,09
21	1,73	2,09
22	1,72	2,08
23	1,72	2,07
24	1,71	2,07
25	1,71	2,06
26	1,71	2,06
27	1,71	2,06
28	1,70	2,05
29	1,70	2,05
30	1,70	2,05
31	1,70	2,04

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Галіахметов Алмаз Мансурович
Єфремова Марія Полікарпівна
Уколов Олексій Іванович

МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З РОЗДІЛУ КУРСУ ФІЗИКИ
„МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА”
(ДЛЯ СТУДЕНТІВ АВТОТРАНСПОРТНИХ І АВТОДОРОЖНИХ
СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ)

Комп’ютерні креслення рисунків виконав
студент АТР – 09 б Опортов О.А.

Підписано до друку 04.01.11 р. Формат 70х90/16. Гарнітура Times New Roman.
Друк - ризографія. Тираж 350 прим. Умов. друк. арк. 4.06. Зам. № 2.

Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
Автомобільно-дорожній інститут
84646, м. Горлівка, вул. Кірова, 51

Редакційно-видавничий відділ

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовників і
розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 2982 від 21.09.2007р.