

### Рекомендована література

1. *Дущенко В.П., Кучерук І.М.* Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. К., Вища школа, 1987.
2. *Кушнір Р.М.* Курс фізики: Ч.2: Молекулярна фізика., Львів, 2000.
3. *Грибовський Р.І.* Курс фізики. К.: Вища школа, 1980.
4. *Трофимова Т.И.* Курс физики. М.: Высшая школа, 1990.

### ЗРАЗОК

оформлення звіту за виконану роботу

#### 1. Титульна сторінка:

Львівський національний університет імені Івана Франка  
Кафедра загальної фізики

### ЗВІТ

про виконання лабораторної роботи № ...  
.....(назва роботи).....

студента.....

Факультет.....

Група.....

Викладач.....

#### 2. На наступних сторінках потрібно висвітлити:

завдання,  
перелік обладнання,  
рисунок установки,  
робочу формулу з розшифруванням величин, які є в ній,  
робочі таблиці,  
формули для обчислення похибок,  
кінцевий результат,  
висновки.

### Лабораторна робота № 201. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

**Завдання:** визначити коефіцієнт в'язкості гліцерину шляхом дослідження руху в ньому змочуваних кульок.

**Приладдя:** скляний циліндр з досліджуваною рідиною (рис.1), кульки з різних матеріалів, мікрометр, масштабна лінійка з міліметровими поділками, секундомір, термометр, пінцет.

**Теоретичний матеріал,** який необхідно засвоїти під час підготовки до роботи: явища перенесення в рідинах, внутрішнє тертя, ідеальна і реальна рідина, формула Стокса, коефіцієнти динамічної і кінематичної в'язкості.

- ЛІТЕРАТУРА. 1. § 7.6, с.114-116; § 7.9, с.121-123; § 19.12, с.371-372.  
2. § 14.2.3, с. 36-38.  
3. § 60, с. 186-190.  
4. § 28, 31-33, с. 51-52, 55-59.

**Опис установки.** Установка виконана у вигляді широкої скляної труби з досліджуваною рідиною, у верхній і нижній частині якої розміщені мітки 2, відстань між якими можна змінювати (рис.1).

**Ідея роботи та виведення робочої формули.** На металеву кульку, яка падає в рідині, діють три сили: сила тяжіння

$$F_1 = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g, \text{ сила Архімеда}$$

$$F_2 = \rho_0 V g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0, \text{ і сила}$$

опору  $F_3$ , яка згідно з формулою Стокса дорівнює  $6\pi\eta r v$ , де  $\rho$  - густина матеріалу

кульки;  $\rho_0$  - густина рідини;  $\eta$  - коефіцієнт в'язкості рідини;  $r$  - радіус кульки;  $v$  - швидкість падіння кульки;  $g$  - прискорення вільного падіння.

На початковій стадії кулька в рідині рухається з прискоренням, тому сила опору  $F_3$  буде збільшуватись доти, доки всі сили, які діють на кульку, не зрівноважаться, а її рух не стане рівномірним. Під час такого рівномірного руху кульки  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0$ , або

$$F_1 = F_2 + F_3. \quad (1)$$

Підставивши в цю формулу вирази для відповідних сил і розв'язавши отримане рівняння, матимемо

$$\eta = \frac{2gr^2(\rho - \rho_0)}{9v}. \quad (2)$$

Швидкість кульки можна визначити як  $v = l/t$ , де  $l$  - шлях, пройдений кулькою;  $t$  - час руху.

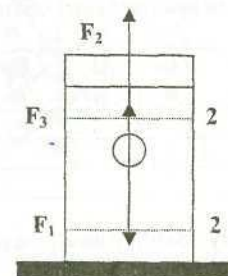


Рис. 1.

Оскільки рідина в циліндрі з радіусом  $R$  має скінченні розміри, то в рівняння (2) необхідно внести поправку. Тоді кінцева формула для розрахунку коефіцієнта в'язкості матиме вигляд

$$\eta = \frac{2gr^2(\rho - \rho_0)t}{9l(1 + 2,4 \frac{r}{R})} \quad (3)$$

Формула (3) є робочою формулою цієї лабораторної роботи.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Записати вихідні дані:  $\rho_0 = (1,250 \pm 0,005) 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  
 $\rho$  свинцю  $= (11,40 \pm 0,01) 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho$  сталі  $= (7,80 \pm 0,01) 10^3 \text{ кг/м}^3$ .
2. Тричі виміряти внутрішній діаметр циліндра і діаметр кульки. Обчислити середні значення  $R$  і  $r$ .
3. Мітками 2 позначити і тричі виміряти задану викладачем відстань  $l$  між ними. (Для забезпечення рівномірного руху кульки верхня мітка повинна бути на 3-5 см нижче від рівня рідини). Обчислити середнє значення  $l$ .
4. Опустити кульку в рідину вздовж осі циліндра і виміряти секундоміром час її руху між мітками. Виконати аналогічні експерименти з п'ятьма кульками.
5. Результати вимірювань і обчислень записати в таблицю.

Номер за пор.	$l$ , м	$\Delta l$ , м	$R$ , м	$\Delta R$ , м	$r$ , м	$\Delta r$ , м	$t$ , с	$\Delta t$ , с
1.								
...								
с/з								

Абсолютну похибку вимірювання обчислити за формулою

$$\Delta \eta = \eta \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \frac{(\Delta \rho)^2 + (\Delta \rho_0)^2}{(\rho - \rho_0)^2} + \left(\frac{2\Delta r}{r}\right)^2}$$

Значення  $\Delta r$  і  $\Delta \rho_0$  взяти з п.1,  $\Delta t$  розрахувати як похибку приладу.

6. Кінцевий результат записати у вигляді

$$\eta = (\eta \pm \Delta \eta), \quad E_\eta = \dots\%$$

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чому внутрішнє тертя належить до явищ перенесення?
2. Від чого залежить сила внутрішнього тертя в рідинах і газах?
3. У чому полягає фізичний зміст коефіцієнта в'язкості рідин?
4. Запишіть і поясніть формулу Стокса. За яких умов її можна застосовувати?
5. Які сили діють на кульку під час її руху в рідині?
6. Від чого залежить коефіцієнт в'язкості рідини?
7. Запишіть і поясніть формулу Пуазейля.

Лабораторна робота №205. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА  
ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ  
МЕТОДОМ ВІДРИВАННЯ КІЛЬЦЯ

**Завдання:** визначити коефіцієнт поверхневого натягу води та водних розчинів при кімнатній температурі методом відривання кільця.

**Приладдя:** установка для вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини, набір досліджуваних рідин, термометр, фільтрувальний папір.

**Теоретичний матеріал,** який необхідно засвоїти під час підготовки до роботи: структура й особливості теплового руху атомів і молекул рідин; основні положення молекулярно-кінетичної теорії; поверхнева енергія; коефіцієнт поверхневого натягу і його фізичний зміст; змочування; крайові кути; тиск під викривленою поверхнею рідини, формула Лапласа.

ЛІТЕРАТУРА: 1. § 19.3-19.5, с.373-380.

2. § 21.4 -21.7, с.122 -130;

3. § 61-63, с.191-262;

4. § 66-69, с.111-116.

**Опис установки.** На рис. 6 зображена установка для визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин методом відривання кільця. Алюмінієве кільце 1 підвішене до мілідинамометра 2. За допомогою гвинта 3 кільце можна опускати і піднімати по вертикалі. Відлік сили виконують за шкалою 4, проградуєваною в міліньютонках. На поворотному столику 5 закріплені посудини 6 із досліджуваними рідинами.

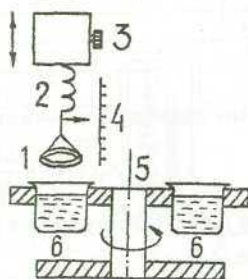


Рис. 6.

**Ідея роботи та виведення робочої формули.** Коефіцієнт поверхневого натягу рідини можна визначити за формулою

$$\alpha = F/l, \quad (1)$$

де  $F$  – сила поверхневого натягу, яка діє на тіло, що контактує з рідиною;  $l$  – довжина межі контакту. Отже, визначивши  $F$  і  $l$ , можна легко обчислити  $\alpha$ .

У цій роботі з рідиною контактує кільце із зовнішнім діаметром  $D$  і товщиною стінки  $d$ . Якщо позначити  $x$  – внутрішній діаметр кільця, то довжину межі контакту можна визначити як  $l = 2\pi(D+x)$ , але  $x = D - 2d$ , тоді

$$l = 2\pi(D-d). \quad (2)$$

Силу поверхневого натягу  $F$  визначають за показами мілідинамометра 2. Тоді з (1) матимемо

$$\alpha = \frac{F}{2\pi(D-d)} \quad (3)$$

Це робоча формула цієї лабораторної роботи.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Записати вихідні дані експерименту: зовнішній діаметр  $D$  і товщину кільця  $d$  (зазначені в паспорті установки), кімнатну температуру.
2. Поворотним столиком 5 підвести посудину з дистильованою водою під кільце.
3. За допомогою гвинта 3 опустити кільце до його дотику з поверхнею рідини. Обережно піднімаючи кільце вгору, зафіксувати за шкалою 4 покази динамометра в момент відривання кільця. Дослід повторити п'ять разів.
4. Обертаючи столик 5, встановити під кільце посудину з іншою рідиною. Повторити експеримент згідно з п.3.
5. Результати вимірювань і обчислень записати в таблицю:

Номер за пор.	F, н	$\Delta F$ , н	$(\Delta F)^2$ , н <sup>2</sup>	$\alpha$ , н/м	$\Delta\alpha$ , н/м
1.					
...					
5.					
с/з					

6. Абсолютну похибку  $\Delta\alpha$  обчислити за формулою

$$\Delta\alpha = \bar{\alpha} \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + \frac{(\Delta D)^2 + (\Delta d)^2}{(D-d)^2}}$$

7. Записати кінцевий результат у вигляді

$$\alpha = (\bar{\alpha} \pm \Delta \bar{\alpha}), \quad E_{\alpha} = \dots \%$$

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Поясніть, чим зумовлена мала стисливість рідини.
2. Що таке поверхнева енергія? Чому вона виникає?
3. Вкажіть напрям вектора сили поверхневого натягу.
4. Запишіть формулу додаткового тиску під викривленою поверхнею рідини. Чому він може мати знаки  $\pm$ ?
5. Поясніть причини змочування поверхні твердого тіла рідиною.
6. Що таке крайовий кут? У яких межах він може змінюватись?
7. Які речовини називають поверхнево-активними? Як вони впливають на коефіцієнт поверхневого натягу рідини?
8. Як змінюється коефіцієнт поверхневого натягу рідин зі зміною температури?

8. Похибки  $\Delta k$  і  $\Delta \alpha$  обчислити за формулами

$$\Delta k = k_1 \sqrt{\left(\frac{\Delta \alpha_0}{\alpha_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_0}{h_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g_0}{g_0}\right)^2};$$

$$\Delta \alpha_1 = \alpha_1 \sqrt{\left(\frac{\Delta \alpha_0}{\alpha_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_0}{h_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_1}{h_1}\right)^2}.$$

9. Кінцевий результат записати у вигляді  $n$  отриманих при різних температурах значень  $\alpha$ :

$$\alpha_n = (\bar{\alpha}_n \pm \Delta \bar{\alpha}), \quad E_{\alpha} = \dots \%$$

10. На міліметровому папері побудувати графік залежності  $\alpha = f(t^{\circ}\text{C})$ .

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Опишіть тепловий рух молекул рідини.
2. Які риси є спільними у тепловому русі молекул газів, рідин і твердих тіл?
3. Запишіть дві формули, на підставі яких дають два різні означення фізичного змісту коефіцієнта поверхневого натягу.
4. Які фактори можуть змінювати коефіцієнт поверхневого натягу рідини?
5. Чим зумовлена температурна залежність коефіцієнта поверхневого натягу рідин?
6. Запишіть і поясніть формулу Лапласа.
7. Якого значення набуває коефіцієнт поверхневого натягу рідини, коли її температура дорівнює критичній?

### Лабораторна робота N208. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОГО РОЗШИРЕННЯ МЕТАЛІВ

**Завдання:** виміряти значення температурного коефіцієнта лінійного розширення металевго стрижня в інтервалі температур  $20-120^{\circ}\text{C}$  і побудувати графік залежності відносного видовження стрижня від температури.

**Приладдя:** установка для вивчення теплового розширення металевих стрижнів (рис. 8), індикатор для вимірювання абсолютного видовження, термомпара, стрижні з різних металів.

**Теоретичний матеріал,** який необхідно засвоїти під час підготовки до роботи: залежність потенціальної енергії взаємодії молекул та сили взаємодії молекул від відстані між ними; пояснення з погляду молекулярно-кінетичної теорії явища лінійного розширення металів; поняття про абсолютне та відносне видовження; фізичний зміст коефіцієнтів лінійного та об'ємного розширення.

- ЛІТЕРАТУРА. 1. § 18.5, с.358-360;  
2. § 20.1, с. 108-110; § 20.4, с.11-113;  
3. § 53, с. 168-173; § 55, с. 177-178;  
4. §60,с. 103-105.

**Опис установки.** Установка для дослідження теплового розширення металів зображена на рис. 8. Уздовж осі циліндра 1, у якому є нагрівальний елемент, знаходиться металевий стрижень 7 з досліджуваного матеріалу. Лівий кінець стрижня закріплений, а правий дотикається до штока індикатора зміни довжини 6 (ціна поділки індикатора становить 0,01 мм). Температуру стрижня підвищують нагрівальним елементом, який через вимикач 2 увімкнений до джерела живлення 220В, а вимірюють терморезистивним датчиком 3 і потенціометром 5, шкала якого проградуєвана в градусах Цельсія.

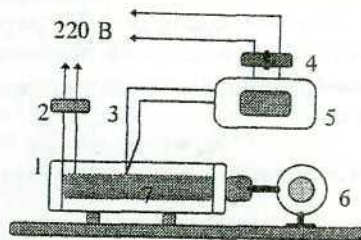


Рис. 8.

**Ідея роботи та виведення робочої формули.** Тверді кристалічні тіла, як звичайно, під час нагрівання розширюються, а під час охолодження стискаються. Явище теплового розширення зумовлене тим, що зі зміною температури змінюється потенціальна енергія взаємодії молекул між собою та амплітуда їхніх ангармонічних коливань. Кількісно теплове розширення твердих тіл описує коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha$ . Він означає, на яку частину початкової довжини (виміряної при  $0^\circ\text{C}$ ) збільшується довжина тіла внаслідок його нагрівання на  $1^\circ\text{C}$ .

Розглянемо, наприклад, стрижень, довжина якого суттєво більша від поперечних розмірів. Якщо довжину стрижня при  $0^\circ\text{C}$  позначити як  $l_0$ , а при  $t^\circ\text{C}$  – як  $l$ , то коефіцієнт лінійного розширення

$$\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 \Delta t} = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t} = \frac{\varepsilon}{\Delta t}, \quad (1)$$

де  $\Delta l = l - l_0$  – абсолютне видовження стрижня під час його нагрівання від  $0^\circ\text{C}$  до  $t^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t = t - t_0$  – зміна температури;  $\varepsilon = \Delta l / l_0$  – відносне видовження стрижня.

Оскільки у формулі (1) фігурує довжина стрижня при  $0^\circ\text{C}$ , а вимірювання проводять при температурах, починаючи від кімнатної і вище, то для виведення робочої формули потрібно врахувати, що початкова довжина стрижня відрізняється від  $l_0$  і становить

$$l_1 = l_0 (1 + \alpha t_1), \quad (2)$$

де  $l_1$  – довжина стрижня при кімнатній температурі  $t_1^\circ\text{C}$ .

У результаті нагрівання стрижня до  $t^\circ\text{C}$  ( $t^\circ\text{C} > t_1^\circ\text{C}$ ) його довжина дорівнюватиме

$$l = l_0 (1 + \alpha t). \quad (3)$$

Поділивши (3) на (2) і врахувавши, що  $l = l_1 + \Delta l$ , отримаємо

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_1 (t - t_1) - \Delta l \cdot t_1}, \quad \text{а} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_1}. \quad (4)$$

Це і є робочі формули лабораторної роботи.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Записати вихідні дані: початкову довжину стрижня  $l_0$  (зазначена в паспорті установки) і значення кімнатної температури  $t_1^\circ\text{C}$ .
2. Шток індикатора зміни довжини 6 сконтактувати з правим кінцем стрижня. Повертанням шкали індикатора встановити його стрілку на позначці "0".
3. Вимикачем 4 увімкнути живлення потенціометра 5; а вимикачем 2 – нагрівник. За умови підвищення температури стрижня до  $30^\circ\text{C}$  записати покази індикатора  $\Delta l$ .
4. Записати покази індикатора за кожного наступного підвищення температури на  $10^\circ\text{C}$  (при  $40, 50 \dots 120^\circ\text{C}$ ). Досягнувши температури  $120^\circ\text{C}$ , вимкнути нагрівник вимикачем 2.
5. Результати вимірювань записати в таблицю:

Номер за пор.	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta l, \text{мм}$	$\alpha \cdot 10^5, (^\circ\text{C})^{-1}$	$\Delta \alpha \cdot 10^5, (^\circ\text{C})^{-1}$
1.				
....				

6. Похибку вимірювань обчислити за формулою

$$\Delta \alpha = \alpha \sqrt{\frac{[l_1 (t - t_1) \Delta(\Delta l)]^2 + l_1^2 \Delta l^2 [( \Delta t )^2 + ( \Delta t_1 )^2]}{\Delta l^2 [l_1 (t - t_1) - \Delta l \cdot t_1]^2}}.$$

Похибки  $\Delta(\Delta l)$ ,  $\Delta t$  і  $\Delta t_1$  обчислити як похибки вимірювальних приладів.

7. Записати кінцевий результат для температурного коефіцієнта лінійного розширення у вигляді
 
$$\alpha = (\alpha \pm \Delta \bar{\alpha}), \quad E_\alpha = \dots \%$$
8. На міліметровому папері побудувати графік залежності  $\varepsilon = f(t^\circ\text{C})$ .

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає подібність і відмінність характеру теплового руху молекул газів, рідин і твердих кристалічних тіл?
2. Сформулюйте основні положення молекулярно-кінетичної теорії.
3. Зобразіть графічно залежність сили і потенціальної енергії взаємодії двох молекул від відстані між ними.
4. У чому полягає фізичний зміст температурного коефіцієнта лінійного розширення?
5. Що називають коефіцієнтом об'ємного розширення?
6. Зобразіть графічно залежність видовження твердого тіла від температури.
7. Чи змінюється густина тіла з температурою?
8. Тіла внаслідок нагрівання, як звичайно, розширюються. Чи є винятки з цього правила?
9. Наведіть приклади застосування явища теплового розширення твердих тіл.

**Лабораторна робота № 212. ВИЗНАЧЕННЯ СПІВВІДНОШЕННЯ  
ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ  $C_p / C_v$   
МЕТОДОМ КЛЕМАНА - ДЕЗОРМА**

**Завдання:** експериментально визначити співвідношення теплоємностей повітря при сталому тиску і сталому об'ємі  $C_p / C_v$ .

**Приладдя:** установка для визначення співвідношення теплоємностей повітря.

**Теоретичний матеріал,** який необхідно засвоїти під час підготовки до виконання роботи: ізопроеци в ідеальному газі; адиабатичний процес; рівняння Пуассона; внутрішня енергія ідеального газу; теплоємність, питома та молярна теплоємності; теплоємність при сталому тиску і сталому об'ємі; рівняння Майєра; ступені вільності молекул; визначення  $C_p / C_v$  через ступені вільності молекул.

ЛІТЕРАТУРА: 1. § 16.2-16.5, с. 285-304;

2. § 18.6-18.8, с. 68-74;

3. § 45-46, с. 104-146; § 71-72, с. 223-232;

4. § 41, с. 73-75; § 50-51, с.88-90; § 53,55, с. 94-96.

**Опис установки.** Експериментальна установка (рис. 13) складається зі скляної посудини 1, герметично закритої корком 5. Через корок проходить скляна трубка з двоходовим краном 4. Кран 4 може з'єднувати посудину 1 з атмосферою або ж із насосом 2, якщо кран 3 відкритий. У першому випадку тиск повітря в балоні дорівнює атмосферному, різниця рівнів рідини у манометрі 6 дорівнює нулю. Якщо кран 4 повернути в інше положення і насосом 2 накачати повітря в балон, то тиск у ньому збільшиться на  $\Delta p = \rho gh$ , де  $\rho$  – густина, а  $h$  – різниця рівнів рідини в манометрі 6.

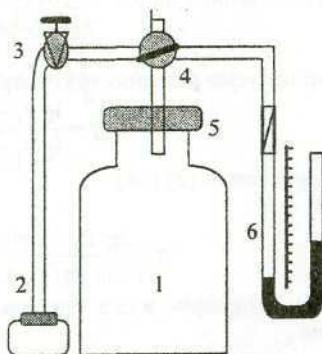


Рис. 13.

**Ідея роботи та виведення робочої формули.** В цій роботі досліджують процес адиабатичного розширення газу, який описує рівняння Пуассона

$$P V^\gamma = \text{const} \quad \text{або} \quad P^{1-\gamma} T^\gamma = \text{const}, \quad (1)$$

де  $\gamma = C_p / C_v$  – показник адиабати.

Очевидне таке: якщо зв'язок між параметрами двох станів газу  $P$  і  $T$  відомий, то з (1) можна отримати вираз для розрахунку  $C_p/C_v$ . У цій роботі досліджуваним газом є повітря, яке міститься в балоні. Після накачування в балон повітря його рівноважний стан визначатимуть такі параметри:  $V$ ,  $T_1$  і  $P_1$ , де  $V$  – об'єм балона;  $T_1$  – кімнатна температура, а

$$P_1 = P_0 + \rho g h_1. \quad (2)$$

Тут  $P_0$  – атмосферний тиск;  $h_1$  – різниця рівнів рідини в манометрі.

Переведемо повітря в балоні в інший стан, з'єднавши за допомогою крана 4 об'єм балона на короткий проміжок часу з атмосферою. В результаті адиабатичного розширення частина повітря вийде з балона. Тиск у балоні буде дорівнювати  $P_0$ , а температура знизиться до  $T_2$ . Цей процес описує рівняння (1), а саме:

$$\left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma}. \quad (3)$$

Після закриття крана 4 повітря в балоні з часом знову нагріється до кімнатної температури  $T_1$ , а тиск у балоні

$$P_2 = P_0 + \rho g h_2. \quad (4)$$

Зауважимо, що цей процес є ізохорним, оскільки об'єм повітря в балоні не змінюється, а тому

$$\frac{P_2}{P_0} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (5)$$

Параметри  $T_1$  і  $P_2$  визначають третій стан газу.

Підставивши (5) у (3), отримаємо

$$\left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_2}{P_0}\right)^{\gamma}. \quad (6)$$

Прологарифмуємо рівняння (6) і розв'яжемо його щодо  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{\lg P_1 - \lg P_2}{\lg P_1 - \lg P_0}, \quad (7)$$

або, використавши (2) і (4),

$$\gamma = \frac{\lg(P_0 + \rho g h_1) - \lg(P_0 + \rho g h_2)}{\lg(P_0 + \rho g h_1) - \lg P_0}. \quad (8)$$

Розклавши логарифми в ряд Тейлора й обмежившись двома першими членами, матимемо

$$\lg P_1 = \lg P_0 + \frac{\rho g h_1}{P_0} + \dots \quad \text{і} \quad \lg P_2 = \lg P_0 + \frac{\rho g h_2}{P_0} + \dots$$

Підставимо отримані вирази в рівняння (8) і отримаємо:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (9)$$

Формула (9) є робочою формулою цієї лабораторної роботи.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Записати вихідні дані експерименту:  $T_1 = (\dots \pm \dots)$  К - кімнатна температура;  $P_0 = (\dots \pm \dots)$  Н/м<sup>2</sup> - атмосферний тиск.
2. Закрити кран 4, а кран 3 відкрити. За допомогою ручного насоса 2 накачати в балон 1 повітря, доки різниця рівнів води в манометрі 6 не досягне 15-18 см. Кран 3 одразу закрити.
3. Спостерігати 2-3 хв за рівнями води в колінах манометра. Коли рівні перестануть змінюватись, записати різницю рівнів  $h_1$  у таблицю.
4. За допомогою крана 4 з'єднати об'єм балона з атмосферою на 2-3 с, після чого кран 4 одразу закрити.
5. Спостерігати 2-3 хв за рівнями води в колінах манометра. Коли рівні перестануть змінюватись, записати різницю рівнів  $h_2$  у таблицю.
6. Повторити дослід згідно з пунктів 2-5 п'ять разів.

Номер за пор.	$h_1$ , м	$\Delta h_1$ , м	$h_2$ , м	$\Delta h_2$ , м
1.				
...				
с/з				

7. За усередненими значеннями  $h_1$  і  $h_2$  розрахувати  $\gamma$  згідно з формулою (9).
8. Абсолютну похибку  $\Delta\gamma$  обчислити за формулою

$$\Delta\gamma = \bar{\gamma} \sqrt{\left(\frac{h_2 \Delta h_1}{h_1(h_1 - h_2)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_2}{h_2}\right)^2}$$

9. Записати кінцевий результат експерименту у вигляді  $\gamma = \bar{\gamma} \pm \Delta\gamma$ ;  $E_\gamma = \dots\%$ .

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Сформулюйте і запишіть перший закон термодинаміки.
2. Поясніть причину зміни температури газу під час його адиабатичного розширення або стиснення.
3. Запишіть формулу для обчислення  $\gamma$  через ступені вільності молекул газу.
4. Дайте визначення молярної теплоємності газу при сталому об'ємі і сталому тиску. Поясніть, чому  $C_v < C_p$ .
5. Виведіть і поясніть рівняння Майєра.
6. Запишіть і поясніть формулу, за якою обчислюють внутрішню енергію ідеального газу.



- Чому повітря в нашому досліді можна наближено вважати двоатомним ідеальним газом?
- Поясніть на графіку залежності  $p = f(V)$ , в чому полягає відмінність між ізотермою й адіабатою.

**Лабораторна робота № 213. ВИЗНАЧЕННЯ СПІВВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЕМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ  $C_p / C_v$  МЕТОДОМ СТОЯЧОЇ ХВИЛІ**

**Завдання:** експериментально визначити співвідношення теплоемностей повітря при сталому тиску і сталому об'ємі методом стоячої хвилі.

**Приладдя:** установка для визначення довжини звукової хвилі в повітрі; генератор звукових коливань; телефон, мікрофон і осцилограф; барометр; термометр.

**Теоретичний матеріал,** який необхідно засвоїти під час підготовки до виконання роботи: ізопроцеси в ідеальному газі; адіабатичний процес; рівняння Пуассона; теплоємність, питома та молярна теплоємності; теплоємність при сталому тиску і сталому об'ємі; звук та звукові хвилі; швидкість поширення звукових хвиль у різних середовищах, від чого вона залежить; утворення стоячої хвилі, вузли та пучності.

- ЛІТЕРАТУРА:** 1. § 16.2-16.5, с. 285-304; § 12.1, с. 205-208;  
 2. § 18.6-18.8, с. 68-74;  
 3. § 45-46, с. 104-146; § 71-72, с. 223-232.  
 4. § 41, с. 73-75; § 50-55 с. 88-96; § 157-158.С.247-251.

**Опис установки.** Установка для визначення довжини звукової хвилі в повітрі показана на рис.14. Вона складається зі скляної труби 2 та резервуара з водою 1, який через кран 9 приєднаний до ручного насоса 8. Уздовж труби розташована лінійка 5 з міліметровими поділками. Закачуючи воду в трубу, рівень води в ній можна піднімати, змінюючи висоту повітряного стовпа  $L$ . Над відкритим кінцем труби розміщений телефон 3, мембрана якого коливається з частотою, яку задає звуковий генератор 7. Моменти підсилення звуку можна реєструвати на слух або осцилографом 6 від мікрофона 4.

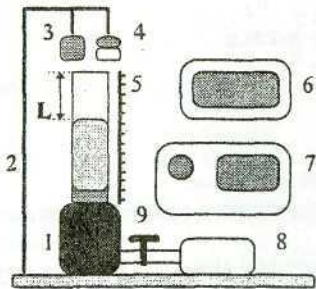


Рис. 14.

**Ідея роботи та виведення робочої формули.** Коливання мембрани телефону збуджують поздовжні коливання стовпа повітря у трубі, тобто звукову хвилю, яка поширюється в трубі, відбивається від поверхні води і йде у зворотному напрямі. У випадку накладання падаючої та відбитої хвиль утворюється

стояча хвиля. Процес поширення поздовжньої хвилі в газі супроводжується утворенням областей стиску і розрідження, між якими при великих частотах теплообміну практично нема. З огляду на це процес поширення звукових хвиль у повітрі можна розглядати як адіабатичний, який описує рівняння Пуассона

$$P V^\gamma = \text{const}, \quad (1)$$

де  $\gamma = C_p / C_v$  – співвідношення питомих теплоемностей газу при сталому тиску та об'ємі.

Швидкість поширення звукової хвилі в повітрі залежить від його фізичних властивостей:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P}{\rho}}, \quad (2)$$

де  $P$  – тиск;  $\rho$  – густина повітря при заданій температурі  $t^\circ$ .

Зауважимо, що густина повітря залежить від температури

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \alpha t^\circ}, \quad (3)$$

де  $\rho_0$  – густина повітря при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря.

Підставивши (3) в (2) і розв'язавши отримане рівняння щодо  $\gamma$ , матимемо

$$\gamma = \frac{v^2 \rho_0}{P(1 + \alpha t^\circ)}. \quad (4)$$

Для визначення швидкості звуку в повітрі скористаємось властивостями стоячої хвилі (рис.15). На поверхні води (точка А) завжди утворюється вузол. Звук мембрани телефону М підсилюватиметься лише тоді, коли на верхньому кінці труби буде пучність стоячої хвилі. З рис.15 можна бачити, що такі моменти можливі лише тоді, коли висота повітряного стовпа  $L$  кратна непарному числу  $\lambda/4$ , тобто

$$L_n = (2n-1) \cdot \lambda/4, \quad (5)$$

де  $n$  – порядок підсилення ( $n=1,2,3,\dots$ ).

Очевидно, що наступне підсилення спостерігатиметься тоді, коли

$$L_{n+1} = [(2n+1) - 1] \cdot \lambda/4. \quad (6)$$

Відстань між двома наступними підсиленнями звуку

$$L_{n+1} - L_n = \lambda/2. \quad (7)$$

Поряд з цим відомо, що довжина хвилі  $\lambda$  пов'язана зі швидкістю її поширення  $v$  та частотою  $\nu$  таким співвідношенням:

$$\lambda = v/\nu. \quad (8)$$

Із (7) і (8) отримаємо

$$v = 2\nu(L_{n+1} - L_n). \quad (9)$$

Підставивши (9) у формулу (4), знайдемо

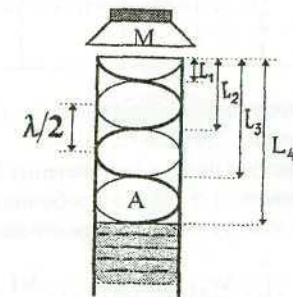


Рис. 15.

$$\gamma = \frac{4v^2 \rho_0 (L_{n+1} - L_n)^2}{P(1 + \alpha t^\circ)} \quad (10)$$

Це і є робоча формула лабораторної роботи.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- Записати вихідні дані експерименту:  $\rho_0 = (1,293 \pm 0,001) \text{ кг/м}^3$ ,  $\alpha = (3,66 \pm 0,01) 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ , частоту  $v$  – задає викладач.
- Увімкнути генератор звукових коливань 7 і виставити задану викладачем частоту. Увімкнути осцилограф 6.
- Відкрити кран 9 і за допомогою насоса 8 підняти рівень води в трубці 2 так, щоб він був на 7-10 см нижче від верхнього кінця трубки. Кран 9 закрити.
- Повільно відкриваючи кран 9, домогтися повільного опускання рівня води в трубці. В момент першого ( $n = 1$ ) підсилення звуку зафіксувати на лінійці 5 висоту  $L_1$ , а під час наступних підсилень –  $L_2, L_3, \dots, L_6$ . Повторити експеримент тричі згідно з пп. 3 і 4. Результати експерименту записати в таблицю.

Номер за пор.	n	$L_n$ , м	$\Delta L_n$ , м	$L_{n+1}$ , м	$\Delta L_{n+1}$ , м	$L_{n+1} - L_n$ , м
1.	1					
2.						
3.						
....	....	....	....	....	....	....
1.	6					
2.						
3.						

- За показами барометра визначити атмосферний тиск  $P$ ,  $\text{Н/м}^2$  (1 мм рт. ст.  $\approx 131,5 \text{ Н/м}^2$ ).
- Розрахувати середнє значення  $L_{n+1} - L_n$  і усереднену похибку  $\bar{\Delta}(L_{n+1} - L_n)$ .
- Обчислити  $\gamma$  згідно з робочою формулою (10).
- Абсолютну похибку вимірювань обчислити за формулою

$$\Delta\gamma = \gamma \left\{ \left( 2 \frac{\Delta v}{v} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} \right)^2 + \left[ 2 \frac{\bar{\Delta}(L_{n+1} - L_n)}{L_{n+1} - L_n} \right]^2 + \left( \frac{\Delta P}{P} \right)^2 + \left( \frac{t \Delta \alpha}{1 + \alpha t^\circ} \right)^2 + \left( \frac{\alpha \Delta t^\circ}{1 + \alpha t^\circ} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

(Похибки  $\Delta v$ ,  $\Delta P$  та  $\Delta t^\circ$  розрахувати як похибки відповідних приладів).

- Записати кінцевий результат експерименту у вигляді  $\gamma = \bar{\gamma} \pm \Delta\gamma$ ;  $E_\gamma = \dots \%$ .

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- Запишіть і поясніть рівняння Пуассона для адіабатичного процесу.

- При якому співвідношенні між висотою повітряного стовпа  $L_n$  і довжиною хвилі  $\lambda$  відбувається максимальне підсилення звуку?
- Від яких параметрів залежить швидкість поширення звукової хвилі в газі, у твердому тілі?
- Дайте визначення молярної теплоємності газу при сталому об'ємі і сталому тиску. Поясніть, чому  $C_v < C_p$ .
- Виведіть і поясніть рівняння Майера.
- Запишіть і поясніть формулу, за якою обчислюють внутрішню енергію ідеального газу.
- Чому повітря в нашому досліді можна наближено вважати двоатомним ідеальним газом?
- Поясніть на графіку залежності  $P = f(V)$ , в чому полягає відмінність між ізотермою й адіабатою.

### Лабораторна робота № 214. ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ ПСИХРОМЕТРОМ

**Завдання:** визначити за допомогою психрометра відносну та абсолютну вологість повітря і сталу психрометра.

**Приладдя:** психрометр Асмана, барометр, психрометрична таблиця, посудина з водою.

**Теоретичний матеріал,** який необхідно засвоїти під час підготовки до виконання роботи: насичена та ненасичена пара; абсолютна та відносна вологість повітря, точка роси; закон Дальтона, методи визначення вологості повітря; зміна внутрішньої енергії рідини під час її випаровування.

- ЛІТЕРАТУРА: 1. § 21.2, с. 401-407;  
 2. § 22.1-22.2, с. 131-133;  
 3. § 68, с. 213-216;  
 4. § 74-75, с. 123-125.

**Опис установки.** Психрометр Асмана (рис. 16), який використовують у цій роботі, складається з двох однакових термометрів 3 та механічного вентилятора 4. Резервуар із ртуттю одного термометра обгорнутий батиствою тканиною 2, яку перед вимірюванням змочують водою з посудини 1. Другий термометр залишається сухим. Вентилятору 4 надають обертового руху шляхом накручування його пружини ключем 5. У робочому режимі вентилятор забезпечує безперервне обдування обох термометрів

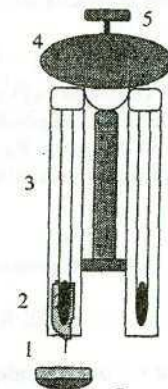


Рис. 16.

потоком повітря зі швидкістю 3-5 м/с, тому швидкість випаровування води з батистової тканини є сталою.

**Ідея роботи та виведення робочої формули.** Принцип вимірювання відносної вологості повітря за допомогою психрометра полягає в порівнянні показів температури сухого і вологого термометрів, які обдуває постійний потік повітря. Різниця показів температури зумовлена тим, що під час випаровування води з тканини, яка обгортає резервуар першого термометра, його температура знижується до  $t^{\circ}_B$ . Ця температура відповідає стану динамічної рівноваги в процесі випаровування. Покази сухого термометра  $t^{\circ}_C$  в цьому разі практично не змінюються.

Інтенсивність випаровування води з тканини більша тоді, коли відносна вологість навколишнього повітря менша, отже, різниця температур які показуватимуть обидва термометри,  $\Delta t^{\circ} = t^{\circ}_C - t^{\circ}_B$  залежатиме від вологості повітря. Якщо відносна вологість повітря 100%, то випаровування води не буде, отже, покази термометрів будуть однаковими:  $t^{\circ}_B = t^{\circ}_C$ .

Величина  $\Delta t^{\circ}$  залежить також від конструктивних особливостей психрометра й атмосферного тиску  $P_0$ . Для врахування цих факторів уведуть коефіцієнт  $\alpha$ , який називають сталою психрометра. Величину  $\alpha$  можна визначити з психрометричного рівняння

$$P = P_{HB} - \alpha \cdot P_0(t^{\circ}_C - t^{\circ}_B), \quad (1)$$

звідки

$$\alpha = \frac{P_{HB} - P}{P_0(t^{\circ}_C - t^{\circ}_B)}, \quad (2)$$

де  $P$  – тиск (пружність) водяної пари в повітрі при кімнатній температурі  $t^{\circ}_C$ ;  $P_{HB}$  – тиск (пружність) насиченої водяної пари при температурі  $t^{\circ}_B$  (визначають з психрометричних таблиць);  $P_0$  – атмосферний тиск.

На практиці відносну вологість повітря  $f$  визначають за психрометричними таблицями і вимірними експериментально значеннями  $t^{\circ}_C$  і  $\Delta t^{\circ} = t^{\circ}_C - t^{\circ}_B$ . За означенням відносна вологість

$$f = \frac{P}{P_H} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де  $P_H$  – тиск (пружність) насиченої водяної пари при температурі  $t^{\circ}_C$ , який також визначають із психрометричних таблиць.

Отже, при відомих  $P_H$  і  $f$  можна розрахувати тиск (пружність) водяної пари в повітрі при кімнатній температурі:

$$P = \frac{f \cdot P_H}{100\%}. \quad (4)$$

Формули (2) і (4) є робочими формулами цієї лабораторної роботи.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- Зволожити водою тканину 2 першого термометра.
- Ключ 5 вентилятора психрометра повернути за годинниковою стрілкою на п'ять-шість обертів і спостерігати за показами сухого і вологого термометрів. Коли настане термодинамічна рівновага, записати ці покази в таблицю.

- Повторити експеримент ще двічі через 8-10 хв. Отримані значення  $t^{\circ}_B$  і  $t^{\circ}_C$  усереднити. Розрахувати  $\Delta t^{\circ} = t^{\circ}_C - t^{\circ}_B$ .
- За отриманими в експерименті значеннями  $\Delta t^{\circ}$  і  $t^{\circ}_C$  обчислити відносну вологість повітря  $f$ . Шукане значення  $f$  визначають на перетині горизонтального рядка психрометричної таблиці, який відповідає  $t^{\circ}_C$ , і вертикальної колонки, яка відповідає  $\Delta t^{\circ}$ .
- За таблицею "Тиск і густина насиченої водяної пари при різних температурах" визначити  $P_H$  і  $P_{HB}$ , які відповідають температурам  $t^{\circ}_C$  і  $t^{\circ}_B$ . Визначити атмосферний тиск  $P_0$  за показами барометра. Результати записати в таблицю:

Номер за пор.	$t^{\circ}_C$ , °C	$\Delta t^{\circ}_C$ , °C	$t^{\circ}_B$ , °C	$\Delta t^{\circ}_B$ , °C	$P_H$ , мм. рт.ст	$\Delta P_H$ , мм. рт.ст	$P_{HB}$ , мм. рт.ст	$\Delta P_{HB}$ , мм. рт.ст	$f$ , %	$\Delta f$ , %
1.										
....										
с.з.										

- Розрахувати за формулою (4) тиск водяної пари в повітрі в умовах виконаного експерименту (аналог абсолютної вологості).
- Обчислити за формулою (2) сталу психрометра  $\alpha$ .
- Похибки  $\Delta P_H$ ,  $\Delta P_{HB}$  і  $\Delta f$  обчислити за середнім арифметичним кількості вимірювань, а  $\Delta P_0$  – як похибку приладу.
- Абсолютні похибки вимірювань обчислити за формулами

$$\Delta P = \bar{P} \sqrt{\left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_H}{P_H}\right)^2};$$

$$\Delta \alpha = \bar{\alpha} \left\{ \left(\frac{\Delta P_0}{P_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{HB}}{P_{HB} - P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P_{HB} - P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_C}{t_C - t_B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_B}{t_C - t_B}\right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

- Записати кінцевий результат експерименту у вигляді

$$f = \bar{f} \pm \Delta f, \quad E_f = \dots \%;$$

$$\alpha = \bar{\alpha} \pm \Delta \alpha, \quad E_{\alpha} = \dots \%;$$

$$P = \bar{P} \pm \Delta P, \quad E_P = \dots \%.$$

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- Яку пару називають насиченою? Як залежить її тиск від температури рідини?
- Дайте означення абсолютної і відносної вологості повітря.
- Що таке точка роси?
- Яке рівняння описує стан насиченої пари? Запишіть його.
- Як змінюється внутрішня енергія рідини в процесі випаровування?

6. Які фактори впливають на різницю показів сухого і вологого термометрів?  
 7. Від чого залежить швидкість випаровування рідини? Чому покази сухого термометра більші, ніж покази вологого? Чи завжди виконується це співвідношення?

### Лабораторна робота № 215. ДОСЛІДЖЕННЯ КРИТИЧНОГО СТАНУ РЕЧОВИНИ

**Завдання:** визначити критичну температуру ефіру.

**Приладдя:** установка для дослідження критичного стану речовини, ампула з ефіром.

**Теоретичний матеріал,** який необхідно засвоїти під час підготовки до роботи: ідеальний і реальний газ; рівняння Ван-дер-Ваальса; ізотерми ідеального і реального газів, метастабільні стани; критичний стан речовини, критичні параметри та їхнє виведення з рівняння стану; зрідження газів; фазові переходи.

- ЛІТЕРАТУРА: 1. § 17.1-17.3, с. 326-336; § 17.5, с. 341-344;  
 2. § 17.2-17.5, с. 56-62;  
 3. § 64-66, с. 203-210.  
 4. § 60-65, с. 103-111.

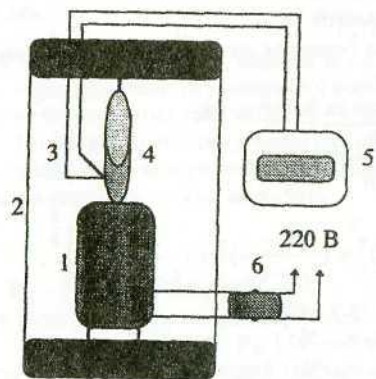


Рис. 17.

відповідає температурі ефіру. Ампула з ефіром, нагрівник і термопара розміщені в захисному корпусі 2.

**Ідея роботи та виведення робочої формули.** Теоретичною основою дослідження критичного стану речовини є рівняння стану реального газу – рівняння Ван-дер-Ваальса. Для одного моля (кіломоля) реального газу це рівняння записують так:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT. \quad (1)$$

де  $P$ ,  $V$  і  $T$  – відповідно тиск, об'єм і температура одного моля газу;  $a$  і  $b$  – поправки Ван-дер-Ваальса на внутрішній тиск і власний об'єм усіх молекул газу;  $R$  – універсальна газова стала.

Для різних газів поправки  $a$  і  $b$  різні за значенням. На рис. 18 показані ізотерми реального газу для різних значень температур. Суцільні криві відповідають експериментальним, а криві з пунктирними ділянками  $BB'CC'$  – теоретичним ізотермам. З графіків видно, що з підвищенням температури горизонтальна ділянка ізотерми  $BC$ , яка відповідає двофазовому стану речовини (рідина + насичена пара), зменшується, стягуючись при критичній температурі  $T_K$  в точку, і дві фази речовини стають нерозрізнюваними. Цій точці відповідають параметри  $T_K$ ,  $P_K$ ,  $V_K$ , які визначають критичний стан речовини. Критичні параметри речовини  $T_K$ ,  $P_K$ ,  $V_K$  можна визначити, розв'язавши рівняння (1):

$$T_K = \frac{8a}{27Rb}; \quad V_K = 3b; \quad P_K = \frac{a}{27b^3}. \quad (2)$$

**Критична температура** – це температура, при якій зникає різниця між рідиною і її насиченою парою. При  $T_K$  питомі теплота пароутворення і коефіцієнт поверхневого натягу рідини  $\alpha$  дорівнюють нулю. При  $T > T_K$  речовина може існувати лише в стані газу, який неможливо перевести в рідину шляхом ізотермічного стиску. При  $T < T_K$  речовина може існувати як у стані рідини, так і в стані насиченої пари.

**Критичний тиск** – це максимально можливий тиск насиченої пари заданої речовини, а **критичний об'єм** – максимальне значення об'єму, який може займати речовина в рідкому стані.

У нашому випадку досліджувана речовина перебуває в замкнутому об'ємі (ефір у запаяній скляній ампулі). Над поверхнею ефіру є насичена пара. З підвищенням температури інтенсивність випаровування ефіру збільшується, отже, густина пари  $\rho_n$  також збільшується, а густина рідини  $\rho_r$  – зменшується (рис. 19). Коли температура досягає критичної, то  $\rho_n = \rho_r$ . Поряд з цим, як зазначено вище, при цій температурі  $\alpha = 0$ , тоді межа поділу між рідиною і її насиченою парою зникне.

Отже, експериментально  $T_K$  можна визначити шляхом візуального спостереження за зникненням (появою) мені-

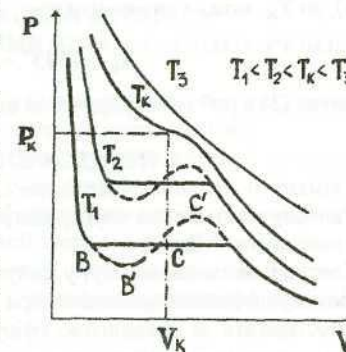


Рис. 18.

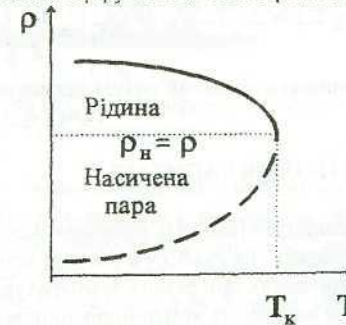


Рис. 19.

ска в запаяній скляній ампулі під час її нагрівання (охолодження). Цей метод, уперше запропонований київським фізиком М.Авенаріусом, застосований у нашій роботі.

Якщо в експерименті виміряти  $t_1$ °C (температуру, при якій зникає меніск в ампулі), і  $t_2$ °C – (температуру, при якій він з'являється, якщо ампулу охолоджувати), то  $T_k$  можна визначити так:

$$T_k = (273^\circ + \frac{t_1 + t_2}{2})K. \quad (3)$$

Формула (3) є робочою формулою цієї лабораторної роботи.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Увімкнути живлення установки 220 В.
2. Увімкнути живлення електронагрівника 1. Для цього перемикач 6 перевести в положення "Вкл."
3. Контролювати температуру ампули 4 під час її нагрівання за шкалою потенціометра 5 (шкала потенціометра проградуєвана в градусах Цельсія).
4. Спостерігати за поведінкою ефіру в ампулі в процесі нагрівання. В момент зникнення межі поділу між рідиною і її парою зафіксувати температуру  $t_1$ °C.
5. Перемикач 6 перевести в положення "Викл.". Спостерігати за поведінкою ефіру в ампулі в процесі охолодження. В момент появи межі поділу між рідиною і парою зафіксувати температуру  $t_2$ °C.
6. Повторити вимірювання згідно з пп. 2-5 ще чотири рази. Вимкнути живлення нагрівника 1. Результати експерименту записати в таблицю:

Номер за пор.	$t_1$ , °C	$\Delta t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$\Delta t_2$ , °C
1.				
.....				
с/з.				

7. Розрахувати за формулою (3) критичну температуру ефіру  $T_k$ .
8. Абсолютну похибку визначення критичної температури обчислити за формулою

$$\Delta T_k = \frac{T_k}{2} \sqrt{\left(\frac{\Delta t_1}{t_1 + t_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_2}{t_1 + t_2}\right)^2}$$

9. Записати кінцевий результат експерименту у вигляді  $T_k = (T \pm \Delta T)K$ ,  $E_{T_k} = \dots\%$ .

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Запишіть і поясніть рівняння Ван-дер-Ваальса для моля реального газу.
2. Покажіть на графіку в системі координат  $P, V$  ряд ізотерм реального газу, отриманих при різних температурах.
3. Що називають критичною точкою речовини і які параметри її характеризують?

4. Як виразити критичні параметри речовини через поправки Ван-дер-Ваальса?
5. Які ви знаєте метастабільні стани речовини? Як їх можна отримати?
6. За яких умов речовину можна перевести з газоподібного стану в рідкий шляхом ізотермічного стиску? Чому більшість газів не зріджуються при кімнатній температурі?

### Лабораторна робота №216. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ КРИСТАЛІЧНИХ РЕЧОВИН

**Завдання:** визначити температуру плавлення (кристалізації) за кривими нагрівання (охолодження) металу і зміну ентропії цього процесу.

**Приладдя:** установка для дослідження процесу плавлення металів; набір тиглів з металами; термометр, барометр, секундомір.

**Теоретичний матеріал,** який необхідно засвоїти під час підготовки до роботи: процеси плавлення та кристалізації твердих тіл; кристалічні та аморфні тіла; фазові переходи першого роду, питома теплота фазових переходів; рівняння Клапейрона-Клаузіуса; ентропія; термопарний метод вимірювання температури.

- ЛІТЕРАТУРА: 1. § 21.3-21.5, с. 407-414;  
2. § 22.4-22.6, с. 134-138;  
3. § 70, с. 219-222;  
4. § 75-76, с. 124-127; § 247, с. 398-400.

**Опис установки.** Установка для дослідження процесу плавлення металів показана на (рис. 20). Вона складається з електропечі 1 для нагрівання тигля з металом 3, поворотного стола 2 з рукою керування 4, на якому закріплені чотири тиглі з різними металами. Термопара 5 разом з потенціометром 7 складають електричний термометр, за допомогою якого вимірюють температуру металу в тиглі. Сама термопара може переміщуватись по вертикалі, якщо обертати гвинт повзунка 6. Секундоміром 8 вимірюють час. Перемикач 9 призначений для увімкнення живлення електропечі 1.

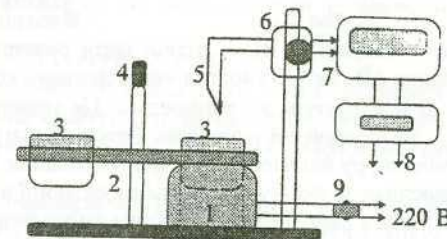


Рис. 20.

**Ідея роботи та виведення робочої формули.** Під час нагрівання кристалічної речовини кінетична енергія її атомів збільшується і, відповідно, збільшується температура тіла. При досягненні температури плавлення  $T_{пл}$  зовнішня енергія, якої набуває тіло, витрачається на руйнування кристалічної ґратки, тому температура тіла не буде підвищуватися, доки вся речовина не перейде в рідкий стан. Процес плавлення належить до фазових переходів першого роду. Його описує рівняння Клапейрона-Клаузіуса