

допомогою виміряного значення. Отже, величини d , t , l , D визначено з певною похибкою. Враховуючи це, формула для обчислення абсолютної похибки для η має вигляд:

$$\Delta\eta = \left| \frac{(\rho_m - \rho_{zl})gt d}{9l(1 + 2.4d/D)} - \frac{0.133gt(\rho_m - \rho_{zl})d^2}{Dl(1 + 2.4d/D)^2} \right| \Delta d +$$

$$+ \left| \frac{(\rho_m - \rho_{zl})gd^2}{18l(1 + 2.4d/D)} \right| \Delta t + \left| \frac{(\rho_m - \rho_{zl})gt \cdot d^2}{18l^2(1 + 2.4d/D)} \right| \Delta l +$$

$$+ \left| \frac{0.133(\rho_m - \rho_{zl})gt d^2}{lD^2(1 + 2.4d/D)^2} \right| \Delta D.$$
(3.32)

Обчисленні значення η та $\Delta\eta$ заносяться до таблиці:

№ дослідів	Коефіцієнт внутрішнього тертя, $\eta, 0.01(Па \cdot c)$	Абсолютна похибка, $\Delta\eta, 0.01(Па \cdot c)$
1		
...		
N		

За даними з цієї таблиці обчислюється середнє значення коефіцієнта внутрішнього тертя η_{cp} відповідно до формули:

$$\eta_{cp} = \sum_{i=1}^n \eta_i / n.$$
(3.33)

Абсолютна похибка для η_{cp} обчислюється за формулою:

$$\Delta\eta_{cp} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta\eta_i)^2} / n.$$
(3.34)

6. Представлення здобутих результатів

Записати отримане значення коефіцієнта внутрішнього тертя $\eta = (\eta_{cp} \pm \Delta\eta_{cp}) 10^{-2}$ (Па·с), обчислити відносну похибку для η за формулою:

$$\delta\eta = \frac{\Delta\eta_{cp}}{\eta_{cp}} 100\%.$$
(3.35)

Порівняти отримане значення коефіцієнта внутрішнього тертя η з табличним. Розрахувати відносне відхилення отриманого значення коефіцієнта внутрішнього тертя η від табличного $\eta_{таб}$ за формулою:

$$\delta = \frac{|\eta_{таб} - \eta|}{\eta} 100\%.$$
(3.36)

Контрольні питання

1. Який фізичний зміст має коефіцієнт внутрішнього тертя?
2. Порівняти залежності коефіцієнтів внутрішнього тертя в газах та рідинах від температури, пояснити природу внутрішнього тертя в цих середовищах.
3. Який радіальний профіль має швидкість упорядкованого руху при протіканні речовини у системах з великим радіусом поперечного перетину (значно більшим ніж довжина вільного пробігу)?
4. Який розподіл частинок ідеального газу за довжиною вільного пробігу?
5. Як пов'язано коефіцієнти дифузії та в'язкості у теорії перенесення для ідеальних газів, в яких одиницях вони вимірюються?
6. Яке явище називають тепловим ковзанням, з чим воно пов'язано?
7. Що та в якому напрямку переноситься в процесі внутрішнього тертя?

3.3. Лабораторна робота «Визначення відношення величин теплоємностей газу за умов сталого тиску та сталого об'єму»

Мета роботи: експериментально визначити відношення величин теплоємності газу при сталому тиску C_p до теплоємності газу при сталому об'ємі газу C_v .

Обладнання: скляний балон великого об'єму, який з'єднано з рідинним манометром, система впуску та випуску газу з балону.

1. Короткі теоретичні відомості

Частка $C_p/C_v = \gamma$ є показником ступеня в рівнянні Пуассона, яке описує рівноважний адіабатичний (ізоентропійний) процес, тобто процес, який відбувається без обміну теплом із зовнішнім середовищем. Тому часто її називають показником адіабати. Показник ізентропи γ відіграє важливу роль в описі реальних технічних процесів, які є близькими до ізоентропійного процесу. Для прикладу вкажемо, що γ зокрема, визначає швидкість поширення звуків у газах, від неї залежить плин газів по трубах зі звуковими швидкостями. Описаний нижче спосіб визначення показника адіабати газу було запропоновано Дезормом та Клеманом. У ньому досліджуються процеси швидкого збільшення та зменшення об'єму газу, які вважаються ізоентропічними, оскільки за час їхнього протікання процес теплопередачі не встигає реалізуватися.

Суть запропонованого методу визначення показника адіабати газу полягає у порівнянні параметрів стану газу, який виконує поступово кілька процесів, серед яких є два різних адіабатичних процеси. У скляному балоні, який з'єднано з манометром, знаходиться певний об'єм газу (повітря); визначимо це, як перший стан (1) термодинамічної системи (повітря в балоні). Цей стан описується наступним набором термодинамічних величин T_1, P_1, V_1 та масою повітря в балоні m .

Якщо до балону швидко за допомогою гумової груші нагнати повітря, то повітря в ньому до певної міри нагріється – це буде другий стан (2) нашої термодинамічної системи T_2, P_2, V_2 . Слід зауважити, що маса повітря в системі змінилась на величину Δm , а об'єм повітря, яке повністю заповнює балон, не змінився, тобто $V_1 = V_2$.

Внаслідок теплообміну між повітрям в балоні та навколишнім середовищем через якийсь час температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною температурою. В цьому стані (3) система описується наступним набором термодинамічних величин T_3, P_3, V_3 та масою повітря $m + \Delta m$.

Розглянемо цей стан більш ретельно. Об'єм повітря у балоні не змінився, тобто $V_1 = V_3$. Але з часом, внаслідок теплообміну, повітря охолоне до кімнатної температури, отже, $T_1 = T_3$. В стані (1) тиск повітря був P_1 , а в стані (3) тиск повітря буде дорівнювати P_3 . Тиск повітря у балоні вимірюється рідинним манометром, завдяки якому ми можемо визначити значення P_3 , яке буде дорівнювати $P_3 = P_1 + g\rho\Delta h$, де ρ – густина манометричної рідини, g – прискорення вільного падіння, Δh – різниця висот стовпчиків рідини в манометрі. Запишемо рівняння стану досліджуваної термодинамічної системи у першому (1) та третьому (3) станах:

$$\begin{aligned} (1) P_1 V_1 &= m R T_1 / \mu, \\ (3) (P_1 + g\rho\Delta h) V_1 &= (m + \Delta m) R T_1 / \mu. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Віднявши від другого рівняння перше, а потім поділивши результат на перше рівняння, ми отримаємо:

$$\frac{g\rho\Delta h}{P_1} = \frac{\Delta m}{m}. \quad (3.38)$$

Обчислимо відносну величину зміни маси. Якщо взяти до уваги, що $g = 9.8 \text{ м/с}^2$, $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$, атмосферний тиск $P_1 = 10^5 \text{ Па}$, а лабораторне обладнання не може забезпечити зміну висоти

стовпчика манометра більшу за 40 см, то ми отримаємо таку оцінку:

$$\Delta m / m \leq 0.039, \quad (3.39)$$

що є набагато менше одиниці. З цього можна зробити наступний висновок: кількістю маси повітря, що ми додали до об'єму лабораторного пристрою можна знехтувати. Враховуючи це, можна розглядати процес переходу з стану (1) до стану (2) як адіабатичний процес стисання газу. Стан газу (2) при цьому описується набором термодинамічних величин T_2, P_2, V_2 , а маса газу вважається незмінною. В такому випадку $T_2 > T_1$, $P_2 > P_1$, $V_2 < V_1$ (див. рис. 3.4).

Внаслідок теплообміну між повітрям в балоні та навколишнім середовищем через якийсь час температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною температурою. В цьому

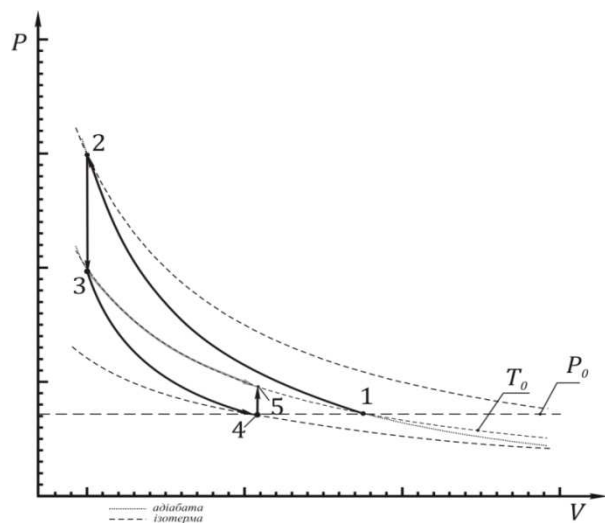


Рис. 3.4. Процеси, що відбуваються в системі: 1 $\rightarrow$ 2 адіабатичний процес нагнітання повітря, 2 $\rightarrow$ 3 ізохоричний процес охолодження повітря до кімнатної температури, 3 $\rightarrow$ 4 адіабатичний процес розширення повітря, 4 $\rightarrow$ 5 ізохоричний процес нагрівання повітря до кімнатної температури

стані система описується наступним набором термодинамічних величин T_3, P_3, V_3 , нагадаємо що маса газу вважається незмінною. Процес охолодження відбувається при сталому об'ємі (ізохоричний процес), таким чином у стані (3) $T_3 = T_1$, $P_2 > P_3 > P_1$, $V_2 = V_3$.

Якщо тепер змусити повітря в балоні швидко розширитися, відкривши кран балону та одразу ж його закривши, тоді внаслідок розширення повітря охолоне, а його тиск впаде до атмосферного. Цей процес розширення можна вважати адіабатичним (хоча маса повітря змінюється, ми вважаємо цей процес адіабатичним без зміни маси газу, через міркування, які є аналогічними тим, що приведені раніше). В кінці цього процесу стан газу, назовемо його четвертим (4), визначається параметрами T_4, P_4, V_4 , при цьому $T_3, T_1 > T_4$, $P_4 = P_1$, $V_4 > V_3$.

Потім через теплообмін між повітрям у балоні та оточуючим середовищем відбудеться поступове нагрівання повітря в балоні до кімнатної температури T_0 . Повітря в балоні перейде у п'ятий (5) стан. У цьому стані повітря характеризується параметрами: T_5, P_5, V_5 . При цьому тиск його стане вищим за атмосферний тиск $P_5 > P_0$, де P_0 – це атмосферний тиск.

2. Визначення коефіцієнта Пуассона

Для знаходження величини коефіцієнта Пуассона слід аналітично зв'язати макропараметри для сусідніх станів повітря у дослідницькому балоні. Перехід від третього до четвертого стану описується рівнянням ізентропи: $P_3 V_3^\gamma = P_4 V_4^\gamma = \text{const}$. Для нашого випадку це рівняння можна записати так:

$$P_3 / P_4 = V_4^\gamma / V_3^\gamma. \quad (3.40)$$

Перехід між третім станом та п'ятим станом можна здійснити ізотермічно, тобто цей процес можна описати законом

Бойля–Маріотта: $P_3V_3 = P_5V_5 = \text{const.}$ Отже, для нашого випадку можна записати:

$$P_3 / P_5 = V_5 / V_3. \quad (3.41)$$

Врахувавши, що в нашому випадку має місце рівність об'ємів $V_4 = V_5$, та рівність тисків $P_4 = P_0$, отримаємо наступну систему двох рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{P_3}{P_5} &= \frac{V_5}{V_3} = \frac{V_4}{V_3}, \\ \frac{P_3}{P_4} &= \frac{P_3}{P_0} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^\gamma = \left(\frac{P_3}{P_5} \right)^\gamma. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Отже, маємо зв'язок для тисків, які можна експериментально виміряти у даній роботі:

$$\frac{P_3}{P_0} = \left(\frac{P_3}{P_5} \right)^\gamma. \quad (3.43)$$

Розв'язавши це рівняння відносно γ отримаємо:

$$\gamma = \ln \left(\frac{P_3}{P_0} \right) / \ln \left(\frac{P_3}{P_5} \right). \quad (3.44)$$

З умов експерименту для тисків повітря у балоні в станах три та п'ять можемо записати: $P_3 = P_0 + \Delta P_1 = P_0 + g\rho h_1$ та $P_5 = P_0 + \Delta P_2 = P_0 + g\rho h_2$. Підставивши це до (3.44) отримаємо наступний вираз для γ :

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\ln[(P_0 + \Delta P_1) / P_0]}{\ln[(P_0 + \Delta P_1) / (P_0 + \Delta P_2)]} = \\ &= \frac{\ln(1 + g\rho h_1 / P_0)}{\ln(1 + g\rho h_1 / P_0) - \ln(1 + g\rho h_2 / P_0)}. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Формулу (3.45) зручно переписати, використовуючи малість часток $\Delta P_1 / P_0$ та $\Delta P_2 / P_0$ порівняно з одиницею, розкладаючи логарифми у ряд Маклорена, у такому вигляді:

$$\gamma \approx \frac{g\rho h_1}{g\rho(h_1 - h_2)} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}, \quad (3.46)$$

де замість додаткових тисків можна використати відповідні значення висоти $h_{1,2}$ стовпчиків рідини, бо тиск у даному манометрі має гідростатичну природу.

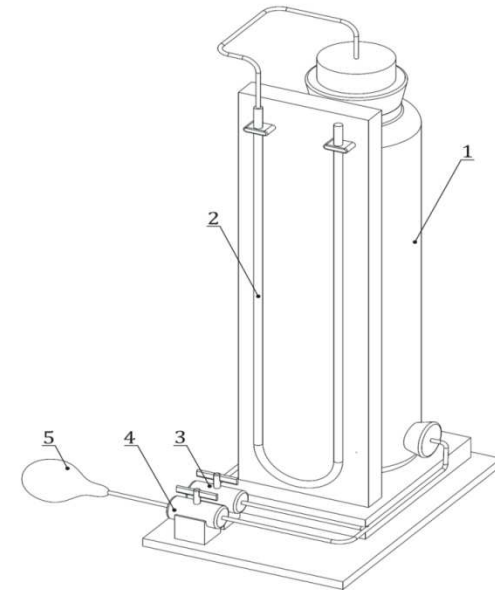


Рис. 3.5. Прилад Клемана і Дезорма. Цифрами позначено:
1 – скляний балон, 2 – рідинний манометр, 3 – кран для скидання надлишкового тиску у балоні, 4 – кран для переходу в режим нагнітання повітря, 5 – гумова груша

3. Порядок виконання роботи

1. Лабораторний пристрій (прилад Клемана і Дезорма) зображено на рис. 3.5. Повернути кран 4 так, щоб балон був з'єднаний із гумовою грушею, кран 3 закрити. Провести нагнітання повітря до тиску, що відповідає різниці рівнів рідини в манометрі приблизно 200–300 мм.

Увага! Закачувати повітря до балону слід обережно, щоб робоча рідина, яку використовують у манометрі, не піднялася до краю манометра. В іншому випадку повітря слід випустити і, зачекавши приблизно п'ять хвилин, дослід слід повторити спочатку.

2. Закрити кран 4, повернувши його на 90°. Почекаати, доки температура повітря в балоні досягне температури навколишнього середовища, про що свідчатиме припинення зміни різниці висоти рівнів рідини у колінах манометра. Виміряти різницю рівнів, що встановлюється при цьому – h_1 (див. рис. 3.6).

3. Швидко відкрити кран 3, повернувши його на 90° для поєднання балону з атмосферою. Тримати кран відкритим необхідно дуже короткий проміжок часу: доти, доки рівні рідини в обох колінах манометра зрівнюються. У момент відкриття крану повітря швидко розширюється, тиск його в балоні стає таким, що дорівнює атмосферному. Зважте на те, що при відкритті крана через різку зміну тиску повітря в балоні можливе короточасне коливання рідини, але воно не впливає на результати дослідів.

4. Почекаати, поки повітря в балоні, що охолонуло при адіабатичному розширенні, знову нагріється

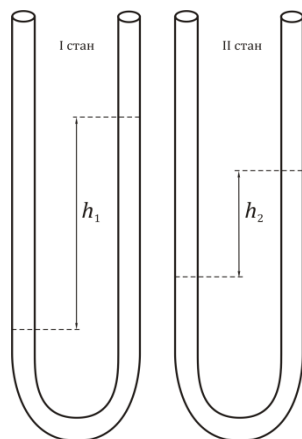


Рис. 3.6. Схема вимірювання тиску повітря в приладі Клемана-Дезорма

до кімнатної температури. Виміряти показання манометра h_2 (див. схему на рис. 3.6).

5. Дослід повторити 10÷12 разів, обчислюючи при цьому значення коефіцієнта Пуассона. Знайти середнє значення γ .

6. Усі експериментальні дані занести до наступної таблиці:

№ дослідів	Рівень рідини, $(h_1 + \Delta h_1), \text{м}$	Рівень рідини, $(h_2 + \Delta h_2), \text{м}$	$\gamma = C_p / C_v$
1			
...			
n			

4. Обробка здобутих результатів вимірювань

1. Знайти середнє значення коефіцієнта Пуассона γ_{cp} за формулою:

$$\gamma_{cp} = \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i \right) / n. \quad (3.47)$$

2. Визначити абсолютну похибку для γ_{cp} . Абсолютна похибка для γ_{cp} обчислюється за формулою:

$$\Delta \gamma_{cp} = t_p \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \gamma_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (3.48)$$

де t_p – це коефіцієнт Стюдента.

5. Представлення здобутих результатів

1. Порівняти отримане значення γ для повітря з табличним значенням, знайти відносне відхилення отриманого результату від табличного за формулою:

$$\delta = \frac{|\gamma_{таб} - \gamma|}{\gamma_{таб}} 100\%. \quad (3.49)$$

2. Знайти відносну помилку для отриманого коефіцієнта Пуассона.
3. Порівняти відносне відхилення та відносну помилку.

Контрольні питання

1. Яким рівнянням описується процес нагнітання повітря до балона? Побудуйте графік цього процесу в координатах T, S .
2. Накреслити на графіку P, T усі наявні в роботі процеси (послідовно).
3. У чому причина розходження значень теплоємностей C_p та C_v для ідеального газу?
4. Як визначається робота ідеального газу для політропічних процесів?
5. Сформулюйте перший закон термодинаміки?
6. Сформулюйте закон Джоуля для ідеальних газів.
7. Намалюйте графіки ізотермічного, ізохоричного та ізобаричного процесів на діаграмі V, T .

3.4. Лабораторна робота «Визначення вологості повітря»

Мета роботи: навчитися експериментально визначати вологість повітря.

Обладнання: стандартний аспіраційний психрометр, барометр.

1. Короткі теоретичні відомості.

Як відомо, атмосферне повітря містить деяку кількість водяної пари. Кількість цієї пари може змінюватися як за абсолютною величиною, так і за ступенем насичення, що характеризується абсолютною і відотною вологістю. Саме визначення цих величин для повітря, яке заповнює лабораторне приміщення, і становить основну мету даної лабораторної роботи.

Абсолютна вологість – це парціальний тиск водяної пари, або кількість водяної пари, що знаходиться в одному кубічному метрі повітря. Оскільки маса пари є малою, то

абсолютну вологість обчислюють у г/м^3 (тобто це така собі несистемна одиниця вимірювання). За природних умов цей показник збільшується з температурою, змінюючись від $\sim 0.1 \text{ г/м}^3$ (при $\sim -25^\circ\text{C}$) до $\sim 70 \text{ г/м}^3$ (при $\sim +40^\circ\text{C}$) залежно від сезону року, географічного розташування, тощо. Зазначимо, що маса 1 м^3 сухого повітря за температури 0°C та тиску 760 мм рт. ст. дорівнює 1293 г . На підставі рівняння Клапейрона–Менделєєва маса M повітря, яке міститься в об'ємі 1 м^3 за температури $t^\circ\text{C}$ та тиску $P \text{ мм рт. ст.}$, дорівнює (в грамах):

$$M = \frac{1293 \cdot P}{760(1 + \alpha)} = \frac{1.701}{1 + \alpha} P, \quad (3.50)$$

де $\alpha = 1/273$ – це температурний коефіцієнт розширення повітря.

Зазначимо, що застосування до водяної пари рівняння Клапейрона–Менделєєва є справедливим лише для пари, яка знаходиться у станах, що є далекими від стану насичення. Використовуючи вираз (3.50), можна визначити абсолютну вологість повітря, якщо відомим є парціальний тиск водяної пари. Для цього у вираз (3.50) слід підставити саме парціальний тиск замість P . З формули (3.50) видно, що при малих значеннях t величина абсолютної вологості мало відрізняється від величини пружності (парціального тиску) водяної пари, якщо виражати її у міліметрах ртутного стовпчика.

Відносна вологість визначається в наступний спосіб:

$$\mu = P / P_{\text{нас}} 100\%, \quad (3.51)$$

де $P_{\text{нас}}$ – це тиск пари, що насичує повітряний простір за даної температури T , P – це парціальний тиск водяної пари при тій же температурі T . Таким чином, відносна вологість характеризує ступінь насичення повітря водяною парою. Визначення вологості повітря робиться, зазвичай, з використанням табличних даних або шляхом визначення точки роси психрометричним методом.

Пристрої, які визначають вологість повітря, називають гігрометрами, вони використовуються для обчислення вологості

речовин у газоподібному стані. Конденсаційний гігрометр називають психрометром. Сучасні гігрометри – це інструменти, які використовують електронні датчики для вимірювання вологості. Найпоширеніші датчики вимірюють зміну ємності або електричного опору датчика під дією вологи. В ємнісних датчиках на дві пластини подається змінна напруга. Залежно від кількості водяної пари між пластинами змінюється діелектрична проникність і відповідно ємність, яка впливає на реактивний опір конденсатора. В електро-резисторних датчиках вимірюється активний опір полімерної мембрани, який змінюється залежно від кількості поглинутої вологи. При вимірюваннях вологості також необхідно вимірювати температуру, оскільки вона впливає на калібрування електронних датчиків. Для перевірки гігрометра застосовується гігростат.

Психрометр – це метеорологічний прилад для вимірювання вологості повітря. Психрометр є простим типом гігрометра. У найпростішому випадку він складається з сухого та вологого термометрів (резервуар термометричної рідини у термометрі обгортається змоченим батистом). За різницею показів цих термометрів, підставляючи ці дані до відповідних таблиць, номограм, визначають абсолютну і відносну вологість повітря. Крім того, за показаннями термометрів знаходять точку роси. Розрізняють стаціонарні, аспіраційні та дистанційні психрометри. При температурах нижче -5°C для визначення вологості повітря користуються гігрометром.

2. Визначення вологості повітря методом психрометра

Метод психрометра найчастіше вживають для вимірювання вологості повітря. Суть його полягає в наступному. Нехай два однакових термометри знаходяться в однакових потоках повітря. Показання термометрів, природно, мають бути однаковими. Але якщо ж балончик одного з термометрів буде увесь час змочений, наприклад, буде загорнутий у мокрий батист, тоді показання термометрів виявляться різними.

Завдяки випаровуванню води з батисту так званий «вологий» термометр показує температуру, нижчу, ніж сухий

термометр. Що меншою є вологість навколишнього повітря, то інтенсивнішим є випаровування і то нижчими є показання вологого термометра. Відлік значень по двох термометрах дає різницю температур, що характеризує вологість повітря. При сталому режимі випаровування, коли температура вологого термометра вже стабілізувалася, приплив тепла Q_1 ззовні дорівнює витраті тепла Q_2 на випаровування води з поверхні термометра. Експериментальним шляхом встановлено, що за одиницю часу надходження тепла дорівнює:

$$Q_1 = \beta(T - T_1)S_1, \quad (3.52)$$

де $T - T_1$ – це найбільша різниця температур, S_1 – це поверхня балончика вологого термометра, β – це певний коефіцієнт пропорційності. За законом Дальтона маса рідини при випаровуванні в одиницю часу визначається виразом:

$$m = \varepsilon S_2(P_{\text{нас}} - P)/P_{\text{нов}}, \quad (3.53)$$

де m – це маса води, що випарувалася; S_2 – площа поверхні, що випаровує воду; $P_{\text{нов}}$ – це тиск повітря в цьому процесі; $P_{\text{нас}}$ – це тиск водяної пари, що насичується за температури рідини, яка випаровується, тобто температури T ; тиск водяної пари, що міститься в повітрі, позначено літерою P ; ε – це коефіцієнт пропорційності, який залежить від швидкості потоку повітря. Кількість тепла Q_2 , яку потрібно витратити для випаровування маси води маси m , можна записати у вигляді:

$$Q_2 = A_v S_2(P_{\text{нас}} - P)/P_{\text{нов}}, \quad (3.54)$$

де A_v – це питома теплота випаровування води. За умов $Q_1 = Q_2$, $S_1 = S_2$, одержуємо рівняння:

$$\beta(t - t_1) = A_v(P_{\text{нас}} - P)/P_{\text{нов}}, \quad (3.55)$$

нагадаємо, що різниця температур є однаковою для шкали Цельсія та Кельвіна. З рівняння (3.55) знаходимо пружність водяної пари, яка в даний момент міститься у повітрі:

$$P = P_{\text{нас}} - A(t - t_1)P_{\text{нов}}, \quad (3.56)$$

де A – константа приладу, величина якої визначається, в основному, швидкістю потоку повітря та знаходиться експериментально.

3. Опис приладу та вимірювання відносної вологості повітря

Для визначення відносної вологості повітря в лабораторії застосовується стандартний аспіраційний психрометр. Він складається з двох однакових спеціальних термометрів. Резервуар з вимірювальною рідиною одного з них обмотано клаптиком батисту, який змочується перед дослідом водою. Прилад має електричний вентилятор для прискорення процесу вимірювання.

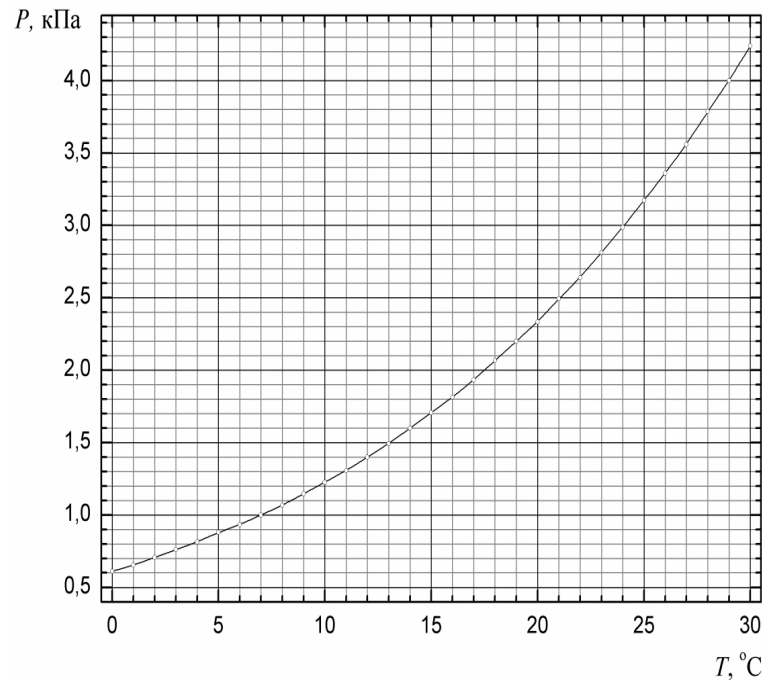


Рис. 3.7. Графік залежності тиску насиченої пари води від її температури

Для усунення нагрівання приладу його металеві частини нікельовано. Варто звертати увагу на те, щоб при змочуванні вода не потрапила на інший термометр або на внутрішню поверхню його екранної трубки. Вмикають вентилятор і стежать за показанням термометра. Коли показання стануть сталими (через 4–5 хв.), їх записують. При відліку показань термометрів варто відрахувати десяті частини градусів та записати їх, а тільки після цього їхні цілі значення.

Абсолютна вологість для стандартного аспіраційного психрометра визначається формулою (3.56), де константа $A=0.000662$, величину $P_{\text{нас}}$ беруть із психрометричної таблиці відносної вологості повітря (див. Розділ 4), тиск повітря визначають лабораторним барометром.

Якщо з психрометричної таблиці взяти величину тиску пари, що насичується, за температури навколишнього повітря, то легко визначити за формулою (3.51) відносну вологість. Зручніше, однак, скористатися спеціальними номограмами у вигляді кривих, за допомогою яких, знаючи температури T та T_1 , одразу визначається величина відносної вологості повітря шляхом простого відліку.

4. Порядок виконання роботи

1. Увімкнути вентилятор і розпочати стеження за показанням термометра. Коли показання стануть сталими (через 4–5 хв.), їх записують. При відліку показань термометрів варто відрахувати десяті частини градусів і записати спочатку їх, а тільки після цього їх цілі значення.
2. Визначити за допомогою психрометра відносну вологість повітря в лабораторії, користуючись таблицею 4.27.
3. Порівняти цей експериментальний результат із даними лабораторного приладу, що визначає відносну вологість через зміну коефіцієнта пружності спеціального матеріалу внаслідок змін вологості повітря та через формулу (3.56).

Контрольні питання

1. Сформулюйте правило фаз для термодинамічних систем.

2. Що таке потрійна точка води? Намалюйте її на графіку в координатах тиск–об'єм: P, V .
3. Сформулюйте закон Клаузіуса.
4. Що таке точка роси, абсолютна та відносна вологість?
5. Як змінюється відносна вологість при зміні температури?
6. Що таке насичена пара та від чого залежить її тиск?
7. Сформулюйте закон Дальтона для суміші газів.

3.5. Лабораторна робота «Визначення швидкості звуку у повітрі інтерференційним методом»

Мета роботи:

1. Визначити швидкість звуку в повітрі інтерференційним методом.
2. Ознайомитися з фізикою процесу поширення звукових хвиль у газовому середовищі.

Обладнання: прилад Квінке для дослідження взаємодії звукових хвиль, генератор електричних коливань звукового діапазону, осцилограф, система перетворення електричних сигналів у звукові та звукових сигналів у електричні (динамік та мікрофон, відповідно).

1. Ознайомлення з основами теорії поширення звуку

Як відомо з теорії інтерференції, результат лінійної взаємодії двох хвиль (тобто збільшення або зменшення амплітуди результуючої хвилі) залежить від різниці фаз, з якими ці хвилі приходять до точки їхньої взаємодії.

Інтерференція, що спостерігається при визначенні даним методом швидкості звуку, є наслідком взаємодії двох звукових монохроматичних хвиль з фіксованою частотою. В даній роботі вона реалізується у вигляді періодичної зміни величини тиску повітря вздовж об'єму металевої трубки, в якій ці хвилі поширюються. Загальну інтерференційну картину в цій трубці можна було б зареєструвати рухомими датчиками, але це технічно важко зробити. Значно простіше зробити нерухомий датчик, а натомість змінювати шлях, який проходять дві

монохроматичні хвилі від їхнього джерела до місця детектування їхньої лінійної взаємодії.

В даній роботі змінюється пройдений шлях однієї з цих двох хвиль. Вимірюючи відстань між двома сусідніми максимумами (або мінімумами) результуючої хвилі за допомогою нерухомого датчика, можна зробити висновок про довжину взаємодіючих хвиль.

Таким чином, експериментальний метод, що використано у даній роботі для визначення швидкості звуку v_s , базується на безпосередньому вимірюванні частоти ν та довжини хвилі λ звуку, які пов'язано формулою:

$$v_s = \lambda \nu. \quad (3.57)$$

В описаному досліді довжина хвилі λ визначається за наслідком лінійної взаємодії (інтерференції) двох звукових хвиль. Різниця ходу S між ними (від місця їхнього утворення до місця їхньої взаємодії та детектування), при якій спостерігається найменша (чи найбільша) інтенсивність звуку, як відомо з теорії інтерференції, пов'язана з довжиною взаємодіючих хвиль наступним співвідношенням:

$$S = N \cdot \lambda / 2, \quad (3.58)$$

де N – натуральне число. Ця різниця ходу визначається у досліді за допомогою приладу Квінке, опис якого подано нижче. Частота ν задається електричним генератором в діапазоні звукових частот 20÷20000 Гц.

Поширення звуку в повітрі, як свідчать експериментальні дані, досить точно описується адіабатичним процесом. Швидкість звуку при цьому приблизно дорівнює:

$$v_s = \sqrt{\gamma \cdot P / \rho}, \quad (3.59)$$

де γ – коефіцієнт Пуассона, ρ та P – густина та тиск повітря відповідно.

2. Опис лабораторного обладнання

До виходу звукового генератора, що задає частоту електричних коливань, підключено звичайний електродинамічний датчик, що перетворює ці електричні коливання на звукову хвилю. Цей датчик закріплено у трубці, по якій звукова хвиля йде від генератора до приладу Квінке.

Прилад Квінке (див. рис. 3.8) складається з двох U-подібних латунних трубок, покритих зверху шаром нікелю та вставлених одна в одну. Одна з трубок є нерухомою, а друга – рухомою; вона може частково висуватися з нерухомо закріпленої трубки. Переміщення цієї рухомої трубки здійснюється за допомогою стрижня з гвинтовою нарізкою та рукоятки. Разом із рухомою трубкою уздовж шкали, яку закріплено на спеціальній дерев'яній підставці, переміщується також і показчик відстані, на яку висуваються обидва кінця рухомої трубки (*зверніть на цю обставину додаткову увагу*).

У тому місці трубки, де звукова хвиля надходить до приладу Квінке, вона розділяється на дві хвилі, що рухаються по різних колінах приладу назустріч одна одній. Проти цього першого патрубку (місця, де відбувається утворення двох хвиль) знаходиться другий патрубок, в який вмонтовано мікрофон,

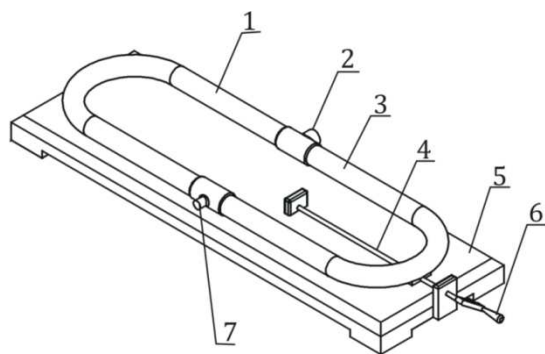


Рис. 3.8. Прилад Квінке. Цифрами позначено: 1 – U-подібна латунна нерухома трубка, 2 – електричний динамік, 3 – U-подібна латунна рухома трубка, 4 – стрижень з гвинтовою нарізкою, 5 – підставка, 6 – рукоять, 7 – мікрофон (для перетворення звукового сигналу в електричний)

який зв'язано з осцилографом. Призначення мікрофону полягає у реєстрації амплітуди результуючої хвилі та перетворенні звукового сигналу в електричний; далі цей електричний сигнал спостерігається за допомогою осцилографа. Відлік розмаху (амплітуди) звукової хвилі ведеться безпосередньо по шкалі на екрані осцилографа.

Знаючи, що швидкість звуку в повітрі за нормальних умов $v_s = 340$ м/с (це відомо з табличних даних, див. Розділ 4), а «розумна», тобто прийнятна з технічної точки зору величина довжини звукової хвилі, яку можна поміряти стандартною технічною лінійкою, становить величину $10 \div 30$ см, можна визначити діапазон частот, де слід виконувати дані експерименти. Це приблизно $1200 \div 4000$ Гц.

Відносна похибка визначення частоти звуку становить 2%, а абсолютна похибка при вимірюванні різниці ходу становить 1 мм, з цього видно, що відносна похибка визначення швидкості звуку $\Delta v_s / v_s$ не перевищить 10%.

Для визначення швидкості звуку шляхом дослідження інтерференції двох монохроматичних хвиль у приладі Квінке різниця ходу має скласти значення не менше ніж $3\lambda/2$, бо сусідні максимуми (або мінімуми, відповідно) інтерференційної картини знаходяться на відстані довжини хвилі. Таким чином, щоб у процесі досліджень впевнено зареєструвати або два сусідніх максимуми, або два сусідніх мінімуми, необхідно, щоб показчик різниці ходу міг переміститися на відстань $3\lambda/4$, що визначає найменшу довжину вимірювальної шкали, яку слід застосувати у цьому експерименті. Отже, довжина шкали має бути не менше, ніж $3\lambda/4 = 3v_s/(4\nu)$; для $\nu = 1700$ Гц це складає 15 см.

3. Порядок виконання роботи

1. Показчик приладу Квінке встановити на нуль шкали. Увімкнути звуковий генератор, якому слід дати 20 хвилин на прогрівання (якщо це прилад, побудований на електронних лампах), потім задати певне значення робочої частоти (рекомендуємо діапазон $2 \div 5$ кГц) та амплітуду вихідного сигналу (в межах $1 \div 5$ В).

2. Увімкнути блок живлення мікрофона та встановити напругу живлення 5 В.

3. Увімкнути осцилограф та отримати впевнене зображення досліджуваного сигналу. Амплітуда сигналу на етапі налаштування не повинна перевищувати 1/4 висоти екрану.

4. Обертанням рукоятки рухома трубка поступово виводиться з нерухомої трубки (максимальне значення показника n становить 160 мм). При цьому з кроком 2 мм вимірюють розмах результуючого сигналу на екрані осцилографа та відлік n_1 по шкалі. Для точки максимуму сигналу, що реєструється осцилографом, різниця ходу становить:

$$S_1 = \lambda. \quad (3.60)$$

5. Зсув трубки продовжують до краю, знаходячи наступний максимум електричного сигналу за допомогою осцилографа. При виявленні другого максимуму по шкалі визначається значення n_2 . Тоді відповідна різниця ходу дорівнює:

$$S_2 = 2\lambda. \quad (3.61)$$

Оскільки показчик різниці довжини *двох* труб у рухомому коліні приладу Квінке зсунувся на $(n_2 - n_1)$, то з рівнянь (3.61) та (3.60) одержуємо вираз для довжини звукової хвилі:

$$\lambda = 2(n_2 - n_1). \quad (3.62)$$

6. Обертаючи ручку, зафіксувати значення амплітуди сигналу для вказаних вище значень частот коливань на всій шкалі приладу Квінке. Отримані данні занести до таблиці, в якій: I – амплітуда сигналу, ΔI – апаратна помилка при вимірюванні амплітуди. За апаратну помилку вважати товщину променя на екрані осцилографа. Вигляд таблиці наведено нижче.

n , мм	$\nu=2000$ Гц		$\nu=2500$ Гц		$\nu=3000$ Гц		$\nu=5000$ Гц	
	I , В	ΔI , В	I , В	ΔI , В	I , В	ΔI , В	I , В	ΔI , В
0								
2								
4								
...								

7. Зменшити величину напруги до нуля, повернувши ручки проти годинникової стрілки в положення «0», вимкнути живлення усіх електричних приладів.

4. Обробка здобутих результатів вимірювань

1. За даними таблиці побудувати графіки залежності квадрата амплітуди результуючих звукових коливань від ходу показника приладу Квінке. З графіка визначити довжину звукової хвилі у повітрі.

2. За формулою (3.57) визначити швидкість звуку у повітрі для усіх вказаних частот коливань генератора за кімнатної температури, яка вимірюється настінним термометром.

3. Обчислити абсолютні та відносні похибки визначення швидкості звуку.

5. Представлення здобутих результатів

1. Представити графіки залежності квадрата амплітуди результуючих звукових коливань від ходу показника приладу Квінке.

2. Знайти швидкість звуку у повітрі за умов експерименту та обчислити її абсолютну й відносну похибки.

3. Знайти швидкість звуку у повітрі за нормальної температури.

4. Порівняти здобуті величини з табличними даними.

Контрольні питання

1. Пояснити залежність швидкості звуку від температури і від тиску газового середовища.

2. Чим поздовжні хвилі відрізняються від поперечних?

3. Пояснити механізм утворення звукової хвилі.

4. Вивести формулу для швидкості звуку в газах та у твердому тілі.

5. Яке співвідношення між швидкостями звуку та руху молекул середовища, в якому поширюється звукова хвиля?

6. Що таке довжина звукової хвилі та як вона пов'язана зі швидкістю поширення звуку?

7. Що таке частота звукової хвилі, які межі їхнього частотного діапазону?

3.6. Лабораторна робота «Визначення коефіцієнта теплопровідності металів»

Мета роботи: визначити коефіцієнт теплопровідності металу.

Обладнання: циліндричний стрижень металу, бокова поверхня якого обгорнута у теплоізолюючий матеріал. Система електронагрівання одного з країв досліджуваного металу, система водяного охолодження протилежного краю досліджуваного металу, система термометрів, що визначає перепад температури вздовж зазначеного металевго стрижня, а також на вході та на виході з системи охолодження стрижня.

1. Ознайомлення з основами класичної теорії теплопровідності

Явище теплопровідності полягає в тому, що кінетична енергія атомів та молекул, яка визначає температуру тіла в певній області цього тіла, передається атомам і молекулам у тих областях тіла, де температура нижча. При теплопровідності величина потоку тепла визначається різницею температури між різними областями тіла.

Найбільшу теплопровідність мають речовини, в яких тепло переноситься хаотичним тепловим рухом вільних електронів, що зумовлено їхньою малою масою та великим значенням коефіцієнта рухливості. Саме тому теплопровідність металів зазвичай висока. В нагрітій області металів значна кількість електронів бере участь в інтенсивному тепловому русі. Внаслідок активної взаємодії з електронами в холодних областях, вони передають їм свою теплову енергію, а окрім того, вони ще розсіюються на коливаннях кристалічної ґратки. Таким чином через зіткнення електронів інтенсивний тепловий рух із області металу, де температура є вищою, переноситься до областей, де температура є нижчою.

В діелектриках, де немає вільних електронів, тепло передається повільнішими коливаннями атомів. А гази, наприклад, повітря, мають ще менше значення величини теплопровідності, зважаючи на невелику густину молекул

у газах і доволі нечасті зіткнення між ними. В газах тепло найчастіше переноситься через утворення макропотоків речовини, тобто конвекцію. З огляду на це, добрими теплоізолюючими властивостями характеризуються матеріали, в яких багато порожнин, заповнених повітрям: вовна, вата, пінопласт тощо.

Теплопровідність – це не єдиний шлях, яким тепло передається від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою температурою. Теплопередача може також відбуватися за рахунок теплового випромінювання і конвекції. Різниця між теплопровідністю та конвекцією в тому, що при конвекції тепло переноситься разом із речовиною, а при теплопровідності переносу речовини немає.

Явище теплопровідності описується в межах феноменологічної моделі рівнянням (3.63), яке називають законом Фур'є. Кількісно теплопровідність характеризується коефіцієнтом теплопровідності κ , який входить до цього рівняння:

$$\vec{q} = -\kappa \cdot \nabla T, \quad (3.63)$$

де $\vec{q}$ – це густина теплового потоку, κ – це коефіцієнт теплопровідності, ∇T – це градієнт температури. За абсолютною величиною градієнт певної скалярної функції це міра її зміни у координатному просторі, яка відбувається на одиниці довжини простору. Для позначення градієнта використовують оператор Гамільтона ∇ :

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{e}_1 + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{e}_2 + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{e}_3. \quad (3.64)$$

Градієнт певної функції це векторна величина, напрямком якої визначається в кожній точці простору напрямком найшвидшої зміни функції. Форма запису градієнта залежить від системи координат. Густина теплового потоку задається формулою:

$$\vec{q} = \vec{W} / S, \quad (3.65)$$