

Лабораторне заняття 4. Особливості підготовки до проведення лабораторних робіт (робіт фізичного практикуму).

Завдання. Підготувати лабораторну роботу (бажано авторську) за обраною темою. Зробити методичний аналіз умінь та навичок, що розвиваються у процесі виконання лабораторної роботи.

Методичні матеріали

Приклад авторської роботи. ВИМІРЮВАННЯ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ



5.1. Теоретичні відомості.

Ми живимо на дні повітряного “океану”. Атмосферний тиск впливає на самопочуття людей, на деякі фізичні процеси. При зміні погоди змінюється і тиск повітря (тому про атмосферний тиск часто згадують у прогнозах погоди). Чим обумовлюється атмосферний тиск?

Розглянемо газ (повітря), який знаходиться у полі тяжіння. Якщо б *тепловий рух* молекул газу був відсутнім, то всі молекули під дією сили тяжіння “впали” б на Землю, і все повітря зібралось б тонким шаром на її поверхні. Якщо б не було *тяжіння*, але існував би тепловий рух молекул, всі частинки розлетілися б по світовому простору. Повітряна оболонка Землі (атмосфера) існує завдяки наявності одночасно і теплового руху молекул і сили тяжіння. При цьому в атмосфері встановлюється певний закон зміни тиску повітря з висотою.

Цей закон нескладно знайти. Як відомо, тиск повітря на деякій висоті дорівнює вазі вертикального стовпа повітря з площею перерізу 1 м^2 , який знаходиться над даним рівнем. При зміні висоти на dx тиск повітря змінюється на dp . При цьому dp характеризує різницю ваги стовпів повітря на висотах x та $x+dx$ (рис. 5.1), тобто дорівнює (з точністю до знака) вазі стовпа повітря висотою dx з площею перерізу 1 м^2 :

$$dp = -\rho g dx, \quad (5.1)$$

де ρ – густина повітря на висоті x ;

g – прискорення вільного падіння.

Знак “–” вказує на те, що при збільшенні висоти ($dx > 0$) тиск зменшується ($dp < 0$). Густина ρ газу, очевидно, дорівнює добутку маси m молекули на її концентрацію n : $\rho = mn$. З молекулярно-кінетичної теорії відомо, що $n = p/kT$ (де k – стала Больцмана, T – температура газу). Тому $\rho = mp/kT$, і формула (5.1) набирає вигляду:

$$dp = -\frac{mg}{kT} p dx.$$

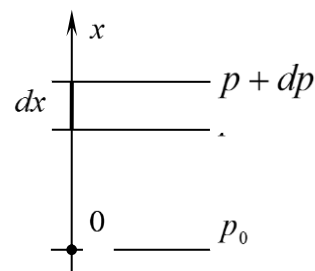


Рис. 5.1. Зміна тиску

Останнє рівняння можна переписати у вигляді:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{mg}{kT} dx.$$

Якщо вважати, що температура на всіх висотах однакова (що, взагалі-то кажучи, невірно), то після інтегрування цього рівняння отримуємо:

$$p = Ce^{-\frac{mg}{kT}x},$$

де C – постійна інтегрування.

Постійну C можна знайти з умови, що біля поверхні ($x = 0$) тиск дорівнює p_0 . Отримуємо $C = p_0$. Отже,

$$p = p_0 e^{-\frac{mg}{kT}x}. \quad (5.2)$$

Рівняння (5.2), яке встановлює закон зміни тиску з висотою, називається *барометричною формулою*. Згідно з цією формулою, атмосферний тиск зменшується з висотою за експоненціальним законом. Формулою (5.2) користуються також для визначення висоти над Землею. Для цього вимірюють тиск на даній висоті та на рівні моря. При цьому в рівнянні потрібно зробити поправку на температуру, яка, як правило, знижується з висотою, тоді як барометрична формула (5.2) нами була отримана у припущенні, що температура на будь-якій висоті однакова.

При отриманні (5.2) ми також вважали, що прискорення вільного падіння g є постійним, тобто не залежить від висоти x . Зрозуміло, що це має місце для порівняно невеликих значень x (порядку десятків кілометрів). Насправді ж

$$g = G \frac{M}{(R+x)^2}, \quad (5.3)$$

де G – гравітаційна стала;

M, R – відповідно маса та радіус Землі.

Нескладно показати, що з врахуванням (5.3) залежність тиску повітря від висоти має вигляд (тут g_0 – прискорення вільного падіння біля поверхні Землі):

$$p = p_0 e^{-\frac{mg_0 R}{kT} \left(1 - \frac{R}{R+x}\right)}.$$

З цієї формули випливає, на перший погляд, парадоксальний результат: навіть при нескінченному віддаленні від Землі ($x \rightarrow \infty$), атмосферний тиск не дорівнює нулю:

$$p_\infty = p_0 \exp\left(-\frac{mg_0 R}{kT}\right).$$

Зрозуміло, що це неможливо, бо число молекул є кінцевим, а об'єм Всесвіту нескінченний. Тому маємо припустити, що атмосфера Землі не перебуває в рівновазі. Так, атмосферний газ постійно розсіюється у світовий простір, проте доля таких частинок мізерна (при існуючому полі тяжіння Землі). Однак такий процес міг привести до втрати атмосфери, наприклад, Місяцем, якщо припустити, що він її колись мав.



5.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я . Виміряти атмосферний тиск у приміщенні шляхом прямих та непрямих вимірювань.

О б л а д н а н н я : барометр-анероїд; скляна трубка довжиною приблизно 30 см з пробкою; гумовий шланг довжиною приблизно 1,5 м; лійка скляна; лінійка вимірювальна 30 см; метр демонстраційний (або вимірювальна стрічка); штатив.



Рис. 5.2. Деякі пристрої, що використовуються при виконанні досліду

Вимірювання атмосферного тиску.

Прилади для безпосереднього вимірювання тиску називаються *манометрами*. Прилади, які спеціально призначені для вимірювання атмосферного тиску називаються *барометрами*. Барометром може бути рідинний манометр, який являє собою U – подібну трубку, яка частково заповнена ртуттю (або іншою рідиною). В одному з колін трубки створюють вакуум (це коліно закрите), інше – залишають відкритим (рис. 5.3). Різниця рівнів h в обох колінах безпосередньо дає тиск у міліметрах ртутного стовпчика.

Широке використання отримали (особливо у побуті) *барометри-анероїди* (“анероїд” – означає безрідинний). Чутливим елементом такого приладу є герметична камера (рис. 5.4), тиск повітря в якій дещо менший за атмосферний. Одна стінка камери кріпиться до корпусу приладу, а до іншої – через систему важелів прикріплено стрілку. Камера має змогу



Рис. 5.3. Модель рідинного манометра

змінювати свій об'єм при зміні атмосферного тиску, що спричиняє поворот стрілки приладу.



Рис. 5.4. Барометр-анероїд: (а) – схема приладу; (б) – герметична камера барометра

Виміряти атмосферний тиск можна і непрямим методом. Відомо, що термодинамічні параметри ідеального газу (тиск p , об'єм V та температура T) можна знайти з рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона-Менделєєва)

$$pV = \nu RT, \quad (5.4)$$

де ν – число молей газу;

R – універсальна газова стала.

Рівняння Клапейрона – Менделєєва виявляється справедливим і для досить розріджених реальних газів і виконується тим точніше, чим менший тиск газу. Так, згідно з експериментальними даними об'єм одного моля азоту при тиску 1 атм та температурі 0°C дорівнює $2,24 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$, а при тиску в 100 атм та при тій же температурі – $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ (що відрізняється від значення, отриманого з рівняння Клапейрона – Менделєєва, більш ніж на 7%).

Отже, для знаходження атмосферного тиску можна скористатися рівнянням стану ідеального газу. Для цього можна, наприклад, здійснити деякий процес над певною кількістю повітря та застосувати для початкового та кінцевого станів газу рівняння (5.4). З огляду на надане обладнання доцільно провести саме процес розширення (або стиснення) певної кількості повітря у скляній трубці при постійній температурі (адже температуру повітря виміряти нічим). При ізотермічному ($T = \text{const}$) процесі з ідеальним газом: $pV = \text{const}$ (закон Бойля – Маріотта). Звідки для двох різних станів газу з об'ємами V_1, V_2 та тисками p_1, p_2 :

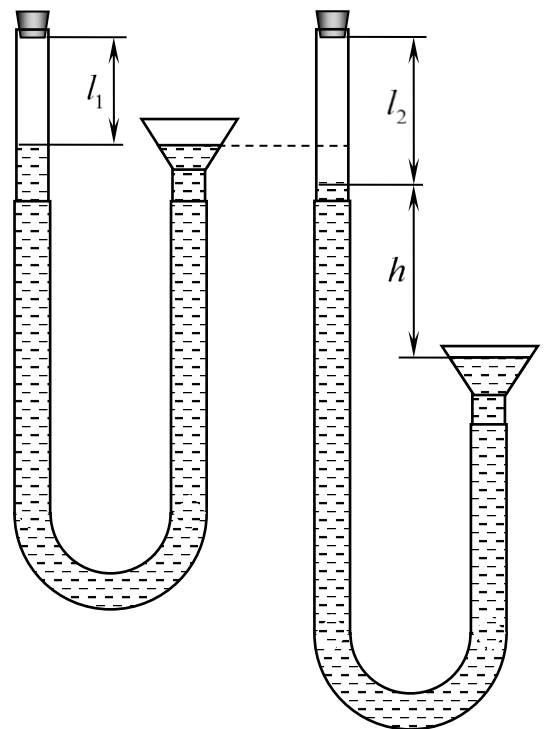


Рис. 5.5. Схема досліду з вимірювання атмосферного тиску

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (5.5)$$

Рис. 5.5 пояснює суть розглядуваного способу. Спочатку повітря у трубці знаходиться під атмосферним тиском p та займає об'єм V_1 . Вкінці розширення тиск зменшується на величину

$$\Delta p = \rho g h,$$

де h – різниця рівнів води у колінах трубки;

ρ – густина води,

при цьому новий об'єм повітря під пробкою V_2 . Рівняння (5.5), записане для початкового та кінцевого станів повітря у трубці, набуває вигляду:

$$p V_1 = (p - \rho g h) V_2.$$

Звідки:

$$p = \rho g h \frac{V_2}{V_2 - V_1}.$$

Оскільки $V_1 = S l_1$ і $V_2 = S l_2$, де S – площа внутрішнього отвору трубки, то

$$p = \rho g h \frac{l_2}{l_2 - l_1}. \quad (5.6)$$

Отже, для визначення атмосферного тиску необхідно виміряти початкову довжину l_1 стовпчика повітря у скляній трубці при однакових рівнях води у трубці і лійці, довжину l_2 стовпчика повітря у трубці після розширення (опускання лійки) та різницю рівнів h води у трубці та лійці.

Зазначимо, що для того, щоб розширення повітря у трубці було ізотермічним, процес повинен відбуватися досить повільно (в цьому випадку завдяки теплообміну з навколишнім середовищем температура повітря буде майже постійною).

Межу відносної похибки ε_p при визначенні тиску за формулою (5.6) можна оцінити так:

$$\varepsilon_p \equiv \frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta l_2}{l_2} + \frac{\Delta(l_2 - l_1)}{l_2 - l_1} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta l_2}{l_2} + \frac{\Delta l_2}{l_2 - l_1} + \frac{\Delta l_1}{l_2 - l_1}.$$

Оскільки $\Delta l_1 = \Delta l_2 \equiv \Delta l$, то

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta l}{l_2} + 2 \frac{\Delta l}{l_2 - l_1}.$$

Звичайно різниця $l_2 - l_1$ суттєво менша від l_2 і, тим більше, від h , тому третій доданок в останній формулі набагато перевищує суму перших двох. Тому для оцінки меж відносної ε_p та абсолютної Δp похибок отримуємо:

$$\varepsilon_p \approx 2 \frac{\Delta l}{l_2 - l_1}; \quad \Delta p = \varepsilon_p p. \quad (5.7)$$

У даній роботі оцінити точність отриманого (непрямим методом) значення атмосферного тиску p можна і шляхом безпосереднього його порівняння з показами барометра p_θ . В цьому випадку

$$\Delta p = |p_\theta - p|; \quad \varepsilon_p = \frac{\Delta p}{p_\theta}. \quad (5.8)$$

Підготовчі вправи.

Рівень А

1. Установіть відповідність між одиницями тиску.

1	1 атм (атмосфера фізична)	А	133,322 Па
2	1 мм рт. ст. (1 Торр)	Б	101,325 кПа
3	1 бар	В	100 Па
4	1 ат = 1 кгс/см ² (атмосфера технічна)	Г	98,0665 кПа
		Д	10 ⁵ Па
2. Який тиск і температура називаються нормальними?
А. 20 °С; 760 мм рт. ст. Б. 20 °С; 100 мм рт. ст.
В. 0 °С; 100 мм рт. ст. Г. 0 °С; 760 мм рт. ст.
3. Який вигляд має рівняння стану ідеального газу?
А. $p = nkT$. Б. $p = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot \overline{v^2}$. В. $\frac{m_0 \cdot \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT$. Г. $pV = \frac{m}{M} RT$.
4. Яке рівняння виконується при ізотермічному процесі з ідеальним газом?
А. $\frac{p}{T} = \text{const}$. Б. $\frac{V}{T} = \text{const}$. В. $p \cdot V = \text{const}$. Г. $\frac{p}{V} = \text{const}$.
5. При ізотермічному стисненні газу його об'єм зменшився з 6 л до 2 л, а тиск підвищився на 40 кПа. Знайдіть початковий тиск.
А. 20 кПа. Б. 40 кПа. В. 60 кПа. Г. 80 кПа.
6. Оцініть тиск на дні найглибшої на Землі океанської впадини глибиною приблизно 11 км. Відповідь виразіть у атм.
А. Приблизно 10 атм. Б. Приблизно 100 атм.
В. Приблизно 1 000 атм. Г. Приблизно 10 000 атм.

Рівень Б

7. Виведіть співвідношення між 1 мм рт. ст. та 1 Па.
8. Який тиск показує барометр на рис. 5.1?
Відповідь дайте у мм рт. ст. та Па.
9. На рис. 5.6 наведено водяний манометр (одна його поділка відповідає 10 мм). Визначте:
 - ціну поділки манометра;
 - тиск повітря у лівому коліні манометра, якщо атмосферний тиск під час досліду становив 748 мм рт. ст.
10. Як ви вважаєте, чому у розглянутому методі вимірювання атмосферного тиску було використано саме розширення (а не стиснення) повітря?
11. Отримайте самостійно формулу (5.6).
12. Обґрунтуйте формули (5.7) та (5.8).
13. Отримайте формули для оцінки похибок ε_p та Δp методом границь.
14. Запропонуйте способи підвищення точності вимірювання тиску повітря p у розглянутому методі.

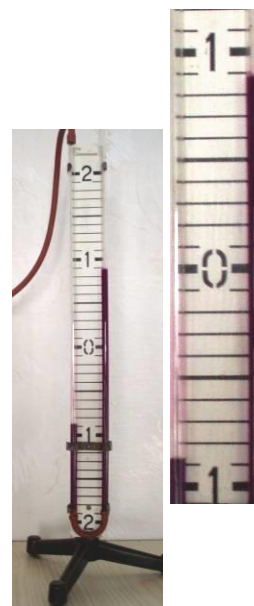


Рис. 5.6. До завдання 9



5.3. Додаткові творчі завдання.

Завдання для формування банку ідей.

1. Як за допомогою гумової трубки перелити воду з бочки у відра?
2. Як виміряти атмосферний тиск за допомогою довгої скляної трубки, лінійки та води?
3. Аквалангісту потрібно визначити глибину річки у певному її місці. Як йому це зробити, якщо у наявності є лише циліндрична мензурка? Чи зміг би він виконати завдання, якщо б мензурка була конічною?
4. Як за допомогою циліндричної посудини з водою та лінійки визначити тиск всередині перегорілої лампи розжарювання?
5. Як визначити тиск всередині тієї ж лампи за допомогою посудини з водою та важків?
6. Як визначити тиск у футбольному м'ячі за допомогою терезів, важків та лінійки?



Експериментальні та тренувальні винахідницькі задачі.

Експериментальні задачі.

1. Визначте густину повітря у приміщенні. *Обладнання:* куля для зважування повітря, терези, різноважки, насос Комовського, посудина місткістю 1,5÷2 л з водою, мірний циліндр місткістю 1000 мл.
2. Виміряйте двома способами атмосферний тиск. *Обладнання:* скляна трубка із внутрішнім діаметром 1,2 мм, пробірка, лінійка, пластилін, склянка з водою.
3. Визначте молярну масу повітря. *Обладнання:* куля для зважування повітря, терези, різноважки, насос Комовського, гумова трубка, затискачі, термометр, манометр.

4. Визначте тиск, який можна створити, стискаючи руками пластикову пляшку з водою. *Обладнання:* пластикова пляшка з водою, пробірка, міліметровий папір, скотч, ножиці, барометр.

5. Визначте тиск повітря у повітряній кулі. *Обладнання:* повітряна куля, шматок органічного скла, набір тягарів відомої маси, аркуш міліметрового паперу, фломастер.

Тренувальні винахідницькі задачі.

1. Інколи трапляється, що вимірюване значення тиску виходить за межі чутливості манометра. На рис. 5.7 наведено схему вдосконаленого приладу: звичайний манометр замінено на систему двох скляних трубок, які з'єднані між собою гумовим перехідником; при цьому одне з колін такої U-подібної трубки розташовується під деяким кутом α до горизонталі.

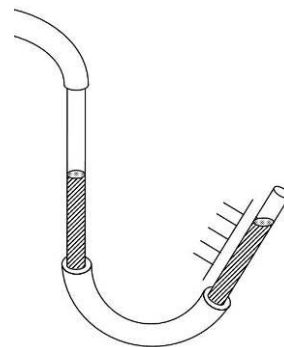


Рис. 5.7. Схема удосконаленого рідинного манометра

Поясніть, за рахунок чого досягається збільшення чутливості у такому приладі. У скільки разів збільшується чутливість, якщо $\alpha = 30^\circ$? Запропонуйте інші способи підвищення чутливості манометрів.

2. У даній роботі висвітлено непрямий спосіб вимірювання атмосферного тиску. Запропонуйте пристрій для безпосереднього визначення тиску повітря, принцип дії якого базувався б на розглянутому способі.

3. Запропонуйте спосіб встановлення двох предметів в різних кімнатах на одному і тому самому горизонтальному рівні. З подібною задачею стикаються, наприклад, при встановленні радіаторів системи водяного опалення у будівлі.



Зробіть своїми руками!

Як відомо, швидкість витікання рідини з отвору біля дна відкритої посудини непостійна: із опусканням рівня рідини у посудині – швидкість зменшується. Маріотт запропонував, як досягти рівномірного витікання рідини. “Посудина Маріотта” (рис. 5.8) складається з ємності, яка закрита пробкою; через пробку пропущено вузьку відкриту з обох боків трубку; в ємності біля дна зроблено отвір.

Виготовте “посудину Маріотта” (для цього можна використати, наприклад, пластикову пляшку та трубку для напоїв) та дослідіть його роботу.

Дайте відповіді на запитання:

- У чому полягає принцип дії пристрою?
- Як можна змінювати швидкість витікання рідини у “посудині Маріотта”?



Рис. 5.8. Посудина Маріотта

(лінійна модель)

- Як припинити витікання рідини?
- Де можна застосувати такий пристрій?