

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

С. О. Подласов

ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ТА МОЛЯРНОЇ МАСИ ПОВІТРЯ

Лабораторний практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Атомні електричні станції»
спеціальності 143 атомна енергетика

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2024

УДК: 53:[004.3:681.586](076.5)

П44

Автор: *Подласов Сергій Олександрович*, старший викладач

Рецензент *Решетняк С. О.*, доктор фіз.-мат наук, професор, завідувач кафедри загальної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Савченко Д. В.*, доктор фіз.-мат наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 3 від 09.01.2025 р.)
за поданням вченої ради фізико-математичного факультету
(протокол № 12 від 13.11.2024 р.)*

П44 Подласов С.О.

Визначення густини та молярної маси повітря. [Електронний ресурс] : лаб. практикум : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Атомні електричні станції» спец. 143 атомна енергетика / С. О. Подласов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 8 с.

... Викладено теоретичні основи та методику проведення визначення густини та молярної маси повітря за результатами дослідження залежності тиску від висоти за допомогою мобільного гаджета. Значну увагу приділено методиці статистичної обробки великих масивів випадкових значень тиску за допомогою MS Excel та Google таблиць. Вказівки до лабораторної роботи призначені для здобувачів освіти ступеня бакалавр за спеціальністю 143 атомна енергетика і може бути корисним для студентів першого курсу всіх спеціальностей.

УДК 53:[004.3:681.586](076.5)

Реєстр. № НП 24/25-156. Обсяг 0,2 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© С. О. Подласов, 2024
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

Визначення густини та молярної маси повітря

Мета роботи: визначення густини та молярної маси повітря за результатами дослідження залежності тиску від висоти.

Обладнання: побутовий термометр, мірна лінійка (рулетка), смартфон, в якому наявний датчик тиску; встановлений в смартфоні вільно поширюваний застосунок PhyPhox.

Зауваження. Перевірити, чи є смартфоні датчик тиску можна за параметрами, які надає виробник, або скориставшись вільно поширюваним застосунком Sensors Multitool (або аналогічного), завантаживши його з Google Play Market.

1. Стислі теоретичні відомості

У загальному випадку залежність тиску повітря від висоти в ізотермічній атмосфері описується барометричною формулою

$$P = P_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}, \quad (1)$$

де P_0 – тиск повітря на висоті $h = 0$, яка прийнята за початок відліку, M – молярна маса.

При невеликих висотах (наприклад, $h = 100$ м) і табличному значенні молярної маси 28,9 г/моль та температурі 290 К показник степеню експоненти

$$\frac{28,9 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 100}{8,31 \cdot 290} \approx 0,01 \ll 1.$$

За умови малості показника степені експоненти за формулою наближеного обчислення $e^{-\frac{Mgh}{RT}} \cong 1 - \frac{Mgh}{RT}$, і тоді формулу (1) можна записати як

$$P = P_0 \left(1 - \frac{Mgh}{RT} \right)$$

При підйомі з висоти h_1 до h_2 тиск змінюється від P_1 до P_2 , отже

$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_0 \left(\frac{Mgh_2}{RT} - \frac{Mgh_1}{RT} \right) = P_0 \frac{Mg}{RT} (h_2 - h_1).$$

Якщо вважати $h_1 = 0$, де тиск $P_1 = P_0$, і визначити тиск $P_2 = P$ на висоті $h_2 = h$, то

$$P_0 - P = P_0 \frac{Mgh}{RT}. \quad (2)$$

Скориставшись рівнянням Клапейрона-Менделєєва, густину газу $\rho = m/V$ можна записати як

$$\rho = \frac{PM}{RT}. \quad (3)$$

При невеликих змінах висоти густина повітря практично незмінна, тому $P_0 M / RT = \rho$ і тоді вираз (2) набуває вигляду

$$P_0 - P = \rho gh \rightarrow P = P_0 - \rho gh. \quad (4)$$

З формули (4) очевидно, що при малих змінах висоти залежність тиску $P(h)$ є лінійною функцією, а кутовий коефіцієнт графіка цієї залежності $\Delta P/\Delta h = \rho g$. Отже,

$$\rho = \frac{\Delta P}{g\Delta h}. \quad (5)$$

За визначеним значенням ρ , скориставшись формулою (3) і взявши тиск P_0 , одержимо молярну масу повітря:

$$M = \frac{\rho RT}{P_0}. \quad (6)$$

2. Вказівки до виконання дослідження

Дослідження залежності тиску від висоти можна проводити у двох- або більше поверхових будинках.

1. Виміряйте висоту сходинки в будинку і запишіть її у табл. 1.
2. Зафіксуйте температури в місці, де проводиться дослідження. Результат запишіть у табл. 1.
3. Вимірюйте тиск поступово піднімаючись, або спускаючись на 5 – 6 сходинок і записуйте кількість сходинок. У багатоповерхових будинках (9 поверхів, чи більше) вимірювання можна проводити на окремих поверхах. Для вимірювання тиску треба:
 - 3.1. Запустити застосунок PhyPhox і вибрати у меню пункт «Тиск» (“Pressure”) і режим «Графік» (“Graph”).
 - 3.2. Натиснути символ запуску вимірювання тиску (трикутник) і протягом 20 – 30 с фіксувати тиск. Далі натиснути символ «стоп» (дві вертикальні паралельні риски). *При вимірюванні завжди треба намагатися тримати смартфон на однаковій висоті відносно тулуба експериментатора.*
 - 3.3. Натиснути три крапки у верхньому правому кутку екрана і вибрати «Експортувати дані» (“Export data”) у формат файлу .xls або .csv, в якому вони будуть передані на комп’ютер. Надіслати дані, користуючись зручним каналом зв’язку.
 - 3.4. Після завершення передачі даних натисніть кнопку «Скид даних» (зображення смітцевої корзини на екрані).
4. Пункти 3.2 – 3.4 виконувати на кожній висоті.

Табл. 1.

Висота однієї сходинки h , см	Похибка висоти сходинки, σ_h , см	Температура повітря	
		t , °	T , К

Табл. 2

№ досліджу	Кількість сходинок над/під початковим рівнем	Висота над/під початковим рівнем h , м	Тиск, P , Па	Похибка у визначенні тиску
1	0	0		
2				

3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Зауваження. Заповнювати всі рядки таблиці 2 не обов'язково, достатньо 8 – 10 вимірювань тиску на відповідних висотах.

$$\rho = \quad \text{кг/м}^3; \quad M = \quad \text{кг/моль}.$$

3. Обробка результатів вимірювань

Обробку даних дослідження можна проводити, використавши різні програмні продукти для роботи з великими масивами даних, або ж «вручну». Використання MS Excel, Google-таблиць описано в Додатку 1, а спеціальної програми, розміщеної на сайті physics.zffft.kpi.ua в Додатку 2.

1. Визначте середнє значення тиску і середню квадратичну похибку для кожного значення висоти, на якій проводилися вимірювання. Результати розрахунків занесіть в табл. 2.
2. Побудуйте графік залежності обчисленого середнього значення тиску від висоти. (Графік можна будувати вручну, або користуючись Excel. Побудова графіка і подальший аналіз результатів при використанні MS Excel описані в Додатку 3).
3. Визначте кутовий коефіцієнт прямої, яка описується виразом (5), і за формулою (6) обчисліть густину повітря.
4. Скориставшись формулою (6) обчисліть молярну масу повітря.

4. Контрольні запитання

1. Поясніть причини зміни тиску повітря при зміні висоти над початковим рівнем.

2. Виведіть барометричну формулу для ізотермічної атмосфери і однорідного поля сили тяжіння.
3. Що таке функція розподілу? Що описує функція розподілу Больцмана та Максвелла-Больцмана?
4. Як за експериментальними даними в дані роботі визначається густина та молярна маса повітря?
5. Чому вимірювання тиску слід проводити при зміні висоти на 50 – 60 см?
6. Що таке вибіркове середнє і вибірковий стандарт середнього?

5. Література

1. Кучерук І.М. Загальний курс фізики. Т.1. / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик – Київ : “Техніка”, 1999.
2. Шиманський Ю. І. Молекулярна фізика: навчальний посібник. // Ю. І. Шиманський, О. Т. Шиманська Київ : Вид. дім «Києво-Могилянська академія». — 2007. С. 120-128.

Додаток 1. Використання MS Excel та Google таблиць для обробки даних експерименту

A. Таблиця Excel

1. Усі дані тиску на певній висоті, одержані із застосування PhyPhox, занесіть в одну колонку таблиці. Виберіть комірку, в яку буде записано середнє значення тиску для даної висоти.
2. У меню виберіть «Формули» → «Інші функції» → «Статистичні» → «Срзнач»
3. У віконці, що з'явилося, введіть номери першої та останньої комірок колонки, розділивши їх символом « : », для яких буде визначатися середнє значення (рис. Д.1) і натисніть «ОК»
4. Виберіть комірку, в яку буде записано середнє квадратичне відхилення. У меню виберіть «Формули» → «Інші функції» → «Статистичні» → «Станд.відх», так само як у п.3 вкажіть діапазон комірок і натисніть «ОК».
5. Дані, одержані в п.3 та п.4 запишіть у табл. 2.

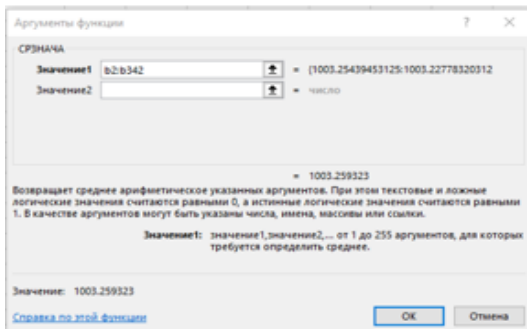


Рис. Д.1. Використання таблиці MS Excel

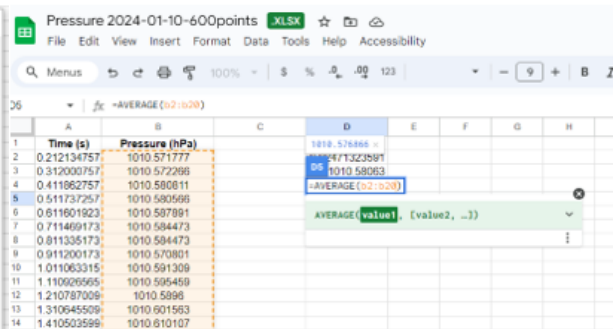


Рис. Д.2. Використання таблиці Google

Б. Google таблиці

1. Завантажте результати вимірів тиску в таблиці Google.
2. Виберіть комірку в яку буде записано середнє значення. Далі, у рядку меню виберіть «Insert» → «Σ Function» → «Statistical» → «AVERAGE». У віконці, що з'являється, вкажіть першу і останню комірку діапазону, для якого буде визначатися середнє, розділивши їх символом « : » (рис. Д.2) і натисніть «Enter».
3. Виберіть комірку, в яку буде записана стандартна похибка. У рядку меню виберіть «Insert» → «Σ Function» → «Statistical» → «STDEV». У віконці, що з'являється, вкажіть першу та останню комірку діапазону, для якого визначається стандартна похибка, розділивши їх символом « : » і натисніть «Enter».
4. Результати обчислень занесіть у табл.2.

Додаток 2. Використання програми статистичної обробки даних

1. Експериментальні дані тиску для кожної висоти запишіть в окремі файли форматів txt або csv.
2. Перейдіть за посиланням: <http://physics.zffft.kpi.ua/mod/page/view.php?id=890> (посилання доступне для зареєстрованих користувачів).
3. Виберіть, дані якого будуть опрацьовуватися, і завантажте його і натиснути кнопку «Почати аналіз».
4. У спливаючому віконці виберіть кількість значень тиску, які будуть опрацьовані (можна брати від 50 до 999. Рекомендована кількість від 100 до 200).
5. Погодитися з усіма пропозиціями програми, натискаючи ОК.
6. Запишіть у табл.2 виведені на екрані результати аналізу.

Додаток 3. Побудова графіка в MS Excel

Для відображення залежності $y(x)$ в MS Excel зручно користуватися точковою діаграмою. Для її побудови

- 1) заповніть у таблиці дві колонки: перша величини x , друга – відповідні x величини y . У першому рядку можна вказати назви величин (рис. Д.3 А);

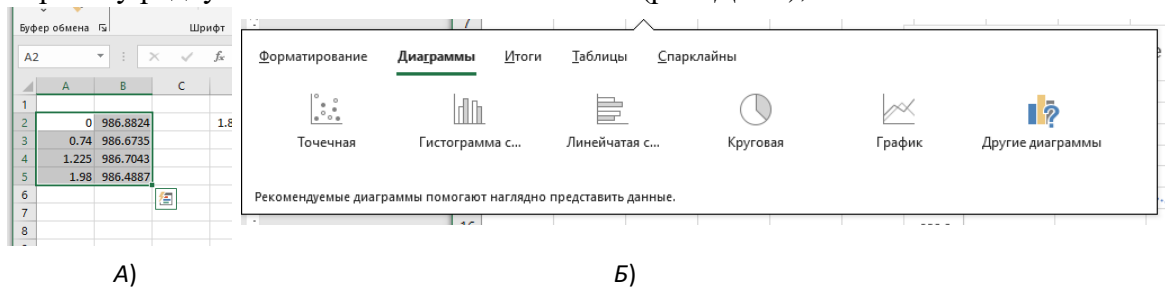


Рис. Д.3. Побудова графіка з використанням MS Excel

- 2) виділіть в обох колонках комірки, значення в яких будуть використані для побудови графіка, в нижній частині виділеного діапазону натисніть прямокутник і виберіть побудову діаграми «Точкова» (рис. Д.3 Б).
- 3) на одержаній точковій діаграмі натисніть праву кнопку миші на будь-якій точці і виберіть опцію «Побудувати лінію тренду». Можна також поставити галочку у віконці «Показати рівняння на графіку».