

Непряме вимірювання універсальної газової сталої в шкільній лабораторії як реалізація STEM на уроках фізики в Новій українській школі

У сучасному бурхливому світі відбувається безліч динамічних процесів, які безпосередньо чи опосередковано впливають на життя кожної людини. Зараз величезне значення має вміння швидко адаптуватися до сьогоденних викликів і оперативно їх долати, швидко реагувати на зміну умов, розвивати свої здібності та поповнювати власний арсенал новими знаннями та вміннями. З метою адаптації навчального процесу до вимог сучасного світу ще у 2018 році в Україні було запроваджено нову концепцію реформи освіти – «Нову українську школу». НУШ – це школа, де прислухаються до думки дитини, не карають її за помилки, вчать критично мислити, дають не тільки знання, але й уміння застосовувати їх у житті, тут створюється нове освітнє середовище, в центрі уваги якого знаходиться учень з усіма його перевагами та недоліками, його власні успіхи та динаміка розвитку.

Невід'ємною складовою сучасної школи має бути отримання наукових знань у ході практичної діяльності – це впливає вже із самої концепції НУШ. І, мабуть, найкращим шляхом в досягненні цієї мети є STEM-підхід до організації процесу навчання, що передбачає тісне поєднання науки, технологій, інженерії та математики в єдиному нерозривному концепті, яким просочується увесь навчальний процес. Відтак, НУШ та STEM передбачають активне навчання, рух, динаміку, взаємодію тощо, та повністю заперечують пасивні ролі здобувачів освіти: практичний підхід – ключ до майбутнього успіху та формування належних особистих якостей майбутніх успішних фахівців. Тому надзвичайно важливе значення має вдосконалення вже наявних практичних робіт, їх актуалізація, розробка і впровадження нових експериментальних робіт та проєктів. І в першу чергу це має відбуватися при вивченні як окремих предметів природничого циклу (фізика, хімія, біологія, географія тощо), так і їх інтегрованих курсів.

В контексті становлення НУШ та розбудови освітнього STEM-простору пропонуємо нове експериментальне дослідження, виконуючи яке учні зможуть не

тільки познайомитися із універсальною газовою сталою, яка має важливе практичне значення, поповнити свої знання та продовжити розвивати предметні навички, але й долучитися до справжнього наукового дослідження, що передбачає проведення натурального експерименту та належний аналіз із використанням сучасних наукових методів. Експеримент передбачає вимірювання залежності тиску деякої порції повітря в закритій ємності при зміні об'єму, побудову апроксимуючої прямої, визначення параметрів отриманої залежності за методом найменших квадратів та стандартну оцінку неточностей (похибок). При цьому вважаю доцільним опустити складні математичні викладки та залишити їх для майбутніх студентів технічних ВНЗ чи факультетів фізико-математичного профілю, а натомість скористатися стандартним інструментарієм електронних таблиць.

Основною метою експерименту є непряме вимірювання значення універсальної газової сталої R та оцінка неточності вимірювань. Для проведення дослідження щонайменше необхідно мати закриту ємність змінного об'єму (шприц) та прилад для вимірювання тиску (манометр). За можливості вимірювати температуру повітря всередині закритої ємності змінного об'єму точність експерименту можна дещо підвищити, однак при достатньо повільному темпі виконання роботи можна вважати, що температура повітря залишається незмінною і увесь час дорівнює температурі навколишнього повітря.

Отже, нехай в закритій ємності змінного об'єму, що сполучена з манометром (див. рис. 1), міститься деяка початкова маса m_0 повітря, яка займає деякий початковий об'єм V_0 (який враховує не тільки початковий об'єм повітря в самій ємності, а також і об'єм сполучних трубок та манометра).



Рис. 1 Принципова будова експериментальної установки

За рівнянням Менделєєва-Клапейрона можемо записати рівність:

$$pV = \frac{m_0}{M} RT, \text{ де } p - \text{ тиск повітря всередині ємності (за манометром),}$$

V - об'єм повітря в ємності; m_0 - маса повітря в ємності (якщо система герметична, то маса m_0 повітря в ній є величина постійна і визначається лише початковими умовами проведення експерименту), $M = 0,029 \text{ кг/моль}$ - молярна маса повітря; R - універсальна газова стала (теоретичне значення універсальної газової сталої становить $R_{теор} = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ і саме це значення будемо шукати під час експерименту); T - абсолютна температура повітря.

Враховуючи той факт, що мірна ємність з'єднується із манометром системою трубок, які разом із манометром також мають свій власний невідомий об'єм V_x , заповнений повітрям, то для повного значення внутрішнього об'єму системи можемо записати:

$V = V + V_x$, де V - об'єм мірної ємності (за шкалою); V_x - невідомий власний об'єм з'єднувальних трубок, манометра тощо.

Масу повітря в системі на початку експерименту можемо визначити наступним чином:

$m_0 = \rho_0(V_0 + V_x)$, де ρ_0 - густина повітря на початку експерименту; V_0 - початковий об'єм повітря в мірній ємності.

Густина ρ_0 повітря можна визначити за відповідною таблицею довідника, або ж за формулою, яку легко отримати з рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$\rho_0 = 0,00348 \frac{p_0}{T_0}, \text{ де } p_0 - \text{атмосферний тиск на початку експерименту, Па;}$$

T_0 - температура повітря в кімнаті на початку експерименту, K .

Таким чином, з рівняння Менделєєва-Клапейрона, можемо записати рівність:

$$p(V + V_x) = \frac{\rho_0(V_0 + V_x)}{M} RT;$$

Якщо проводити експеримент поволі та уникати зайвих змін температури повітря всередині системи, то можемо вважати, що температура повітря залишається постійною:

$$T = T_0;$$

$$p(V + V_x) = \frac{\rho_0(V_0 + V_x)}{M} RT_0;$$

Для зручності подальшого аналізу отримаємо співвідношення між об'ємом V мірної посудини та оберненим тиском повітря в ній $\frac{1}{p}$:

$$V + V_x = \frac{\rho_0(V_0 + V_x)RT_0}{M} \cdot \frac{1}{p};$$

$$V = \frac{\rho_0(V_0 + V_x)RT_0}{M} \cdot \frac{1}{p} - V_x;$$

Отримане співвідношення можна розглядати як функціональну залежність $V\left(\frac{1}{p}\right)$, що має вигляд лінійної залежності виду $y(x) = kx + b$, де $y = V$ - ордината,

$x = \frac{1}{p}$ - абсциса, k - кутовий коефіцієнт, b - вільний член:

$$\begin{cases} k = \frac{\rho_0(V_0 + V_x)RT_0}{M}, \\ b = -V_x; \end{cases}$$

Очевидно, що отримавши за експериментальними даними рівняння апроксимуючої прямої $V\left(\frac{1}{p}\right)$ та встановивши значення кутового коефіцієнту k і вільного члена b (див. рис. 2), можемо розрахувати експериментальне значення універсальної газової сталої:

$$R = \frac{kM}{\rho_0(V_0 + V_x)T_0} = \frac{kM}{\rho_0(V_0 - b)T_0};$$

Для перевірки гіпотези було зібрано експериментальну установку, яка складалась зі звичайного шприца з'єданого трубкою з манометром (див. рис. 1), та проведено експеримент, результати вимірювань під час якого наведено в табл. 1:

Таблиця 1

Результати натурального експерименту

№	1	2	3	4	5
$p, \text{кПа}$	197,20	101,29	85,18	68,84	51,95
$\frac{1}{p}, (\text{кПа})^{-1}$	0,0051	0,0099	0,0117	0,0145	0,0192
$V, \text{мл}$	5	10	12	15	20

Оскільки експеримент розпочинався при початковому значенні об'єму повітря в шприці 10 мл при тиску 101,29 кПа за температури в кімнаті +26°C, то:

$$V_0 = 10 \text{ мл};$$

$$p_0 = 101,29 \text{ кПа};$$

$$T_0 = 26 + 273 = 299 \text{ К};$$

Густина повітря на початок експерименту:

$$\rho_0 = 0,00348 \cdot \frac{101,29 \cdot 10^3 \text{ Па}}{299 \text{ К}} \approx 1,179 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

Залежність $V\left(\frac{1}{p}\right)$ за даними експерименту

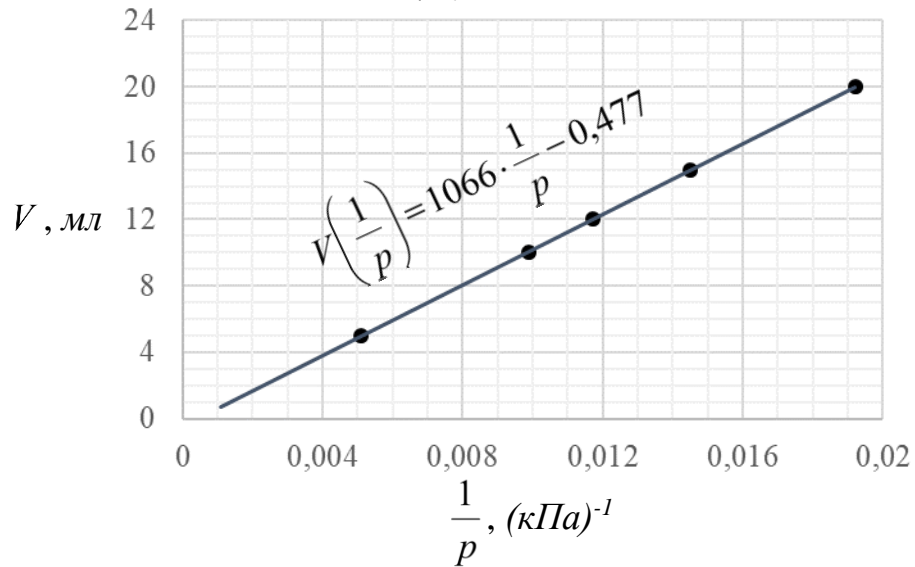


Рис. 2 Побудова лінії тренду засобами електронних таблиць

Маємо:

$$k = 1066 \text{ кПа} \cdot \text{мл};$$

$$b = -0,477 \text{ мл};$$

Експериментальне значення універсальної газової сталої:

$$R = \frac{kM}{\rho_0(V_0 - b)T_0} = \frac{1066 \text{ кПа} \cdot \text{мл} \cdot 0,029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{1,179 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot (10 + 0,477) \text{ мл} \cdot 299 \text{ К}} \approx 0,00837 \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} =$$

$$= 8,37 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}};$$

Відносно теоретична неточність, в даному випадку, становить:

$$\delta = \frac{|R - R_{\text{теор}}|}{R_{\text{теор}}} \cdot 100\% = \frac{|8,37 - 8,31|}{8,31} \cdot 100\% \approx 0,7\% ;$$

Звісно можна доповнити розрахунки визначенням відносної неточності ε експерименту, однак це може значно ускладнити експериментальну роботу. Отож переконаний, що відносна неточність можна пропонувати для розрахунків у вищій школі, або ж за наявності вільного часу в профільній старшій школі:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2};$$

В класах рівня стандарт можна обмежитися лише пошуком апроксимаційної прямої, розрахунком експериментального значення універсальної газової сталої R та його порівнянням з теоретичним значенням $R_{теор}$.

Таким чином, описаний в цій статті метод непрямого вимірювання універсальної газової сталої R в шкільній лабораторії можна рекомендувати як достатньо науковий і водночас простий експеримент до його застосування на уроках фізики чи в позаурочний час, що повністю відповідає концепції STEM-освіти та методологічним засадам Нової української школи, а отримані в ході натурального експерименту результати свідчать про його достатню точність і можливість розвивати компетентності майбутніх науковців-інженерів та відповідний стиль мислення в процесі практичної роботи здобувачів освіти.