

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

О.О. Штофель

Визначення універсальної газової сталі

Лабораторний практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Моделювання фізичних процесів»
спеціальності Е5 Фізика та астрономія

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2025

УДК 53.02 :533.1
Ш92

Автор: *Штофель Ольга Олександрівна*, канд. техн. наук.

Рецензент *Красікова І.С.*, канд. фіз.-мат. наук., Інститут проблем матеріалознавства ім.І.М.Францевича Національної академії наук України

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

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 9 від 26.06.2025 р.)
за поданням вченої ради фізико-математичного факультету
(протокол № 7 від 04.06.2025 р.)*

Штофель О.О.
Ш92 Визначення універсальної газової сталої [Електронний ресурс] : лаб. практикум: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Моделювання фізичних процесів» спец. Е5 Фізика та астрономія/ О.О. Штофель ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 12 с.

Викладено теоретичні основи та методику визначення газової сталої за результатами дослідження зміни маси при зміні тиску повітря у колбі. Методичний матеріал до лабораторної роботи призначені для здобувачів освіти ступеня бакалавр за спеціальністю Е5 Фізика та астрономія. Лабораторний практикум також може бути корисним для малих груп (до 10 осіб) при виконанні лабораторних робіт з курсу молекулярної фізики та термодинаміки для здобувачів освіти ступеня бакалавр за іншими технічними, інженерними спеціальностями.

УДК 53.02:533.1

Реєстр. № НП 24/25-598. Обсяг 0,35 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.

©О.О. Штофель, 2025
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

Лабораторна робота. Визначення універсальної газової сталої

Мета роботи: вивчити рівняння стану ідеального газу, визначити універсальну газову сталу.

Обладнання: скляна колба, вакуумметр, ваги, шланг, вакуумний насос.

Теоретичні відомості

Параметри стану, рівняння стану

За не дуже високих тисків, але досить високих температур газ можна вважати ідеальним.

Газоподібний стан є найпростішим з усіх станів, у яких може перебувати будь-яка речовина. Стан усякого тіла (або системи тіл) у молекулярній фізиці визначається чисельними значеннями деяких змінних величин, що називаються параметрами стану.

Такими параметрами для газів є тиск P , об'єм V і температура T . Виявляється, що ці параметри не можуть набувати довільних значень, а закономірно пов'язані між собою.

Рівняння, що встановлює зв'язок між параметрами стану, називається рівнянням стану [1].

Найпростіший вигляд мають рівняння стану ідеальних газів. Ідеальним називається газ, між молекулами якого відсутні сили тяжіння, а їхнє зіткнення відбувається так само, як зіткнення пружних кульок, що зникають малих розмірів. Досвід показує, що всі гази при досить малих тисках і не надто низьких температурах за своїми властивостями близькі до ідеальних.

Параметри стану ідеального газу пов'язані рівнянням стану Менделєєва-Клапейрона [2]:

$$pV = \frac{m}{\mu}RT = \nu RT,$$

де P - тиск газу, V - об'єм газу, m - маса газу, μ - молярна маса газу; R - універсальна газова стала ($R=8,31$ Дж/моль·К), T - абсолютна температура газу, ν - кількість молів газу.

Із рівняння Менделєєва-Клапейрона можна отримати формулу для універсальної газової сталої:

$$R = \frac{PV\mu}{mT}$$

Якщо вимірювання тиску P , об'єму V , температури T газу, тобто параметрів газу, що входять до формули, не спричиняє особливих труднощів, то визначення маси газу виконати практично неможливо, тому що зважування газу можливе тільки разом із об'ємом, у якому він перебуває [3]. Тому для визначення R необхідно виключити масу об'єму, в даній роботі – скляної кулі. Це можна зробити, розглянувши рівняння стану двох мас m_1 і m_2 одного й того самого газу за незмінних температури T і об'єму V .

Нехай у кулі об'ємом V міститься газ масою m_1 за тиску P_1 і температури T . Рівняння стану газу для цього газу має вигляд:

$$P_1 V = \frac{m_1}{\mu} RT$$

Закачаємо газ, не змінюючи його температури. Після закачування маса газу та його тиск збільшилися. Позначимо їх відповідно m_2 і P_2 і знову запишемо рівняння стану

$$P_2 V = \frac{m_2}{\mu} RT$$

З останніх двох рівнянь отримуємо

$$R = \frac{(P_2 - P_1)V\mu}{(m_2 - m_1)T}$$

Отримана формула дає можливість визначити R , якщо відома зміна маси газу (але не сама маса), а також зміна тиску, температура та об'єм газу.

Універсальна газова стала R пов'язана з іншою важливою фізичною константою - сталою Больцмана k : $R = kN_A$, де N_A - число молекул в одному молі речовини (число Авогадро) [4]. З'ясуємо, який фізичний зміст універсальної газової сталої R . Відомо, що робота газу за ізобаричного процесу ($P = \text{const}$) дорівнює:

$$A = P\Delta V$$

Для цього процесу з рівняння Менделєєва-Клапейрона отримаємо:

$$p\Delta V = \frac{m}{\mu} R\Delta T = \nu R\Delta T.$$

З останніх двох рівнянь знайдемо, що

$$R = \frac{A}{\nu \Delta T},$$

тобто універсальна газова стала дорівнює роботі, яку виконує моль ідеального газу в разі ізобаричної зміни його температури на один градус.

Рівняння Менделєєва-Клапейрона можна застосувати і до суміші ідеальних газів. У цьому випадку m - маса суміші газів, P - тиск суміші, що дорівнює сумі парціальних тисків компонент газовой суміші, за законом Дальтона:

$$P = \sum p_i$$

де p_i - парціальний тиск i -ї компоненти.

У формулі $p \Delta V = \frac{m}{\mu} R \Delta T$, μ - маса одного моля суміші:

$$\mu = \frac{m}{\sum \frac{m_i}{\mu_i}},$$

де m_i - маса i -ї компоненти, μ_i - маса одного моля цієї компоненти.

Зв'язок параметрів стану газу P і T з величинами, що характеризують тепловий рух молекул

Тиск P , який чинить газ на стінки посудини, зумовлений тим, що молекули під час свого хаотичного руху зіштовхуються не тільки одна з одною, а й зі стінками посудини. Ці зіткнення визначають силу, яку відчуває стінка посудини з боку газу. Середня сила, що діє на одиницю площі, дорівнює тиску. Очевидно, що тиск газу буде тим більшим, чим більша концентрація молекул і чим більша швидкість їхнього хаотичного руху. Отже, такий макроскопічний параметр газу, яким є тиск, залежить від поведінки окремих молекул, тобто від мікроскопічних параметрів теплового руху. Кількісний зв'язок між тиском газу і мікроскопічними параметрами молекул встановлюється в молекулярно-кінетичній теорії ідеальних газів. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії (рівняння Клаузіуса) має вигляд [5]:

$$P = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2},$$

де n - число молекул газу в одиниці об'єму (концентрація молекул), m_0 - маса однієї молекули, середнє значення квадрата швидкості молекул:

$$\overline{v^2} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n},$$

v_i - величина швидкості поступального руху i -ї молекули.

Квадратний корінь із називається середньою квадратичною швидкістю:

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n}}$$

Ввівши цю швидкість до основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії, можна записати рівняння Клазюса в такому вигляді:

$$P = \frac{2}{3} n \cdot \bar{\varepsilon},$$

де $\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} m_0 \cdot v_{\text{кв}}^2$ - середня кінетична енергія постійного руху молекул ідеального газу.

Розглядаючи рівняння Менделєєва-Клапейрона для 1 моля газу ($PV_0 = RT$) спільно з рівнянням Клазюса, отримуємо:

$$\frac{2}{3} n V_0 \bar{\varepsilon} = \frac{2}{3} N_A \bar{\varepsilon} = RT,$$

де V_0 - об'єм моля газу, $nV_0 = N_A$ - число Авогадро, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{моль}^{-1}$.

Формула $\frac{2}{3} n V_0 \bar{\varepsilon} = \frac{2}{3} N_A \bar{\varepsilon} = RT$ дає змогу подати середню кінетичну енергію поступального руху молекул як функцію температури:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{3RT}{2N_A} = \frac{3}{2} kT,$$

де $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$.

Сумарна кінетична енергія поступального руху всієї сукупності молекул довільної кількості ідеального газу визначається співвідношенням:

$$E = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT,$$

тобто її величина прямо пропорційна абсолютній температурі газу. Внутрішня енергія ідеального газу, що являє собою сумарну кінетичну енергію всіх видів руху молекул (поступального, обертального, коливального), визначається за формулою:

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT$$

де i - число ступенів вільностей молекули, що залежить від її будови.

Підставляючи $\bar{\varepsilon} = \frac{3RT}{2N_A} = \frac{3}{2} kT$ у рівняння Клазюса $P = \frac{2}{3} n \cdot \bar{\varepsilon}$, можна привести основне рівняння кінетичної теорії газів до вигляду:

$$P = nkT$$

Таким чином, універсальна газова стала (R) і стала Больцмана (k) входять до низки найважливіших рівнянь, що описують стан газу.

Опис експериментальної установки



Установка ФПТ1-12 являє собою конструкцію настільного типу, що складається з:

- блоку вимірювального (1);
- вакуумметра (2);
- електронних вагів (3);
- скляної колби, ємністю 1000 мл (4);
- вакуумного насосу (5) з кульовим краном (6);
- гнучкого шлангу, що сполучає

вимірювальний блок і вакуумний насос.

В процесі проведення лабораторної експерименту проводиться відкачування повітря з колби за допомогою вакуумного насоса. Насос оснащений зворотнім клапаном, що запобігає натікання повітря в робочий об'єм.

Установка призначена для експлуатації в закритих приміщеннях при температурі навколишнього повітря від $+10^{\circ}\text{C}$ до $+35^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості не більше 80%.

Технічні характеристики установки:

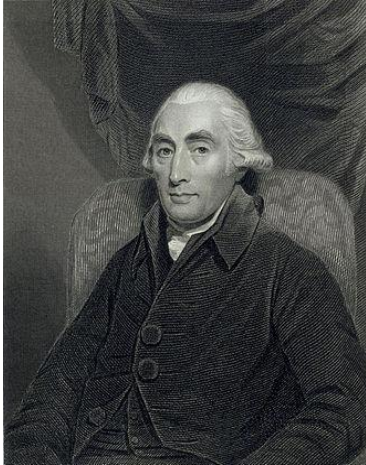
Діапазон вимірюваних тисків, кПа, не менше	від 0 до -8	$\pm 5\%$
Обсяг скляної колби, мл	1000	± 10
Діапазон вимірювання ваги, г	від 0.1 до 3000	± 0.1
Електроживлення від мережі змінного струму:		
напругою, В	220	
частота, Гц	50	
Споживана потужність, Вт, не більше	120	

Експериментальне завдання. Визначення універсальної газової постійної методом відкачування

- Підготуйте експериментальну таблицю до заповнення.
- Оцініть температуру та вологість в лабораторії.
- Ознайомтесь із установкою.
- Подайте напругу живлення на електронні ваги й увімкніть установку. При цьому загоряється сигнальна лампа.
- Виставте ваги, за вимірювальним рівнем на них, рівно відносно горизонту.
- Наненість на місце з'єднання колби з фланцем 5 крапель води для отримання герметичного з'єднання колби з фланцем.
- Кульовий кран насоса поставте в положення «Закрито».
- Увімкніть компресор і відкачайте повітря з колби до тиску $P_2=70-80$ кПа. Для відкачування необхідно злегка притиснути колбу зверху, щоб вакуум «прихопив» колбу.
- Включіть живлення ваг і дочекайтесь їх робочого режиму вимірювання в грамах.
- Визначте масу колби за тиску P_2 обережно поставивши пристрій з колбою на ваги.
- Вимкніть компресор і кульовий кран насоса поставте в положення «Відкрито».
- Визначте масу колби за тиску P_1 (без відкачки).
- Приберіть пристрій з вагів.
- За п. 6-12 повторіть вимірювання 5 разів.
- Заповніть таблицю експериментальними даними.

№ п/п	m_2+m_1 , кг	m_2-m_1 , кг	P_1 , Па	P_2 , Па	P_1-P_2 , Па	R , Дж/(моль·К)
1						
2						
3						
4						
5						
μ , кг/моль =			$T, K =$		V , м³=	

1. Оскільки склад повітря непостійний і залежить від різних чинників, в обчисленнях прийнято використовувати середню молярну масу повітря. Вона розраховується як сума мас усіх компонентів, поділена на сумарну кількість речовини:



$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \nu_i}{\sum_{i=1}^n \nu_i} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n \nu_i}$$

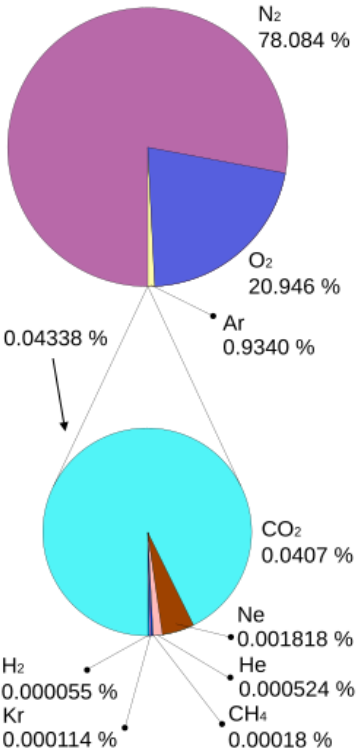
У 1754 році Джозеф Блек ((1728-1799) - шотландський хімік і фізик, викладач) експериментально довів, що повітря являє собою суміш газів, а не просту речовину.

Хімічний склад осушеного повітря за об'ємом:

Азот N₂ 78,084%, Кисень O₂ 20,946%,
Аргон Ar 0,934%, Вуглекислий газ CO₂ 0,03%,
Неон Ne 0,001818%, Криптон Kr 0,000114%,
Метан CH₄ 0,0002%, Гелій He 0,000524%,
Водень H₂ 0,00005%, Ксенон Xe 0,0000087%

Молярна маса повітря за **нормальних умов**

$\mu = 28,96$ г/моль.



2. Для кожного проведеного вимірювання визначте масу відкачаного повітря ($m_1 - m_2$), різницю тисків ΔP і обчисліть універсальну газову сталу:

$$R = \frac{\mu(P_1 - P_2)V}{(m_1 - m_2)T}$$

2. Визначте середнє значення R:

$$\frac{\sum R_i}{5} =$$

3. Оцініть похибки отриманої універсальної газової сталої R.

$$R_{\text{табл}} = 8,314462618153 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{K})$$

Для цього скористайтесь формулами, які дає «Теорія похибок і обробка результатів вимірювань у фізичній лабораторії»:

$$\sigma_R = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$S_{\langle R \rangle} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Розрахункове завдання. Визначення характеристик газу.

Для виконання завдання вкажіть атмосферний тиск P і температуру повітря T .

1. Розрахуйте число молей повітря в балоні за вихідних тиску й температури.
2. Розрахуйте число молей повітря в балоні після відкачування.
3. Розрахуйте число молекул повітря в балоні:
 - а) за вихідних тиску й температури,
 - б) після відкачування.
4. Розрахуйте число молекул, відкачаних із балона:
 - а) за результатами першого досліду,
 - б) за результатами другого досліду.
5. Розрахуйте середню енергію поступального руху молекул повітря в балоні до початку дослідів.
6. Розрахуйте сумарну кінетичну енергію поступального руху молекул повітря в балоні після відкачування:
 - а) за результатами першого досліду,
 - б) за результатами другого досліду.
7. Розрахуйте середньоквадратичну, імовірнісну та середню арифметичну швидкості молекул повітря в умовах досліду.
8. Розрахуйте число зіткнень, які зазнає за секунду одна молекула повітря ($d=0.3$ нм):
 - а) до відкачування,
 - б) після відкачування.
9. Розрахуйте довжину вільного пробігу молекул повітря в балоні ($d=0.3$ нм):
 - а) до відкачування,
 - б) після першого відкачування,
 - в) після другого відкачування.
10. Вважаючи повітря сумішшю двоатомних газів, знайдіть внутрішню енергію повітря в балоні:
 - а) до відкачування,
 - б) після першого відкачування,
 - в) після другого відкачування.
11. Вважаючи повітря сумішшю двоатомних газів, знайдіть зміну внутрішньої енергії повітря в балоні під час відкачування:
 - а) за результатами першого досліду,
 - б) за результатами другого досліду.

Контрольні запитання

1. Що розуміють під ідеальним газом?
2. За яких умов можна застосовувати закони, виведені для ідеальних газів, до реальних?
3. Запишіть і сформулюйте основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії?
4. Запишіть рівняння Менделєєва-Клапейрона та поясніть величини, що входять до нього.
5. Сформулюйте закон Дальтона. Який тиск газу називається парціальним?
6. Як кінетична енергія молекул залежить від температури?
7. Який фізичний зміст універсальної газової сталої? Дайте обґрунтування.

Література

1. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Ільчук Г.А., Романишин Б.М. Фізика. Підручник. –Львів: Афіша, 2005-394 с.
2. Воловик П.М. Фізика: Для ун-тів.-К.; Ірпінь: Перун, 2005. -864 с.: іл..
3. Волков О.Ф., Лумпієва Т.П. Курс фізики: У 2-х т. Т.1: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний струм. Електромагнетизм: Навчальний посібник для студентів інженернотехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – 224 с.
4. Курс загальної фізики : навчальний посібник / В.М. Вакалюк, А.В. Вакалюк ; Міністерство освіти і науки України, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021

Використані джерела:

1. Яворський Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. Довідник з фізики для інженерів та студентів вищих навчальних закладів / Переклад з 8-го переробл. і випр. вид. — Т. : Навчальна книга — Богдан, 2007. — 1040 с.
2. Константинов Ю. М., Гіжа О.О. Технічна механіка рідини і газу [Підручник]. — К. : Вища школа, 2002. — 277 с.
3. Артеменко Ю.А. Фізика. Частина 1: навч. посіб. / Ю.А. Артеменко, О.М. Любименко. – Луцьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2022. – 259 с.: іл.46, табл.7. – Бібліогр. 9.
4. Миронов О.С., Брижа М.Р., Бойко В.Б., Золотовська О.В. Теплотехніка: основи термодинаміки, теорія теплообміну, використання тепла в сільському господарстві. – Дніпропетровська: ТОВ «ЕНЕМ», 2011. – 424 с.
5. Лабораторний практикум із молекулярної фізики й термодинаміки : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. – Вид. 2-ге, виправл., змін. та доповн. / Н. А. Головіна, Г. П. Кобель, В. П. Доскоч, Л. Р. Калапуша – Луцьк : ВежаДрук, 2013. – 248 с.