

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Волинський національний університет імені Лесі Українки
Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

ГОЛОВІНА Н.А., КОБЕЛЬ Г.П.

**Лабораторний практикум з молекулярної
фізики і термодинаміки**

(навчальний посібник для студентів університетів)

Луцьк – 2023

УДК 539.1(075.8)

ББК 22.36я73

Л 12

Гриф «Затверджено до друку вченою радою ВНУ імені
Лесі Українки (протокол № 3 від 23.02.2023 р.)

Рецензенти:

ПАСТЕРНАК Я.М. - доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри комп'ютерних наук та кібербезпеки факультету
інформаційних технологій і математики ВНУ імені Лесі Українки

ШИГОРІН П.П. – кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики ім.
А.В.Свідзинського ВНУ імені Лесі Українки.

Головіна Н.А., Кобель Г.П.

Л 12 Лабораторний практикум з молекулярної фізики і
термодинаміки: Навч. посіб. для студ. вищих навч. закл. Луцьк, 2023. 247 с.

ISBN

Навчальний посібник розрахований на студентів фізичних
факультетів університетів, які вивчають загальний курс фізики (молекулярна
фізика і термодинаміка). Посібником можуть успішно користуватись при
підготовці до лабораторних робіт також студенти інших факультетів, які
вивчають відповідний курс фізики.

В посібнику рекомендовано як традиційне лабораторне обладнання,
так і сучасні установки.

УДК 539.1(075.8)

ББК 22.36я73

© Головіна Н. А., Кобель Г. П., 2023

© Гончарова В. О. (обкладинка), 2023

ISBN © Волинський національний університет
імені Лесі Українки, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ I. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ФІЗИКИ	8
§1.1. Тиск. Одиниці тиску.....	8
§1.2. Об'єм. Одиниці об'єму	9
§1.3. Температура. Вимірювання температури	10
§1.4. Кількість речовини. Одиниці кількості речовини	17
§1.5. Маса в молекулярній фізиці	Ошибка! Закладка не определена.
§1.6. Внутрішня енергія. Кількість теплоти	19
§1.7. Теплоємність тіл. Одиниці теплоємності.....	20
§1.8. Поняття про фазові переходи.....	21
§1.9. Ентропія. Обчислення ентропії.....	22
РОЗДІЛ II. ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ	
СТУДЕНТАМИ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ	27
§2.1. Загальні вимоги до підготовки, виконання й оформлення робіт лабораторного практикуму.....	27
§2.2. Правила техніки безпеки під час виконання лабораторного практикуму	30
§2.3. Похибки та їх оцінка при обробці результатів вимірювання	34
§2.4. Інформація про Міжнародну систему одиниць	42
§2.5. Відомості про вчених в галузі молекулярної фізики і термодинаміки	52
РОЗДІЛ III. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ	76
Лабораторна робота № 1. Вимірювання температури та перевірка термометрів	76
Лабораторна робота № 2. Визначення маси молекули ефіру	80
Лабораторна робота № 3. Визначення універсальної газової сталої методом відкачування	82
Лабораторна робота № 4*. Визначення молярної маси і густини газу методом відкачування	85
Лабораторна робота № 5. Визначення середнього термічного коефіцієнта тиску газів та вимірювання температури газовим	

термометром.....	89
Лабораторна робота № 6*. Визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря та водяної пари	92
Лабораторна робота № 7. Визначення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметра молекул повітря	98
Лабораторна робота № 8*. Визначення коефіцієнта в'язкості повітря капілярним методом	104
Лабораторна робота № 9. Визначення коефіцієнта теплопровідності повітря методом нагрітої нитки	110
Лабораторна робота № 10*. Визначення залежності температури кипіння води від зовнішнього тиску	115
Лабораторна робота № 11. Визначення абсолютної та відносної вологості повітря	118
Лабораторна робота № 12. Визначення відношення теплоємностей газу C_p/C_v методом Клемана і Дезорма	124
Лабораторна робота № 13*. Визначення відношення теплоємностей повітря за сталих тиску та об'єму	127
Лабораторна робота № 14*. Визначення відношення теплоємностей повітря за сталих тиску й об'єму резонансним методом.....	134
Лабораторна робота № 15. Визначення водяного еквівалента калориметра і термометра.....	140
Лабораторна робота № 16. Визначення кількості теплоти, що втрачається калориметром у навколишнє середовище	146
Лабораторна робота № 17. Визначення питомої теплоти пароутворення	150
Лабораторна робота № 18*. Визначення теплоти пароутворення води.....	153
Лабораторна робота № 19. Визначення питомої теплоємності рідин електричним калориметром	159
Лабораторна робота № 20. Визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса	161

Лабораторна робота № 21. Визначення коефіцієнта лінійного розширення твердих тіл та об'ємного розширення рідин	165
Лабораторна робота № 22. Визначення поверхневого натягу рідини методом Ребіндера	170
Лабораторна робота № 23. Визначення поверхневого натягу рідин методом відриву крапель	177
Лабораторна робота № 24. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу методом підняття рідини в капілярах	183
Лабораторна робота № 25*. Визначення теплоємностей твердих тіл	186
Лабораторна робота № 26. Визначення теплопровідності твердих тіл	192
Лабораторна робота № 27*. Визначення зміни ентропії в процесі нагрівання і плавлення олова.....	195
Лабораторна робота № 28. Техніка одержання та вимірювання вакууму.....	199
Лабораторна робота № 29*. Моделювання необоротності теплових процесів (розширення газу в пустоту, дифузія та теплопровідність).....	211
ДОДАТКИ	220
ЛІТЕРАТУРА	228
ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК	229
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	230

*) Нові лабораторні роботи, які виконуються на сучасному типовому обладнанні

ВСТУП

Серед багатьох методів наукового пізнання, якими користуються фізики, особливе місце посідає експериментальний метод. Наукові істини, добуті експериментально, часто стають основою фізичних теорій. З іншого боку, висновки з фізичних теорій перевіряються і уточнюються, як правило, за допомогою експерименту. У цьому сенсі фізику відносять до експериментальних наук.

Оскільки навчальні курси з фізики (з інших предметів також) формуються за рахунок відповідної наукової інформації, то цілком очевидно, що вивчення фізики як у середніх, так і у вищих навчальних закладах не можливе без експерименту. Так, наприклад, навчальний план для студентів ВНЗ фізичних спеціальностей передбачає на лабораторний практикум з курсів загальної фізики 25 % від загальної кількості аудиторних годин.

Однак у реалізації цієї проблеми є суттєві труднощі. Одна з них – відсутність відповідних навчальних посібників для студентів ВНЗ, які вивчають фізику. Масовим тиражем така література випускалась ще у 60–80 роках минулого століття. Цілком зрозуміло, що посібники такого призначення або зовсім відсутні, або вони вже не відповідають вимогам сьогодення.

Пропонований навчальний посібник "Лабораторний практикум з молекулярної фізики і термодинаміки" розрахований на студентів ВНЗ, які вивчають загальний курс фізики.

Посібник складається з трьох розділів. У першому – стисло проаналізовано основні поняття молекулярної фізики (тиск, об'єм, температура, кількість речовини, маса, внутрішня енергія, теплоємність тіл, фазові переходи, ентропія тощо).

У другому розділі розкрито основні вимоги до виконання студентами лабораторного практикуму, розглянуто правила техніки безпеки, подано класифікацію та методи обчислення похибок, представлено коротку інформацію про Міжнародну систему одиниць та відомості про вчених, які працювали у галузі молекулярної фізики і термодинаміки.

У третьому розділі подано детальну інформацію про 29 лабораторних робіт (тема, обладнання, завдання, теоретичні відомості, рисунки, контрольні запитання). Десять лабораторних робіт з тих, що включено у посібник, абсолютно нові, сучасні (№№ 4, 6, 8, 9, 13, 14, 18, 25, 27, 29). Кожна з установок цих робіт – комплексний блок вимірювальних приладів та інших

експериментальних засобів разом з об'єктом дослідження. Робота №29 – це матеріальна модель за допомогою якої можна вивчати необоротні процеси та визначати їх параметри. Ці роботи в змісті позначено зірочками.

Широкий вибір тем лабораторних робіт та обладнання до них дає можливість комплектувати лабораторний практикум з молекулярної фізики не тільки для студентів-фізиків, але й для майбутніх хіміків, біологів, географів та інших, які вивчають фізику.

У додатку посібника подано таблиці фізичних величин та список літератури.

При написанні посібника використано багаторічний досвід викладачів кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки.

РОЗДІЛ I

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ФІЗИКИ

§1.1. Тиск. Одиниці тиску

Тиском називається фізична величина P , яка дорівнює границі відношення числового значення нормальної сили ΔF_n , що діє на ділянку поверхні тіла площею ΔS , до величини цієї площі:

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta S} = \left(\frac{dF}{dS} \right)_n \quad (1.1.)$$

Тиск, якого зазнає стінка посудини або інша поверхня, що стикається з газом, визначається силами, які виникають при зіткненні молекул, що рухаються безладно і хаотично, з цією стінкою. При вимірюванні тиску мають справу не з миттєвим, а з середнім значенням величини P (макроскопічного параметра) за великі проміжки часу, значно більші від тривалості одного зіткнення. Другою причиною тиску є пружні властивості газу, які обумовлені потенціальною енергією взаємодії молекул.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів встановлює зв'язок тиску газу (макроскопічна величина) з мікропараметрами системи: концентрацією молекул n_0 , масою окремих молекул m і середньою квадратичною швидкістю $\sqrt{\bar{v}_{кв}^2}$ їхнього руху

$$P = \frac{1}{3} n_0 m \bar{v}_{кв}^2 \quad (1.2)$$

У стані термодинамічної рівноваги кожний внутрішній параметр є однозначною функцією зовнішніх параметрів і температури системи. Це твердження є результатом узагальнень дослідних фактів. Прикладом може служити рівняння стану, яке має вигляд $P = f(T, V)$. З нього слідує, що стан системи визначається двома незалежними параметрами, а третій однозначно визначається рівнянням стану.

Тиск газу залежить від довжини вільного пробігу молекул газу $P \approx \frac{1}{\lambda}$. Стан газу, при якому середня довжина вільного пробігу молекул λ порівняна з розмірами посудини l , в якій міститься газ, називають вакуумом. Таким чином, поняття вакуум є відносним і при дуже малих розмірах посудини (пористих системах) він виникає за

нормальних умов.

На використанні вакууму ґрунтуються фізико-хімічні дослідження поверхонь, технологія тонких плівок, виробництво електронних приладів, особливо напівпровідникових.

Зменшити тиск у вакуумній камері можна двома способами:

- виштовхуванням газу з вакуумної камери (механічний і пароструменевий насоси);
- конденсацією або захопленням молекул газу на певній частині внутрішньої поверхні камери без видалення назовні (кріогенний, кріосублімаційний, сублімаційний і гетероіонний насоси).

За одиницю тиску у SI прийнято $1 \frac{Н}{м^2} = 1 Па$

Вкажемо позасистемні одиниці тиску та їх зв'язок з одиницею тиску в СІ – Паскалем:

$1 \text{ мм рт.ст.} = 1 \text{ Тор} = 1,33 \cdot 10^2 \text{ Па}$

$1 \text{ мм вод.ст.} = 9,807 \text{ Па}$

$1 \text{ атм (фізична атмосфера)} = 760 \text{ мм рт.ст.} = 101325 \text{ Па}$

$1 \text{ ат (технічна атмосфера)} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 9,807 \cdot 10^4 \text{ Па}$

$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$

Верхня межа отриманих статичних тисків становить 500 Кбар .

У таких технологічних процесах, як синтез алмазу, гідропресування в порошковій металургії, полімеризація під високим тиском, тиски використовують як засоби впливу на властивості речовини.

Вимірюють тиски манометрами, барометрами, вакуумметрами, а також використовують різні датчики.

§1.2. Об'єм. Одиниці об'єму

Об'єм – це фізична величина, що визначається простором, який займає дана речовина. Позначається латинською літерою V і має одиниці в SI метри кубічні. На практиці часто використовують для вимірювання об'єму: 1 мм^3 , 1 см^3 , 1 дм^3 або 1 л і т.д.

Питомий об'єм – це об'єм одиниці маси:

$$V_0 = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1.3)$$

Молярний об'єм – це об'єм, який займає 1 моль даної речовини:

$$V_{\mu} = \frac{V}{\nu} \quad (1.4)$$

де V – загальний об'єм речовини, ν – кількість молів даної речовини. З формули (1.4) цілком очевидно, що молярний об'єм вимірюється у $\frac{м^3}{моль}$.

§1.3. Температура. Вимірювання температури

Температура є одним із складних фізичних понять, до встановлення якого можна підходити з різних точок зору. Феноменологічно температура вводиться через поняття термодинамічної рівноваги. З точки зору статистичної фізики зміст твердження про термодинамічну рівновагу полягає у тому, що для будь-якої ізольованої макроскопічної системи існує такий єдиний найбільш імовірний стан, який створюється безперервно рухомими частинками, коли протікають лише процеси на молекулярному рівні (динамічна рівновага), а всі макроскопічні процеси припиняються. Якщо дві рівноважні системи привести в тепловий контакт, то внаслідок теплообміну (обміну енергією) вони набувають іншого рівноважного стану. Отже, стан термодинамічної рівноваги системи визначається не лише її зовнішніми параметрами, а й певною величиною T (температурою), яка характеризує її внутрішній стан. З двох контактуючих систем температура буде більшою в тій системі, від якої теплота переходить до іншої.

Температура – це фізична величина, яка характеризує ступінь нагрятості тіла.

Вона виражає стан руху молекул рівноважної системи й має однакове значення для всіх частин даної системи, незалежно від числа частинок у ній і визначається зовнішніми параметрами. Температура є одним із параметрів стану макросистеми.

Процес переходу тепла від одного тіла до іншого свідчить про залежність температури тіл від їх внутрішньої енергії. Згідно з молекулярно-кінетичною теорією, всі тіла складаються з молекул, які перебувають у тепловому русі. Залежність між середньою кінетичною енергією поступального руху молекул і кількістю переданого тілу тепла для ідеальних газів можна записати у вигляді

$$E = \frac{3}{2}kT, \quad (1.5)$$

де k – стала Больцмана, T – абсолютна температура тіла.

Для реальних газів, рідин і твердих тіл ця залежність більш складна.

Отже, температура є умовною статистичною величиною, яка прямо пропорційна середній кінетичній енергії молекул тіла. Звідси слідує, що вимірювання температури має зміст лише при наявності великої кількості молекул. Поняття температури однієї молекули не має змісту, оскільки кінетична енергія окремих молекул тіла може значно відрізнятись від їх середньої кінетичної енергії.

З розподілу Максвелла молекул за швидкостями слідує, що температура характеризує “ширину” розподілу молекул за швидкостями або енергіями, величину природного розкиду кінетичної енергії молекул біля її середнього значення.

Таким чином, температура як параметр визначає статистику поступального руху молекул.

Враховуючи формулу (1.5) природно вважати, що *середня кінетична енергія молекул є кількісною мірою температури*. При такому визначенні температури вона повинна, очевидно, вимірюватися в одиницях енергії. Однак, на практиці користуватися такою одиницею температури з ряду причин незручно. У фізиці, як правило, користуються градусом, який визначається, як одна сота частина різниці показів термометра, вміщеного в пару киплячої води і в танучий лід (градус Цельсія). Множник k (стала Больцмана у формулі (1.5) визначає співвідношення між Джоулем і Кельвіном (градусом).

Якщо виходити з визначення, що температура пропорційна середній кінетичній енергії частинок (кінетична енергія не може бути від’ємною), то від’ємна абсолютна температура не має фізичного змісту. Однак, якщо скористатися більш загальним поняттям про температуру, як величину, що визначає розподіл частинок за енергіями, то ми прийдемо формально до можливості існування абсолютних від’ємних температур.

З розподілу Больцмана $n = n_0 e^{-\frac{u}{kT}}$ слідує, що $\frac{n}{n_0}$ – це доля частинок, які перебувають у стані з енергією U .

Прологарифмувавши рівність, дістанемо

$$T = -\frac{U}{k \ln \frac{n}{n_0}} \quad (1.6)$$

З виразу (1.6) видно, що при $n > n_0$ T може набувати від'ємних значень.

Цілком природно, що у стані рівноваги системи всі температури переходів однакові і рівні дійсній температурі даної речовини вцілому. Якщо ж яким-небудь способом термодинамічна рівновага порушується, то температура переходу буде відрізнятись від дійсної температури речовини. Оскільки при термодинамічній рівновазі $n < n_0$, $\ln \frac{n}{n_0} < 0$, то температура буде додатньою. Якщо ж яким-небудь методом зрівняти $n = n_0$, то температура стане рівною нескінченості ($T = \pm\infty$), а при інверсній заселеності ($n > n_0$) температура стає від'ємною. Поняття „від'ємна температура” означає нерівноважний стан системи. Відмітимо, що температура макроскопічного тіла як цілого, може бути лише додатною величиною.

Тобто, якщо в основу визначення температури покласти розподіл Больцмана, то стан системи, коли на нижньому рівні знаходиться більше частинок, ніж на верхньому, буде описуватись додатною, а в протилежному випадку – від'ємною температурою. У відповідності з таким визначенням температури, якщо, наприклад, всі частинки в дворівневій системі знаходяться на 2 нижньому енергетичному рівні, то їй відповідає температура переходу $T = +0\text{К}$; якщо ж всі частинки знаходяться на верхньому енергетичному рівні (повна інверсія системи), то $T = -0\text{К}$. Стан системи, коли верхній і нижній рівні заселені однаково, відповідає $T = \pm\infty\text{К}$. Схематично це показано на рис. 1.1.

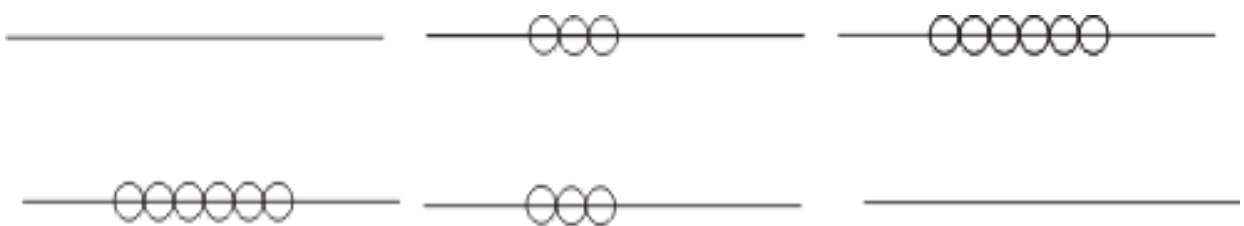


Рис. 1.1. Енергетичні рівні системи

Графік залежності $\frac{n}{n_0}$ від температури показано на рис. 1.2. З

графіка видно, що повна інверсія виникає при наближенні температури переходу до нуля зі сторони від'ємних температур, в той час як повне звільнення верхніх рівнів відбувається при $T \rightarrow 0\text{K}$ зі сторони позитивних температур.

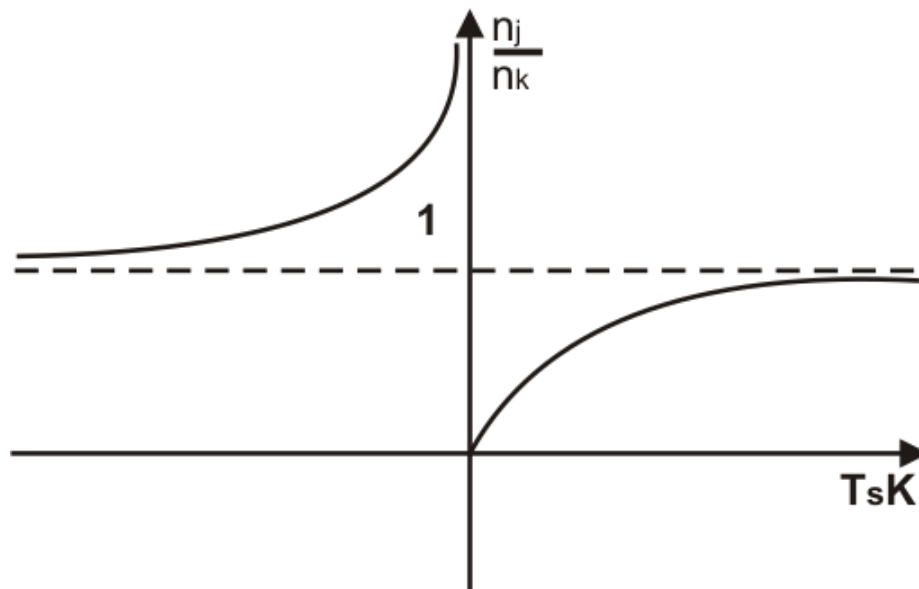


Рис. 1.2. Залежність $\frac{n}{n_0}$ від температури

Порушення теплової рівноваги до стану системи з від'ємною температурою здавалось настільки неймовірним, що до 1940-х років не було навіть спроб отримати інверсні стани.

Фізичного змісту від'ємна температура не має. Це тільки спосіб описати інверсний стан речовини, який реалізується у робочому тілі будь-якого квантового генератора.

Вимірювання температури

Виміряти температуру будь-якого тіла безпосередньо неможливо, оскільки в природі не існує еталону одиниці цієї величини. Її визначають за зміною будь-якої фізичної величини, що характеризує речовину та однозначно змінюється з температурою.

Властивості речовини, які можна використовувати для вимірювання температури, називають термометричними. До них належать об'єм, густина, довжина, електричний опір, термоелектрорушійна сила та інтенсивність випромінювання. Термометрична речовина при контакті з нагрітим тілом через певний

час набуває щодо нього теплової рівноваги. Такий метод вимірювання дає не абсолютне значення температури нагрітого тіла, а різницю відносно початкової температури робочої речовини, умовно прийнятої за нуль.

Першим приладом за допомогою якого вимірювали температуру, був водяний термометр (термоскоп) Галілея, створений у кінці 16 століття. Це скляна куля, заповнена повітрям. Куля закривалась водяним стовпом, висота якого залежала від тиску повітря в кулі і в атмосфері. Тому про точність вимірювань такого термометра говорити не приходиться. Згодом у Тоскані удосконалили виготовлення термометрів. Їх робили у запаяному варіанті і заповнювали спиртом. Точність вимірювання – 1° .

Реперні точки відліку на теперішній шкалі температур були введені у 1702 році Амонтоном (французький фізик). Одна реперна точка відповідала кипінню води (правда Амонтон не знав, що ця точка залежить від тиску), а друга відповідала сьгоднішньому поняттю абсолютного нуля.

Перший сучасний термометр був створений у 1724 році Фаренгейтом, складувом із Голландії. Найнижча температура – це найнижча температура суворої зими 1709 року, яку він зімітував сумішшю льоду, кухонної солі і нашатирю. Другу точку отримав, занурюючи термометр у суміш льоду і води. Відстань між точками Фаренгейт розділив на 32 частини. Отже за Фаренгейтом лід плавиться при $32^{\circ}F$. Пізніше він же ввів ще одну реперну точку – точку кипіння води, яка в його системі нанесення шкали вийшла рівною 212° . Така шкала збереглася і по цей день в Англії і США.

У Франції застосовують шкалу А. Реомюра (1740 р.), побудовану на точках замерзання і кипіння води. Робочими тілами були вода, спирт і, нарешті, ртуть. Він вибрав у якості реперної точки температуру танення льоду, а в якості одиниці температури градуса – таке збільшення температури, при якому спирт розширюється на 0,001 свого попереднього об'єму. При цьому отримав температуру кипіння води $80^{\circ}R$.

Шведський астроном і фізик А. Цельсій у 1742 році запропонував нову шкалу температур, яка сьогодні широко використовується на практиці. В ній були взяті дві реперні точки – точка замерзання води – 100° і точка кипіння води – 0° . Така „перевернута” шкала не була прийнята і її знов „перевернули”. В такому вигляді вона існує і нині. Одна сота інтервалу між точкою

замерзання води (0°) та точкою її кипіння (100°) була прийнята – 1°C .

Термодинамічну шкалу температур запропонував англійський фізик У. Томсон (лорд Кельвін) у 1848 р. Вона починається з абсолютного нуля, при якому тиск ідеального газу при постійному об'ємі дорівнює нулю.

Якщо відома температура тіла за шкалою Цельсія, то можна визначити температуру за шкалою Кельвіна:

$$T = 273 + t^{\circ}\text{C} \quad (1.7)$$

У 1968 р. на XIII генеральній конференції з мір і ваг було прийнято новий принцип побудови термодинамічної шкали температур на основі однієї реперної точки – це температура, при якій існують у рівновазі всі три фази води: пара-вода-лід (потрійна точки води). Цьому стає відповідає температура $273,16\text{ K}$. Тобто 0°C відповідає $273,16\text{ K}$.

На практиці, згідно з міжнародним договором, прийнята емпірична, легко відтворювана шкала, так звана міжнародна практична температурна шкала (МПТШ), яка наближається до термодинамічної температурної шкали Кельвіна.

При відтворенні МПТШ68, крім реперних точок (потрійна точка води і точка кипіння води), застосовують вторинні реперні точки, такі, як температурні рівноваги між твердою і рідкою фазами олова, свинцю, тощо. Ця шкала прийнята для обов'язкового градуювання всіх приладів, призначених для вимірювання температури.

Зв'язок між шкалами, які застосовуються у світовій практиці, крім МПТШ68, встановлюють формули:

$$t_F = (32^{\circ} + 1,8t^{\circ}\text{C}), \quad t_R = (0,8t^{\circ}\text{C}) \quad (1.8)$$

Ці зв'язки між температурами за різними шкалами можна подати також у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Шкали	Точка плавлення льоду	Точка кипіння води
Цельсія	0°C	100°C
Реомюра	0°R	80°R
Фаренгейта	32°F	212°F
Кельвіна	273 K	373 K

На практиці для вимірювання температури часто користуються скляними рідинними термометрами. Дія їх ґрунтується на зміні об'єму термометричної речовини з температурою. Для автоматичного

регулювання температури використовують контактні ртутні термометри.

Принцип роботи дилатометричних термометрів полягає у відносному видовженні під впливом температури двох твердих тіл, які мають різні температурні коефіцієнти лінійного розширення. Їх використовують як чутливі елементи в системах автоматичного регулювання (біметалеві термометри).

Конструкція і принцип дії манометричних термометрів ґрунтується на залежності тиску рідини, газу чи пари з рідиною, які знаходяться в замкнутому об'ємі від температури. Манометричні термометри залежно від наповнювача термосистеми поділяють на три типи: газові, конденсаційні (парорідинні) та рідинні.

Розглянуті вище термометри не дають змоги проводити дистанційні вимірювання, мають малий інтервал вимірювань, недовговічні, тощо. Цих недоліків позбавлені електричні методи вимірювання температури. До приладів цієї групи належать термоперетворювачі опору, термоелектричні перетворювачі (термопари). Принцип роботи термоперетворювачів опору базується на зміні електричного опору металів, електролітів і напівпровідників залежно від температури. Найбільш придатним матеріалом для теплочутливого термоперетворювача опору є платина (в інтервалі – $200+650^{\circ}\text{C}$) і мідь ($-50+180^{\circ}\text{C}$). Широко застосовуються в автоматичних системах і контрольно-вимірювальній техніці напівпровідникові термоперетворювачі опору – терморезистори. На відміну від металевих резисторів терморезистори мають від'ємний температурний коефіцієнт, тобто при нагріванні зменшують опір.

Термоелектричний метод вимірювання температури ґрунтується на ефекті Зеебека. Диференціальна термопара складається з провідників двох різних металів і двох спаїв між ними. Один зі спаїв поміщається у середовище з вимірюваною температурою, другий перебуває при постійній відомій температурі, наприклад, знаходиться в посудині з танучим льодом. Як правило, вимірюється різниця потенціалів, тобто термоелектрорушійна сила між розімкнутими кінцями провідників. Найбільш поширеними термоелектродними матеріалами є платина, платино-іридій, хромель, алюмель, копель, а для вимірювання у лабораторних умовах – мідь, залізо, константан. У додатку наведено градувальні характеристики деяких термоелектричних перетворювачів.

Досить високі температури (тисячі градусів і вище) вимірюють за

допомогою пірометрів – приладів, дія яких базується на тепловому випромінюванні в оптичному діапазоні спектра.

Джерело електромагнітного випромінювання може характеризуватися ще і так званою ефективною температурою, яка подібно до температури переходу, не має фізичного змісту, але зручна для опису інтенсивності та спектрального складу теплових джерел. Справа в тому, що інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла і його спектральний склад добре описуються формулою Планка, де єдиним параметром, від якого залежить як інтенсивність, так і спектральний склад випромінювання, є температура.

Для збереження температури в якості параметра і для джерела, яке не є абсолютно чорним тілом, вводиться поняття ефективної температури. Під ефективною температурою джерела розуміють температуру, яку повинно мати абсолютно чорне тіло, щоб спектральна густина випромінювання в заданому інтервалі частот випромінювання абсолютно чорного тіла і даного джерела випромінювання були однакові.

Часто користуються поняттям „яскравості” температури, під якою розуміють таку температуру абсолютно чорного тіла, при якій його випромінювальна здатність („яскравість”) рівна випромінювальній здатності даного джерела на заданій довжині хвилі.

§1.4. Кількість речовини. Одиниці кількості речовини

Кількість речовини визначається кількістю її структурних елементів у об’ємі даного тіла. Структурними елементами речовини можуть бути: молекули, атоми, протони, нейтрони, електрони тощо. За одиницю кількості речовини взято 1 моль.

Чинне (2019): Один моль містить точно $6,02214076 \cdot 10^{23}$ формульних одиниць. Це число є фіксованим значенням сталої Авогадро (N_A), коли виражається в одиниці моль⁻¹ і називається числом Авогадро. Еталон не створюється.

Це число називають числом Авогадро і позначають N_A . $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Щоб визначити кількість молей даної речовини, потрібно загальне число молекул даної речовини поділити на число Авогадро.

$$\nu = \frac{N}{N_A} \quad (1.9)$$

За одиницю кількості речовини у SI прийнято – 1 моль.

§1.5. Маса в молекулярній фізиці

Кількісні співвідношення у молекулярній фізиці вдалося встановити тоді, коли було введено одиниці атомної та молекулярної мас. Оскільки маси атомів і молекул дуже малі, то вводять спеціальну одиницю маси – атомну (молекулярну) одиницю маси. За одиницю атомної (молекулярної) маси прийнято $1/12$ маси атома вуглецю $^{12}_6\text{C}$. Цією одиницею й вимірюють маси всіх атомів та молекул. Маса атома чи молекули, визначена таким чином, називається відносною атомною або відносною молекулярною масою. Якщо масу даного атома (молекули) позначити через m_0 , то відносну атомну (молекулярну) масу можна визначити так:

$$\mu_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}m_{0c}}, \quad (1.10)$$

де m_{0c} – маса атома вуглецю $^{12}_6\text{C}$. Цілком зрозуміло, що відносна атомна (молекулярна) маса є величина безрозмірна. Крім відносної атомної (молекулярної) маси, вводять ще поняття молярної маси. Молярна маса – це маса одного моля речовини.

За одиницю молярної маси взято 1 кг/моль. Молярну масу можна визначити як добуток маси одного атома (молекули) m_0 взятої в кілограмах, на число Авогадро N_A .

$$\mu = m_0 N_A. \quad (1.11)$$

Молярну масу даної речовини можна виразити через відносну молекулярну (атомну) масу, яка для всіх атомів дається в таблиці елементів Д.І.Менделєєва.

Відомо, що:

$$N_A = \frac{0,012 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{\frac{1}{12}m_{0c}}. \quad (1.12)$$

Підставимо у (1.11) значення N_A з (1.12) і m_0 з (1.10).

$$\mu = \frac{0,012}{m_{0c}} \cdot \frac{1}{12} m_{0c} \mu_r$$

або

$$\mu = \mu_r \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \right). \quad (1.13)$$

Визначимо, наприклад, молярну масу води. Відносна молекулярна маса для води: $\mu_r = 2 + 16 = 18$.

$$\text{Тоді: } \mu = 18 \cdot 10^{-3} = 0,018 \left(\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \right).$$

§1.6. Внутрішня енергія. Кількість теплоти

Внутрішня енергія – це середнє значення повної енергії всіх частинок тіла. Вона включає в себе кінетичну енергію руху молекул, кінетичну енергію руху атомів всередині молекул і ядер та електронів всередині атомів, потенціальну енергію взаємодії атомів всередині молекули і ядер та електронів всередині атомів. Якщо кількість частинок N , тоді

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{m_i v_i^2}{2} + E_{II}, \text{ де } m_i \text{ та } v_i \text{ – маса та швидкість } i\text{-ої частинки;}$$

E_{II} – енергія взаємодії частинок між собою.

Внутрішня енергія має такі властивості:

а) в стані теплової рівноваги частинки макроскопічного тіла рухаються так, що їх повна енергія рівна внутрішній енергії тіла. Іншими словами можна сказати, що флуктуації енергії в рівноважному стані дуже малі;

б) внутрішня енергія є функцією стану системи, тобто залежить від її макроскопічних параметрів. Внутрішня енергія може бути, наприклад, функцією температури T та об'єму V . $U = U(T, V)$. Тоді зміна внутрішньої енергії

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV \quad (1.14)$$

в) внутрішня енергія системи тіл рівна сумі внутрішніх енергій кожного тіла.

Залежність U від T зумовлена рухом частинок тіла, тобто наявністю в них кінетичної енергії. Залежність U від V пов'язана із взаємодією частинок між собою. Із зміною об'єму змінюється концентрація частинок n , а отже, і середня відстань між ними. У залежності від цього змінюється і середня енергія їх взаємодії. Для твердих тіл внутрішня енергія залежить також від їх форми, навіть

при незмінному об'ємі тіла.

Згідно з першим законом термодинаміки:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (1.15)$$

де δQ – кількість теплоти або енергія, яка передана системі в результаті теплообміну; δA – робота, яку виконує система над зовнішніми тілами.

Хоча кількість теплоти і робота є складовими частинами внутрішньої енергії, тим не менше між dU з одного боку, і δQ та δA , з іншого є принципові відмінності, важливість яких підкреслена різним позначенням приростів (d та δ). Внутрішня енергія є функцією стану системи. Її зміна залежить лише від початкового і кінцевого стану тіла, а робота і кількість теплоти є функціями процесу переходу системи з одного стану в інший.

§1.7. Теплоємність тіл. Одиниці теплоємності

З експерименту слідує, що різні тіла з однаковою масою нагріваються по різному при наданні їм однакової кількості теплоти. Кажуть, що вони відрізняються теплоємностями.

Поняття “теплоємність” виникло з потреб калориметрії і відіграло важливу роль у формуванні та встановленні законів термодинаміки. Воно міцно закріпилося в науці. Теплоємності багатьох речовин порівняно мало залежать від температури і є константами у значних температурних інтервалах.

Теплоємністю тіла називають кількість теплоти, яку потрібно надати тілу масою m , щоб змінити його температуру на 1 K .

$$C = \frac{\delta Q}{\delta T} \quad (1.16)$$

За одиницю теплоємності у SI взято $1 \frac{\text{Дж}}{\text{K}}$. Теплоємність можна також віднести до одиниці маси тіла, до одного моля речовини або до одиниці об'єму. Відповідно до цього розрізняють питому, молярну та об'ємну теплоємності. За одиницю питомої теплоємності у SI прийнято $1 \frac{\text{Дж}}{\text{K} \cdot \text{K}}$, за одиницю молярної теплоємності – $1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}$.

Оскільки кількість теплоти є функцією процесу, то значення теплоємності залежить від умов теплообміну. Якщо ж умови теплообміну не змінюються, то теплоємність виражається через функцію стану системи. Розрізняють теплоємність при сталому

об'ємі C_V і теплоємність при сталому тиску C_P . У першому випадку нагрівання (або охолодження) відбувається при незмінному об'ємі тіла. У другому випадку підтримується сталим тиск.

Молярна теплоємність C_V означається через внутрішню енергію

$$\text{тіла: } C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V. \quad (1.17)$$

Використовуючи перший закон термодинаміки та рівняння стану ідеального газу, можемо отримати рівняння Майєра, яке виражає молярну теплоємність C_P через C_V :

$$C_P = C_V + R. \quad (1.18)$$

Внутрішня енергія ідеального газу не залежить від його об'єму і є лише функцією температури, тому $\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = 0$. Зміну внутрішньої енергії для ідеального газу можна знайти з (1.13) використовуючи (1.17):

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT = C_V dT. \quad (1.19)$$

§1.8. Поняття про фазові переходи

Фазовий перехід – це процес переходу речовини з однієї фази в іншу. Фазові переходи бувають першого та другого родів. Фазові переходи першого роду супроводяться стрибкоподібною зміною внутрішньої енергії та густини речовини і пов'язані з виділенням або поглинанням тепла. Тиск і температура протягом усього фазового переходу першого роду залишаються сталими. Наприклад: кипіння рідини, плавлення твердих кристалічних тіл, перехід між кристалічними модифікаціями, тощо.

Плавлення твердого тіла в кристалічному стані відбувається при певній, але незмінній протягом плавлення температурі. Питома теплота плавлення $\lambda = U_P - U_T + P(V_P - V_T)$, де U_P – внутрішня енергія одиниці маси рідини; U_T – внутрішня енергія одиниці маси твердого тіла; V_P і V_T – питомі об'єми рідини і твердого тіла; P – сталий тиск фазового переходу. Температура плавлення речовини залежить від тиску P . Цю залежність подано в рівнянні Клапейрона-Клаузіуса:

$$\frac{dT}{dP} = \frac{T(V_P - V_T)}{\lambda}. \quad (1.20)$$

Якщо об'єм речовини в рідкому стані перевищує її об'єм у твердому стані, тобто $V_P > V_T$, то як видно з (1.20) $\frac{dT}{dP} > 0$, тобто із зростанням зовнішнього тиску підвищується температура плавлення. Якщо ж $V_P < V_T$, що наприклад, має місце для води, то $\frac{dT}{dP} < 0$. Це означає, що із зростанням зовнішнього тиску температура плавлення зменшується.

У випадку фазових переходів другого роду не змінюються густина речовини, і не виділяється і не поглинається теплота.

До фазових переходів другого роду відносять: перехід феромагнетика в парамагнетик при відсутності магнітного поля, перехід рідкого гелію в надтекучий стан, деякі переходи в бінарних сплавах тощо.

§1.9. Ентропія. Обчислення ентропії

Ентропія походить від грецького – *τροπή*, що означає перетворення. Ентропія – це особлива фізична величина, яка є функцією стану системи, тобто вона не залежить від шляху, яким система перейшла з одного стану в інший, а залежить від значень тих параметрів, які мала система в початковому та кінцевому станах. Ентропія характеризує тепловий стан тіла і можливі зміни стану матеріальних систем. Це поняття вперше ввів у науку у 1865 році німецький фізик – теоретик Р. Клаузіус.

Ентропію позначають латинською літерою S . Якщо система переходить із стану A в стан B , тоді для оборотних процесів різницю ентропій між цими двома станами можна обчислити за формулою:

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}, \quad (1.21)$$

де $\frac{dQ}{T}$ – зведена кількість теплоти; dQ – кількість теплоти, яку одержала система; T – абсолютна температура системи.

Для необоротних процесів:

$$S_B - S_A > \int_A^B \frac{dQ}{T}. \quad (1.22)$$

Якщо система ізольована ($dQ = 0$), то для оборотних процесів $dS = 0$ – ентропія не змінюється, а для необоротних $dS > 0$ – ентропія зростає. Якщо система не ізольована, то при її переході з одного стану в інший ентропія може збільшуватися або зменшуватися. Так, наприклад, при плавленні твердого тіла ентропія зростає ($\Delta S > 0$), а при кристалізації – зменшується ($\Delta S < 0$). Якщо система складається з кількох тіл і при цьому ентропія кожного з них змінюється відповідно на $\Delta S_1, \Delta S_2, \dots, \Delta S_n$, то загальна зміна ентропії системи буде:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i; \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

На основі поняття ентропії Р. Клаузіус і У. Томсон (Кельвін) узагальнили II закон термодинаміки, який було в елементарній формі сформульовано С. Карно у 1824 році, надавши йому математичного вигляду:

$$dS \geq \frac{dQ}{T} \quad (1.23)$$

Словесно вираз можна сформулювати так: у природі для всякої замкненої системи тіл існує деяка величина – ентропія, яка при всіх змінах системи залишається або сталою – $dS = 0$ (для оборотних процесів), або зростає $dS > 0$ (для необоротних процесів).

Оскільки всі реальні процеси необоротні, то в ізольованій системі ентропія завжди зростає. Збільшення ентропії означає збільшення імовірності стану системи:

$$S = k \cdot \ln P_i \quad (1.24)$$

де S – ентропія системи; P_i – імовірність стану системи; k – стала Больцмана.

На основі (1.24) приходимо до такого наслідку: ізольована система самовільно може переходити тільки від станів менш імовірних у стан найбільш імовірний.

Розглянемо приклади обчислення ентропії.

Приклад 1.

Знайти зміну ентропії 280 г азоту при ізотермічному збільшенні його об'єму в 5 разів. Зміну ентропії даної системи можна обчислити за формулою:

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}. \quad (1.25)$$

На основі I закону термодинаміки маємо:

$dQ = dU + dA$, але для ізотермічного процесу $dU = 0$, тому $dQ = dA$ (1.26); $dA = PdV$ (1.27); $PV = \frac{m}{\mu}RT$, звідки: $P = \frac{m}{V\mu}RT$

(1.28). Підставимо значення P з (1.28) у (1.27), одержимо $dA = \frac{m}{\mu}RT \frac{dV}{V}$ враховуючи (1.26), запишемо вираз для dQ : $dQ = \frac{m}{\mu}RT \frac{dV}{V}$ (1.29).

Підставимо значення dQ з (1.29) у (1.25)

$$S_B - S_A = \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{\mu} R \frac{dV}{V} = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

В останню формулу підставимо числові значення відповідних фізичних величин:

$$m = 0,28 \text{ кг};$$

$$\mu = 28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}};$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}};$$

$$\ln 5 = 1,6;$$

$$S_B - S_A = \frac{28 \cdot 10^{-2}}{28 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot \ln 5 = 133 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Приклад 2.

Знайти зміну ентропії при охолодженні 100 г води від $t_1 = 10^\circ\text{C}$ до 0°C .

$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}$, для даного процесу $dQ = cm \cdot dT$, тоді:

$$S_A - S_B = \int_{T_1}^{T_2} cm \frac{dT}{T} = cm \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

В останню формулу підставимо числові значення відповідних фізичних величин:

$$C = 4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$m = 0,1 \text{ кг};$$

$$T_1 = 283 \text{ К};$$

$$T_2 = 273 \text{ K};$$

$$S_A - S_B = 4190 \cdot 0,1 \cdot \ln \frac{273}{283} = -16,76 \frac{\text{Дж}}{\text{K}}.$$

Приклад 3.

Знайти зміну ентропії ΔS у випадку, якщо потрібно перетворити лід масою 10 г при температурі $t = -20^\circ\text{C}$ у пару ($t_k = 100^\circ\text{C}$).

Зміну ентропії визначають за формулою:

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}. \quad (1.30)$$

При нагріванні льоду масою m від T до T_0 маємо: $dQ_1 = mc_x dT$, тоді

$$\Delta S_1 = mc_x \ln \frac{T_0}{T}; \quad (1.31)$$

c_x – питома теплоємність льоду.

При плавленні льоду: $\int dQ_2 = m\lambda$, тоді

$$\Delta S_2 = \frac{m\lambda}{T_0}, \quad (1.32)$$

λ – питома теплота плавлення льоду.

При нагріванні маси m води до кипіння: $dQ_3 = mcdT$, зміна ентропії становить:

$$\Delta S_3 = mc \cdot \ln \frac{T_k}{T_0}; \quad (1.33)$$

де c – питома теплоємність води.

При перетворення маси води m у пару:

$$\int dQ_4 = mr.$$

Зміна ентропії:

$$\Delta S_4 = \frac{mr}{T_K}, \quad (1.34)$$

r – питома теплота пароутворення.

Загальна зміна ентропії системи дорівнює:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_4$$

або підставивши (1.31), (1.32), (1.33), (1.34) в (1.30), одержимо

$$\Delta S = m \left(c_x \ln \frac{T_0}{T} + \frac{\lambda}{T_0} + c \ln \frac{T_k}{T_0} + \frac{r}{T_k} \right).$$

В останню формулу підставимо числові значення відповідних

фізичних величин:

$$m = 0,01 \text{ кг}, T = 253 \text{ К}, T_0 = 273 \text{ К}, T_k = 373 \text{ К}, c_x = 2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$
$$c = 4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \lambda = 330000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, r = 2600000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

$$\text{При цих значення фізичних величин } \Delta S = 88 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

РОЗДІЛ II

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ СТУДЕНТАМИ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

§2.1. Загальні вимоги до підготовки, виконання й оформлення робіт лабораторного практикуму

Процес виконання роботи лабораторного практикуму з молекулярної фізики складається з таких етапів:

1. Підготовка студента до роботи (самостійна робота).
2. Виконання роботи (робота студента в лабораторії під керівництвом викладача).
3. Оформлення звіту та його захист (самостійна робота студента та індивідуальна робота викладач-студент).

Для повноцінної реалізації цих етапів потрібно забезпечити належні умови: наявність в лабораторії або читальному залі відповідної літератури, наявність справного навчального обладнання, наявність у студентів спеціальних зошитів для лабораторного практикуму, постійний контроль з боку викладача та об'єктивна оцінка роботи студента.

Підготовка до виконання робіт практикуму

Підготовка до виконання робіт лабораторного практикуму з молекулярної фізики передбачає такі види діяльності студента:

- а) уважно опрацьовує в посібнику розширену інструкцію до лабораторної роботи;
- б) записує в зошиті для лабораторних робіт номер роботи, тему, мету, завдання;
- в) опрацьовує вказану в інструкції літературу; в зошит студент записує формулювання законів, означення понять, функціональні залежності між ними, графіки та іншу потрібну інформацію;
- г) записує в зошит перелік поданих в інструкції дослідів;
- д) дає письмові відповіді на запитання, що стосуються змісту даної роботи;
- е) знайомлюється з правилами техніки безпеки, які стосуються теми даної роботи.

Виконання робіт практикуму

Щоб дістати дозвіл на виконання роботи, студент повинен:

- а) мати конспект, що відповідає зазначеним вище вимогам;
- б) уміти давати відповіді на контрольні запитання;

- в) знати будову та принцип дії приладів;
- г) вміти складати за схемою робочу установку;
- д) уміти за показами приладів визначати значення відповідних фізичних величин

Діставши дозвіл, студент повинен:

- а) перевірити наявність основних та допоміжних приладів, які потрібні для демонстрування дослідів з даної теми;
- б) виконати досліди в тій послідовності, яка вказана в інструкції;
- в) визначити наукову та практичну мету кожного дослідів;
- г) запропонувати практичне використання даного фізичного явища чи процесу.

Звіт про роботу

- а) студент виконує схематичні рисунки кожного дослідів та робить до них письмові пояснення;
- б) в таблицю заносить числові значення фізичних величин;
- в) визначає шукану величину;
- г) обчислює похибки;
- д) робить загальний висновок.

Нижче наводимо приклад виконання та оформлення звіту однієї з лабораторних робіт.

Лабораторна робота № 14

Визначення відношення теплоємностей повітря за сталих тиску й об'єму резонансним методом

1. Плавно збільшуючи за допомогою ручок „Грубо” і „Точно” частоту коливань, які задаються звуковим генератором, визначити частоту 1-го резонансу за максимальним відхиленням стрілки на шкалі „індикатор резонансу”. Результат вимірювання занести до таблиці.

2. Плавно збільшуючи частоту коливань за допомогою ручок „Грубо” і „Точно” і вибираючи потрібну чутливість системи індикації резонансу рукояткою „Посилення”, визначити частоту 2...5 резонансів. Роблячи виміри при зменшенні частоти, переконатися у повторюваності результатів. Результати вимірювань занести до таблиці.

3. Виконаємо, для прикладу, вимірювання для одного значення температури $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T = 293\text{ K}$.

№ резонансу	$\nu, \text{Гц}$	$\nu_0 = \frac{\nu}{n}, \text{Гц}$	$\bar{\nu}_0 - \nu_{0i}$	$(\bar{\nu}_0 - \nu_{0i})^2$
1	340	340	2,3	5,29
2	690	345	-2,7	7,29
3	1020	340	2,3	5,29
4	1370	342,5	-0,2	0,04
5	1720	344	-1,7	2,89
		$\bar{\nu}_0 = 342,3$		$\sum_{i=1}^5 (\bar{\nu}_0 - \nu_{0i})^2 = 20,8$

4. Знаходимо швидкість поширення звуку $\nu = 2L\nu_0$ та підставляємо у співвідношення (11). Довжина труби $L = (51 \pm 0,5) \text{ см}$

5. Обчислюємо показник адиабати за формулою $\gamma = \frac{4L^2\nu_0^2\mu}{RT}$ (13).

Молярна маса повітря $\mu = 0,02896 \text{ кг/моль}$, універсальна газова стала

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \gamma = \frac{4 \cdot 1,02^2 \cdot 342,3^2 \cdot 0,02896}{8,31 \cdot 293} = 1,4499.$$

6. Обчислимо похибку для знаходження відносної похибки. Для цього прологарифмуємо співвідношення (13):

$$\ln \gamma = \ln 4 + 2 \ln L + 2 \ln \nu_0 + \ln \mu - \ln R - \ln T.$$

7. Диференціюємо останнє співвідношення, вважаючи μ та R

сталими $\frac{d\gamma}{\gamma} = 2 \frac{dL}{L} + 2 \frac{d\nu_0}{\nu_0} - \frac{dT}{T}.$

8. Замінімо диференціал приростом (абсолютною похибкою) та

знак мінус на плюс. Тоді $\varepsilon = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} = 2 \frac{\Delta L}{L} + 2 \frac{\Delta\nu_0}{\nu_0} + \frac{\Delta T}{T}.$

9. Абсолютна похибка температури рівна інструментальній похибці термометра $\Delta T = \Delta t = 1 \text{ К}.$

10. Абсолютна похибка знаходження резонансної частоти складається із інструментальної та випадкової похибок: $\Delta\nu_0 = \Delta\nu_{in} + \Delta\nu_{\varepsilon}.$ Оскільки частоту вимірюємо цифровим приладом, то в якості інструментальної похибки беремо одиницю останнього розряду $\Delta\nu_{in} = 0,01 \text{ кГц} = 10 \text{ Гц}.$ Для оцінки випадкової похибки

використовуємо розподіл Стюдента $\Delta\nu_{\varepsilon} = t_{\alpha,n} \frac{S_n}{\sqrt{n}},$ де

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\bar{v}_0 - v_{0i})^2}{n-1}}$$

Оцінимо випадкову похибку, наприклад, для рівня значимості $\alpha = 0,95$ і $n = 5$. Знаходимо коефіцієнт Стьюдента $t_{\alpha,n} = 2,78$. Тоді $\Delta v_\epsilon = 2,78 \cdot \sqrt{\frac{20,8}{5 \cdot 4}} = 2,84 \approx 3$ (Гц). Отже $\Delta v_0 = 10 + 3 = 13$ (Гц).

11. Відносна похибка:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \gamma}{\gamma} = 2 \frac{0,5}{51} + 2 \frac{13}{342,3} + \frac{1}{293} = 0,0196 + 0,076 + 0,0034 = 0,099 = 9,9 \%$$

12. Тоді абсолютна похибка $\Delta \gamma = \varepsilon \cdot \gamma = 0,099 \cdot 1,4499 = 0,14 \approx 0,1$.

Отже, кінцевий результат ми повинні заокруглити до десятих $\gamma = 1,4 \pm 0,1$.

Найбільшу похибку ми зробили при знаходженні резонансної частоти (7,6 %). Для підвищення точності експерименту потрібно обладнати установку частотоміром із більшою кількістю розрядів, який дав би можливість вимірювати частоту із точністю до 1 Гц.

§2.2. Правила техніки безпеки під час виконання лабораторного практикуму

При виконання лабораторних робіт з молекулярної фізики потрібно неухильно дотримуватись правил техніки безпеки, які стосуються у першу чергу життя і здоров'я тої людини, що працює з приладами (викладач, студент). Крім того, потрібно враховувати ще „правила техніки безпеки” стосовно приладів, які використовуються для проведення лабораторних робіт. Збереження справності приладів навчального фізичного експерименту – одна із важливих складових техніки безпеки в цілому.

Проаналізуємо основні правила техніки безпеки, яких потрібно дотримуватись під час проведення робіт лабораторного практикуму.

Робота з електричним струмом. Результати дії електричного струму на організм людини залежать від сили струму, його частоти, тривалості дії, шляху проходження струму та індивідуальних особливостей людини.

Для змінного струму промислової частоти (50 Гц) безпечна сила струму становить 0,01 А. Струм силою 0,015 А спричинює хворобливий стан; людина може втратити свідомість. Струм силою 0,05 А вважається небезпечним для життя, а проходження через

організм людини струму силою $0,1\text{ A}$ призводить до смерті.

Для постійного струму безпечна межа становить $0,05\text{ A}$.

Струм частотою більш як $150\text{--}200\text{ кГц}$ менш небезпечний для організму, ніж струм промислової частоти.

Небезпека ураження струмом підвищується із збільшенням тривалості дії струму на людину. Якщо час дії менший від $0,1\text{ с}$, то організм може витримати струм силою в кілька ампер. При більш тривалій дії настає параліч дихання, а потім і серця. Ступінь небезпеки ураження електричним струмом залежить і від нервового стану людини. Людина стомлена, роздратована, морально пригнічена, більш вразлива, ніж здорова і врівноважена.

Якщо в організмі є хоч незначна кількість алкоголю, то електричний опір такого організму різко знижується, що підвищує небезпеку ураження струмом.

Працюючи з електричним струмом, дотримуйтеся таких правил:

1. Складати електричні кола, робити в них перемикання можна тільки при вимкненому джерелі живлення.

2. Вмикати струм у складене коло можна лише з дозволу викладача.

3. Якщо напруга в зовнішній мережі зникла, треба вимкнути всі прилади, які були під напругою.

4. У процесі роботи не можна доторкатися руками до затискачів і провідників із струмом.

5. Забороняється працювати з несправною апаратурою і без дозволу викладача ремонтувати її.

6. Наявність напруги на затискачах приладів або елементах кола слід перевіряти тільки вимірювальними приладами.

7. Працюючи з випрямлячами, перед приєднанням проводів потрібно перевірити, чи розряджені конденсатори фільтрів.

8. Категорично забороняється застосовувати «жучки» замість зіпсованих запобіжників.

9. При вимиканні шнурів з штепсельними вилками із розеток треба витягати їх за корпус, а не за шнур.

10. Розбираючи електричне коло, спочатку слід від'єднати джерело струму, а потім решту приладів.

Робота з джерелами випромінювання

1. Працюючи з потужними джерелами світла, особливо з тими, що дають ультрафіолетове випромінювання (наприклад, кварцова лампа), треба користуватись спеціальними окулярами.

2. Не можна дивитися на джерело світла через збірну лінзу.

3. При користуванні біноклем, підзорною трубою, телескопом не наводьте ці прилади на Сонце.

4. Не допускайте безпосередньої дії на людину світла від потужних джерел: електричної дуги, ламп від проекційної апаратури, стробоскопа та ін. Під час роботи з такими приладами потрібно користуватися захисними кожухами і фільтрами.

5. Проводячи досліди з лазером, слід враховувати наступне:

а) категорично забороняється дивитись на зустріч первинному або дзеркально відбитому лазерному променю;

б) забороняється направляти лазерний промінь на вікна і двері, які здатні пропускати лазерне випромінювання;

в) забороняється також дивитися вздовж лазерного променя, який спрямований на відповідний об'єкт, бо виникає можливість ураження відбитим світлом.

6. Категорично забороняється використовувати катодні трубки, трубки Рентгена незалежно від їх потужності і конструкції.

Робота з вакуумними і газорозрядними приладами

1. В усіх дослідах, пов'язаних з відкачуванням (або нагнітанням) повітря з тонкостінних скляних посудин, потрібно застосовувати захисні чохла. При цьому можна користуватися тільки круглодонними колбами.

2. Особливо обережно слід поводитися з електронно-променевими трубками. Балон електронно-променевої трубки зазнає дії значної сили зовнішнього тиску внаслідок високого вакууму всередині. Незначний удар по трубці може спричинитися до вибуху, і осколки скла можуть поранити присутніх. Треба про це пам'ятати і під час роботи з посудинами Дьюара, електронними лампами та іншими порожнистими приладами.

Робота з нагрівальними приладами і легкозаймистими речовинами

1. Застосовувати в навчальному експерименті нагрівальні прилади, що працюють на бензині, забороняється.

2. Не можна залишати на робочому столі після виконання досліду гарячі прилади, які можуть стати причиною опіків учнів.

3. Неприпустимо залишати без догляду, хоча б і на короткий час, у робочому стані нагрівальні прилади.

4. Користуючись легкозаймистими леткими рідинами (ефір, бензин, гас, ацетон та ін.), треба стежити, щоб посудини з цими

рідинами були надійно закриті і розміщені від нагрівників на відстані не ближче 3 м.

5. Не дозволяється ставити металевий посуд на електричні плитки з відкритими нагрівними спіралями (без азбестових прокладок).

6. Щоб запобігти вибуху спиртівки, не допускається вигорання спирту більш як на 2/3 об'єму посудини.

7. Не можна безпосередньо запалювати спиртівку від другої, яка горить.

Робота з деякими хімічними речовинами

1. Щоб запобігти неправильному використанню хімічних речовин, треба на кожній посудині мати етикетку з відповідним написом.

2. Категорично забороняється визначати речовину «на смак».

3. Під час виготовлення розчинів сірчаної кислоти обов'язково треба дотримуватись правила – лити тоненьким струменем сірчану кислоту в воду, а не навпаки, бо в останньому випадку вода закипатиме і розбризкуватиме кислоту.

4. Всю роботу з розчинами кислот і лугів слід проводити в посудинах, поставлених на спеціальний емальований піднос або у велику фотографічну кювету.

5. Якщо на шкіру потрапила кислота або луг, треба перш за все змити їх великою кількістю води і для нейтралізації змочити по верхню шкіри, що зазнала дії кислоти, 3%-ним розчином питної соди. Поверхню шкіри, що зазнала дії лугу, змочують 3%-ним розчином оцтової кислоти або 10%-ним розчином борної кислоти.

6. Якщо бризки кислоти або лугу потрапили в очі, їх треба промити великою кількістю води, а потім нейтралізувати: для кислоти – 3%-ним розчином питної соди; для лугу – 2%-ним розчином борної кислоти. Після промивання слід негайно звернутися до лікаря.

7. Категорично забороняється зберігати у лабораторії порох або будь-які інші вибухові речовини.

Запобіжні заходи під час роботи з ртуттю

Ртуть і її пара – сильнодіючі отрути. При тривалому вдиханні навіть у дуже малих кількостях пари ртуті настає поступове отруєння організму, що може спричинити тяжке захворювання. Тому під час роботи з ртуттю треба бути уважним і стежити, щоб вона не розливалась і не розбризкувалась на підлогу. Дрібні краплини ртуті розтікаються і забиваються в найменші щілини, звідки їх дуже важко зібрати. Ртуть поступово випаровується, отруюючи повітря.

Під час роботи з ртуттю можна порадити дотримуватися таких правил:

1. Зберігати ртуть тільки в товстостінних скляних посудинах з вузькими горловинами. Посудини щільно закривати гумовими пробками.

2. Усі роботи з ртуттю виконувати над дерев'яним чи залізним підносом або над великою фотографічною кюветою.

3. Якщо ртуть розлилася, то її відразу потрібно зібрати до останньої краплинки спеціальною піпеткою (рис. 2.1) або амальгамованою вузькою цинковою пластинкою. Для амальгамування добре очищену наждачним папером цинкову пластинку опускають у плоский кристалізатор із слабким водним розчином сірчаної кислоти, в якому є 2–3 краплини ртуті. Ртуть розтирають змоченою розчином ваткою по поверхні пластинки так, щоб поверхня її стала сріблястою. При збиранні краплинок ртуті до них дотикаються кінчиком амальгамованої пластинки. Ртуть, змочуючи пластинку, розтікається по її по верхні. Час від часу зібрану ртуть струшують у посудину з водою. Амальгамовані пластинки зберігають у щільно закритій посудині.

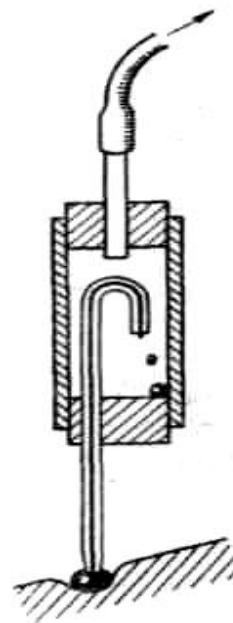


Рис. 2.1. Піпетка для збирання ртуті

§2.3. Похибки та їх оцінка при обробці результатів вимірювання

Фізика – одна із природничих наук, яка широко використовує у своїх дослідженнях експеримент. Розрізняють три види експерименту: якісний, кількісний та мислений. Кількісний експеримент не можливий без вимірювання відповідних фізичних величин. Вимірювання – одна з найдавніших операцій, яку виконує людина у процесі пізнання матеріального світу. *Вимірювання* – це процес знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. У наукових дослідженнях використовують різні методи вимірювання, залежно від природи вимірювальної фізичної величини, засобів вимірювання, потрібної точності, швидкості та ін.

Метод вимірювання – це використання сукупності відповідних наукових принципів та засобів вимірювання з метою визначення числового значення відповідної фізичної величини.

Серед методів вимірювання можна виділити такі:

а) *метод безпосередньої оцінки* – це метод вимірювання, при якому значення фізичної величини визначають безпосередньо за відліковим пристроєм приладу (амперметр, вольметр, манометр, ртутний термометр тощо);

б) *метод порівняння з мірою* – вимірювальну величину порівнюють з фізичною величиною такого ж роду, взятою за одиницю (вимірювання маси на важільних терезах, вимірювання розмірів предмета за допомогою лінійки тощо).

Відомі ряд інших методів вимірювання, серед них: *метод заміщення, диференціальний метод, метод збігів* та ін.

При будь-якому вимірюванні фізичної величини, не залежно від того, який використовується метод вимірювання, неминучі похибки. Похибки вимірювань зумовлені різними причинами. За характером зміни фізичної величини похибки поділяють на такі три види:

1. *Систематичні похибки*, які зумовлені дією незмінних факторів. Сюди відносять:

а) похибки засобів вимірювання, вони залежать від конструкції вимірювальних приладів (*інструментальні похибки*);

б) похибки методу вимірювання, які залежать від вибраного методу вимірювання (*методичні похибки*).

2. *Випадкові похибки* – це похибки, які змінюються випадково при повторних вимірюваннях тієї самої величини без будь-якої очевидної закономірності. Ці похибки виникають внаслідок одночасної дії багатьох відомих та невідомих причин (дія навколишнього середовища, недосконалість органів відчуттів експериментатора тощо).

3. *Промахи* – це похибки вимірювань, які істотно перевищують очікувану за даних умов похибку. Вони зумовлені неуважністю експериментатора, неправильними поводженням із засобами вимірювання. Похибки такого типу ліквідовуються шляхом повторних вимірювань.

У процесі вимірювання ці види похибок проявляються одночасно, і загальна похибка вимірювань може бути виражена їхньою сумою.

За способом обчислення, змістом і критерієм оцінки точності вимірювання похибки поділяються на *абсолютні й відносні*.

Абсолютна похибка обчислюється так:

$$\Delta N_i = N - N_c,$$

де N_c – середнє значення фізичної величини, здобуте при кількох вимірюваннях; N – істинне значення вимірювальної величини, яке залишається невідомим. Істинне значення лежить в таких межах:

$$N = N_c \pm \Delta N. \quad (2.1)$$

Абсолютна похибка має розмірність вимірювальної фізичної величини.

Відносна похибка – це відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірювальної величини:

$$\gamma = \frac{\Delta N}{N}. \quad (2.2)$$

Вона вимірюється у відносних одиницях або у відсотках.

Кожен експериментатор намагається якомога точніше виконати вимірювання. Однак відлік "на око" десятків часок поділок навіть на при найбільш сприятливих умовах не гарантує достатньої надійності вимірювання. Тому, в навчальних лабораторіях рекомендовано проводити відлік відповідних вимірювань з точністю до половини мінімальної поділки шкали приладу. Звідки слідує таке практичне правило: якщо невідома похибка вимірювального приладу, то її можна оціночно вважати рівною половині ціни поділки шкали приладу. Це й буде абсолютна похибка ΔA вимірювальної фізичної величини.

На прктиці дуже рідко приходиться обмежуватись вимірюванням лише однієї фізичної величини та обчислювати її похибку. У переважній більшості випадків для одержання відповідного результату необхідно провести вимірювання декількох фізичних величин, а з їх числовими значеннями – виконати відповідні математичні обчислення. Знаючи похибки, які мають місце при вимірюванні кожної з фізичних величин, що входять у кінцевий результат можна розрахувати на основі відповідної теорії [6] похибку кінцевого результату.

У наведеній нижче таблиці 1 подано формули для обчислення абсолютних та відносних похибок вимірювання кількох фізичних величин над числовими значеннями яких виконано відповідні математичні операції.

Правила визначення *випадкових похибок* вивчаються в теорії похибок – математичній дисципліні, яка базується на законах теорії

ймовірностей. Ми наведемо лише деякі висновки з теорії похибок, які необхідні для математичної обробки результатів вимірювання.

Випадкові похибки підпорядковуються нормальному розподілу (розподілу Гаусса). Для оцінки точності результатів вимірювання частіше всього користуються стандартною (середньоквадратичною) похибкою, яку знаходять із закону розподілу випадкових похибок.

Таблиця 1.

№ п/п	Математична операція	Абсолютна похибка	Відносна похибка
1.	$N = A + B + C$	$\Delta N = \pm(\Delta A + \Delta B + \Delta C)$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm\left(\frac{\Delta A + \Delta B + \Delta C}{A + B + C}\right)$
2.	$N = A - B$	$\Delta N = \pm(\Delta A + \Delta B)$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm\left(\frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}\right)$
3.	$N = A \cdot B$	$\Delta N = \pm(A\Delta B + B\Delta A)$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm\left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}\right)$
4.	$N = A \cdot B \cdot C$	$\Delta N = \pm(A\Delta B + B\Delta A + C\Delta C)$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm\left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C}\right)$
5.	$N = \frac{A}{B}$	$\Delta N = \pm\frac{B\Delta A + A\Delta B}{B^2}$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm\left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}\right)$
6.	$N = A^n$	$\Delta N = \pm n \cdot A^{n-1} \cdot \Delta A$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm n \cdot \frac{\Delta A}{A}$
7.	$N = \sqrt[n]{A}$	$\Delta N = \pm \frac{1}{n} \cdot A^{\frac{1}{n}-1} \cdot \Delta A$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta A}{A}$
8.	$N = \sin A$	$\Delta N = \pm \cos A \cdot \Delta A$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \operatorname{ctg} A \cdot \Delta A$
9.	$N = \cos A$	$\Delta N = \pm \sin A \cdot \Delta A$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \operatorname{tg} A \cdot \Delta A$
10.	$N = \operatorname{tg} A$	$\Delta N = \pm \frac{\Delta A}{\cos^2 A}$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{2\Delta A}{\sin 2A}$
11.	$N = \operatorname{ctg} A$	$\Delta N = \pm \frac{\Delta A}{\sin^2 A}$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{2\Delta A}{\sin 2A}$
12.	$N = \ln A$	$\Delta N = \pm \frac{\Delta A}{A}$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{\Delta A}{A \cdot \ln A}$

Оцінкою середньої квадратичної похибки $\sigma_{\bar{x}}$ є величина $\frac{S_n}{\sqrt{n}}$, яку обчислюють за формулою

$$\frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}},$$

де \bar{x} – середнє арифметичне значення вимірювальної величини, x_i – результат і-го вимірювання.

Результат вимірювання записують у вигляді нерівності:

$$\bar{x} - \frac{S_n}{\sqrt{n}} \leq x_0 \leq \bar{x} + \frac{S_n}{\sqrt{n}},$$

або в інтервальній формі:

$$x_0 = \bar{x} \pm \frac{S_n}{\sqrt{n}},$$

де x_0 – дійсне значення вимірювальної величини, яке близьке до істинного значення x і є його найкращою числовою оцінкою.

Проміжок $\left[\bar{x} - \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \bar{x} + \frac{S_n}{\sqrt{n}} \right]$, називають надійним або довірчим інтервалом. Підрахунки показують, що цей інтервал, який визначається середньою квадратичною похибкою $\sigma_{\bar{x}}$, містить дійсне значення вимірюваної величини з надійною або довірчою ймовірністю $\alpha = 0,68$; подвоєній середній квадратичній похибці ($2\sigma_{\bar{x}}$) відповідає надійна ймовірність – 0,95, потроєній ($3\sigma_{\bar{x}}$) – 0,997. Можна сформулювати питання інакше: який надійний інтервал слід вибрати, щоб приблизно 81% результатів попали в нього? З відповідних таблиць знаходимо, що значенню надійної ймовірності $\alpha = 0,81$ відповідає доля середньої квадратичної похибки $\frac{\Delta x}{\sigma_{\bar{x}}} = 1,3$.

Таким чином, вибраному $\alpha = 0,81$ відповідає надійний інтервал $\left[\bar{x} - 1,3 \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \bar{x} + 1,3 \frac{S_n}{\sqrt{n}} \right]$. Отже, для характеристики величини випадкової похибки потрібне знання двох чисел: значення самої похибки (або надійного інтервалу) та значення надійної ймовірності.

Однак користуватись формулами нормального розподілу випадкових похибок для визначення надійного інтервалу при заданій надійній ймовірності або навпаки можна лише для великої кількості вимірювань (практично при $n \geq 10$). Насправді ж число вимірювань у переважній більшості невелике і часто в лабораторних роботах наукових дослідженнях користуються результатами, які дістали з

двох-трьох вимірювань. При малій кількості вимірювань користуються розподілом Стюдента, який дає змогу обчислити значення коефіцієнтів $t_{\alpha,n}$ для будь-якого значення надійної ймовірності α та числа вимірювань n . Значення коефіцієнтів Стюдента $t_{\alpha,n}$ для різних значень α і n наведено у відповідних таблицях. У цьому разі надійний інтервал випадкової похибки задається аналогічно попередньому:

$$\left[\bar{x} - t_{\alpha,n} \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{\alpha,n} \frac{S_n}{\sqrt{n}} \right].$$

Для оцінки точності вимірювань користуються відносною похибкою E , яка визначається таким відношенням:

$$E = \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\% .$$

Для оцінки максимально можливих, граничних похибок користуються правилом трьох сигма. Згідно цього правила значення

$$3S_n = 3\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}$$
 є межею випадкового відхилення спостереження.

Значення відхилення окремого спостереження більше $3S_n$ вважають промахом і при обробці результатів вимірювання не враховують.

Інколи в практиці для оцінки випадкової похибки користуються середньою арифметичною похибкою. Хоча вона легше обчислюється,

ніж $\frac{S_n}{\sqrt{n}}$, середню арифметичну похибку використовують рідко, бо

для неї не обчислені відповідні значення надійної ймовірності. Згідно з теорією випадкових похибок, тільки при виконанні десяти і більше дослідів випадкова похибка не перевищує середньої арифметичної похибки:

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| .$$

Якщо проведено 7...8 дослідів, то $\Delta \bar{x}$ треба збільшити у два рази, щоб гарантувати належність дійсного значення вимірювальної величини інтервалу $[\bar{x} \pm 2\Delta \bar{x}]$. Якщо буде зроблено п'ять вимірювань, то $\Delta \bar{x}$ доводиться збільшувати в три рази. Потроєну середню арифметичну похибку $3\Delta \bar{x}$ ще називають межею випадкової похибки. При числі вимірювань $n > 5$ оцінити надійність одержаних результатів за допомогою середньої арифметичної похибки

неможливо.

Природно постає питання про кількість повторних вимірювань. Дати відповідь на нього можна лише в ході самого експерименту на основі аналізу одержаних результатів, порівняння випадкової і інструментальної похибок. Ситуація проясняється при двох-трьох повторних вимірюваннях. Якщо результати вимірювань співпадають (випадкові похибки не проявились: вони менше інструментальної), то продовжувати вимірювання немає сенсу. Якщо ж проявляються випадкові похибки (має місце розкид даних), то проводять серію із п'яти-десяти повторних вимірювань

Одноразові вимірювання не можуть дати достовірних і надійних результатів. Крім того, одиничний результат може бути промахом. В той же час слід зауважити, що в ряді лабораторних робіт з молекулярної фізики повторні вимірювання за час відведений на виконання роботи провести не вдається (тривале охолодження системи до початкового стану, швидка зміна температури і т.п.). У таких випадках доводиться обмежуватись інструментальними похибками або звертатись до графічного методу обробки результатів вимірювання. Цей метод дозволяє швидко знаходити функціональні залежності між величинами, розраховувати значення різних параметрів, графіки дозволяють легко і швидко виявляти грубі похибки. Для цього первинну графічну обробку даних слід виконувати безпосередньо під час експерименту, тоді передбачуваний хибний результат негайно перевіряється.

Більшість фізичних величин не можна визначити в лабораторних умовах прямими вимірюваннями. Непрямими або посередніми вимірюваннями називаються такі, в яких шукана величина виражається явною функцією інших величин, які знаходять прямими вимірюваннями.

Похибки посередніх вимірювань визначаються за похибками безпосередньо вимірюваних величин. безпосередньо вимірювані величини вважатимемо аргументами, а посередньо вимірювані – функціями. Якщо посередньо вимірювана величина є функцією багатьох аргументів

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.3)$$

то середня квадратична похибка обчислюється за загальною диференціальною формулою

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{dx_i} \Delta x_i \right)^2}, \quad (2.4)$$

де Δx_i – величини малі та мають однакове значення надійної ймовірності α .

Відносна середня квадратична похибка посереднього вимірювання

$$E = \pm \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{f} \frac{df}{dx_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (2.5)$$

Оскільки $\frac{1}{f} \frac{df}{dx_i} \Delta x_i = \pm \frac{d}{dx_i} \ln f \cdot \Delta x_i$, то

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d}{dx_i} \ln f \cdot \Delta x_i \right)^2}. \quad (2.6)$$

Отже, на практиці для знаходження E треба спочатку функцію прологарифмувати, а потім знайти частинні диференціали натуральних логарифмів кожного з n аргументів.

Як видно, формула (2.6) значно простіша за формулу (2.4), тому у випадку, коли залежність (2.3) виражена формулою, зручною для логарифмування, простіше спочатку визначити відносну похибку за (2.6), потім з виразу $E = \pm \frac{\Delta y}{y}$ знайти абсолютну похибку. У виразах,

які не піддаються логарифмуванню, простіше відразу обчислити абсолютну, а потім відносну похибки.

При оцінці похибки результату у випадку непрямих вимірювань слід звертати увагу також на те, яка буде внесена систематична похибка внаслідок заокруглення табличних величин, фізичних констант, що входять у робочу формулу.

Числові значення фізичних величин, що містять в довідкових таблицях, заокруглюють за основними правилами в них лише правильні цифри. Звідси слідує, що різниця між записами в таблиці і незаокругленим значенням будь-якої величини не перевищує половини одиниці останнього розряду заокругленого значення. Наприклад, якщо в таблиці вказано, що густина ртуті $\rho = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, то абсолютна похибка $\Delta \rho = 0,05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Якщо в таблиці значення атмосферного тиску записано у вигляді

$P = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, то $\Delta P = 0,005 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Числа, які заносяться в таблицю, часто містять спільний множник виду 10^n , де n – ціле додатне або від’ємне число. Для того, щоб кожного разу не повторювати відповідний множник, в таблицю зручно записувати не саму величину, а зменшену (при $n > 0$) або збільшену (при $n < 0$) в 10^n разів. Наприклад, замість поверхневого натягу $\sigma = 72,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}$ в таблицю заносять величину в 10^{+3} разів більшу, тобто $\sigma \cdot 10^{+3} = 72,8 \text{ Н / м}$.

В таблицях можуть бути наведені і точні значення фізичних величин. Тоді їх похибки, звичайно, рівні нулю. Наприклад, температура танення льоду при нормальному атмосферному тиску рівна 0°C , значення синуса кута в 30° рівне 0,5.

§2.4. Інформація про Міжнародну систему одиниць

Інтенсивний розвиток науки і техніки, розширення торгівельних зв’язків між різними країнами стало основною причиною, яка стимулювала розвиток метрології як науки, внаслідок чого була створена єдина Міжнародна система одиниць (СІ), яка охопила всі галузі вимірювань.

Вчені різних країн більше ста років працювали над створенням такої універсальної системи одиниць вимірювань, яка була б побудована з урахуванням найбільш строгих метрологічних вимог і яка була б придатна для міжнародних відносин.

Це питання розглядалося на ІХ (1948 р.), Х (1954 р.) і ХІ (жовтень 1960 р.) Генеральних конференціях з міри і ваги. На Одинадцятій генеральній конференції з міри і ваги було прийнято рішення про встановлення практичної системи одиниць вимірювань з шістьма основними одиницями, а саме: одиниця довжини – метр, одиниця маси – кілограм, одиниця часу – секунда, одиниця температури – кельвін, одиниця сили струму – ампер, одиниця сили світла – кандела. Пізніше було введено ще одну основну одиницю – одиниця кількості речовини – моль.

Цій універсальній системі одиниць присвоєно назву “Міжнародна система одиниць вимірювань”, міжнародне позначення – SI, українське – СІ.

У СІ було введено дві додаткові одиниці: одиниця плоского кута – радіан, і одиниця тілесного кута – стерадіан.

Основні одиниці СІ

Величина		Одиниця СІ		
Найменування	Розмірність	Найменування	Позначення	
			міжнародне	українське
<i>Довжина</i>	L	метр	<i>m</i>	<i>м</i>
<i>Маса</i>	M	кілограм	<i>kg</i>	<i>кг</i>
<i>Час</i>	T	секунда	<i>s</i>	<i>с</i>
<i>Сила електричного струму</i>	I	ампер	<i>A</i>	<i>А</i>
<i>Термодинамічна температура</i>	Θ	кельвін	<i>K</i>	<i>К</i>
<i>Кількість речовини</i>	N	моль	<i>mol</i>	<i>моль</i>
<i>Сила світла</i>	J	кандела	<i>cd</i>	<i>кд</i>

Означення основних одиниць СІ

Метр дорівнював 1650763,73 довжин хвиль у вакуумі випромінювання, що відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$ атома криптоні – 86 (ХІ Генеральна конференція з мір та ваг, 1960 р.).

На XVII ГКМВ (1983 р.) було сформульовано і прийнято нове визначення метра, яке ґрунтується на швидкості світла з урахуванням досягнень лазерної техніки та квантової електроніки. Введення його в практику дало змогу суттєво підвищити точність лінійних вимірювань.

За цим визначенням метр дорівнював відстані, яку проходить у вакуумі плоска електромагнітна хвиля за $1/299\,792\,458$ частку секунди.

Чинне (2019): Метр визначається фіксацією числового значення швидкості світла у вакуумі $c = 299\,792\,458$ в одиницях $m \cdot s^{-1}$, де секунда визначається через частоту випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133. $L = \frac{c_0}{f}$.

Кілограм дорівнював масі міжнародного прототипу кілограма (І ГКМВ, 1889 р. і III ГКМВ, 1901 р.). До 2019 р. одиниця маси – кілограм, була прив'язана до маси циліндра зі сплаву платини та іридію, який зберігався у французькому місті Севр. Однак кілька міжнародних звірянь національних копій, виготовлених з того ж матеріалу, показали що їх маси змінюються щодо головного еталону в діапазоні ± 50 мікрограмів за 100 років. У зв'язку з такою неточністю



було ухвалено рішення «відв'язати» кілограм від матеріального носія-еталону. Тепер він буде визначатися через постійну Планка. Установка, за допомогою якої можна реалізувати новий еталон маси, має назву ваги Кіббла. У таких вагах еталоном є вантаж, який врівноважує силу відштовхування між постійним магнітом і котушкою, через яку пропускають струм. Так, масу об'єкта можна знайти за рахунок рівності електричної і механічної сил.

Завдяки новому визначенню кілограма, кожна країна зможе відтворити еталонну установку самостійно в будь-який час, не вдаючись до звірення з головним еталоном.
$$m = h \frac{f_{j1} \cdot f_{j2}}{\nu \cdot g}$$

Чинне (2019): кілограм визначається через сталу Планка h , яка точно дорівнює $6,62607015 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (Дж = кг·м²·с⁻²), та визначення метра і секунди.

Секунда дорівнювала 9192631770 періодів випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію – 133 за температури 0 К (ХІІ ГКМВ, 1967 р.).

Чинне (2019): Секунда визначається прийняттям фіксованого числового значення частоти надтонкого розщеплення основного стану атома цезію-133, що дорівнює точно 9192631770, коли вона виражена одиницею SI Гц, яка еквівалентна с⁻¹. $1 \text{ с} = 9192631770 T_{\text{Cs}}$

Ампер дорівнював силі незмінного струму, який під час проходження по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини та нескінченно малого кругового поперечного перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1 м один від одного,

зумовив би на кожній ділянці провідника завдовжки 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н (ІХ ГКМВ, 1948 р.).

Чинне (2019): ампер встановлюється фіксацією числового значення елементарного електричного заряду e , коли він виражений одиницею Кл, що відповідає А·с, де секунда визначається через частоту випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133. Тепер вчені вирішили зафіксувати числове значення електричного заряду для нового визначення ампера. Елементарний електричний заряд e дорівнюватиме точно $1,602176634 \cdot 10^{-19}$ (Кл). $I = ef_T$ (метод – SET – тунелювання).

Кельвін дорівнював 1/273,16 частини термодинамічної температури потрійної точки води (ХІІІ ГКМВ, 1967 р.).

Чинне (2019): кельвін визначається через встановлення фіксованого числового значення сталої Больцмана k рівним $1,380649 \cdot 10^{-23}$ в одиницях Дж·К⁻¹, або в основних одиницях SI: кг·м²·с⁻²·К⁻¹, де кілограм, метр і секунда визначаються через h , c і $\Delta\nu_{Cs}$. (h – стала Планка, c – швидкість світла у вакуумі, $\Delta\nu_{Cs}$ – частота, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями незбуреного основного стану атома цезію ¹³³Cs).

Моль дорівнював кількості речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці – 12 масою 0,012 кг.

При застосуванні моля структурні елементи мають бути специфіковані й можуть бути атомами, молекулами, іонами, електронами та іншими частинками або специфікованими групами частинок (ХІV ГКМВ, 1971 р.).

Чинне (2019): Один моль містить точно $6,02214076 \cdot 10^{23}$ формульних одиниць. Це число є фіксованим значенням сталої Авогадро (N_A), коли виражається в одиниці моль⁻¹ і називається числом Авогадро. Еталон не створюється.

Кандела дорівнює силі світла у заданому напрямку джерела, що випромінює монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого у цьому напрямку становить 1/683 Вт/ср (ХVІ ГКМВ, 1979 р.).

Чинне (2019): кандела визначається прийняттям фіксованого числового значення сили світла монохроматичного випромінювання частотою 540×10^{12} Гц, зі світловою віддачею K_{cd} , яка дорівнює

$683 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$, що є еквівалентним $\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{Вт}^{-1}$ або в основних одиницях SI $\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^3$, де кілограм, метр і секунда визначаються через h , c і $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ (h – стала Планка, c – швидкість світла у вакуумі, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ – частота, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями незбуреного основного стану атома цезію¹³³Cs)

Радіан дорівнює куту між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу.

Стерадіан дорівнює тілесному куту з вершиною в центрі сфери, який вирізує на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата зі стороною, яка дорівнює радіусу сфери.

На XX Генеральній конференції з мір і ваг (1995 р. резолюція 8) радіан і стерадіан визначено як безрозмірнісні похідні одиниці, назви і позначення яких не обов'язково мають використовуватися у вираженні інших похідних одиниць СІ.

Похідні одиниці СІ, які мають спеціальні найменування

№ п/ п	Величина	Розмір- ність	Наймену- вання	Одиниця		вираз через основні
	Найменування			Позначення		
				міжна родне	українсь ке	
1.	Частота	T^{-1}	герц	<i>Hz</i>	<i>Гц</i>	с^{-1}
2.	Сила, вага	LMT^{-2}	ньютон	<i>N</i>	<i>Н</i>	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
3.	Тиск, механічна напруга, модуль пружності	$\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$	паскаль	<i>Pa</i>	<i>Па</i>	$\frac{\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}}{2}$
4.	Енергія, робота, кількість теплоти	L^2MT^{-2}	джоуль	<i>J</i>	<i>Дж</i>	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
5.	Потужність, потік енергії	L^2MT^{-3}	ват	<i>W</i>	<i>Вт</i>	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
6.	Плоский кут	-	радіан	<i>rad</i>	<i>рад</i>	-
7.	Тілесний кут	-	стерадіан	<i>sr</i>	<i>ср</i>	-

Позасистемні одиниці, які допускаються до застосування нарівні з одиницями СІ

Величина	Одиниця			
	Найменування	Позначення		Співвідношення з одиницею СІ
міжн.		укр.		
Маса	тонна	<i>t</i>	<i>T</i>	10^3 кг
	атомна одиниця маси	<i>u</i>	<i>a.o.</i> <i>м.</i>	$\approx 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Час	хвилина	<i>min</i>	<i>хв</i>	60 с
	година	<i>h</i>	<i>год</i>	3600 с
	доба	<i>d</i>	<i>доба</i>	86400 с
Плоский кут	градус	\dots°	\dots°	$\pi/180 \text{ рад} = 1,745329 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$
	хвилина	\dots'	\dots'	$\pi/10800 \text{ рад}$
	секунда	\dots''	\dots''	$\pi/648000 \text{ рад}$
	град	<i>g(gon)</i>	<i>град</i>	$\pi/200 \text{ рад}$
Об'єм, місткість	літр	<i>l</i>	<i>л</i>	10^{-3} м^3
Температура Цельсія, різниця температур	градус Цельсія	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$t = T - T_0$, де $T_0 = 273,15 \text{ K}$
Відносна величина (безрозмірне відношення фізичної величини до однойменної фізичної величини, взятої за вихідну: ККД, масова доля)	процент	$\%$	$\%$	10^{-2}
	проміле	‰	‰	10^{-3}
	мільйонна частка	<i>ppm</i>	<i>млн</i> <i>-1</i>	10^{-6}
логарифмічна величина (логарифм безрозмірного відношення фізичної величини до однойменної фізичної величини,	бел	<i>B</i>	<i>Б</i>	$1 \text{ Б} = \lg(P_2/P_1)$ при $P_2 = 10 \cdot P_1$ (для енергетичних од.) $1 \text{ Б} = 2 \cdot \lg(F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt{10} F_1$ (для "силових" величин: тиск, напруга, сила струму)

взятої за вихідну: рівень звукового тиску, підсилення, послаблення)	децибел	<i>dB</i>	дБ	0,1 Б
Частотний інтервал	октава	-	<i>окт</i>	1 <i>окт</i> = $\log_2(f_2/f_1)$ при $f_2 = 2 \cdot f_1$
	декада	-	<i>дек</i>	1 <i>дек</i> = $\lg(f_2/f_1)$ при $f_2 = 10 \cdot f_1$

Одиниці системи СГС , що мають власне найменування, та інші одиниці, які використовуються у фізиці

Величина	Одиниця			
	Найменування	Позначення		Співвідношення з одиницею СІ
міжн.		укр.		
Довжина	ангстрем	<i>Å</i>	<i>Å</i>	10^{-10} м
	мікрон	<i>μ</i>	<i>мк</i>	10^{-6} м
Сила, вага	дина	<i>dyn</i>	<i>дин</i>	10^{-5} Н
	кілограм-сила	<i>kgf</i>	<i>кгс</i>	9,80665 Н
	понд	<i>p</i>	-	$9,80665 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$
Тиск	кілограм-сила на квадратний сантиметр	<i>kgf/cm²</i>	<i>кгс/см²</i>	98066,5 Па
	міліметр водяного стовпа	<i>mm H₂O</i>	<i>мм вод. ст.</i>	9,80665 Па
	міліметр ртутного стовпа	<i>mm Hg</i>	<i>мм рт. ст.</i>	133,322 Па
	тор	<i>Torr</i>		133,322 Па
	фізична атмосфера	<i>atm</i>	<i>атм</i>	101325 Па
	технічна атмосфера	<i>at</i>	<i>ат</i>	98066,5
	Напруга (механічна)	кілограм-сила на квадратний міліметр	<i>kgf/mm²</i>	<i>кгс/мм²</i>

Робота, енергія	ерг	<i>erg</i>	<i>epg</i>	10^{-7} Дж
Потужність	кінська сила	-	<i>к.с.</i>	735,499 Вт
Динамічна в'язкість	пуаз	<i>P</i>	<i>П</i>	0,1 Па·с
Кінематична в'язкість	стокс	<i>St</i>	<i>Ст</i>	10^{-4} м ² /с
Кількість теплоти, термодинамічний потенціал (внутрішня енергія, ентальпія), теплота фазового перетворення	калорія (міжнар.)	<i>cal</i>	<i>кал</i>	4,1868 Дж
	Калорія (термохімічна)	<i>cal_{th}</i>	<i>кал_{тх}</i>	4,1840 Дж
	калорія 15-градусна	<i>cal₁₅</i>	<i>кал₁₅</i>	4,1855 Дж

Десяткові кратні та частинні одиниці

Для утворення десяткових кратних і частинних одиниць використовується ряд множників, що дорівнюють 10^n , де n – ціле додатне або від'ємне число, і префіксів до найменувань одиниць, по одній для кожного множника. Цей спосіб, який був уперше прийнятий ще під час створення метричної системи мір, дає змогу легко переводити числові значення величин при переході від одиниць СІ до кратних і частинних від них або від одних кратних і частинних одиниць до інших.

Множники та префікси для утворення десяткових кратних і частинних одиниць а також їх найменувань наведено в таблиці.

Префікси СІ для утворення десяткових кратних і частинних одиниць

Множник	Префікс	Символ		Множник	Префікс	Символ	
		міжн.	укр.			міжн.	укр.
10^{24}	йота	<i>Y</i>	<i>Й</i>	10^{-1}	деци	<i>d</i>	<i>д</i>
10^{21}	зета	<i>Z</i>	<i>ЗТ</i>	10^{-2}	санти	<i>c</i>	<i>с</i>
10^{18}	екса	<i>E</i>	<i>Е</i>	10^{-3}	мілі	<i>m</i>	<i>м</i>
10^{15}	пета	<i>P</i>	<i>П</i>	10^{-6}	мікро	<i>μ</i>	<i>мк</i>
10^{12}	тера	<i>T</i>	<i>Т</i>	10^{-9}	нано	<i>n</i>	<i>н</i>
10^9	гіга	<i>G</i>	<i>Г</i>	10^{-12}	піко	<i>p</i>	<i>п</i>
10^6	мега	<i>M</i>	<i>М</i>	10^{-15}	фемто	<i>f</i>	<i>ф</i>
10^3	кіло	<i>k</i>	<i>к</i>	10^{-18}	атто	<i>a</i>	<i>а</i>
10^2	гекто	<i>h</i>	<i>г</i>	10^{-21}	zepto	<i>z</i>	<i>зп</i>
10^1	дека	<i>da</i>	<i>да</i>	10^{-24}	йокто	<i>y</i>	<i>й</i>

Примітка. Одиниці часу (хвилину, годину, добу), плоского кута

(градус, хвилину, секунду), астрономічну одиницю, світловий рік, діоптрію та атомну одиницю маси не допускається застосовувати з префіксами.

При утворенні десяткових кратних і частинних одиниць слід керуватися певними правилами, встановленими стандартом.

1. Не допускається приєднання до найменування одиниці двох або більше префіксів підряд. Наприклад, замість найменування одиниці мікромікрофарад слід вживати пікофарад.

2. Префікс або його позначення слід писати разом з найменуванням одиниці, до якої вона приєднується, або відповідно з її позначенням.

3. Якщо одиницю утворено як добуток або відношення одиниць, то префікс слід приєднувати до найменування першої одиниці, що входить до добутку або до відношення.

Правильно: кілопаскаль-секунда на метр ($kPa \cdot s/m$; $кПа \cdot с/м$).

Неправильно: Паскаль-кілосекунда на метр ($Pa \cdot ks/m$; $Па \cdot кс/м$).

4. Допускається застосовувати, префікс в другому множнику добутку або в знаменнику лише в обґрунтованих випадках, коли такі одиниці дуже поширені. Наприклад, тонна-кілометр ($t \cdot km$; $т \cdot км$); ват на квадратний сантиметр (W/cm^2 ; $Вт/см^2$); вольт на сантиметр (V/cm ; $В/см$); ампер на квадратний міліметр (A/mm^2 ; $А/мм^2$).

5. Найменування кратних і частинних одиниць від одиниці, піднесеної до степеня, слід утворювати приєднанням префікса до найменування вихідної одиниці. Наприклад, кратною або частинними одиницями від одиниці площі – квадратного метра – будуть квадратний кілометр, квадратний дециметр, квадратний сантиметр, квадратний міліметр і т. д.

6. Позначення кратних і частинних одиниць від одиниці, піднесеної до степеня слід утворювати доданням відповідного показника степеня до позначення кратної або частинної від цієї одиниці, при цьому показник означає піднесення до степеня кратної або частинної одиниці разом з префіксом. Наприклад:

а) $5 км^2 = 5 (10^3 м)^2 = 5 \cdot 10^6 м^2$;

б) $250 см^3/с = 250 (10^{-2} м)^3/(1 с) = 250 \cdot 10^{-6} м^3/с$;

в) $0,002 см^{-1} = 0,002 (10^{-2} м)^{-1} = 0,002 \cdot 100 м^{-1} = 0,2 м^{-1}$.

7. Вибір десяткової кратної або частинної одиниці від одиниці СІ диктується насамперед зручністю її застосування. З різних кратних і частинних одиниць, що можуть бути утворені за допомогою

префіксів, вибирають таку, щоб числові значення величини лежали в межах від 0,1 до 1000.

8. Як десяткові кратні та частинні одиниці від основних і похідних одиниць СІ рекомендуються такі:

Одиниці СІ		Десяткові кратні та частинні від одиниць СІ	
Найменування	Позначення		Позначення
	міжнародне	українське	Міжнародні/українські
Метр	<i>m</i>	<i>м</i>	<i>km; cm; mm; μm; nm; pm; fm</i>
			<i>км; см; мм; мкм; нм; нм; фм</i>
Кілограм	<i>kg</i>	<i>кг</i>	<i>g; mg; μg</i>
			<i>г; мг; мкг</i>
Секунда	<i>s</i>	<i>с</i>	<i>ks; ms; μs; ns</i>
			<i>кс; мс; мкс; нс</i>
Ампер	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>kA; mA; μA; nA</i>
			<i>кА; мА; мкА; нА</i>
Кельвін	<i>K</i>	<i>К</i>	<i>MK; kK; mK; μK</i>
			<i>МК; кК; мК; мкК</i>
Моль	<i>mol</i>	<i>моль</i>	<i>kmol; mmol; μmol</i>
			<i>кмоль; ммоль; мкмоль</i>
Кандела	<i>cd</i>	<i>кд</i>	
Радіан	<i>rad</i>	<i>рад</i>	<i>mrad; μrad</i>
			<i>мрад; мкрад</i>
Стерадіан	<i>sr</i>	<i>ср</i>	

9. Для зменшення імовірності помилок при розрахунках десяткові кратні та частинні одиниці рекомендується підставляти тільки в кінцевий результат, а під час розрахунків усі величини слід виражати в одиницях СІ, замінюючи префікси степенями числа 10.

§2.5. Відомості про вчених в галузі молекулярної

фізики і термодинаміки

АВОГАДРО Амедео. Його повне ім'я: Лоренцо Ромено Амедео Карло Авогадро ді Кваренья є ді Черрето (1776–1856) – італійський фізик і хімік, член Туринської АН (1819 р.).

Народився у П'ємонті. Одержав юридичну освіту. У 1800 почав самостійно вивчати фізику і математику. З 1806 – демонстратор у коледжі при Туринській академії, з 1809 р. – професор у коледжі Верчеллі, у 1820–1822 рр. і 1834–1850 рр. – завідувач кафедри математичної фізики Туринського університету.

Основні фізичні роботи присвячені молекулярній фізиці. Уже першими своїми дослідженнями в цій області заклав основи молекулярної теорії, висунувши в 1811 р. молекулярну гіпотезу в «Нарисі методів визначення відносних мас елементарних молекул тіл і пропорцій, по яких вони входять у сполуки».

Відкрив у 1811 р. важливий для фізики і хімії закон, по якому в рівних обсягах різних газів при однакових умовах міститься однакова кількість молекул (закон Авогадро). Виходячи зі свого закону, розробив метод визначення молекулярної й атомної мас. Автор чотири томної праці «Фізика вагових тіл, чи трактат про загальну конституцію тіл» (1837 – 1841 рр.), що був першим посібником з молекулярної фізики.

БОЙЛЬ Роберт (1627–1691) – англійський хімік, фізик і філософ, член Лондонського королівського товариства (1663 р.). Народився в Лісморі (Ірландія). З 1654 р. жив в Оксфорді, де займався дослідженнями в галузі фізики і хімії. У 1668 р. переїхав у Лондон.

Фізичні роботи присвячені молекулярній фізиці, вивченню світлових і електричних явищ, гідростатиці, акустиці, теплоті, механіці. У 1660 р. удосконалив повітряний насос Геріке, здійснив з ним ряд дослідів (виявив пружність повітря, визначив його густину, виміряв ступінь розрідженості і т.п.) і відкрив нові фізичні факти, які виклав у творі «Нові фізико-механічні досліди, що стосуються пружності повітря» (1660 р.). Показав, що тепла вода може закипіти при розрідженні навколишнього повітря, і всупереч думці, що тоді існувала, довів, що підйом рідини у вузьких трубках не зв'язана з атмосферним тиском. Відкрив у 1661 р. закон зміни об'єму повітря зі зміною тиску, що незалежно від нього установив (1676 р.) також Е. Маріотт (закон Бойля-Маріотта). Для своїх дослідів сконструював барометр, увів (1662–1663 рр.) термін «барометр».

Виконав перші дослідження пружності твердих тіл, висловив

думку про складність білого світла, про можливість електризації через вплив, теплоту розглядав як рух молекул, був прихильником атомістичної гіпотези, вважаючи, що всі тіла складаються з більш дрібних зовсім однакових часток. У 1663 р. відкрив кольорові кільця в тонких шарах, названі згодом ньютонівськими.

Значні заслуги Бойля у хімії. Сформулював у 1661 р. поняття хімічного елемента і ввів у хімію експериментальний метод, поклавши тим самим початок становленню хімії як науки.

БОЛЬЦМАН Людвіг (1844–1906) – австрійський фізик-теоретик, один з основоположників класичної статистичної фізики, член Австрійської АН (1895 р.). Народився у Відні. Закінчив Віденський університет (1866 р.). Професор університетів у Граці (1869–1873 рр. і 1876–1889 рр.), Відні (1873–1876 рр., 1894–1900 рр. і з 1903 р.), Мюнхені (1889–1894 рр.), Лейпцигу (1900–1902 рр.).

Основні роботи в області кінетичної теорії газів, термодинаміки і теорії випромінювання. Вивів у 1866 р. закон розподілу газових молекул за швидкостями (статистика Больцмана). Закон рівноважного больцманівського розподілу ліг в основу класичної статистичної фізики. У 1871 р. висловив ергодичну гіпотезу. Застосовуючи статистичні методи до кінетичної теорії ідеальних газів, вивів (1872 р.) основне кінетичне рівняння газів, що є основою фізичної кінетики. Зв'язав ентропію фізичної системи з імовірністю її стану (1872 р.) і довів статистичний характер другого закону термодинаміки, давши йому своє формулювання, чим був нанесений удар ідеалістичній гіпотезі-тепловій смерті Всесвіту. Сформулював у 1872 р. Н-теорему (Н-теорема Больцмана), що разом з його статистичною інтерпретацією другого початку термодинаміки покладена в основу теорії необоротних процесів.

Уперше застосував до випромінювання принципи термодинаміки. Використовуючи гіпотезу Дж. Максвелла про світловий тиск, у 1884 р. теоретично відкрив закон теплового випромінювання, за яким випромінювана енергія абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню абсолютної температури тіла. Цей закон був експериментально встановлений у 1879 р. І. Стефаном (закон Стефана-Больцмана). У 1884 р. з термодинамічних міркувань вивів існування тиску світла.

Приділяв увагу також філософським питанням природознавства, активно боровся з енергетиками, відстоюючи атомістичну теорію, а в теорії пізнання – з махістами. Безупинні нападки з боку

супротивників кінетичної теорії газів викликали в Больцмана манію переслідування. Можливо, тому він покінчив життя самогубством.

Роботи присвячені також математиці, механіці, оптиці, гідродинаміці, теорії пружності, теорії електромагнітного поля і т.п.

Член багатьох академій наук.

ВАН ДЕР ВААЛЬС Йоханнес Дідерік (1837–1923) – нідерландський фізик, член Нідерландської АН. Народився в Лейдені. Закінчив Лейденський університет. У 1877–1907 рр. – професор Амстердамського університету.

Роботи присвячені молекулярній фізиці і вивченню низькотемпературних явищ. У 1873 р. вивів рівняння стану реального газу, що враховує об'єм молекул і сили взаємодії між ними (рівняння Ван дер Ваальса), і установив неперервність газоподібного і рідкого станів. Уперше розглянув питання про міжмолекулярні сили у зв'язку з будовою речовин у газоподібному і рідкому станах. Запропонував теорію, що якісно пояснює природу критичних явищ. У 1910 р. за роботи, що містять рівняння агрегатних станів газів і рідин, визнаний гідним Нобелівської премії.

Розробив теорію бінарних сумішей (1890 р.) і термодинамічну теорію капілярності (1894 р.). Дослідження належать також до електролітичної дисоціації і гідростатики.

Член Паризької АН.

ГАЛІЛЕЙ Галілео (1564–1642) – видатний італійський фізик і астроном, один із засновників точного природознавства, член Академії деї Лінчеї (1611 р.). Народився у Пізі. У 1581 р. поступив у Пізанський університет, де вивчав медицину. Але, захопившись геометрією і механікою, зокрема творами Архімеда й Евкліда, залишив університет з його схоластичними лекціями і повернувся у Флоренцію, де чотири роки самостійно вивчав математику.

З 1589 р. – професор Пізанського університету, у 1592–1610 рр. – Падуанського, надалі – придворний філософ герцога Козімо II Медічі.

Уплинув на розвиток наукової думки. Саме від нього бере початок фізика як наука. Галілею людство зобов'язане двома принципами механіки, що зіграли велику роль у розвитку не тільки механіки, але і усієї фізики. Це відомий галілеєвський принцип відносності для прямолінійного і рівномірного руху і принцип сталості прискорення сили тяжіння. Виходячи з галілеєвського принципу відносності, І. Ньютон прийшов до поняття інерціальної системи відліку, а другий принцип, пов'язаний з вільним падінням

тіл, привів його до поняття інертної і гравітаційної маси. А. Ейнштейн поширив механічний принцип відносності Галілея на усі фізичні процеси, зокрема на світло, і вивів з нього тезу про природу простору і часу (при цьому перетворення Галілея замінюються перетвореннями Лоренца). Об'єднання ж другого галілеєвського принципу, що Ейнштейн тлумачив як принцип еквівалентності сил інерції силам тяжіння, із принципом відносності привело його до загальної теорії відносності.

Галілей установив закон інерції (1609 р.), закони вільного падіння, руху тіла по похилій площині (1604–1609 рр.) і тіла, кинутого під кутом до горизонту, відкрив закон додавання рухів і закон сталості періоду коливань маятника (явище ізохронізму коливань, 1583 р.). Від Галілея веде свій початок динаміка.

У липні 1609 р. Галілей побудував свою першу підзорну трубу – оптичну систему, що складається з опуклої й увігнутої лінз, – і почав систематичні астрономічні спостереження. Це було друге народження підзорної труби, що після майже 20-літньої невідомості стала могутнім інструментом наукового пізнання. Тому Галілея можна вважати винахідником першого телескопа. Він досить швидко удосконалив свою підзорну трубу і, як писав згодом, «побудував собі прилад у такому ступені чудесний, що з його допомогою предмети здавалися майже в тисячу разів більшими і більш ніж у тридцять разів ближчими, чим при спостереженні простим оком». У трактаті «Зоряний вісник», що вийшов у Венеції 12 березня 1610 р., він описав відкриття, зроблені за допомогою телескопа: виявлення гір на Місяці, чотирьох супутників у Юпітера, доказ, що Молочний Шлях складається з безлічі зірок.

Створення телескопа й астрономічні відкриття принесли Галілею широку популярність. Незабаром він відкриває фази у Венери, плями на Сонці і т.п. Галілей налагоджує в себе виробництво телескопів. Змінюючи відстань між лінзами, у 1610–1614 рр. створює також мікроскоп. Завдяки Галілею лінзи й оптичні прилади стали могутнім знаряддям наукових досліджень. Як відзначав С. І. Вавілов, «саме від Галілея оптика одержала найбільший стимул для подальшого теоретичного і технічного розвитку». Оптичні дослідження Галілея присвячені також вченню про колір, питанням природи світла, фізичній оптиці. Галілею належить ідея скінченності швидкості поширення світла і постановки (1607 р.) експерименту по її визначенню.

Астрономічні відкриття Галілея зіграли величезну роль у розвитку наукового світогляду, вони з всією очевидністю переконували в правильності вчення Коперніка, помилковості системи Арістотеля і Птолемея, сприяли перемозі і утвердженню геліоцентричної системи світу. У 1632 р. вийшов відомий «Діалог про дві найголовніші системи світу», у якому Галілей відстоював геліоцентричну систему Коперніка. Вихід книги роз'ярив церковників, інквізиція звинуватила Галілея в ересі і, улаштувавши процес, змусила привселюдно відмовитися від коперниківського вчення, а на «Діалог» наклала заборону. Після процесу в 1633 р. Галілей був оголошений «в'язнем святої інквізиції» і змушений був жити спочатку в Римі, а потім в Арчертрі біля Флоренції. Однак наукову діяльність Галілей не припинив, до своєї хвороби (у 1637 р. Галілей остаточно втратив зір) він завершив працю «Бесіди і математичні докази, що стосуються двох нових галузей науки», що підбивав підсумок його фізичних досліджень.

Винайшов термоскоп, що є прообразом термометра, сконструював (1586 р.) гідростатичні ваги для визначення густини твердих тіл, визначив густину повітря. Висунув ідею застосування маятника у годиннику. Фізичні дослідження присвячені також гідростатиці, міцності матеріалів і т.п.

ГЕЙ-ЛЮССАК Жозеф Луї (1778–1850) – французький фізик і хімік, член Паризької АН (1806 р.). Народився в Сен-Леонарі. Закінчив Політехнічну школу (1800 р.), де працював з 1802 р. (з 1809 р. – професор хімії), одночасно в 1808–1832 рр. – професор фізики Паризького університету. З 1832 рр. – професор хімії Паризького ботанічного саду.

Фізичні роботи в області молекулярної фізики і теплоти. Досліджував розширення і властивості газів. У 1802 р. незалежно від Дж. Дальтона відкрив один з газових законів (закон Гей-Люссака), довів, що коефіцієнт розширення всіх газів однаковий, і обчислив його ($0,00375 \text{ град}^{-1}$). У 1804 р. двічі здійснив польоти на повітряній кулі (на висоту 7 км), під час яких виконав ряд наукових досліджень, зокрема, вивчав температуру і вологість повітря. У 1807 р. установив зниження температури повітря при його розширенні і підвищення – при стиску (без теплообміну), встановив незалежність теплоємності газу від його об'єму. У 1808 р. емпірично установив, що всі прості гази з'єднуються один з одним у простих кратних відношеннях (закон об'ємних відношень). У 1811 р. розробив спосіб визначення густини

пари, досліджував (1816 р.) пружність пари. Був прибічником корпускулярної теорії світла. В області хімії розробив спосіб одержання калію і натрію (разом з Л. Тенаром), одержав ряд хімічних сполук, зокрема синильну кислоту, ціан, поклав початок об'ємному аналізу. Винайшов ряд приладів (гідрометр, спиртометр, барометр, термометри, насос).

З 1815 р. разом з Д. Араго редагував журнал «Аннали хімії і фізики».

ДАЛЬТОН Джон (1766–1844) – англійський хімік і фізик, член Лондонського королівського товариства (1822 р.). Народився в Іглсфілді. Освіту здобув самостійно. Був учителем математики в Манчестері.

Фізичні дослідження проводив у галузі молекулярної фізики. Спостерігав (1800 р.) підвищення температури повітря при його адіабатичному стиску і зниження – при розширенні. Досліджував властивості водяної пари, перший указав (1801 р.) на відмінність пари насиченої і перегрітої. У 1801 р. відкрив закон парціальних тисків газів, у 1803 р. – закон залежності розчинення газів від їхнього парціального тиску (закон Дальтона), у 1801 р. незалежно від Ж. Гей-Люссака – один з газових законів: при постійному тиску всі гази з підвищенням температури розширюються однаково.

Велика заслуга Дальтона в розвитку атомістичних уявлень стосовно до хімії. Установив, що атоми того самого хімічного елемента мають однакові властивості. Увів поняття атомної маси і склав першу таблицю атомних мас елементів (1803 р.). Запропонував позначення для атомів хімічних елементів, але вони не одержали поширення. У 1794 р. вперше описав дефект зору, що одержав назву дальтонізму.

Член Паризької АН.

ДЖОУЛЬ Джеймс Прескотт (1818–1889) – англійський фізик, один з першовідкривачів закону збереження енергії, член Лондонського королівського товариства (1850 р.). Народився у Солфорді. Одержав домашню освіту. Перші уроки з фізики йому давав Дж. Дальтон, під впливом якого Джоуль початків свої експериментальні дослідження.

Роботи присвячені електромагнетизму, теплоті, кінетичній теорії газів. Установив у 1841 р. залежність кількості тепла, виділюваного в провіднику при проходженні через нього електричного струму, від величини струму й опору провідника (закон Джоуля – Ленца). У

1843 р. експериментально показав, що теплоту можна одержати за рахунок механічної роботи, і обчислив механічний еквівалент теплоти, давши тим самим переконливий доказ закону збереження енергії. Досліджував теплові явища при стиску і розширенні газу, зокрема дослідом з розширенням розрідженого газу показав, що внутрішня енергія ідеального газу не залежить від його об'єму (1845 р.). Разом з У. Томсоном відкрив у 1853–1854 рр. явище охолодження газу при його повільному стаціонарному адіабатичному протіканні через пористу перегородку (ефект Джоуля – Томсона). Побудував термодинамічну температурну шкалу, теоретично визначив теплоємність деяких газів. Теплоту розглядав як рух часток. Обчислив швидкість руху молекул газу й установив її залежність від температури, тиск газу вважав результатом ударів часток цього газу об стінки посудини (1848 р.). Відкрив явище магнітного насичення ферромагнетиків (1840 р.) і магнітострикцію (1842 р.).

ДЮЛОНГ П'єр Луї (1785–1838) – французький фізик і хімік, член Паризької АН (1823), президент (1828 р.). Народився у Руані. У 1801–1803 рр. навчався в Політехнічній школі. У 1811–1820 рр. працював у Нормальній і Ветеринарній школах у Парижі. З 1820 р. – професор Паризького університету й у 1820–1830 рр. – Політехнічної школи.

Фізичні роботи присвячені теплоті. Разом з А. Пті в 1819 р. установив, що добуток питомої теплоємності й атомної маси для простих тіл у кристалічному стані є величиною майже постійною (закон Дюлонга і Пті). Досліджував теплопровідність і пружність газів, теплове розширення твердих тіл, винайшов (1816) катетометр (з А. Пті). У 1829 р. обчислив теплоємність різних газів при постійному об'ємі, у 1830 р. сконструював водяний калориметр і визначив теплоти згоряння великої кількості речовин. Вперше одержав хлористий азот і фосфорноватисту кислоту.

ЕЙНШТЕЙН Альберт (1879–1955) – видатний фізик-теоретик, один із творців сучасної фізики. Народився в Ульме (нині ФРН). У чотирнадцять років переїхав у Швейцарію, де закінчив Цюрихський політехнікум (1900 р.). У 1902–1908 рр. працював експертом у патентному бюро в Берні, у 1909–1913 рр. – професор Цюрихського політехнікуму (у 1911 р. – професор Німецького університету в Празі), у 1914–1933 рр. – професор Берлінського університету і директор Інституту фізики. Після утворення влади фашистів піддався переслідуванням і був змушений залишити Німеччину. У

1933 р. переїхав у США, де до кінця життя працював у Принстонському інституті перспективних досліджень.

Творець спеціальної і загальної теорій відносності, що докорінно змінила уявлення про простір, час і матерію. У 1905 р. у статті “До електродинаміки тіл, що рухаються,” розробив основи спеціальної теорії відносності, виклавши нові закони руху, що узагальнювали ньютонівські і переходили в них у випадку малих швидкостей тіл, коли $v < c$. В основу своєї теорії поклав два постулати: спеціальний принцип відносності, що є узагальненням механічного принципу відносності Галілея на будь-які фізичні явища (у будь-яких інерціальних системах усі фізичні процеси – механічні, електричні, теплові, оптичні й ін. – протікають однаково), і принцип сталості швидкості світла у вакуумі (швидкість світла у вакуумі не залежить від руху джерела світла чи спостерігача й однакова у всіх напрямках, тобто однакова в усіх інерціальних системах і дорівнює $3 \cdot 10^{10}$ см/с). Обидва постулати і теорія, побудована на їхній основі, привели до руйнування багатьох сталих класичних понять (абсолютний простір, абсолютний час), змусили переглянути ряд основних положень класичної фізики Ньютона, установили новий погляд на світ, нові просторово-часові уявлення (відносність довжини, часу, одночасності подій). Однак ця теорія не відкинула зовсім закономірностей, установлених класичною механікою, а уточнила їх у випадку руху зі швидкостями, порівнянними зі швидкістю світла у вакуумі.

Виходячи зі своєї теорії, у тому ж 1905 р. відкрив закон взаємозв'язку маси й енергії. Показав, що маса є мірою енергії, укладеної в тілах. Це співвідношення Ейнштейна ($E = mc^2$) лежить в основі розрахунку енергетичного балансу ядерних реакцій, в основі всієї ядерної фізики. Усі положення і висновки спеціальної теорії відносності яскраво підтвердилися в численних дослідах, вона стала могутнім інструментом у фізичних дослідженнях, зокрема у фізиці мікросвіту.

Значна роль Ейнштейна й у створенні квантової теорії. Якщо М. Планк (1900 р.) квантував лише енергію матеріального осцилятора, то Ейнштейн увів у 1905 р. поняття про дискретну, квантову структуру самого світлового випромінювання, розглядаючи останнє як потік квантів світла, чи фотонів (фотонна теорія світла). Таким чином, Ейнштейну належить теоретичне відкриття фотона, експериментально виявленого в 1922 р. А. Комптоном. Виходячи з квантової теорії світла, пояснив такі явища, як фотоефект (закон

Ейнштейна для фотоефекту), правило Стокса для флюоресценції, фотоіонізацію й ін., чого не могла пояснити електромагнітна теорія світла (Нобелівська премія, 1921 р.). У 1907 р. поширив ідеї квантової теорії на фізичні процеси, безпосередньо не зв'язані зі світлом. Зокрема, розглянувши теплові коливання атомів у твердому тілі і використавши ідеї квантової теорії, пояснив зменшення теплоємності твердих тіл при зниженні температури, розробивши першу квантову теорію теплоємності твердих тіл (1907 р.). У 1909 р. уперше розглянув корпускулярно-хвильовий дуалізм для випромінювання, а також флуктуації енергії рівноважного випромінювання, одержавши формулу для флуктуації енергії. У 1912 р. установив основний закон фотохімії: кожен поглинений фотон викликає одну елементарну фотореакцію (закон Ейнштейна). Передбачив у 1916 р. явище індукованого випромінювання, ввів ймовірності спонтанного і вимушеного випромінювань (коефіцієнти Ейнштейна).

У статистичній фізиці розвинув у 1905 р. молекулярно-статистичну теорію броунівського руху, у 1924–1925 рр. створив квантову статистику частинок з цілим спіном (статистика Бозе-Ейнштейна).

У 1915 р. передбачив і разом з В. де Гаазом експериментально відкрив ефект зміни механічного моменту при намагнічуванні тіла (ефект Ейнштейна – де Гааза).

У 1915 р. завершив створення загальної теорії відносності, або сучасної релятивістської теорії тяжіння, що установила зв'язок між простором – часом і матерією. До її створення Ейнштейна призвів аналіз відомого факту, що відношення інертної маси тіла до гравітаційної однакове для всіх тіл (принцип еквівалентності). Цей принцип разом із принципом відносності ліг в основу загальної теорії відносності, що пояснила сутність тяжіння, що полягає в зміні геометричних властивостей, викривленні чотирьохвимірному простору – часу навколо тіл, які утворюють поле (будь-яка маса впливає на метрику навколишнього простору). Вивів рівняння, що описує поле тяжіння – рівняння Ейнштейна (у 1915 р. загально коваріантні рівняння гравітаційного поля одержав також Д. Гільберт). Для перевірки своєї теорії запропонував три ефекти: викривлення світлового променя в полі тяжіння Сонця, зсув перигелію Меркурію і гравітаційний червоний зсув. Ці ефекти, як показали наступні експерименти, дійсно існують і кількісно правильно передбачувалися загальною теорією відносності. У 1916 р. висунув гіпотезу про

існування гравітаційних хвиль, а у 1918 р. вивів формулу для потужності гравітаційного випромінювання.

Загальна теорія відносності обумовила бурхливий розвиток космології як науки. Виходячи з цієї теорії, Ейнштейн у 1917 р. запропонував нову модель Всесвіту, відповідно до якої Всесвіт являє замкнутий тривимірний простір (тривимірну сферу) скінченого об'єму і незмінний у часі. Однак ця модель не відповідає дійсності, оскільки Всесвіт нестационарний, він розширюється. Уперше це теоретично показав А. А. Фрідман, а в 1929 р. було підтверджено спостереженнями (явище розбігання галактик).

Починаючи з 1933 р., роботи Ейнштейна були присвячені питанням космології і єдиній теорії поля. Однак спроби побудувати таку теорію закінчилися невдачею. У роботах Ейнштейна піднято ряд гносеологічних проблем, але його філософські погляди не завжди послідовні.

Член багатьох академій наук і наукових товариств.

КАМЕРЛІНГ-ОННЕС Гейке (1853–1926) – нідерландський фізик, член Нідерландської АН. Народився у Гронінгені. Закінчив Гронінгенський університет (1876 р.). Удосконалював знання в Г. Кірхгофа і Р. Бунзена в Гейдельберзі. У 1878–1882 рр. працював у Політехнічній школі в Делфті, у 1882–1923 рр. – професор Лейденського університету, засновник і директор (1894–1923 рр.) криогенної лабораторії (тепер Лейденська криогенна лабораторія ім. Г. Камерлінг-Оннеса).

Роботи належаться до фізики низьких температур і надпровідності. У 1892–1894 рр. сконструював високопродуктивну зріджувальну установку каскадного типу для кисню, азоту і повітря. У 1906 р. одержав рідкий водень. Перший одержав температури, близькі до абсолютного нуля, і досліджував властивості багатьох речовин при наднизьких температурах. Розробив метод одержання рідкого гелію, у 1908 р. вперше одержав рідкий гелій і виміряв його температуру (Нобелівська премія, 1913 р.). Надалі виконав ряд вимірів по уточненню цієї температури, одержавши для неї значення $4,25\text{ K}$ (1911) і $4,42\text{ K}$ (1922 р.). Виміряв (1911 р.) критичну точку гелію ($T_k = 5,20\text{ K}$, $p_k = 2,26\text{ ат}$), у 1909 р. одержав температуру в $1,04\text{ K}$. Виміряв в'язкість рідкого гелію, знайшов, що вона максимальна при $2,2\text{ K}$; виміряв густину рідкого гелію і його пари, питому теплоємність, разом з Л. Дана приховану теплоту пароутворення.

У 1911 р. відкрив явище надпровідності в ртуті, потім в олова,

свинцю, талію й ін. Знайшов у 1913 р. руйнування надпровідності під впливом сильних магнітних полів і струмів. У 1924 р. показав можливість створення незатухаючого струму в кільці, що складається з двох різних надпровідників, що знаходяться в контакті. Перший запропонував використовувати надпровідну обмотку для створення дуже сильного магнітного поля.

Виявив себе як великий організатор науки, що поклав початок новому підходу до планування і керівництва науковими дослідженнями, його лабораторія стала своєрідною моделлю для наукових інститутів ХХ ст. Заснував (1901 р.) при лабораторії школу лаборантів і складувів, науковий журнал «Повідомлення з фізичної лабораторії Лейденського університету».

КАРНО Нікола Леонард Саді (1796–1832) – французький фізик і інженер, один із творців термодинаміки. Народився у Парижі. Закінчив Політехнічну школу (1814 р.). У 1814–1819 рр. і 1826–1827 рр. перебував на військовій службі як інженер.

У 1824 р. опублікував твір «Міркування про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу», у якому, виходячи з неможливості створення вічного двигуна, уперше показав, що корисну роботу можна одержати лише у випадку, коли тепло переходить від нагрітого тіла до більш холодного (другий закон термодинаміки). Тільки різниця температур нагрівача і холодильника обумовлює віддачу (КПД) теплової машини, природа ж робочого тіла не грає ніякої ролі (теорема Карно). Праця Карно одержала широку популярність у 1834 р. завдяки Б. Клапейрону, який його ідеям надав доступну математичну форму.

Увів поняття кругового й оборотного процесів, ідеального циклу теплових машин, заклав тим самим основи їхньої теорії. Показав перевагу застосування в парових машинах пари високого тиску і її багаторазового розширення, сформулював принцип роботи газових теплових машин. Прийшов до поняття механічного еквівалента теплоти.

КЛАПЕЙРОН Бенуа Поль Еміль (1799–1864) – французький фізик і інженер, член Паризької АН (1858 р.). Народився у Парижі. Закінчив Політехнічну школу (1818 р.). У 1820–1830 рр. працював у Петербурзі в Інституті інженерів шляхів сполучення. Після повернення у Францію був професором (з 1844 р.) Школи мостів і доріг у Парижі.

Фізичні дослідження присвячені теплоті, пластичності і рівновазі

твердих тіл. Надав у 1834 р. математичну форму ідеям Н. Карно, першим оцінивши велике наукове значення його праці «Міркування про рушійну силу вогню...», що містить фактично формулювання другого закону термодинаміки. Виходячи з цих ідей, уперше ввів у термодинаміку графічний метод – індикаторні діаграми, зокрема запропонував систему координат P – V . У 1834 р. вивів рівняння стану ідеального газу, узагальнене надалі (1874 р.) Д. І. Менделєєвим (рівняння Менделєєва – Клапейрона), і рівняння, що встановлює зв'язок між температурою плавлення і кипіння речовини і тиском, – рівняння Клапейрона – Клаузіуса (останній обґрунтував у 1851 р. це рівняння).

КЛАУЗІУС Рудольф Юліус Емануель (1822–1888) – німецький фізик-теоретик, один із творців термодинаміки і кінетичної теорії газів, член-кореспондент Берлінської АН (1876 р.). Народився в Кесліні (нині Кошалін, Польща). Закінчив Берлінський університет (1848 р.). З 1855 р. – професор Цюріхського, з 1867 р. – Вюрцбургського і з 1869 р. – Боннського університетів.

Роботи в області молекулярної фізики, термодинаміки, теорії парових машин, теоретичної механіки, математичної фізики. Розвиваючи ідеї Н. Карно, точно сформулював принцип еквівалентності теплоти і роботи. У 1850 р. незалежно від У. Ранкіна одержав загальні співвідношення між теплотою і механічною роботою (перший закон термодинаміки) і розробив ідеальний термодинамічний цикл парової машини (цикл Ранкіна–Клаузіуса). Першим досліджував властивості водяної пари (1851 р.), вказав (1856 р.) шлях підвищення КПД теплової машини – підвищення температури робочого тіла. Сформулював (1850 р.) другий закон термодинаміки: «теплота сама по собі не може перейти від холодного тіла до більш теплого». Дав математичний вираз другого закону як у випадку оборотних кругових процесів (1854 р.), так і необоротних (1862 р.). Розвиваючи свої термодинамічні ідеї, увів нове важливе поняття – поняття ентропії (1865 р.), установивши її найважливішу особливість: у замкнутій системі ентропія або залишається незмінною (у випадку оборотних процесів), або зростає (у випадку необоротних процесів). Тим самим Клаузіус показав, що зміна ентропії визначає напрямок протікання процесу. Поширивши принцип зростання ентропії на весь Всесвіт, вважаючи її замкнутою системою, прийшов до помилкового висновку про теплову смерть Всесвіту, тобто до того самого висновку, що впливав з ідеалістичної гіпотези теплової

смерті Всесвіту, висунутої в 1852 р. У. Томсоном. Неспроможність цієї гіпотези довів Л. Больцман, обґрунтувавши статистичний характер другого закону термодинаміки.

Значний внесок вніс у кінетичну теорію газів, давши в 1857 р. систематичний виклад основ цієї теорії. Увів тут статистичні уявлення (метод середніх величин), поняття довжини вільного пробігу молекул і обчислив (1859 р.) середню довжину їхнього шляху між двома зіткненнями, перший теоретично обчислив величину тиску газу на стінки посудини. Увів поняття про сферу дії молекул (1859 р.). Довів у 1870 р. теорему віріала, що зв'язує середню кінетичну енергію системи частинок з діючими в ній силами. Запропонував більш загальну форму рівняння газового стану в порівнянні з рівнянням Ван дер Ваальса (1880 р.). Обґрунтував (1851 р.) рівняння Клапейрона, що зв'язує температуру плавлення речовини з тиском (рівняння Клапейрона – Клаузіуса).

Теоретично обґрунтував закон Джоуля–Ленца, розвинув у 1853 р. термодинамічну теорію термоелектрики, увів у 1857 р. поняття про електролітичну дисоціацію. Розробив (1879 р.) теорію поляризації діелектриків, виходячи з якої, незалежно від О. Моссотті вивів співвідношення між діелектричною проникністю і поляризованістю діелектрика (формула Клаузіуса–Моссотті).

Член ряду академій наук і наукових товариств.

ЛОМОНОСОВ Михайло Васильович (1711–1765) – видатний російський учений, мислитель, член Петербурзької АН (1745 р.). Народився в с. Денисівка Архангельської губ. (нині с. Ломоносове Архангельської обл.). У 1731–1735 рр. – учився у Слов'яно-греко-латинській академії у Москві, у 1735–1736 рр. – в університеті при Петербурзькій АН, у 1736–1741 рр. – за кордоном в Марбурзі і Фрейберзі. Повернувшись у Росію, був обраний у 1742 р. ад'юнктом, а в 1745 р. – академіком Петербурзької АН. Роботи присвячені фізиці, хімії, астрономії, гірській справі, металургії й ін. Ломоносов зосередив дослідження на найбільш актуальних проблемах фізики і хімії того часу. Висловив ряд нових положень і гіпотез, зробив ряд відкриттів, що випередили його час і передбачили досягнення фізики ХІХ ст. Експериментально довів закон збереження речовини. У 1756 р. виконав класичний дослід, показавши, що в запаяній судині при нагріванні без доступу повітря маса металу не збільшується і при цьому загальна маса посудини залишається незмінною (закон збереження маси речовини). Аналогічний експеримент був виконаний

А. Лавуазьє лише в 1774 р. І хоча саме після цих робіт Лавуазьє закон збереження маси речовини при хімічних реакціях остаточно ввійшов у науку, пріоритет Ломоносова у відкритті цього закону є незаперечним.

Вважав природу як єдине ціле, де усе взаємозалежне. Усі процеси в природі відбуваються так, що зміни в одному місці обов'язково зв'язані зі змінами в іншому. При цьому ніщо не зникає безвісти і не виникає з нічого. Ломоносов говорить про будь-які «зміни, що у природі мають місце» і про «їхнє загальне збереження» (закон збереження матерії і руху Ломоносова).

Розробив точні методи зважування і був основоположником запровадження фізичних методів у хімію, намагався застосувати у хімії методи точного кількісного аналізу. При вивченні природи основним вважав дослід, що було найбільш характерною рисою його як ученого. Вивчав рідкий, газоподібний і твердий стани речовин, докладно розробив термометрію, досить точно калібрував свої ртутні термометри. З досить високою для свого часу точністю визначив коефіцієнт розширення газів.

Розробив також чимало конструкцій різних фізичних, метеорологічних і ін. приладів (близько 100), зокрема віскозиметр, прилад для визначення твердості тіл, пірометр, казан для дослідження речовини при низькому і високому тисках, анемометр, газовий барометр і ін.

Був непримиренним супротивником концепції невагомих і, усупереч більшості вчених, що займалися придумуванням невагомих для пояснення різних фізичних процесів, розробив свій погляд на світ і процеси, що відбуваються в ньому. За Ломоносовим, навколишній світ складається з вагової матерії (яка у свою чергу складається з нечуттєвих часток) і ефіру. Усі тіла складаються з «корпускул» (у сучасній термінології – молекул), що містять деяку кількість «елементів» (атомів). Між атомами і молекулами він проводив чітку межу, близько підійшов до ідеї молекулярної будови хімічних сполук. Усі фізичні явища розглядав як результат руху великих і малих мас вагової матерії й ефіру.

Рухом дрібних часток уявлялася Ломоносову теплота, кінетична природа теплоти не викликала у нього ніяких сумнівів. Нагрівання тіл він зв'язував зі зростанням поступального й обертального руху. Близько підійшов до поняття абсолютного нуля. Свою теорію теплоти виклав у роботі «Міркування про причину теплоти і холоду»

(1747–1748 рр.). Є одним з основоположників молекулярно-кінетичної теорії теплоти.

Значне місце у творчості Ломоносова займали роботи з оптики. Він був прихильником хвильової теорії світла, розробив теорію кольорів, сконструював ряд оптичних приладів, зокрема телескоп-рефлектор за допомогою якого спостерігав у 1761 р. проходження Венери по диску Сонця, що привело його до відкриття атмосфери на цій планеті.

Разом з Г. В. Ріхманом проводив дослідження в області електрики, зокрема атмосферної. З цією метою вони використовували винайдений Ріхманом «електричний покажчик», що був прообразом електрометра. Розробив теорію утворення атмосферної електрики, походження якої зв'язував з висхідними і низхідними потоками повітря. Намагався створити загальну теорію електричних явищ, суть якої він бачив у русі ефіру.

Багато зробив для розвитку науки, культури й освіти в Росії. У 1755 р. з ініціативи і за проектом М. В. Ломоносова був відкритий Московський університет, що носить нині його ім'я. Був засновником природознавства в Росії. Академія наук СРСР заснувала золоту медаль ім. М. В. Ломоносова.

ЛОШМІДТ Йоганн Йозеф (1821–1895) – австрійський фізик і хімік, член Австрійської АН (1870 р.). Народився в Путшірні. Учився в Празькому університеті. З 1865 р. працював у Віденському університеті (з 1868 р. – професор). Основні роботи в області кінетичної теорії газів, кристалографії, стереохімії. Перший обчислив (1865 р.) діаметр молекули і визначив кількість молекул газу, що містяться в 1 см^3 при нормальних умовах (число Лошмідта).

МАЙЄР Юліус Роберт (1814–1878) – німецький лікар. Одним з перших відкрив фундаментальний закон природи – закон збереження і перетворення енергії. Народився в Хейльброні. Закінчив Тюбінгенський університет (1838 р.), одержавши ступінь доктора медицини. У 1839 р. працював у клініках Парижа. У 1840–1841 рр. як корабельний лікар брав участь у плаванні на о. Яву. Під час плавання помітив, що колір венозної крові матросів у тропіках значно світліший, ніж у північних широтах. Ця зміна кольору венозної крові привела його до думки, що існує зв'язок між споживанням речовини й утворенням тепла. Установив також, що кількість продуктів, що окисляються, в організмі людини зростає зі збільшенням виконуваної ним роботи. Усе це дало Майєру підставу в 1840 р. припустити, що

теплота і механічна робота здатні взаємно перетворюватися. Результати своїх досліджень він виклав у роботах «Про кількісне і якісне визначення сил» (1841 р., опублікована в 1881 р.) і «Зауваження щодо сил неживої природи» (1841 р., опублікована в 1842 р.). У цих роботах Майєр уперше сформулював закон збереження енергії, докладніше – у роботі «Органічний рух у його зв'язку з обміном речовин» (1845 р.), а також теоретично обчислив механічний еквівалент теплоти.

Однак видатне відкриття Майєра не мало визнання, його робота (1845 р.), що він видав на власні кошти окремою брошурою, тривалий час залишалася майже невідомою. Першовідкривачем закону стали називати Дж. Джоуля, а потім і Г. Гельмгольца. Спроби Майєра захистити свій пріоритет у відкритті закону збереження і перетворення енергії спричинили за собою нападки на нього і травлю з боку місцевих учених. Це негативно відбилося на його психічному стані і привело до важкого нервового розладу, що унеможливило активну наукову діяльність. Лише в 50-х–60-х роках пріоритет Майєра у відкритті закону збереження енергії був визнаний.

Майєр також перший висловив думку, що випромінювання Сонця приводить до зменшення його маси.

МАРІОТТ Едм (1620–1684) – французький фізик, член Паризької АН (1666 р.), один з її засновників. Народився в Діжоні. Був ігуменом монастиря Св. Мартіна поблизу Діжона.

Роботи належать до механіки, теплоти, оптики. У 1676 р. установив закон зміни об'єму даної маси газу від тиску при постійній температурі (закон Бойля–Маріотта; цей закон відкрили в 1661 р. Р. Бойль і Р. Тоунлі). Передбачив різноманітні застосування цього закону, зокрема розрахунок висоти місцевості за даними барометра. Експериментально підтвердив формулу Торрічеллі щодо швидкості витікання рідини, досліджував висоту підйому фонтанів, склав таблиці залежності висоти підйому від діаметра отвору. Вивчав зіткнення пружних тіл, коливання маятника. У «Трактаті про удар або зіткнення тіл» (1678 р.) узагальнив дослідження в цій галузі. Довів збільшення об'єму води при замерзанні. Знайшов у 1666 р. сліпу пляму в оці, досліджував кольори, зокрема кольорові кільця навколо Сонця і Місяця, вивчав веселку, дифракцію світла, променисту теплоту, показав відмінність між тепловими і світловими променями. Виготовив чимало різних фізичних приладів.

МЕНДЕЛЄЄВ Дмитро Іванович (1834–1907) – російський

учений, член-кореспондент Петербурзької АН (1876 р.). Народився у Тобольську. Закінчив Головний педагогічний інститут у Петербурзі (1855 р.). У 1857–1890 рр. викладав у Петербурзькому університеті (з 1865 р. – професор). У 1890 р. залишив університет через конфлікт із міністром освіти І. Д. Деляновим. З 1892 р. – учений-хоронитель Депо зразкових гир і ваг, що з його ініціативи в 1893 р. реорганізоване в Головну палату мір і ваг (Всесоюзний науково-дослідний інститут метрології ім. Д. И. Менделєєва), її керуючий у 1893–1907 рр.

Роботи належать переважно до галузі хімії, а також фізики, метрології, метеорології й ін. Відкрив у 1869 р. один з фундаментальних законів природи – періодичний закон хімічних елементів – і на його основі створив періодичну таблицю хімічних елементів. Виправив значення атомних мас багатьох елементів (берилію, індію, урану, торію, церію й ін.), передбачив існування і властивості нових, ще не відкритих елементів (галію, германію, скандію) і обчислив приблизно їхні атомні маси. Подальші відкриття блискуче підтвердили періодичний закон Менделєєва, що став основою сучасного вчення про речовину.

Передбачав існування критичної температури (1860 р.), узагальнивши рівняння Клапейрона, знайшов у 1874 р. загальне рівняння стану ідеального газу (рівняння Менделєєва-Клапейрона). Сконструював барометр. У 1887 р. здійснив (без пілота) політ на повітряній кулі для спостереження сонячного затемнення і вивчення верхніх шарів атмосфери. В галузі метрології розробив фізичну теорію ваг, конструкції коромисла й аретира, точні прийоми зважування й ін. У 1888 р. уперше висунув ідею підземної газифікації вугілля.

На честь Д. І. Менделєєва Академія наук СРСР заснувала премію і золоту медаль за кращі роботи з хімії. Його ім'ям названий 101-й елемент – менделєєвій. Член багатьох іноземних академій наук і наукових товариств.

ПЕРРЕН Жан Батіст (1870–1942) – французький фізик і фізико-хімік, член Паризької АН (1923 р.), у 1936 р. – президент. Народився в Ліллеві. Закінчив Нормальну школу (1894 р.), де в 1897 р. одержав ступінь доктора. З 1898 р. – у Паризькому університеті (з 1910 р. – професор). З 1938 р. жив у США.

У 1895 р. експериментально довів, що катодні промені є потоком негативно заряджених частинок. У 1908 р. здійснив цикл

експериментальних досліджень броунівського руху, що підтвердили молекулярно-статистичну теорію Ейнштейна–Смолуховського й остаточно переконали в тім, що броунівський рух є наслідком теплового руху молекул середовища, переконали в реальності самих молекул. Виходячи зі своїх дослідів, обчислив (1909 р.) число Авогадро – $6,8 \cdot 10^{23}$. Вивчаючи в 1918–1919 рр. будову мильних плівок, показав, що найменша товщина її дорівнює двом молекулярним шарам і будь-яка плівка складається з цілого числа бімолекулярних шарів.

Роботи присвячені також дослідженню рентгенівських променів, провідності газів, флюоресценції, радіоактивності, атомній фізиці, акустиці. Розробив (1901 р.) планетарну модель атома (модель Перрена).

Боровся проти фашизму. Нобелівська премія (1926 р.).

Пті Алексіс Терез (1791–1820) – французький фізик. Народився у Везулі. Закінчив Політехнічну школу (1809 р.). У 1810 р. став професором лицю (Париж), з 1815 р. – професор Політехнічної школи. Роботи присвячені теплоті і молекулярній фізиці. Разом з П. Дюлонгом досліджував охолодження тіл у порожнечі, вивів (1818 р.) формулу для швидкості охолодження нагрітих тіл. Розробив метод вивчення теплопровідності газів, а також методи визначення теплового розширення і питомої теплоємності твердих тіл. У 1819 р. з Дюлонгом емпірично установив, що атомна теплоємність усіх простих твердих тіл при постійному об'ємі майже незмінна і дорівнює $6 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot \text{град})$ (закон Дюлонга і Пті), винайшов (1816 р.) катетометр.

ПУАЗЕЙЛЬ Жан Луї Марі (1799–1869) – французький фізіолог і фізик, член Французької медичної академії (1842 р.). Народився у Парижі. Учився в Політехнічній школі. Працював у Парижі.

Фізичні дослідження належать до молекулярної фізики, головним чином до вивчення руху рідин у тонких трубках і внутрішнього тертя. Відкрив (опублікував у 1840 р.) закон витікання рідини через тонку циліндричну трубку (закон Пуазейля), що одержав широке застосування для визначення в'язкості і швидкості плину в капілярах. Винайшов віскозиметр. Перший застосував у 1828 р. ртутний манометр для вимірювання кров'яного тиску.

ПУАССОН Сімеон Дені (1781–1840) – французький механік, математик і фізик, член Паризької АН (1812 р.). Народився у Пітав'є. Закінчив Політехнічну школу (1800 р.), де викладав (з 1806 р. –

професор), з 1809 р. – професор Паризького університету.

Фізичні дослідження належать до електрики і магнетизму, капілярності, теорії пружності, гідромеханіки, теорії коливань, теорії світла. У 1811 р. застосував математичну теорію потенціалу до електростатики, сформулювавши тут важливу теорему, відповідно до якої напруженість поля у точці на поверхні провідника пропорційна густині заряду провідника; і розв'язав задачу про розподіл електрики на поверхні різних провідників і системах провідників. У 1824 р. поширив теорію потенціалу на магнітні явища і розробив математичну теорію магнетизму.

Уперше записав рівняння аналітичної механіки в складових імпульсу, у гідродинаміці узагальнив рівняння Нав'є – Стокса на випадок руху стисливої в'язкої рідини з урахуванням теплопередачі. Розробляв теорію поширення звуку в повітрі. Перший теоретично досліджував адіабатичний процес, зробив (1823 р.) виведення рівняння адіабати (рівняння Пуассона).

Вирішив ряд задач теорії пружності, увів (1810 р.) так званий «коефіцієнт Пуассона» як характеристику матеріалу пружного тіла – відношення поздовжнього розтягу до поперечного стиску, узагальнив рівняння теорії пружності на випадок анізотропних тіл. Поряд з Л. Нав'є й О. Коші є основоположником теорії пружності.

РЕОМЮР Рене Антуан Фершо (1683–1757) – французький натураліст, член Паризької АН (1708 р.). Народився в Ла-Рошелі.

Наукові праці в області математики, фізики, хімічної технології, зоології, ботаніки. Винайшов у 1730 р. спиртовий термометр зі шкалою від 0 до 80° (термометр Реомюра). Перший застосував (1722 р.) мікроскоп для металургійних досліджень. У 1734 р. указав на можливість одержання штучного шовку.

СМОЛУХОВСЬКИЙ Маріан (1872–1917) – польський фізик. Народився у Фордербрюле біля Відня. Закінчив Віденський університет (1895 р.). Удосконалював знання в лабораторіях у Г. Ліппмана, У. Томсона і Е. Варбурга. У 1899–1913 рр. працював у Львівському університеті (з 1900 р. – професор). З 1913 р. – професор Краківського університету (у 1917 р. – ректор).

Основні роботи присвячені молекулярній фізиці, термодинаміці, статистичній механіці, зокрема кінетичній теорії газів і рідин, теорії броунівського руху, молекулярній статистиці. Теоретично обґрунтував у 1898 р. явище температурного стрибка на межі «газ – тверде тіло», відкрите експериментально ще в 70-х роках, яке було

досить сильним аргументом на користь молекулярної кінетики. Подальші дослідження Смолуховського броунівського руху і питань меж застосування другого закону термодинаміки обґрунтовували і розвивали ідеї Л. Больцмана. Виходячи з кінетичного закону розподілу енергії, створив (1905–1906 рр.) теорію броунівського руху, що довела справедливості кінетичної теорії теплоти і сприяла її остаточному утвердженню.

Установив (1904 р.) закони флуктуації рівноважних станів у молекулярних системах, які використав для обґрунтування больцманівської ідеї про обмеженість класичного трактування Р. Клаузіусом другого закону термодинаміки, що приводило до «теплової смерті» Всесвіту. Його теорія термодинамічних флуктуацій дала можливість визначити час, через який настає новий аномальний стан системи, і завдала серйозного удару гіпотезі «теплової смерті». Дослідження належали також до аеродинаміки і фізики колоїдів.

Польським фізичним товариством заснована медаль ім. М. Смолуховського.

СТОКС Джордж Габріель (1819–1903) – англійський фізик і математик, член Лондонського королівського товариства (1851 р.), секретар у 1854–1885 рр., президент – 1885–1890 рр. Народився в Скріні (Ірландія). Закінчив Кембріджський університет (1841 р.), з 1849 р. – професор цього університету.

Роботи належать до гідродинаміки, оптики, спектроскопії, математичної фізики. Розробив (1845 р.) теорію в'язкості рідин, математичну теорію руху в'язкої рідини (рівняння Нав'є–Стокса). Вивів у 1851 р. формулу, що визначає силу опору, що діє на тверду кулю при її повільному рівномірному поступальному русі у в'язкій рідині (закон Стокса), заклавши тим самим основи наукової гідродинаміки. В галузі оптики досліджував аберацію світла, кільця Ньютона, інтерференцію і поляризацію світла, спектри, люмінесценцію. У 1845–1846 рр. побудував теорію аберації, виходячи з гіпотези про повне захоплення ефіру Землею, що рухається. У 1852 р. установив, що довжина хвилі фотолюмінесценції більша від довжини хвилі збудливого світла (правило Стокса). Вивчав варіації гравітації. Дав перше теоретичне уявлення про походження рентгенівських променів.

Член Паризької АН. Медалі Коплі (1851 р., 1903 р.), Б. Румфорда (1852).

ТОМСОН (Кельвін) Вільям (1824–1907) – англійський фізик,

один з основоположників термодинаміки, член Лондонського королівського товариства (1851 р.), президент у 1890–1895 рр. У 1892 р. одержав титул лорда Кельвіна. Народився в Белфасті. Закінчив Кембріджський університет (1845 р.). У 1846–1899 рр. – професор університету в Глазго (у 1846 р. організував одну з перших фізичних лабораторій), з 1904 р. – президент.

Роботи стосуються термодинаміки, гідродинаміки, електромагнетизму, пружності, теплоти, математики, техніки. У 1851 р. сформулював (незалежно від Р.Клаузіуса) другий закон термодинаміки: «у природі неможливий процес, єдиним результатом якого була б механічна робота, виконана за рахунок охолодження теплового резервуара». Відповідно цьому формулюванню другого закону термодинаміки (за Томсоном) була доведена неможливість вічного двигуна другого роду. Однак, виходячи з відкритого закону термодинаміки і застосовуючи його до Всесвіту як до єдиного цілого, прийшов (1852 р.) до помилкового висновку про неминучість «теплової смерті Всесвіту» (гіпотеза теплової смерті Всесвіту). Неправомірність такого підходу і помилковість гіпотези довів Л. Больцман.

Широко застосовував термодинамічний метод для пояснення різних фізичних явищ. Увів у 1848 р. поняття абсолютної температури й абсолютну шкалу температури, названу його ім'ям (шкала Кельвіна). Показав, як температура кипіння рідини в залежності від тиску зв'язана з теплотою паротворення, об'ємом рідини і парою, яка утворилася з неї, установив у 1870 р., що пружність насиченої пари залежить від форми поверхні рідини. Разом із Дж. Джоулем установив у 1853–1854 рр. зміну температури газу при його повільному стаціонарному адіабатичному протіканні крізь пористу перегородку (ефект Джоуля –Томсона). Використання цього ефекту є одним з основних методів одержання низьких температур.

Відкрив у 1856 р. третій термодинамічний ефект (ефект Томсона): якщо уздовж провідника, по якому тече електричний струм, існує перепад температур, то, крім джоулевої теплоти, в об'ємі провідника в залежності від напрямку струму виділяється чи поглинається ще деяка кількість теплоти (теплота Томсона). Побудував термодинамічну теорію термоелектричних явищ.

Плідно працював в області вивчення електричних і магнітних явищ, зокрема вивчав магнітні властивості кристалів. Відкрив у 1851 р. зміну питомої електропровідності феромагнетиків при

їхньому намагнічуванні (ефект Томсона). Сконструював ряд високочутливих електрометрів і гальванометрів, універсальний компас та інші прилади. Провів розрахунок електричних коливань у контурі, вивівши в 1853 р. формулу залежності періоду власних коливань у контурі від його ємності й індуктивності (формула Томсона). Установив (1856 р.) зміну опору металів у магнітному полі, яке перпендикулярне струму. Теоретичні дослідження Томсона з електромагнетизму і ряд його технічних винаходів значно сприяли практичному здійсненню телеграфного зв'язку, зокрема по трансатлантичному кабелі, у прокладанні якого він брав активну участь.

Відомі його дослідження з теплопровідності, що він намагався використовувати для розрахунку віку Землі, вивчав проблему обертання Землі навколо осі, прийшов до висновку, що морські припливи і відливи впливають на це обертання. Висунув (1902 р.) гіпотезу про будову атомів, здійснив розрахунки розмірів молекул і т.д.

Член багатьох академій наук і наукових товариств.

ТОРРІЧЕЛЛІ Еванджеліста (1608–1647) – італійський фізик і математик. Народився у Фасенці. Навчався у Римі в Б. Кастеллі, товариша й учня Г.Галілея. У 1641 р. переїхав в Арчетрі, де допомагав Галілею. У 1642 р. став придворним математиком герцога Тосканського і професором математики і фізики Флорентійського університету.

Основні фізичні роботи в галузі пневматики і механіки. У 1643 р. відкрив атмосферний тиск, зробивши удар сформованій думці про те, що «природа боїться порожнечі» (дослід Торрічеллі). Винайшов ртутний барометр (1644 р.). Важливий був і сам факт «одержання» порожнечі, чи вакууму, тому що після Торрічеллі «порожнеча» стала об'єктом досліджень, що зрештою привело до її практичного використання, зокрема в повітряному насосі. Удосконалив повітряний термоскоп Галілея, переробивши його в спиртовий термометр. Перший пояснив вітер варіаціями атмосферного тиску.

У трактаті «Про рух вільно падаючих і кинутих важких тіл» (1641 р.) довів постулат про рівність швидкостей важких тіл, що падають по похилих площинах однакової висоти (не знаючи, що це вже зробив Галілей), установив параболічний характер траєкторії руху тіл, кинутих під довільним кутом до горизонту, інші добре відомі тепер теореми балістики. Сформулював (1641 р.) закон

витікання рідини з отворів посудини і вивів формулу для визначення швидкості витікання (формула Торрічеллі). Досяг досконалості в конструюванні мікроскопів і шліфуванні лінз телескопів.

ФАРЕНГЕЙТ Даніель Габріель (1686–1736) – фізик. Народився в Данцизі (нині Гданськ). З 1707 р. подорожував по Німеччині, набув професію виготовлювача різних інструментів. У 1717 р. переїхав в Амстердам, де утвердився як майстер по виготовленню інструментів і приладів. Велику частину свого життя прожив у Голландії.

Зустрічався і листувався з провідними ученими свого часу, зокрема з П. Мушенбруком, В. Гравезандом. Організував механічну майстерню, у якій виготовляв термометри, барометри, ареометри й інші фізичні й астрономічні інструменти. У 1709 р. виготовив спиртовий термометр, у 1714 р. – ртутний. Запропонував (1710 р. чи 1714 р.) температурну шкалу (шкала Фаренгейта), у якій температурний інтервал між точками танення льоду і кипіння води був розділений на 180 частин (градусів) і точці танення льоду відповідало значення $32^{\circ}F$, а точці кипіння води – $212^{\circ}F$. Термометри Фаренгейта були першими практично придатними термометрами.

Досліджував явище переохолодження води (1721 р.) і залежність температури кипіння рідини від тиску і вмісту розчинених у ній солей. Сконструйований термометр дав можливість за даними точки кипіння знаходити тиск. Визначав температуру суміші гарячої і холодної води. Удосконалив ваговий ареометр, склав таблиці густин тіл (1724 р.).

Член Лондонського Королівського товариства (1724 р.).

ЦЕЛЬСІЙ Андерс (1701–1744) – шведський астроном і фізик, член Шведської АН. Народився в Упсалі. Навчався в університеті в Упсалі, з 1730 р. – професор цього університету, одночасно з 1740 р. – директор Упсальської астрономічної обсерваторії.

Роботи належать до астрономії, геофізики, фізики. У 1742 р. запропонував стоградусну шкалу термометра, у якій за нуль градусів прийняв температуру кипіння води при нормальному атмосферному тиску, а за сто градусів – температуру танення льоду. Сучасна шкала Цельсія введена трохи пізніше.

Член Лондонського королівського товариства і Берлінської АН.

ШАРЛЬ Жак Олександр Цезар (1746–1823) – французький фізик, член Паризької АН (1803 р.), у 1816 р. – президент. Народився в Божансі. Учився самостійно. Професор експериментальної фізики в Консерваторії мистецтв і ремесел у Парижі. Досліджував розширення

газів, установив (1787 р.) закон зміни тиску даної маси ідеального газу зі зміною температури при постійному об'ємі (закон Шарля). Відразу ж після братів Ж. і Е. Монгольф'є побудував повітряну кулю з прогумованої тканини і перший використовував для її наповнення водень. Здійснив політ на цій кулі в 1783 р. Винайшов ряд приладів. Перший почав спробу одержання фотографічних зображень.

ШТЕРН Отто (1888–1969) – німецький фізик-експериментатор. Народився в Зорау. Закінчив Бреславльський університет (1912 р.). У 1913–1914 рр. працював у Цюрихському політехнікумі, у 1914–1921 рр. – у Франкфуртському університеті. У 1921–1922 рр. – професор Ростокського університету, 1923–1933 рр. – Гамбурзького університету. У 1933–1945 рр. – професор Технологічного інституту Карнегі в Пітсбурзі, з 1946 р. – у Берклі (США).

Дослідження в області молекулярної фізики, атомної і ядерної фізики, квантової теорії. Розробив метод атомних (молекулярних) пучків і в 1920 р. з його допомогою експериментально виміряв швидкості теплового руху молекул газу (дослід Штерна). У 1922 р. разом з В. Герлахом довів наявність магнітного моменту атома, інакше кажучи, експериментально підтвердив просторове квантування (дослід Штерна–Герлаха). У 1929 р. разом з І. Естерманом уперше показав, що дифракція властива й атомним пучкам (продемонстрував також хвильові властивості протонів), у 1933 р. разом з О. Фрішем уперше виміряв магнітний момент протона у водневій молекулі, з Естерманом – магнітний момент дейтона. За внесок у розвиток молекулярно-променевого методу і відкриття магнітного моменту протона в 1943 р. визнаний гідним Нобелівської премії.

Член Національної АН США (1945 р.).

РОЗДІЛ III ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторна робота № 1

Вимірювання температури та перевірка термометрів

Мета роботи: ознайомитись з поняттям температури, вивчити будову, принцип дії та види термометрів.

Прилади і матеріали: прилад для визначення точки плавання льоду, еталонний термометр, досліджуваний термометр, дистильована вода, електроплитка, штатив з затискачами, калориметр з мішалкою, барометр.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацюйте таку літературу [1, §112], [2, §13.4, §14.5], [3, Р.1 §15], [5, Р.6 §15] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Перевірити “нульову” точку термометра.
3. Перевірити проміжні точки та точку кипіння води.
4. Побудувати графік залежності поправок показань термометра від величини вимірювання температури.
5. Побудувати графік константи охолодження термометра.

Увага! Виконуючи роботу, проявіть особливу обережність при користуванні ртутними термометрами.

Теоретичні відомості та опис приладів

Вимірювання температури і її контроль – одна з найбільш поширених в науці і техніці вимірювальних операцій. Оскільки фізичні величини залежать від температури, то термометрія може ґрунтуватися на вимірюванні довільного параметра раціонально-вибраного термометричного тіла. Звичайно, вибраний параметр повинен бути однозначною, неперервною і монотонною функцією температури (для точних інтерполяції та екстраполяції температурної шкали вкрай бажано мати лінійну залежність між значенням вимірюваного параметра і температурою). Певною мірою цим вимогам задовольняють тиск і об'єм газів, об'єм рідин, електричний опір провідників і напівпровідників, термоелектрорушійна сила

деяких термопар.

Рідинні термометри – перші, які набули масового застосування (використання їх не потребує допоміжних приладів та джерел енергії). Із загальної кількості термометричних приладів близько половини припадає на скляно-рідинні. Серед рідинних термометрів розрізняють *ртутні та термометри з не ртутним заповненням* (спиртові, толуолові, ксилолові та ін.; використовуються для вимірювання температур до -200°C), *гелієві* (для вимірювання температур до 120°C) тощо. Значного поширення набули ртутні термометри. Ртуть як термометричну речовину можна добути в дуже чистому вигляді (марка ртуті Р1 містить не менш як 99,999 % ртуті, марка Р2 – 99,990% ртуті), вона не змочує скла, її теплопровідність значно вища, ніж теплопровідність інших рідин. Ртутні термометри мають широкий інтервал вимірювання: від $-38,9$ до 357°C . Для підвищення верхньої межі простір капіляра над ртуттю заповнюють інертним відносно неї азотом під певним тиском. Простота будови та використання роблять ртутні термометри вигіднішими, ніж інші типи термометрів. Ртутні термометри виготовляють з вкладеною шкалою (наноситься на пластинку з молочного скла або металу, пофарбованого в білий колір) і стержньові (шкалу нанесено на масивній капілярній трубці). Ртутні термометри характеризуються чутливістю, ціною поділки і точністю.

Чутливість термометра показує, наскільки змінюється положення стовпчика ртуті при нагріванні на 1 K (1°C). Вона визначається діаметром капіляра (для термометрів високої чутливості виготовляють капіляри діаметром в кілька сотих мм) і об'ємом посудини з ртуттю (останній не перевищує 1 см^3 через можливі завищення інерційності та нерівномірності температури по об'єму).

Точність термометра залежить від ціни його поділки. Ціна поділки стандартних термометрів вибирається не менш як $0,01^{\circ}\text{C}$ (в метастатичному термометрі Бекмана ціна поділки становить $0,005^{\circ}\text{C}$).

Ртутні термометри, як і інші, відзначаються інерційністю, вони не відразу реєструють температуру середовища T_c (якщо $T_c = \text{const}$, вся ртуть у резервуарі термометра лише через деякий час матиме температуру T_c ; якщо $T_c = \text{var}$, то покази термометра запізнюються: при зростанні температури вони менші, а при зниженні – більші).

На основі закону охолодження Ньютона $dT = k \cdot (\theta - T)dt$ (тут θ і T – температури середовища і термометра; k – константа охолодження термометра; t – час), час, через який температура за термометром

дорівнюватиме температурі середовища, обчислюється за формулою

$$t = k \cdot \ln \frac{T_0 - T}{T_t - T},$$

де T_0 – початкова температура термометра; T_t – його температура в розглядуваний момент; T – температура середовища.

Для визначення k термометр нагрівають на $10\text{--}15^\circ\text{C}$ вище від температури термостата, куди цей термометр занурюють. Через рівні проміжки часу, які фіксуються секундоміром, реєструють покази термометра T_t . Далі будують на напівлогарифмічному папері графік, відкладаючи вздовж осі ординат $\ln(T_t - T)$, а вздовж осі абсцис – t , s .

Графік повинен мати вигляд, як на рис.1, тобто починатися з деякого значення $\ln(T_0 - T)$ при $t_0 = 0$.

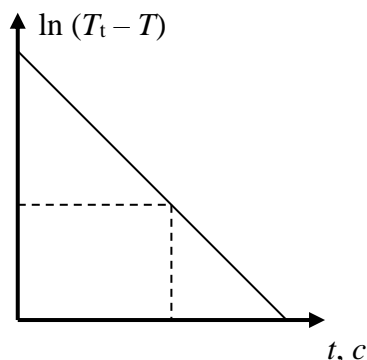


Рис. 1.1. Залежність $\ln(T_t - T)$ від часу

Значення k визначають з графіка: $k = \text{ctg } \alpha$, де α – кут нахилу прямої до осі t .

При вимірюванні температури середовища не завжди вдається розмістити в ньому весь термометр (здебільшого розміщується тільки посудина з ртуттю та деяка частина стовпчика ртуті в капілярі; виступаючий стовпчик має іншу температуру). Це може привести до значних помилок у вимірюванні. Тому потрібно внести поправку на виступаючий стовпчик:

$$\Delta = \alpha \cdot n (T_2 - T_1),$$

де α – термічний коефіцієнт розширення скла; n – число градусів виступаючого стовпчика; T_2 – температура за термометром; T_1 – середня температура виступаючого стовпчика.

При точних вимірюваннях температури слід вносити також поправки на калібр (врахування різниць перерізів капіляра на окремих ділянках), зовнішній тиск, на внутрішній (гідростатичний) тиск (тиск плюс тиск парів ртуті при вимірюванні високих температур).

До значних похибок може привести так званий «мертвий хід» термометра. У вузьких капілярах проявляється вплив тертя ртуті об стінки капіляра (термометр дає занижені покази, коли ртуть рухається вгору і навпаки). Щоб уникнути цього, рекомендується;

перед зніманням показів злегка вдаряти по термометру. Отже, вимірювання температури потребує не тільки додержання ряду правил, а й систематичної перевірки приладу.

Це реалізується за методом сталих точок. Сталими точками є температура рівноваги між рідкою водою і її паром (точка кипіння води $100\text{ }^{\circ}\text{C}$), потрійна точка води ($+0,01^{\circ}\text{C}$) та інші (ГОСТ 13417-76). Щоб перевірити 0°C , встановлюють термометр у посудину Дьюара місткістю 1–2 л, наповнену сумішшю товченого льоду, приготовленого з дистильованої води, і дистильованої води настільки, щоб резервуар і стовпчик ртуті були вкриті цією сумішшю. Через деякий час (5–10 хв) знімають покази термометра.

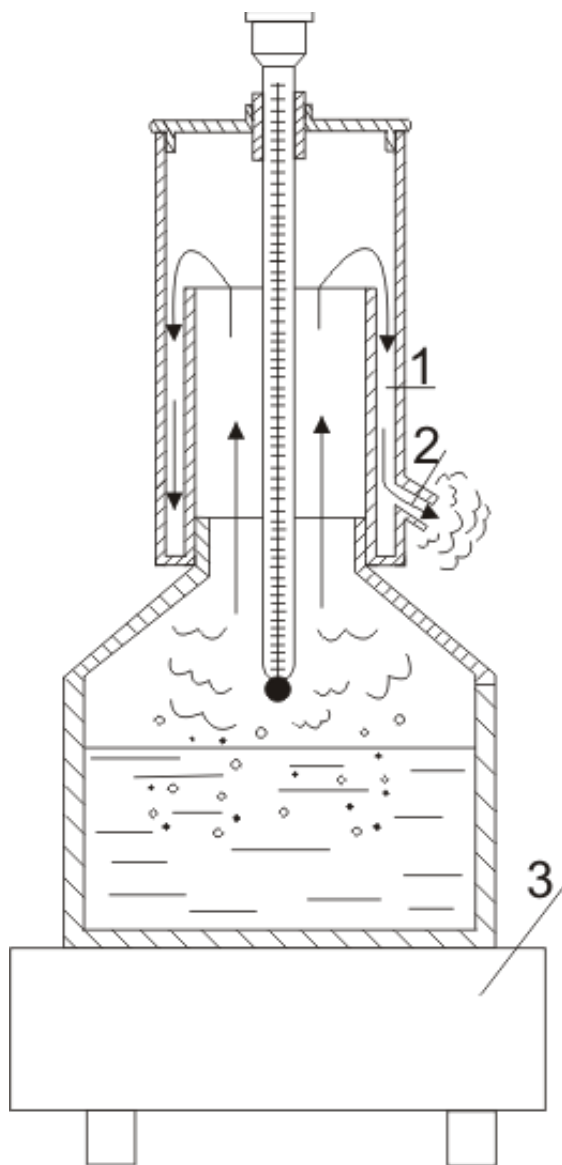


Рис. 1.2. Прилад для перевірки точки кипіння води

Проміжні точки до 90°C можна перевірити, порівнюючи покази досліджуваного термометра із зразковим термометром. Для цього обидва термометри підвішують на однаковій висоті і занурюють у водяний термостат, що міститься на нагрівачі. Покази з них знімають через кожні 5°C зміни температури. Точку кипіння води перевіряють на спеціальному приладі (рис. 1.2). Резервуар з ртуттю термометра вміщують не у воду, а в пар. Для підтримання пари при атмосферному тиску вона має вільний вихід по трубці 1 через отвір 2; 3 – нагрівач. Температуру кипіння води при

розглядуваному тиску знаходять з таблиць, атмосферний тиск визначають барометром.

Порядок виконання роботи

1. Підготувати посудину з сумішшю товченого льоду і

дистильованої води. Перевірити нульову точку термометра.

2. Перевірити проміжні точки термометра, знімаючи покази через 5°C . Графічно подати залежність різниці показів зразкового і досліджуваного термометрів, відкладаючи по осі абсцис покази досліджуваного термометра.

3. Визначити константу охолодження термометра. Обчислити час встановлення показів термометра для трьох температур середовища.

Контрольні запитання:

1. Які Ви знаєте прилади для вимірювання температури?
2. Яка конструктивна будова будь – якого термометра?
3. Чи користуються ртутними термометрами на полярних станціях Антарктиди?
4. Яка будова та принцип дії термопарного термометра?
5. Як виміряти температуру розплавленого заліза?
6. Що називають реперними точками?
7. Які температурні шкали вам відомі? Яке співвідношення температури у цих шкалах із температурою у МПТШ – 68?
8. Температура повітря підвищилася на 17°C . Чому рівна зміна температури у Кельвінах?

Лабораторна робота № 2

Визначення маси молекули ефіру

Мета роботи: обчислити масу молекули ефіру.

Прилади і матеріали: скляний балон (10–20 л) з корком, медичний шприц, термометр, U – подібний водяний манометр, ефір.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати дане питання за [2, §14.11] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Знайти масу молекули ефіру.

Теоретичні відомості та опис приладів

В даній роботі знаходять масу молекули ефіру за допомогою спеціальної установки.

Велику скляну посудину (об'ємом 10–15 л) закривають корком через який пропущені дві скляні трубочки. На одну із них надівають

гумову трубку, з'єднану з манометром. Через другу вводять деяку кількість рідкого ефіру (2–3 см³), який швидко випаровується, утворюючи насичену пару. В цьому випадку до газоподібного ефіру можна застосувати закони ідеального газу.

Якщо об'єм балона V , а маса ефіру m , то густина газоподібного ефіру:

$$\rho_{ze} = \frac{m}{V}. \quad (1)$$

З іншого боку густину газу можна знайти, знаючи масу однієї молекули m_0 і кількість молекул в одиниці об'єму n_0 , тобто

$$\rho_{ze} = m_0 n_0. \quad (2)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (1) і (2), одержуємо формулу для знаходження маси молекули ефіру

$$m_0 = \frac{m}{V n_0}. \quad (3)$$

Концентрацію молекул n_0 визначають, використовуючи основне рівняння кінетичної теорії газів ($p = n_0 k T$), з якого слідує:

$$n_0 = \frac{p}{k T}, \quad (4)$$

де p – парціальний тиск газоподібного ефіру, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура.

Оскільки парціальний тиск ефіру зрівноважується тиском стовпа рідини висотою h в манометричній трубці, то $p = \rho g h$, де ρ – густина рідини, то формулу (4) можна записати у вигляді:

$$n_0 = \frac{\rho g h}{k T}. \quad (5)$$

Виразивши масу пари ефіру через густину рідкого ефіру ρ_e і об'єм V_e введеного в посудину рідкого ефіру та врахувавши (5), з формули (3) визначають масу однієї молекули:

$$m_0 = \frac{\rho_e V_e k T}{V \rho g h}.$$

Обчислити масу молекули ефіру m_0 при різних V_e .

Числові значення величин $\rho_e = 714 \text{ кг/м}^3$, k , ρ , g беруть з таблиць.

Відносну похибку знаходять методом диференціювання

$$\frac{\Delta m_0}{m_0} = \frac{\Delta V_e}{V_e} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta h}{h}.$$

Абсолютними похибками значень табличних величин в

порівнянні з похибками вимірюваних величин нехтуємо.

Результати роботи занести в таблицю:

V_e (m^3)	V (m^3)	h (m)	m_0 (kg)	Δm_0

Контрольні запитання

1. Що таке молярна маса?
2. Який фізичний зміст сталої Больцмана?
3. Що таке число Лошмідта? Чому воно дорівнює?
4. Наведіть основні закономірності кінетичної теорії газу.
5. Охарактеризуйте температуру як енергетичний параметр стану газу.
6. Який тиск називають парціальним?
7. Які співвідношення між одиницями вимірювання тиску?
8. Визначити об'єм, який займає молекула води.

Лабораторна робота № 3

Визначення універсальної газової сталої методом відкачування

Мета роботи – визначити числове значення універсальної газової сталої.

Прилади і матеріали: установка для визначення універсальної газової сталої, аналітичні терези.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §87], [2, §14.6], [5, Р.1 §3] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Визначити числове значення універсальної газової сталої.

Теоретичні відомості та опис приладів

Фізичний зміст універсальної газової сталої

При ізохоричному ($V = const$) нагріванні одного моля газу вся надана йому теплота витрачається на збільшення внутрішньої енергії ΔU . $\Delta Q = \Delta U$.

Молярна теплоємність газу при сталому об'ємі

$$C_v = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T}, \quad (1)$$

де ΔT – збільшення температури газу при нагріванні.

При ізобаричному ($p = \text{const}$) нагріванні одного моля газу теплота ΔQ витрачається на збільшення внутрішньої енергії ΔU і на роботу розширення газу ΔA , тобто $\Delta Q = \Delta U + \Delta A$.

Молярна теплоємність газу при сталому тиску

$$C_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} + \frac{\Delta A}{\Delta T} = C_v + \frac{\Delta A}{\Delta T}, \quad (2)$$

де ΔA – робота розширення газу

$$\Delta A = p\Delta V. \quad (3)$$

Початковий стан 1 моля газу описується рівнянням Менделєєва-Клапейрона

$$pV = RT. \quad (4)$$

Після нагрівання на ΔT при сталому тиску p об'єм газу збільшиться на ΔV і рівняння стану набере вигляду

$$p(V + \Delta V) = R(T + \Delta T). \quad (5)$$

Враховуючи (3) і (4) з (5) отримаємо $p\Delta V = R\Delta T$, тобто $\Delta A = R\Delta T$; звідки

$$R = \frac{\Delta A}{\Delta T}. \quad (6)$$

Універсальна газова стала R чисельно дорівнює роботі розширення одного моля газу при нагріванні його на 1 K при сталому тиску.

У даній роботі універсальна газова стала визначається методом відкачування. Установка складається з балона A , з якого відкачують газ, насоса H , яким відкачують та манометра B , який показує тиск газу в балоні після відкачки, з'єднані між собою гумовими трубками. До установки додаються терези для зважування балона з газом при атмосферному тиску і зважування балона після відкачування. Рівняння Менделєєва-Клапейрона для об'єму V , при кімнатній температурі T , атмосферному тиску p_1 , для маси повітря M_1 в балоні A запишеться так:

$$p_1 V = \frac{M_1}{\mu} RT, \quad (7)$$

де $M_1 = m_1 - m_0$; m_0 – маса самого балона A , m_1 – сумарна маса балона A і повітря в ньому при тиску p_1 . Якщо відкачати насосом H повітря із балона A до тиску p_2 (при тій же температурі), то рівняння (7)

запишеться так:

$$p_2 V = \frac{M_2}{\mu} RT, \quad (8)$$

де $M_2 = m_2 - m_0$; m_2 – сумарна маса балона A і повітря в ньому при тиску p_2 (після відкачування).

Із рівнянь (7) і (8) знаходимо універсальну газову сталу:

$$R = \frac{\mu(p_1 - p_2)V}{(m_1 - m_2)(273 + t)}. \quad (9)$$

Якщо в початковому стані повітря перебуває при атмосферному тиску то манометр має нульові покази. При відкачуванні він показує зміну тиску $(p_1 - p_2)$, яку й потрібно підставляти у співвідношення (9).

Відносна похибка вимірювання може бути знайдена з формули (9) методом логарифмування та диференціювання

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \mu}{\mu} + \frac{\Delta(p_1 - p_2)}{p_1 - p_2} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta m_1 + \Delta m_2}{m_1 - m_2} + \frac{\Delta t}{273 + t}. \quad (10)$$

Порядок виконання роботи:

1. На аналітичних терезах зважують балон A .
2. За допомогою гумової трубки з'єднують балон A (з краном K) з манометром і насосом.
3. Насосом H відкачують повітря із балона A .
4. Закривають кран K , від'єднують балон A і на терезах знаходять сумарну масу m_2 балона і повітря в ньому (після відкачування).
5. Вимірювання проводять не менше трьох разів при різних (як можна більших) значеннях зміни тиску.
6. За формулою (9) обчислюють шукану величину R , а за формулою (10) знаходять відносну похибку. Після цього обчислюють абсолютну похибку результату.

Контрольні запитання:

1. Дайте означення молярної маси?
2. Обчисліть молярну масу повітря.
3. В яких одиницях вимірюють тиск та які співвідношення між цими одиницями?
4. Яким вимогам має відповідати модель ідеального газу?
5. Який фізичний зміст універсальної газової сталої?
6. В чому полягає відмінність між рівняннями Клапейрона та Менделєєва-Клапейрона?

7. Обчисліть густину повітря при нормальних умовах.
8. Закрита посудина повністю заповнена водою при 27 °С. Яким би був тиск в посудині, як би сили взаємодії між молекулами води зникли?

Лабораторна робота №4*

Визначення молярної маси і густини газу методом відкачування

Мета роботи: ознайомитись з одним із методів визначення молярної маси і густини газу.

Прилади і матеріали: ваги, вакуумметр, вимірювальний блок, колба.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §87], [2, §14.6], [5, Р.1 §3] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Визначити числове значення молекулярної маси і густини газу.

Теоретичні відомості

Молекулярною (молярною) масою зветься маса одного моля речовини. У системі СІ ця величина вимірюється в кілограмах на моль. Моль – кількість речовини, яка містить стільки ж структурних елементів (молекул, атомів і т.д.), скільки атомів міститься в ізотопі вуглецю $^{12}_6\text{C}$ масою 0,012 кг. Молярну масу газу можна визначити з рівняння газового стану.

При не дуже високих тисках, але досить високих температурах газ можна вважати ідеальним. Стан такого газу описується рівнянням Менделєєва-Клапейрна:

$$P \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T, \quad (1)$$

де P – тиск газу; V – об'єм газу, m – маса газу; μ – молярна маса газу; $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль } K)$ – універсальна газова стала; T – абсолютна температура газу.

З рівняння (1) можна одержати формулу для молярної маси газу:

$$\mu = \frac{m \cdot R \cdot T}{P \cdot V}. \quad (2)$$

Якщо вимірювання тиску P , об'єму V , температури T газу, тобто параметрів газу, які входять до формули (2), не викликає особливих труднощів, то визначення маси газу виконати практично неможливо, тому що газ можна зважити тільки разом з колбою, в якій він знаходиться. Існує інший спосіб визначення μ , який дозволяє виключити невідоме значення маси колби m_0 . Це можна зробити, розглянувши рівняння стану двох мас m_1 і m_2 того самого газу при незмінних температури T та об'єму V .

Нехай у колбі об'ємом V знаходиться газ масою m_1 під тиском P_1 і за температури T . Рівняння стану (1) для цього газу має вигляд

$$P_1 \cdot V = \frac{m_1}{\mu} \cdot R \cdot T. \quad (3)$$

Відкачуємо частину газу з колби, не змінюючи його температури. Після відкачування маса газу, що залишився у колбі, та його тиск зменшується. Позначимо їх відповідно m_2 і P_2 і знову запишемо рівняння стану

$$P_2 \cdot V = \frac{m_2}{\mu} \cdot R \cdot T. \quad (4)$$

З рівнянь (3) та (4) дістанемо:

$$\mu = \frac{m_1 - m_2}{P_1 - P_2} \cdot \frac{R \cdot T}{V}. \quad (5)$$

Одержана формула (5) дає можливість визначити μ , якщо відома зміна маси газу (але не сама маса), а також зміна тиску, температури та об'єму газу.

У даній роботі досліджуваним газом є повітря, яке є сумішшю азоту, кисню, аргону та інших газів.

Формула (5) придатна і для визначення μ суміші газів. Знайдене у цьому випадку значення μ становить середню або ефективну молярну масу суміші газів. Молярна маса суміші газів може бути розрахована і теоретично, якщо відомий процентний вміст та молярна маса кожного з газів, який входить до складу суміші, за формулою

$$\mu_c = \frac{1}{\frac{m_1}{t} \cdot \frac{1}{\mu_1} + \frac{m_2}{t} \cdot \frac{1}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{t} \cdot \frac{1}{\mu_n}}, \quad (6)$$

де $\frac{m_1}{t}$, $\frac{m_2}{t}$, ..., $\frac{m_n}{t}$ – відомий вміст кожного газу; μ_1 , μ_2 , ..., μ_n –

молярні маси газів.

Якщо відома молярна маса газу, то можна легко визначити ще одну важливу характеристику газу – його густину ρ . Густина газу – це маса одиниці об'єму газу:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (7)$$

Виразивши $\frac{m}{V}$ з рівняння Менделєєва-Клапейрона, дістанемо:

$$\rho = \frac{P \cdot \mu}{R \cdot T}. \quad (8)$$

Густину суміші газів можна обчислити за формулою (8), розуміючи під μ ефективну молярну масу суміші.

Експериментальна установка

Для визначення молекулярної маси повітря призначена експериментальна установка ФПТ1-12, загальний вигляд якої зображено на рис. 4.1.

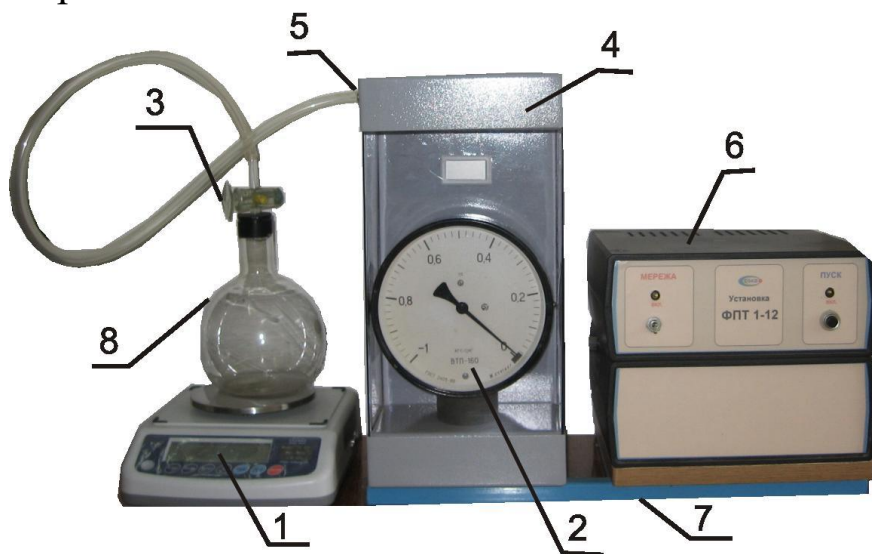


Рис. 4.1. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ 1-12
1 – ваги; 2 – вакуумметр; 3 – вакуумний кран; 4 – вимірювальний блок;
5 – шпуцер; 6 – компресор; 7 – стояк; 8 – колба

Робочий елемент установки – це скляна колба 8, з'єднана із стрілочним вакуумметром 2, покази якого P відповідають різниці атмосферного тиску у лабораторії P_0 і тиску газу в колбі P_K . Колба має відросток з краном, який за допомогою гумової трубки з'єднується з входним патрубком компресора 6, розміщеного на стояку 7. Колбу встановлено на електронних вагах 1. Значення об'єму V колби вказано у паспорті.

Порядок виконання роботи

1. Подати напругу живлення на електронні ваги, ввімкнувши установку тумблером „Мережа”.

2. За допомогою електронних ваг визначити масу колби з повітрям ($m_0 + m_1$) при тиску P_1 .

3. Увівши компресор тумблером „Пуск” і, відкривши кран, відкачати повітря з колби до тиску P_2 , після чого, заклавши кран і вимкнувши компресор, визначити за допомогою ваг масу колби з повітрям ($m_0 + m_2$) за тиску P_2 . Одержані результати занести до таблиці 1.

Таблиця 1

№ вим.	$m_0 + m_1$ кг	$m_0 + m_2$ кг	$m_1 - m_2$ кг	P_1 Па	P_2 Па	$P_1 - P_2$ Па	T К	μ кг/моль	ρ кг/м ³

4. Повторити виміри по пп. 2–3 не менш як 3 рази.

5. Виміряти температуру повітря в лабораторії.

6. Вимкнути установку тумблером „Мережа”.

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного виміру визначити масу відкачаного повітря ($m_1 - m_2$) та різниці тисків ($P_1 - P_2$).

2. За формулою (5) обчислити для кожного виміру значення молярної маси повітря μ . Знайти середнє значення $\langle \mu \rangle$.

3. За формулою (8) обчислити для кожного виміру густину повітря, використовуючи знайдене значення молярної маси μ .

4. Оцінити похибку результатів вимірювання.

Контрольні запитання

1. Що таке молекулярна маса речовини і в яких одиницях вона вимірюється?

2. Запишіть і поясніть рівняння Менделєєва-Клапейрона. В яких випадках його можна використовувати для практичних обчислень?

3. Як теоретично розрахувати молекулярну масу суміші газів?

4. Що таке густина газу і як її можна визначити експериментально?

5. Виведіть розрахункову формулу для визначення молярної маси, що використовуються в даній роботі.

6. Чому молярну масу газу не можна визначити безпосередньо,

використовуючи рівняння Менделєєва-Клапейрона?

7. У чому полягає метод відкачування для визначення молярної маси газу?

8. Основні джерела похибок даного методу вимірювання.

Лабораторна робота № 5

Визначення середнього термічного коефіцієнта тиску газів та вимірювання температури газовим термометром

Мета роботи: виміряти температуру газовим термометром, визначити середній термічний коефіцієнт тиску газів.

Прилади і матеріали: газовий термометр, кип'ятильник з нагрівником, посудина для льоду, мішалка, термометр, барометр.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1], [2], [3], [5] і теоретичні відомості в даному посібнику.

2. Визначити термічний коефіцієнт тиску для повітря.

Теоретичні відомості та опис приладів

Температуру T , виміряну довільним термометром, називають *емпіричною температурою*, а відповідну шкалу температур – *емпіричною температурною шкалою*. В основу вимірювання температури можна покласти довільні термічні властивості тіл. Залежно від вибору термометричної речовини і термометричного параметра можна здійснити багато емпіричних температурних шкал, які збігатимуться лише в основних реперних точках, прийнятих при побудові температурної шкали. Це означає, що при вимірюванні фіксованої температури різні термометри дадуть неоднакові покази. Тому виникла потреба створити універсальну температурну шкалу, яка б не залежала від особливостей термометричної речовини.

Для розв'язання цієї проблеми використано властивості ідеальної теплової машини Карно, коефіцієнт корисної дії якої визначається лише температурами нагрівника і холодильника. К.к.д. такої машини Карно можна подати як функцію лише одного аргументу (температури). Ця температура називається термодинамічною. Кельвін запропонував термодинамічну шкалу температур, яка досить близька до прийнятої на той час умовної шкали водневого газового

термометра. Звичайно, ідеальний цикл Карно є суто теоретичною схемою і практично нездійснений. Через це для відтворення термодинамічної шкали потрібно використати відповідні зручні фізичні закони, в яких термодинамічна температура T пов'язана з іншими фізичними величинами, що можна безпосередньо виміряти. Найчастіше використовують рівняння Менделєєва-Клапейрона $PV = \frac{m}{\mu}RT$, де R – універсальна газова стала. Теоретично доведено, що температура T в цьому рівнянні тотожна термодинамічній температурі, виведеній з циклу Карно. Прилади, принцип дії яких ґрунтується на рівнянні Менделєєва-Клапейрона, називають *газовими термометрами*. Вони є основними для реалізації термодинамічної температурної шкали.

Газовий термометр може бути реалізований двома способами:

на основі закону Гей-Люссака ($p = const$, індикатором температури є об'єм V) і на основі закону Шарля ($V = const$, індикатором температури є тиск p). Відповідно до цього використовують газові термометри сталого тиску або газові термометри сталого об'єму. Термометричною речовиною в газових термометрах для вимірювання низьких температур є водень і кисень, а для високих температур – азот. Верхня температурна межа застосування газових термометрів дорівнює приблизно 1100°C , нижня близька до точки кипіння гелію ($4,2\text{ K}$). За газовим термометром перевіряють ртутні термометри. Газові термометри сталого об'єму завдяки практичним зручностям застосовують частіше.

Закон Шарля для двох станів певної маси газу можна записати так:

$$\frac{p_1}{1 + \alpha_v t_1} = \frac{p_2}{1 + \alpha_v t_2}$$

звідки

$$\langle \alpha_v \rangle = \frac{p_2 - p_1}{p_1 t_2 - p_2 t_1} \quad (1)$$

де $\langle \alpha_v \rangle$ – середній термічний коефіцієнт тиску; p_1 і p_2 – тиски газу при температурах t_1 і t_2 . Отже, при умові сталості α_v вимірювання температури зводиться до вимірювання зміни тиску газу.

Відносну похибку результату можемо знайти методом

диференціювання. При цьому враховуємо, що інструментальні похибки $\Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h$, $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$.

$$\frac{\Delta \langle \alpha_v \rangle}{\langle \alpha_v \rangle} = \frac{2\Delta p}{p_2 - p_1} + \frac{t_1 + t_2}{p_1 t_2 - p_2 t_1} \Delta p + \frac{p_1 + p_2}{p_1 t_2 - p_2 t_1} \Delta t. \quad (2)$$

Газовий термометр складається з скляного балона 2 (рис. 5.1), в якому міститься сухий газ (повітря). Балон безпосередньо сполучається з манометром 4, 5 – кран для заповнення скляного балона газом.

При нагріванні газу в балоні, який розміщено в термостаті 1, покази манометра змінюються.

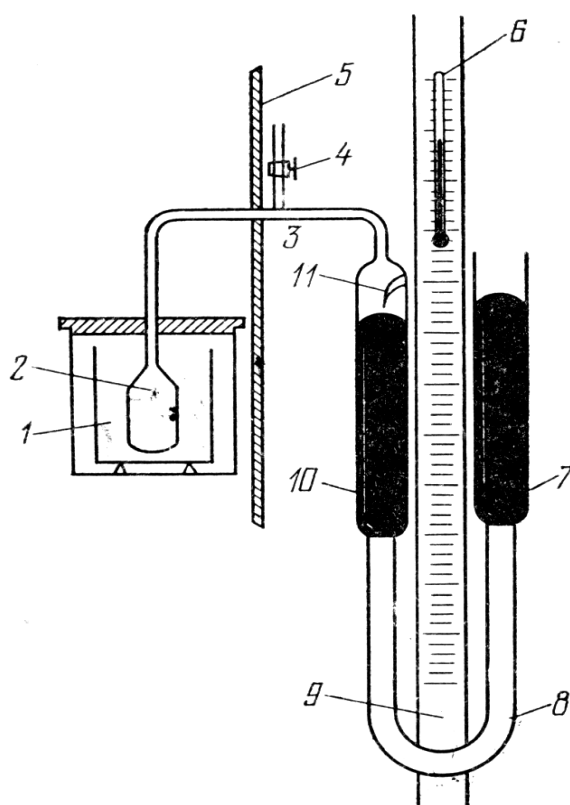


Рис. 5.1. Газовий термометр: 1 – термостат; 2 – скляний балон; 3 – з'єднувальна трубка; 4 – кран; 6 – термометр; 7, 10 – ртуть; 8 – гумова трубка; 9 – шкала манометра

Порядок виконання роботи

1. Заповнити балон газового термометра сухим повітрям.
2. Занурити балон газового термометра в робочий об'єм термостата. Тиск повітря в балоні вимірюється барометром (H) та манометром ($\Delta h'$), температура – лабораторним термометром. Тиск визначають за формулою $p_1 = H + \Delta h'$, де H – атмосферний тиск.
3. Далі слід підвищувати температуру газу в балоні через 10°C до 90°C . Тиск газу аналогічно п.2 вимірюють барометром і манометром.

4. За формулою (1) слід обчислити $\langle \alpha_v \rangle$ для різних температур і відносну похибку за формулою (2). Обчислити абсолютну похибку і результат подати у вигляді: $\langle \alpha_v \rangle = \bar{\alpha}_v \pm \Delta \alpha_v$.

5. Подати графічно залежність $p = f(t)$ на основі досліджених даних.

6. Визначити газовим термометром температуру згідно із завданням викладача.

Контрольні запитання

1. Що таке температурна шкала?
2. Що називають ідеальною тепловою машиною Карно?
3. Що є термометричною величиною у газових термометрах?
4. На основі яких законів реалізується газовий термометр?
5. Який фізичний зміст термічного коефіцієнта тиску газів?
6. Якими приладами вимірюють тиск газів?
7. Наведіть одиниці вимірювання тиску та співвідношення між ними?
8. В чому полягає суть градування термометра?

Лабораторна робота №6*

Визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря та водяної пари

Мета роботи: вивчення дифузії як одного з явищ переносу; визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря та водяної пари за швидкістю випаровування рідини з капіляра.

Прилади і матеріали: експериментальна установка ФПТ1-4; блок вимірювальних приладів; блок робочого елемента; стояк; мікроскоп; робочий елемент; цифровий контролер для виміру температури.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати дане питання за [2, §15.3] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Знайти середнє значення швидкості випаровування рідини з капіляра.
3. Обчислити коефіцієнт взаємної дифузії повітря та водяної

пари.

Теоретичні відомості

Дифузія – це процес вирівнювання концентрації газів, який супроводжується переносом маси відповідного компонента газу з області з більшою до області з меншою концентрацією. Маса компонента газу, яка переноситься внаслідок дифузії через поверхню площею S перпендикулярну до осі OX , за час τ , визначається законом Фіка:

$$M = -D \cdot \frac{d\rho}{dx} \cdot S \cdot \tau, \quad (1)$$

де D – коефіцієнт дифузії; $\frac{d\rho}{dx}$ – градієнт густини компонента газу.

Для ідеального газу

$$D = \frac{1}{3} \cdot \langle \lambda \rangle \cdot \langle v_T \rangle, \quad (2)$$

тут $\langle \lambda \rangle$ – середня довжина вільного пробігу молекули; $\langle v_T \rangle$ – середня швидкість теплового руху молекул, $\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$.

Розглянемо частково заповнену водою вузьку трубку сталого перерізу S , відкриту з одного кінця, вісь X спрямуємо вздовж осі трубки. На межі з водою ($X = 0$) парціальний тиск водяної пари P_{II} у трубці дорівнює тискові насиченої пари P_H при температурі дослідів. Тиск водяної пари у трубці змінюється вздовж осі X від значення P_H до тиску P_1 біля відкритого кінця трубки ($X = h$), який визначається вологістю повітря у лабораторії, отже, вздовж осі трубки існує градієнт парціального тиску пари $\frac{dP_{II}}{dx}$, внаслідок чого в ній виникає дифузійний потік M пари, напрямлений вгору. Густину пари ρ_{II} можна виразити через його парціальний тиск, використовуючи рівняння стану ідеального газу:

$$\rho_{II} = \frac{m}{V} = \frac{P_{II}\mu_{II}}{RT}. \quad (3)$$

Підставляючи одержане співвідношення (3) у формулу закону Фіка (1), визначимо масу пари, яка переноситься через площу поперечного перерізу трубки за одну секунду:

$$M_{II} = -D \cdot \frac{d\rho_{II}}{dx} \cdot S = -\frac{D\mu_{II}}{RT} \cdot \frac{dP_{II}}{dx} \cdot S. \quad (4)$$

Знехтувавши масою пари, що переноситься конвективним потоком, що виникає у трубці, масу пари M_{II} можна виразити через швидкість зниження рівня рідини у капілярі:

$$M_{II} = \rho_P \cdot S \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau}, \quad (5)$$

де ρ_P – густина рідини; Δh – зниження рівня рідини за час $\Delta \tau$.

Підставивши одержаний вираз (5) у формулу (4), дістанемо

$$\rho_P \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = - \frac{D \mu_{II}}{RT} \cdot \frac{dP_{II}}{dx}. \quad (6)$$

Розділяючи змінні і інтегруючи цю рівність, дістанемо:

$$\rho_P \cdot R \cdot T \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau} \cdot \int_0^h dx = -D \cdot \mu_{II} \cdot \int_{P_H}^{P_1} dP_{II}$$

або

$$\rho_P \cdot R \cdot T \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau} \cdot h = D \cdot \mu_{II} \cdot (P_H - P_1),$$

звідси

$$D = \frac{\rho_P \cdot R \cdot T \cdot h \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau}}{\mu_{II} \cdot (P_H - P_1)}, \quad (7)$$

де D – коефіцієнт взаємодії дифузії; ρ_P – густина рідини (води); R – універсальна газова стала: $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; h – відстань від поверхні води до верхнього краю трубки; T – температура води у капілярі і повітря у лабораторії; Δh – зниження рівня рідини за час $\Delta \tau$; μ_{II} – молярна маса води; P_H – тиск насиченої пари; P_1 – тиск пари, який визначається вологістю повітря у лабораторії.

Формулу (7) можна використовувати для експериментального визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря та водяної пари, нехтуючи конвективним потоком пари, що виникає у трубці. Врахування конвективного потоку приводить до більш точної формули для визначення коефіцієнта взаємної дифузії:

$$D = \frac{\rho_P \cdot R \cdot T \cdot h \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau}}{\mu_P \cdot P_0 \cdot \ln \frac{P_0 - P_1}{P_0 - P_H}}, \quad (8)$$

де P_0 – атмосферний тиск.

Необхідно відзначити за умови $P_0 \gg P_H$ з рівності (8) можна досить просто одержати формулу (7).

Експериментальна установка

Для визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря і водяної пари призначена експериментальна установка ФПТ1-4, загальний вигляд якої зображено на рис. 6.1.

Основним елементом установки є мікроскоп 4, на предметному столику якого розташовані робочий елемент, що складається з вимірювача, до рухомої частини якого закріплений корпус з оргскла. В отворі корпусу знаходиться скляна трубка (капіляр) з дистильованою водою.

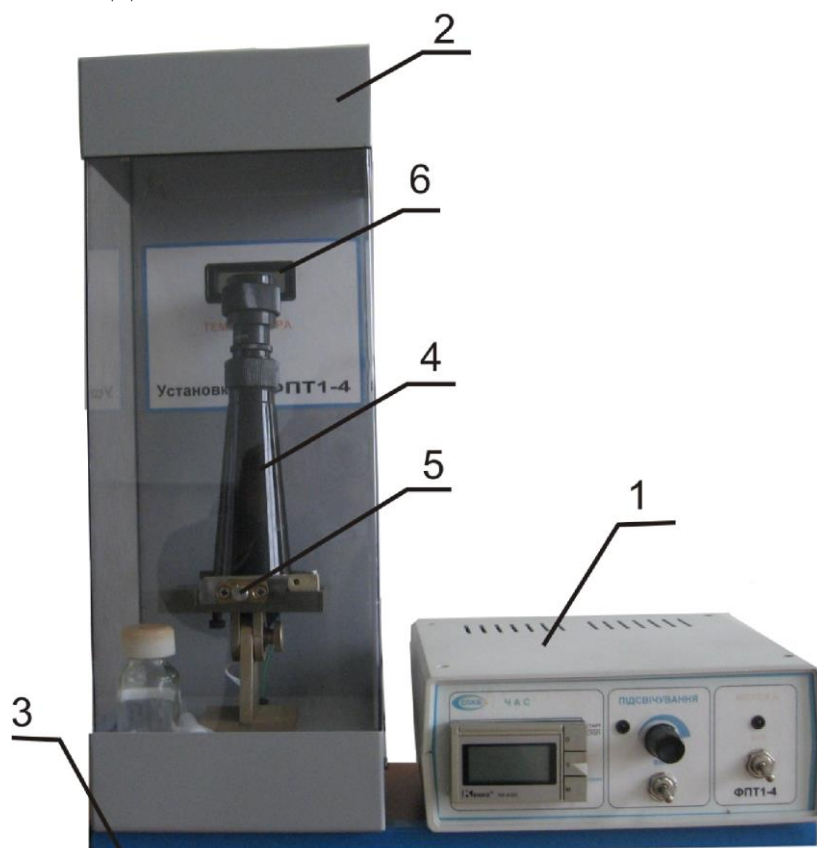


Рис. 6.1. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-4:

1 – блок вимірювальних приладів; 2 – блок робочого елемента; 3 – стаяк; 4 – мікроскоп; 5 – робочий елемент; 6 – цифровий контролер для виміру температури

Для підсвічування трубки при вимірюваннях застосовується ліхтар, світло від якого передається до робочого елемента по світловоду з оргскла. Яскравість свічення лампи встановлюється регулятором „Підсвічування капіляра”, який знаходиться на передній панелі блоку приладів 1.

Час випаровування води з капіляра вимірюється секундоміром, розташованим у блоці приладів, і реєструється на цифровому індикаторі „Час”. Секундомір приводиться в дію при вмиканні

живлення блоку приладів. Скидання до нуля значень на індикаторі провадиться натисканням кнопки „Стоп”, після відпускання якої знову починається відлік часу.

Температура повітря у блоці робочого елемента вимірюється напівпровідниковим термометром і реєструється на цифровому індикаторі „Температура” блоку робочого пристрою.

Ціна поділки α окулярної шкали мікроскопа вказана на окулярній шкалі.

Порядок виконання роботи

1. Зняти захисний кожух з мікроскопа і підвісити його на гвинти задньої панелі. Тубус мікроскопа встановити у положення, за якого предметний столик з робочим елементом розміщується горизонтально.

2. Заправити робочий елемент водою. Для цього залити воду в ємність 1 (рис. 6.2) робочого елемента, висунути на 10–15 мм і знову засунути шток 2 (рис. 6.2).

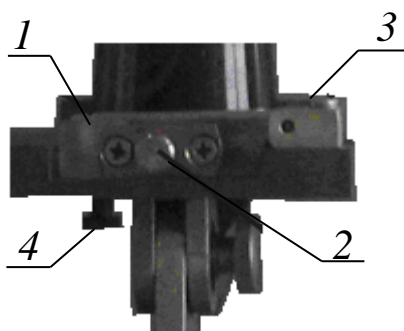


Рис. 6.2. Робочий елемент: 1 – ємність; 2 – шток; 3 – регулювальний гвинт; 4 – гвинт

Подальші роботи проводити не раніше, ніж через 10–15 хвилин після заправлення.

3. Переконавшись у тому, що регулятор підсвічування капіляра у положенні мінімальної яскравості, увімкнути установку тумблером „Мережа”.

4. Регулятором підсвічування капіляра встановити зручне для роботи освітлення. Органами настроювання мікроскопа досягти чіткого зображення капіляра.

5. Переміщуючи капіляр обертанням гайки 3 (рис. 6.2) робочого елемента, встановити зображення верхнього краю капіляра навпроти нульової поділки шкали окуляра мікроскопа, тобто $h_0 = 0$, і зафіксувати це положення гвинтом 4 (рис. 6.2).

6. Сфокусувати мікроскоп на меніску рідини. Визначити відстань h від краю капіляра до меніска по шкалі мікроскопа відповідно до рис. 6.3. Значення h занести в таблицю 1.

7. Увімкнути відлік часу. Спостерігаючи у мікроскоп за рухом меніска рідини через кожні 5 поділок шкали окуляра, занести в таблицю значення n і час τ випарювання рідини.

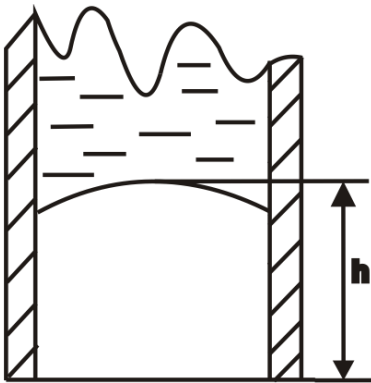


Рис. 6.3. Визначення положення меніска

8. Зробити 8–10 вимірів положення меніска.

9. Виміряти температуру повітря у робочому елементі установки.

10. Встановити регулятор підсвічування капіляра в положення мінімальної яскравості, після чого вимкнути установку

№ вим.	h , м	n , поділ.	τ , с	$\Delta n / \Delta \tau$, поділ./с	$\Delta h / \Delta \tau$, м/с	P_0 , Па	T , К	P_H , Па	P_1 , Па	D , м ² /с

тумблером „Мережа”. Тубус мікроскопа установити у вертикальне положення.

Таблиця 1

Обробка результатів вимірювання

1. Побудувати графік залежності числа поділок n окулярної шкали мікроскопа від часу τ : $n = f(\tau)$ і за нахилом одержаної усередненої прямої визначити середнє значення $\frac{\Delta n}{\Delta \tau}$. Помноживши цю величину на ціну поділки α окулярної шкали, знайти середнє значення швидкості випаровування рідини з капіляра $\frac{\Delta h}{\Delta \tau}$.

2. Використовуючи знайдене значення $\frac{\Delta h}{\Delta \tau}$, за формулою (8) або (7) (за вказівкою викладача) обчислити коефіцієнт взаємної дифузії повітря та водяної пари, враховуючи, що густина води $\rho_p = 10^3 \text{ кг/м}^3$, молярна маса води $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. Тиск насиченої водяної пари визначити з таблиці 2, де наведено залежність тиску P_H та густини ρ насиченої водяної пари P_1 біля відкритого кінця трубки знайти за значенням відносної вологості φ (у відсотках) у приміщенні лабораторії:

$$P_1 = \frac{\varphi}{100} \cdot P_H.$$

3. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Таблиця 2

t °C	P_H кПа	ρ 10^{-3}кг/м^3	t °C	P_H кПа	ρ 10^{-3}кг/м^3	t °C	P_H кПа	ρ 10^{-3}кг/м^3
15	1,704	12,84	19	2,196	16,32	23	2,809	20,60
16	1,817	13,65	20	2,337	17,32	24	2,984	21,81
17	1,937	14,50	21	2,486	18,35	25	3,168	23,07
18	2,062	15,39	22	2,642	19,44	26	3,361	24,40

Контрольні запитання

1. У чому полягає явище дифузії? Яка величина переноситься при дифузії?
2. Напишіть формулу Фіка і поясніть фізичний зміст коефіцієнта дифузії.
3. Запишіть формулу для коефіцієнта дифузії ідеального газу.
4. Що таке парціальний тиск? Як можна визначити тиск суміші газів?
5. Що таке відносна вологість повітря? як можна визначити цю величину?
6. У чому полягає метод визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря та водяної пари за швидкістю випаровування рідини з капіляра?
7. Виведіть розрахункову формулу для визначення коефіцієнта взаємної дифузії.
8. Основні джерела похибок даного методу вимірювання.

Лабораторна робота № 7

Визначення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметра молекул повітря

Мета роботи: визначити середню довжину вільного пробігу, ефективний діаметр молекул повітря та залежність цих величин від температури.

Прилади і матеріали: установка для визначення довжини вільного пробігу та ефективного діаметра молекул, електроплитка, термометр, секундомір.

Довжина капіляра $l = (102,2 \pm 0,05) \text{ мм}$

Діаметр капіляра $d = (0,25 \pm 0,0025) \text{ мм}$

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §93], [2, §15.1], [3, Р.3 §2] і теоретичні відомості в даному посібнику.

2. Знайти за одержаними дослідними і обчисленими даними середню довжину вільного пробігу.

3. Знайти значення ефективного діаметра молекул.

4. Порівняти значення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметра молекул при кімнатній температурі та температурі кипіння води.

Теоретичні відомості

Хаотичність теплового руху молекул газу, безперервні зіткнення між ними приводять до сталого переміщення частинок і зміни їх швидкостей та енергій. Якщо в середовищі існує просторова неоднорідність густини, температури або швидкості впорядкованого переміщення окремих шарів, то на тепловий рух молекул накладається впорядкований рух, який веде до вирівнювання цих неоднорідностей. Явища вирівнювання густини, кількості руху та енергії молекул газу мають між собою багато спільного, і тому всі вони об'єднуються спільною назвою явищ переносу. До них належать дифузія, внутрішнє тертя і теплопровідність.

Явище внутрішнього тертя, або в'язкості, зв'язане з виникненням сил тертя між шарами газу або рідини, що переміщуються паралельно один відносно одного з різними швидкостями. З боку шару, що рухається швидше, на повільніший шар діє прискорююча сила, і, навпаки, повільніший шар гальмує швидкий. Сили тертя, які при цьому виникають, напрямлені по дотичній до поверхні шарів, що труться. З точки зору молекулярно-кінетичної теорії газів причиною внутрішнього тертя є накладання впорядкованого руху шарів газу з різними швидкостями на хаотичний тепловий рух молекул.

Сила внутрішнього тертя, тобто сила взаємодії між суміжними шарами, що рухаються відносно себе,

$$f = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S, \quad (1)$$

де $\left| \frac{dv}{dx} \right|$ – абсолютне значення градієнта швидкості в напрямі x ; S –

площа, через яку відбувається взаємодія; η – коефіцієнт в'язкості.

Розрахунки, проведені на основі молекулярно-кінетичної теорії газів, дають таке значення коефіцієнта в'язкості ідеального газу:

$$\eta = \frac{1}{3} \bar{u} \bar{\lambda} \rho, \quad (2)$$

де \bar{u} – середня швидкість газових молекул; $\bar{\lambda}$ – середня довжина їх вільного пробігу; ρ – густина газу.

Середня довжина вільного пробігу $\bar{\lambda}$, як відомо, обернено пропорційна густині газу ρ . Отже, згідно з формулою (2) коефіцієнт в'язкості газу (в певних межах) не залежить від його густини.

Оскільки середня швидкість молекул \bar{u} прямо пропорційна кореневі квадратному з абсолютної температури, коефіцієнт внутрішнього тертя η , як видно з формули (2), із збільшенням температури зростає.

Точніший вивід із врахуванням розподілу швидкостей молекул за законом Максвелла і сил взаємодії між молекулами (реальні гази)

приводить до такого ж виразу, тільки множник $\frac{1}{3}$ замінюється іншим,

рівним приблизно $\frac{1}{2}$, тобто

$$\eta = \frac{1}{2} \bar{u} \bar{\lambda} \rho.$$

З останнього виразу і знаходимо шукану середню довжину вільного пробігу молекул:

$$\bar{\lambda} = \frac{2\eta}{\bar{u}\rho}. \quad (3)$$

Коефіцієнт внутрішнього тертя для газів, як і для рідин, може бути визначений експериментально на підставі закону Пуазейля. Метод Пуазейля ґрунтується на вимірюванні об'єму V досліджуваного газу або рідини, що протікає за час t через капілярну трубку:

$$\eta = \frac{\pi \Delta p r^4 t}{8lV}, \quad (4)$$

де r – радіус капіляра; l – його довжина; Δp – середня різниця тисків на кінцях капіляра, під впливом якої відбувається витікання газу або рідини, t – час витікання деякого об'єму V рідини.

$$\Delta p = \frac{h_1 + h_2}{2} \rho_g g.$$

Середню швидкість газових молекул \bar{u} і густину газу знаходять за відомими формулами:

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (5)$$

$$\rho = \frac{p\mu}{RT}, \quad (6)$$

де R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура газу; p – тиск газу; μ – молярна маса газу.

Отже, вимірявши на досліді коефіцієнт в'язкості η та обчисливши (при умовах досліду) \bar{u} і ρ , знайдемо середню довжину вільного пробігу за формулою (3).

Можемо підставивши (4), (5) та (6) у (3) вивести формулу для обчислення λ .

$$\lambda = \frac{2\pi\sqrt{\pi}\Delta p r^4 t R T}{2\sqrt{2}RT\mu p} = \frac{\pi\sqrt{\pi}RT\Delta p r^4 t}{\sqrt{2}\mu p}$$

або

$$\bar{\lambda} = \frac{\pi\sqrt{\pi}RT(h_1 + h_2)\rho_g g r^4 t}{2\sqrt{2}\mu p}. \quad (7)$$

Методом диференціювання знаходять відносну похибку результату:

$$\frac{\Delta\bar{\lambda}}{\bar{\lambda}} = \frac{\Delta T}{2T} + \frac{2\Delta h}{h_1 + h_2} + \frac{4\Delta r}{r} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta p}{p}. \quad (8)$$

Величини π , R , ρ_g , g , μ , беремо з таблиць з такою точністю, яка б перевищувала точність вимірювань. Тому абсолютною похибкою у знаходженні цих величин нехтуємо. При обчисленні відносної похибки вимірюваних величин, їх числові значення та інструментальні похибки можна підставляти у позасистемних одиницях, в яких проградуйовані вимірювальні прилади (тиск – у мм. рт. ст.)

Із відомого співвідношення:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n} \quad (9)$$

можна знайти ефективний діаметр молекул σ . Концентрацію молекул

n визначають із рівняння:

$$n = n_0 \frac{pT_0}{p_0T}, \quad (10)$$

де $n_0 = 2,687 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ концентрація молекул (число молекул в 1 см^3) при нормальних умовах ($p_0 = 101325 \text{ Па}$, $T_0 = 273 \text{ К}$) – число Лошмідта. Отже,

$$\sigma = \sqrt{\frac{p_0T}{\sqrt{2\pi\lambda} n_0 p T_0}}. \quad (11)$$

Методом диференціювання знаходять відносну похибку результату:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta T}{2T} + \frac{\Delta\lambda}{2\lambda} + \frac{\Delta p}{2p}. \quad (12)$$

Експериментальна установка

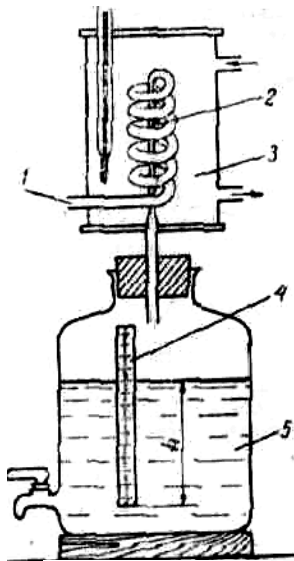


Рис. 7.1. Установка для визначення довжини вільного пробігу та ефективного діаметра молекул повітря

Капіляр 2 (рис. 7.1), через який проходить досліджуваний газ (найчастіше повітря), поміщений у циліндричній посудині 3 з термометром і бічними відростками для пропускання водяної пари. У верхній частині капіляр сполучений із змійовиком порівняно великого діаметра, вільний кінець якого 1 виходить назовні. Нижній кінець капіляра, що переходить у трубку порівняно більшого діаметра, закріплений у герметично закритій посудині 5 з краном внизу. Посудина 5 заповнена водою, рівень якої обчислюють по шкалі 4. Якщо відкрити кран, то вода виливається з посудини і через капіляр у неї засмоктується повітря. Спочатку вода вибігає безперервним струменем завдяки деякому додатковому тиску над поверхнею води в посудині, а далі починає витікати серіями краплин, оскільки капіляр дуже вузький і повітря просмоктується через нього повільно. Отже,

витікання води серіями краплин визначається діаметром капіляра, а не отвором крана.

Порядок виконання роботи

1. Відкривають кран і після чергової серії краплин підставляють під нього зважену на аналітичних терезах лабораторну склянку. Одночасно вмикають секундомір та фіксують за шкалою 4 рівень води h_1 .

Вимірювання припиняють, коли в склянку натече 50–70 см³ води.

2. За масою води в склянці знаходять об'єм повітря V , що ввійшов у посудину через капіляр. Тиск, під яким втікає повітря в посудину,

$$\Delta p = \frac{h_1 + h_2}{2} \rho_e g,$$

де h_2 – рівень води в посудині через t секунд, протягом яких тривав дослід; ρ_e – густина води.

3. Радіус капіляра r вимірюють за відрізанним від нього кусочком відліковим мікроскопом. В зв'язку з тим, що капіляр може не бути точно циліндричним, його діаметр вимірюють декілька разів у різних напрямках і знаходять середнє арифметичне значення. Довжина капіляра l , а іноді і його радіус r вказується на приладі.

4. Обчислюють значення \bar{u} і ρ при умовах досліду.

5. За одержаними дослідними і обчисленими даними знаходять за формулою (3) середню довжину вільного пробігу $\bar{\lambda}$. Можна обчислювати $\bar{\lambda}$ за формулою (7), а відносну похибку за співвідношенням (8).

6. Значення ефективного діаметра молекул визначають за формулою (11). Відносну похибку результату знаходять за формулою (12). Після цього обчислюють абсолютну похибку і записують остаточний результат у вигляді $\sigma = \bar{\sigma} \pm \Delta\sigma$.

7. Ці ж вимірювання проводять при температурі кипіння води, пропускаючи водяну пару через посудину 4.

Примітка. Всі величини для знаходження $\bar{\lambda}$ і σ повинні бути взяті в СІ.

Контрольні запитання

1. Що таке явища переносу? Вказати характерні особливості кожного з цих явищ.
2. Від чого залежить сила внутрішнього тертя?
3. Який фізичний зміст коефіцієнта в'язкості газу? Від чого він залежить?
4. Що таке середня довжина вільного пробігу молекули?
5. Що розуміють під ефективним діаметром молекул?
6. Які швидкості молекул вам відомі?
7. Чому в даній роботі використовується капілярна трубка?

*Лабораторна робота 8**

Визначення коефіцієнта в'язкості повітря капілярним методом

Мета роботи: вивчити внутрішнє тертя повітря як одне з явищ переносу газу.

Прилади і матеріали: експериментальна установка ФПТ 1-1: блок робочого елемента, блок приладів (мікрокомпресор, стояк, капіляр, реометр, манометр).

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §95], [2, §15.1], [5, Р.3 §8] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Знайти середнє значення коефіцієнта в'язкості.
3. Обчислити середню швидкість теплового руху молекул повітря.
4. Обчислити середню довжину вільного пробігу молекул.

Теоретичні відомості

Явища переносу – це процеси встановлення рівноваги в системі шляхом переносу маси (дифузія), енергії (теплопровідність) та імпульсу молекул (внутрішнє тертя, або в'язкість). Усі ці явища обумовлені тепловим рухом молекул.

При явищі в'язкості спостерігається перенос імпульсу від молекул із шарів потоку, які рухаються швидше, до повільніших. Наприклад, у випадку протікання рідини або газу прямолінійною циліндричною трубою (капіляром) за малих швидкостей потоку течія є ламінарною,

тобто потік газу рухається окремими шарами, які не перемішуються між собою. У цьому випадку шари – це собою сукупність нескінченно тонких циліндричних поверхонь, вкладених одна в одну, які мають спільну вісь, що збігається з віссю труби.

Внаслідок хаотичного теплового руху молекули безперервно переходять із шару в шар і при зіткненнях з іншими молекулами обмінюються імпульсами напрямленого руху. При переході із шару з більшою швидкістю напрямленого руху в шар із меншою швидкістю молекули переносять у другий шар свій імпульс напрямленого руху. У "більш швидкий" шар переходять молекули з меншим імпульсом. У результаті перший шар гальмується, а другий – прискорюється. Дослід показує, що імпульс dP , що передається від шару до шару через поверхню S , пропорційний градієнту швидкості $\frac{dv}{dr}$ площі S та часу переносу dt :

$$dP = -\eta \frac{dv}{dr} S \cdot dt.$$

У результаті між шарами виникає сила внутрішнього тертя:

$$F_T = \left| \frac{dP}{dt} \right| = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| S, \quad (1)$$

де η – коефіцієнт в'язкості, для ідеального газу $\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle v_T \rangle$, тут ρ – густина газу; $\langle \lambda \rangle$ – середня довжина вільного пробігу молекул; $\langle v_T \rangle$ – середня арифметична швидкість теплового руху молекул – $v_T = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$, де μ – молярна маса газу; R – універсальна газова стала.

Виділимо в капілярі уявний циліндричний об'єм газу радіуса r і довжиною l , так як це показано на рис. 8.1. Позначимо тиски на його торцях P_1 і P_2 . При установленій течії сила тиску на циліндр $F = (P_1 - P_2)\pi \cdot r^2$ врівноважується силою внутрішнього тертя F_T , що діє на бічну поверхню циліндра з боку зовнішніх шарів газу:

$$F - F_T = 0. \quad (2)$$

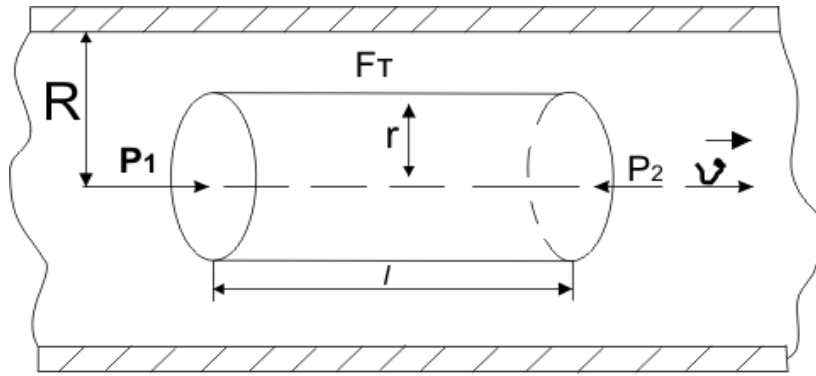


Рис. 8.1. До розрахунку об'ємної витрати газу в разі протікання його через капіляр

Сила внутрішнього тертя визначається за формулою Ньютона (1), зважаючи на те, що $S = 2\pi \cdot r \cdot l$ і швидкість $v(r)$ зменшується при віддаленні від осі труби, тобто $\frac{dv}{dr} < 0$, можна записати:

$$F_T = -\eta \frac{dv}{dr} 2\pi r l . \quad (3)$$

У цьому випадку умова стаціонарності (2) запишеться у вигляді:

$$(P_1 - P_2)\pi \cdot r^2 + \eta \frac{dv}{dr} 2\pi r l = 0 . \quad (4)$$

Інтегруючи рівняння, одержимо

$$v(r) = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta l} r^2 + C ,$$

де C – стала інтегрування, яка визначається граничними умовами задачі.

При $r = R$ швидкість газу повинна перетворюватися на нуль, оскільки сила внутрішнього тертя об стінку капіляра гальмує суміжний з нею шар газу.

Тоді

$$v(r) = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} (R^2 - r^2) . \quad (5)$$

Підрахуємо об'єм витрати газу Q , тобто об'єм, що протікає за одиницю часу через поперечний переріз труби. Через кільцеву площадку з внутрішнім радіусом r і зовнішнім $r + dr$ щосекунди протікає об'єм газу $dQ = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot v(r)$.

$$\text{Тоді } Q = \int_0^R 2\pi r v(r) dr = \pi \frac{P_1 - P_2}{2\eta l} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr , \text{ або}$$

$$Q = \pi \frac{P_1 - P_2}{8\eta l} R^4. \quad (6)$$

Формулу (6), яка зветься формулою Пуазейля, можна використовувати для експериментального визначення коефіцієнта в'язкості газу.

Формулу Пуазейля було одержано в припущенні ламінарної течії газу або рідини. Однак із збільшенням швидкості потоку рух стає турбулентним і шари перемішуються. За турбулентного руху швидкість у кожній точці змінює своє значення і напрям, зберігається тільки середнє значення швидкості. Характер руху рідини або газу в трубі визначається числом Рейнольдса:

$$R_e = \frac{\langle v \rangle \cdot l}{\nu}, \quad (7)$$

де l – характерний розмір труби, в нашому випадку R , $\langle v \rangle$ – середня швидкість потоку, ν – кінематична в'язкість, яка дорівнює $\frac{\eta}{\rho}$, де ρ – густина речовини .

У гладких циліндричних каналах перехід від ламінарної течії до турбулентної відбувається при $R_e \approx 1000$. Тому в разі використання формули Пуазейля необхідно забезпечити виконання умови $R_e < 1000$. Крім того, експеримент необхідно ставити таким чином, щоб стисливістю газу можна було б знехтувати. Це можливо тоді, коли перепад тисків вздовж капіляра значно менший від самого тиску. У даній установці тиск газу дещо більший від атмосферного (10^3 см вод. ст.), а перепад тисків становить від ~ 10 см вод. ст., тобто приблизно 1% атмосферного.

Формула (6) справедлива для ділянки труби, в якій встановилась стала течія з квадратичним законом розподілу швидкостей (5) по перерізу труби. Така течія встановлюється на деякій відстані від входу в капіляр, тому для досягнення достатньої точності експерименту необхідний виконання умови $R \ll l$ де R – радіус; l – довжина капіляра.

Експериментальна установка

Для визначення коефіцієнта в'язкості повітря призначена експериментальна установка ФПТ 1-1, загальний вигляд якої зображений на рис. 8.2.

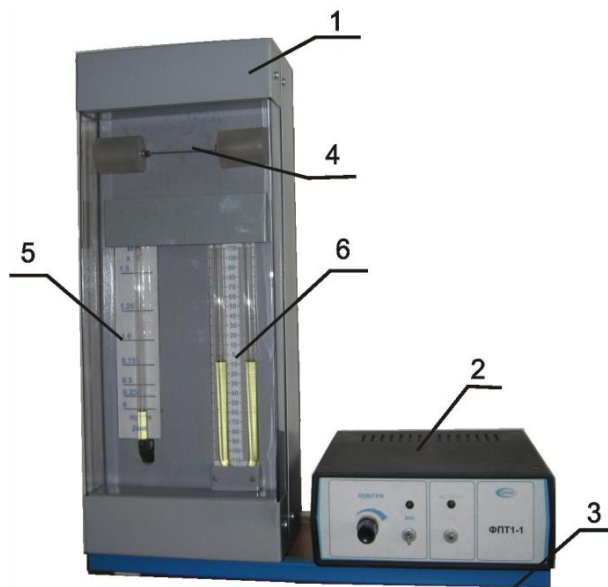


Рис. 8.2. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ 1-1: 1 – блок робочого елемента; 2 – блок приладів; 3 – стояк; 4 – капіляр; 5 – реометр; 6 – манометр

Повітря в капіляр 4 нагнітається мікрокомпресором, розміщеним у блоці приладів 2. Об'ємна витрата повітря вимірюється реометром 3, а потрібне її значення встановлюється регулятором "Повітря", який знаходиться на передній панелі блоку приладів. Для вимірювання різниці тисків повітря на кінцях капіляра призначений U -подібний водяний манометр 6. Геометричні розміри капіляра – радіус R і довжина l

вказані на робочому місці.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку тумблером "Мережа".
2. За допомогою регулятора "Повітря" установити за показаннями реометра вибране значення об'ємної витрати повітря Q .
3. Виміряти різницю тисків ΔP в колінах манометра. Значення Q і ΔP занести до таблиці 1.

Таблиця 1

№ виміру	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta P, \text{ Па}$	$\eta, \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$

4. Повторити вимірювання за пп. 2–3 для 5 значень об'ємної витрати повітря.

5. Встановити регулятор витрати повітря на мінімум, після чого вимкнути установку тумблером «Мережа».

Обробка результатів

1. Для кожного режиму визначити за формулою Пуазейля коефіцієнт в'язкості повітря:

$$\eta = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot Q \cdot l}$$

Знайти середнє значення коефіцієнта в'язкості.

2. За формулою $\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ обчислити середню швидкість

теплового руху молекул повітря, враховуючи, що молярна маса повітря $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а універсальна газова стала $R = 8,31$ Дж/(моль · К).

3. За формулою $\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho\langle v_T \rangle}$ обчислити середню довжину

вільного пробігу молекул. При цьому густину повітря знайти, виходячи з рівняння Клапейрона-Менделєєва $\rho = \frac{P\mu}{RT}$ для відомих значень температури й тиску в лабораторії у процесі виконання експерименту.

4. Оцінити похибку результатів вимірювання.

Контрольні запитання

1. Розкажіть про явища переносу в газах.

2. Поясніть явище внутрішнього тертя в ідеальному газі з точки зору молекулярно-кінетичної теорії.

3. Напишіть і поясніть формулу Ньютона для внутрішнього тертя.

4. Який фізичний зміст коефіцієнта в'язкості? В яких одиницях СІ вимірюється ця величина?

5. Запишіть формулу для коефіцієнта в'язкості ідеального газу.

6. Яка величина називається середньою швидкістю теплового руху молекул ідеального газу? Від яких величин вона залежить?

7. Яка величина зветься середньою довжиною вільного пробігу молекули? Від яких фізичних величин вона залежить?

8. У чому полягає капілярний метод визначення коефіцієнта в'язкості газів?

9. Виведіть формулу Пуазейля. За яких умов її можна застосувати?

10. Як змінюється швидкість руху газу по радіусу каналу за ламінарного режиму течії?

11. Як оцінити середню довжину вільного пробігу та ефективний діаметр молекули газу, використовуючи явище внутрішнього тертя у газах?

12. Чому при будівництві магістральних газопроводів використовують труби великого діаметру, а не збільшують тиск газу,

який транспортується?

Лабораторна робота № 9

Визначення коефіцієнта теплопровідності повітря методом нагрітої нитки

Мета роботи: вивчити теплопровідність повітря як одне з явищ переносу в газах, навчитись визначати коефіцієнт теплопровідності методом нагрітої нитки.

Прилади і матеріали: експериментальна установка ФПТ1-3: блок приладів, цифровий термометр, блок робочого елемента, вольфрамова дротина, стояк, датчик температури термометра.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §95], [2, §15.1], [5, Р.3 §8] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Для кожного вимірювання розрахувати різницю температур ΔT , коефіцієнт теплопровідності.
3. Знайти середнє значення коефіцієнта теплопровідності повітря.

Теоретичні відомості

Поширення теплоти в газах відбувається трьома способами: тепловим випромінюванням (перенос енергії електромагнітними хвилями), конвекцією (перенос енергії за рахунок переміщення шарів газу в просторі з областей з більш високою температурою в області з нижчою температурою) та теплопровідністю.

Теплопровідність – це процес передачі теплоти від більш нагрітого шару газу до менш нагрітого за рахунок хаотичного теплового руху молекул. При теплопровідності відбувається безпосередня передача енергії від молекул, що мають більшу енергію, до тих, що мають меншу. Для стаціонарного процесу, за якого різниця температур у шарі газу не змінюється з часом, кількість теплоти δQ , яка переносить внаслідок теплопровідності за час dt через поверхню площею S , перпендикулярну до напрямку переносу енергії, в напрямі зменшення температури, визначається законом Фур'є:

$$\delta Q = -\chi \cdot \frac{dT}{dr} \cdot S \cdot d\tau, \quad (1)$$

де χ – коефіцієнт теплопровідності; dT/dr – градієнт температури.

Для ідеального газу

$$\chi = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \langle \lambda \rangle \cdot \langle v_T \rangle \cdot C_v, \quad (2)$$

тут ρ – густина газу; $\langle \lambda \rangle$ – середня довжина вільного пробігу молекули; $\langle v_T \rangle$ – середня швидкість теплового руху молекул,

$\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$; C_v – питома теплоємність газу за сталого об'єму.

Розглянемо два коаксіальні циліндри, простір між якими заповнено газом. Якщо внутрішній циліндр нагріти, а температуру зовнішнього циліндра підтримувати сталою, нижчою за температуру нагрівника, то в кільцевому шарі газу виникає радіальний потік теплоти, напрямлений від внутрішнього циліндра до зовнішнього. При цьому температури шарів газу, прилеглих до стінок циліндрів, дорівнює температурі стінок. Виділимо у газі кільцевий шар радіусом r , товщиною dr і довжиною L . За законом Фур'є (1) тепловий потік $q = \delta Q/d\tau$, тобто кількість теплоти, що проходить через цей шар за одну секунду, можна записати у вигляді

$$q = -\chi \frac{dT}{dr} S = -\chi \frac{dT}{dr} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L. \quad (3)$$

Розділивши змінні, одержимо

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} dT.$$

Тоді

$$\int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} \int_{T_1}^{T_2} dT,$$

або

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} \cdot (T_1 - T_2). \quad (4)$$

тут T_1 , R_1 і T_2 , R_2 – відповідно температури поверхонь та радіуси внутрішнього і зовнішнього циліндрів.

З рівняння (4) одержимо формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності газу:

$$\chi = \frac{q \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)}. \quad (5)$$

Формулу (5) одержимо у припущенні, що теплота переноситься від внутрішнього до зовнішнього циліндра тільки завдяки теплопровідності. Це припущення є достатньо обґрунтованим, оскільки потік променистої енергії при не високих температурах і малому діаметрі нагрівника становить не значну частину кількості теплоти, що переноситься, а конвекція усувається підбором діаметра зовнішнього циліндра та його вертикальним розміщенням в експериментальній установці.

Внутрішнім циліндром може служити тонка дротина (нитка), звичайно вольфрамова, яка нагрівається електричним струмом. Тоді після встановлення стаціонарного режиму тепловий потік можна прийняти таким, що дорівнює потужності електричного струму у дротині

$$q = I_H U_H,$$

де I_H – струм через дротину; U_H – спад напруги на дротині.

Якщо послідовно з дротиною підімкнути еталонний резистор опору R_P , то $I_H = \frac{U_P}{R_P}$ і тоді $q = \frac{U_P \cdot U_H}{R_P}$, (6)

де U_P – спад напруги на еталонному резисторі.

Використовуючи рівність (6) у формулі (5), одержимо

$$\chi = \frac{U_P \cdot U_H \cdot \ln \frac{D}{d}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot R_P \cdot \Delta T}, \quad (7)$$

де D і d – діаметри зовнішнього циліндра і дротини; $\Delta T = T_H - T_T$ – різниця температур дротини і зовнішнього циліндра (трубки).

Температуру трубки T_T можна взяти такою, що дорівнює температурі навколишнього повітря. Для обчислення різниці температур ΔT у шарі газу запишемо формули, що визначають опір дротини при температурі навколишнього повітря і у нагрітому стані:

$$R_{H.0} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_0), \quad R_H = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t),$$

де R_0 – опір дротини при $t = 0$ °C; α – температурний коефіцієнт опору матеріалу дротини.

Виключивши з цих рівностей R_0 , знайдемо

$$\Delta T = t - t_0 = \frac{R_H - R_{H.0}}{\alpha \cdot R_{H.0}} (1 + \alpha \cdot t_0).$$

Враховуючи, що $R_H = \frac{U_H}{I_H}$, $I_H = \frac{U_P}{R_P}$ і $R_{H.0} = \frac{U_{H.0}}{I_{H.0}}$, $I_{H.0} = \frac{U_{P.0}}{R_P}$,

отримаємо

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_H}{U_P} - \frac{U_{H.0}}{U_{P.0}} \right) \cdot (1 + \alpha \cdot t_0)}{\frac{U_{H.0}}{U_{P.0}} \cdot \alpha}, \quad (8)$$

де U_H , $U_{H.0}$ – спад напруги на дротині відповідно у нагрітому стані і при температурі навколишнього повітря t_0 ; U_P , $U_{P.0}$ – спад напруги на еталонному резисторі відповідно при температурі навколишнього повітря t_0 .

Експериментальна установка

Для визначення коефіцієнта теплопровідності повітря призначена експериментальна установка ФПТ1-3, загальний вигляд якої зображено на рис. 9.1.

Робочий елемент установки – це скляна трубка, заповнена повітрям, уздовж осі якої натягнута вольфрамова дротина 4. Температура трубки в ході експерименту підтримується сталою завдяки примусовій циркуляції повітря між трубкою і кожухом блоку робочого елемента 3, яка здійснюється за допомогою вентилятора, що знаходиться в блоці робочого елемента. Температура повітря навколо трубки вимірюється датчиком температури і реєструється цифровим контролером для виміру температури. Значення падінь напруги на еталонному резисторі U_P і на дротині U_H вимірюється цифровим контролером для виміру напруги. Значення напруги на дротині встановлюється регулятором „Нагрів”, який знаходиться на передній панелі блоку приладів 1. геометричні розміри робочого елемента – діаметр трубки D , діаметр дротини d , довжина трубки L , температурний коефіцієнт опору матеріалу дротини α – вказані на робочому місці.

Порядок виконання роботи

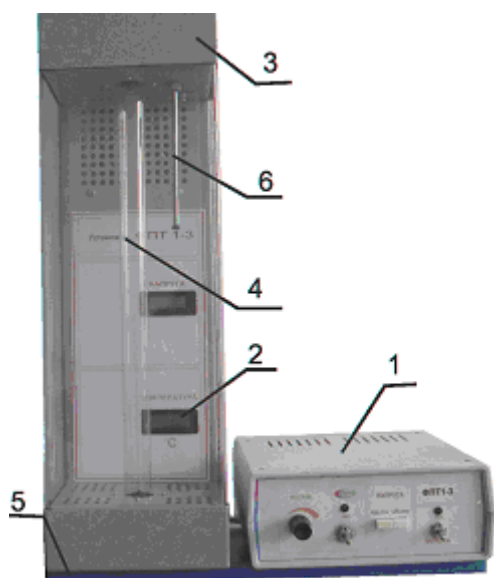


Рис. 9.1 Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ 1-3: 1 – блок приладів; 2 – цифровий термометр; 3 – блок робочого елемента; 4 – вольфрамова дротина; 5 – стояк; 6 – датчик температури термометра.

1. Увімкнути установку тумблером „Мережа”. Уключити тумблер „Нагрівання”.

2. Натиснути кнопку „ U_P ” (режим вимірювання спаду напруги на еталонному резисторі) і за допомогою регулятора „Нагрів” встановити спад напруги $U_{P,0}$ не більш $0,06\text{ В}$, за якого температура дротини залишається практично незмінною („ненагріваючий” струм).

3. Натиснути кнопку „ U_H ” (режим вимірювання спаду напруги на дротині) і реєструвати значення напруги $U_{H,0}$.

4. Повторити виміри за пп. 2–3 для 3 значень напруги $U_{P,0}$ обчислити середнє значення $U_{P,0}$ і

$U_{H,0}$ Усі результати внести до таблиці 1.

Таблиця 1

1

№ вим.	$U_{P,0}$, мВ	$U_{H,0}$, мВ	t_0 , °С	U_P , мВ	U_H , мВ	ΔT , К	χ , Вт/(м·К)

5. Натиснути кнопку „ U_P ” і за допомогою регулятора „Нагрів”, встановити спад напруги на еталонному резисторі U_P у діапазоні $0,3...6,5\text{ В}$.

6. Зачекавши 2 хвилини, що необхідно для стабілізації теплового режиму робочого елемента, натиснути кнопку „ U_H ” і визначити спадання напруги на дроті U_H .

7. Повторити вимірювання за пп. 5–6 для 3–5 значень спаду напруги U_P , результати занести до таблиці 1.

8. Встановити ручку регулятора „Нагрів” на мінімум. Відімкнути тумблер „Нагрів”, після чого відімкнути установку тумблером „Мережа”.

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного вимірювання за формулою (8) розрахувати

різницю температур ΔT , а за формулою (7) – коефіцієнт теплопровідності χ і занести одержані значення до таблиці 1.

2. Знайти середнє значення коефіцієнта теплопровідності повітря $\langle \chi \rangle$.

3. Оцінити похибки результатів вимірювань.

Контрольні запитання

1. Розкажіть про можливі способи передачі теплоти.

2. У чому суть явища теплопровідності? Яка величина переноситься при теплопровідності?

3. Яка величина зветься тепловим потоком? У яких одиницях СІ вона вимірюється?

4. Якою формулою описується потік теплоти, перенесеної при теплопровідності?

5. Який фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності? У яких одиницях СІ вимірюється ця величина?

6. Запишіть формулу для коефіцієнта теплопровідності ідеального газу.

7. Поясніть поняття градієнта температури.

8. У чому полягає метод нагрітої нитки для визначення коефіцієнта теплопровідності газів?

9. Виведіть розрахункову формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності методом нагрітої нитки.

10. Поясніть призначення еталонного резистора у схемі експериментальної установки.

11. Як визначається різниця температур дротини і зовнішньої трубки у даній роботі?

12. Як оцінити середню довжину вільного пробігу та ефективний діаметр молекули газу, використовуючи явище теплопровідності?

Лабораторна робота № 10*

Визначення залежності температури кипіння води від зовнішнього тиску

Мета роботи: визначити залежність температури кипіння води від зовнішнього тиску.

Прилади і матеріали: спеціальна установка, насос Комовського, електроплитка, барометр.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §128], [5, Р.7 §4] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Зменшуючи тиск в приладі, виконати вимірювання
3. Побудувати графік залежності температури кипіння води від тиску над рідиною.

Теоретичні відомості

Процес переходу з рідкого стану у газоподібний називається пароутворенням. Пароутворення може відбуватися двома шляхами: випаровування та кипіння. Випаровування – це процес пароутворення, яке відбувається з вільної поверхні рідини при будь – якій температурі.

При нагріванні рідини збільшується кінетична енергія її частинок, а отже, і її внутрішня енергія. У результаті цього перш за все посилюється випаровування і підвищується температура рідини; причому пароутворення відбувається не тільки з поверхні, але й у кожній бульбашці з насиченою парою, які знаходяться всередині рідини. В міру зростання температури посилюється випаровування і збільшується тиск всередині бульбашок, доки нарешті при певній температурі цей тиск не стане рівний зовнішньому тискові:

$$p = p_0 + \rho gh,$$

де p_0 – тиск повітря і пари над рідиною (зовнішній тиск); h – висота стовпа рідини над бульбашкою, ρ – густина рідини. Тоді бульбашки з парою піднімаються на поверхню рідини і починається пароутворення по всій масі рідини, яке називається **кипінням**. Протягом усього процесу кипіння температура рідини залишається сталою. Така температура називається температурою кипіння.

Як бачимо, рідина може кипіти при різних температурах, в залежності від зовнішнього тиску. Вплив тиску на температуру кипіння (так само, як і на температуру плавлення) показує рівняння Клапейрон-Клаузіуса, яким визначається зміна температури ΔT переходу з одного стану в інший при зміні тиску на Δp ,

$$\Delta T = \frac{(V_2 - V_1)}{\lambda} T \Delta p,$$

де λ – теплота агрегатного переходу (пароутворення, плавлення); T – абсолютна температура переходу із стану, в якому питомий об'єм V_1 , у стан, в якому питомий об'єм V_2 .

Питомий об'єм пари V_2 помітно більший від питомого об'єму рідини V_1 , а тому зміна температури ΔT значна. Крім того, вона завжди додатна, тобто із збільшенням тиску температура кипіння рідини підвищується, а із зменшенням тиску – знижується.

Опис установки

Установка для вивчення залежності температури кипіння від зовнішнього тиску (рис. 10.1) складається із герметично закритого кип'ятильника 1 з ізолюваним від атмосфери термометром; холодильника 2 (для конденсації пари, що утворилась в кип'ятильнику), буферної посудини 4, яка амортизує нерівномірності роботи вакуумного насоса 6. Буферна посудина з'єднує між собою ртутні манометри – відкритий 5 і закритий 3, яким вимірюють малі тиски. Для нагрівання посудини з водою використовують електричну плитку.

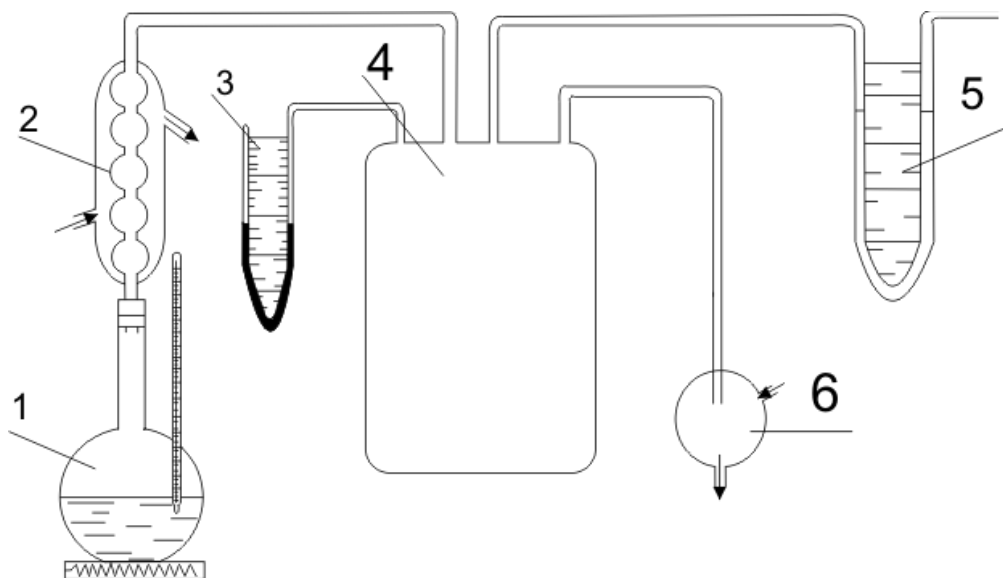


Рис. 10.1. Установка для вивчення залежності температури кипіння від зовнішнього тиску

Порядок виконання роботи

1. Патрубки холодильника сполучають з водопроводом і пропускають через нього протягом досліду воду такого напору, щоб біля стінок холодильника не утворювалось повітряних бульбашок.

2. Відкривають кран так, щоб тиск над рідиною був рівним атмосферному.

3. Нагрівають воду в кип'ятильнику до кипіння, потім зменшують нагрівання так, щоб кипіння не було надто сильним.

4. Визначають атмосферний тиск і за таблицями знаходять

температуру кипіння води. Якщо табличне значення температури не збігається з показами термометра кип'ятильника, вводять відповідну поправку.

5. Коли протягом декількох хвилин кипіння покази термометра і манометра залишаються сталими, дані досліду записують у таблицю.

6. Вимикають нагрівник і чекають поки вода охолоне на 5°C . З допомогою насоса зменшують тиск над рідиною доти, поки не рідина не закипить. Дані досліду записують тільки тоді, коли покази термометра і покази манометра протягом деякого часу залишаються сталими.

7. Знову зменшують тиск в приладі і виконують нові вимірювання.

8. За одержаними результатами будують графік залежності температури кипіння води від тиску над рідиною.

Примітка. Після закінчення роботи потрібно перевірити за барометром, чи не змінився атмосферний тиск. При невеликих змінах в обчисленнях беруть його середнє значення.

Контрольні запитання

1. Що таке пароутворення? Якими шляхами воно може відбуватися?

2. Що називають питомою теплотою пароутворення?

3. У чому полягає відмінність між випаровуванням та кипінням рідини?

4. Чи може випаровуватися тверде тіло?

5. Що розуміють під температурою кипіння?

6. Чи можна змінювати температуру кипіння рідини?

7. Які параметри бульбашки міняються, при її підніманні у рідини, під час кипіння останньої?

8. Капсулу з водою відкрили у космосі. Які процеси відбуватимуться при цьому?

Лабораторна робота № 11

Визначення абсолютної та відносної вологості повітря

Мета роботи: навчитись визначати абсолютну та відносну вологості повітря.

Прилади і матеріали: гігрометр Ламбрехта, психрометр Августа,

термометр, психрометр Асмана, ефір, груша – насос, барометр, посудина з водою.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §95], [2, §15.1], [5, Р.3 §8] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Вивчити будову та принцип дії гігрометра, психрометра Августа.
3. Визначити точку роси гігрометром.
4. Обчислити абсолютну вологість.
5. Визначити відносну вологість.

Теоретичні відомості та опис приладів

Вологість повітря зумовлюється наявністю в ньому водяної пари. Маса водяної пари може змінюватись як за абсолютною величиною, так і за ступенем насичення, що відповідно характеризується абсолютною і відносною вологістю.

Абсолютна вологість повітря (ρ) кількісно дорівнює масі водяної пари в грамах, що міститься в 1 м^3 повітря.

Під *відносною вологістю* φ слід розуміти відношення абсолютної вологості до маси водяної пари, яка насичує 1 м^3 повітря при тій самій температурі.

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_n}$$

Застосовуючи до водяної пари рівняння Менделєєва-Клапейрона отримуємо залежність густини від парціального тиску водяної пари $\rho = \frac{PM}{RT}$. Парціальним називається тиск, який би чинила одна складова суміші газів якби лише вона займала весь об'єм.

Відносну вологість можна знаходити як відношення парціального тиску водяної пари, яка міститься в повітрі при даній температурі до парціального тиску насиченої водяної пари при цій же температурі.

$$\varphi = \frac{P}{P_n}$$

Це відношення виражають у процентах.

Точкою роси називається температура, при якій наявна в повітрі водяна пара стає насиченою, тобто починає конденсуватися на охолодженій поверхні.

Дефіцитом вологості називають різницю між максимальним вмістом водяної пари в 1 м^3 повітря і абсолютною вологістю.

$$D = \rho_n - \rho$$

Основні способи визначення вологості повітря ґрунтуються на методах точки роси і психрометра.

1. **Метод точки роси.** Вологість повітря методом точки роси визначають гігрометром Ламбрехта (рис. 11.1).

Він складається з тонкого металевого полірованого диска 1 , на зворотному боці якого є резервуар 5 . У резервуар наливають ефір і вставляють термометр 3 через отвір 4 . Через другий отвір за допомогою гумової трубки з грушею 6 продувають повітря. Ефір швидко випаровується і диск 1 при цьому охолоджується. Одночасно охолоджується й повітря, що прилягає до диска, а на поверхні диска виступає роса внаслідок конденсації водяної пари з повітря (поверхня

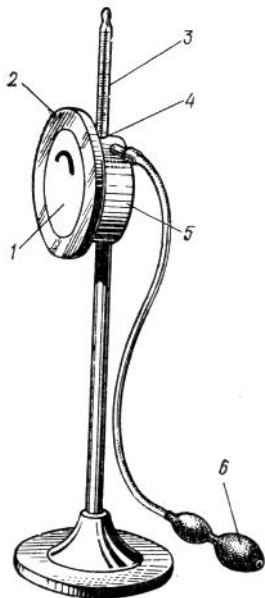


Рис. 11.1. Гігрометр Ламбрехта

диска стає ніби матовою, що добре помітно, коли порівняти її з блискучою поверхнею кільця 2). Фіксують температуру, що відповідає моменту потемніння поверхні диска 1 t_{p1} . Припинивши продування повітря, визначають температуру t_{p2} зникнення роси. Для обчислення вологості повітря беруть за точку роси t_p середнє арифметичне величин t_{p1} і t_{p2} .

З таблиць визначають густину насиченої водяної пари ρ при температурі t_p , тобто абсолютну вологість.

Знаючи кімнатну температуру t_k , з таблиць знаходять густину насиченої водяної пари ρ_n при температурі t_k . Відношення цих двох величин і дає значення відносної

вологості повітря.

2. **Метод психрометра.** Якщо взяти два однакових нормальних термометри, кулька одного з яких постійно змочується водою через батист, занурений у склянку з водою, то покази обох термометрів (“сухого” і “мокрого”) відрізнятимуться. Внаслідок випаровування води з батисту мокрий термометр буде показувати нижчу температуру, ніж сухий. Чим менша вологість навколишнього повітря, тим інтенсивніше випаровування і тим менші покази мокрого термометра. Значення показів сухого t_c і мокрого t_m термометрів

дають можливість визначити вологість повітря.

Покази мокрого термометра в психрометрі дещо відрізняються (в бік завищення) від справжньої температури мокрого термометра. Пояснюється це тим, що кульці мокрого термометра передається певна кількість теплоти випромінювання навколишніх тіл і деяка кількість її надходить через виступаючий стовпчик ртуті термометра, що має температуру навколишнього повітря. Щоб зменшити цей вплив, треба захистити кульку від радіації екранами, обгорнути батистом виступаючий стовпчик ртуті, підвищити швидкість руху повітря і цим збільшити швидкість випаровування.

Як показують спеціальні дослідження, при швидкості повітря 1,5–2 м/с і температурі мокрого термометра $t_m > 20^{\circ}\text{C}$ помилка становить приблизно 1% психрометричної різниці, і нею можна знехтувати.

Психрометричну формулу можна вивести з рівняння теплового балансу для кульки мокрого термометра; кількість теплоти Q_1 , передана від повітря в стаціонарному стані (температура мокрого термометра вже встановилась) і при відсутності тепловитрат, дорівнює кількості теплоти Q_2 , потрібної для випаровування води з поверхні батисту S , тобто

$$\alpha (t_c - t_m)S = q_m \lambda S, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт теплообміну; λ – питома теплота випаровування; q_m – швидкість випаровування $\frac{dm}{d\tau}$ з одиниці поверхні. Рівняння (1) віднесемо до одиниці часу.

$$\text{З (1) матимемо: } t_m = t_c - \frac{q_m \lambda}{\alpha}.$$

Швидкість випаровування можна визначити, виходячи із закону Дальтона, як для випаровування води з вільної поверхні:

$$q_m = \alpha_m \Delta p \cdot \frac{760}{H}, \quad (2)$$

де α_m – коефіцієнт випаровування; H – атмосферний тиск; Δp – різниця парціальних тисків водяної пари біля поверхні води і в навколишньому повітрі. Для нашого випадку $\Delta p = p_m - p_n$, де p_m – тиск насиченої пари при температурі t_m , p_n – тиск пари в навколишньому повітрі.

З (1) і (2) маємо рівняння психрометра:

$$p_n = p_m - A \cdot H \cdot (t_c - t_m), \quad (3)$$

де $A = \frac{\alpha}{\alpha_m \cdot 760 \cdot \lambda}$ – психометричний коефіцієнт.

$$\text{З (3) можна отримати: } A = \frac{p_m - p_n}{H(t_c - t_m)}, \quad (4)$$

де p_n – тиск насиченої пари при температурі повітря, тобто при температурі сухого термометра t_c .

Використовуючи метод логарифмування та диференціювання обчислюють відносну похибку

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta p_m + \Delta p_n}{p_m - p_n} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta t_c + \Delta t_m}{t_c - t_m}. \quad (5)$$

Психометричний коефіцієнт в основному залежить від швидкості руху повітря, яка визначає коефіцієнти теплообміну та випаровування. Експериментальними дослідженнями Зворикіна (1883 р.) встановлено таку формулу для коефіцієнта A :

$$A \cdot 10^6 = 593,1 + \frac{135,1}{\sqrt{v}} + \frac{48}{v},$$

де v – швидкість руху повітря біля психрометра, м/с.

Найпростіший тип психрометра – психрометр Августа – показано на рис.11.2, а.

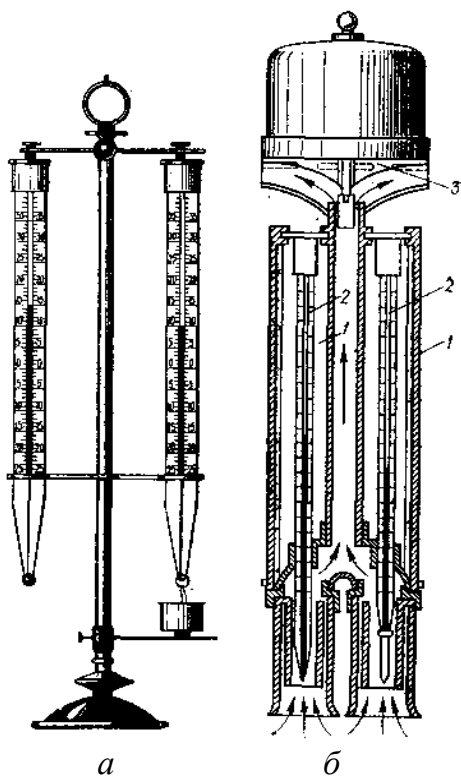


Рис. 11.2. Психрометр Августа (а); психрометр Асмана (б)

Психометричний коефіцієнт A дуже залежить від швидкості руху повітря в області малих значень швидкості, а при великих швидкостях змінюється мало. Тому запропоновано конструкцію психрометра з примусовим рухом повітря (рис.11.2, б). Це так званий аспіраційний психрометр або психрометр Асмана.

Кулька правого термометра обгорнута батистом. Лівий термометр сухий. По двох трубках 1, в яких вміщено термометри 2, повітря з швидкістю 3–5 м/с продувається вентилятором 3. Батист змочують дистильованою водою за допомогою груші і піпетки.

За показами термометрів

визначають температури t_c і t_m , коли вони встановляться при роботі вентилятора на повну потужність. Знаючи t_c і t_m і користуючись таблицями, визначають m і φ .

Порядок виконання роботи

1. Визначити точку роси t_p гігрометром, як зазначалось вище. При цьому слід запобігти впливу дихання експериментатора на вологість навколо приладу. Знаючи t_k , за таблицями визначити ρ і ρ_n , а потім обчислюють φ .

2. Визначити за сухим і мокрим термометрами психрометра Августа t_c і t_m і за таблицями – φ . За таблицею знаходять ρ_n і обчислюють абсолютну вологість.

3. Змочити батист мокрого термометра аспіраційного психрометра, звернувши при цьому увагу на те, щоб вода не попала в сухий термометр і внутрішню поверхню трубки. Ключем завести вентилятор (5–6 поворотів ключа) і стежити за показами термометрів. Коли покази встановляться (через 4–5 хв), записати значення t_c та t_m , а потім користуючись таблицями визначити φ . За таблицею знаходять ρ_n і обчислюють абсолютну вологість.

4. Обчислити психрометричний коефіцієнт A для кожного психрометра за формулою (4) та відносну похибку за формулою (5).

5. Знімаючи покази термометрів, спочатку відрахувати десяті частки градуса і записати їх, а потім цілі значення.

6. У кожному випадку дослід повторити не менше 3 разів і порівняти результати.

7. Сформулювати висновки відносно методики проведення експерименту і результатів вимірювання вологості повітря.

Контрольні питання

1. Дайте означення абсолютної вологості повітря.
2. Дайте означення відносної вологості повітря.
3. Що таке точка роси?
4. Яка пара є насиченою?
5. Якою є водяна пара, що знаходиться в повітрі при температурі, яка нижча за точку роси ?
6. Які є методи визначення вологості повітря?
7. Чи можуть сухий і змочений термометри психрометра показувати однакову температуру?
8. Вдень при температурі 20°C відносна вологість повітря

дорівнювала 60%. Скільки води у вигляді роси виділиться з кожного кубічного метра повітря, якщо температура вночі знизилась до 8°C ?

Лабораторна робота № 12

Визначення відношення теплоємностей газу C_p/C_v методом Клемана і Дезорма

Мета роботи: визначити відношення теплоємностей газу C_p/C_v методом Клемана і Дезорма.

Придали і матеріали: балон об'ємом $(20-25) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ і герметично сполучений з ним відкритий рідинний манометр та скляні трубки з кранами, ручний насос, гумова трубка.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §101], [5, Р.2 §5-7] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Визначити відношення теплоємностей газу C_p/C_v .
3. Обчислити середнє значення C_p/C_v .
4. Накреслити діаграму термодинамічних процесів, які відбуваються під час експерименту в координатах $p-V$.

Теоретичні відомості та опис приладів

Відношення питомих $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ або молярних $\frac{C_{mp}}{C_{mv}}$ теплоємностей

газів відіграє важливу роль при описанні адіабатних процесів. Для газів $C_p > C_v$. Метод Клемана–Дезорма ґрунтується на адіабатному розширенні газів (у даному випадку повітря).

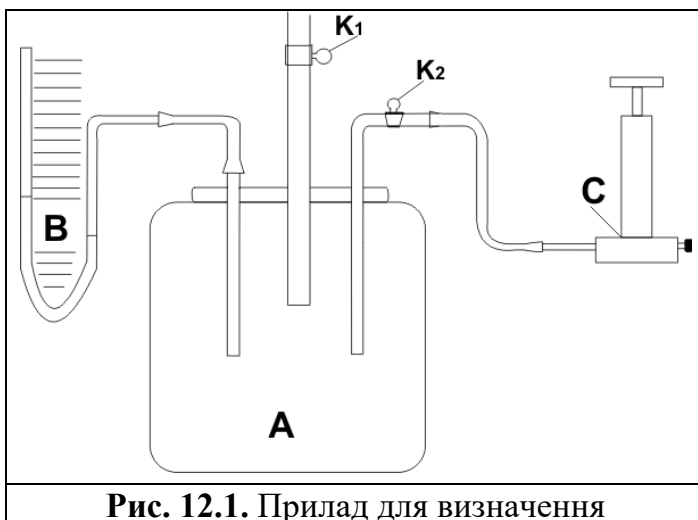


Рис. 12.1. Прилад для визначення

товстостінний балон A , сполучений гумовими трубками з диференціальним манометром B і через кран K_2 з насосом C . Кран K_1 сполучає балон з навколишнім повітрям.

В балон A , наповнений повітрям при атмосферному тиску p_0 , нагнітаємо повітря до деякою нового тиску. На шляху потоку повітря розміщується осушувач – склянка Тищенко, наповнена хлористим кальцієм. Тоді маса повітря в балоні, що займала певний об'єм, стиснеться до тиску p_1 і займатиме менший об'єм V_1 .

Одночасно при цьому стиснена маса повітря нагріється. Припинивши накачування, зачекаємо кілька хвилин, поки температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною T_1 , (I стан повітря). Остаточну різницю рівнів, що встановилась у манометрі, позначимо h_1 . Тоді $p_1 = p_0 + \rho g h_1$ (ρ – густина манометричної рідини).

Відкриваємо на короткий час кран K_1 , щоб тиск у балоні зрівнявся з атмосферним $p_1 = p_0$ (при цьому рівні рідин у манометрі зрівняються), після чого закриваємо кран K_1 . Повітря у балоні швидко розшириться до об'єму V_2 (при цьому, зважаючи на малий час розширення, помітного теплообміну між стінками балона і навколишнім повітрям не буде). Температура повітря в балоні зменшується до T_2 (II стан повітря).

Чекаємо, поки температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною T_1 . Об'єм V_2 залишається незмінним, тиск при нагріванні повітря збільшиться до p_3 . Різниця рівнів рідини в манометрі нехай буде h_2 тоді $p_3 = p_0 + \rho g h_2$ (III стан повітря).

Перехід повітря з I стану в II – адіабатний. Отже, за рівнянням Пуассона

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (1)$$

Температури повітря в станах I і III дорівнюють одна одній, тому за законом Бойля-Маріотта маємо

$$p_1 V_1 = p_3 V_2 \quad (2)$$

Прологарифмувавши (1) і (2) та розв'язавши їх відносно γ , дістанемо

$$\gamma = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg p_1 - \lg p_3} \quad (3)$$

Розклавши $\lg p_1$, $\lg p_3$ в ряд Тейлора і обмежившись двома першими членами, матимемо

$$\lg p_1 = \lg (p_o + \rho g h_1) = \lg p_o + \frac{\rho g h_1}{p_o} + \dots,$$

$$\lg p_3 = \lg (p_o + \rho g h_2) = \lg p_o + \frac{\rho g h_2}{p_o} + \dots$$

Підставивши ці результати в (3) і врахувавши, що $p_2 = p_o$, остаточно матимемо
$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (4)$$

Всі розглядувані процеси в балоні віднесено до сталої маси повітря, яке було в балоні до початку дослідів.

Методом логарифмування та диференціювання формули (4) знаходимо відносну похибку $\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\Delta h_1}{h_1} + \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{h_1 - h_2}$. Для обчислення

похибки потрібно врахувати, що при вимірюванні різниці рівнів рідини у манометрі відлік проводиться у двох колінах манометра, тому $\Delta h_1 = \Delta h_2 = 2\Delta h$.

Порядок виконання роботи

1. Відкривши кран K_2 (кран K_1 закритий), накачати в балон повітря, щоб у манометрі була значна різниця рівнів рідини (20–30 см). Зафіксувати різницю рівнів h_1 що остаточно встановилася в манометрі після охолодження нагрітого при адіабатичному стиску повітря до температури навколишнього середовища.

2. Відкрити і швидко закрити кран K_1 після встановлення однакового рівня рідини в обох колінах манометра. Через 2–3 хв зафіксувати різницю рівнів h_2 , яка встановиться. За формулою (4)

обчислити $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ для повітря і порівняти з теоретично знайденим,

вважаючи повітря двохатомним газом.

3. Дослід повторити не менш як 10 разів при найбільш можливих значеннях h_1 . Здобуті результати занести в таблицю. Обчислити середнє значення γ і похибки вимірювання.

4. В координатах p – V намалювати діаграму термодинамічних процесів, які відбуваються під час експерименту.

Контрольні запитання:

1. Дайте означення питомої та молярної теплоємності.
2. Що більше c_p чи c_v і чому? Вивести рівняння Майєра.
3. Який процес називають адіабатним? Записати перший закон термодинаміки для цього процесу.
4. Виведіть рівняння Пуассона.
5. Що таке число ступенів вільності? Як це число зв'язане з γ ?
6. Чому дорівнюють теплоємності газу при ізотермічному і адіабатичному процесах?
7. Як забезпечується адіабатний процес у ході виконання досліду?
8. Як і чому змінюється температура газу в балоні при виконанні досліду?

*Лабораторна робота № 13**

Визначення відношення теплоємностей повітря за сталих тиску та об'єму

Мета роботи: вивчення процесів в ідеальних газах, визначення відношення теплоємностей $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

Придали і матеріали: експериментальна установка ФПТ 1-6: колба; блок приладів; блок манометра; стояк; пневмотумблер "Атмосфера".

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §101], [5, Р.2 §5-7] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Визначити відношення теплоємностей газу C_p/C_v .
3. Обчислити середнє значення C_p/C_v .

Теоретичні відомості

Питомою теплоємністю речовини зветься величина, що дорівнює кількості теплоти, яку потрібно надати одиниці маси речовини для підвищення її температури на один Кельвін:

$$c = \frac{\delta Q}{m dT} \quad (1)$$

Теплоємність одного моля речовини називається молярною

теплоємністю:

$$C_{\mu} = \frac{\delta Q}{\nu dT} = \frac{\delta Q}{\frac{m}{\mu} dT}, \quad (2)$$

де ν – кількість речовини, m – маса, μ – молярна маса речовини.

Значення теплоємності газів залежить від умов, за яких відбувається їх нагрівання. Згідно з першим законом термодинаміки кількість теплоти δQ , надана системі, витрачається на збільшення внутрішньої енергії dU і на виконання системою роботи δA проти зовнішніх сил:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (3)$$

Приріст внутрішньої енергії ідеального газу в разі зміни його температури на dT :

$$dU = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} \cdot R \cdot dT, \quad (4)$$

де i – число ступенів свободи молекули, під яким розуміється число незалежних координат, що визначають положення молекули у просторі: $i = 3$ – для одноатомної; $i = 5$ – для двоатомної; $i = 6$ – для три- та багатоатомної, R – універсальна газова стала; $R = 8,31$ Дж/(моль·К).

При розширенні газу система виконує роботу

$$\delta A = PdV. \quad (5)$$

Якщо газ нагрівається при сталому об'ємі $V = const$, то $\delta A = 0$ і згідно з (3) вся одержана газом кількість теплоти витрачається тільки на збільшення його внутрішньої енергії $\delta Q_V = dU$ і, отже враховуючи (4), молярна теплоємність ідеального газу за сталого об'єму

$$C_V = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R. \quad (6)$$

Якщо газ нагрівається за сталого тиску $P = const$, то одержана газом кількість теплоти витрачається на збільшення внутрішньої енергії dU та виконання роботи δA :

$$\delta Q_P = dU + PdV.$$

Тоді молярна теплоємність ідеального газу за сталого тиску

$$C_P = \frac{dU}{dT} + P \cdot \left(\frac{dV}{dT} \right)_P \quad (7)$$

Використовуючи рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона-Менделєєва) для одного моля газу $PV = RT$ маємо:

$$P \cdot \left(\frac{dV}{dT} \right)_P = R i, \text{ отже}$$

$$C_p = C_v + R = \frac{i+2}{2} \cdot R. \quad (8)$$

$$\text{Відношення теплоємностей: } \gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (9)$$

Адіабатичним зветься процес, який відбувається без теплообміну із зовнішнім середовищем, $\delta Q = 0$. Практично він може бути здійснений у системі, оточеній теплоізолюючою оболонкою, але оскільки для теплообміну потрібен деякий час, то адіабатичним можна вважати також процес, який відбувається так швидко, що система не встигає вступити у теплообмін із навколишнім середовищем. Перший закон термодинаміки з урахуванням (4)–(6) для адіабатичного процесу має вигляд

$$\frac{m}{\mu} C_v dT = -PdV \quad (10)$$

Продиференціювавши рівняння Клапейрона-Менделєєва

$$PdV + VdP = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot dT$$

і підставивши dT до формули (10), одержимо

$$(C_v + R)PdV + C_v VdP = 0.$$

Враховуючи співвідношення між молярними теплоємностями ідеального газу за сталих тиску та об'єму, яке описується формулою Майера (8), а також (9), дістанемо

$$\gamma \cdot \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0.$$

Розв'язок записаного диференційного рівняння має вигляд

$$PV^\gamma = \text{const}. \quad (11)$$

Рівняння (11) зветься рівнянням адіабати (рівнянням Пуасона), а введена у (9) величина γ – показником адіабати.

Метод визначення показника адіабати, запропонований Клеманом і Дезормом (1819 р.), ґрунтується на вивченні параметрів деякої маси

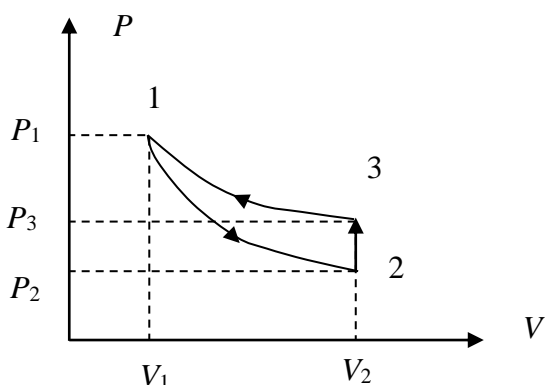


Рис. 13.1. Процеси зміни стану газу під час проведення досліду

газу, яка переходить з одного стану в інший двома послідовними процесами – адіабатичним та ізохоричним. Ці процеси на діаграмі $P-V$ (рис. 13.1) зображені кривими відповідно $1-2$ і $2-3$. Якщо у балон, з'єднаний з відкритим водяним манометром, накачати повітря і зачекати до встановлення теплової рівноваги з навколишнім середовищем, то в цьому початковому

стані 1 газ має параметри P_1, V_1, T_1 причому температура газу в балоні дорівнює температурі навколишнього середовища $T_1 = T_0$, а тиск $P_1 = P_0 + P'$ трохи більший від атмосферного.

Якщо тепер на короткий час з'єднати балон з атмосферою, то станеться адіабатичне розширення повітря. При цьому повітря в балоні перейде у стан 2 , його тиск знизиться до атмосферного $P_2 = P_0$. Маса повітря, що залишилося у балоні, яка в стані 1 займала частину об'єму балона, розширюючись, займе весь об'єм V_2 . При цьому температура повітря, що залишилось у балоні, знизиться до T_2 . Оскільки процес $1-2$ є адіабатичний, до нього можна застосувати

рівняння Пуассона (11): $P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$ або $\frac{T_1^\gamma}{P_1^{\gamma-1}} = \frac{T_2^\gamma}{P_2^{\gamma-1}}$. Звідси

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_0}{T_2}\right)^\gamma. \quad (12)$$

Після короткочасного з'єднання балона з атмосферою охолоджене адіабатичним розширенням повітря в балоні буде нагріватись (процес $2-3$) до температури навколишнього середовища $T_3 = T_0$ за сталого об'єму $V_3 = V_2$. При цьому тиск у балоні підвищиться до $P_3 = P_2 + P''$. Оскільки процес $2-3$ є ізохоричним, для нього можна застосувати закон Шарля:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3},$$

звідси

$$\frac{P_0 + P''}{P_0} = \frac{T_0}{T_2}. \quad (13)$$

З рівнянь (12) та (13) дістанемо:

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_0 + P''}{P_0}\right)^{\gamma}.$$

Прологарифмуємо:

$$(\gamma - 1)\ln\left(1 + \frac{P'}{P_0}\right) = \gamma \ln\left(1 + \frac{P''}{P_0}\right).$$

Оскільки надлишкові тиски P' та P'' дуже малі порівняно з атмосферним тиском P_0 , враховуючи те, що коли $x \ll 1$, то $\ln(1+x) \approx x$, матимемо $(\gamma - 1)P' = \gamma P''$, звідки

$$\gamma = \frac{P'}{P' - P''}. \quad (14)$$

Надлишкові тиски повітря P' і P'' вимірюють за допомогою U-подібного манометра за різницею рівнів рідини з густиною ρ :

$$P' = \rho g H; \quad P'' = \rho g h. \quad (15)$$

З (14) і (13) дістанемо розрахункову формулу для визначення γ :

$$\gamma = \frac{H}{H - h}. \quad (16)$$

Експериментальна установка

Для визначення відношення теплоємностей повітря $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$,

призначена експериментальна установка ФПТ 1-6, загальний вигляд якої показаний на рис. 13.2.

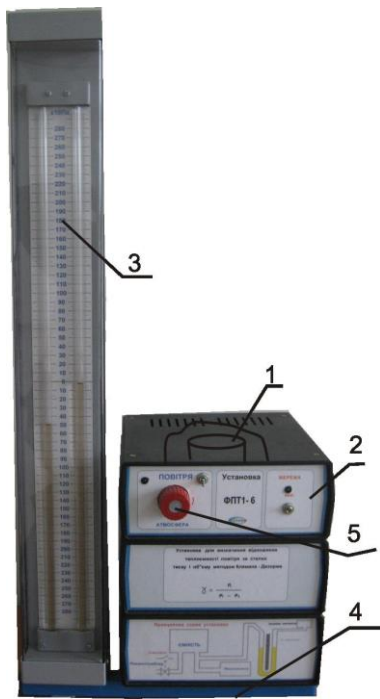


Рис. 13.2. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ 1-6: 1 – колба; 2 – блок приладовий; 3 – блок манометра; 4 – стояк; 5 – пневмотумблер “Атмосфера”

Установка складається із скляної колби 1, з'єднаної з відкритим водяним манометром 3. Повітря нагнітається в колбу мікрокомпресором, розміщеним у блоці приладів 2. Мікрокомпресор вмикається тумблером "Повітря", який знаходиться на передній панелі блоку приладів. Пневмотумблер "Атмосфера" 5, який знаходиться на панелі блоку приладового, дозволяє з'єднати колбу з атмосферою при повертанні його за годинною стрілкою до щиглика.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку тумблером "Мережа".
2. Для подачі повітря в колбу увімкнути тумблер "Повітря".
3. За допомогою манометра контролювати тиск у колбі. Коли різниця рівнів води у манометрі досягне 150...250 мм вод. ст., вимкнути подачу повітря.
4. Зачекати 2...3 хв., доки температура повітря у колбі зрівняється з температурою навколишнього повітря T_0 , у колбі при цьому встановиться сталий тиск $P_1 = P_0 + \rho g H$. Визначити різницю рівнів H , яка встановилася у колінах манометра, і одержане значення занести до таблиці 1.
7. На короткий час з'єднати колбу з атмосферою, повернувши пневмотумблер "Атмосфера" за годинною стрілкою до щиглика.
8. Через 2...3 хв., коли в колбі встановиться сталий тиск $P_3 = P_0 + \rho g h$ визначити різницю рівнів h , яка встановилася у колінах манометра, і одержане значення занести до таблиці 1.
9. Повторити виміри за пп. 2–6 не менш 10 разів за різних значень величини H .
10. Вимкнути установку тумблером "Мережа".

Таблиця 1

№ вим.	H , мм. вод. ст.	h , мм. вод. ст.	γ

--	--	--	--

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного вимірювання визначити за формулою (16) відношення теплоємностей γ . Знайти середнє значення $\langle \gamma \rangle$.

2. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Методом логарифмування та диференціювання формули (16) знаходимо відносну похибку $\frac{\Delta\gamma}{\gamma} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta H + \Delta h}{H - h}$. Для обчислення

похибки потрібно врахувати, що при вимірюванні різниці рівнів рідини у манометрі відлік проводиться у двох колінах манометра, тому $\Delta H = \Delta h = 2\Delta h_0$.

Контрольні запитання

1. Що таке ізопроцеси і яким законам вони підкоряються? Намалюйте графіки цих процесів.

2. Сформулюйте I закон термодинаміки. Запишіть цей закон для ізобаричного, ізохоричного, ізотермічного й адіабатичного процесів.

3. Дайте визначення питомої та молярної теплоємностей. В яких одиницях СІ вони вимірюються?

4. У чому особливості теплоємності газу? Виведіть формулу для молярних теплоємностей C_v і C_p ідеального газу.

5. Дайте визначення числа ступенів свободи молекули. Чому дорівнює величина i для 1-, 2-, 3- і багатоатомного газів?

6. Який процес називається адіабатичним? Наведіть різні варіанти рівняння Пуасона.

7. Розрахуйте теоретичне значення показника адіабати для 1-, 2- і 3-атомного газів.

8. У чому полягає метод Клемана та Дезорма для визначення відношення $\frac{C_p}{C_v}$?

9. Опишіть робочий цикл експериментальної установки $P-V$ за діаграмою.

10. Виведіть розрахункову формулу для визначення γ .

11. Як і чому змінюється температура газу у колбі при проведенні досліду?

Лабораторна робота №14*

Визначення відношення теплоємностей повітря за сталих тиску й об'єму резонансним методом

Мета роботи: вивчити процес поширення звукової хвилі, виміряти швидкість звуку у повітрі за різних температур та визначити відношення теплоємностей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$.

Придали і матеріали: експериментальна установка ФПТ1-7: блок приладів (генератор звукових коливань, цифровий індикатор, міліамперметр), блок робочого елемента, стояк; труба з нагрівником.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §103], [2, §16.5], [5, Р.2 §5-7] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Визначити частоту 1-го резонансу за більшим відхиленням стрілки на шкалі „індикатор резонансу”.
3. Визначити частоту 2...6 резонансів.
4. Повторити виміри ще при двох різних температурах.
5. Побудувати графіки залежності резонансної частоти від номера резонансу.
6. Визначити швидкість звуку та відношення теплоємностей.

Теоретичні відомості

Пружними хвилями зуться механічні збурення, які поширюються у пружному середовищі. Нехай вздовж однорідного циліндричного зразка з площею поперечного перерізу S поширюється пружна поздовжня хвиля. Отже, зразком із швидкістю v поширюється відносна деформація $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ (рис. 14.1). Виділивши деяку частину зразка, знайдемо густину недеформованого середовища:

$$\rho = \frac{m}{Sl}, \quad (1)$$

де l – довжина виділеної частинки зразка.

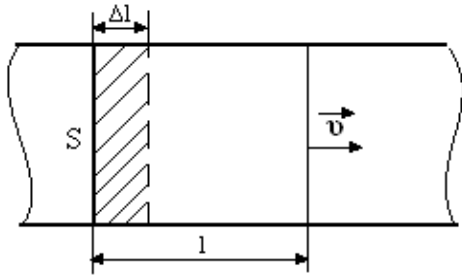


Рис. 14.1. Схема поширення збурення вздовж однорідного зразка.

Стиску відповідає збільшення густини, отже, густина в області стиску

$$\rho + \Delta\rho = \frac{m}{S(l - \Delta l)}. \quad (2)$$

Тут врахували, що площа поперечного перерізу S зразка не змінюється при поширенні повздовжньої хвилі. У формулі (2)

домножимо чисельник і знаменник на величину $(l + \Delta l)$:

$$\rho + \Delta\rho = \frac{m(l + \Delta l)}{S(l^2 - \Delta l^2)}.$$

Враховуючи, що $\Delta l^2 \ll l^2$, дістанемо

$$\rho + \Delta\rho = \frac{m(l + \Delta l)}{Sl^2} = \frac{m}{S \cdot l} + \frac{m \cdot \Delta l}{Sl^2}.$$

Звідси, враховуючи формулу (1), маємо

$$\rho + \Delta\rho = \rho + \rho \cdot \frac{\Delta l}{l},$$

або

$$\Delta\rho = \rho\varepsilon. \quad (3)$$

Поширення збурення – це рух області стиску із швидкістю v вздовж зразка. За проміжок часу dt через поперечний переріз пройде ділянка стиску довжиною $dx = vdt$. Маса цієї ділянки $dm = \Delta\rho \cdot S \cdot dx$, або, враховуючи (7.3) $dm = \rho \cdot \varepsilon \cdot S \cdot v \cdot dt$.

Маса dm рухається зі швидкістю v і має імпульс $vdm = \rho \cdot \varepsilon \cdot S \cdot v^2 \cdot dt$. Ця зміна імпульсу маси dm (оскільки до проходження збурювання ця маса перебувала у спокої) за другим законом Ньютона дорівнює добуткові діючої на неї сили пружності і часу її дії. Записуючи силу пружності за законом Гука

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l}, \quad (4)$$

дістанемо $F \cdot dt = E \cdot \varepsilon \cdot S \cdot dt$, де E – модуль пружності.

Отже:

$$\rho \cdot \varepsilon \cdot S \cdot v^2 \cdot dt = E \cdot \varepsilon \cdot S \cdot dt,$$

звідки

$$v^2 = \frac{E}{\rho}$$

і швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (5)$$

Якщо пружна хвиля поширюється у газі, який міститься у гладенькій прямолінійній трубці зі сталим поперечним перерізом, то, враховуючи, що на відміну від твердих тіл, гази не чинять опору зсуву, в них можуть виникати тільки поздовжні хвилі, і, отже, швидкість поширення пружної хвилі в газі може обчислюватися за формулою (5). Визначимо величину E для газу. Якщо за дії сили F на деякий об'єм газу тиск у ньому одержить приріст ΔP по відношенню до тиску газу P в незбуреному стані, то за аналогією з (4):

$$\Delta P = E \cdot \frac{\Delta V}{V}.$$

Вважаючи зміни тиску dP і об'єму dV нескінченно малими, можна записати

$$E = - \frac{dP}{\frac{dV}{V}}, \quad (6)$$

де знак мінус означає, що збільшення тиску відповідає зменшенню об'єму.

Нехай у газі поширюється звукова хвиля, яка являє собою пружну хвилю малої інтенсивності, здатну викликати відчуття звуку, з частотою від 16 до 20000 Гц. Коливання густини у звуковій хвилі відбувається так швидко, що теплообмін між шарами газу, які мають різні температури, не встигає відбутися. Тому процес поширення звукової хвилі в газі можна вважати адіабатним і до нього можна застосувати рівняння Пуассона $PV^\gamma = const$.

Диференціюючи це рівняння, одержуємо $V^\gamma \cdot dP + \gamma \cdot PV^{\gamma-1} dV = 0$.

Звідси

$$\frac{dP}{\frac{dV}{V}} = -\gamma P. \quad (7)$$

З (6) і (7) знайдемо $E = \gamma \cdot P$. (8)

Визначивши P з рівняння Клапейрона-Менделєєва і враховуючи, що густина газу $\rho = \frac{m}{V}$, дістанемо

$$P = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{\mu}.$$

Підставимо значення P у (8), і тоді

$$E = \gamma \cdot \rho \cdot \frac{R \cdot T}{\mu}. \quad (9)$$

Підставивши співвідношення (9) у формулу (5), матимемо формулу Лапласа для розрахунку швидкості звуку в газі:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{\mu}} \quad (10)$$

з якої випливає

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{v^2 \cdot \mu}{R \cdot T}. \quad (11)$$

Таким чином, для визначення відношення теплоємностей газу γ достатньо виміряти його температуру T та швидкість поширення звуку v у цьому газі.

Швидкість звуку за даної температури може бути визначена резонансним методом. Під час поширення хвилі вздовж закритого каналу, вона багаторазово відбивається від торців, і звукові коливання в каналі є результатом накладання цих відбитих хвиль.

Якщо довжина каналу L дорівнює цілому числу півхвиль $L = \frac{n \cdot \lambda}{2}$ (n –

будь-яке ціле число, λ – довжина хвилі), то хвиля, відбита від торця каналу, повернувшись до його початку і знову відбиваючись, збігається по фазі з прямою хвилею. Такі хвилі підсилюють один одного, амплітуда коливань при цьому різко зростає – настає резонанс. Під час звукових коливань шари газу, прилеглі до торців каналу, не зазнають зміщення. У цих місцях утворюються вузли зміщення, які повторюються через $\lambda/2$ по всій довжині каналу. Між вузлами знаходяться максимуми зміщення (пучності). Швидкість звуку v зв'язана з частотою коливань ν і довжиною хвилі λ співвідношенням $v = \lambda \nu$, з урахуванням якого умову резонансу можна записати у вигляді

$$2 \cdot L \cdot \nu_0 = n \cdot \nu, \quad (12)$$

де ν_0 – резонансна частота.

Залежність (12) резонансної частоти від номера резонансу n може бути перевірено експериментально. Змінюючи частоту коливань за

сталої довжини каналу, необхідно побудувати графік залежності $v_0 = f(n)$, за кутовим коефіцієнтом якого $K_\alpha = \frac{v}{2 \cdot L}$ визначається швидкість звуку.

Експериментальна установка

Для визначення відношення теплоємностей повітря $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ резонансним методом існує експериментальна установка ФПТ1-7, загальний вигляд якої показано на рис. 14.2.

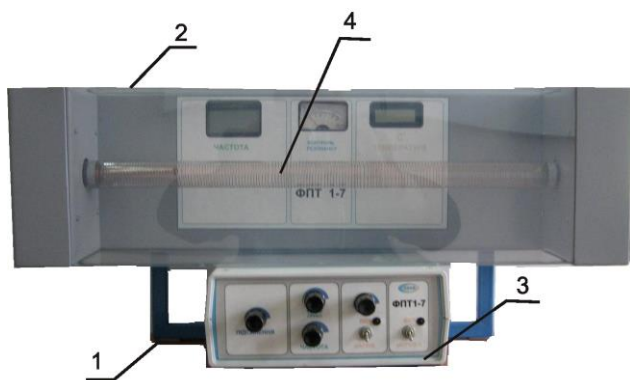


Рис. 14.2. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ 1-7:
1 – блок приладів; 2 – блок робочого елемента; 3 – стояк; 4 – труба з нагрівником.

Робочий елемент установки – це скляна трубка довжиною $L = (51 \pm 0,5) \text{ см}$, на торцях якої розміщені телефон і мікрофон. Температуру повітря у трубці можна змінювати за допомогою нагрівальної спіралі, навитої на трубку. Потужність нагрівника установлюється регулятором „Нагрів”, який знаходиться на передній панелі блоку приладів

1. температура повітря у трубці вимірюється напівпровідниковим термометром і реєструється на цифровому індикаторі „Температура”. У блоці приладів розташований генератор звукових коливань, відімкнений до телефону, який збуджує звукові коливання в трубці. Частота коливань, які задаються звуковим генератором, регулюється ручками „Грубо” і „Точно” і реєструється на цифровому індикаторі „Частота”. Сигнал від мікрофона вимірюється міліамперметром – „індикатором резонансу”, чутливість якого регулюється ручкою „Посилення”. Максимальні значення струму, зареєстровані міліамперметром під час плавної зміни частоти коливань, відповідають появі резонансу на каналі. Довжину труби L вказано на робочому місці.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку тумблером „Мережа”.
2. Ручки „Грубо” і „Точно” встановити у крайнє ліве положення. Ручкою „Посилення” відрегулювати чутливість „індикатора

резонансу” (стрілка повинна бути приблизно на третині шкали).

3. Плавно збільшуючи за допомогою ручок „Грубо” і „Точно” частоту коливань, які задаються звуковим генератором, визначити частоту 1-го резонансу по більшому відхиленню стрілки на шкалі „індикатор резонансу”. Результат вимірювання занести до таблиці.

4. Плавно збільшуючи частоту коливань за допомогою ручок „Грубо” і „Точно” і вибираючи потрібну чутливість системи індикації резонансу рукояткою „Посилення”, визначити частоту 2...6 резонансів. Роблячи виміри при зменшенні частоти, переконатися у повторюваності результатів. Результати вимірювань занести до таблиці 1.

Таблиця 1

№ резонансу	$t_1 = ^\circ C$			$t_2 = ^\circ C$			$t_3 = ^\circ C$		
	ν , Гц	ν , м/с	γ	ν , Гц	ν , м/с	γ	ν , Гц	ν , м/с	γ

5. Увімкнути тумблер „Нагрів” і регулятором температури нагріву досягти температури повітря в трубці $t_2 = 40...45^\circ C$. Після стабілізації температури повторити виміри за пп. 2–4.

6. Збільшуючи нагрів, досягти температури повітря в трубці $t_3 = 55...60^\circ C$. Після стабілізації температури повторити виміри по пп.2-4.

7. Регулятор температури нагріву вивести в крайнє ліве положення, вимкнути тумблер „Нагрів”, ручки „Посилення”, „Грубе” і „Точно” установити в крайнє положення, після чого вимкнути установку тумблером „Мережа”.

Обробка результатів вимірювань

1. Побудувати графіки залежності резонансної частоти від номера резонансу $\nu_0 = f(n)$ для кожної температур та визначити кутові коефіцієнти K_α для кожного графіка.

2. Для кожного значення температури повітря в трубці, використовуючи знайдені кутові коефіцієнти K_α визначити швидкість звуку ν по формулі $\nu = 2 \cdot L \cdot K_\alpha$ та відношення теплоємностей за формулою (11), враховуючи, що молярна маса повітря $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

3. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні запитання

1. Що таке пружна хвиля? Охарактеризуйте процес поширення пружної хвилі в газі.
2. Вивести формулу швидкості поширення пружної хвилі.
3. Сформулюйте 1 закон термодинаміки. Запишіть цей закон для ізобаричного, ізохоричного, ізотермічного та адіабатного процесів.
4. Виведіть формулу Майера.
5. Виведіть рівняння Пуассона.
6. Що таке адіабатичний процес? Чому процес поширення звукової хвилі в газі є адіабатичний?
7. Що таке звукова хвиля? Виведіть формулу швидкості звуку в газі.
8. У чому полягає резонансний метод визначення швидкості звуку в газі?
9. Чому при поширенні звуку в закритому каналі можуть утворюватись вузли та скупченості? За якої умови вони утворюються?
10. Як змінюється швидкість звуку в повітрі зі зміною його температури?

Лабораторна робота № 15

Визначення водяного еквівалента калориметра і термометра

Мета роботи: знайти дослідним шляхом і за допомогою обчислення водяні еквіваленти калориметра і ртутного термометра, порівняти результати, одержані різними способами.

Прилади і матеріали: калориметр з мішалкою, ртутний і спиртовий термометри з ціною поділки $0,1^{\circ}\text{C}$, мензурка об'ємом до 100 мл, технічні терези, вода кімнатної температури, гаряча вода.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [22], [11], [17], [2] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Визначити експериментально водяний еквівалент калориметра.
3. Визначити експериментально водяний еквівалент термометра.

4. Обчислити водяні еквіваленти калориметра і ртутного термометра.
5. Порівняти результати одержані різними способами.

Теоретичні відомості та опис приладу

Теплоємність тіла C – це кількість теплоти, яка потрібна для зміни його температури на 1 K .

Питома теплоємність c речовини – це величина, яка дорівнює відношенню кількості теплоти Q , потрібної для нагрівання однорідного тіла, до його маси m і різниці температур ΔT , тобто

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}.$$

Для проведення теплових процесів використовують спеціальні прилади, які називають калориметрами.

Калориметр – це прилад, який використовується для вимірювання кількості теплоти, що віддається або вбирається тілами у різноманітних процесах теплообміну. Сукупність тіл, між якими відбувається теплообмін, називається калориметричною системою. Найбільш поширеними є рідинні калориметри. Методи калориметрії застосовуються в багатьох галузях науки і техніки, і тому існує чимало різних конструкцій калориметрів. Найпростіший, так званий калориметр з

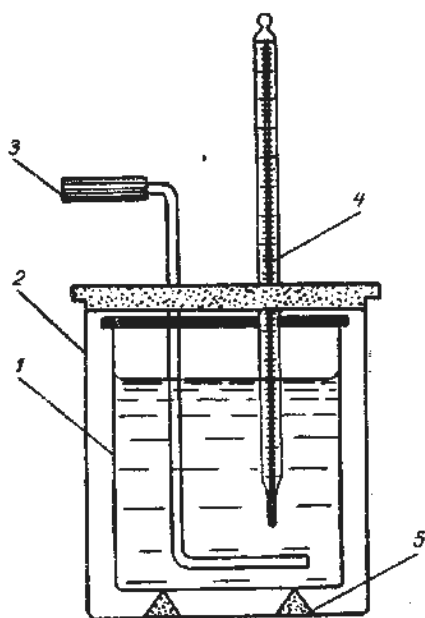


Рис. 15.1. Найпростіший калориметр

мішування (рис. 15.1), складається із посудини циліндричної форми 1 , яка виготовлена з металу високої теплопровідності (мідь, латунь, алюміній; товщина стінок по можливості мінімальна). Для захисту від теплообміну із зовнішнім середовищем вона вставляється на теплоізоляційній підставці 5 у посудину 2 більших розмірів. Як калориметричну рідину використовують дистильовану воду (її переваги – доступність, простота очищення і незмінність складу), а також різні масла. Для вирівнювання температури рідини (води) у всьому об'ємі користуються мішалкою 3 .

Термометром 4 вимірюють температуру рідини на початку і в кінці

процесу теплообміну.

При калориметричних вимірюваннях теплових сталих різних речовин енергія витрачається не лише на забезпечення протікання досліджуваного теплового процесу, а й на нагрівання самого калориметра, мішалки та інших частин калориметричної установки. Ці затрати теплової енергії часто доводиться знаходити і потім враховувати при обчисленні досліджуваних сталих речовин. Нерідко безпосереднє визначення затрат теплової енергії, що йде на нагрівання калориметра, мішалки, термометра і т.д., ускладнюється відсутністю відомостей про природу і масу матеріалів, з яких виготовлені ці частини даної установки. Тому в практиці калориметричних вимірювань вводяться і широко використовуються поняття так званих теплових еквівалентів різних тіл.

Тепловий еквівалент будь-якого однорідного тіла рівний добутку його маси на питому теплоємність, тобто теплоємності даного тіла. Для системи тіл тепловий еквівалент визначається сумою добутків відповідних мас на їх питомі теплоємності, тобто дорівнює сумі теплоємностей цих тіл. Якщо у якості калориметричної рідини використовується вода, то для зручності використовують водяний еквівалент.

Під водяним еквівалентом будь-якого тіла розуміють кількість теплової енергії, що необхідна для нагрівання його на 1°C і чисельно дорівнює масі води, для нагрівання якої також на 1°C потрібна така ж кількість теплової енергії, як і на нагрівання даного тіла.

Отже, маса води, якою можна замінити калориметр з мішалкою:

$$m_{\text{в}} = \frac{Q_k}{c_{\text{в}}} .$$

Якщо величини теплових еквівалентів калориметра, мішалки і термометра незначні порівняно з кількостями теплоти, яка затрачається на протікання досліджуваних процесів, і самі вимірювання теплових сталих цих процесів виконуються з невисоким ступенем точності, то їх не визначають і не беруть до уваги при остаточних підрахунках шуканих величин. В усіх інших випадках еквіваленти калориметра, мішалки, термометра і т.д. слід обчислювати або знаходити дослідним шляхом.

Нехай дана калориметрична установка складається з простого калориметра і мішалки, що мають маси m_1 , m_2 і питомі теплоємності c_1 , c_2 . Тоді водяний еквівалент калориметра з мішалкою

$$\omega_k = m_1 c_1 + m_2 c_2. \quad (1)$$

Отже, водяний еквівалент калориметра ω_k знаходиться дуже просто, якщо відомі матеріали, з яких виготовлені калориметр і мішалка, і легко можна визначити їх маси. В тих же випадках, коли не відомо, з яких матеріалів виготовлені всі частини калориметричної установки або важко знайти маси окремих частин, як це має місце у багатьох типів електрокалориметрів, єдиним способом визначення водяного еквівалента залишається дослід.

При нетривалих і не дуже точних вимірюваннях можна вважати, що калориметрична рідина, сам калориметр і його допоміжні частини за час досліду не встигнуть віддати помітну кількість теплоти зовнішньому середовищу. При точніших калориметричних вимірюваннях треба вводити відповідні поправки.

Завдання 1. Визначення водяного еквівалента калориметра

Порядок виконання роботи

1. Знаходять масу m_k внутрішньої частини калориметра з усіма її допоміжними частинами, якщо вони є в конструкції, шляхом зважування на технічних терезах.

2. Наповнюють внутрішню посудину калориметра приблизно до половини водою кімнатної температури і знову зважують. Нехай тепер її маса з водою m_1 . Тоді різниця $(m_1 - m_k)$ дає масу води m , яка налита в калориметр.

3. Поміщають внутрішню посудину калориметра у зовнішню, опускають у воду термометр і вимірюють її температуру t_1 .

4. Визначають температуру гарячої води t_2 і наливають в калориметр з холодною водою таку її кількість, що приблизно дорівнює половині кількості холодної води. Після цього воду перемішують, поки в калориметрі не встановиться стан термодинамічної рівноваги, і вимірюють кінцеву температуру суміші θ .

5. Знову зважують внутрішню посудину калориметра. Нехай тепер її маса буде m_2 . Різниця $(m_2 - m_1)$ дасть масу долитої в калориметр гарячої води m_3 .

6. На підставі проведених дослідів складають рівняння теплового балансу даного процесу, нехтуючи тією кількістю теплоти, яка втрачена калориметром в навколишнє середовище. Гаряча вода при охолодженні віддала $m_3 c (t_2 - \theta)$ теплоти, де c – питома теплоємність води. Ця теплота пішла на нагрівання холодної води і самого

калориметра, які одержали $(mc + m_k c_k) (\theta - t_1)$ тепла, де c_k – питома теплоємність матеріалу, з якого виготовлений калориметр. Користуючись законом збереження і перетворення енергії, записують рівняння теплового балансу в такому вигляді:

$$m_3 c (t_2 - \theta) = (mc + \omega_k) (\theta - t_1).$$

Звідси визначають шукану величину водяного еквівалента калориметра

$$\omega_k = \frac{cm_3(t_2 - \theta) - cm(\theta - t_1)}{(\theta - t_1)} = \frac{cm_3(t_2 - \theta)}{(\theta - t_1)} - cm. \quad (2)$$

Цією формулою і користуються при знаходженні водяного еквівалента калориметра дослідним шляхом.

Абсолютну похибку знайдемо методом диференціювання

$$\Delta \omega_k = \frac{(\Delta m_3(t_2 - \theta)c + 2\Delta t c m_3)}{(\theta - t_1)} + \frac{2\Delta t c m_3(t_2 - \theta)}{(\theta - t_1)^2} + \Delta m c.$$

Завдання 2. Визначення водяного еквівалента термометра

При визначенні водяних еквівалентів ртутних термометрів дуже зручним є те, що теплові еквіваленти невеликих однакових об'ємів скла і ртуті є майже однаковими. Справді, питома теплоємність скла становить $795,492 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, ртуті – $138,1644 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, а густини відповідно дорівнюють 2500 і $13600 \text{ кг}/\text{м}^3$. Отже, тепловий еквівалент 1 м^3 скла $\omega_c = c_p V = 795,492 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \cdot 2500 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 1 \text{ м}^3 = 1,9887 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{К}$ і такого ж об'єму ртуті $\omega_{рт} = 138,1644 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \cdot 13600 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 1 \text{ м}^3 = 1,879 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{К}$.

Із наведених розрахунків видно, що водяні еквіваленти одиниці об'єму скла і ртуті відрізняється лише на $0,11 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{К}$.

Зрозуміло, що тепловий еквівалент ртутного термометра можна визначити за виміряним об'ємом його зануреної частини, прийнявши, що тепловий еквівалент одиниці об'єму ртутного термометра становить $1,93 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{К}\cdot\text{м}^3)$.

Об'єм зануреної частини термометра V знаходять за допомогою мензурки. Тоді водяний еквівалент термометра

$$\omega_r = V \cdot 1,93 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{К}\cdot\text{м}^3). \quad (3)$$

Таким чином, водяний еквівалент ртутного термометра можна визначити як безпосередньо на досліді, так і способом обчислення, описаним вище. Для спиртових термометрів залишається тільки дослідний шлях, бо теплові еквіваленти скла і спирту, взяті в однакових об'ємах, значно відрізняються між собою.

Порядок виконання роботи

1. Наливають в калориметр невелику кількість води (близько 50 г, в залежності від об'єму зануреної частини термометра). Масу цієї води m визначають так само, як і в першому завданні (пункт перший).

2. Вимірюють термометром температуру води t_1 .

3. Нагрівають досліджуваний термометр у гарячій воді до температури t_2 .

4. Швидко занурюють термометр у калориметр з холодною водою. Термометр віддасть калориметру з водою деяку кількість тепла, і їх спільна температура стане рівною θ .

5. Тепер, як і в попередньому завданні, складають рівняння теплового балансу.

$$\omega_T(t_2 - \theta) = (mc + \omega_k) \cdot (\theta - t_1), \quad (4)$$

де ω_k – водяний еквівалент калориметра, визначений у першому завданні.

З рівняння (4) визначаємо шукану величину водяного еквівалента термометра

$$\omega_T = \frac{(mc + \omega_k)(\theta - t_1)}{t_2 - \theta}. \quad (5)$$

Відносну похибку знаходимо методом диференціювання

$$\frac{\Delta\omega_T}{\omega_T} = \frac{\Delta mc + \Delta\omega_k}{mc + \omega_k} + \frac{2\Delta t}{\theta - t_1} + \frac{2\Delta t}{t_2 - \theta}.$$

В даній роботі водяні еквіваленти калориметра і ртутного термометра знаходять як дослідним шляхом, так і шляхом обчислення, використавши формули (1) і (3). Після цього порівнюють одержані різними способами результати.

Контрольні запитання:

1. Що називають питомою теплоємністю?
2. Сформулюйте рівняння теплового балансу.
3. Що таке тепловий еквівалент калориметра?
4. Що таке водяний еквівалент калориметра, термометра?
5. Чому внутрішню посудину калориметра не виготовляють із заліза?
6. Яке призначення зовнішньої посудини калориметра?
7. Яким чином виміряти температуру 1 см^3 води?

8. Які основні джерела похибок при проведенні калориметричних дослідів?

Лабораторна робота № 16

Визначення кількості теплоти, що втрачається калориметром у навколишнє середовище

Мета роботи: визначити кількість теплоти, що втрачається калориметром у навколишнє середовище.

Прилади і матеріали: калориметр з мішалкою, термометр, тверде тіло, яке погано проводить тепло (гума, каучук), нагрівник, вода, секундомір.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [22], [11], [17], [2] і теоретичні відомості в даному посібнику.

2. Побудувати графік зміни температури води калориметра з часом.

3. Побудувати графіки залежності швидкості охолодження калориметра від температури навколишнього середовища.

Теоретичні відомості та опис приладів

При визначенні теплоємності твердих тіл, зокрема поганих провідників теплоти, методом змішування проходить значний проміжок часу від занурення нагрітого тіла у воду калориметра до моменту, коли температура води і тіла стане однаковою і роблять відлік кінцевої температури води. За цей час внаслідок випаровування води і випромінювання втрата теплоти в навколишнє середовище буде значною і нехтувати нею не можна.

Часто цю втрату враховують на підставі закону Ньютона. Згідно з цим законом втрата теплоти Q при проходженні тіла прямо пропорційна величині поверхні цього тіла S , часові τ і різниці температур тіла Θ і навколишнього середовища t , тобто:

$$Q = \alpha (\Theta - t) S \tau. \quad (1)$$

Тут α – коефіцієнт пропорційності, який називається коефіцієнтом тепловіддачі. Він характеризує собою умови теплообміну між поверхнею твердого тіла і навколишнім середовищем і вимірюється, як це випливає із рівняння (1), в СІ у

вт/м²·град. Отже, коефіцієнт тепловіддачі чисельно дорівнює кількості теплоти, переданої за одиницю часу через одиницю поверхні при різниці температур між поверхнею і рідиною чи газом в один градус.

Наведений вище закон Ньютона є емпіричним і його застосування обмежується випадком, коли $\Theta - t \leq 5^{\circ}$.

Тому температура в калориметрі не повинна відрізнятися від температури навколишнього середовища більш ніж на 5°C .

Втрати теплоти калориметра в навколишнє середовище у випадку, коли $\Theta - t > 5^{\circ}$, можуть бути обчислені графічним методом. Для цього, опустивши нагріте тіло в калориметр, починають перемішувати в ньому воду і записують її температуру через рівні проміжки часу. Спостереження продовжують, аж поки температура води, досягнувши найвищого значення, не понизиться на декілька градусів. Результати спостережень зображують графічно. Приблизний хід кривої поданий на рис.16.1.

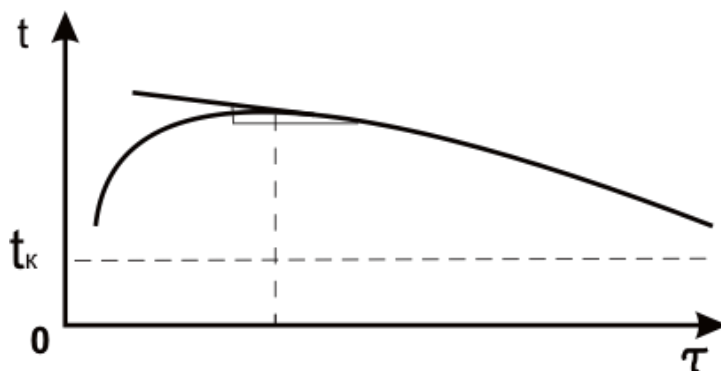


Рис. 16.1. Графік охолодження калориметра

Із графіка видно, що після того, як температура води в калориметрі досягла найвищого значення, починається її охолодження. Спочатку швидкість зниження температури нерівномірною, а через деякий час вона стає постійною. Ця швидкість рівна тангенсу кута нахилу прямолінійної ділянки графіка до осі температур. При температурі, близькій до кімнатної, швидкість охолодження води і тіла в калориметрі зменшується і при кімнатній температурі стає рівною нулю.

Таким чином, у розглянутому процесі маємо дві швидкості охолодження: одну при температурі, починаючи з якої охолодження води і тіла в калориметрі відбувається рівномірно, і другу – при кімнатній температурі, при якій зниження температури води рівне нулю. Використаємо величини цих швидкостей і побудуємо ще один

графік залежності швидкості охолодження від температури. Для цього по осі абсцис відкладають значення температур, а по осі ординат – швидкості охолодження (рис. 16.2). Нехай точка M відповідає температурі води в калориметрі, при якій швидкість охолодження стала постійною, а ордината ML – величина швидкості охолодження води при цій температурі. Точка K відповідає кімнатній температурі, при якій

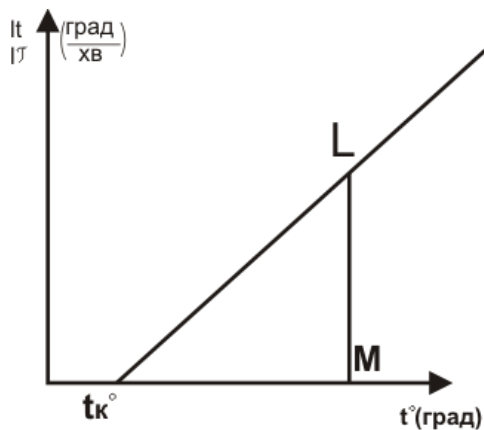


Рис. 16.2. Графік залежності швидкості охолодження калориметра від температури навколишнього середовища

швидкість охолодження дорівнює нулю. Таким чином, пряма KL дає можливість визначити поправку для будь-якої температури в інтервалі від кімнатної температури до температури, що відповідає початку сталої швидкості охолодження.

Легко зрозуміти, що температура води в калориметрі досягає максимального значення трохи раніше, ніж настає повна теплова рівновага в калориметрі.

Справді, в момент настання теплової рівноваги середня температура тіла дещо вища від температури води і тіло віддає воді стільки теплоти, скільки калориметр втрачає її у навколишнє середовище. Отже, рівновага настає дещо пізніше, і саме з цього часу зниження температури води відбувається рівномірно. Тому можна припустити, що швидкість охолодження, яка відповідає ординаті точки L , збігається з моментом часу, коли тіло і вода досягли однакової температури і стали охолоджуватися з однаковою швидкістю.

Користуючись графіком (рис. 16.2), знаходять ту найвищу температуру, яку б мала вода в калориметрі після занурення в неї гарячого тіла, якщо б не було втрат теплоти у навколишнє середовище.

Нехай t_1 означає температуру води в момент занурення тіла в калориметр. Через рівні проміжки часу в n хвилин ця температура буде відповідати $t_2, t_3, t_4 \dots$. Можна припустити, що протягом кожного із цих невеликих проміжків часу (по n хвилин) температура залишається незмінною і рівною по величині середньому значенню

$$\frac{t_1 + t_2}{2}, \frac{t_2 + t_3}{2}, \frac{t_3 + t_4}{2} \dots$$

Якщо, наприклад, на графіку (рис. 16.2) температурі $\frac{t_1 + t_2}{2}$ відповідає швидкість охолодження a град /хв, теплота, втрачена протягом проміжку n хвилин, була б достатньою для підвищення температури калориметра з водою і тілом на n хв $\times a$ град /хв = na град.

Аналогічно, якщо швидкість охолодження при середній температурі $\frac{t_2 + t_3}{2}$ другого проміжку часу дорівнює b град /хв, то теплоти, втраченої за другий проміжок в n хвилин, було б достатньо для підвищення температури тіла і води калориметра nb град. Так само знаходимо кількість теплоти, втраченої в кожному із наступних інтервалів часу, і число градусів, на яке піднялася б температура води калориметра і температура тіла при відсутності втрат теплоти.

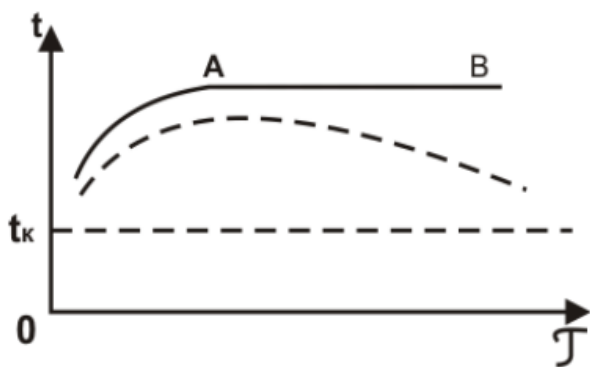


Рис. 16.3. Криві зміни температури води в калориметрі: пунктирна – без

втраченої теплоти, чирка – з втраченою. Припустімо, що тіло і вода набули однакової температури в кінці i -того проміжку часу. Тоді найвища однакова температура при відсутності втрат була б досягнута при умові, якщо всю втрачену теплоту можна було б повернути системі. Визначимо температурну поправку, яку потрібно додати до температури в цей момент часу, і одержимо температуру, яка була б досягнута при відсутності втрат теплоти. Для цього знаходимо суму i доданків виду

$$na + nb + nc + \dots$$

врахування втрат у навколишнє середовище; суцільна – з врахуванням втрат

Так само повинні бути обчислені поправки для температур, зафіксованих після

досягнення системою найвищої температури. Виправлені значення наносять на графік (рис. 16.3). Частина цієї кривої *AB* є прямою лінією, паралельно осі абсцис. Температура, що відповідає цій прямій ділянці графіка, є тією найвищою температурою, які мали б вода калориметра і тіло при відсутності втрат теплоти у навколишнє середовище.

Порядок виконання роботи

1. Нагрівають тіло (поганий провідник теплоти), поміщаючи його на 20–30 хв у киплячу воду.
2. Опускають нагріте тіло у калориметр з водою. Записують зміни температури води в калориметрі через кожні 1–2 хв. Будують графік зміни температури води калориметра з часом.
3. За даними досліду будують графік залежності швидкості охолодження від температури.
4. Знаходять виправлені значення температури води і тіла в калориметрі протягом досліду і наносять їх на графік.

Контрольні запитання

1. Фізичний зміст температури (для газу, рідин і твердого тіла).
2. Яким чином відбуваються втрати тепла?
3. Від чого залежить теплота втрат?
4. Що таке термодинамічна шкала температур?
5. Чи однаковий кут нахилу графіка залежності швидкості охолодження калориметра від температури повітря для різних тіл з різною теплоємністю?
6. Яке призначення складових частин калориметра?
7. Чому температура в калориметрі не повинна відрізнятися від температури навколишнього середовища більш ніж на 5°C ?

Лабораторна робота № 17

Визначення питомої теплоти пароутворення

Мета роботи: визначити питому теплоту пароутворення.

Прилади і матеріали: калориметр, змійовик, технічні терези з важками, барометр, термометр, електроплитка.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §128], [5, Р.7 §4] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Визначити тепловий еквівалент калориметра.
3. Визначити масу сконденсованої пари у мідному циліндрі
4. Обчислити питому теплоту пароутворення.

Теоретичні відомості та опис приладів

Питомі теплоти пароутворення і конденсації при однакових температурах дорівнюють одна одній. У роботі визначають питому теплоту пароутворення при температурі кипіння під атмосферним тиском при конденсації водяної пари, оскільки в цьому разі результати точніші.

Сконденсована водяна пара скупчується в мідному змійовику 4 (рис. 17.1), який знаходиться у калориметрі. У калориметрі розміщені також термометр і мішалка. Водяна пара надходить у змійовик з нагрівника-кип'ятильника 1 через сухопарник 3, призначення якого – затримувати сконденсовану в рідину пару, щоб у циліндр надходила тільки суха пара.

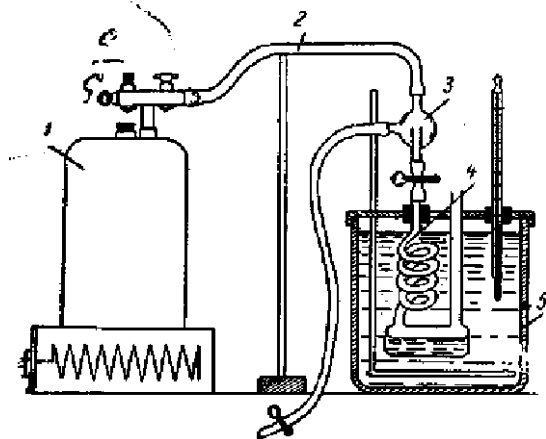


Рис. 17.1. Установа для визначення питомої теплоти пароутворення

Теплота, що виділяється при конденсації водяної пари, йде на нагрівання калориметра. Питому теплоту конденсації водяної пари при температурі кипіння води визначають з рівняння теплового балансу

$$mr + mc(t_1 - \theta) = (c_B m_B + K)(\theta - t_2),$$

де m – маса сконденсованої пари; r – питома теплота конденсації пари; m_B – маса води в калориметрі; c_B – питома

теплоємність води; t_1 – температура кипіння води при даному атмосферному тиску; t_2 і θ – початкова і кінцева температури води в калориметрі; K – тепловий еквівалент калориметра

$$r = \frac{(c_B m_B + K)(\theta - t_2) - mc(t_1 - \theta)}{m}. \quad (1)$$

Користуючись співвідношенням (1) можна методом

диференціювання знайти абсолютну похибку:

$$\Delta r = \frac{(\Delta\theta + \Delta t_2)(cm_g + K) + (\theta - t_2)(c\Delta m_g + m_g\Delta c + \Delta K)}{m} + \frac{(\theta - t_2)(cm_g + k)\Delta m}{m^2} + (t_1 - \theta)\Delta c + c(\Delta t_1 + \Delta\theta)$$

Відносна похибка $\varepsilon = \pm \frac{\Delta r}{r} \cdot 100\%$.

Порядок виконання роботи:

1. На технічних терезах визначити масу води в калориметрі.
2. Визначити тепловий еквівалент калориметра, якщо він невідомий.
3. Виміряти початкову температуру води в калориметра t_2 .
4. Нагріти воду в кип'ятильнику до кипіння і пропускати пару спочатку лише через сухопарник, а потім, коли він нагріється, у мідний циліндр. Пропускаючи пару, воду в калориметрі перемішувати мішалкою. Пропускання пари припинити, коли температура води в калориметрі стане вищою за початкову на 10–15⁰C. Кінцеву максимальну температуру θ записати.
5. Визначити масу сконденсованої пари на аналітичних терезах.
6. Точку кипіння води t_1 взяти з таблиць, виходячи з величини атмосферного тиску.
7. За формулою (1) обчислити r . Вивести формули для обчислення відносної та абсолютної похибок і визначити ці похибки.

Контрольні запитання

1. Який процес називається пароутворенням?
2. Якими шляхами відбувається пароутворення?
3. Що називається питомою теплотою пароутворення?
4. На що витрачається теплота пароутворення?
5. Як залежить питома теплота пароутворення від атмосферного тиску?
6. Запишіть рівняння теплового балансу для даної роботи.
7. Яку роль відіграє в даній роботі сухопарник?
8. Які переходи називаються фазовими переходами першого роду?

Визначення теплоти пароутворення води

Мета роботи: визначити питому та молярну теплоту пароутворення води при фазовому переході першого роду за експериментально одержаною залежністю тиску насичених парів від температури.

Прилади і матеріали: експериментальна установка ФПТ1-10: блок приладів, блок робочого елемента, стояк, термостат, вакуумметр.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §128], [5, Р.7 §4] і теоретичні відомості в даному посібнику.

2. Обчислити тиск водяної пари в ампулі.

3. Побудувати графік залежності тиску пари в ампулі від температури пари.

4. Побудувати графік залежності $\ln P_{II} = f\left(\frac{1}{T}\right)$. Визначити кутовий коефіцієнт графіка.

5. Визначити молярну теплоту пароутворення води.

6. Обчислити питому теплоту пароутворення води.

Теоретичні відомості

Фазою зветься однорідна частина речовини, що має границю з іншими частинами системи, у якій вона перебуває, і яка може бути віддалена від цієї системи. Перехід речовини з одного фазового стану в інший зветься фазовим переходом. Фазовий перехід першого роду завжди супроводжується поглинанням або виділенням прихованої

теплоти Q та зміною питомого об'єму $\nu = \frac{V}{m}$ і молярного об'єму

речовини $V_{\mu} = \frac{V}{\nu}$, де ν – число молів, $\nu = \frac{m}{\mu}$; m – маса; μ – молярна

маса речовини.

Оскільки кількість схованої теплоти залежить від маси речовини, яка здійснює фазовий перехід, для характеристики процесу застосовується питома теплота переходу q , віднесена до одиниці маси

речовини:

$$q = \frac{Q}{m}, \quad (1)$$

і молярна теплота переходу q_μ , віднесена до одного моля речовини:

$$q_\mu = \frac{Q}{\nu}. \quad (2)$$

За сталого тиску фазовий перехід завжди проходить при певній температурі, що зветься температурою переходу, для якої важлива термодинамічна рівновага фаз за даного тиску. Для розгляду фазового переходу „рідина-пара” звернемося до ізотерм, побудованих для кількох значень температури (T_1, T_2) на $P-V$ діаграмі (рис. 18.1). Горизонтальні ділянки ізотерм відповідають областям фазового переходу. У процесі переходу молярний об’єм стрибкоподібно змінюється від величини $V_{\mu 1}$, що відповідає молярному об’єму рідкої фази, до величини $V_{\mu 2}$, що відповідає молярному об’єму газоподібної фази. Інтервал $V_{\mu 1} - V_{\mu 2}$ являє собою область двофазного станів (рідина-пара) речовини. Серед усіх можливих температур є одна, що зветься критичною температурою $T_{\text{КР}}$, при якій горизонтальна ділянка ізотерми, що відповідає фазовому переходу, вироджується в точку перегину. За температур речовини, більших від критичної, зникає різниця між паром і рідиною, а речовину за будь-яких тисків не можна перевести з газоподібного у рідкий стан. Поза областю фазового переходу стан реальної речовини в рідкій і газоподібних фазах досить точно описує рівняння

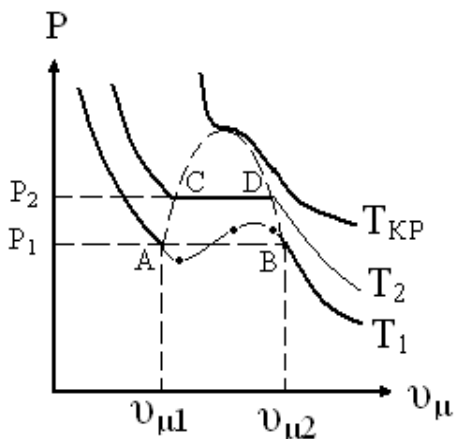


Рис. 18.1. Ізотерми Ван-дер-Ваальса та реальної речовини

на рис. 18.1 штрих-пунктирною лінією.

Для обчислення зміни тиску насиченої пари залежно від температури проведемо для одного моля речовини цикл Карно, до

рівняння Ван-дер-Ваальса, яке для одного моля газу має вигляд

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = RT,$$

де параметри a і b введемо для врахування потенційної взаємодії між молекулами та власного об’єму молекул газу. Ізотерму, побудовану згідно з рівнянням Ван-дер-Ваальса на $P-V$ діаграмі для температури T_1 , зображено

якого входять горизонтальні ділянки ізотерм реальної речовини AB і CD (рис. 18.1). Нехай $P_1 = P$; $P_2 = P + dP$; $T_1 = T$; $T_2 = T + dT$. Виконана за цикл робота δA дорівнює площі цього циклу на P - V діаграмі, а сам цикл, зважаючи на близькість ізотерм, що його утворюють, можна приблизно вважати паралелограмом.

$$\text{Тоді } \delta A = (V_{\mu 2} - V_{\mu 1}) \cdot dP.$$

У ході ізотермічного фазового переходу (ділянка AB) речовина одержує від нагрівника кількість теплоти, що дорівнює молярній теплоті переходу q_{μ} . Тому ККД циклу можна записати у вигляді

$$\eta = \frac{(V_{\mu 2} - V_{\mu 1}) \cdot dP}{q_{\mu}} = \frac{(\nu_2 - \nu_1) \cdot dP}{q}. \quad (3)$$

Оскільки розглядається цикл Карно, ККД цього циклу можна також записати, використовуючи теорему Карно:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} + \frac{dT}{T}. \quad (4)$$

Прирівнюючи вирази (3) та (4), одержимо

$$\frac{dP}{dT} = \frac{q}{T \cdot (\nu_2 - \nu_1)}. \quad (5)$$

Співвідношення (5), яке зветься рівнянням Клапейрона-Клазіуса, можна використати для визначення теплоти пароутворення рідини. Враховуючи, що за температурах, далеких від критичної, $\nu_2 \gg \nu_1$, отримуємо

$$\frac{dP}{dT} = \frac{q}{T \cdot \nu^2}. \quad (6)$$

У ділянках високих тисків до парів можна застосувати закони ідеальних газів, і тоді питомий об'єм ν_2 можна визначити з рівняння Клапейрона-Менделєєва:

$$\nu^2 = \frac{R \cdot T}{\mu \cdot P}. \quad (7)$$

Підставляючи значення ν_2 з формули (10.7) у співвідношення (6), одержимо

$$\frac{dP}{P} = \frac{q_{\mu}}{R} \cdot \frac{dt}{T^2}. \quad (8)$$

Вважаючи величину q сталою для досліджуваного інтервалу зміни температури, проінтегруємо рівняння (8):

$$\ln P = -\frac{q_{\mu}}{R \cdot T} + const. \quad (9)$$

Одержана формула встановлює зв'язок молярної теплоти пароутворення води з тиском і температурою водяної пари. Змінюючи температуру пари T , необхідно побудувати графік залежності $\ln P = f\left(\frac{1}{T}\right)$, за кутовим коефіцієнтом якого $K_{\alpha} = \frac{q_{\mu}}{R}$ можна визначити молярну теплоту пароутворення води.

Експериментальна установка

Для визначення теплоти пароутворення води призначена експериментальна установка ФПТ1-10, загальний вигляд якої зображений на рис. 18.2.

Робочий елемент установки – це скляна ампула з досліджуваною речовиною (у даній роботі досліджується вода), з якої відкачане повітря до тиску мінус 55 ... мінус 69 kPa (мінус 0,6 мінус 0,7 kg/cm^3), розміщена в термостаті 4. Ампула з'єднана з вакуумметром 5, покази якого P відповідають різниці атмосферного тиску в лабораторії P_0 і тиску водяної пари в ампулі P_{II} , отже:

$$P_{II} = P_0 - P. \quad (10)$$

Температура пари вимірюється цифровим термометром, датчик якого знаходиться у термостаті, і реєструється на цифровому індикаторі „Температура” блоку робочого елемента 2. для збільшення температури ампули з досліджуваною рідиною у термостаті, заповненому водою, розміщений нагрівний елемент, зроблений з ніхромової спіралі, вміщеної у трубку з кварцового скла.

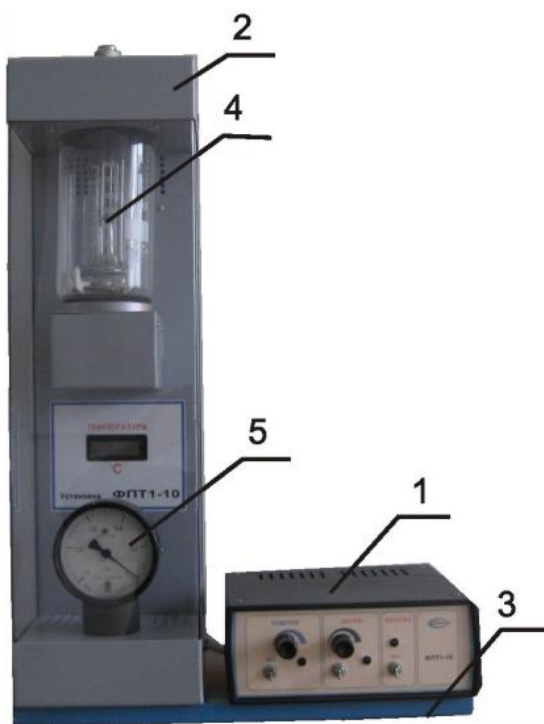


Рис. 18.2. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-10: 1 – блок приладів; 2 – блок робочого елемента; 3 – стояк; 4 – термостат; 5 – вакуумметр приладів.

Для досягнення достатньої точності експерименту нагрівання води у термостаті повинне відбуватися досить повільно, щоб температуру води в ампулі можна було вважати рівній температурі води у термостаті. Потрібна потужність нагрівника встановлюється регулятором „Нагрів”, який знаходиться на передній панелі блоку приладів 1.

У блоці приладів знаходиться компресор, за допомогою якого у термостат можна подати стиснене повітря. ввімкнений компресор сприяє рівномірному нагріванню води в термостаті. Інтенсивність подачі стисненого повітря встановлюється регулятором „Повітря”, який знаходиться на передній панелі блоку

Порядок виконання роботи

1. Переконайтесь у тому, що рівень води у термостаті не менше, ніж на 2 см перевищує верхній край ампули, після чого ввімкнути установку тумблером „Мережа”.

2. Увімкнути тумблер подачі повітря і регулятором „Повітря” встановити таку інтенсивність подачі стисненого повітря у термостат, за якої забезпечується переміщення води без її сильного бурління.

3. Увімкнути тумблер „Нагрів”, регулятором потужності „Нагрів” встановити в крайнє праве положення.

4. Після нагрівання води до температури 65⁰С знизити потужність нагрівника, обертаючи регулятор потужності „Нагрів” вліво.

5. У діапазоні температур термостата (68...98)⁰С зняти покази вакуумметра через кожні 2⁰С. перенести покази N вакуумметра в одиниці тиску $P = aN$, де a – ціна поділки шкали вакуумметра; $a = 400 \text{ Па/под}$. Регулятор потужності „Нагрів” встановити в крайнє ліве положення, вимкнути тумблер „Нагрів”. Результати вимірів занести

до таблиці 1.

Таблиця 1

№ вим.	$t,$ $^{\circ}\text{C}$	$T,$ K	$1/T,$ K^{-1}	$P,$ Па	$P_{\text{п}},$ Па	$\ln P_{\text{п}}$	$q_{\mu},$ Дж/моль	$q,$ Дж/К^2

6. Відімкнути подачу стисненого повітря тумблером „Повітря”.

7. Вимкнути установку тумблером „Мережа”.

Обробка результатів вимірювань

1. За формулою (10) обчислити тиск водяної пари в ампулі.

2. Побудувати графік залежності тиску пари в ампулі від температури пари $P_{\text{п}} = f(T)$, яка відповідає фазовому переходові між рідиною і парою.

3. Обчислити значення $\left(\frac{1}{T}\right)$ та $\ln P_{\text{п}}$ і побудувати графік залежності $\ln P_{\text{п}} = f\left(\frac{1}{T}\right)$. Визначити кутовий коефіцієнт K_{α} графіка.

4. Використовуючи знайдений кутовий коефіцієнт K_{α} , визначити молярну теплоту пароутворення води q_{μ} за формулою $q_{\mu} = K_{\alpha} \cdot R$.

5. Обчислити питому теплоту пароутворення води q , враховуючи, що молярна маса води $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

6. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні питання

1. Що таке фазовий перехід? Назвіть види фазових переходів.

2. Яка величина зветься прихованою теплотою переходу?

3. Запишіть і поясніть рівняння Ван-дер-Ваальса.

4. Зобразіть на P – V діаграмі ізотерми Ван-дер-Ваальса і реальної речовини для кількох значень температури. Що таке критична температура?

5. Розкажіть про цикл Карно. Запишіть формулу ККД циклу Карно.

6. Виведіть рівняння Клапейрона-Клазіуса. Поясніть фізичний зміст цього рівняння.

7. Виведіть основну розрахункову формулу, яка використовується в даній роботі.

8. У чому полягає метод визначення теплоти пароутворення води з

використанням експериментальної залежності $P_{II}(T)$?

9. Для чого ампулу з досліджуваною речовиною розміщують у термостат?

10. Які основні джерела похибок даного методу вимірювання?

Лабораторна робота № 19

Визначення питомої теплоємності рідин електричним калориметром

Мета роботи: визначити питому теплоємність рідини (технічного масла) електричним калориметром.

Прилади і матеріали: калориметр з дротяним нагрівником і мішалкою, термометр, досліджувана рідина (технічне масло), амперметр, вольтметр, реостат, набір провідників, ключ, випрямляч, холодна вода, технічні терези, секундомір.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [22], [11], [17], [2] і теоретичні відомості в даному посібнику.

2. Визначити питому теплоємність технічного масла.

Теоретичні відомості.

Нехай в калориметр з досліджуваною рідиною поміщена електрична спіраль (нагрівник) і по ній протягом часу τ пропускають електричний струм силою I . Тоді, згідно із законом Джоуля-Ленца, кількість теплоти, яка виділяється у калориметрі,

$$Q = IU\tau, \quad (1)$$

де U – спад напруги на затискачах нагрівника.

Теплота Q йде на нагрівання калориметра з рідиною. Нехтуючи втратами тепла через випромінювання і теплопровідність, на підставі закону збереження і перетворення енергії записуємо

$$IU\tau = (ct + c_1m_1 + \omega) \cdot (t_2 - t_1),$$

де m – маса рідини в калориметрі; c – її питома теплоємність; m_1 – маса посудини калориметра і мішалки (мішалка виготовляється з того матеріалу, що і калориметр); c_1 – питома теплоємність калориметра і мішалки; ω – тепловий еквівалент термометра в Дж/К; t_1 – температура рідини і калориметра до пропускання струму; t_2 –

температура рідини і калориметра після пропускання струму.

З попередньої рівності знаходимо

$$c = \frac{IU\tau - [(\omega + c_1 m_1)(t_2 - t_1)]}{m(t_2 - t_1)}. \quad (2)$$

Співвідношення (2) і є робочою формулою.

Опис установки

Основною частиною установки (рис. 19.1) є калориметр. У його верхній кришці є дві ізолювані ввідні клеми, до яких кріпиться металева спіраль, що служить електронагрівником. Крім того, в верхній кришці зроблені два отвори для введення термометра і мішалки.

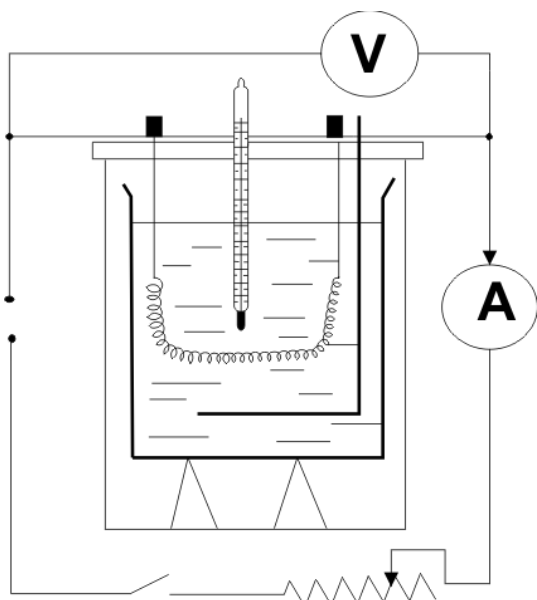


Рис. 19.1. Схема установки для визначення питомої теплоємності рідин електричним калориметром

До нагрівника паралельно підключений вольтметр V , який показує спад напруги. Амперметр A , ввімкнутий послідовно з нагрівником і реостатом, дає можливість визначити силу струму I , що протікає через нагрівник. За допомогою реостата можна змінювати величину струму, а також підтримувати його сталим протягом досліду.

Досліджувану рідину (гліцерин, оливу або якусь іншу) слід заливати в такій кількості, щоб вона повністю покривала спіраль нагрівника.

Порядок виконання роботи

1. Промивають гарячою водою внутрішню посудину калориметра, просушують її за допомогою фена і визначають масу m_1 (разом з мішалкою) на технічних терезах з точністю до 0,1 г.

2. Наповнюють внутрішню посудину калориметра досліджуваною рідиною і зважують її знову разом з мішалкою на терезах з точністю до 0,1 г. Різниця між попереднім зважуванням і цим дає масу досліджуваної рідини m .

3. Збирають електричне коло, схема якого зображена на рис. 19.1.

4. Замикають ключ і, користуючись реостатом, підбирають в колі робочий струм. Величина його залежить від опору нагрівника, але завжди вибирається не більшою 2–3 А. Розмикають ключ.

5. Поміщають внутрішню посудину разом з рідиною і мішалкою в лід (сніг, холодну воду або холодильник), щоб температура системи понизилась на $5\text{--}6^\circ\text{C}$ порівняно з кімнатною.

6. Добре перемішують рідину мішалкою і вимірюють термометром початкову температуру t_1 з точністю до $0,1^\circ$.

7. Замикають ключ і вмикають секундомір. Записують покази амперметра A і вольтметра V , підтримуючи їх незмінними (за допомогою реостата) протягом усього досліду.

8. Коли температура досліджуваної рідини підвищиться на стільки градусів вище кімнатної, на скільки вона була нижча від неї до вмикання струму, розмикають електричне коло і зупиняють секундомір.

9. Після вимикання струму добре перемішують досліджувану рідину і вимірюють кінцеву температуру t_2 з точністю до $0,1^\circ$. За секундоміром визначають час τ .

10. Знаходять водяний еквівалент термометра, як це описано в лабораторній роботі або користуються вимірним значенням, якщо в обох роботах використовують однакові термометри.

11. За таблицями знаходять значення питомої теплоємності калориметра c_1 .

12. Підставляючи у формулу (2) всі одержані дані, обчислюють значення питомої теплоємності досліджуваної рідини.

Контрольні запитання

1. Що називається питомою теплоємністю?
2. Як залежить питома теплоємність рідин від температури?
3. Що таке рівняння теплового балансу?
4. Яка будова електрокалориметра?
5. Сформулюйте другий закон термодинаміки.
6. Якими шляхами може відбуватися теплообмін?
7. Навіщо понижувати температуру системи на $5\text{--}6^\circ\text{C}$?

Лабораторна робота 20

Визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса

Мета роботи: визначити коефіцієнт в'язкості рідини методом

Стокса.

Прилади і матеріали: скляний циліндрі висотою 40–60 см і діаметром 6–10 см, досліджувані рідини, металеві кульки, штангенциркуль, масштабна лінійка, термометр, секундомір, пінцет.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [3, §19.2], [5, Р.7 §1] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Визначити густину досліджуваної рідини ареометром.
3. Обчислити коефіцієнт в'язкості рідини.

Теоретичні відомості

Визначення коефіцієнта в'язкості рідин методом Стокса ґрунтується на вивченні руху кульки у в'язкій рідині. У досліджувану рідину кидають маленьку тверду кульку радіусом r . Шар рідини, що покриває поверхню кульки і рухається із швидкістю кульки, зазнає опору зі сторони прилеглих до нього інших шарів. Цей опір зумовлений внутрішнім тертям рідини.

Кулька, що падає у в'язкій рідині, перебуває під дією трьох сил: сили тяжіння, виштовхувальної сили F_A , що визначається за законом Архімеда, і сили в'язкості F , яка за законом Стокса прямо пропорційна радіусу кульки r і швидкості її руху v :

$$F = 6\pi\eta r v. \quad (1)$$

При падінні у нескінченній у всіх напрямках в'язкій рідині кулька, рухаючись прискорено, набуває такої швидкості, при якій сили, що діють на неї, взаємно зрівноважуються. При цьому має місце рівність:

$$mg = F_A + F$$
$$\frac{4}{3}\pi^3 \rho g = \frac{4}{3}\pi^3 \rho_0 g + 6\pi\eta r v, \quad (2)$$

де ρ – густина кульки; ρ_0 – густина досліджуваної рідини при даній температурі.

При рівновазі всіх сил, що діють на кульку, її дальший рух стає рівномірним.

Розв'язавши останнє рівняння відносно η , одержимо:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho_0}{v} r^2 g. \quad (3)$$

Швидкість руху кульки $v = \frac{h}{t}$, тоді

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_0)tr^2g}{9h} = \frac{(\rho - \rho_0)tg d^2}{19h}. \quad (4)$$

Відносну похибку знаходимо методом диференціювання

$$\varepsilon = \frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta\rho + \Delta\rho_0}{\rho - \rho_0} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{2\Delta d}{d} + \frac{\Delta h}{h}. \quad (5)$$

де d – діаметр кульки.

Але рівняння (2) справедливе тільки тоді, коли кулька падає у нескінченному середовищі. При вимірюванні коефіцієнта в'язкості методом Стокса в цю формулу вносять поправки, якими враховується вплив стінок циліндра і його дна. Тоді рівняння (2) набирає такого вигляду:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{(\rho - \rho_0)r^2g}{v \left(1 + 2,4 \frac{r}{R}\right) \left(1 + 1,33 \frac{r}{h}\right)}, \quad (6)$$

де R – радіус циліндра; h – висота рідини в ньому.

Примітка. Зрозуміло, коли $r \ll h$, а також $r \ll R$, можна скористатися формулою (4).

Експериментальна установка

Прилад для визначення коефіцієнта в'язкості рідини (рис. 20.1) являє собою високий скляний циліндр 2, наповнений досліджуваною рідиною. Для захисту від зміни температури його поміщають у посудину 5 з водою кімнатної температури.

Прилад встановлюють вертикально за допомогою виска 1 і гвинтів 6. Зверху в центрі циліндра з досліджуваною рідиною поміщають лійку 4, через яку кидають кульки. На дні циліндра звичайно знаходиться металева сітка з держакон 3, якою виймають кульки.

Кинута в рідину кулька спочатку рухається прискорено, а далі рівномірно. Рискю a ставлять на тому місці циліндра, де рух кульки вже напевно є рівномірним (десь на глибині 5–6 см). У нижній частині циліндра нанесена горизонтальна риска.

Хід роботи

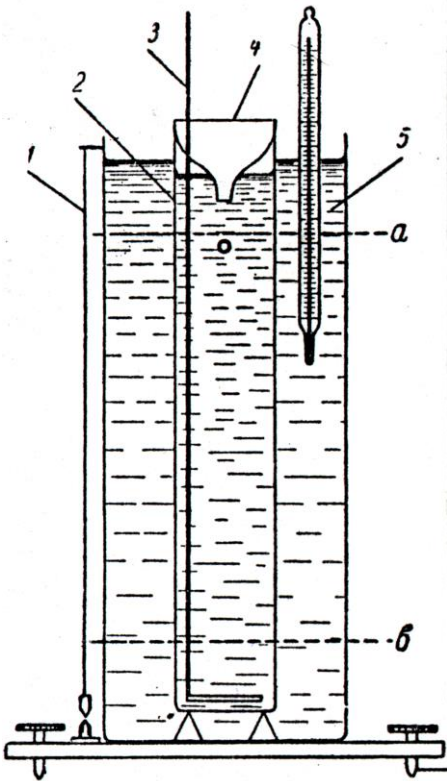


Рис. 20.1. Віскозиметр Стокса

руху кульки від риски *a* до риски *b* і знаючи вже віддаль між цими рисками, обчислюють швидкість падіння кульки.

6. Значення густини кульок беруть із таблиці або визначають дослідним шляхом.

7. Підставляючи одержані дані у формулу (4) або (6), обчислюють коефіцієнт в'язкості рідини.

8. За формулою (5) знаходять відносну похибку, а за співвідношенням $\Delta\eta = \varepsilon\eta$ знаходять абсолютну похибку результату.

Контрольні запитання

1. Які явища належать до явищ переносу? Вказати характерні особливості кожного з цих явищ.

2. В чому полягає явище внутрішнього тертя? Записати і пояснити вираз для сили внутрішнього тертя.

3. Як залежить коефіцієнт внутрішнього тертя від температури?

4. Пояснити механізм виникнення сили в'язкого тертя, що діє на кульку, яка рухається у в'язкому середовищі?

5. Як змінюється швидкість кульки при падінні у рідині? Чим це зумовлено?

6. Який фізичний зміст коефіцієнта в'язкості?

Лабораторна робота 21

Визначення коефіцієнта лінійного розширення твердих тіл та об'ємного розширення рідин

Мета роботи: визначити коефіцієнт лінійного розширення твердих тіл та об'ємного розширення рідини.

Прилади і матеріали: прилад Менделєєва для дослідження коефіцієнта лінійного розширення твердих тіл, нагрівник-кип'ятильник, термометри, прилад Дюлонга і Пті.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [2, §18.5], [5, Р.9 §5] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Ознайомитись з приладом Менделєєва, вивчити метод вимірювання коефіцієнта лінійного розширення стержня.
3. Визначити коефіцієнт лінійного розширення стержня.
4. Ознайомитись з приладом Дюлонга і Пті, вивчити метод сполучених посудин для вимірювання коефіцієнта об'ємного розширення рідини.
5. Визначити коефіцієнт об'ємного розширення рідини.

Теоретичні відомості та опис приладів

Температурний коефіцієнт α лінійного розширення є величина, що дорівнює відношенню відносного видовження $\frac{d\ell}{\ell_0}$ тіла до зміни температури dT , яка зумовила це видовження, тобто

$$\alpha = \frac{d\ell}{\ell_0 dT}.$$

Дослідним шляхом значення α вимірюється не в точці, а в деякому температурному інтервалі ΔT . При цьому

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T}, \quad (1)$$

де $\langle \alpha \rangle$ – середнє значення α в інтервалі $\Delta T = T_2 - T_1$; l_0 – довжина тіла при 0°C . Значення $\langle \alpha \rangle$ – і α збігаються, якщо коефіцієнт α є сталою величиною або лінійно залежить від температури. Розмірність коефіцієнтів лінійного розширення $\dim \alpha = \theta^{-1}$.

Користуватись формулою (1) для визначення α на практиці не-

зручно, бо експеримент ускладнюється підтриманням температури тіла при 0°C . Тому, вимірявши довжини тіла l_1, l_2 при температурах відповідно t_1 і t_2 з (1), дістанемо:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\Delta l}{l_1 t_2 - l_2 t_1}, \quad (2)$$

де $\Delta l = l_2 - l_1$.

Так як експериментально визначається початкова довжина l_1 і видовження Δl , то формула (2) набуде вигляду: $\langle \alpha \rangle = \frac{\Delta l}{l_1 \Delta t - \Delta l t_1}$.

Відносну похибку знайдемо методом диференціювання.

$$\frac{\Delta \langle \alpha \rangle}{\langle \alpha \rangle} = \frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta l} + \frac{t_1}{l_1 \cdot \Delta t - \Delta l \cdot t_1} \Delta(\Delta l) + \frac{\Delta t}{l_1 \cdot \Delta t - \Delta l \cdot t_1} \Delta l_1 + \frac{l_1}{l_1 \cdot \Delta t - \Delta l \cdot t_1} \Delta(\Delta t) + \frac{\Delta l}{l_1 \cdot \Delta t - \Delta l \cdot t_1} \Delta t_1.$$

Прилад Менделєєва (рис. 21.1) складається з металевої трубки 4 завдовжки приблизно 100 см і діаметром 2–3 см, обмотаної для теплоізоляції сукном або іншим матеріалом. Один кінець трубки прикріплюють гвинтом 6 нерухомо до стояка 7 (при нагріванні трубки цей кінець не має можливості розширюватись). До другого кінця трубки прикріплено металевий індекс 2 у вигляді відполірованої пластинки (при нагріванні трубки внаслідок її розширення цей індекс вільно переміщується вліво). Справа від індексу на стояку 9 закріплено муфту 10 з індексом 3. Трубка 4 має отвори 1 і 5 для пропускання водяної пари з нагрівника і стікання її в конденсаційну посудину з водою, а також для пропускання води і ще два отвори для термометрів. Прилад змонтовано на дерев'яній підставці 8.

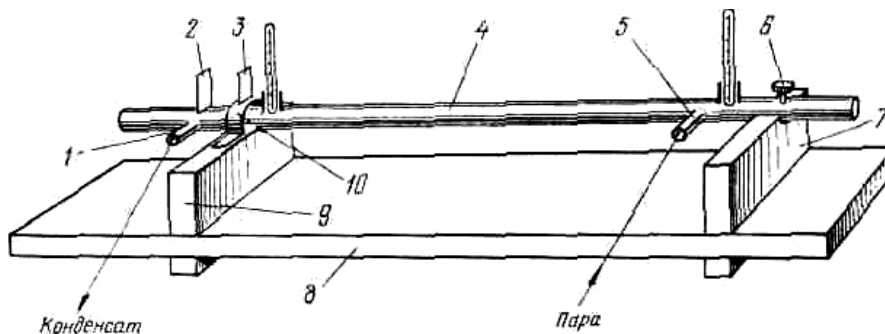


Рис. 21.1. Прилад Менделєєва

Дослід доцільно проводити з двома трубками з різного матеріалу,

пропускаючи через них одночасно водяну пару.

Порядок виконання роботи

1. Закріпити гвинтом правий кінець трубки, виміряти початкову довжину трубки l_1 (відстань між гвинтом та індексом 3).

2. Пропускати (15–20 хв) водяну пару з нагрівника – кип'ятильника, поки перестануть змінюватись покази термометрів. Середнє арифметичне показів термометрів взяти за кінцеву температуру t_2 .

За початкову температуру t_1 взяти покази термометрів до початку досліду.

3. Виміряти індикатором годинникового типу видовження стержня Δl .

4. Після закінчення досліду через трубку пропустити воду для її охолодження і повторити дослід тричі.

Можна також пропускати воду через трубку перед початком досліду.

5. За формулою (2) визначити коефіцієнт $\langle \alpha \rangle$. Вивести формулу для обчислення відносної та абсолютної похибок і визначити їх.

Контрольні запитання

1. Яке молекулярно-кінетичне тлумачення теплового розширення твердих тіл?

2. Який фізичний зміст коефіцієнта лінійного розширення?

3. Яка розмірність коефіцієнта лінійного розширення?

4. Як залежить коефіцієнт лінійного розширення твердих тіл від температури?

5. Який зв'язок між коефіцієнтами лінійного та об'ємного розширення ізотропних твердих тіл?

6. Наведіть приклади використання теплового розширення твердих тіл та необхідності його врахування.

Визначення температурного коефіцієнта об'ємного розширення рідин

Теоретичні відомості та опис приладів

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення β – фізична величина, що дорівнює відношенню відносного збільшення об'єму dV/V_0 тіла до зміни dT температури, яка зумовила це збільшення

об'єму: $\beta = \frac{dV}{V_0 dT}$, де V_0 – об'єм при 0°C .

Якщо коефіцієнт β сталий в інтервалі ΔT , то $\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta T}$.

Розмірність коефіцієнта β : $\dim \beta = \theta^{-1}$.

Прилади для вимірювання коефіцієнтів об'ємного розширення тіл називаються *дилатометрами*. Дилатометр для рідин складається із посудини з плавненого кварцу з каліброваним капіляром. Зміна об'єму при нагріванні рідини в термостаті реєструється за переміщенням рідини в капілярі.

Дюлонг і Пті запропонували метод вимірювання коефіцієнта β за методом *сполучених посудин*. Цей метод ґрунтується на використанні рівноваги двох стовпчиків рідини, коли рідина в них має різну температуру. При цьому розширення посудини не впливає на результат.

Прилад Дюлонга і Пті (рис. 21.2) складається з U-подібної трубки 1–6–4, наповненої досліджуваною рідиною. Одне коліно 1 трубки підтримується при температурі t_1 за рахунок циркуляції води в скляній муфті, що охоплює коліно. Температура води контролюється термометром 2. Друге коліно 4 підтримується при температурі t_2 водяною парою, яку пропускають через скляну охоронну муфту, що охоплює це коліно 5 – теплозахисний екран. Температуру t_2 визначають з таблиць залежності температури кипіння води від тиску (атмосферний тиск вимірюють барометром). Температуру кипіння води обчислюють за емпіричною формулою

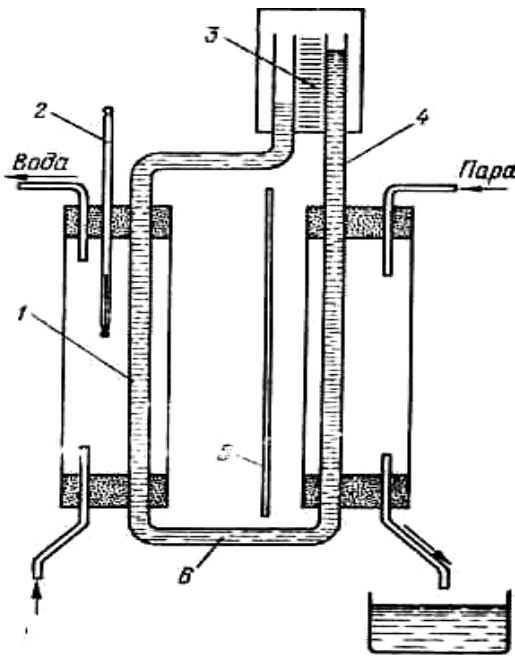


Рис. 21.2. Прилад Дюлонга і Пті

$$t_2 = 100 + 0,0375 (p_{атм} - 760),$$

де $p_{атм}$ – атмосферний тиск (у мм. рт. ст).

Верхні частини трубок 1 і 4 зближені, щоб можна було визначити висоту рівнів рідини в трубках h_1 і h_2 по одній шкалі 3.

Нехай густини рідини у лівій і правій трубках сполученої посудини відповідно дорівнюють ρ_1 та ρ_2 ; ρ_0 – густина рідини при 0°C . Тоді маємо:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}; \quad (1)$$

$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{1 + \beta t_1} \text{ і } \rho_2 = \frac{\rho_0}{1 + \beta t_2} \quad (2)$$

Підставляючи (2) в (1), дістанемо:

$$\frac{h_1}{1 + \beta t_1} = \frac{h_2}{1 + \beta t_2}. \quad (3)$$

З (3) маємо:

$$\beta = \frac{h_2 - h_1}{h_1 t_2 - h_2 t_1}. \quad (4)$$

Відносну похибку знайдемо методом диференціювання, враховуючи, що $\Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h$.

$$\frac{\Delta \beta}{\beta} = \frac{2\Delta h}{h_2 - h_1} + \frac{t_2}{h_1 t_2 - h_2 t_1} \Delta h + \frac{h_1}{h_1 t_2 - h_2 t_1} \Delta t_2 + \frac{h_2}{h_1 t_2 - h_2 t_1} \Delta t_1 + \frac{t_1}{h_1 t_2 - h_2 t_1} \Delta h \quad (5)$$

Порядок виконання роботи

1. Наповнити прилад досліджуваною рідиною.
2. Пропускати через скляні охоронні муфти воду і пару, поки рівні рідини в трубках перестануть змінюватися. При цьому слід досягати по можливості більших значень $(h_2 - h_1)$.
3. Зробити відлік h_1, h_2 і, а також визначити t_1 і t_2 .
4. За формулою (4) визначити коефіцієнт β .
5. За формулою (5) обчислити відносну похибку.
6. Знайти абсолютну похибку і кінцевий результат подати у вигляді: $\beta = \bar{\beta} \pm \Delta \beta$.

Контрольні запитання

1. Яке молекулярно-кінетичне тлумачення теплового розширення рідин ?
2. Який фізичний зміст коефіцієнта об'ємного розширення рідин?
3. Яка розмірність коефіцієнта об'ємного розширення?
4. Як залежить коефіцієнт об'ємного розширення рідин від температури?
5. Яка особливість залежності коефіцієнта об'ємного розширення води від температури?
6. Наведіть приклади використання теплового розширення рідин та необхідності його врахування.

Лабораторна робота 22

Визначення поверхневого натягу рідини методом Ребіндера

Мета роботи: вивчити характеристики рідкого стану речовини; метод Ребіндера; визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідини.

Прилади і матеріали: установка для вимірювання поверхневого натягу методом Ребіндера, досліджувані рідини (спирти, мильний розчин, вода).

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §121], [2, §19.3], [5, Р.7 §3] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Освоїти метод Ребіндера.
3. Визначити поверхневий натяг рідин при кімнатній температурі.
4. Вивчити залежність поверхневого натягу від температури.

Теоретичні відомості та опис приладу

Характеристика рідкого стану речовини

Рідина відіграє важливу роль у природі і техніці. Тому рідкий стан речовини здавна привертає до себе увагу дослідників. Але будова і властивості рідини вивчені значно менше, ніж властивості

газів і твердого тіла. Пояснюється це насамперед тим, що рідина має ознаки як кристалічного, так і газового стану, тому характер руху молекул у ній і взаємодія між ними значно складніші.

З практики відомо, що рідини мало стисливі. Це дозволяє зробити припущення, що в процесі стиску частинки рідини взаємно відштовхуються. Навпаки, при розтягу тіл між частинками переважають сили взаємного притягання. Таким чином, між молекулами рідини можливі два види взаємодії взаємне притягання і відштовхування. Звідси слідує, що найстійкіше розміщення взаємодіючих молекул буде тоді, коли сили притягання зрівноважуються силами відштовхування.

Як правило, міжмолекулярна взаємодія описується потенціальною енергією взаємодії, бо саме середня потенціальна енергія взаємодії визначає стан і багато властивостей речовини.

Встановимо орієнтовний характер залежності потенціальної енергії взаємодії молекул від відстані між ними. Вважають, що потенціальна енергія при відштовхуванні молекул додатна, при притягуванні – від’ємна. Нехай одна з молекул міститься в початку координат, а друга – на деякій відстані r від неї. На графіку (рис. 22.1) показано залежність потенціальної енергії взаємодії цих молекул від відстані між ними.

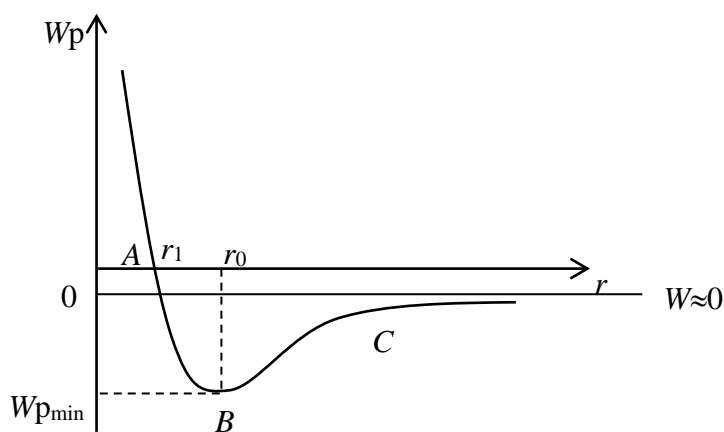


Рис. 22.2. Залежність потенціальної енергії взаємодії молекул від відстані між ними

При зближенні молекул потенціальна енергія (W_p) їх зменшуватиметься і досягне мінімального значення при $r = r_0$. Для такої відстані між молекулами сила взаємодії між ними дорівнює 0 (сила притягання зрівноважена силою відштовхування). Дальше зближення молекул можливе лише за рахунок зовнішньої роботи, яка виконується проти сил відштовхування. При цьому W_p різко зростає.

Отже, W_p взаємодії молекул має мінімум W_p тіл при $r = r_0$. І

цьому мінімуму потенціальної енергії відповідає положення стійкої рівноваги. Ділянку ABC на графіку ще часто у фізиці називають потенціальною ямою.

Крім того, молекули перебувають у русі і, отже, мають певну кінетичну енергію W_k .

Співвідношення між мінімальною потенціальною енергією $W_{p_{\min}}$ і середньою кінетичною енергією W_k хаотичного теплового руху визначає можливість існування того чи іншого агрегатного стану речовини: газоподібного, твердого і рідкого.

Якщо $|W_k| \gg |W_{p_{\min}}|$, то речовина перебуває в газоподібному стані; якщо $|W_k| \ll |W_{p_{\min}}|$, то речовина перебуває у твердому стані; якщо $|W_k| \approx |W_{p_{\min}}|$, то речовина перебуває у рідкому стані.

Розглянемо це більш детально на прикладі рідкого стану речовини. Оскільки систему, яка складається з двох молекул, можна вважати ізольованою, то повна енергія $W = W_k + W_p$ молекули, яка знаходиться не в початку координат, а на осі OR , є величиною сталою. Тому на графіку ця енергія зобразиться у вигляді прямої, паралельної осі OR . У рідинах середня кінетична енергія поступального руху W_k лише незначно менша від $W_{p_{\min}}$. Тому повна енергія $W = W_k + W_p$, хоч і менша від нуля, але мало від нього відрізняється. Підтвердженням того факту, що повна енергія рідини загалом від'ємна, є збереження рідиною свого об'єму.

У цьому разі частинка (молекула), що знаходиться на осі OR , може наблизитись на відстань r_1 до молекули, що знаходиться в початку координат. В точці з координатою r_1 кінетична енергія $W_k = 0$, бо повна енергія дещо менша від нуля. Власне за таких умов ця молекула може відійти від молекули, що знаходиться в початку координат і перемітитися в інше місце. Інакше кажучи, в рідинах сили зчеплення між частинками не можуть довгий час утримувати їх у положенні рівноваги, біля якого вони коливаються. Відсутність у рідинах стійких положень рівноваги молекул дає їм змогу мільйони разів за секунду змінювати своє взаємне розташування, перестрибуючи з місця на місце на невеликі відстані. Фізик Я. І. Френкель, який займався вивченням рідин, підрахував, що за одну секунду частинка рідини встигає 10^{10} разів змінити місце свого "осілого" життя, причому між кожними двома переходами вона здійснює приблизно 100 коливань.

Так як під час переходів на молекулу діють сили притягання

сусідніх молекул, траєкторії переходів будуть кривими лініями. Таким чином, рух молекул у рідинах являє собою локальні коливання. Навколо деяких положень рівноваги і стрибкоподібні переміщення з одного положення рівноваги в сусіднє. На рис. 22.2 показана модель руху молекул в рідині.

Саме таким рухом частинок і пояснюється велика текучість (плинність, властивість змінювати форму при найменшому зовнішньому впливі) рідин і відсутність у них певної форми (висока дифузійна здатність). Невеликі, але спрямовані у певний бік, зовнішні дії

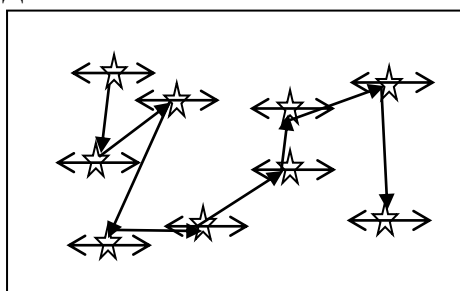


Рис. 22.2. Модель руху молекул у рідині

(різниця тисків, сила тяжіння, вітер) значно збільшують ймовірність “стрибків” молекул у напрямі зовнішнього впливу, що виявляється у поступовій зміні форми рідини. Дією сили тяжіння і текучістю можна пояснити те, що поверхня нерухомої рідини завжди горизонтальна. Зате в умовах невагомості,

коли вплив сили тяжіння відсутній, рідина в будь-якій кількості набирає форму кулі. Якщо молекули змінюють своє положення повільно, то потрібен великий інтервал часу для істотної зміни форми рідини, що ми спостерігаємо у таких в’язких рідин, таких як смоли.

Якщо на рідину подіяли короткочасно, так щоб час цієї дії був менший від часу “осілого життя”, то при цьому виявляється велика схожість властивостей рідини з властивостями твердого тіла. Так, при різкому ударі яким-небудь плоским предметом то поверхні води він відскакує від неї, бо рідина виявляє пружні властивості. Якщо ж час взаємодії з рідиною буде більшим за час “осілого” життя молекул, то при цьому виявляється текучість рідини.

Внаслідок текучості і дії сили тяжіння рідина не має власної форми. Вона набирає форму посудини, в яку вона налита, зберігаючи при цьому сталим свій об’єм. Збереження сталого об’єму в рідин пояснюється наявністю великих сил зчеплення між молекулами рідини, розташованими майже на тих самих відстанях одна від одної, що й у твердих тілах.

Дані рентгеноструктурного аналізу показують, що у рідинах спостерігається певний порядок в розташуванні лише близьких частинок і зникає в міру віддалення від атома або молекули, що

розглядається. Інакше кажучи, в рідинах існує ближній порядок, але немає дальнього.

Практика показує, що рідини практично нестисливі. Щоб пояснити цей факт оцінимо середню відстань між молекулами рідин.

Нехай m – маса рідини, ρ – густина, Тоді $m = N \cdot m_m$, де N – кількість молекул або атомів, m_m – маса молекули.

$Nm_m = N\rho V$, де V – об'єм який займає одна молекула (або атом).

Якщо покласти, що $m = M$ (молярній масі), то $N = N_A$ тоді $M = N_A\rho V$.

Таким чином, на кожен атом (молекулу) припадає об'єм у вигляді куба зі стороною L . $V = L^3$, $M = N_A\rho L^3 \Rightarrow L^3 = \sqrt{\frac{M}{N_A \cdot \rho}}$. Для води

взятої при нормальних умовах $M = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $\rho = 10^3$ кг/м³, $L \sim 3 \cdot 10^{-10}$ м. З таблиці даних слідує, що розміри молекули $\sim 2,6 \cdot 10^{-10}$ м. Видно, що молекули води розміщені дуже щільно, що є причиною малої стисливості. Із-за тісноти в розміщені молекул вони взаємодіють одночасно лише з кількома сусідніми молекулами. На більших відстанях цей зв'язок відсутній, що свідчить про відсутність дальнього порядку.

Експерименти показують, що під час плавлення твердих тіл, об'єм зростає в середньому на 3%. Це означає, що середня відстань між центрами частинок рідини не набагато більша порівняно з твердим тілом. Отже, При плавленні порушується лише дальній порядок у розташуванні частинок, але відстань між ними майже не змінюється.

Метод Ребіндера застосовується дуже широко, він полягає у вимірюванні тиску, потрібного для утворення бульбашки або краплі.

Установка, що використовується в роботі (рис. 22.3), складається з наповненого водою аспіратора 10, з'єднаного гумовими і скляними трубками з манометром 8 і повітряним простором закритої посудини

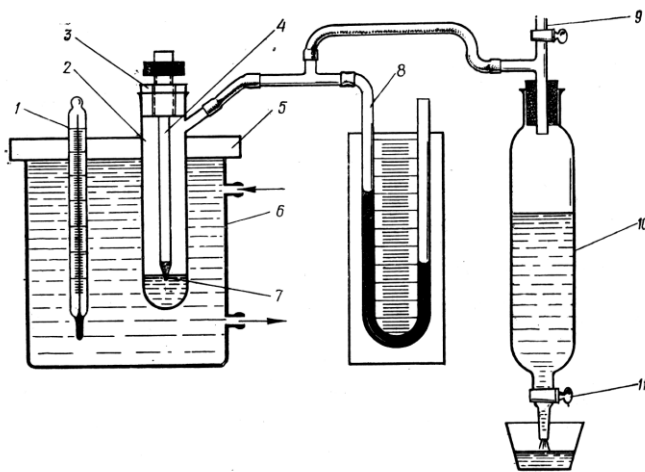


Рис. 22.3. Схема експериментальної установки: 1 – термометр; 2 – посудина; 3 – гумовий корок; 4 – трубка; 5 – кришка; 6 – посудина; 7 – капілярний наконечник; 8 – манометр; 9 – відросток аспірації; 10 – аспірація; 11 – кран.

2, в нижню частину якої налита досліджувану рідину. Через отвір у гумовому корку 3, який закриває посудину 2, проходить трубка 4 з капілярним наконечником 7. Досить зручні капілярні наконечники виготовляють з товстого скла з піпеткоподібним розширенням перед капіляром. Капілярний наконечник очищають, засмоктуючи хромову суміш, а потім промивають його дистильованою водою. Під час досліду капілярний наконечник 7 занурюють у рідину так, щоб він лише торкався її поверхні. Посудину 2 для підтримання і зміни температури вміщують у посудину 6, з'єднану з ультратермостатом і герметично закриту кришкою 5.

Коли з аспірації при закритому відростку 9 почне повільно витікати вода, це означатиме, що тиск у верхній частині посудини 2 і в лівому коліні манометра зменшується. При певному розрідженні p внаслідок дії атмосферного тиску p_0 через капіляр у рідину продавлюється бульбашка повітря (різниця тисків Δp вимірюється манометром). Це відбувається тоді, коли різниця тисків Δp урівноважується тиском, зумовленим силами поверхневого натягу досліджуваної рідини, які намагаються стиснути утворену бульбашку.

Отже, у момент відриву бульбашки $\alpha = Ah$, де h – різниця висот рідини в колінах манометра; A – стала приладу, яка залежить від розмірів капілярного наконечника. Для її визначення потрібно провести дослід з рідиною, поверхневий натяг α_0 якої відомий. Нехай при цьому значенні α_0 , $h = h_0$. Тоді $A = \frac{\alpha_0}{h_0}$. Шуканий поверхневий

натяг $\alpha = \alpha_0 \frac{h}{h_0}$. Методом логарифмування і диференціювання

знаходимо відносну похибку результату:
$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta\alpha_0}{\alpha_0} + \frac{\Delta h_0}{h_0} + \frac{\Delta h}{h}.$$

Порядок виконання роботи

1. Налити в посудину 2 двічі дистильовану воду до такого рівня, щоб капілярний наконечник 7 лише торкався її поверхні. Відкривши відросток 9, зрівняти рівні рідини в колінах манометра. Манометрична рідина, наприклад толуол, повинна добре змочувати скло. Щоб підвищити точність відліків h , можна використати похилий манометр.

Закривши відросток 9, відкрити кран 11 аспіратора так, щоб тиск змінювався досить повільно і легко було визначити за манометром h момент відриву бульбашки. Коли встановиться певна частота утримання бульбашок, зробити відліки h за манометром не менш як для 10 бульбашок. Одночасно треба записати показати термометра 1. Знаючи з таблиць α_0 для води при певній температурі, визначити сталу приладу A .

2. Замінивши в посудині 2 воду досліджуваною рідиною, провести аналогічні вимірювання і визначити α при різних наперед заданих температурах. Здобуті експериментальні дані зобразити графічно $\alpha = f(T)$.

3. Показати, що стала приладу A пропорційна радіусу r капіляра.

Контрольні запитання

1. Яка відмінність між станами молекул, які перебувають у середині рідини та в поверхневому шарі?

2. Від чого залежить сила поверхневого натягу? Де вона прикладена?

3. З'ясуйте фізичний зміст поверхневого натягу (фізичної величини).

4. Які методи визначення поверхневого натягу ви знаєте?

5. В чому полягає суть явища змочування твердого тіла рідиною?

6. Як змінюється поверхневий натяг рідини із зміною температури? Чому?

7. Чому при відсутності зовнішніх сил рідина набуває форми сфери?

8. Яку роботу потрібно виконати, щоб надути мильну бульбашку радіусом 4 см?

Визначення поверхневого натягу рідин методом відриву крапель

Мета роботи: визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідин методом відриву крапель.

Прилади і матеріали: бюретка, штатив, вимірювальний мікроскоп, аналітичні терези, набір капілярних трубок, еталонна рідина (дистильована вода), досліджувані рідини.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §121, 122], [2, §19.3], [5, Р.7 §3] і теоретичні відомості в даному посібнику.

2. Визначити поверхневий натяг рідини методом відриву крапель.

Теоретичні відомості та опис приладів

Рідкий стан, займаючи за своїми властивостями проміжне положення між газами і кристалами, поєднує деякі риси обох цих станів. Зокрема, для рідин характерна наявність власного об'єму, але разом з тим вона набуває форми посудини, в якій вона знаходиться. У розташуванні частинок рідини спостерігається так званий ближній порядок. Це означає, що стосовно до довільної частинки розташування найближчих до неї сусідів упорядковане.

Молекули рідини розташовуються настільки близько одна до одної, що сили притягання між ними мають значну величину. Оскільки взаємодія швидко зменшується з віддалю, починаючи з деякої відстані силами притягання між молекулами можна знехтувати. Цю відстань називають радіусом молекулярної дії, а сферу цього радіуса називають сферою молекулярної дії. Радіус молекулярної дії має величину порядку декількох ефективних діаметрів молекул.

Кожна молекула зазнає притягання зі сторони всіх сусідніх з нею молекул, що знаходяться в межах сфери її молекулярної дії. Якщо молекула перебуває від поверхні рідини на відстані, що перевищує радіус молекулярної дії, то рівнодійна всіх сил притягання для неї в середньому дорівнює нулю.

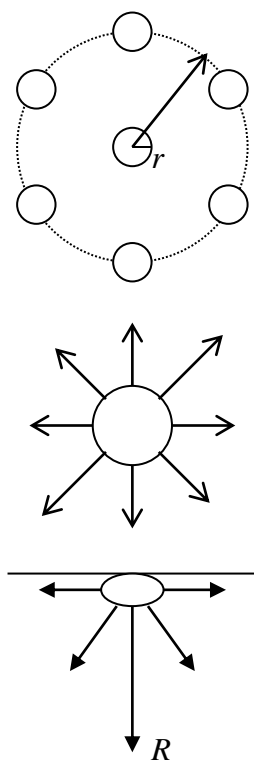


Рис. 23.1.

Поверхня рідини, що стикається з іншим середовищем, наприклад з її власною парою, з якоюсь іншою рідиною або з твердим тілом (зокрема, з стінками посудини, в якій вона міститься), перебуває в особливих умовах порівняно з усією масою рідини. Оскільки густина пари, з якою межує рідина, значно менша від густини рідини, то частина сфери молекулярної дії, яка виступає за межі рідини, буде менш заповнена молекулами, ніж та, яка знаходиться в рідині. У результаті на кожну молекулу, що знаходиться у поверхневому шарі товщиною, що дорівнює радіусу молекулярної дії, буде діяти сила, яка напрямлена всередину рідини. Величина цієї сили зростає в напрямку від внутрішньої до зовнішньої межі шару. Отже, виходить, що на молекули дуже тонкого поверхневого шару діють сили, які прагнуть

втягнути їх у середину рідини. Поверхневий шар тисне з деякою силою на рідину, створюючи в ній молекулярний тиск.

На кожну молекулу рідини діють сили притягання з боку сусідніх молекул, які віддалені від неї на відстань $15 \cdot 10^{-10}$ м, тобто тих, центри яких перебувають всередині сфери радіусом $R = 15 \cdot 10^{-10}$ м. Оскільки $r \sim 5 \cdot 10^{-10}$ м, то радіус молекулярної дії $R \approx 3r$.

Отже, кожна молекула рідини взаємодіє тільки з сусідніми молекулами. Розглянемо молекулу, яка перебуває всередині рідини. З усіх сторін її оточує в середньому однакове число молекул, тому результуюча сил, які діють на молекулу рівна нулю. Якщо ж молекула перебуває в поверхневому шарі, то концентрація молекул над рідиною мала, і результуюча сил, які діють на молекулу не рівна нулю і напрямлена всередину рідини перпендикулярно до її поверхні. В такому стані будуть перебувати всі молекули, які лежать в поверхневому шарі рідини, товщина якого рівна радіусу сфери молекулярної дії. Поверхневий шар рідини чинить на всю рідину тиск. Цей тиск називається внутрішнім, або молекулярним.

Так як внутрішній тиск напрямлений перпендикулярно поверхні рідини, то об'єм вільної рідини набуває форми кулі (при відсутності зовнішніх сил). Куля має найменшу площу поверхні при даному об'ємі. Отже, під дією молекулярних сил поверхня рідини

скорочується до мінімально можливих розмірів. Поверхневий шар перебуває в напруженому розтягнутому стані. Цей стан називається поверхневим натягом, він зумовлений силами притягання між молекулами. Виділимо в рідині контур. Сума сил притягання, які діють на контур, який обмежує поверхню рідини, називається силою поверхневого натягу F . Ця сила пропорційна числу молекул, які прилягають до контуру, а воно в свою чергу пропорційне довжині контуру. Отже,

$$F = \alpha \cdot l, \quad (1)$$

α – коефіцієнт пропорційності, який називається коефіцієнтом поверхневого натягу (поверхневим натягом): $\alpha = \frac{F}{l}$, він рівний силі поверхневого натягу, яка діє на одиницю довжини контуру, який обмежує поверхню рідини, $[\alpha] = \frac{H}{m}$.

З підвищенням температури α зменшується у зв'язку із збільшенням середньої відстані між молекулами.

Для збільшення поверхні рідини необхідно виконати роботу проти молекулярних сил. При скороченні поверхні молекулярної сили самі виконують роботу. Таким чином, при розширенні поверхні рідини її потенціальна енергія збільшується, а при скороченні – зменшується.

Визначимо роботу, яка виконується при скороченні поверхні рідини. Нехай плівка рідини натягнута на прямокутну рамку, права сторона якої довжиною l може вільно рухатися (рис. 23.2). Під дією постійної сили F поверхневого натягу ця сторона буде переміщуватися вліво, а поверхня – вкорочуватися. $A = F \cdot \Delta x = 2dl\Delta x = \alpha\Delta S$, $\Delta S = 2l\Delta x$ – зміна площі поверхні. Множник 2 вказує, що плівка має дві поверхні.

Робота виконується за рахунок зменшення потенціальної енергії $\Delta W = A$.

Молекули поверхневого шару рідини мають надмірну порівняно з молекулами, які є в об'ємі рідини потенціальну енергію.

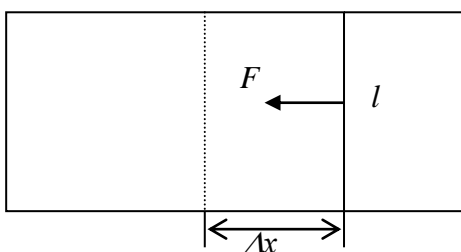


Рис. 23.2. Обчислення роботи сил поверхневого натягу

Та частина енергії системи, яку можна в даних умовах перетворити в механічну

роботу, називається *вільною енергією*.

Вільна енергія всієї поверхні рідини рівна добутку коефіцієнта поверхневого натягу на площу цієї поверхні. $W = \alpha \cdot S$.

Отже, $\alpha = \frac{W}{S}$ – коефіцієнт поверхневого натягу рівний вільній

енергії одиниці площі поверхні рідини, $[\alpha] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$.

На практиці одним з поширених методів вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини α є метод відриву крапель. При порівняно невеликій швидкості витікання рідини з вузької трубки утворюються краплі майже сферичної форми. Перед відривом краплі виникає «нитка», по якій і відбувається розрив (рис. 23.3). На краплю діє дві сили: сила тяжіння m_0g та сила поверхневого натягу $F = \alpha \cdot l$. Крапля відривається тоді, коли ці сили стають рівними.

Нехай діаметр нитки в момент відриву краплі дорівнює $d = 2r$. Тоді справедлива рівність $\pi d \alpha = m_0g$, звідси

$$\alpha = \frac{m_0g}{\pi d}. \quad (2)$$

Для більш точного визначення коефіцієнта α знаходять масу m певної кількості n крапель, а потім середнє значення маси окремої краплі

$$\alpha = \frac{mg}{\pi dn}. \quad (3)$$

Використовується також варіант підрахунку числа крапель n певного об'єму V витікаючої рідини. Розрізняють абсолютний і відносний способи визначення коефіцієнта α .

Абсолютний спосіб полягає у вираженні у формулі (2) маси краплі m_0 через її об'єм рідини V , визначений за шкалою бюретки, густину рідини ρ і кількість крапель n :

$$\alpha = \frac{\rho g V}{\pi dn}. \quad (4)$$

Відносний спосіб полягає в порівнянні коефіцієнтів поверхневого натягу досліджуваної рідини α і еталонної α_0 . Записавши (4) для однакових об'ємів цих рідин, дістанемо



Рис. 23.3. Метод відриву крапель

$$\alpha = \frac{\rho d_0 n_0}{\rho_0 d n} \alpha_0, \quad (5)$$

де ρ_0 , n_0 , d_0 – відповідно густина, кількість крапель, діаметр шийки краплі еталонної рідини; ρ , n , d – аналогічні параметри досліджуваної рідини. Еталонною рідиною рекомендують брати дистильовану воду. Густину рідини можна визначити пікнометричним методом. На рис. 23.4 зображено схему приладу для визначення коефіцієнта поверхневого натягу α рідини методом відриву краплі. Рідину наливають у бюретку 3, закріплену в штативі 2. Рідину, що витікає з бюретки, збирають в скляному кристалізаторі 4. Діаметр шийки краплі вимірюють мікроскопом 1.

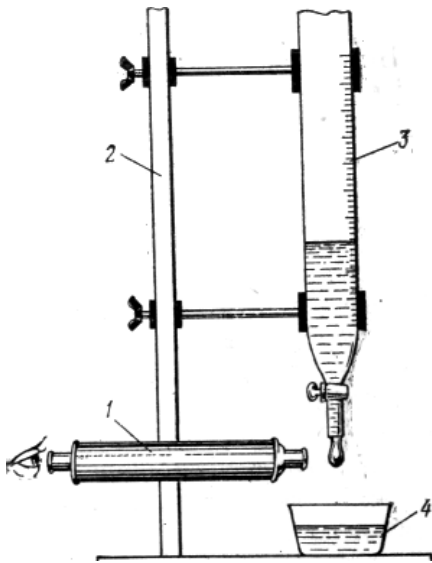


Рис. 23.4. Схема приладу для визначення коефіцієнта поверхневого натягу

Порядок виконання роботи

Завдання 1

1. У чисту бюретку, промиту хромовою сумішшю (5%-й розчин двохромовоокислого калію в концентрованій сірчаній кислоті) та дистильованою водою, налити приблизно 10 см^3 досліджуваної рідини, відкрити кран і заповнити рідиною вузьку частину бюретки нижче крана.

2. Зважити на аналітичних терезах скляний кристалізатор.

3. Відкривши кран, забезпечити повільне витікання крапель; відрахувати 50–100 крапель. Одночасно виміряти мікроскопом діаметр шийки 10–15 крапель. Обчислити середнє значення діаметра шийки краплі d .

4. Зважити кристалізатор і обчислити масу n крапель.

5. За формулою (3) обчислити α .

6. Дослід повторити 5–8 разів.

7. Обчислити відносну похибку використовуючи метод логарифмування та диференціювання: $\varepsilon = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta d}{d}$, де – Δm ,

Δd – абсолютні похибки вимірювання маси n крапель рідини та діаметра шийки краплі.

8. Обчислити абсолютну похибку $\Delta\alpha = \varepsilon \cdot \alpha$.

Завдання 2

1. Визначити пікнометричним методом густину досліджуваної рідини.
2. Заповнити мікробюретку досліджуваною рідиною, зафіксувати об'єм рідини.
3. Відкривши кран, підрахувати кількість крапель n у досліджуваному об'ємі.
4. Виміряти мікроскопом середнє значення діаметра шийки краплі d .
5. За формулою (3) обчислити α .
6. Дослід повторити 5–8 разів.
7. Оцінити точність результатів вимірювання.

Завдання 3

1. Заповнивши мікробюретку еталонною рідиною (дистильована вода), зафіксувати об'єм рідини.
2. Відкривши кран, підрахувати кількість крапель n_0 . Дослід повторити 3–5 разів.
3. Виміряти мікроскопом середнє значення радіуса шийки краплі d_0 .
4. Заповнити мікробюретку досліджуваною рідиною. Повторити аналогічні вимірювання, як і для еталонної рідини, 5–8 разів для того самого об'єму.
5. Значення p , α_0 і r взяти з таблиць. За формулою (4) обчислити α .
6. Оцінити точність результатів вимірювання.
7. Порівняти значення α , добуті трьома способами. Результати вимірювання віднести до температури досліду.
8. Зробити висновки відносно методів і результатів вимірювання.

Контрольні запитання:

1. Яка відмінність між станами молекул, які перебувають у середині рідини та в поверхневому шарі?
2. Від чого залежить сила поверхневого натягу? Де вона прикладена?
3. З'ясуйте фізичний зміст поверхневого натягу (фізичної величини).
4. Які вам відомі методи визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини?

5. Чому при відсутності зовнішніх сил крапля рідини набуває форми сфери?
6. Чому рівна маса краплини рідини при відриві?
7. Яку роботу потрібно виконати, щоб надути мильну бульбашку радіусом 4 см?

Лабораторна робота 24

Визначення коефіцієнта поверхневого натягу методом підняття рідини в капілярах

Мета роботи: визначити коефіцієнт поверхневого натягу методом підняття рідини в капілярах.

Прилади і матеріали: набір капілярних трубок діаметром 0,2–1 мм; тримач капілярних трубок; скляна посудина для досліджуваних рідин; катетометр або вимірювальний мікроскоп; висок; досліджувані рідини (спирти, толуол та ін.).

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §121, 123], [2, §19.3, 19.4], [5, Р.7 §3] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Обчислити коефіцієнт поверхневого натягу.

Теоретичні відомості та опис установки

Під викривленою поверхнею рідини крім гідростатичного тиску створюється ще *додатковий тиск*, зумовлений кривизною поверхні. Нехай маємо дві рідини із випуклою і вгнутою поверхнями (рис. 24.1). Випукла поверхня прямує до плоскої форми і тому буде чинити на рідину додатковий тиск, в одному напрямі із внутрішнім тиском.

Додатковий тиск під вгнутою поверхнею буде зменшувати внутрішній тиск.

Додатковий тиск пропорційний коефіцієнту поверхневого натягу і обернено пропорційний радіусу кривизни поверхні рідини $\Delta p \sim \frac{\alpha}{R}$.

Додатковий тиск під викривленою поверхнею рідини будь-якої форми виражається *формулою Лапласа*

$$\Delta p = \pm \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2)$$

Знак (+) – відповідає випуклій поверхні, а знак (–) – вгнутій поверхні; R_1 і R_2 – радіуси кривизни двох нормальних взаємно перпендикулярних перерізів поверхні.

Для сферичної поверхні $R_1 = R_2 = R$, тому

$$\Delta p = \pm \frac{2\alpha}{R}.$$

(3)

При великій кривизні, яка має місце для малесеньких крапель, додатковий тиск може бути дуже великим. Для $r = 0,001$ мм

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R} = \frac{2 \cdot 73 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Із крапель такого розміру утворюються тумани.

Додатковий тиск відіграє велику роль в капілярних явищах. Вони проявляються на межі контакту рідини з твердим тілом. Якщо сили притягання між молекулами рідини більші, ніж між молекулами рідини і твердого тіла то рідина не змочує тіло. Кут θ між поверхнею тіла і дотичною до поверхні рідини називається *крайовим*. Для не змочуваних рідин $\theta > 90^\circ$. При $\theta = 180^\circ$ має місце повне незмочування. Якщо ж сили притягання між молекулами менші, ніж між молекулами рідини і твердого тіла, то рідина змочує тверде тіло при цьому крайовий кут $\theta < 90^\circ$.

Поверхня рідини повинна викривлятися біля стінок посудини. У вузьких посудинах краєві викривлення охоплюють всю поверхню рідини. Такі вузькі посудини (трубки, щілини) називаються *капілярами*.

Внаслідок додаткового тиску рідина в капілярах піднімається або опускається.

Рідина, яка змочує стінки капіляра піднімається на деяку висоту h

$$\rho g h = \frac{2\alpha}{R}, \text{ звідки } h = \frac{2\alpha}{\rho g R},$$

де – R , α , ρ , g – відповідно радіус кривизни меніска, коефіцієнт поверхневого натягу, густина рідини, прискорення вільного падіння,

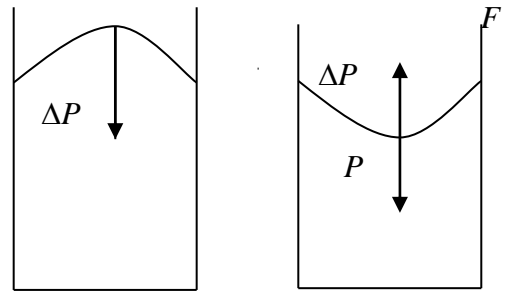


Рис. 24.1. Виникнення додаткового тиску в залежності від кривизни поверхні рідини

$$R = \frac{r}{\cos \theta}, \quad r - \text{радіус трубки.}$$

Висота h піднімання рідини в циліндричній капілярній трубці радіуса r , яку вміщено в широкую посудину, визначається за формулою

$$\text{Жюрена:} \quad h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g r}. \quad (4)$$

Формула (4) справедлива і для випадку незмочування рідиною твердого тіла.

В дуже тонких капілярах рідина може підніматися на велику висоту. Якщо має місце повне змочування, то $\theta = 0^\circ$ і $h = \frac{2\alpha}{\rho g r}$.

Капілярні явища відіграють важливу роль у природі та техніці.

У роботі для визначення коефіцієнта поверхневого натягу використовують одночасно два капіляри радіуса r_1 і r_2 . У цьому разі

$$h_1 = \frac{2\alpha}{\rho g r_1}, \quad h_2 = \frac{2\alpha}{\rho g r_2}. \quad (5)$$

Оскільки $\Delta h = h_1 - h_2$, то враховуючи (5), знаходимо

$$\alpha = \rho g \Delta h \frac{r_1 r_2}{2(r_2 - r_1)}. \quad (6)$$

Схему установки зображено на рис. 24.2, де $б$ – посудина з досліджуваною рідиною; 5 – капіляри, закріплені на штативі 4 ; 3 – вимірювальний мікроскоп на рухомій підставці 2 ; 1 – мікрогвинт; 7 – висок.

На рис. 24.3 метод вимірювання різниці рівнів рідини в капілярах Δh ілюструється за допомогою окулярної шкали вимірювального

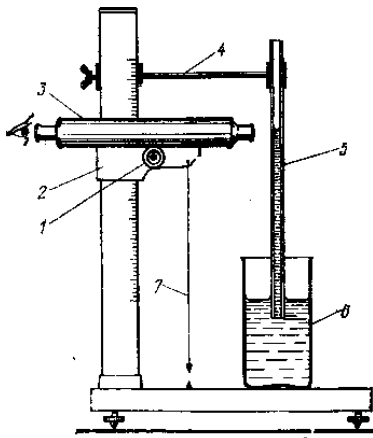


Рис. 24.2. Схема установки для визначення коефіцієнта поверхневого натягу

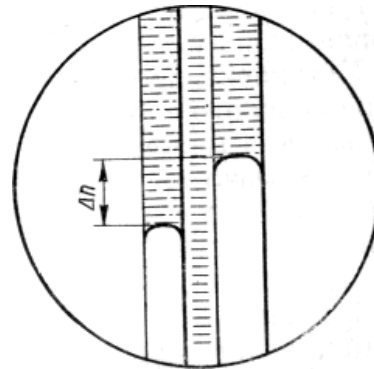


Рис. 24.3. Окулярна шкала мікроскопа

мікроскопа.

Порядок виконання роботи

1. Якщо радіуси капілярів невідомі, їх потрібно виміряти мікроскопом або методом заповнення рідиною з наступним зважуванням.

2. Капіляри старанно промити розчином двохромокислого калію в сірчаній кислоті, а потім дистильованою водою.

3. Закріпити на штативі занурені в досліджувану рідину на глибину 1–2 см промиті капіляри радіусів r_1 і r_2 .

4. За допомогою вимірювального мікроскопа виміряти різницю рівнів рідини в капілярах Δh .

5. За формулою (6) обчислити коефіцієнт α . Дослід повторити 3–5 разів при різному зануренні капілярів у досліджувану рідину. Зафіксувати температуру досліду.

6. Оцінити результати вимірювань.

7. Визначити відносну похибку результату за формулою

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{h_1 - h_2} + \frac{\Delta r_1}{r_1} + \frac{\Delta r_2}{r_2} + \frac{\Delta r_2 + \Delta r_1}{r_2 - r_1}.$$

8. Зробити висновок про методику і результати вимірювань.

Контрольні запитання

1. Чому в роботі краще одночасно використовувати два капіляри?
2. Що є причиною підняття змочуючих рідин у капілярах?
3. Чому в роботі велика увага приділяється чистоті капілярів?
4. В чому полягає суть явища змочування твердого тіла рідиною?
5. Яке практичне значення капілярних явищ?
6. На яку висоту піднімається рідина в капілярній трубці при її змочуванні?

Лабораторна робота 25*

Визначення теплоємностей твердих тіл

Мета роботи: визначити теплоємності зразків металів калориметричним методом з використанням електричного нагрівання.

Прилади і матеріали: експериментальна установка ФПТІ-8: блок

приладів (джерело живлення нагрівника, вольтметр, амперметр, секундомір) блок робочого елемента, стояк, нагрівник, досліджувані зразки.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [1, §127], [2, §18.6], [5, Р.9 §5] і теоретичні відомості в даному посібнику.

2. Побудувати графік залежності різниці часу нагрівання калориметра із зразком і порожнього калориметра від зміни температури калориметра.

3. Визначити кутовий коефіцієнт.

4. Визначити питому теплоємність зразка.

Теоретичні відомості

З теорії ідеального газу відомо, що середня кінетична енергія одноатомних молекул (ізольованих часток)

$$\langle E_K \rangle = \frac{3}{2} kT,$$

де k – стала Больцмана.

Тоді середнє значення повної енергії частинки коливального руху у кристалічній ґратці

$$\langle U_0 \rangle = 3kT.$$

Повну внутрішню енергію U одного моля твердого тіла одержимо домноживши середню енергію однієї частинки на число частинок, що незалежно коливаються, які містяться в одному молі, тобто на сталу Авогадро N_A :

$$U = \langle U_0 \rangle N_A = 3N_A kT = 3RT, \quad (1)$$

де R – універсальна газова стала, $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Для твердих тіл, внаслідок малої величини коефіцієнта теплового розширення, теплоємності за сталих тиску та об'єму практично не відрізняються одна від одної. Тому, враховуючи (1), молярна теплоємність твердого тіла

$$C_\mu = C_{\mu V} = \frac{dU}{dT} = 3R. \quad (2)$$

Підставивши чисельне значення універсальної газової сталої, одержимо:

$$C_\mu = 25 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Ця рівність, що зветься законом Дюлінга і Пті, виконується досить точно для багатьох речовин за кімнатної температури. Однак із зниженням температури теплоємності всіх твердих тіл зменшуються, наближаючись до нуля за $T \rightarrow 0$. Біля абсолютного нуля молярна теплоємність усіх тіл пропорційна T^3 , і тільки за досить високої, характерної для кожної речовини температури починає виконувалася рівність (2). Ці особливості теплоємностей твердих тіл за низьких температур можна пояснити за допомогою квантової теорії теплоємностей, створеної Ейнштейном та Дебаєм.

Для експериментального визначення теплоємності досліджуване тіло вміщується в калориметр, який нагрівається електричним струмом. Якщо температуру калориметра з досліджуванним зразком дуже повільно збільшувати від початкової T_0 на ΔT , то енергія електричного струму піде на нагрівання зразка і калориметра:

$$IU\tau = m_0c_0\Delta T + mc\Delta T + \Delta Q, \quad (3)$$

де I і U – струм і напруга нагрівача; τ – час нагрівання; m_0 і m – маси калориметра і досліджуваного зразка, c_0 і c – питомі теплоємності калориметра і досліджуваного зразка, ΔQ – втрати теплоти в теплоізоляцію калориметра та в навколишній простір.

Для виключення з рівняння (3) кількості теплоти, витраченої на нагрівання калориметра, і втрат теплоти в навколишній простір, необхідно за тієї самої потужності нагрівника нагріти порожній калориметр (без зразка) від початкової температури T_0 на таку саму різницю температур ΔT . Втрати теплоти в обох випадках будуть практично однаковими і досить малими, якщо температура захисного кожуха калориметра в обох випадках стала і дорівнює кімнатній:

$$IU\tau_0 = m_0c_0\Delta T + \Delta Q_0. \quad (4)$$

З рівнянь (3) і (4) випливає:

$$IU(\tau - \tau_0) = mc\Delta T. \quad (5)$$

Рівняння (5) може бути використане для експериментального визначення питомої теплоємності матеріалу досліджуваного зразка. Змінюючи температуру калориметра, необхідно побудувати графік залежності різниці часу нагрівання від зміни температури досліджуваного зразка: $(\tau - \tau_0) = f(\Delta T)$, за кутовим коефіцієнтом

якого $K_\alpha = \frac{m \cdot c}{J \cdot U}$ можна визначити питому теплоємність зразка.

Експериментальна установка

Для визначення теплоємності твердих тіл призначена експериментальна установка ФПТІ-8, загальний вигляд якої зображено на рис. 25.1.

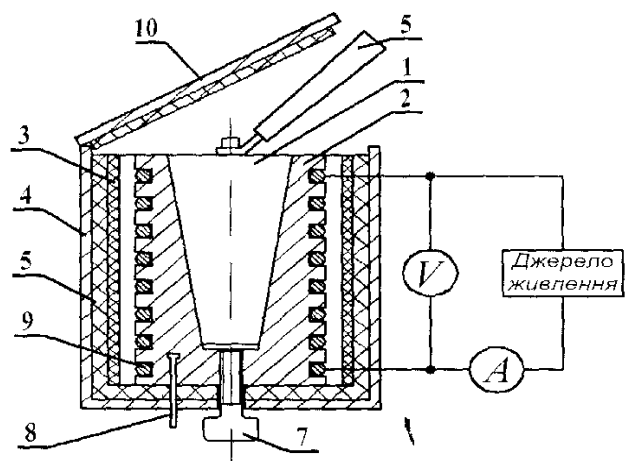
Зразки нагріваються в калориметрі, схема якого наведена на рис. 25.2. Калориметр складається з латунного корпусу з конічним отвором, куди вміщується досліджуваний зразок. На зовнішній поверхні корпусу в спеціальних пазах розміщена нагрівальна спіраль. Зовні корпус калориметра теплоізолювано шарами азбесту і скловолокна та закрито алюмінієвим кожухом. Калориметр закривається теплоізолюваною кришкою. Досліджувані зразки розташовані в гніздах у блоці робочого елемента 2. Після закінчення експерименту зразок можна виштовхнути з конічної порожнини корпусу калориметра за допомогою



Рис. 25.1. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТІ-8: 1 – блок приладів; 2 – блок робочого елемента; 3 – стаяк; 4 – нагрівник; 5 – досліджувані зразки

ГВИНТА.

ГВИНТА.



Для видалення нагрітого зразка з калориметра та установки зразка в нагрівник використовується

рукоятка, розміщена у спеціальному гнізді поруч з досліджуваними зразками. Температура калориметра вимірюється цифровим термометром, датчик якого знаходиться в корпусі калориметра. У блоці приладів 7 розташоване також джерело живлення нагрівника, потужність якого встановлюється регулятором «Нагрів».

Напруга й струм у колі нагрівника вимірюються вольтметром і амперметром, які знаходяться на передній панелі блоку приладів. Час нагрівання калориметра вимірюється секундоміром, розташованим у блоці приладів. Секундомір приводиться в дію при вмиканні живлення блоку приладів.

Атомні маси зразків наведені в таблиці 1.

Рис. 25.2. Схема калориметра: 1 – зразок; 2 – корпус; 3 – азбест; 4 – кожух; 5 – рукоятка; 6 – скловолокно; 7 – гвинт; 8 – датчик температури; 9 – нагрівник; 10 – кришка

Таблиця 1

№ п/п	Матеріал зразка	Атомна маса, кг/моль
1.	Дюраль	$26,98 \cdot 10^{-3}$
2.	Латунь	$63,57 \cdot 10^{-3}$
3.	Сталь	$55,85 \cdot 10^{-3}$

Порядок виконання роботи

1. Зняти кожух з блоку робочого елемента установки і підвісити його на гвинтах задньої панелі. Ввімкнути установку тумблером «Мережа».

2. Порожній калориметр щільно закрити кришкою. Ввімкнути тумблер, «Нагрів». За допомогою регулятора «Нагрів» встановити необхідну напругу в колі.

3. При температурі калориметра $t_0 = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ увімкнути відлік часу, зробити 7–10 вимірів часу нагрівання порожнього калориметра через інтервал 1°C . Результати занести до таблиці 2.

Таблиця 2

№ вим.	U, V	I, A	$\Delta T, K$	t_0, c	τ, c	$\tau - t_0, c$	$c, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$C_{\mu}, \text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$

4. Вимкнути тумблер «Нагрів», відкрити кришку і охолодити калориметр до початкової температури t_0 .

5. Обертаючи гвинт уліво, помістити в калориметр один з

досліджуваних зразків, взятий за вказівкою викладача. Щільно закрити кришку калориметра і зачекати 3 хв до вирівнювання температур калориметра і зразка.

6. Ввімкнути нагрівник калориметра, встановивши те саме значення напруги в колі, що й при нагріванні порожнього калориметра.

7. Ввімкнути відлік часу за тієї самої початкової температури t_0 . Зробити 7–10 вимірів часу τ нагрівання калориметра із зразком через інтервал температури $1\text{ }^\circ\text{C}$. Результати занести до таблиці 2.

8. Регулятор „Нагрів” установити в крайнє ліве положення, вимкнути тумблер «Нагрів», відкрити кришку калориметра. Для видалення зразка з калориметра гвинт обертати вправо, після чого за допомогою рукоятки вийняти нагрітий зразок.

9. Вимкнути установку тумблером «Мережа».

Обробка результатів

1. Побудувати графік залежності різниці часу нагрівання калориметра $(\tau - \tau_0) = f(\Delta T)$ із зразком і порожнього калориметра від зміни температури калориметра та визначити кутовий коефіцієнт K_α .

2. Використовуючи знайдений кутовий коефіцієнт K_α , визначити питому теплоємність зразка за формулою $c = \frac{J \cdot U}{m} \cdot K_\alpha$.

3. Використовуючи дані таблиці 1, визначити молярну теплоємність зразка.

4. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні запитання

1. Яка величина зветься теплоємністю речовини, питомою і молярною теплоємністю? У яких одиницях СІ вони вимірюються?

2. Виведіть формулу для повної внутрішньої енергії 1 моля твердого тіла.

3. У чому особливості теплоємностей твердих тіл? Виведіть формулу для молярної теплоємності твердого тіла

4. Запишіть і поясніть закон Дюлонга і Пті.

5. Розрахуйте, виходячи із закону Дюлонга і Пті, питому теплоємності алюмінію ${}_{23}\text{Al}^{27}$ та заліза ${}_{26}\text{Fe}^{56}$.

6. У чому полягає метод електричного нагрівання для визначення теплоємності твердих тіл?

7. Виведіть формулу для експериментального визначення

теплоємності.

8. Чому під час виконання експерименту нагрівання порожнього калориметра та калориметра із зразком необхідно проводити при одній і тій самій потужності нагрівника?

9. Чим обмежена максимально допустима температура нагрівання калориметра?

10. Основні джерела похибок даного методу вимірювання.

Лабораторна робота № 26

Визначення теплопровідності твердих тіл

Мета роботи: визначити теплопровідність твердих тіл.

Прилади і матеріали: прилад Христіансена, електроплитка, термопари, мілівольтметр, мікрометр.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [2, §18.7] і теоретичні відомості в даному посібнику.

2. Вивчити будову приладу Христіансена.

3. Вивчити суть методу Христіансена.

4. Визначити температурну залежність коефіцієнта теплопровідності неметалічних кристалів.

Теоретичні відомості та опис приладу

При контакті тіл з різними температурами завжди теплота передається від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою температурою. Передача теплоти від однієї частини тіла до другої внаслідок теплового руху частинок, з яких складається тіло, називається теплопровідністю (процес). У твердих тілах процес теплопровідності зумовлений тепловими коливаннями частинок, які утворюють кристалічну ґратку, а в металах крім того і тепловим рухом електронів.

Якщо на гранях пластинки (диска), виготовленої з даного матеріалу, підтримувати незмінними температури $t_1 \neq t_2$, то теплота безперервно буде переходити від грані з вищою температурою до

грані з нижчою температурою і через деякий час встановиться стаціонарний тепловий потік.

Кількість теплоти, яка переходить від однієї грані пластинки до другої буде визначатись законом Фур'є. Для одновимірного випадку він записується у вигляді:

$$Q = K \frac{t_1 - t_2}{d} S \tau, \quad (1)$$

де $t_1 - t_2$ – різниця температур на гранях пластинки, S – площа однієї з граней, τ – час теплообміну, d – товщина пластинки, K – теплопровідність (фізична величина).

З формули (1) теплопровідність рівна

$$K = \frac{Q}{\frac{t_1 - t_2}{d} S \tau} = \frac{Q \cdot d}{(t_1 - t_2) S \tau} \left(\frac{Вт}{М \cdot град} \right), \quad (2)$$

де $\frac{t_1 - t_2}{d}$ – градієнт температури в пластинці.

Теплопровідність характеризує властивість даного матеріалу і чисельно дорівнює кількості теплоти, яка проходить через одиничну площадку, перпендикулярну до потоку теплоти, за одиницю часу при градієнті температури рівному одиниці.

В даній роботі теплопровідність визначається методом Христіансена. Прилад для визначення K (рис.26.1), складається з циліндричної посудини A і електричної плитки B , між якими розміщені три мета-

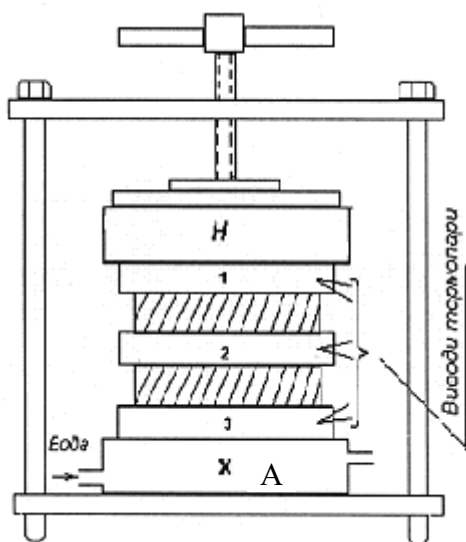


Рис. 26.1. Прилад Христіансена

леві диски (I, II, III) з отворами для термопар. Між I і II дисками розміщують пластинку з відомою теплопровідністю K_0 , а між II і III дисками – пластинку з речовини, теплопровідність K_1 яку потрібно визначити (площі поперечних перерізів пластинок і дисків повинні бути однакові). Якщо, пропускаючи через посудину A холодну воду, охолоджувати диск I, то через деякий час в пластинах і дисках встановиться стаціонарний

тепловий потік (температури дисків t_1, t_2, t_3 перестануть змінюватись).

При стаціонарному тепловому потоці через будь-яку пластинку за рівні проміжки часу пройдуть рівні кількості теплоти.

Кількість теплоти, яка пройшла за час τ від диска I до диска II, (через пластинку з відомим K_0) на основі (I) визначиться за формулою:

$$Q_0 = K_0 \frac{t_1 - t_2}{d_0} S \tau,$$

де d_0 – товщина пластинки з відомою K_0 . Через пластинку з невідомою K_1 за такий же час τ пройде кількість теплоти.

$$Q_1 = K_1 \frac{t_2 - t_3}{d_1} S \tau,$$

де d_1 – товщина пластинки з невідомою теплопровідністю K .

Так, як при стаціонарному потоці $Q_1 = Q_0$, то

$$K_1 \frac{t_2 - t_3}{d_1} S \tau = K_0 \frac{t_1 - t_2}{d_0} S \tau.$$

Звідки теплопровідність досліджуваного матеріалу буде рівна

$$K_1 = K_0 \frac{(t_1 - t_2)d_1}{(t_2 - t_3)d_0}. \quad (3)$$

Формула (3) дає задовільну точність в тому випадку, коли будуть незначні витрати теплоти дисками і пластинками в навколишнє середовище $Q_1 \cong Q_0$. Для цього диски і пластинки під час експерименту розміщують в теплоізоляційному кожусі.

Логарифмуючи та диференціюючи співвідношення (3) знаходимо відносну похибку результату:

$$\varepsilon = \frac{\Delta K_1}{K_1} = \frac{\Delta K_0}{K_0} + \frac{2\Delta t}{t_1 - t_2} + \frac{2\Delta t}{t_2 - t_3} + \frac{\Delta d}{d_0} + \frac{\Delta d}{d_1}. \quad (4)$$

Абсолютна похибка $\Delta K_1 = \varepsilon K_1$.

Порядок виконання роботи

1. В декількох (3–4) місцях виміряти мікрометром товщину досліджуваної пластинки d_2 і товщину d_1 пластинки з відомим K_0 .

2. Зібрати установку так, як показано на рис. 26.1.

3. Через посудину A пустити холодну воду з водопроводу I , увімкнувши через автотрансформатор електроплитку, спостерігати за температурою дисків I, II, III.

4. Через 20–30 хв. Коли температура дисків перестане змінюватись з часом визначити температури t_1 , t_2 і t_3 . Перекрити воду

і вимкнути електроплитку.

5. Результати вимірювань занести в таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	d_1	d_2	t_1	t_2	t_3	K_0	K	ΔK

6. Підставляючи у формулу (3) значення вимірних величин і значення K_0 , взяте з таблиць, визначити K_1 досліджуваного матеріалу.

7. Обчислити відносну та абсолютну похибки отриманого результату.

Контрольні питання

1. В чому полягає явище теплопровідності? Яким законом воно описується?

2. Пояснити механізм теплопровідності у різних речовинах.

3. Яка формула для визначення коефіцієнта теплопровідності?

4. Який фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності? В яких одиницях він вимірюється?

5. Що таке тепловий потік? Який тепловий потік називається стаціонарним?

6. Як залежить коефіцієнт теплопровідності неметалічних кристалів від температури? Пояснити цю залежність.

7. Які методи визначення коефіцієнта теплопровідності?

8. При якій умові метод Христіансена для визначення K дає задовільні результати?

Лабораторна робота № 27*

Визначення зміни ентропії в процесі нагрівання і плавлення олова

Мета роботи: визначення зміни ентропії за фазового переходу першого роду на прикладі плавлення олова.

Прилади і матеріали: експериментальна установка ФПТ1-11: стояк; кронштейн; нагрівник; датчик температури; тигель з досліджуваним матеріалом; блок робочого елемента; блок приладів.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати

літературу [1, §109], [3, §16.8], [5, Р.6 §9-12] і теоретичні відомості в даному посібнику.

2. Дослідити зміну температури олова при нагріванні та охолодженні і побудувати графік.

Теоретичні відомості

Фазовий перехід першого роду – це перехід речовини з одного стану в інший, який супроводжується поглинанням або виділенням деякої кількості прихованої теплоти та зміною питомого об'єму речовини. При цьому температура переходу залишається сталою і залежить від тиску. Отже, для розплавлення деякої маси m речовини, що знаходиться при температурі плавлення T_{Π} , необхідно витратити кількість теплоти

$$Q_{\Pi} = \lambda \cdot m, \quad (1)$$

де λ – питома теплота плавлення даної речовини.

Ентропією зветься така функція стану термодинамічної системи, диференціал якої dS в оборотному процесі дорівнює відношенню нескінченно малої кількості теплоти δQ , наданої системі, до термодинамічної температури T системи:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}.$$

Ентропія завжди визначається з точністю до сталої величини, тому зміст має лише її зміну при переході системи зі стану 1 до стану 2:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (2)$$

Процес плавлення олова проходить за сталої температури $T = T_{\Pi}$ і, отже, є ізотермічним. Зміну ентропії у такому процесі можна знайти за формулою (2):

$$\Delta S_{\Pi} = \frac{1}{T_{\Pi}} \int_1^2 \delta Q_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi}}{T_{\Pi}}.$$

З виразу (2) випливає, що зміну ентропії при нагріванні і плавленні олова можна визначити як суму зміни ентропії при нагріванні його від початкової температури T_K до температури плавлення T_{Π} та при плавленні олова:

$$\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_{\Pi} = \int_{T_K}^{T_{\Pi}} \frac{\delta Q_H}{T} + \frac{Q_{\Pi}}{T}.$$

Враховуючи, що $\delta Q_H = c \cdot m \cdot dT$, і беручи до уваги формулу (1), дістаємо

$$\Delta S = c \cdot m \cdot \int_{T_K}^{T_{II}} \frac{dT}{T} + \frac{\lambda \cdot m}{T_{II}},$$

або
$$\Delta S = c \cdot m \cdot \ln \frac{T_{II}}{T_K} + \frac{\lambda \cdot m}{T_{II}}, \quad (3)$$

де c і λ – питома теплоємність та питома теплота плавлення олова.

Формула (3) може бути використана для експериментального визначення зміни ентропії при нагріванні та плавленні олова після вимірювання значень температур T_K і T_{II} .

Експериментальна установка

Для визначення зміни ентропії при нагріванні і плавленні олова призначена експериментальна установка ФПТ1-11, загальний вигляд якої показано на рис. 27.1.

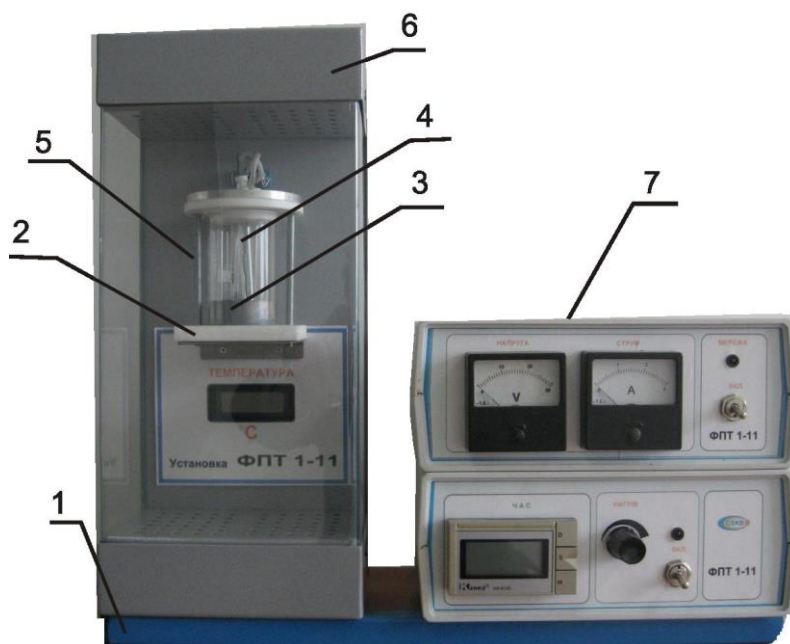


Рис. 27.1. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-11: 1 – стоек; 2 – кронштейн; 3 – нагрівник; 4 – датчик температури; 5 – тигель з досліджуваним матеріалом; 6 – блок робочого елемента; 7 – блок приладів

Нагрівання олова відбувається в тиглі за допомогою електричного нагрівника 3, джерело живлення якого розміщене в блоці приладів 7. Температура олова вимірюється цифровим термометром, розташованим у блоці робочого елемента 6. Час нагрівання вимірюється цифровим секундоміром, розташованим у

блоці приладів. Секундомір приводиться в дію вмиканням живлення блоку приладів.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку тумблером „Мережа” та виміряти початкову температуру олова (T_K).

2. Одночасно увімкнути нагрівник та секундомір і через кожну хвилину вимірювати температуру олова. Вимірювання проводити доти, доки температура після досягнення сталої величини (T_{II}) не почне підвищуватись. Результати вимірювань позначити на графіку $T = f(t)$.

3. Вимкнути нагрівник і провести аналогічні виміри при охолодженні олова, позначаючи температуру на тому самому графіку, що і в п.2.

4. Вимкнути установку тумблером „Мережа”.

Обробка результатів вимірювань

1. За двома одержаними графіками визначити температури, які відповідають ділянкам, паралельним осі часу і за їх середнім значенням знайти температуру плавлення олова.

2. За формулою (3) визначити зміну ентропії під час нагрівання та плавлення олова. Питому теплоту плавлення та питому теплоємність олова знайти у довідниках.

3. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні завдання

1. Що таке фазовий перехід першого роду?

2. Що таке ентропія?

3. Чому дорівнює зміна ентропії за ізотермічного та адіабатичного процесів?

4. Виведіть основну розрахункову формулу, яка використовується у даній роботі.

5. У чому полягає метод визначення, зміни ентропії за нагрівання та плавлення олова, який використано у даній роботі?

6. До якої температури слід нагріти олово у тиглі при виконанні експерименту?

7. Які основні джерела похибок даного методу вимірювання?

Техніка одержання та вимірювання вакууму

Мета роботи: вивчити техніку одержання та вимірювання вакууму.

Прилади і матеріали: вакуумна установка, манометри, розрядна трубка і трубка, призначена для визначення підтікання у системі, трансформатор Тесла, розбірна модель ротаційного насоса.

Завдання:

Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [2, §15.4]. [5, Р.4 §7] і теоретичні відомості в даному посібнику.

Теоретичні відомості та опис приладів

При досить малих тисках середня довжина вільного пробігу молекул λ може перевищувати лінійні розміри посудини L . Таке розрідження називається вакуумом. Вакуумною називається система обмеженого об'єму, у якій знаходиться газ під тиском, значно меншим від атмосферного. Основними одиницями тиску у вакуумних системах служать: *Па* (паскаль), *Торр* або *мм рт. ст.* та *мбар*, $1 \text{ Торр} = 1 \text{ мм рт.ст.} = 133322 \text{ Па} = 1,33322 \text{ мбар}$. Взагалі поняття вакууму відносне. Так, наприклад, для газу у пористих речовинах при розмірах пор порядку 10^{-5} см уже атмосферний тиск є вакуумом. Поняття вакууму застосовне тільки відносно газу, який міститься в об'ємі посудини (воно не застосовне відносно газу в космічному просторі).

Виберемо характерний лінійний розмір посудини L порядку 10 см . При цьому розрізняють такі ступені вакууму:

- а) низький ($\lambda < L$) – діапазон тисків $0,1 \text{ МПа} - 133 \text{ Па}$;
- б) середній ($\lambda \sim L$) – діапазон тисків $133 \text{ Па} - 0,133 \text{ Па}$
- в) високий ($\lambda \geq L$) – діапазон тисків $0,133 \text{ Па} - 1,33 \text{ мкПа}$;
- г) надвисокий ($\lambda \gg L$) – діапазон тисків $1,33 \text{ мкПа} - 13,3 \text{ нПа}$.

При інших розмірах посудини ступені вакууму будуть, звичайно, припадати на інші інтервали тисків.

Кількість газу у вакуумній техніці вимірюється величиною

$$Q = P \cdot V. \tag{1}$$

Відкачуваний об'єм з'єднаний з насосом трубопроводами, по яких у процесі відкачування тече потік газу. Потік газу дорівнює

$$I = \frac{dQ}{dt}. \quad (2)$$

Між потоком газу і різницею тисків P_1 і P_2 на кінцях трубопроводу має місце співвідношення

$$I = L(P_1 - P_2). \quad (3)$$

Тут величина L називається пропускною здатністю трубопроводу. Пропускна здатність у загальному випадку пов'язана з тиском у трубопроводі.

Отримання вакууму. Насоси

Одним з поширених методів отримання вакууму є використання насосів. Кожен насос, незалежно від конструкції, характеризується двома головними параметрами: швидкістю відкачування та граничним тиском. *Швидкістю відкачування* називається потік газу поділений на тиск газу при вході у насос

$$S = \frac{I}{P_{\text{ex}}}. \quad (4)$$

Швидкість відкачування вимірюється у $\text{м}^3/\text{с}$ і залежить не лише від конструкції насоса, але й від тиску P . Швидкість відкачування, починаючи з деякого тиску у будь-якого насоса починає зменшуватися. Той тиск, при якому $S = 0$ називається *граничним тиском*, тобто це той мінімальний тиск, до якого даний насос може відкачати вакуумну систему.

За величиною початкового тиску насоси можна поділити на насоси попереднього розрідження (форвакуумні) та високовакуумні. Насоси можуть працювати починаючи з атмосферного тиску і викидати газ у повітря.

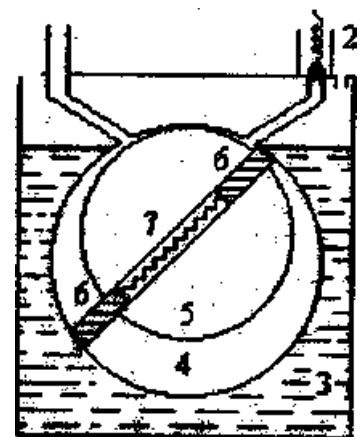


Рис. 28.1. Механічний

Найбільш поширеним форвакуумним ротаційний насос є механічний ротаційний насос (рис. 28.1). Він складається з циліндричної камери 4, у якій обертається циліндричний ротор 5 з лопатями 6. Пружина 7 між лопатями весь час щільно притискає їх до стінок камери. При обертанні ротора поза лопаттю створюється розрідження і туди по трубопроводу 1, що з'єднує насос з вакуумною системою, всмоктується газ. Друга лопать стискає цей газ і виштовхує його назовні через клапан 2. Насос вміщено у посудину 3 з маслом. На рис. 28.2 зображена PV – діаграма циклу роботи такого насоса. Під тиском $P_{вх}$ через патрубок 1 газ з вакуумної системи засмоктується у камеру 4 до об'єму V_0 (процес 1–2). Потім камера відділяється від входу ротором 5 і газ адіабатно стискається до тиску $P_{вих}$ (процес 2–3) і при постійному тиску виштовхується через клапан 2 назовні (процес 3–4). При цьому деяка кількість газу залишається під клапаном, об'єм якого під тиском $P_{вих}$ – V_x . Це є остаточний або шкідливий об'єм. При подальшому обертанні ротора 5 відбувається засмоктування нової порції газу через патрубок 1, але у камеру 4 попадає також газ із шкідливого об'єму V_x , який під тиском $P_{вх}$ займає об'єм V_1 , розширюючись при цьому адіабатно (процес 4–1). У

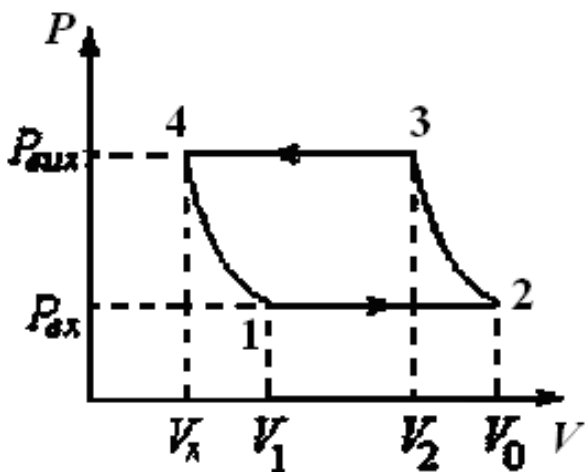


Рис. 28.2. P - V діаграма циклу роботи насоса

результаті цього за кожний цикл роботи насоса відкачується кількість газу, що дорівнює

$$Q = P_{вх} (V_0 - V_1).$$

Якщо за 1 с насос робить η циклів, то потік газу, що відкачується, дорівнює $I = nP_{вх} (V_0 - V_1)$.

$$I \text{ швидкість відкачування } S = n(V_0 - V_1) = nV_0 \left(1 - \frac{V_1}{V_0}\right).$$

Виражаючи V_1 з рівняння адіабати, для швидкості відкачування одержимо

$$S = nV_0 \left[1 - \frac{V_x}{V_0} \left(\frac{P_{вих}}{P_{вх}} \right)^{\frac{1}{y}} \right]. \quad (4')$$

Тоді з умови $S = 0$ знаходимо граничний тиск

$$P_{сп} = \left(\frac{V_x}{V_0} \right)^y P_{вих}. \quad (5)$$

Механічні насоси працюють, як правило, при $P_{вих} = 1 \text{ атм}$, тому їх роблять двоступеневими з метою пониження граничного тиску. При цьому два ступені працюють як окремі насоси, тільки вихід першого ступеня з'єднаний з входом другого. Тобто $P_{вих1} = P_{вх2}$. Якщо параметри V_x і V_0 обох ступенів однакові, то граничний тиск двоступеневого насоса дорівнює

$$P_{сп} = \left(\frac{V_x}{V_0} \right)^{2y} P_{вих}. \quad (6)$$

Для створення високого вакууму використовують явище дифузії газу в область пониженого тиску, яка зазвичай виникає у швидких струменях пари. На рис. 28.3 у розрізі показано схему паромасляного дифузійного насоса. При роботі нагрівника 1 пара масла, що кипить, піднімається по коаксіальним трубопроводам 2 і 3 і створює у соплах 4 і 5 струмені, напрямлені вниз. Потім пара конденсується і стікає по стінках у маслоприймач. Стінки насоса охолоджуються проточною водою. Молекули газу при цьому дифундують у струмені масляної пари. Для нормальної роботи дифузійного насоса потрібен форвакуум порядку 10^{-1} Торр , тобто такий, при якому довжина вільного пробігу молекул газу, що відкачується, була б велика у порівнянні зі щільною на рівні верхнього сопла і були умови для інтенсивної дифузії в струмінь масла біля сопла 4, а потім 5. Далі газ відкачується механічним насосом.

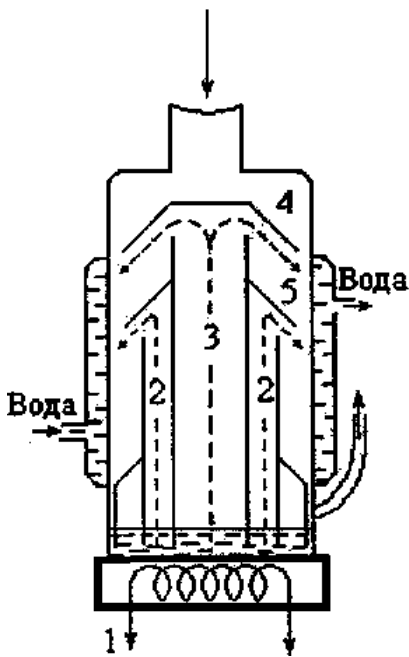


Рис. 28.3. Схема паромасляного дифузійного насоса

У дифузійному насосі повинно використовуватись масло досить термостійке і яке має низький тиск насиченої пари при кімнатній температурі.

При роботі насоса відбувається розділення масла на фракції. Найбільш Форвакуум важкі фракції, з найнижчим тиском насиченої пари попадають у верхнє сопло 4, оскільки мають велику температуру кипіння і випаровуються у центральній частині випаровувача. Більш легкі фракції випаровуються у паропровід 2 і попадають у сопло 5. При цьому вони не мають контакту з вакуумною системою, і якщо нема спеціальних вловлювачів, то у системі встановлюється тиск насиченої пари важкої фракції масла ($\sim 10^{-6}$ Торр).

Для створення надвисокого вакууму використовують турбомолекулярний насос. Його схема наведена на рис. 28.4. На осі насоса розміщено вал 1. На нього насаджені роторні диски 2. По периметру кожного диска містяться похило поставлені відбиваючі лопаті, схожі на лопаті ротора турбіни. З роторними дисками чергуються статорні диски 3, аналогічні роторним, але нерухомі. Ротор обертається з частотою 6000–12000 об/хв. Для роботи насоса потрібен форвакуум, при якому довжина вільного пробігу молекул більша за щілину між дисками. Молекули при ударах об відбиваючі лопаті одержують компоненти швидкості, напрямлені вздовж осі камери. Після кожного удару молекули відскакують від диска до диска, переміщуючись при цьому вздовж осі насоса від центра до краю. Граничний тиск такого насоса становить $\sim 10^{-10}$ Торр. Швидкість відкачування досить велика як для повітря, так і для інертних газів.

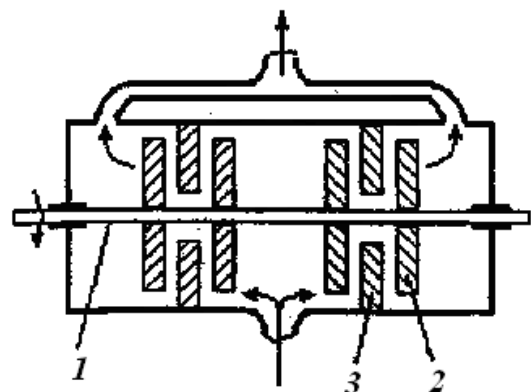


Рис. 28.4. Турбомолекулярний насос

Іншим насосом для надвисокого вакууму є іонно-сорбційний насос. Його дія ґрунтується на сорбції газу на поверхні щойно

напиленого металу, наприклад, титану. Схема такого насоса наведена на рис. 28.5. Насос складається з багатопластинчастого анода A і двох бічних катодів K з титану. На катода подається напруга $U = -5 \text{ кВ}$.

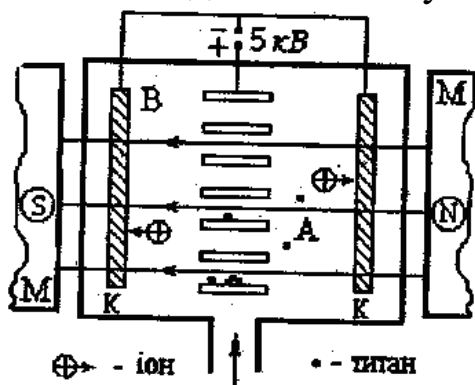


Рис. 28.5. Іонно-сорбційний насос

В просторі між електродами виникає газовий розряд, для полегшення створення якого вздовж осі системи накладається постійне магнітне поле індукції B , створене постійним магнітом M . Це поле утримує електрони у розрядній області та збільшує ймовірність іонізації молекул газу електронами. Електрони коливаються між катодами;

проскакуючи при цьому між пластинами анода. Додатні іони, що утворились в результаті іонізації газових молекул, прискорюються електричним полем і бомбардують катода. Матеріал катода розпилюється, в результаті чого на пластинках анода утворюється плівка напиленого титану на якій адсорбуються молекули газу. Ці молекули покриваються новими шарами титану. Чим більша площа поверхні пластин анода, тим більша швидкість відкачування насоса. Відкачування газу відбувається за рахунок втілення швидких іонів газу у матеріал катода. Граничний вакуум такого насоса становить

$\sim 10^{-2} \text{ Torr}$, але недоліком його є те, що швидкість відкачування інертних газів, які погано адсорбуються, у нього мала.

Вимірювання вакууму. Манометри

Найпростішим манометром є U – подібний манометр, з допомогою якого тиск вимірюється за різницею рівнів рідини у колінах. Граничний тиск для нього становить $0,1-0,5 \text{ Torr}$. U – подібний манометр, так само як і манометр Мак-Леода, є абсолютним манометром. Дія компресійного манометра Мак-Леода базується на вимірюванні U – подібним манометром тиску газу, попередньо стиснутого у певне число разів. Це дозволяє вимірювати тиски до $10^{-4}-10^{-5} \text{ Torr}$. Цей манометр використовується в основному для градуювання манометрів інших систем. На рис. 28.6 показано манометр Мак-Леода. Коли об'єм V_0 з'єднаний з вакуумною системою, газ у ньому знаходиться під тиском P_x . Рухомий резервуар R дозволяє заповнити цей об'єм рідиною, як правило, ртуттю, від'єднавши його від вакуумної системи.

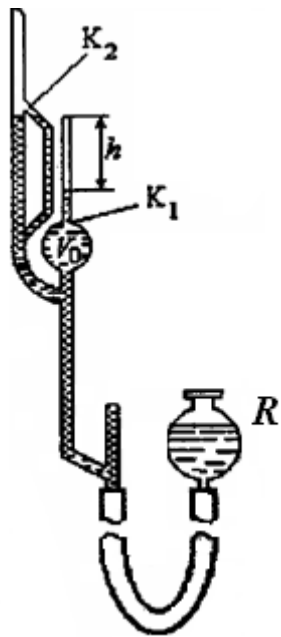


Рис. 28.6. Манометр Мак-Леода

Газ стискується у капілярі K_1 . Різниця рівнів ртуті у капілярах K_1 і K_2 служить мірою тиску P_x . Якщо, наприклад, довести рівень ртуті у капілярі K_2 до вершини капіляра K_1 то за законом Бойля-Маріотта $P_x V_0 = h^2 \sigma$, де σ – площа перерізу капіляра, однаковий для K_1 і K_2 , h – висота стовпчика газу у капілярі K_1 . Тоді

$$P_x = \frac{\sigma}{V_0} h^2 = \alpha h^2, \text{ де } \alpha \text{ – постійна манометра. До}$$

недоліків манометра Мак-Леода можна віднести наявність ртуті, яка своєю парою забруднює установку та відсутність неперервності у показах тиску в системі.

У вакуумній техніці широко використовуються різні електричні манометри. Одним з них є термоелектричний манометр, принцип дії якого базується на залежності коефіцієнта теплопровідності газу від тиску. Електрична схема терморного манометра з терморною лампою ЛТ-2 приведена на рис. 28.7. Лампа ЛТ-2 має нитку розжарювання, яка нагрівається електричним струмом. До середини нитки розжарювання прикріплено спай терморпар T , а другий – має температуру стінок лампи. При зміні тиску у певному діапазоні його значень, теплопровідність газу починає залежати від тиску. Температура нитки розжарювання також починає змінюватися. Індикатором зміни температури служить термо-е.р.с., яка вимірюється вольтметром і є мірою тиску газу. У манометричній лампі теплопередача відбувається між ниткою і циліндричним корпусом лампи. Нитка розжарювання лампи ЛТ-2 має радіус $r \sim 10^{-4}$ м. Теплопровідність газу залежить від тиску при умові, що $\lambda \geq r$. При умові $\lambda \ll r$ залежності від тиску немає і манометр не працює.

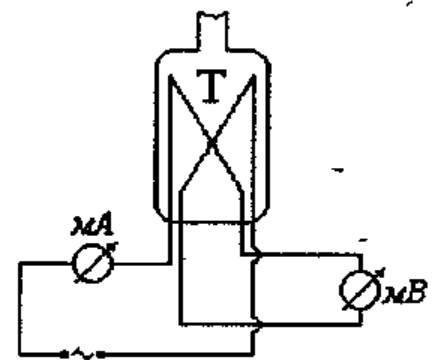


Рис. 28.7. Електрична схема терморного манометра

При малих тисках теплопровідність газу зменшується, а температура нитки зростає. При цьому втрати тепла, обумовлені тепловим випромінюванням і теплопровідністю держаків нитки, стають більшими, ніж тепловий потік, що переноситься газом і

температура нитки перестає визначатися його тиском. Це обмежує робочу область манометра з боку високих тисків. Робоча область манометра лежить у межах від $0,5$ до 10^{-3} Torr. Недоліком його є те, що він не абсолютний і потребує попереднього градування, яке залежить від роду газу, тиск якого вимірюється.

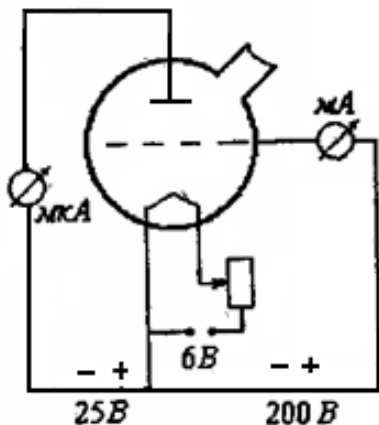


Рис. 28.8. Схема манометра з гарячим катодом на лампі

Для вимірювання тисків, менших за 10^{-3} Torr використовуються манометри, дія яких базується на іонізації газу та залежності іонного струму від тиску. Електрична схема такого манометра з гарячим катодом на лампі ЛМ-2 зображена на рис. 28.8. Лампа має катод, розміщений на осі циліндричного корпусу, навколо катода циліндричну сітку і далі – суцільний циліндричний анод. На сітку від катода подається $+200$ В, а на анод -25 В. Змінюючи розжарювання катода, встановлюють струм емісії електронів

визначеної величини, для лампи ЛМ-2 – $0,5$ мА. Електрони прискорюються полем сітки, проходять крізь неї, відштовхуються від анода, знову проходять крізь сітку і т.д. За рахунок коливань між катодом і анодом довжина шляху електронів збільшується і росте ймовірність зіткнення електронів з атомами і молекулами газу та їх іонізації. Позитивні іони, що утворюються, захоплюються анодом і створюють струм, який однозначно характеризує тиск газу $I_A = C \cdot P$

Коефіцієнт пропорційності C для лампи ЛМ-2 дорівнює $0,1$ А/Torr. Іонізаційний манометр вимірює тиск до 10^{-10} Torr. Обмеження пов'язане з труднощами вимірювання малих іонних струмів на фоні струму фотоемісії з анода. Фотоемісія виникає під дією м'якого рентгенівського випромінювання, яке виникає при гальмуванні електронів при їх попаданні на сітку.

Вакуумна установка

Схема вакуумної установки наведена на рис. 28.9. На схемі введені такі позначення: ΦH – форвакуумний насос; $ДН$ – дифузійний насос; B_2 – балон з якого відкачується повітря; IM – іонізаційний манометр; TM – термопарний манометр; B_1 – додатковий форвакуумний балон до дифузійного насоса; T – розрядна трубка для оцінки вакууму до виду світіння газового розряду; T_p – трубка з протіканням; L – вловлювач для масляної пари.

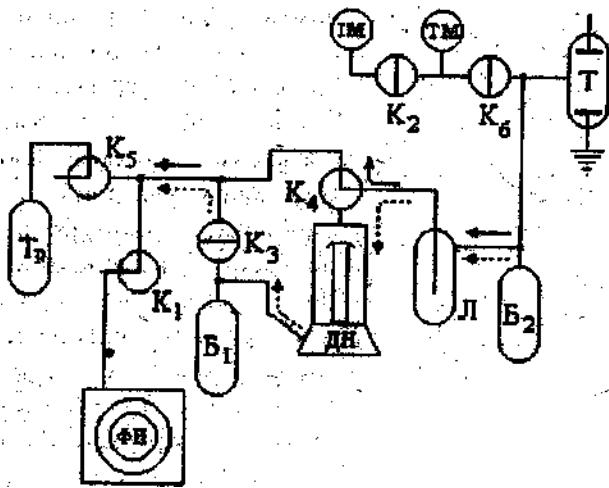


Рис. 28.9. Схема вакуумної установки

Форвакуумний насос ФН служить для створення попереднього розрідження, необхідного для роботи дифузійного насоса ДН.

Крани $K_1 - K_6$ служать для з'єднання окремих частин вакуумної установки між собою. Кран K_1 може з'єднувати форвакуумний насос або з установкою, або з атмосферою. У процесі відкачування він

встановлюється так, що з'єднує установку з насосом. При вимкненні форвакуумного насоса кран K_1 необхідно з'єднати з атмосферою, інакше атмосферний тиск видавить масло з робочої камери насоса у трубку, яка з'єднує насос з установкою. Відкачку повітря форвакуумним насосом з балона B_2 можна здійснювати як через насос ДН, так і безпосередньо. Для цього служать крани K_3 і K_4 . Якщо відкачування ведеться безпосередньо, то отвір у трубці триступеневого крана K_4 повинен бути повернутий у бік форвакуумного насоса і відкачування з балона B_2 йде у напрямку суцільних стрілок (перший шлях). Кран K_3 при цьому повинен бути закритий. Таким чином насос ДН повністю від'єднаний від установки.

При переключенні крану K_4 у бік насоса ДН, відкачування йде у напрямку пунктирних стрілок, тобто через дифузійний насос (другий шлях). При цьому кран K_3 відкритий. Перед початком відкачування, коли тиск у балоні B_2 більший за граничний тиск форвакуумного насоса, треба створити попереднє розрідження, необхідне для роботи насоса ДН, і проводити відкачування спочатку по першому шляху і лише потім по другому. Взагалі кажучи, частина установки, яка зв'язана з дифузійним насосом (насос ДН і балон B_1), завжди повинна знаходитись "під вакуумом", щоб виключити поглинання повітря маслом дифузійного насоса.

При виконанні вправ, під час яких тиск змінюється від атмосферного до форвакуумного, ця частина установки повинна бути від'єднана, що відповідає закритому крану K_3 і першому положенню крану K_4 . Це запобігає попаданню у розігрітий дифузійний насос газу під високим тиском, тому що масло, яке міститься у насосі згоряє і

насос виходить з ладу.

Завдання 1. Ознайомлення з будовою вакуумних насосів

Порядок виконання роботи

1. Детально ознайомитись з розбірним макетом насоса *BH – 461M*. Визначити шлях відкачуваного газу всередині насоса від входу до виходу. Визначити число ступенів насоса.

2. Виміряти корисний об'єм робочої камери одного із ступенів насоса,

3. Виміряти діаметр та довжину каналу, що сполучає камеру з випускним клапаном насоса. Обчислити шкідливий об'єм.

4. За формулою (5) або (6), в залежності від числа ступенів насоса. Обчислити граничний тиск, вважаючи камери насоса однаковими ($\gamma = 1,4$).

5. Обчислити за формулою (4') швидкість відкачування при значеннях вхідного тиску 0,1 та 0,001 *Torr* при кількості обертів $n = 9$ об/с.

Завдання 2. Ознайомлення з приладами для вимірювання тиску та будовою вакуумної установки

Порядок виконання роботи

1. Замалювати електричних вакуумметрів: термодіффузійного та іонізаційного. Вказати робочі області кожного з манометрів тих типів, які використовуються на вакуумній установці.

2. Замалювати манометр Мак-Леода. Вивчити принцип дії даного манометра.

3. Детально ознайомитись зі схемою вакуумної установки і призначенням кожної деталі. Замалювати схему установки.

Завдання 3. Вивчення процесу відкачування та вимірювання граничного вакууму з допомогою форвакуумного насоса

Порядок виконання роботи

1. При виконанні цієї вправи користуються тільки форвакуумним насосом. Тиск вимірюється термодіффузійним манометром. Іонізаційний манометр повинен бути вимкнений, кран K_2 – закритий. У вихідному стані всі крани повинні бути закриті (отвори у корпусах кранів

повернуті до працюючого). Переконавшись, що всі крани закриті, увімкнути нагрівач термopарного манометра у мережу 127 В. Реостатом R (див. рис. 28.7.) встановити силу струму, вказану на цоколі манометричної лампи.

2. Запустити у дію форвакуумний насос. Для цього декілька разів (2–3 рази) швидко увімкнути двигун насоса для того, щоб видалити масло з його камер. Увімкнути насос і зачекати 2–3 хв. Краном K_1 під'єднати насос до установки. При повороті крана треба однією рукою притримувати муфту крана, щоб запобігти його поломці. Краном K_4 під'єднати до насоса балон B_2 , а краном K_6 термopарний манометр TM . Відкачування проводиться обминаючи насос $ДН$ і балон B_1 . Тому кран K_3 повинен бути перекритий. По зміні показів термopарного манометра переконатись у тому, що насос працює.

3. Про величину розрідження газу в установці можна зробити висновок, спостерігаючи за характером газового розряду, який збуджується трансформатором Тесла у трубці T . Трансформатор вмикається тумблером, розміщеним на панелі установки. При вмиканні трансформатора кран K_6 повинен бути закритий. Результати спостережень заносять, у таблицю.

Завдання 4. Визначення місць натікання у вакуумній установці

У зібраній вакуумній установці часто виникають порушення герметичності, тобто натікання газу. Визначення місць натікання проводиться різними методами, самим розповсюдженим з яких є *метод іскри*. У цьому методі використовують трансформатор Тесла. Якщо кінець провідника вторинної обмотки піднести до поверхні скляної трубки чи балона з розрідженим газом, то з нього на скло перекинеться невпорядкований пучок іскор. Якщо поблизу є ушкоджене місце (невидимий оком отвір, невидима тріщина тощо), то у точку натікання починає бити іскра, яка різко відрізняється своєю інтенсивністю і кольором.

У даній вправі ушкоджене місце варто шукати у трубці T_p . Для цього треба закрити крани K_6 і K_4 , щоб відключити манометр TM , і краном K_5 з'єднати трубку T_p з насосом $ФН$. Кінцем вторинної обмотки трансформатора Тесла дослідити поверхню скла трубки T_p і місця натікання помітити спеціальним олівцем.

Цей метод придатний у діапазоні тисків від декількох $Torr$ до $10^{-3} Torr$.

Після закінчення вправи від'єднати краном K_5 трубку T_p від установки, потім відкрити крани K_4 і K_5 і знову відкачати балон B_2 до граничного вакууму.

Завдання 5. Отримання та вимірювання високого вакууму

Порядок виконання роботи

1. Після досягнення граничного тиску, що створюється форвакуумним насосом ($\sim 10^{-2}$ Torr), можна пускати у дію дифузійний насос. Для цього перемкнути крани K_3 і K_4 так, щоб відкачування балона B_2 здійснювалося через насос ДН.

2. Пустити воду з водопровідного крана у систему охолодження насоса ДН. Переконатись по стоку води у її достатній кількості й увімкнути нагрівач дифузійного насоса. При цьому повинна загорітися сигнальна лампа, закріплена біля насоса. При припиненні подачі води треба негайно вимкнути нагрівач і повідомити про це викладача чи лаборанта. Під час розігрівання насоса з масла починає виділятися поглинутий газ. Тому спочатку тиск у системі дещо підвищиться. Розігрівання насоса триває 10–15 хв.

3. За допомогою манометра TM слідкують за тиском у системі. Після того, як тиск не буде перевищувати 10^{-3} Torr, вмикають іонізаційний манометр. Подальші вимірювання тиску проводять з його допомогою.

4. Після вимірювання тиску вимикають манометр, закривають кран K_6 і спостерігають світіння розряду у трубці T . *Треба слідкувати, щоб при роботі розрядної трубки манометр був вимкнений!*

5. Після досягнення граничного вакууму вимикають манометри і нагрівач дифузійного насоса. Треба закрити всі крани (отвори у кранах повернуті до працюючого). *Подачу води у системі охолодження насоса ДН не припиняти до його повного охолодження, тому що передчасне її припинення призводить до псування масла у насосі.*

6. Вимикають форвакуумний насос, краном K_1 сполучають його вхід з атмосферою.

7. Переконавшись у тому, що насос ДН охолодився, припиняють подачу води у систему охолодження.

Контрольні запитання

1. Що таке вакуум? Де його застосовують? Класифікація вакууму за ступенями розрідження. Одиниці вимірювання вакууму.
2. З яких основних частин складається вакуумна установка?
3. Як залежить швидкість відкачування форвакуумним насосом від тиску?
4. Чим визначається граничний вакуум? Вивести формулу для граничного вакууму механічного насоса.
5. Як залежить теплопровідність газу від тиску?
6. Будова і принцип роботи манометра Мак-Леода. Що таке постійна манометра?
7. Пояснити принцип дії термодіффузійного манометра. Які його недоліки? Яка у нього робоча область?
8. Пояснити принцип дії іонізаційного манометра. Яка у нього робоча область?
9. Які насоси застосовуються для попереднього розрідження? Пояснити, як працює ротаційний механічний насос.
10. Пояснити, як працює паромасляний дифузійний насос. Якими властивостями повинна володіти рідина у дифузійному насосі? Чому він не може працювати при великих вхідному і вихідному тисках?
11. Які ви знаєте високо вакуумні насоси. Як вони працюють?

Лабораторна робота № 29

Моделювання необоротності теплових процесів (розширення газу в пустоту, дифузія та теплопровідність)

Мета роботи: Показати, що теплові процеси проходять в одному напрямі: від впорядкованості до хаотичності.

Прилади і матеріали: установка для моделювання молекулярних явищ (УММЯ), метроном.

Завдання:

1. Готуючись до лабораторної роботи, докладно опрацювати літературу [5] і теоретичні відомості в даному посібнику.
2. Дослідити залежність імовірності стану системи від кількості частинок.

Теоретичні відомості та опис установки

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії має статистичний характер. Статистичний метод застосовують до вивчення явищ, які є сукупністю величезної кількості подібних між собою явищ. Прикладом такого явища може бути стан газу, який визначається поведінкою величезної кількості молекул, рух кожної з яких можна розглядати як найпростіше явище. Проте молекулярний рух не можна розглядати як механічний рух сукупності молекул, бо сукупність великої кількості молекул має якісно інші властивості порівняно з тими, які має окремо взята молекула. У мікросвіті основну роль відіграють випадкові події. При розв'язуванні завдань молекулярно-кінетичної теорії використовують закони теорії ймовірності, яка вивчає випадкові явища. Введемо поняття ймовірності стану. Якщо є n незалежних і однаково можливих подій (загальне число можливих подій) і серед них m таких, що з ними пов'язане виникнення явища, яке нас цікавить (число сприятливих подій), то відношення $p = m/n$ називається ймовірністю виникнення цього явища. До поняття ймовірності вдаються тоді, коли йдеться про випадкові події, умови виникнення яких невідомі, і які не можна передбачити. Всяка випадкова подія характеризується певною ймовірністю її виникнення. Розподіл молекул у просторі є випадковим явищем. Тому при даних умовах (температурі, густині, характері взаємодії між молекулами) розподіл молекул у просторі характеризується певною ймовірністю.

Якщо газ знаходиться в рівноважному стані і на нього не діють зовнішні сили, то його макроскопічні параметри (тиск, температура, густина) в кожній точці об'єму будуть однакові. Це свідчить про рівномірний розподіл молекул по всьому об'ємі. Такий стан буде найстійкіший і його імовірність найбільша. Рівноважним називають такий стан системи, який не змінюється з часом. Тобто макроскопічні параметри (густина, тиск, температура) залишаються сталими в усіх точках системи. Мікроскопічні ж характеристики (координати і швидкості частинок) з часом змінюються.

Установка для моделювання молекулярних явищ

Загальний вигляд запропонованої установки подано на рис. 29.1, а її схематичне зображення – на рис. 29.2. Вона складається з таких основних вузлів: прозорої кювети (1), кількох десятків пінопластових кульок (2), котушки з осердям (3), підставки (5), джерела змінної

регульованої напруги (6), демонстраційного амперметра (7). Кювету (1) виготовляють з тонкого органічного скла у формі прямокутної призми, яка має розміри $70 \text{ мм} \times 160 \text{ мм} \times 180 \text{ мм}$. Такі розміри, з одного боку, забезпечують її достатню видимість для всіх учнів класу, з другого – створюють належні умови для проведення модельного експерименту (розподіл магнітного потоку по об'єму кювети).

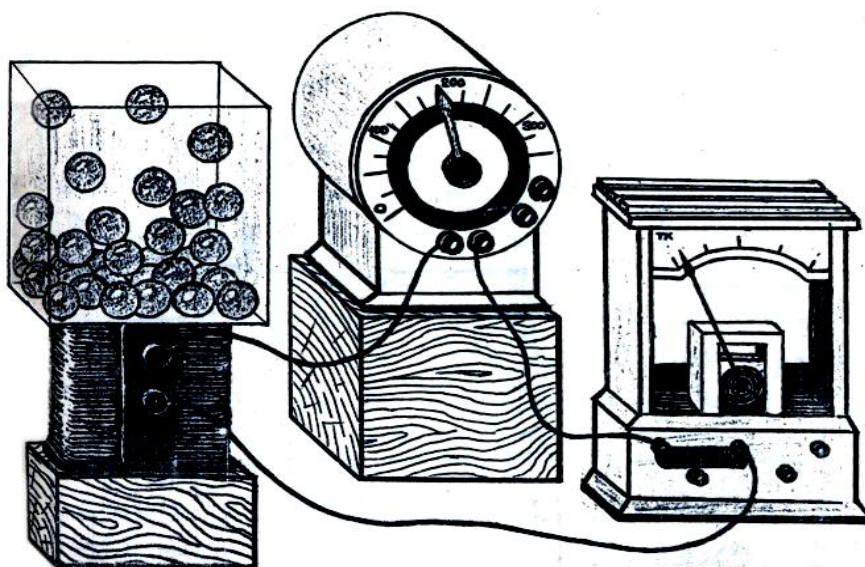


Рис. 29.1. Загальний вигляд установки для моделювання молекулярних явищ

При умові використання установки для індивідуальної роботи учнів (робота фізичного практикуму), розміри кювети можна зменшити ($70 \text{ мм} \times 100 \text{ мм} \times 140 \text{ мм}$), що забезпечить більш високий рівень модельного експерименту.

Кювету заповнюють кульками (діаметр кожної – 12 мм), виготовлених з твердого пінопласту, який має добрі пружні властивості.

Технологія виготовлення кульок не складна. Їх вирізують із шматка пінопласту за допомогою ніхромової дротини, зігнутої у формі кільця відповідного діаметру.

До кінців ніхромової дротини підводять напругу, значення якої вибирають експериментально. В середину кожної кульки вставляють кусочок керамічного магніту, який закріплюють клеєм. Розміри керамічних магнітів, які поміщають в середину кульок, становлять $3\text{--}4 \text{ мм}$. Частина кульок (75 %) – білі, решта (25 %) – пофарбовано в рожевий колір. Такий розподіл кульок за кольором потрібний буде для проведення відповідних дослідів.

Для фарбування кульок використовують спиртове чорнило або пасту від кулькових ручок, розчинену в спирті. Поверхню пінопластових кульок покривають водним розчином клею ПВА, що надає їм більшої міцності та запобігає електризації в наслідок тертя.

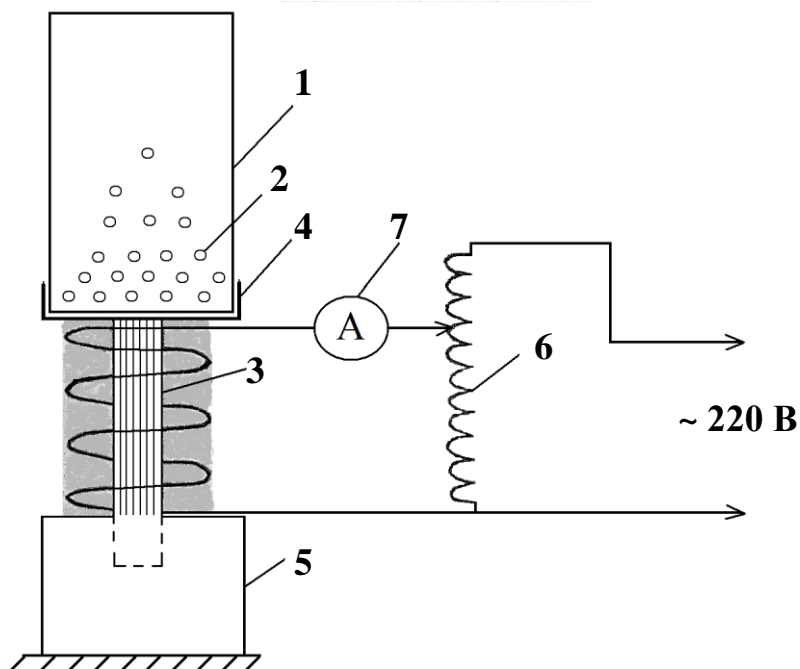


Рис. 29.2. Схематичне зображення установки для моделювання молекулярних явищ

Наші дослідження показали, що кульки діаметром 12 мм забезпечують оптимальні умови модельного експерименту.

Тут враховуються:

- а) вимога видимості експерименту;
- б) маса кульок, а, отже, і сила тяжіння, яка діє на них;
- в) необхідність зведення до мінімуму взаємного притягання кульок за рахунок магнітних сил, викликаних керамічними магнітиками.

Сила відштовхування між кульками виникає під час їх пружних співударів.

Котушка з осердям (3) служить для створення змінного магнітного поля, в якому рухаються пінопластові кульки з керамічними магнітиками. Котушку складають з деталей шкільного універсального трансформатора. Для цього використовують котушку на 220 В, в яку поміщають ярмо трансформатора, закріплене на підставці (5). На осердя котушки надівають спеціальну насадку (4), яку виготовляють з листової електротехнічної сталі товщиною 3–4

мм. Насадка служить, з одного боку, для рівномірного розподілу магнітного потоку по всій площі основи кювети, а з другого – підставкою, на якій розміщують кювету з кульками під час досліду.

Котушка живиться змінною регульованою напругою (0–250 В) від шкільного регулятора напруги (6).

Демонстраційний амперметр (7) вимірює силу струму, яку споживає обмотка котушки. Покажемо, що сила струму в цій установці моделює температуру відповідної системи (газ, рідина, тверде тіло).

Енергія кульок, які моделюють рух молекул речовини у відповідному агрегатному стані, поповнюється за рахунок магнітного поля котушки. Позначимо середнє за період значення індукції магнітного поля котушки через \vec{B}_c . Керамічний магнітик кульки можна розглядати як магнітний диполь з моментом \vec{P}_m . Тоді середню потенціальну енергію взаємодії кожної кульки з магнітним полем можна обчислити за формулою:

$$W_p = (\vec{P}_m \cdot \vec{B}_c) = P_m \cdot B_c \cos \alpha, \quad (1)$$

де α – кут між векторами \vec{P}_m і \vec{B}_c .

Середнє за період значення індукції магнітного поля для даної котушки можна приблизно визначити за відповідною формулою для нескінченно довгого соленоїда:

$$B_c = \mu_0 \mu n I, \quad (2)$$

де n – кількість витків дротину котушки, що припадає на одиницю її довжини.

Якщо врахувати, що котушка, яка використовується в даній установці, не є нескінченно довгим соленоїдом і, крім того, має місце деяке розсіювання магнітного потоку, то

$$B_c = \beta \mu_0 \mu n I, \quad (3)$$

де β – деякий коефіцієнт, який враховує ці фактори.

Тому енергія взаємодії кульки з магнітним полем котушки буде рівна:

$$W_p = \beta P_m \mu_0 \mu n I \cos \alpha. \quad (4)$$

Якщо припустити, що магнітні моменти кульок майже однакові і магнітний потік розподіляється приблизно рівномірно по всій площі основи кювети, то енергія взаємодії (4) при даній силі струму буде залежати тільки від значення $\cos \alpha$ і змінюватиметься від 0 до деякого максимального значення:

$$W_{p \max} = \beta P_m \mu_0 \mu n I . \quad (5)$$

Оскільки потенціальна енергія (5) перетворюється в кінетичну енергію кульки, то цілком зрозуміло, що матиме місце розподіл кульок за енергіями і за швидкостями. Тому на основі закону збереження енергії можна записати:

$$\frac{m v_{\max}^2}{2} = \beta P_m \mu_0 \mu n I . \quad (6)$$

Покладемо, що кожна кулька має три ступені вільності, тоді:

$$\frac{m v_{\max}^2}{2} = \frac{3}{2} k T . \quad (7)$$

Прирівнявши праві сторони рівності (6) і (7), одержимо:

$$\frac{3}{2} k T = \beta P_m \mu_0 \mu n I .$$

Звідки знаходимо:

$$T = \frac{2 \beta P_m \mu_0 \mu n}{3k} I . \quad (8)$$

Ввівши нову сталу: $\gamma = \frac{2 \beta P_m \mu_0 \mu n}{3k}$, рівність (8) можна записати так:

$$T = \gamma \cdot I . \quad (9)$$

Зауважимо, що коефіцієнт пропорційності можна виміряти експериментально на цій установці.

Як видно з рівності (9), температура системи моделюється силою струму, яка вимірюється демонстраційним амперметром. На установці можна дослідити залежність середньої кінетичної енергії поступального руху „молекул” від „температури”.

Хід роботи

Кювету ділять заслінкою на дві однакові частини. В ліву частину кювети поміщають одну білу та одну рожеву кульку. На котушку приладу подають напругу, яка забезпечує моделювання руху молекул газу. Після піднімання заслінки обидві кульки будуть рухатися по всій кюветі (відбулося розширення “газу” в “пустоту”). Якщо опустити перегородку, то може виявитися одне із чотирьох розміщень кульок: обидві кульки лишилися в лівій частині кювети; обидві кульки перемістилися в праву частину; в лівій частині знаходиться рожева кулька, а у правій – біла; у лівій частині знаходиться біла кулька, а у правій – рожева (Таблиця 1.). Виходячи

з означення, ймовірність кожного стану рівна $p = \frac{1}{4} = 1/2^2$. Ймовірність рівномірного розподілу кульок по всьому об'єму кювети дорівнює 0,5, тобто в два рази більша. При проведенні експерименту опускають перегородку через однакові проміжки часу. Для їх визначення використовують метроном. Випробовування виконують 80 разів, дані вимірювань та обчислень заносять у таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Розміщення кульок		Кількість випадків	Ймовірність стану
	Ліва частина	Права частина		
1	р, б	-	21	$p_1 = 21/80 = 0,2625$
2	р	б	17	$p_2 = 17/80 = 0,2125$
3	б	р	20	$p_3 = 20/80 = 0,25$
4	-	р, б	22	$p_4 = 22/80 = 0,275$

Як видно з таблиці 1, ймовірність того, що всі кульки знову зберуться в лівій частині кювети p_1 ; а ймовірність розподілу кульок по всьому об'єму кювети $p = p_2 + p_3$.

Далі кладуть в ліву частину кювети три кульки різних кольорів (рожеву, білу, зелену). Після підняття та опускання через деякий час перегородки можливе одне із восьми розміщень кульок. Теоретична ймовірність кожного стану рівна $p = 1/8 = 1/2^3$.

Під час проведення експерименту здійснюють знову 80 випробовувань. Дані експерименту записують в таблицю.

Результати експерименту показують: імовірність того, що всі три кульки будуть знаходитися в лівій частині кювети дорівнює p_1 . Імовірність розподілу кульок по всьому об'ємі кювети рівна $p = p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 = 1 - (p_1 + p_8)$.

Якщо взяти чотири кульки різних кольорів (рожеву, синю, зелену, білу), то вони можуть розміститися в двох частинах кювети шістнадцятьма способами. Тоді теоретична ймовірність кожного стану однакова і рівна $p = 1/16 = 1/2^4$. Проводять експеримент, заносючи дані в таблицю.

Імовірність того, що всі чотири кульки знову зберуться в лівій частині кювети $p = \frac{1}{16} = \frac{1}{2^4}$, а ймовірність розподілу молекул у всьому об'ємі кювети $p = 1 - (p_1 + p_{16}) = \frac{7}{8}$. Найбільше число випадків

відповідає такому стану, коли кульки розміщуються рівномірно по всьому об'єму кювети. Отже, ймовірність того, що в кожній частині кювети міститься по дві кульки дорівнює $p = m/n = p_6 + p_7 + p_8 + p_9 + p_{10} + p_{11}$. З аналізу результатів проведених експериментів роблять висновок. Із збільшенням кількості кульок імовірність того, що всі вони знову зберуться в лівій частині кювети, зменшується, а ймовірність p розподілу кульок по всьому об'єму кювети зростає.

Якщо посудина заповнена газом при нормальних умовах, то в 1 см^3 міститься $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. Тоді ймовірність того, що всі молекули газу зберуться в одній частині посудини (газ сам стиснеться) рівна $p = 1/2^{2,7 \cdot 10^{19}}$. Це настільки мала величина, що практично такий розподіл є неможливим.

Отже, закон, за яким молекули газу, рухаючись хаотично, намагаються заповнити весь наданий йому об'єм є статистичним законом, який ґрунтується на теорії ймовірності. Аналогічно відбувається явище дифузії двох речовин. Ймовірність змішування молекул зростає із збільшенням їх кількості. При великій кількості частинок процес дифузії проходить в одному напрямі: відбувається змішування молекул речовин, а не їх розділення.

Процес теплопередачі також відбувається за статистичним законом. Рівномірний розподіл швидких і повільніших молекул по всьому об'єму є більш ймовірний, ніж такий стан, коли б усі швидкі молекули зібралися в одній частині посудини.

Отже, в усіх наведених випадках система, яка полишена сама на себе, переходить від менш імовірного до більш імовірного рівноважного стану.

Аналізуючи розподіл молекул газу по всьому об'єму, ми враховували лише їх тепловий (хаотичний) рух. Він приводить до того, що молекули газу розподіляються рівномірно по всьому об'єму. Такий стан буде в тому випадку, коли на молекули не діють сторонні сили. В протилежному разі дія сил поля веде до встановлення нерівномірних густин у різних частинах об'єму газу. Прикладом такого стану може бути розподіл молекул атмосфери в полі сил земного тяжіння.

Контрольні запитання

1. Опишіть поняття температури.
2. У чому полягає статистичний характер температури? Які ще термодинамічні параметри мають статистичний характер?

3. Що таке модель та метод моделювання?
4. Які моделі використовують у молекулярній фізиці?

ДОДАТКИ

Таблиця 1. Основні фізичні константи

Назва	Позначення	Числове значення
Швидкість світла у вакуумі	c	$299792458 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Нормальне прискорення вільного падіння	g	$9,80665 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$
Гравітаційна стала	γ, G	$6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Стала Авогадро	N_A	$6,0221367 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стала Больцмана	k	$1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \text{ К}^{-1}$
Число Лошмідта	n_L	$2,686763 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
Універсальна газова стала	R	$8,31451 \text{ Дж} (\text{моль} \text{ К})^{-1}$
Атомна одиниця маси	а.о.м.	$1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Нормальний атмосферний тиск	$P_{атм}$	101325 Па
Об'єм одного моля ідеального газу при нормальних умовах	V_μ	$22,4141 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ моль}^{-1}$
Нормальні умови	$P_{атм}$ T	101325 Па $273,15 \text{ К}$

Таблиця 2. Деякі фізичні характеристики газів

Густина при нормальних умовах ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; температурний коефіцієнт об'ємного розширення в інтервалі температур $0 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$ при нормальному атмосферному тиску β , К^{-1} ; питома теплоємність при сталому тиску c_p і сталому об'ємі c_v для температури 20°C і тиску 101325 Па , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; c_p / c_v ; теплопровідність λ при 0°C і нормальному атмосферному тиску $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, коефіцієнт внутрішнього тертя η при 0°C , $\text{мкПа} \cdot \text{с}$, середня довжина вільного пробігу молекул ℓ при 25°C і тиску 101325 Па , мкм .

Газ	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\beta, \text{К}^{-1}$	$c_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$c_v, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	c_p / c_v	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	η мкПа·с	ℓ мкм
Азот	1,2505	0,003672	1,051	0,745	1,40	0,0242	16,5	0,067
Аргон	1,7839	0,003676	0,523	0,322	1,67	0,0162	21,0	0,067
Водень	0,08988	0,003664	14,269	10,132	1,41	0,173	8,5	0,123
Вуглекислий газ	1,9769	0,003726	0,837	0,653	1,3	0,0143	13,7	0,044
Гелій	0,17846	0,00366	5,296	3,182	1,66	0,143	18,8	0,194
Кисень	1,42895	0,003672	0,913	0,653	1,4	0,0245	19,2	0,071
Повітря сухе	1,2928	0,003665	1,009	0,720	1,4	0,0244	17,1	0,067

Таблиця 3. Деякі фізичні характеристики рідин

Густина ρ при 20°C , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, поверхневий натяг на межі “рідина-повітря” σ при 20°C , $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$, коефіцієнт внутрішнього тертя η при 20°C , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ або $\text{мПа} \cdot \text{с}$; коефіцієнт об’ємного розширення β при 20°C , К^{-1} ; питома теплоємність c при 20°C , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; температура кипіння при нормальному атмосферному тиску t_k , $^{\circ}\text{C}$; питома теплота пароутворення при температурі кипіння і нормальному атмосферному тиску r $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; теплопровідність λ при 20°C , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Рідина	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	σ $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$	η мПа·с	$\beta, 10^{-6}$ К^{-1}	$c_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$t_k, ^{\circ}\text{C}$	$r, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Вода	998,203	72,75	1,004	208	4182	100,00	2256	0,599
Гліцерин	1260	63	1499	505	2430	290,0	830	0,285
Мильний розчин	-	40	-	-	-	-	-	-
Маса трансф.	840-890	-	19,8	600	1880	-	-	0,131
Ртуть	13545,7	472	1,554	181	139	356,66	293,1	7,8(0°C)

Спирт	789,4	22,0	1,19	1100	2470	78,3	906,0	0,159
-------	-------	------	------	------	------	------	-------	-------

Таблиця 4. Деякі фізичні характеристики твердих тіл

Густина ρ при 20°C , якщо не вказана температура, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; температурний коефіцієнт лінійного розширення α в інтервалі температур $0-100^{\circ}\text{C}$, K^{-1} ; питома теплоємність c при 20°C , якщо не вказана температура, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; теплопровідність χ при 20°C , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; температура плавлення $t_{\text{пл}}$, $^{\circ}\text{C}$; питома теплота плавлення при температурі плавлення λ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Речовина	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\alpha, 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\chi, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$t_{\text{пл}}, ^{\circ}\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Алюміній	2698,9	23,8	896	209(0°C)	660,6	393
Граніт	2500-3000	6-9	800($0-100^{\circ}\text{C}$)	3,42		
Залізо	7874	12,2	452	73,3	1539	270,0
Латунь	8300-8700	17,0-21,2	390-410	106		
Лід	916(0°C)	51($-20-0^{\circ}\text{C}$)	2122(0°C)	2,26(0°C)	0,00	332,4
Мідь	8960	17,1	383	395,4(0°C)	1084,88	213
Парафін	870-920	130($0-38^{\circ}\text{C}$)	2890	0,27(0°C)	38-56	147
Скло лаб.	2450-2720	9,5($20-200^{\circ}\text{C}$)	840($0-100^{\circ}\text{C}$)	0,814	460-800	
Сталь	7600-7900	12,0	460($20-200^{\circ}\text{C}$)	45-58	1300-1500	

Таблиця 5. Тиск P і густина ρ насиченої водяної пари при різній температурі

$t, ^{\circ}\text{C}$	$P, \text{Па}$	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$P, \text{Па}$	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$P, \text{Па}$	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$
-----------------------	----------------	-------------------------------------	-----------------------	----------------	-------------------------------------	-----------------------	----------------	-------------------------------------

0	611	4,85	18	2062	15,39	36	5941	41,8
1	656	5,20	19	2196	16,32	37	6276	44,0
2	705	5,57	20	2337	17,32	38	6625	46,3
3	757	5,95	21	2486	18,35	39	6991	48,7
4	813	6,37	22	2642	19,44	40	7376	51,2
5	872	6,80	23	2809	20,60	45	9583	65,4
6	935	7,27	24	2984	21,81	50	12333	83,2
7	1005	7,70	25	3168	23,07	55	15732	104,3
8	1072	8,28	26	3361	24,40	60	19915	130,5
9	1148	8,83	27	3565	25,79	65	24998	161
10	1227	9,41	28	3780	27,26	70	31158	198,4
11	1312	10,02	29	4005	28,7	75	38543	242
12	1401	10,67	30	4242	30,3	80	47302	293
13	1497	11,36	31	4493	32,1	85	57808	354
14	1597	12,08	32	4754	33,9	90	70100	424
15	1704	12,84	33	5030	35,7	95	84513	506
16	1817	13,65	34	5320	37,6	100	101325	598
17	1937	14,50	35	5624	39,6			

Таблиця 6. Психрометрична таблиця

Покази сухого термометра, °C	Різниця показів сухого і вологого термометрів, °C											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
	Відносна вологість, %											
0	100	81	63	45	28	11	-	-	-	-	-	
1	100	83	65	48	32	16	-	-	-	-	-	
2	100	84	68	51	35	20	-	-	-	-	-	
3	100	84	69	54	39	24	10	-	-	-	-	
4	100	85	70	56	42	28	14	-	-	-	-	
5	100	86	72	58	45	32	19	6	-	-	-	
6	100	86	73	60	47	35	23	10	-	-	-	
7	100	87	74	61	49	37	26	14	-	-	-	
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	-	-	
9	100	88	76	64	53	42	34	21	11	-	-	
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	-	
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8	-	
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-	
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6	
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9	
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12	
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15	
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17	

18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Таблиця 8. Надійні ймовірності α для надійного інтервалу, вираженого в долях середньої квадратичної похибки $\frac{\Delta x}{\sigma}$.

α	$\frac{\Delta x}{\sigma}$	α	$\frac{\Delta x}{\sigma}$	α	$\frac{\Delta x}{\sigma}$
0	0	0,77	1,2	0,991	2,6
0,04	0,05	0,81	1,3	0,993	2,7
0,08	0,1	0,84	1,4	0,995	2,8
0,12	0,15	0,87	1,5	0,996	2,9
0,16	0,2	0,89	1,6	0,997	3,0
0,24	0,3	0,91	1,7	0,9981	3,1
0,31	0,4	0,93	1,8	0,9986	3,2
0,38	0,5	0,94	1,9	0,9990	3,3
0,45	0,6	0,95	2,0	0,9993	3,4
0,52	0,7	0,964	2,1	0,9995	3,5
0,58	0,8	0,972	2,2	0,9997	3,6
0,63	0,9	0,979	2,3	0,9998	3,7
0,68	1,0	0,984	2,4	0,99986	3,8
0,73	1,1	0,988	2,5	0,99990	3,9

Таблиця № 9. Граничні абсолютні похибки деяких мір

№ п/п	Назва міри	Значення міри, діапазон вимірювання	Ціна поділки шкали	Межа похибки засобу вимірювання або гранична абсолютна похибка
1.	Лінійки: а) металеві б) дерев'яні в) пластмасові з накатаними поділками шкали	500, 1000 мм 300, 400, 500, 750 мм 250, 300 мм	1 мм 1 мм 1 мм	0,2 мм 0,5 мм 1 мм
2.	Рулетки і міри кравецькі (Рулетки вимірювальні неметалеві, ГОСТ 11900-66).	1 м 1,5 м; 2 м	5 мм 5 мм	1 мм 3 мм
3.	Комплект гир ГОСТ 7328	10 мг 20 мг 50 мг 100 мг 200 мг 500 мг 1 г 2 г 5 г 10 г 20 г 50 г 100 г		0,25 мг 0,3 мг 0,4 мг 0,5 мг 0,6 мг 0,8 мг 1,0 мг 1,2 мг 1,5 мг 2,0 мг 2,5 мг 3,0 мг 5,0 мг
4.	Набір тягарців з двома гачками	100 г	-	2 г
5.	Мензурки 2-го класу, ГОСТ 1770-64	100, 250, 500, 1000 мл	10 мл 25 мл 25 мл 50 мл	5,00 мл 5,00 мл 12,50 мл 25,00 мл
6.	Циліндри мірні (наливні) 2-го класу, ГОСТ 1770-64	100 мл 250 мл 500 мл 1000 мл	1 мл 5 мл 5 мл 10 мл	0,25 мл 1,25 мл 2,50 мл 5, 00 мл
7.	Набір резисторів (шкільний)	1, 2, 5 Ом	-	3% номінального значення

8.	Магазин опорів штепсельний (шкільний)	10, 20, 50 Ом	-	1,5% номінального значення
----	---------------------------------------	---------------	---	----------------------------

Таблиця № 10. Граничні абсолютні похибки деяких вимірювальних приладів

№ п/п	Назва вимірювального приладу	Діапазон вимірювання	Ціна поділки шкали	Межа похибки засобу вимірювання або гранична абсолютна похибка
1.	Штангенциркулі , ГОСТ 166-63	0 ...125, 0...200, 0...320 мм	0,1 мм або 0,05 мм (по ноніусу)	Одне значення ціни поділки по ноніусу
2.	Терези рівноплечі, ручні, ГОСТ 359-54	1,00 ...20 г 5,00...100 г	-	20 мг при 20 г (6 мг при 2 г) 50 мг при 100 г (10 мг при 10 г)
3.	Терези шкільні	10...200 г	-	50 мг при 10 г (20 мг при 200 г)
4.	Термометри скляні рідинні (не ртутні) ГОСТ 9177-74	-20°C100°C- 35°C100°C	0,2°C; 0,5°C; 1°C, 2°C, 5°C	1 ціна поділки шкали, якщо вона рівна 1°C, 2°C, 5°C і 2 ціни поділки, якщо вона рівна 0,2°C; 0,5°C.
5.	Термометри ртутні скляні, ГОСТ 2045-71	-35°C0°C 0°C100°C 100°C200°C -35°C200°C -35°C100°C 100°C200°C -35°C200°C -35°C200°C	0,1°C; 0,2°C 0,2°C 0,2°C 0,5°C 1°C 1°C 1°C 2°C 5 і 10°C	0,3°C, 0,3°C 0,2°C 0,4°C 1°C 1°C 2°C 2°C 5°C
6.	Динамометр навчальний	0...4 Н	0,1 Н	0,05 Н
7.	Секундоміри механічні	30... 60 с	-	1,5 ціни поділки шкали за один оберт секундної стрілки
8.	Секундоміри електричні	30 с	-	0,5 ціни поділки шкали за один оберт секундної стрілки.
9.	Амперметр шкільний	0...2 А	0,1 А	0,05 А

10.	Вольтметр шкільний	0...6 В	0,2 В	0,15 В
-----	-----------------------	---------	-------	--------

ЛІТЕРАТУРА

1. Бушок Г. Ф., Венгер Є. Ф. Курс фізики: У з кн. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка: Навч. посіб. К.: Вища шк., 2002. 375 с.
2. Дущенко В. П., Кучерук І. М. Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. К.: Вища шк., 1987. 431 с.
3. Кікоїн І. К., Кікоїн А. К. Молекулярна фізика. К.: Рад. школа, 1968. 476 с.
4. Кобель Г. П., Калапуша Л. Р. Моделювання у вивченні молекулярної фізики. Луцьк: Вежа, 1994. 50 с.
5. Головіна Н. А., Кобель Г. П. Лабораторний практикум із молекулярної фізики й термодинаміки: навч. посіб. Луцьк: Вежа-Друк, 2017. 247 с. Гриф «Затверджено до друку вченою радою СНУ імені Лесі Українки (Протокол № 17 від 29.11.2017; Наказ №336 - з від 29.11.2017 р.)

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

АВОГАДРО Амедео, 49
БОЙЛЬ Роберт, 49
БОЛЬЦМАН Людвіг, 50
ВАН ДЕР ВААЛЬС Йоханнес Дідерік, 51
ГАЛІЛЕЙ Галілео, 51
ГЕЙ-ЛЮССАК Жозеф Луї, 53
ДАЛЬТОН Джон, 54
ДЖОУЛЬ Джеймс Прескотт, 54
ДЮЛОНГ П'єр Луї, 55
ЕЙНШТЕЙН Альберт, 55
КАМЕРЛІНГ-ОННЕС Гейке, 58
КАРНО Нікола Леонард Саді, 59
КЛАПЕЙРОН Бенуа Поль Еміль, 59
КЛАУЗІУС Рудольф Юліус Емануель, 60
ЛОМОНОСОВ Михайло Васильович, 61
ЛОШМІДТ Йоганн Йозеф, 63
МАЙЄР Юліус Роберт, 63
МАРІОТТ Едм, 64
МЕНДЕЛЄЄВ Дмитро Іванович, 64
ПЕРРЕН Жан Батіст, 65
ПТІ Алексіс Терез, 66
ПУАЗЕЙЛЬ Жан Луї Марі, 66
ПУАССОН Сімеон Дені, 66
РЕОМЮР Рене Антуан Фершо, 67
СМОЛУХОВСЬКИЙ Маріан, 67
СТОКС Джордж Габріель, 68
ТОМСОН (Кельвін) Вільям, 68
ТОРРІЧЕЛЛІ Еванджеліста, 70
ФАРЕНГЕЙТ Даніель Габріель, 70
ЦЕЛЬСІЙ Андерс, 71
ШАРЛЬ Жак Олександр Цезар, 71
ШТЕРН Отто, 71

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

Вакуум 196

Відношення теплоємностей газу C_p/C_v 120, 123, 129

Внутрішня енергія 18

Водяний еквівалент 135

Вологість

- абсолютна 114

- відносна 114

В'язкість повітря кінематична 100, 156

Дифузія 89, 203

Ентропія 22, 188

Ефективний діаметр молекул 95

Калориметр 135, 141

Кількість речовини 17

Кількість теплоти 18, 141

Коефіцієнт

- дифузії 89

- лінійного розширення твердих тіл 159

- об'ємного розширення рідин 159

- середній термічний тиску газів 86

- теплопровідності повітря 106

Маса 77

Метод

- відкачування 79

- відриву крапель 170

- підняття рідини в капілярах 176

- Ребіндера 164

- Клемана і Дезорма 120

- резонансний 129

- Стокса 156

- капілярний 100

- нагрітої нитки 106

Міжнародна система одиниць 41

Молекулярна маса 82

Об'єм 9

Питома теплота пароутворення 145

Питома теплота плавлення

Поверхневий натяг рідини 164, 170, 176

Похибки 33

Правила техніки безпеки 29
Середня довжина вільного пробігу 95
Температура 73
Теплопровідність 106, 185, 203
Термометр 73, 86
Теплоємність 20
- питома
- молярна
Теплота пароутворення 147
Тиск 8, 86, 111, 191
Універсальна газова стала 79
Фазові переходи 21