



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет механотроніки та інжинірингу
Кафедра фізики та математики**

**Методичні вказівки до виконання
лабораторних робіт з дисципліни**

«ФІЗИКА»

Частина 2: Термодинаміка та молекулярна фізика

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навчання освітньо-професійних та освітньо-наукових програм: «Агроінженерія», «Галузеве машинобудування», «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», «Будівництво та цивільна інженерія», «Архітектура та містобудування», «Автомобільний транспорт», «Транспортні технології», «Лісове господарство», «Геодезія та землеустрій», «Деревообробні та меблеві технології», «Садово-паркове господарство».

спеціальності: 208 «Агроінженерія», 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 192 «Будівництво та цивільна інженерія», 191 «Архітектура та містобудування», 274 «Автомобільний транспорт», 275 «Транспортні технології», 205 «Лісове господарство», 193 «Геодезія та землеустрій», 187 «Деревообробні та меблеві технології», 206 «Садово-паркове господарство».

Затверджено
на засіданні Науково-методичної ради
факультету мехатроніки та інжинірингу
Протокол № 4 від 4 травня 2023 р.

Харків 2023

Схвалено
на засіданні кафедри фізики та математики
Протокол № 3 від 31 жовтня 2022 р.

Рецензенти:

Маяк О.А., канд. техн. наук, доц., доцент кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв Державного біотехнологічного університету

Сліпченко М.В., канд. техн. наук, доц., завідувач кафедри надійності та міцності машин і споруд ім. В.Я.Аніловича Державного біотехнологічного університету.

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Фізика. Частина 2: Термодинаміка та молекулярна фізика» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навчання спеціальностей: 208 «Агроінженерія», 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 192 «Будівництво та цивільна інженерія», 191 «Архітектура та містобудування», 274 «Автомобільний транспорт», 275 «Транспортні технології», 205 «Лісове господарство», 193 «Геодезія та землеустрій», 187 «Деревообробні та меблеві технології», 206 «Садово-паркове господарство». / Пак А. О., Сіняєва О. В. – Харків : [б. в.], 2023. – 36 с.

Призначено для здобувачів вищої освіти ОС «Бакалавр» спеціальності: 208 «Агроінженерія», 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». 192 «Будівництво та цивільна інженерія», 191 «Архітектура та містобудування», 274 «Автомобільний транспорт», 275 «Транспортні технології», 205 «Лісове господарство», 193 «Геодезія та землеустрій», 187 «Деревообробні та меблеві технології», 206 «Садово-паркове господарство».

© Пак А.О., Сіняєва О.В. 2023

© Державний біотехнологічний університет 2023

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ | 4 |
| Правила виконання лабораторних робіт | 5 |
| 1-11. Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини методом Стокса | 6 |
| 1-12. Визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом Пуазейля | 11 |
| 1-13. Визначення довжини вільного пробігу та ефективного діаметра молекул повітря | 20 |
| 1-14. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом відриву кільця | 24 |
| 1-15. Визначення повітропроникності капілярно-пористих тіл | 30 |
| Список рекомендованої літератури | 34 |

ВСТУП

Методичні вказівки призначені для студентів факультетів обладнання та технічного сервісу, менеджменту, інженерно-технологічного та товарознавчого. До кожної лабораторної роботи сформульовані завдання, наведені необхідні теоретичні відомості, надано принципові схеми приладів, наведено порядок виконання роботи та форми таблиць для запису отриманих дослідних даних. Крім того, надані контрольні запитання для самоперевірки та контролю з боку викладача.

Метою лабораторних занять з фізики, розділ “Механіка та “Молекулярна фізика” є:

- закріпити теоретичний матеріал лекційного курсу;
- дати змогу детально ознайомитись з пристроями та характеристиками найбільш важливих приладів, які складають лабораторний практикум; ознайомити з методами вимірювання та основними приладами, які застосовують в лабораторії “Механіки та молекулярної фізики”: мікрометром, штангенциркулем, відліковим мікроскопом, рідинним манометром, термометром, термопарою, аналітичними терезами;
- навчити техніці безпеки експериментальних досліджень фізичних моделей та промислових зразків пристроїв;
- навчити вимірювати основні величини: довжину, час, тиск, температуру, масу;
- навчити використовувати різні методи аналізу і оцінювати похибки вимірювань;
- навчити висловлювати свої висновки щодо робочих властивостей та ступеня придатності досліджуваних пристроїв для рішення практичних завдань.

Виконання кожної лабораторної роботи включає п’ять етапів: вивчення теоретичних положень майбутньої роботи, ознайомлення з приладом, проведення експерименту, обробки його результатів та складання звіту.

ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

1. До роботи в лабораторії допускаються студенти, які прослухали та вивчили розділи теоретичного курсу, де викладено матеріал з теми лабораторних занять, а також опанували вимоги техніки безпеки під час виконання лабораторних робіт.

2. Кожен студент повинен заздалегідь підготуватись до лабораторного заняття, використавши лекційний матеріал, рекомендовану навчальну літературу та відповіді на питання, які дає викладач щодо теми заняття.

3. Ознайомитися з приладом, який використовується у лабораторній роботі та виконати необхідні вимірювання.

4. Кожна робота виконується з приладами, спеціально для неї призначеними.

5. Під час роботи з електровимірювальними приладами студент повинен слідкувати за тим, щоб вимірювана величина не перевищувала допустимих значень.

6. У випадку виникнення несправності чи аварійного стану установки студент повинен вимкнути її та сповістити викладача.

7. Після закінчення дослідів кожен студент повинен до вимикання установки або до припинення роботи з приладом пред'явити викладачу на підпис бланк з результатами спостережень. Якщо результати дослідів будуть визнані незадовільними чи зовсім не будуть пред'явлені викладачу, то у такому випадку робота не зараховується і знову призначається студенту до виконання.

8. Кожен студент до майбутнього лабораторного заняття повинен пред'явити викладачу окремий звіт з виконаної роботи, без якого студент не буде допущений до виконання наступної роботи.

9. У звіті необхідно привести результати спостережень, розрахунків та відповідні графіки, а також скласти висновок за результатами виконаної роботи.

10. Графіки рекомендується креслити на міліметровій сітці з нанесенням масштабу на координатні вісі.

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

Мета роботи:

Експериментальне визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини методом кульки, яка падає у цій рідині.

Прилади і матеріали:

1. прилад Стокса;
2. свинцеві кульки;
3. мікрометр;
4. масштабна лінійка;
5. секундомір.

Теоретичні відомості

Метод Стокса

Якщо у рідині різні шари рухаються з різною швидкістю, то між ними виникає сила внутрішнього тертя, пропорційна площі поверхні шару та градієнту швидкості:

$$F = -\eta \frac{dv}{dz} \cdot S, \quad (11.1)$$

де η – коефіцієнт пропорційності, який характеризує властивості цієї рідини і називається коефіцієнтом внутрішнього тертя; $\frac{dv}{dz}$ – градієнт швидкості; S – площа дотичних шарів.

Коли маленька кулька повільно рухається у рідині, вона зустрічає опір, який обумовлений в'язкістю рідини. Під час руху кульки шар рідини, який дотичний до її поверхні, прилипає до кульки й рухається з її швидкістю. Найближчі суміжні шари рідини також приводяться до руху. Швидкість, яку

вони отримують, тим менша, чим далі вони знаходяться від кульки. Стокс теоретично показав, що під час падіння кульки у безмежній рідині, коли не утворюються ніякі завихрення, сила тертя, яка діє на неї, визначається за формулою:

$$F = 6\pi\eta r v \quad (11.2)$$

де v – швидкість падіння кульки (ця швидкість повинна бути малою); r – радіус кульки ($r \ll R$); R – радіус сосуду, у якому падає кулька.

На кульку, яка падає у в'язкій рідині, діють три сили:

1. \vec{P} – сила тяжіння

$$\vec{P} = mg \quad (11.3)$$

де m – маса кульки, g – прискорення вільного падіння.

Маса кульки m визначається за формулою :

$$m = \rho \cdot V \quad (11.4)$$

де ρ – густина кульки, V – об'єм, який дорівнює:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (11.5)$$

Підставляючи у формулу (11.3) значення величин, знаходимо силу тяжіння:

$$\vec{P} = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 \vec{g}. \quad (11.6)$$

2. \vec{F}_e – виштовхувальна сила, яка визначається за законом Архімеда:

$$\vec{F}_e = m_1 \cdot \vec{g} = \rho_1 \frac{4}{3}\pi r^3 \vec{g} \quad (11.7)$$

де ρ_1 – густина рідини, в'язкість якої визначається.

3. \vec{F}_m – сила опору руху, яка обумовлена силами внутрішнього тертя. Ця сила визначається за формулою Стокса.

При падінні кульки сила тяжіння направлена вниз, виштовхувальна сила та сила тертя направлені вгору. Під час руху кульки швидкість її збільшується, а значить, росте і сила внутрішнього тертя. За деякого значення швидкості кульки сили, які діють на неї, урівноважуються. Рух кульки при цьому буде

прямолінійним та рівномірним. Кулька буде рухатись по інерції зі сталою швидкістю v . У даному випадку маємо:

$$\vec{P} - \vec{F}_g - \vec{F}_m = 0 \quad (11.8)$$

У формулу (11.8) підставляємо значення величин з формул (11.2), (11.6) та (11.7):

$$\rho \frac{4}{3} \pi r^3 g - \rho_1 \frac{4}{3} \pi r^3 g - 6\pi r v \eta = 0 \quad (11.9)$$

Розв'язуючи рівняння (11.9) відносно коефіцієнта внутрішнього тертя, отримуємо:

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_1)}{9v} g r^2, \quad (11.10)$$

v – швидкість руху кульки, яку за сталого руху знаходимо за формулою

$$v = \frac{l}{t}, \quad (11.11)$$

де l – шлях у в'язкій рідині, який проходить кулька; t – час руху кульки.

Здійснити падіння кульки у необмеженій рідині практично неможливо, оскільки рідина завжди знаходиться у якомусь посуді, який має реальні стінки. Врахування стінок під час руху кульки вздовж осі циліндричного посуду призводить до такого виразу для коефіцієнта в'язкості:

$$\eta = \frac{2}{9} r^2 g \frac{(\rho - \rho_1)}{v \left(l + 2,4 \frac{r}{R} \right)}, \quad (11.12)$$

де R – радіус посуду, у якому рухається кулька.

Одиниця в'язкості – паскаль-секунда ($Па \cdot c$). Чим більша в'язкість, тим рідина більше відрізняється від ідеальної, тим більші сили внутрішнього тертя у ній виникають. В'язкість залежить від температури. При підвищеній температурі коефіцієнт в'язкості зменшується. Особливо залежить від температури в'язкості мастил. Наприклад, в'язкість касторової олії в інтервалі $18...40^\circ C$ падає у чотири рази. Тому, записуючи значення коефіцієнта внутрішнього тертя, треба вказувати температуру рідини.

Порядок виконання роботи

1. За допомогою мікрометра виміряти діаметр кульки d у трьох місцях, взяти середнє значення. Записати значення радіуса $r = d/2$. Результати вимірів записати у таблицю за зразком:

Таблиця 11.1

| | ρ , кг/м ³ | ρ_1 , кг/м ³ | r , м | R , м | l , м | v , м/с | T , К | η , Па·с | η_1 , Па·с |
|----|-------------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------------|--------------------|
| 1. | | | | | | | | | |
| 2. | | | | | | | | | |
| 3. | | | | | | | | | |
| 4. | | | | | | | | | |
| 5. | | | | | | | | | |

2. Записати температуру рідини, вважаючи, що вона дорівнює кімнатній температурі.
3. Масштабною лінійкою виміряти відстань L між мітками декілька разів і взяти середнє значення.
4. Опустити кульку у рідину ближче до осі циліндричної трубки. Око спостерігача має знаходитися проти верхньої мітки так, щоб вони зливалися в одну лінію. В момент перетину кулькою верхньої мітки слід увімкнути секундомір, при проходженні нижньої – вимкнути його. Відлік за секундоміром дає час t проходження кулькою шляху l .
5. Підрахувати швидкість кульки v за формулою (11.11).
6. Дослід повторити 3...5 разів.
7. Занести до таблиці значення g , ρ , ρ_1 , які є сталими.
8. Виміряти радіус трубки R .
9. За формулою (11.10) підрахувати значення коефіцієнта в'язкості для кожного досліду η .
10. Підрахувати значення коефіцієнта в'язкості η_1 за формулою (11.12).
11. Підрахувати абсолютну та відносну похибки.

Контрольні запитання і завдання

1. Що таке коефіцієнт внутрішнього тертя? Який його фізичний зміст?
2. Від чого залежить коефіцієнт в'язкості?
3. Які сили діють на кульку під час її руху у в'язкій рідині?
4. Виведіть формулу (11.10).
5. Які явища належать до явищ переносу?
6. Внаслідок чого виникає у рідині тертя?
7. Яке співвідношення є між коефіцієнтами внутрішнього тертя та дифузії?
8. Як залежить коефіцієнт внутрішнього тертя від температури?
9. Чому відлік часу починають не від поверхні рідини?
10. Як змінюється швидкість руху кульки при збільшенні її діаметру?

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ ПУАЗЕЙЛЯ

Мета роботи:

Навчитися визначити коефіцієнт в'язкості рідини методом Пуазейля.

Прилади та матеріали:

1. установка для вимірювання в'язкості води;
2. штангенциркуль;
3. мікроскоп.

Теоретичні відомості:

Тверде тіло, що рухається в рідині або газі, відчуває опір своєму руху. Рухаючись в рідкому або газовому середовищі, тіло поступово залучає до свого руху шари середовища, які раніше покоїлися. Швидкості шарів спадають по мірі віддалення від тіла.

Якщо рідина або газ течуть по трубі, швидкості в різних точках труби також виявляються різними.

Перелічені явища пояснюються однією і тією ж причиною.

Між рухомими суміжними шарами рідини або газу, що рухаються з різною швидкістю, діють дотичні сили. Їх називають силами внутрішнього тертя або в'язкості.

Сили внутрішнього тертя відіграють істотну роль при протіканні рідин або газів по трубах а також під час руху в них твердих тіл. До рухомого тіла в рідині або газі прилипає тонкий шар даної речовини, який рухається разом з ним. Наявність взаємодії між шарами залучає до руху все більш віддалені шари. Одночасно ці дальні шари гальмують рух тіла (приведене пояснення опору руху твердого тіла справедливе тільки тоді, коли не утворюються вихори, тобто при малих швидкостях руху і обтічній формі тіла).

При перетіканні рідини по трубі її тонкий шар, безпосередньо прилеглий до стінок труби – також нерухомий, начебто прилипає до стінок. Унаслідок наявності внутрішнього тертя, він гальмує рух сусіднього з ним шару, а завдяки взаємодії наступних шарів, це гальмування передається далі. В результаті швидкість течії рідини уздовж осі труби виявляється найбільшою і поступово зменшується до стінок.

Сили взаємодії між двома шарами рідини, тобто сили внутрішнього тертя, характеризують наступним чином.

Нехай А та В (рис.12.1) – два близько розташованих шари рідини або газу, що рухаються в напрямку осі x зі швидкостями u_1 та u_2 . Відстань між ними Δy . Взаємодія цих шарів зводиться до того, що шар А, який рухається з більшою швидкістю захоплює більш повільний шар В. Останній гальмує рух шару А.

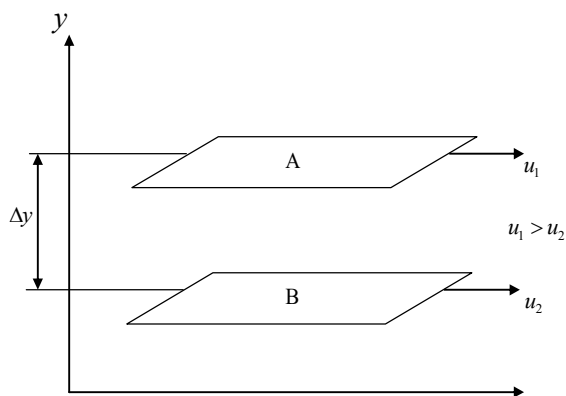


Рис.12.1 – Рух шарів рідини

Сила, що діє з боку одного шару на іншій, тим більша, чим ближче розташовані шари і чим більша площа їх зіткнення, а також чим сильніше відрізняються їх швидкості. Тобто сила внутрішнього тертя f прямо пропорційна площі дотичних шарів S , їх відносній швидкості $\Delta u = u_1 - u_2$ і обернено пропорційна відстані між ними Δy :

$$f = \eta \frac{\Delta u}{\Delta y} S \quad (12.1)$$

Відношення $\frac{\Delta u}{\Delta y}$ при $\Delta y \rightarrow 0$ дорівнює похідній: $\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta y} = \frac{du}{dy}$. Воно

показує, як швидко змінюється швидкість шарів середовища з відстанню. Дане відношення називають градієнтом швидкості.

Коефіцієнт пропорційності η називають коефіцієнтом в'язкості або коефіцієнтом внутрішнього тертя. Чисельно він рівний силі внутрішнього тертя, що виникає між двома шарами рідини або газу з одиничною площею, якщо градієнт швидкості також рівний одиниці. У різних речовинах при цьому виникають різні по величині сили, отже, різні речовини мають різні коефіцієнти в'язкості, тобто різну в'язкість.

Розмірність коефіцієнта в'язкості може бути отримана з формули(12.1):

$$[\eta] = \frac{[f]}{\left[\frac{\Delta u}{\Delta y}\right][S]} = \frac{MLT^{-2}}{LT^{-1}L^{-1}L^2} = \frac{M}{LT} \quad (12.2)$$

У системі СІ одиниця в'язкості – $\frac{кг}{м \cdot с} = Па \cdot с$. Величина коефіцієнта

в'язкості залежить від властивостей рідини або газу і змінюється зі зміною температури середовища.

Природа сил внутрішнього тертя в рідинах і газах різна внаслідок відмінності їх молекулярної структури. Механізм виникнення сил внутрішнього тертя в газах можна пояснити таким чином .

Звернемося знову до рис.12.1 . Нехай А і В два шари газу, які рухаються з різними швидкостями u_1 і u_2 , кожна молекула в обох шарах бере участь одночасно в двох рухах – направленому і хаотичному тепловому. Завдяки безладності теплового руху, між шарами газу здійснюється обмін молекулами. Переходячи зі швидшого в повільніший шар, молекули газу переносять з собою більшу кількість направленого руху $p_1 = tu_1$, яка, завдяки зіткненням, перерозподіляється між молекулами повільнішого шару, внаслідок чого останній прискорюється. Потрапляючи з повільнішого шару в швидший, молекули приносять меншу кількість руху $p_2 = tu_2$, що уповільнює його.

Чим вище температура газу, тим більша швидкість теплового руху його молекул, тим інтенсивніше йде вирівнювання швидкостей рухомих шарів газу, тим більше буде його коефіцієнт в'язкості.

Внутрішнє тертя в рідинах обумовлене взаємодією між молекулами дотичних шарів і лише в деякій мірі описаним вище процесом. З підвищенням температури рідини збільшується рухливість її молекул, сили взаємодії менше позначаються на русі шарів. З підвищенням температури в'язкість рідин зменшується.

Коефіцієнт в'язкості для даної рідини або газу, що характеризує величину сил внутрішнього тертя в них, може бути визначений різними способами. У даній роботі коефіцієнт в'язкості вимірюється методом, заснованим на законах плинності рідини по трубі.

Характер плинності рідини або газу по трубі залежить від швидкості потоку. При невеликих швидкостях шар, безпосередньо прилеглий до стінки труби, – нерухомий, решта шарів рідини рухається один відносно іншого і швидкості їх збільшуються у напрямку до осі труби. Розподіл швидкостей в деякому перетині труби зображений на рис.12.2.

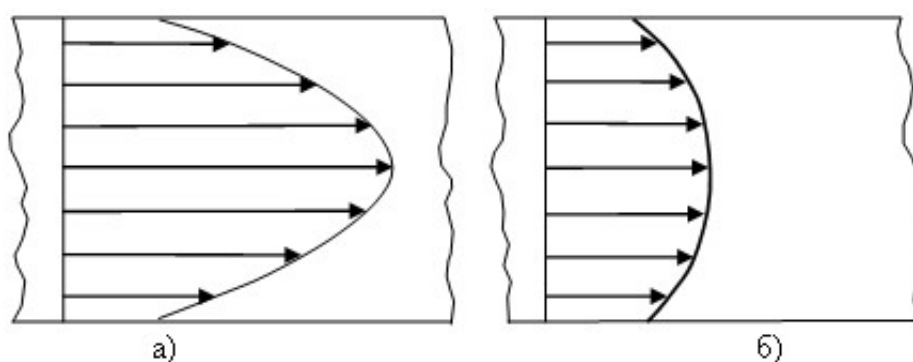


Рис.12.2 – Розподіл швидкостей в перетині труби при малих (а) та великих (б) швидкостях плинності.

Стрілками позначені величини та напрямки швидкостей в потоці на різних відстанях від стінки. Протікання рідини із сталим розподілом швидкостей уздовж труби називається *ламінарним*. Із збільшенням швидкості потоку шарувата течія порушується, частинки рідини переходять з одного шару

в іншій, розподіл швидкостей в потоці перестає бути стаціонарним, виникають завихрення. Такий рух називається *турбулентним*, вихровим. Швидкість, при якій відбувається перехід ламінарної течії в турбулентну залежить від розмірів труби, форми її перетину і стану стінок, а також від властивостей рідини – густини, коефіцієнта в'язкості.

Пуазейлем було показано, що об'єм рідини (або газу) V , що протікає через трубу за ламінарної течії за деякий час τ , дорівнює:

$$V = \frac{\pi R^4 (p_2 - p_1) \tau}{8\eta l} \quad (12.3)$$

де R – радіус труби, l – її довжина, η – коефіцієнт в'язкості рідини, $p_2 - p_1$ – різниця тиску на кінцях труби.

Формула Пуазейля може бути отримана наступним чином.

Розглянемо сталий плин рідини по трубі радіусом R і довжиною l . Якщо швидкість потоку в кожній його точці не змінюється з часом, то це означає, що сума сил, що діють на будь-який об'єм рідини дорівнює нулю.

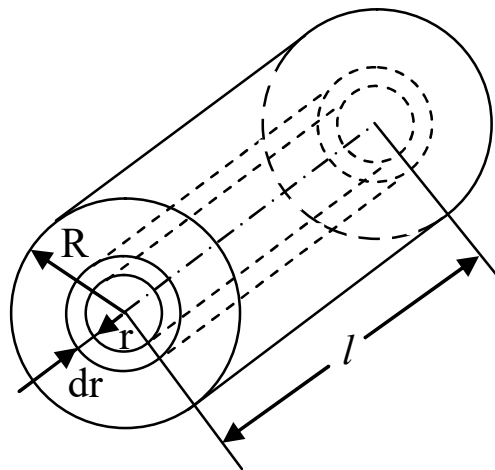


Рис.12.3 – Елемент об'єму рідини

Знайдемо розподіл швидкостей в потоці в залежності від відстані до осі труби. Для цього виділимо із загального об'єму рідини циліндр радіусом r (рис.12.3). На одиницю площі його бокової поверхні діє сила в'язкості:

$$f_2 = \eta \frac{dv}{dr}, \quad (12.4)$$

а на всю поверхню сила:

$$f_{\text{тр}} = 2\pi r l \eta \frac{dv}{dr} \quad (12.5)$$

Оскільки рух відбувається з постійною швидкістю, сила тертя повинна врівноважувати різницю сил тиску $p_2 - p_1$ на торцях циліндра, отже:

$$-2\pi r l \eta \frac{dv}{dr} = (p_2 - p_1) \pi r^2 \quad (12.6)$$

Знак мінус пояснюється тим, що сила тертя направлена у бік, протилежний силі тиску. З (12.6) виражаємо dv :

$$dv = -\frac{(p_2 - p_1) r dr}{2\eta l} \quad (12.7)$$

Проінтегрувавши даний вираз отримаємо:

$$v_2 = -\frac{p_2 - p_1}{4\eta l} \cdot r^2 + c \quad (12.8)$$

Постійну інтегрування c визначимо з граничних умов: біля стінок труби, де $r=R$, $v=0$ тобто:

$$0 = -\frac{p_2 - p_1}{4\eta l} \cdot R^2 + c \quad (12.9)$$

Звідси:

$$c = \frac{p_2 - p_1}{4\eta l} \cdot R^2 \quad (12.10)$$

Підставивши c в (12.8), знайдемо швидкість потоку v в будь-якій точці перетину труби:

$$v_2 = \frac{p_2 - p_1}{4\eta l} \cdot (R^2 - r^2) \quad (12.11)$$

Підрахуємо об'єм рідини, що протікає через усі перетини труби за час τ . Для цього розіб'ємо його на кільця малої товщини dr , так, що швидкості уздовж всього кільця можна вважати однаковими. Виділимо одне з цих кілець радіусу r і товщиною dr . Площа такого кільця дорівнює:

$$dS = 2\pi r dr \quad (12.12)$$

За час τ секунд через нього протече об'єм рідини, що дорівнює:

$$dv = dS \cdot v_2 \cdot \tau \quad (12.13)$$

де v_2 – швидкість потоку на відстані r від осі.

Через весь перетин труби радіусу R протече об'єм рідини V рівний:

$$V = \int dV = \int_0^R 2\pi r v_2 \tau dr \quad (12.14)$$

Підставивши значення швидкості (12.11) і проінтегрувавши, отримаємо:

$$V = \int_0^R 2\pi r \frac{p_2 - p_1}{4\eta l} (R^2 - r^2) \tau dr = \frac{p_2 - p_1}{l} \cdot \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \tau \quad (12.15)$$

Вимірявши об'єм V рідини, що протекла, і знаючи різницю тиску на кінцях труби та її розміри – довжину l і радіус R , можна обчислити коефіцієнт в'язкості η з (12.15):

$$\eta = \frac{(p_2 - p_1)\pi R^4}{8Vl} \cdot \tau \quad (12.16)$$

Описаний метод визначення коефіцієнта в'язкості по кількості рідини або газу, що протекли крізь трубу, є одним з найбільш поширених методів.

Порядок виконання роботи

Вимірювання коефіцієнту в'язкості води

В даній роботі необхідно виміряти коефіцієнт в'язкості води за кімнатної температури. Для цього використовують установку, зображену на рис.12.4.

Т-У-подібна трубка з нерівними колінами закріплена на штативі D. Один її кінець має кран П, інший – закритий пробкою, крізь яку пропущений капіляр К. Капіляр занурений в ємність А з водою. Ємність В служить термостатом. Вістря О дозволяє фіксувати рівень води в ємності А.

Дослід здійснюється наступним чином.

Знімають трубку Т з штатива D, заповнюють її водою так, щоб в ній не залишалися бульбашки повітря. Після цього її знову закріплюють на штативі. Кінець капіляра К повинен бути занурений у воду, що заповнює ємність А, а вістря О торкатися поверхні води.

Відкривають кран П, дають можливість деякому об'єму води витекти в стакан С. Об'єм води, що витекла, визначають зважуванням: знаходять вагу

порожнього стакана і стакана з водою. Об'єм V буде дорівнювати різниці результатів зважування $m_1 - m_2$ поділених на густину води.

Для правильного визначення об'єму, слід, відкривши кран, почекати, поки не витече декілька крапель, а потім, підставивши стакан С, одночасно включити секундомір для вимірювання часу τ .

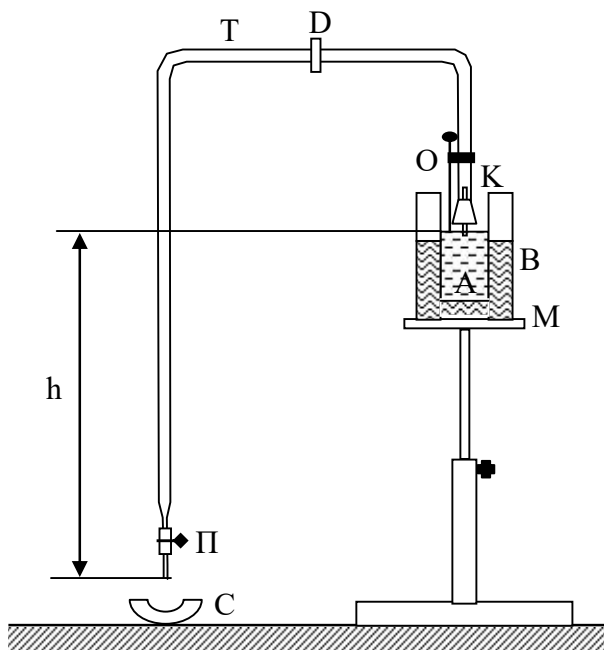


Рис.12.4 – Установка для вимірювання коефіцієнта в'язкості води

Тиск, під яким тече вода, дорівнює гідростатичному тиску стовпа води h між кінцем трубки Т і поверхнею води в ємності А:

$$p_2 - p_1 = \rho gh, \quad (12.17)$$

де ρ – густина води, g – прискорення сили тяжіння.

Довжину капіляра вимірюють штангенциркулем, радіус його – за допомогою окулярної шкали мікроскопа. Отримані результати вимірювань підставляють у формулу (12.16) і обчислюють η . Знайдене значення коефіцієнта в'язкості відповідає температурі води в ємності А. Її вимірюють, зануривши термометр в стакан В.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке коефіцієнт внутрішнього тертя? Який його фізичний зміст?
2. Від чого залежить коефіцієнт в'язкості?
3. Поясніть залежність коефіцієнту в'язкості в рідині та в газі від температури?
4. Що таке ламінарна та турбулентна течії? Поясніть причини їх виникнення.
5. Виведіть формулу Пуазейля.

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ ТА ЕФЕКТИВНОГО ДІАМЕТРУ МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ

Мета роботи:

1. Повторити основні поняття МКТ.
2. Визначити довжину вільного пробігу молекул.
3. Визначити ефективний діаметр молекул поверхні.

Прилади і обладнання:

1. посудина з краном в нижній частині та капіляром, який проходить крізь пробку у верхньому отворі;
2. мензурка;
3. секундомір;
4. термометр.

Теоретичні відомості

Молекулярно-кінетична теорія встановлює зв'язок між коефіцієнтом внутрішнього тертя ідеального газу η , середньою довжиною вільного пробігу молекули λ і середньою арифметичною швидкістю v їх переміщення у вигляді

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \lambda v, \quad (13.1)$$

де ρ – густина газу.

Більш детальний розгляд даного зв'язку з урахуванням розподілу молекул за швидкостями дає таку ж формулу, але вже з іншим числовим коефіцієнтом:

$$\eta = \frac{1}{2} \rho \lambda v. \quad (13.2)$$

Замінімо v та ρ на їх значення з кінетичної теорії та отримаємо:

$$\lambda = \frac{\eta}{\rho} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}}, \quad (13.3)$$

де T – абсолютна температура; R – стала газів; M – молекулярна маса газів.

Всі фізичні величини, зокрема η , постійні або легко вимірюються, тому експериментально вимірюючи η , легко підрахувати потім і λ за формулою (13.3).

Для вимірювання коефіцієнту внутрішнього тертя можна скористатися формулою Пуазейля:

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8l\eta} \cdot t, \quad (13.4)$$

де V – об'єм газу, який витікає через капіляр за час t ; r – радіус капіляра; ΔP – різниця в тиску на кінцях капіляра; l – довжина капіляра.

Із (13.4) маємо

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8lV} \cdot t. \quad (13.5)$$

Всі фізичні величини в правій частині можуть бути виміряні безпосередньо.

Методика вимірювань та опис вимірювальної установки:

Вимірювальна установка зображена на рис.13.1.

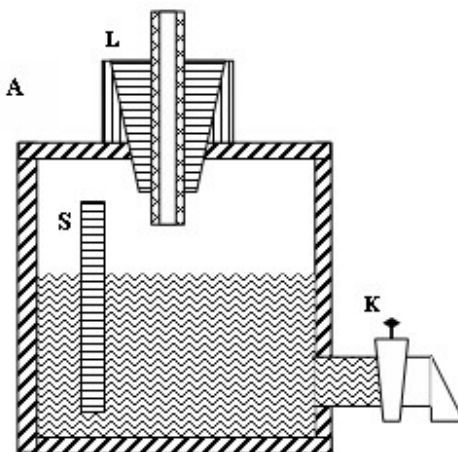


Рис. 13.1 – Вимірювальна установка

Посудину А з краном К в нижній частині наповнюють водою так, щоб рівень води не перевищував шкалу S, що приклеєна до скляної посудини. Через пробку в посудині А проходить капіляр L, радіус і довжина якого вказані в

таблиці на установці. Капіляр не повинен торкатися поверхні води. Кран К має отвір значно більшого перерізу, ніж капіляр (рис.13.1).

При відкриванні крану починається витікання рідини під дією гідростатичного тиску рідини, яка знаходиться вище рівня отвору крану.

$$\Delta P = \frac{h_1 + h_2}{2} \rho g, \quad (13.6)$$

де h_1 і h_2 – початкова і кінцева висота рідини в посудині, відповідно; ρ – густина рідини; g – прискорення вільного руху.

Об'єм повітря V , яке пройшло крізь капіляр, буде дорівнювати об'єму рідини, яка витекла через кран К в мензурку.

Порядок виконання роботи

1. Відкрити кран К повністю, і коли вода почне витікати, підставити вимірювальну мензурку. Одночасно потрібно ввімкнути секундомір і записати (відмітити) в зошиті висоту рівня води в посудині h_1 . Якщо кран відкрити не повністю, то результат буде хибний.
2. Зупинити секундомір, коли в мензурці буде 50...100 см³ рідини (необхідно дивитися на поділки на мензурці), і записати в зошиті новий рівень води в посудині. Записати також в зошит час за секундоміром.
3. За формулою (13.6) підрахувати ΔP .
4. За формулою (13.5) підрахувати коефіцієнт внутрішнього тертя η .
5. Поміряти кімнатну температуру T і атмосферний тиск p . За формулою (13.3) підрахувати λ .
6. Підрахувати ефективний переріз за формулою

$$d_{eff} = \sqrt{\frac{P_0 T}{\sqrt{2} n_0 P T_0 \lambda}}, \quad (13.7)$$

де P_0 і T_0 – тиск і температура за нормальних умов; n_0 – число Лошмідта; P і T – тиск і температура за умов вимірювання.

При підрахунках брати наступні значення фізичних величин:

$n_0 = 2,65 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ – число Лошмідта;

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

$$T_0 = 273 \text{ К} \text{ та } P_0 = 101 \cdot 10^3 \text{ Па} - \text{температура та тиск за нормальних умов};$$

$$M = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} - \text{молекулярна маса повітря.}$$

Всі сталі записані в системі СІ. Оскільки λ і d_{eff} підраховувались за експериментально виміряним η , то для підрахування похибки необхідно оцінити похибку при визначенні η непрямим методом.

Контрольні запитання і завдання

1. Що називається коефіцієнтом внутрішнього тертя, який у нього фізичний зміст?
2. Що називається середньою довжиною вільного пробігу молекули? Від яких фізичних величин вона залежить?
3. Виведіть формулу (13.7).
4. Які явища називаються явищами переносу?

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ МЕТОДОМ ВІДРИВУ КІЛЬЦЯ

Мета роботи:

Ознайомитися з методами визначення коефіцієнту поверхневого натягу рідин.

Прилади та матеріали:

1. лабораторний прилад;
2. набір досліджуваних рідин;
3. комплект ваг.

Теоретичні відомості

У рідинах середні відстані між молекулами значно менші, ніж у газах, тому сили взаємодії між молекулами грають у рідинах суттєву роль. Молекула, що знаходиться всередині рідини, взаємодіє з оточуючими її молекулами. Оскільки сили взаємодії симетричні, то рівнодіюча всіх сил, що діють на цю молекулу, в середньому дорівнює нулю. Молекули ж, що знаходяться на поверхні рідини, зазнають більшої дії з боку молекул рідини, ніж з боку молекул пару та газу, над поверхнею рідини. Тому у поверхневому шарі рідини виникає надмірний молекулярний тиск, що спрямований по нормалі в середину рідини.

Перехід молекул з глибини рідини у поверхневий шар супроводжується роботою проти сил молекулярного притягання. Робота, яка затрачена на утворення поверхні рідини, призводить до збільшення потенційної енергії молекул поверхневого шару. Отже поверхневий шар рідини має зайву вільну енергію.

Як відомо, рівноважний стан – це стан із мінімумом вільної енергії, тому поверхня рідини прагне зменшитися. Це прагнення зменшити поверхню здійснюється силами притягання між молекулами, які діють на поверхні рідини

(ці сили називаються силами поверхневого натягу). Рідина поводить себе так, як наче вона містилася б в пружній розтягнутій плівці, що прагне до стиснення. Наприклад, за відсутності зовнішніх сил рідина приймає форму кулі – форму тіла, яке за деякого об'єму має мінімальну поверхню. Поверхневий шар складається з тих самих молекул, що й ця рідина. Взаємодія між молекулами має в поверхневому шарі такий самий характер, що і всередині рідини.

Припустимо, що є прямокутна рамка з рухомою перекладиною, яка зтягнута плівкою рідини (рис.14.1).

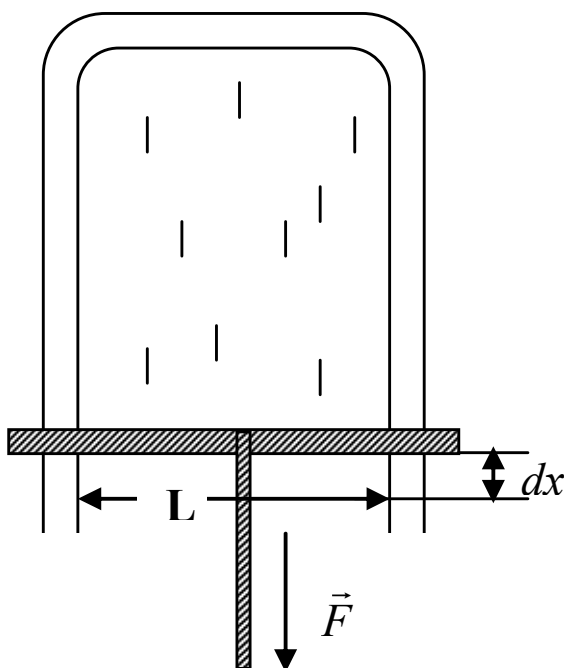


Рис. 14.1 – Прямокутна рамка з рухомою перекладиною

Плівка являє собою плоский об'єкт рідини, обмежений із двох сторін поверхневим шаром. Внаслідок прагнення поверхневого шару до скорочення з боку плівки буде діяти на перекладину сила

$$F_{n.n.} = 2\alpha l, \quad (14.1)$$

де l – довжина перекладини; α – сила поверхневого натягу, що приходить на одиницю довжини контуру (цю величину називають коефіцієнтом поверхневого натягу).

Щоб перекладина знаходилася в рівновазі, до неї треба прикласти зовнішню силу F , яка дорівнює силі натягу плівки, тобто

$$F = 2\alpha l. \quad (14.2)$$

Припустимо, що перекладина переміститься у напрямку дії сили F на величину dx . Цей процес супроводжується здійсненням рідиною над перекладиною роботи

$$dA = -F \cdot dx = -2\alpha l \cdot dx = -\alpha \cdot dS, \quad (14.3)$$

де dS – приріст поверхні поверхневого шару. Припустимо, що дослід здійснюється за ізотермічних умов, тобто $T = \text{const}$. При цьому процесі робота дорівнює зменшенню вільної енергії, тому

$$dA = -\alpha \cdot dS = -dW_{\text{вільн.}}. \quad (14.4)$$

Отриманий результат означає, що при ізотермічному збільшенні площі поверхневого шару на dS , вільна енергія рідини зростає на $dW_{\text{вільн.}} = \alpha \cdot dS$. Таким чином, коефіцієнт поверхневого натягу являє собою вільну енергію, що належить до одиниці площі поверхневого шару. Відповідно до цього α можна виразити у "СІ" не лише у Н/м , а також у Дж/м^2 .

Коефіцієнт поверхневого натягу рідини залежить від навколишнього середовища, з яким вона стикається. Зі збільшенням температури поверхневий натяг зменшується, а поблизу критичної температури зменшується до нуля. Це впливає з того, що густина рідини та насиченого пару у критичному стані однакові, і поверхня розділу між ними зникає.

Домішки сильно впливають на значення поверхневого натягу. Наприклад, розчинення у воді мила зменшує її коефіцієнт поверхневого натягу в півтора рази, а розчинення у воді NaCl приводить до збільшення α .

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка призначена для визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини (рис. 14.2).

У верхній частині штатива 1 є кронштейн 2, до кінця якого прикріплена пружина 3. До кінця пружини на нитках підвішене кільце 4. У нижній частині штативу закріплено кронштейн 5, який фіксується на штативі гвинтом 6. Підставка 7 може рухатися вгору-вниз уздовж циліндричного отвору

кронштейна. Переміщення підставки вгору здійснюється за допомогою гвинта 8. При обертанні гвинта 8 у протилежний бік підставка під дією власної ваги

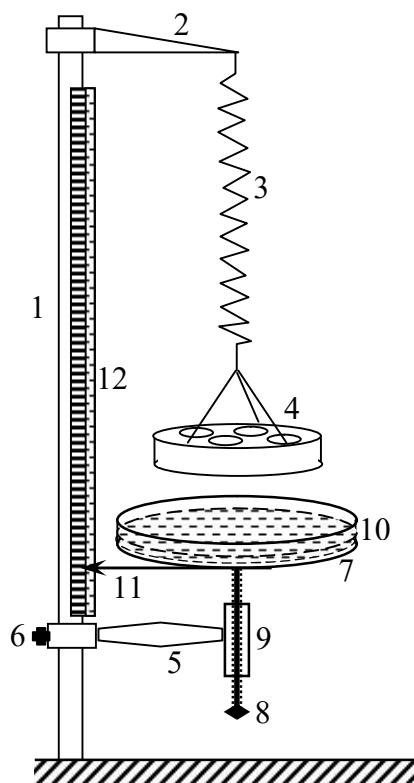


Рис. 14.2 – Схема вимірної установки

переміщується вниз.

На підставці розміщується чашка Петрі 10 із досліджуваною рідиною. До підставки жорстко прикріплений показчик 11. Лінійка 12 призначена для визначення подовження пружини.

Порядок виконання роботи:

1. Проградувати пружину. Для цього ослабити гвинт 6 та кронштейн із підставкою і гайкою відхилити вбік на 90° та зафіксувати в цьому положенні гвинтом 6., Визначити положення кільця відносно шкали (рис.14.3). За допомогою пінцета опустити гирьку 0,5 г на середину кільця, при цьому пружина подовжиться. Записати данні (n_1) положення кільця відносно шкали. Збільшуючи поступово масу на 0,5 г, довести її до 4,0 г, записуючи положення

кільця ($n_1...n_8$). За цими даними побудувати на міліметровому папері графік $\Delta x = f(P)$, де $\Delta x = n_i - n_0$ – подовження пружини.

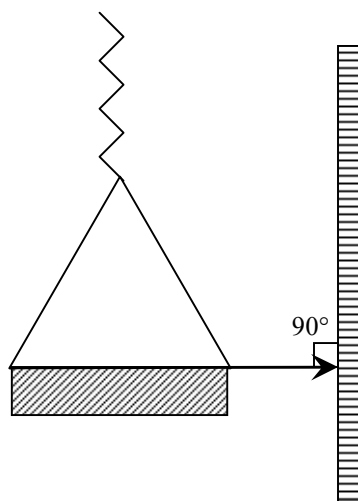


Рис. 14.3 – Вимірювання подовження пружини

2. Привести установку у вихідне положення. При цьому треба звернути увагу на те, щоб кільце відносно шкали установки залишилося в початковому положенні n_0 , оскільки при занурюванні кільця в рідину на кільце діятиме сила виштовхування, а дія цієї сили негативно впливає на точність вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу α .

3. Записати початкове положення покажчика 11. Починайте повільно відкручувати гвинт 8. При цьому підставка разом з чашкою Петрі й досліджуваною рідиною опускатиметься вниз. Під дією сил поверхневого натягу кільце також рухатиметься за рідиною вниз, розтягуючи при цьому пружину. В момент, коли сили поверхневого натягу стануть дорівнювати силі розтягнення пружини, кільце відірветься від поверхні рідини. Записати положення покажчика N_1 . Обчислити подовження пружини $\Delta x = N_1 - N_0$, яке визвано дією на кільце сил поверхневого натягу. Дослід повторити не менше 3...5 разів. Обчислити $\Delta x_{сер}$.

4. За графіком залежності $\Delta x = f(P)$ визначити $F_{н.н.}$.

5. Коефіцієнт поверхневого натягу обчислити за формулою

$$\alpha = \frac{F_{н.н.}}{2\pi(d - h)}, \quad (14.5)$$

де d – зовнішній діаметр кільця, h – товщина кільця.

6. Обчислити абсолютну $\Delta\alpha$ та відносну δ похибки.

Результати дослідження оформити у вигляді таблиці

Таблиця 14.1

Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини

| № з/п | n_0 | n_i | Δx | N_0 | N_i | $\Delta x_{сер}$ | $F_{п.н.}$ | α | $\Delta\alpha$ |
|-------|-------|-------|------------|-------|-------|------------------|------------|----------|----------------|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Примітка. Зовнішній діаметр кільця $d=80$ мм. Товщина кільця $h=1$ мм.

Контрольні запитання та завдання

1. Яка причина виникнення сил поверхневого натягу з молекулярної точки зору?
2. Який фізичний зміст коефіцієнту поверхневого натягу?
3. Від чого залежить коефіцієнт поверхневого натягу рідини?
4. Одиниці вимірювання коефіцієнту поверхневого натягу в "СІ".
5. Як одержано формулу (14.5) для визначення α методом відриву кільця?
6. Наведіть приклади речовин із різними значеннями коефіцієнту поверхневого натягу.
7. Яка причина залежності коефіцієнта поверхневого натягу від температури?
8. В чому полягає метод відриву кільця для визначення коефіцієнта поверхневого натягу?
9. Від чого залежить похибка вимірювань коефіцієнта поверхневого натягу?

ВИЗНАЧЕННЯ ПОВІТРОПРОНИКНОСТІ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ ТІЛ

Мета роботи:

Освоїти методику вимірювання повітропроникності капілярно-пористих тіл.

Прилади і матеріали:

1. посудина з краном у нижній частині і отвором у верхній частині для наповнення водою;
2. чарунка для кріплення зразка;
3. секундомір;
4. мензурка.

Теоретичні відомості

Повітропроникність капілярно-пористих тіл у загальному вигляді визначається законом Дарсі:

$$B = \frac{V}{t \cdot S} = K \frac{\Delta P}{\eta d} \quad (15.1)$$

де V – об'єм повітря, що пройшов крізь зразок за час t ; S – площа зразка; ΔP – перепад тиску; η – в'язкість газу (повітря); d – товщина зразка; K – коефіцієнт, який залежить від природи пористого зразка.

Теоретичне значення K може бути визначено, якщо обрати конкретну модель капілярно-пористого тіла. Для "капілярної" моделі, що має наскрізні капіляри різного радіуса, для K маємо

$$K = \frac{\Pi \bar{r}^2}{8}, \quad (15.2)$$

де Π – загальна пористість зразка; \bar{r}^2 – середньоквадратичний радіус пор, який залежить від функції розподілу пор за радіусами в тілі.

Диференційна функція розподілу пор за радіусами має вигляд:

$$f(r) = \frac{dV}{V_0 dr}, \quad (15.3)$$

де dV – об’єм пор в інтервалі $[r, r + dr]$; V_0 – загальний об’єм пор.

Визначення $f(r)$ являє собою важке завдання і потребує спеціальних методів, а тому важко теоретично визначити і повітропроникність.

В наведеній роботі будемо визначати повітропроникність експериментально за формулою

$$B = \frac{V}{t \cdot S}, \quad (15.4)$$

де V – об’єм повітря, яке пройшло через зразок за час t , S – площа зразка.

Після цього, визначивши B за формулою (15.4), можна знайти коефіцієнта K , який є структурною характеристикою тіла.

Методика вимірювання повітропроникності капілярно-пористих тіл

Установку для вимірювання повітропроникності зображено на рис.15.1.

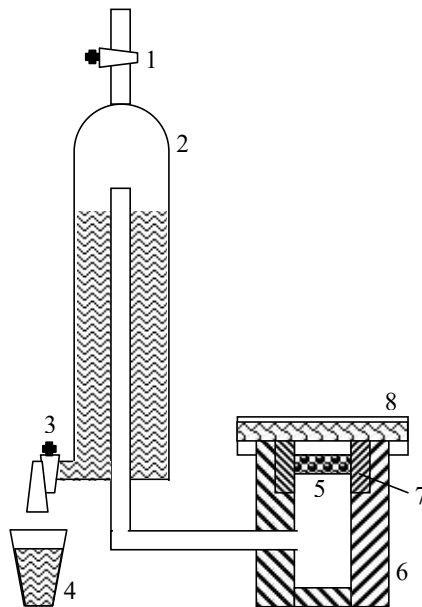


Рис.15.1 – Схема вимірювальної установки

Вона складається з вимірювального скляного циліндра 2, в який наливається вода через кран 1. Зразок капілярно-пористого тіла (дається викладачем) 5 стискується у вимірювальній чарунці між гумовими

прокладками 7 накладною гайкою 8. Тримач зразка (чарунка) з'єднується з циліндром 2 вакуумною гумовою трубкою 9.

Установка працює наступним чином. Закриваємо кран 1 і відкриваємо кран 3. При цьому вода з вимірювального циліндру виливається в мензурку 4 і дає об'єм V повітря, яке пройшло крізь зразок за час t . Перепад тиску ΔP дорівнює висоті водяного стовпа у вимірювальному циліндрі.

Повітропроникність капілярно-пористого тіла знаходимо за формулою (15.4), а потім визначаємо структурний коефіцієнт K .

$$K = \frac{B\eta d}{\Delta P}. \quad (15.5)$$

Порядок виконання роботи

1. Помістимо зразок капілярно-пористого тіла у вимірювальну чарунку і зафіксуємо її накладною гайкою.

2. Наливаємо воду у вимірювальний циліндр до висоти 40...45 см.

3. Відкриваємо кран 3 (попередньо заклавши кран 1) і вмикаємо секундомір. Далі записуємо в зошит висоту відмітки води в скляному циліндрі через рівні проміжки часу.

4. Після того, як мензурку 4 заповнено на 75% водою, секундомір вимикаємо і записуємо в таблицю значення часу t і об'єму води в мензурці V в системі СІ.

5. З розміру отвору в чарунці визначаємо робочу площу зразка S .

6. За формулою (15.4) визначаємо повітропроникність капілярно-пористого тіла.

7. За формулою (15.5) визначаємо структурний коефіцієнт K . При цьому для коефіцієнта внутрішнього тертя повітря взяти значення $\eta = 1,84 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$.

Контрольні запитання і завдання

1. Що називається повітропроникністю і чому важко виконувати теоретичні розрахунки проникності капілярно-пористих тіл?
2. У чому полягає відмінність у визначенні повітропроникності в одиночному капілярі і капілярно-пористому тілі?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. І.П. Богацька, Д.Б. Головка, Ю.Л. Ментковський та ін.: Загальні основи фізики. Механіка: Навч. посіб./К.: Либідь, 1992. – 104 с.
2. Загальна фізика: Лабораторний практикум: Навч. посіб. / В.М. Барановський, П.В. Бережний, І.І. Горбачук та ін.: За заг. ред. І.І. Горбачука. – К.: Вища шк., 1992. – 509 с.
3. Ю.С. Крот. Курс фізики. – К.: НМК БО, 1992.-192 с.
- 4.Лабораторний практикум з фізики. Частина 1. Механіка та молекулярна фізика / І.Є. Лопатинський , І.Р. Зачек, С.О. Юр'єв та ін. – Львів, Вид. НУ ЛП, 2015. – 188с.

Навчальне видання

Склали: **ПАК АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ**
СІНЯЄВА ОЛЬГА ВОЛОДИМИРІВНА

«ФІЗИКА»

ЧАСТИНА 2: Термодинаміка та молекулярна фізика

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навчання освітньо-професійної та освітньо-наукової програм «Агроінженерія», «Галузеве машинобудування», «електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» «Будівництво та цивільна інженерія», «Архітектура та містобудування», «автомобільний транспорт», «Транспортні технології», «Лісове господарство», «Геодезія та землеустрій», «Деревообробні та меблеві технології», «Садово-паркове господарство».

Підп. до др. Формат 60x84 1/16

Папір газет. Друк офс. Ум. друк арк. 2,2 Обл.-вид. арк.

Ум. фабр. – відб.: Тираж прим. Зам.

Державний біотехнологічний університет
61002 Харків, вул. Алчевських 44
