

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ
УКРАЇНИ**

КАФЕДРА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ ДИСЦИПЛІН

**Методичні рекомендації
до лабораторного заняття
з навчальної дисципліни “Фізика”**

**ВИМІРЮВАННЯ
В’ЯЗКОСТІ РІДИНИ
МЕТОДОМ СТОКСА**

Обговорено та затверджено на засіданні
кафедри фізико-математичних дисциплін
Протокол № ____ від _____ 201 р.

План-конспект лабораторного заняття

«Вимірювання в'язкості рідини методом Стокса»

Тема заняття: Вивчення явищ переносу і експериментальне визначення коефіцієнта в'язкості рідини.

Мета заняття:

— *навчальна:* навчити використовувати знання законів термодинаміки для знаходження фізичних величин, пов'язаних з цими законами, зокрема вивчення нерівноважних процесів. Ознайомити слухачів з методами наукового пізнання на практиці;

— *виховна:* виховувати інформаційну культуру студентів, увагу, дисциплінованість, самоконтроль;

— *розвиваюча:* розвивати впізнавальний інтерес, мислення, уміння використовувати на практиці фізичні прилади. Забезпечити розвиток експериментальних умінь слухачів і навичок проведення вимірювань фізичних величин.

Тип заняття: закріплення вивченого матеріалу.

Вид заняття: лабораторна робота.

Методи навчання:

пояснювально-ілюстративний:

– більш конкретне, наочне пояснювання слухачам навчального матеріалу;

частково-пошуковий метод:

– пошук слухачами відповідей на сукупність логічних запитань з конкретної теми, спрямованих на виконання лабораторної роботи.

Опорні терміни і поняття: нерівноважні процеси, явища переносу, середня довжина вільного пробігу молекули, коефіцієнт в'язкості.

Основні джерела інформації:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.1.: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Техніка, 1999. – 269с., ст. 343-348, 348-352.

2. Борисенко В. Г. Фізика. Практикум. Лабораторні роботи. Х .: НУЦЗУ, 2010. – ст. 44-51.

3. ФІЗИКА. Методичні рекомендації з організації самостійної роботи студентів при вивченні дисципліни. / Борисенко В. Г., Деркач Ю.Ф., Кривцова В.І., Умеренкова К.Р. / Х .: НУЦЗУ, 2010, 63 с. (електронний варіант).

План заняття та розподіл часу

1. Організаційний етап – 5хв:
 - нагадування правил техніки безпеки для перебування в лабораторії, та під час виконання лабораторної роботи;
 - перевірка наявності запису лабораторної роботи в журналі звітів.
2. Підготовка до виконання лабораторної роботи – 10хв:
 - перевірка домашнього завдання;
 - перевірка готовності до роботи.
3. Виконання лабораторної роботи – 55хв:
 - підготовка лабораторної установки до роботи;
 - проведення прямих і непрямих вимірів, знаходження необхідних похибок вимірів, оформлення таблиць та графіків. Формулювання висновку.
4. Підведення підсумків заняття – 5хв.
5. Домашнє завдання – 5 хв



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

КАФЕДРА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ
ДИСЦИПЛІН

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

Укладачі:

В.Г. Борисенко, В.І. Кривцова, К.Р. Умеренкова

Харків
2018

Мета роботи: вивчення явищ переносу і експериментальне визначення коефіцієнта в'язкості рідини.

Короткі теоретичні відомості

Важливою особливістю довільної макросистеми (газоподібні, рідкі та тверді тіла) є те, що при виведенні системи зі стану рівноваги вона буде намагатись знову перейти до стану рівноваги. Виникнення нерівноважного стану часто проявляється в наявності градієнтів параметрів системи, тому сам перехід до стану рівноваги супроводжується виникненням потоків, характер яких залежить від природи нерівноважного стану і полягає в перенесенні частинок, імпульсу, тепла, електричного заряду та інших величин. Такі нерівноважні процеси називають *явищами перенесення*. До них відносяться, наприклад, *теплопровідність, дифузія та внутрішнє тертя*.

Зокрема, явище внутрішнього тертя (в'язкість) спостерігається, коли в рідині або газі швидкість течії в різних місцях середовища різна. В цьому випадку перехід до рівноважного стану буде полягати в процесі вирівнювання швидкості, який має назву внутрішнього тертя або в'язкості. Коротко опишемо механізм цього процесу. Для спрощення будемо вважати, що вектор швидкості рідини (газу) буде мати однаковий напрямок у всіх перерізах течії (рис. 5.1), але модуль вектора швидкості

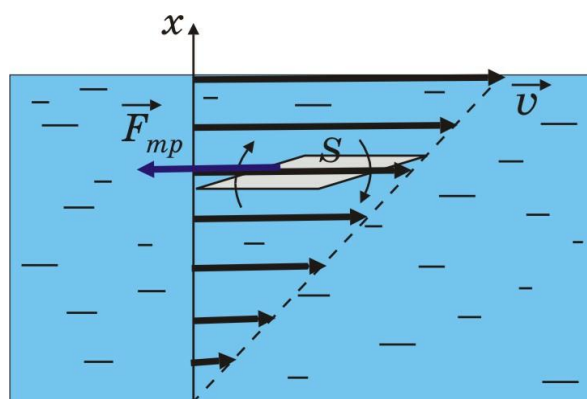


Рис. 5.1. Розподіл швидкості в течії.

змінюється лише в одному напрямі (вісь x), перпендикулярному до напрямку течії, тобто $v = v(x)$. Тоді через довільний переріз S (рис. 5.1), перпендикулярний до площини рисунка, за рахунок теплового руху із шару, який рухається з більшою поступальною швидкістю, молекули переходять до шару, що рухається з меншою швидкістю і навпаки. В результаті шари течії обмінюються імпульсами, передача яких відбувається в напрямку осі x , за рахунок чого і відбувається вирівнювання швидкостей шарів, оскільки верхній шар буде прискорювати нижній, а нижній буде гальмувати верхній.

Тоді можна підрахувати імпульс, що переноситься за одиницю часу в напрямку осі x через одиничну площу. Але, згідно з другим законом Ньютона, зміна імпульсу за одиницю часу – це є сила. Ця сила є *сила тертя*, що виникає між шарами рідини, що рухаються з різними швидкостями. Цим і обумовлена назва явища – внутрішнє тертя.

Підрахунки і дослід показують, що *сила внутрішнього тертя*, яка діє на одиницю площі поверхні, що розділяє сусідні шари, пропорційна градієнту швидкості dv/dx і дорівнює

$$f = -\eta \frac{dv}{dx}, \quad (5.1)$$

де коефіцієнт η має назву *коефіцієнта внутрішнього тертя або коефіцієнта динамічної в'язкості*. За фізичним змістом коефіцієнт внутрішнього тертя показує, як швидко передається імпульс із шару в шар, а кількісно він дорівнює величині імпульсу, що передається за одиницю часу через одиничну площадку при одиничному градієнті швидкості. З другого боку, коефіцієнт в'язкості чисельно дорівнює силі, що діє на одиницю площі поверхні, що розділяє сусідні шари при одиничному градієнті швидкості. Тому, за одиницю в'язкості в системі СІ приймається коефіцієнт в'язкості такої речовини (рідини або газу), в якій за градієнта швидкості, рівного одиниці (1с^{-1}), через площу в 1м^2 за час 1с переноситься імпульс в 1кгм/с . Отже, коефіцієнт в'язкості в СІ вимірюється в одиницях $\text{кг/м} \cdot \text{с} = \text{Па} \cdot \text{с}$.

Коефіцієнт в'язкості в газах і рідинах має різну природу. Так, згідно з елементарною кінетичною теорією для ідеального газу

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \bar{\ell}, \quad (5.2)$$

де ρ – густина газу; \bar{v} – середня швидкість теплового руху молекул; $\bar{\ell}$ – середня довжина вільного пробігу молекул. В (5.2) $\rho = nm$, де n – концентрація молекули, а m – її маса; $\bar{v} \propto \sqrt{T}$, $\bar{\ell} \propto 1/n$. Тому очевидно, що коефіцієнт ідеального газу не залежить від тиску і пропорційний \sqrt{T} . Цей висновок підтверджується експериментально для розріджених газів. Зокрема, (див. табл. 4 додатку II) коефіцієнт в'язкості газів за температури 20°C і атмосферних умов ($101,3\text{кПа}$) має порядок $10^{-5}\text{Па} \cdot \text{с}$. Наприклад, в'язкість повітря – $1,82 \cdot 10^{-5}\text{Па} \cdot \text{с}$, кисню – $2,02 \cdot 10^{-5}\text{Па} \cdot \text{с}$, а водню – $0,88 \cdot 10^{-5}\text{Па} \cdot \text{с}$. В'язкість реальних газів може залежати від тиску та температури і визначається відхиленням стану газу від ідеального. У рідинах в'язкість визначається також міжмолекулярною взаємодією. В загальному випадку в'язкість рідин падає з ростом температури і росте при збільшенні тиску. В деяких органічних рідинах (наприклад, гліцерин) при підвищенні температури в'язкість може падати дуже швидко. Зокрема, в'язкість води при

температурі 20°C складає $1,002 \pm 0,001$ мПа·с і це значення приймається за еталон. При зниженні температури густина в'язкої рідини зростає і вона перетворюється в аморфне тіло (наприклад, каніфоль).

Якщо у в'язкій рідині або газі рухається тіло, то на нього діє сила опору. В загальному випадку вона залежить від різних факторів: в'язкості рідини, форми тіла, швидкості руху тіла та ін., тому гідродинамічний розрахунок величини сили опору досить складний. Але для тіл, що рухаються досить повільно, можна вважати, що сила опору пропорційна першому степеню швидкості v і із міркувань розмірності можна знайти вираз для неї, який має вигляд

$$F_{on} = A\eta Lv, \quad (5.3)$$

де L – характерний розмір тіла, A – безрозмірний множник, що залежить від форми тіла, його орієнтації відносно потоку рідини і одержується за більш строгими розрахунками. Так, для найпростішого випадку тіла сферичної форми Стокс обчислив, що множник $A = 6\pi$, якщо за характерний розмір взяти радіус R кульки. Тоді сила опору буде визначатись за *формулою Стокса*, яка має вигляд

$$F_{on} = 6\pi\eta Rv. \quad (5.4)$$

Те, що сила опору залежить від коефіцієнта в'язкості, дає можливість визначити його за результатами досліду.

Опис лабораторної роботи

Вимірювання коефіцієнта в'язкості рідини виконується на лабораторній установці, зовнішній вигляд якої показано на рис. 5.2а, а її схематичне зображення – на рис. 5.2б. Основним елементом установки є прозора трубка 6 з рідиною, в якій може рухатись сталева кулька 7. Фіксація кульки в верхньому положенні трубки (рис. 5.2б) здійснюється за допомогою пускового пристрою: електромагніту 4 та магнітопроводу 5. Якщо після фіксації кульки встановити трубку вертикально і вимкнути електромагніт, то кулька буде падати в рідині. Для виміру швидкості кульки трубка поміщена в корпус 3, що має два оптоелектричних датчики (верхній і нижній), які розміщені на фіксованій відстані l один від одного. Кожний складається з світлодіода (джерело світла) та фотодіода (приймач світла). Якщо кулька при падінні перетинає промінь світлодіода, то відбувається падіння сигналу фотодіода, що фіксується на дисплеї монітора (рис. 5.2а). Оскільки на дисплеї монітора зображена залежність інтенсивності сигналу верхнього і нижнього фотодіодів від часу, то це дозволяє виміряти проміжок часу, протягом якого кулька рухалась від верхнього датчика до нижнього.

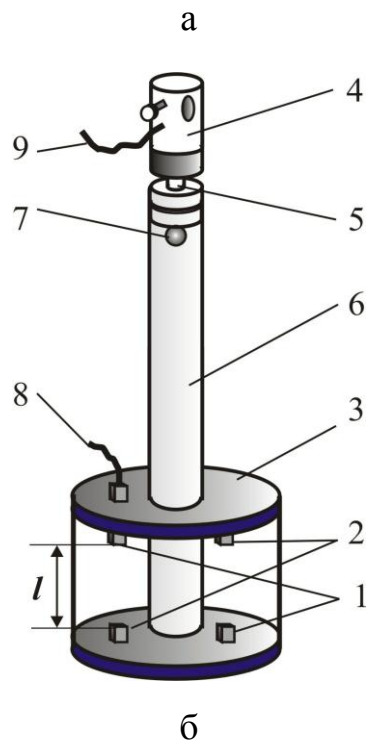
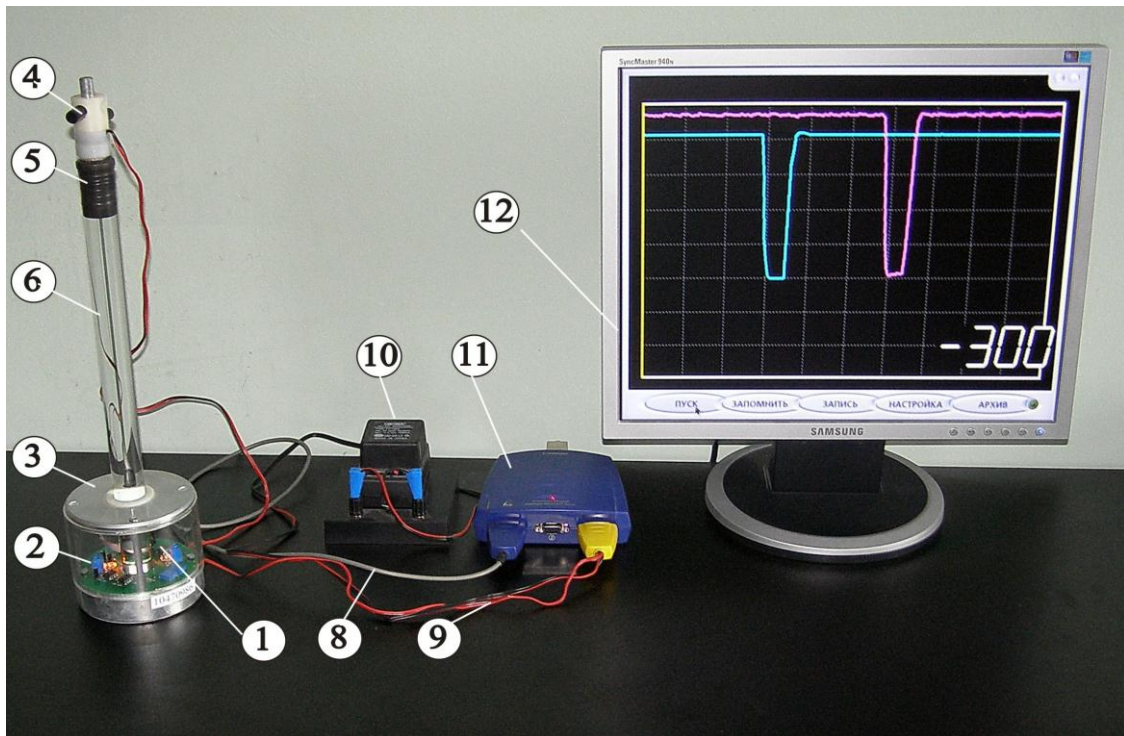


Рис. 5.2. Зовнішній вигляд (а) лабораторної роботи та її схематичне зображення (б). Позначення: 1 – світлодіод; 2 – фотодіод; 3 – корпус; 4 – електромагніт; 5 – магнітопровід; 6 – трубка з рідиною; 7 – сталева кулька; 8 – кабель датчиків; 9 – кабель електромагніту; 10 – джерело живлення нагрівача; 11 – вимірювальний блок; 12 – монітор.

Метод вимірювання коефіцієнта в'язкості базується на розгляді руху кульки при її падінні в рідині (газі). У цьому випадку на кульку діють (рис. 5.3) три сили: вертикально донизу – сила тяжіння $\vec{P} = m\vec{g}$, де

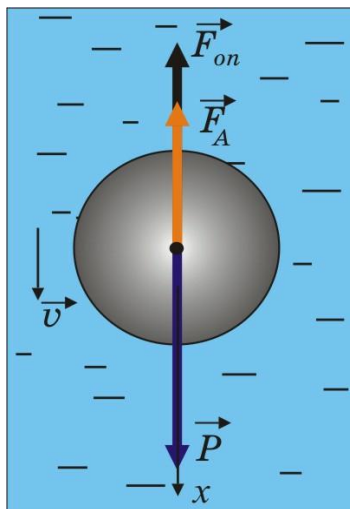


Рис. 5.3. Схема дії сил на кульку, що падає в рідині

m – маса кульки, а \vec{g} – прискорення вільного падіння; вертикально догори – сила Архімеда \vec{F}_A та сила опору \vec{F}_{op} . Рівняння руху кульки має вигляд

$$m\vec{a} = \vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_{op}, \quad (5.5)$$

де \vec{a} – прискорення кульки. В цьому рівнянні сила тяжіння за величиною дорівнює

$$P = mg = \rho_m Vg = \rho_m \frac{4}{3} \pi R^3 g, \quad (5.6)$$

де ρ_m – густина матеріалу кульки; V – її об'єм; R – радіус кульки. Вираз для величини сили Архімеда записується аналогічно

$$F_A = \rho Vg = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g, \quad (5.7)$$

де ρ – густина рідини.

Якщо кулька рухається досить повільно, то величина сили опору F_{op} , що діє з боку рідини на тіло, яке має форму кулі, визначається за формулою Стокса (5.4). Тоді рівняння (5.5) в проєкціях на напрямок руху буде мати вигляд

$$ma = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_m g - \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g - 6\pi\eta Rv. \quad (5.8)$$

Зауважимо, що на початку руху кульки сила тяжіння за величиною більша за суму сил Архімеда та опору ($P > F_A + F_{\text{оп}}$), тому рух кульки прискорений. Але, згідно з (5.4), сила опору при зростанні швидкості також зростає і досить швидко наступає момент, коли наступить рівновага сил $P - F_A - F_{\text{оп}} = 0$. З цього моменту рух кульки буде рівномірним ($a = 0$) і рівняння руху (5.8) запишеться у вигляді

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_m g = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g + 6\pi\eta Rv. \quad (5.9)$$

З (5.9) одержимо вираз для коефіцієнта в'язкості

$$\eta = \frac{2R^2 g (\rho_m - \rho)}{9v}. \quad (5.10)$$

Якщо експериментально визначити швидкість кульки v , то всі інші величини в рівнянні (5.10) легко знайти: геометричний розмір кульки (R) вимірюється безпосередньо, табличні (ρ_m , ρ) чи метрологічні (g) дані відомі до досліду.

Швидкість кульки v у формулі (5.10) визначається експериментально. Оскільки верхній і нижній датчики розміщені в кінцевій частині трубки з рідиною, то рух кульки між ними буде рівномірний, тому її швидкість визначається за формулою

$$v = \frac{l}{\Delta t}, \quad (5.11)$$

де l – фіксована відстань між верхнім та нижнім датчиками; Δt – проміжок часу, протягом якого кулька рухалась від верхнього датчика до нижнього. Підставивши (5.11) в (5.10) одержимо робочу формулу

$$\eta = \frac{2R^2 g (\rho_m - \rho)}{9l} \Delta t \quad (5.12)$$

для експериментального визначення коефіцієнта в'язкості.

Завдання:

- а) визначити час проходження кульки між верхнім і нижнім датчиками декілька разів;
- б) визначити експериментальне значення коефіцієнта в'язкості;
- в) порівняти метрологічне та експериментально визначене значення коефіцієнтів в'язкості.

Порядок виконання роботи

1. Підготуватись до роботи. Для цього необхідно зібрати установку і під'єднати вимірювальні кабелі. У вікні монітора відкрити програму „L-физика практикум”, в меню програми натиснути пункт „Вибор работы” і у вікні, що відкриється, в наведеному переліку лабораторних робіт натиснути назву „Измерение вязкости жидкости методом Стокса”. Після цього, для переходу до вимірів натиснути кнопку «Проведение измерений», що приведе до відкриття вікна виконання лабораторної роботи і вмикання електромагніту пускового пристрою.
2. Занести до таблиці даних радіус кульки R , відстань l між датчиками, густину матеріалу кульки ρ_m та густину рідини ρ відповідно.
3. Витягнути трубку з корпусу і перевернути трубку так, щоб кулька, падаючи вертикально донизу, торкнулась до магнітопроводу пускового пристрою. Після цього помістити трубку в корпус.
4. Натиснути кнопку „Пуск” в меню роботи для початку реєстрації даних і спостерігати за падінням кульки.
5. Після проходження кулькою верхнього і нижнього датчиків на екрані монітора буде зафіксоване зображення (рис. 5.2а) залежності фотоструму від часу для верхнього і нижнього датчиків відповідно. Кожна з них має характерний мінімум, що свідчить про проходження кульки повз відповідний датчик. Користуючись курсором, визначте час руху кульки між датчиками. Для цього підведіть курсор до точки, що відповідає середині мінімуму сигналу від верхнього датчика, і натисніть ліву кнопку миші. На екрані виникне вертикальна жовта лінія, що проходить через вибрану точку, а в нижньому правому кутку буде вказаний час, що відповідає цій точці. Занести це значення часу t_1 до таблиці. Після цього аналогічно визначити і занести в таблицю час t_2 , що відповідає середині мінімуму сигналу від нижнього датчика.

Таблиця

№	R , м	l , м	ρ , кг/м ³	ρ_m , кг/м ³	t_1 , с	t_2 , с	Δt , с	η_i , кг м·с	$\Delta \eta_i$, кг м·с
1.									
2.									
.									
.									
								$\bar{\eta} =$	$\sum_i \Delta \eta_i^2 =$

6. За даними таблиці розрахувати за формулою (5.12), коефіцієнт в'язкості рідини і занести результат до таблиці.

7. Провести дослід п'ять разів, повторюючи дії пунктів 3-6. Живлення електромагніта вмикається автоматично після завершення чергового запису даних.
8. За даними таблиці розрахувати середній коефіцієнт в'язкості $\bar{\eta}$ рідини та похибку вимірювання $\Delta\eta$.
9. Порівняти експериментально знайдене значення $\bar{\eta}$ з метрологічним для даної рідини і зробити висновки.

Контрольні питання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Які явища мають назву явищ перенесення?
3. В чому полягає явище в'язкості і за яких умов воно виникає?
4. Яка фізична величина переноситься при в'язкості ?
5. Чи є явище в'язкості рівноважним процесом?
6. Від яких параметрів залежить сила внутрішнього тертя?
7. Який фізичний сенс коефіцієнта в'язкості?
8. Як залежить коефіцієнт в'язкості різних речовин від тиску та температури?
9. Вказати хід виконання лабораторної роботи.
10. Як впевнитись у вірності проведених вимірів коефіцієнта в'язкості?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.1.: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Техніка, 1999. – 269с., ст. 343-348, 348-352.
2. Физический практикум. / Под ред. В.И.Ивероной. – М: Гос.изд-во физ.- мат. л-ры, 1962.– 956с.