

Лабораторна робота № 1

Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідин методом Стокса

Мета роботи: Експериментально визначити коефіцієнт внутрішнього тертя рідини (технічне масло) методом падаючої кульки, який запропонував Стокс.

Прилади: скляний циліндр з рідиною, мікрометр, секундомір, пластикові кульки різного діаметра, масштабна лінійка.

Теоретичні відомості

В'язкість – важлива фізико-хімічна характеристика речовин. Величина, протилежна до в'язкості, називається текучістю. Її необхідно враховувати, наприклад, при перекачуванні рідин і газів трубопроводами, розливанні розплавлених металів, змащуванні машин та механізмів тощо. У медицині в'язкість крові визначає стан організму – в нормі або при патології.

В'язкість – властивість рідин і газів чинити опір відносному зсуву шарів. Вона виявляється в тому, що з боку шару, який рухається швидше, на шар, що рухається повільніше, діє прискорююча сила, а з боку шару, що рухається повільніше, на шар, що рухається швидше, діє гальмівна сила. В'язкість обумовлена наявністю між окремими частинками (молекулами) рідини сил притягання, які, при переміщенні однієї частини рідини відносно іншої, стримують рух шарів. Очевидно, що всі рідини повинні бути в'язкими, оскільки між реальними молекулами завжди існують сили не тільки притягання, а й відштовхування. Рівновага між цими силами й визначає рівноважний стан рідини. В рівноважному стані частинки (молекули) розташовуватимуться таким чином, що рівнодійна сила (сума сил притягання і відштовхування) дорівнюватиме нулю. Якщо ця умова не виконується, то молекули будуть переміщатися одна відносно одної, доки знову не настане рівновага.

У рідинах відстані між молекулами рідини порівняно невеликі (впорядкування зберігається на 1 – 1,5 нм відносно центральної частинки), тому сили взаємодії значні. Молекули рідин, подібно як і частинки твердого тіла, коливаються біля положень рівноваги. Після закінчення деякого інтервалу часу ($t_D \sim 10^{-11}$ с) молекула стрибком переходить у нове положення в об'ємі рідини. Цей час називається часом осілого життя молекули.

Сили міжмолекулярної взаємодії залежать від роду рідини. Речовини з малою в'язкістю – текучі, і навпаки, сильно в'язкі речовини можуть мати значну механічну твердість, як, наприклад, скло. В'язкість істотно залежить від кількості та складу домішок, і навіть від температури. З підвищенням температури час осілого життя зменшується, що зумовлює зростання рухливості рідини та зменшення її в'язкості.

Механізм в'язкості рідин, як і внутрішнє тертя в газах, зумовлений передачею кількості руху (mv) від одного шару рідини до іншого, але цей механізм володіє різною температурною залежністю (зі зростанням температури в'язкість рідин зменшується, а газів – росте (рис.1)). Для більшості рідин в заданому інтервалі температур і тисків в'язкість зменшується з температурою за експоненціальним законом:

$$\eta(T) = \eta_0 e^{\frac{E}{kT}} - \text{формула Френкеля.}$$

де η_0 – коефіцієнт в'язкості для даної рідини при нескінченно великій температурі, E – енергія активації в'язкої течії, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура.

Для газів та парів справедлива формула, встановлена українським фізиком І. П. Пулюєм (1845-1918):

$$\eta(T) = \eta_0(1 + \alpha T)^n$$

$$\frac{2}{3} < n < \frac{3}{4}$$

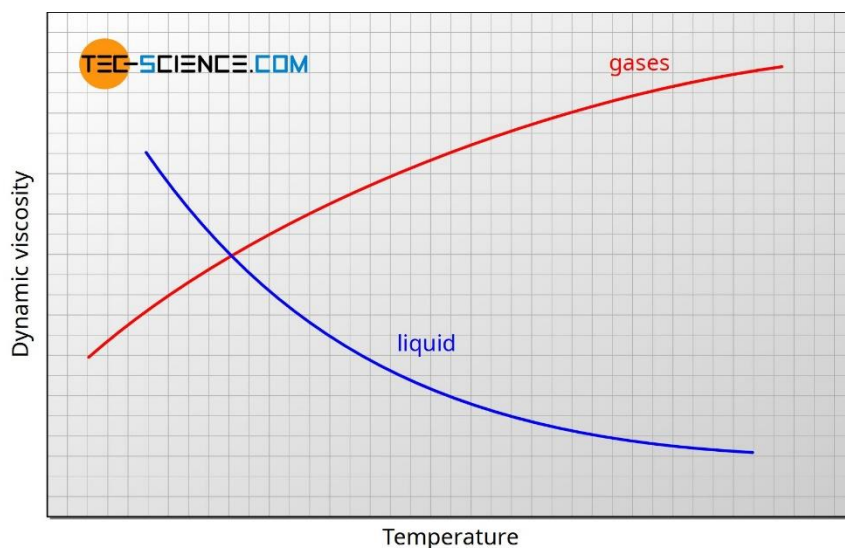
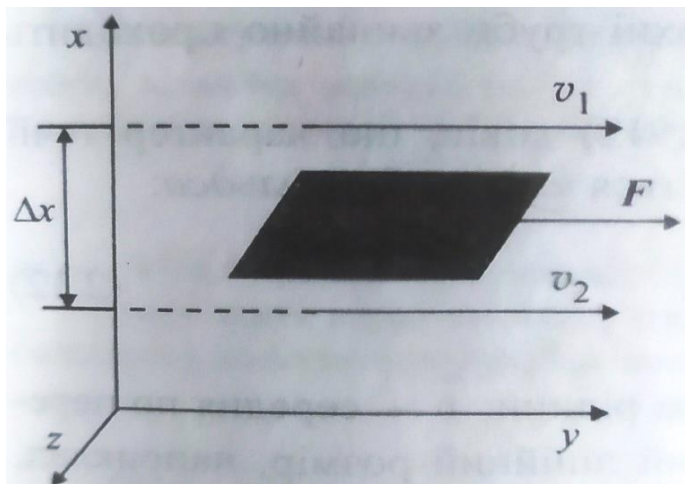


Рис.1. Температурна залежність коефіцієнтів в'язкості рідин і газів



Розглянемо два шари рідини, які рухаються перпендикулярно до осі ОХ з різними швидкостями (рис. 2). Дослідження показують, що між шарами рідини виникає сила внутрішнього тертя, і вона є тим більшою, чим більша контактна площа поверхні шару S і залежить від того, наскільки швидко змінюється швидкість течії рідини при переході від шару до шару. На

Рис. 2. Рух двох шарів рідин з різними швидкостями, перпендикулярний до осі Х

малюнку 2 показано два шари, які віддалені

один від одного на відстань Δx і рухаються зі швидкостями v_1 і v_2 . При цьому $v_1 - v_2 = \Delta v$. Напрямок, вздовж якого відраховується відстань між шарами, перпендикулярний до швидкості течії шарів. Величина $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ показує зміну швидкості від шару до шару в напрямку x , що перпендикулярний до напрямку руху шарів, і називається **градієнтом швидкості**. Таким чином, модуль сили внутрішнього тертя:

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} S \quad (1)$$

де коефіцієнт пропорційності η називається динамічною в'язкістю (або просто в'язкістю), який характеризує властивості конкретної рідини. Ця формула відома як формула Ньютона для сили в'язкості рідин.

Одиниця в'язкості в системі СІ – паскаль-секунда (Па•с).

Відомо, що існує два режими течії: *ламінарний* і *турбулентний*. Англійський фізик О. Рейнольдс (1842-1912) довів, що характер течії залежить від безрозмірної величини, яка називається числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (2)$$

де ρ – густина рідини, v – середня по перетину труби швидкість рідини, d – діаметр труби.

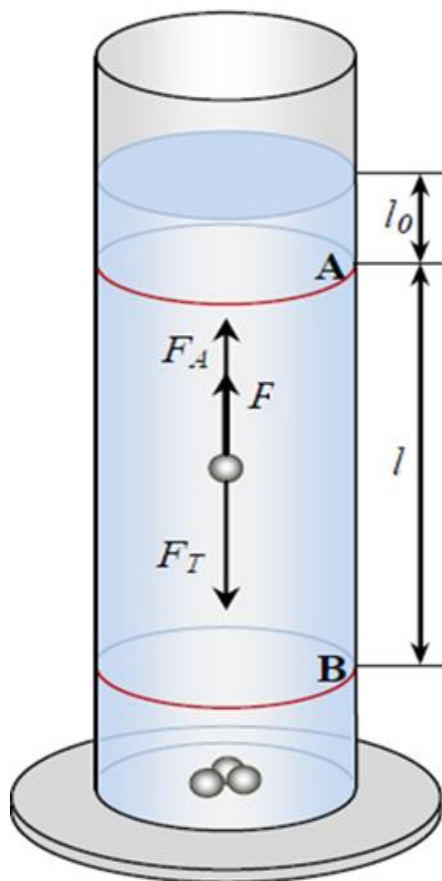
Для малих значень Re ($Re \leq 1000$) спостерігається ламінарна течія, перехід від ламінарного до турбулентного режиму проходить в області $1000 \leq Re \leq 2000$. Якщо Re однакове, то режим течії різних рідин (газів) в трубах різного діаметра однаковий.

При малих Re опір середовища зумовлений в основному лише силами тертя. Англійський фізик Стокс (1819-1903) теоретично довів, що під час падіння кульки в рідині, нескінченній в усіх напрямках, без будь-яких завихрень ($v = \text{const}$), сила тертя виражається формулою

$$F = 6\pi\eta r v \quad (3)$$

де v – швидкість руху кульки в рідині, r – радіус кульки.

Розглянемо рух падаючої кульки в рідині запропонований Стоксом. Беремо високий циліндр, наповнений досліджуваною рідиною (рис. 3). На циліндрі є 2 кільцеві мітки А і В, розміщені на віддалі l одна від одної. Якщо маленька кулька рівномірно



рухається в рідині, то вона зазнає опору. Кульку покриває тонкий шар рідини, який рухається зі швидкістю кульки. Відбувається тертя окремих шарів рідини між собою. Наступні віддалені від кульки шари рідини рухаються щораз з меншими швидкостями.

На кульку, що рухається в рідині, діють сили:

- 1) сила земного тяжіння, направлена вниз

$$F_T = \frac{4}{3}\pi r^3 g \rho_k$$

де ρ_k – густина кульки, r – радіус кульки, g – прискорення вільного падіння;

- 2) сила Архімеда, направлена вертикально вгору:

$$F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 g \rho$$

(ρ – густина рідини);

- 3) сила опору, напрямлена вертикально вгору:

$$F = 6\pi\eta r v$$

Рис. 3. Установка для вимірювання в'язкості рідини методом Стокса

Запишемо рівняння руху кульки:

$$ma = F_T + F_A + F \quad (4)$$

$$ma = \frac{4}{3}\pi r^3 g \rho_k - \frac{4}{3}\pi r^3 g \rho - 6\pi\eta r v$$

Сили тяжіння та Архімеда постійні. На початковому етапі сила опору змінюється і є прямо пропорційна швидкості руху кульки і меншою за силу тяжіння. Оскільки під час руху кульки її швидкість зростатиме, отже, матимемо справу з прискореним рухом. Але в певний момент часу, за деякого значення швидкості v , сила опору зросте настільки, що всі три сили зрівноважаться і рух кульки стане рівномірним. В цьому разі рівняння (3) переписеться в такому вигляді:

$$0 = \frac{4}{3}\pi r^3 g \rho_k - \frac{4}{3}\pi r^3 g \rho - 6\pi \eta r v \quad (5)$$

Після перетворень вираз для коефіцієнта внутрішнього тертя:

$$\eta = \frac{2g(\rho_k - \rho)r^3}{9v} \quad (6)$$

Але формула(6) справедлива лише для нескінченного середовища. Тому враховуючи поправки на розміри посудини, матимемо:

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho_k - \rho}{v} \frac{1}{1+2.4\frac{r}{R}} \frac{1}{1+3.3\frac{r}{h}} \quad (7)$$

де R – радіус поперечного перерізу циліндричної посудини; h – висота стовпа рідини.

Оскільки $\frac{r}{h}$ для даної установки дуже мале, то **робоча формула** матиме вигляд:

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho_k - \rho}{l\left(1+2.4\frac{r}{R}\right)} t$$

де $v = l/t$, l – шлях, який проходить кулька за час t .

Таблиця вимірювань (для 2 кульок):

№	t, c	$\eta, Pa \cdot c$	$\Delta\eta, Pa \cdot c$	$E, \%$
1			***	***
...			***	***
5			***	***
	с/зн	с/зн		

Хід роботи

1. Мікрометром виміряти діаметри кульок і визначити їхні радіуси.
2. Виміряти віддаль l між двома мітками (шлях, пройдений кулькою за час t).
3. Опустити кульку в циліндр так, щоб вона падала вздовж осі циліндра. Виміряти секундоміром час t падіння кульки між двома мітками циліндра.
4. Дослід повторити п'ять разів з різними кульками.
5. Згідно з робочою формулою визначити коефіцієнт внутрішнього тертя рідини та знайти середнє значення. Порахувати абсолютну та відносну похибки експерименту. Результати вимірювань та обчислень записати в таблицю. Зробити висновок.

Густини кульок, густина рідини та діаметр циліндра зазначені на установці.

Контрольні питання

1. Що таке в'язкість? Розмірність коефіцієнта в'язкості?
2. Які сили діють на кульку, яка рухається в рідині? Записати рівняння руху кульки в рідині.
3. Яка залежність коефіцієнта в'язкості рідини від температури? Намалювати температурну залежність коефіцієнтів в'язкості рідин і газів. Записати формулу Ньютона для сили внутрішнього тертя в рідині.
4. Чому, починаючи з деякого моменту часу, кулька рухається рівномірно?
5. Яка природа сили внутрішнього тертя в рідині.
6. Що таке «ньютонівська» і «неньютонівська» рідина?
7. Що таке ламінарний і турбулентний режими течії рідин?
8. Пояснити, що означають написи на машинному маслі: 5W-30, 10W-40, 10W-30.