

## Лабораторна робота № 1

### Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідин методом Стокса

Мета роботи: Експериментально визначити коефіцієнт внутрішнього тертя рідини (в'язкості) методом падаючої кульки, який запропонував Стокс.

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

### Теоретичні відомості

Розглянемо два шари рідини, які рухаються перпендикулярно до осі  $OZ$  з різними швидкостями  $v_1$  і  $v_2$  відповідно (рис. 16). Дослід показує, що між шарами виникає сила внутрішнього тертя, пропорційна градієнту швидкості та площі поверхні шарів, по якій вони дотикаються між собою:

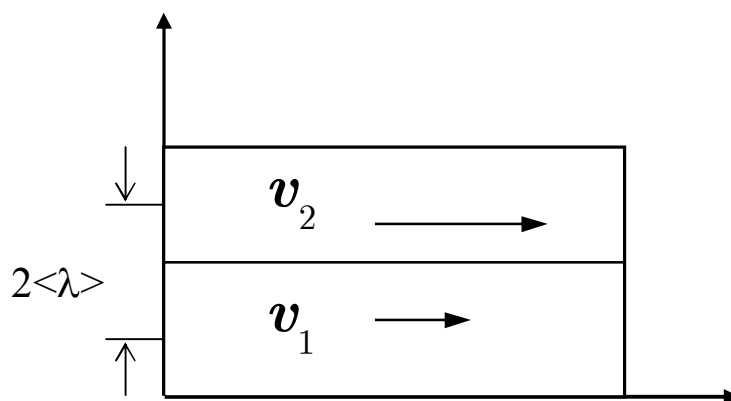


Рис. 16.

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S. \quad (1)$$

Ця формула відома як формула Ньютона для сили в'язкості. Коефіцієнт пропорційності  $\eta$  називається коефіцієнтом в'язкості, який характеризує властивості даної рідини. Як видно з (1), коефіцієнтом в'язкості називається фізична величина, чисельно рівна силі, що виникає між двома шарами рідини чи газу одиничної площі при градієнті швидкості, рівному одиниці. Коефіцієнт в'язкості вимірюється в Паскаль – секундах (Па·с).

Якщо маленька кулька повільно рухається в рідині, то вона зустрічає опір, зумовлений в'язкістю рідини. Причому в цьому випадку спостерігається не тертя кульки до рідини, а тертя окремих шарів рідини між собою: кулька покривається тонким шаром, який рухається зі швидкістю кульки. Наступні більш віддалені від кульки шари рідини рухаються зі все меншими швидкостями. Стокс теоретично показав, що при падінні кульки в рідині, нескінченній в усіх напрямках, без будь-яких завихрень, сила тертя, що діє на неї, виражається формулою

$$F = 6\pi\eta r v, \quad (2)$$

де  $v$  – швидкість падіння кульки,  $r$  – радіус кульки.

На кульку, що падає в рідині, діють три сили:

- 1) сила земного тяжіння, направлена вертикально вниз:

$$F_{\text{тяж}} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{к}} g$$

( $\rho_{\text{к}}$  – густина кульки,  $r$  – радіус кульки,  $g$  – прискорення вільного падіння);

- 2) сила Архімеда, направлена вертикально ввєрх:

$$F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{р}} g$$

( $\rho_p$  – густина рідини);

3) сила опору, направлена вертикально вгору:

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

Запишемо рівняння руху даної кульки:

$$ma = \frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho_k - \rho_p) - 6\pi\eta r v. \quad (3)$$

При русі кульки з ростом швидкості зростатиме й сила опору. При деякому значенні швидкості  $v$ , сили, що діють на кульку, зрівноважуються. Рух кульки при цьому буде рівномірним. Тому рівняння (3) переписеться в такому вигляді:

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

Звідси коефіцієнт внутрішнього тертя:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_k - \rho_p}{v}. \quad (5)$$

Здійснити падіння кульки в необмеженому середовищі практично неможливо, оскільки рідина завжди знаходиться в якійсь посудині, що має стінки. Врахування наявності стінок, дна посудини і поверхні рідини при русі кульки вздовж осі циліндричної посудини призводить до наступного виразу для коефіцієнта в'язкості:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_k - \rho_p}{v} \frac{1}{1 + 2,4 \frac{r}{R}} \frac{1}{1 + 3,3 \frac{r}{h}}, \quad (6)$$

де  $R$  – радіус поперечного перерізу циліндричної посудини;  $h$  – висота стовпа рідини у ній. Оскільки  $\frac{r}{h}$  для даної установки дуже мале, то для обчислення коефіцієнта внутрішнього тертя можна використовувати більш просту формулу:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{(\rho_k - \rho_p) \tau}{l \left(1 + 2,4 \frac{r}{R}\right)},$$

де  $l$  – шлях, який проходить кулька за  $\tau$  секунд.

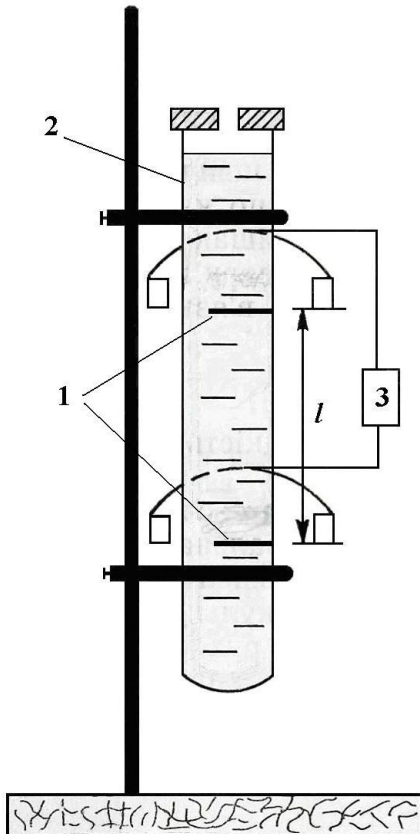


Рис. 17. Установка для вимірювання в'язкості рідини методом Стокса.

#### Хід виконання робіт

1. Виміряти мікрометром діаметри кульок і визначити їх радіуси.
2. Виміряти віддаль між кільцями 1 на скляному циліндрі 2 з рідиною.
3. Пінцетом опустити кульку в циліндр так, щоб кулька падала вздовж осі циліндра. Виміряти секундоміром 3 час падіння кульки між кільцями на скляному циліндрі.
4. Дослід повторити п'ять разів з різними кульками.
5. Визначити коефіцієнт внутрішнього тертя з кожного досліду та знайти середнє значення. Розрахувати абсолютну та відносну похибки експерименту.

Результати вимірювань та обчислень занести в таблицю.

Густина кульок, густина рідини та діаметр циліндра вказані на установці.

№ $\frac{c}{i}$	$r, м$	$l, м$	$\tau, с$	$\eta, Па \cdot с$	$\Delta\eta, Па \cdot с$	E, %
-----------------	--------	--------	-----------	--------------------	--------------------------	------

### Контрольні запитання

1. Що таке в'язкість? В яких одиницях вимірюється коефіцієнт в'язкості?
2. Які сили діють на кульку, яка падає у рідині?
3. Чому, починаючи з деякого моменту часу, кулька рухається рівномірно?
4. Як змінюється швидкість руху кульки зі збільшенням її діаметра?