

Вивчення явища внутрішнього тертя

Мета роботи: визначити коефіцієнт внутрішнього тертя (в'язкість) рідини методом Стокса.
Приналежності. Прилад Стокса, алюмінієві кульки, мікрометр, лінійка, секундомер.

Теоретичний вступ

В'язкість або **внутрішнє тертя** – властивість газів та рідин чинити опір переміщенню однієї їх частини відносно іншої.

Відомо, що при протіканні рідини уздовж труби швидкості різних шарів розподілені так, як показано на рис. 1, де стрілки представляють вектори швидкостей u шарів, перпендикулярних осі x .

Найбільша швидкість спостерігається в середній прилеглій до осі частині труби, в міру наближення до стінок швидкість зменшується, а шар, що безпосередньо прилягає до стінок труби, є нерухомим.

Внаслідок теплового руху молекули рідини переходять з одного шару в інший, переносячи при цьому свій імпульс tu упорядкованого руху. В результаті обміну молекулами між шарами, що рухаються з різними швидкостями, імпульс упорядкованого руху шару, що рухається швидше, зменшується, а шару, що рухається повільніше – збільшується. Іншими словами, більш швидкий шар гальмується, а повільний – прискорюється.

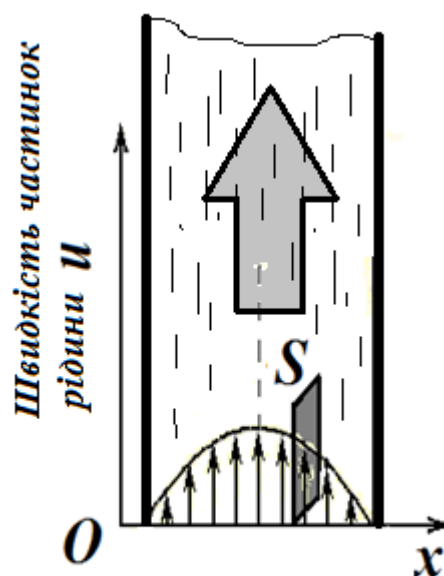
Згідно з другим законом Ньютона сила дорівнює швидкості зміни імпульсу, тобто похідній імпульсу за часом.

Це означає, що на кожен з шарів, що рухається відносно сусіднього, діє сила, яка дорівнює зміні імпульсу в одиницю часу. Сила ця – сила тертя між шарами рідини, що рухаються з різними швидкостями. Звідси і назва – *внутрішнє тертя*.

Рівняння для сили внутрішнього тертя між сусідніми шарами називається законом Ньютона:

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

Тут η – так звана *динамічна в'язкість*, S - площа поверхні, що лежить на границі між шарами (див. рис.1), du/dx - швидкість зміни швидкості течії рідини або газу в напрямку x , перпендикулярному до напрямку руху шарів (градієнт u).



Протікання рідини по круглій трубі

Рис. 1.

Основи вимірювання в'язкості методом Дж. Стокса

Сила внутрішнього тертя виникає не тільки при русі рідини відносно тіла, що покоїться, але і при русі твердого тіла в рідині, яка покоїться. На цьому і заснований метод вимірювання в'язкості за Стоксом.

Стоксом була виведена формула для сили опору, що діє на кульку, що рухається в рідині, за умови, що рух рідини відносно кульки є *ламінарним*. Ламінарна течія - це така течія, при якій шари рідини можна вважати паралельними один одному і напряму макроскопічного руху рідини. Такі умови практично виконуються при досить малих швидкостях руху кульки.

Якщо ця умова не виконується, то в рідині утворюються вихори, течія стає *турбулентною* і тоді про в'язкість як про властивість речовини не може йтися.

У методі Стокса досліджують рух невеликої кульки в рідині за малих швидкостей.

На тверду кульку, що падає у в'язкій рідині, діють три сили (наведені модулі сил):

1) **сила тяжіння**

$$mg = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho_1 \cdot g ,$$

де r - радіус кульки;

ρ_1 - густина речовини кульки;

g - прискорення вільного падіння;

2) **виштовхувальна сила (сила Архімеда):**

$$F_A = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho_2 \cdot g ,$$

де ρ_2 - густина рідини;

3) **сила опору руху (сила в'язкості)**, обумовлена силами внутрішнього тертя рідини.

Якщо кулька падає в рідині, що простягається безмежно за всіма напрямками, не залишаючи за собою ніяких завихрень (мала швидкість падіння, маленька кулька), то, як показав Стокс, сила опору руху дорівнює:

$$F_C = 6 \pi r v \eta ,$$

де η - коефіцієнт внутрішнього тертя рідини (**або** динамічна в'язкість рідини);

v - швидкість руху кульки;

r - її радіус.

Ці три сили спрямовані по вертикалі (рис. 2): сила тяжіння - вниз, виштовхувальна сила Архімеда і сила опору - вгору.

Рівняння руху кульки в рідині (другий закон Ньютона) в проекції на напрямок руху має вигляд:

$$mg - F_A - F_C = ma, \quad (2)$$

де a - прискорення кульки.

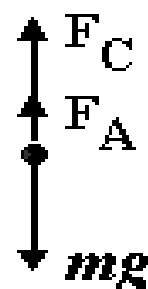


Рис. 2

Сила опору зростає зі збільшенням швидкості руху кульки, а прискорення зменшується, поки, нарешті, кулька досягає такої швидкості, при якій прискорення a стає рівним нулю.

Тоді рівняння (2) приймає вигляд:

$$mg - F_A - F_C = 0. \quad (3)$$

В цьому випадку кулька рухається з постійною швидкістю v_0 .

Підставимо значення сил, що входять в рівняння (3):

$$\frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot g - 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v_0 = 0. \quad (4)$$

Вирішуючи його відносно коефіцієнта внутрішнього тертя, отримаємо:

$$\eta = \frac{2 \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot r^2 \cdot g}{9 \cdot v_0}. \quad (5)$$

Практично неможливо здійснити падіння кульки в безмежному середовищі, оскільки рідина завжди міститься в якій-небудь посудині, що має стінки. Якщо кулька падає уздовж осі циліндричної посудини радіуса R , то врахування наявності стінок посудини призводить до наступного виразу для коефіцієнта в'язкості:

$$\eta = \frac{2 \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot r^2 \cdot g}{9 \cdot v_0 \cdot \left(1 + 2,4 \frac{r}{R}\right)}. \quad (6)$$

В СІ динамічна в'язкість вимірюється в Паскаль - секундах [Па·с].

Позасистемна одиниця динамічної в'язкості - пуаз [П].

1 Па·с = 10 Пуаз.

Так званий *кінематичний коефіцієнт в'язкості* може бути отриманий як відношення динамічного коефіцієнта в'язкості до густини речовини (η / ρ).

В СІ кінематична в'язкість вимірюється в квадратних метрах на секунду [м²/с]. Також використовується позасистемна одиниця - стокс [Ст].

1 Ст = 0,0001 м²/с = 1 см²/с.

Опис лабораторної установки

Для визначення в'язкості рідини за методом Стокса береться висока скляна циліндрична посудина з досліджуваною рідиною (рис. 3). На посудині є дві кільцеві мітки A і B , розташовані на відстані L одна від одної. Рівень рідини має бути вище верхньої мітки на 4 - 5 см, щоб до моменту проходження кульки повз верхньої позначки її швидкість v_0 можна було вважати усталеною. Кидаючи кульку в посудину, відзначають за секундоміром час t проходження кулькою відстані L між двома мітками.

Знаючи відстань L між мітками на посудині і проміжок часу t , за який кулька проходить цю відстань, можна визначити швидкість її рівномірного руху

$$v_0 = \frac{L}{t}$$

З огляду на те, що на досліді вимірюють діаметр кульки, а не її радіус, отримаємо **розрахункову формулу**

$$\eta = \frac{(\rho_1 - \rho_2) \cdot d^2 \cdot g \cdot t}{18 \cdot L \cdot \left(1 + 1,2 \frac{d}{R}\right)} \quad (7)$$

Порядок виконання роботи

1. Візьміть у викладача або лаборанта дані по густині матеріалу кульки ρ_1 і досліджуваної рідини ρ_2 . Занесіть отримані дані в таблицю.

2. Виміряйте внутрішній радіус судини R і відстань L між мітками на посудині. Виміряні дані запишіть в таблицю.

3. Відберіть декілька кульок. Виміряйте діаметри кульок d за допомогою штангенциркуля або мікрометра в трьох різних напрямках (d_1, d_2, d_3).

Обчисліть середнє арифметичне значення діаметра. Результати вимірювань занесіть у таблицю.

4. Опустіть одну кульку в циліндр з рідиною, як можна ближче до його осі (в разі утворення бульбашок повітря на поверхні кульки необхідно взяти іншу кульку і повторити даний дослід). У момент проходження кульки повз верхньої позначки включите секундомір і зупиніть його в момент проходження кулькою нижньої мітки. В процесі спостереження за кулькою, в момент проходження нею мітки, око повинно знаходитися на одному рівні з міткою. Результати вимірювання часу занесіть в таблицю.

5. Повторіть експеримент з іншими кульками.

6. Розрахуйте коефіцієнт в'язкості рідини за формулою (7). Оцініть величину похибки вимірювань.

7. Повторіть досліди для іншої рідини.

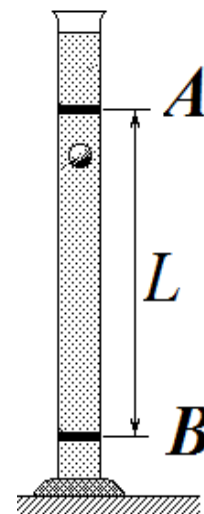


Рис. 3.

Таблиця

№ п/п	Рідина	L , м	d_1 , м	d_2 , м	d_3 , м	$\langle d \rangle$, м	t , с	ρ_1 кг/м ³	ρ_2 кг/м ³	η , Нс/м ²	$\langle \eta \rangle$, Нс/м ²	$S\langle \eta \rangle$ Нс/м ²	$\Delta \eta$ Нс/м ²	E %

Кінцевий результат записати у вигляді

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta \eta \text{ Н с/м}^2 \text{ при } \alpha = \dots$$

Контрольні питання

1. Поясніть механізм виникнення сили внутрішнього тертя, що діє на кульку, яка рухається у в'язкому середовищі.
2. Яке тертя враховується в досліді - тертя шарів рідини один об одного або тертя кульки об рідину?
3. В чому полягає метод Стокса? Які сили діють на кульку, що падає в рідині?
4. Від яких величин залежить в'язкість?
5. Який фізичний зміст коефіцієнта внутрішнього тертя, в яких одиницях він вимірюється?

Рекомендована література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т, Луцік П. П. Загальний курс фізики у трьох томах : навч. посіб. Київ: Техніка, 2006. Т. 1 : Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. 536 с.
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є.). – Львів. – ”Бескід Біт”. – 2002.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики. Кн.2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. К. «Либідь»2001. – 422 с.
4. І.П.Гаркуша, В.П.Курінний. Фізика. Навч. посібник у 7 частинах. Ч.2 Молекулярна фізика. Д. НГУ. 2011.

Укладач І.П. Гаркуша