

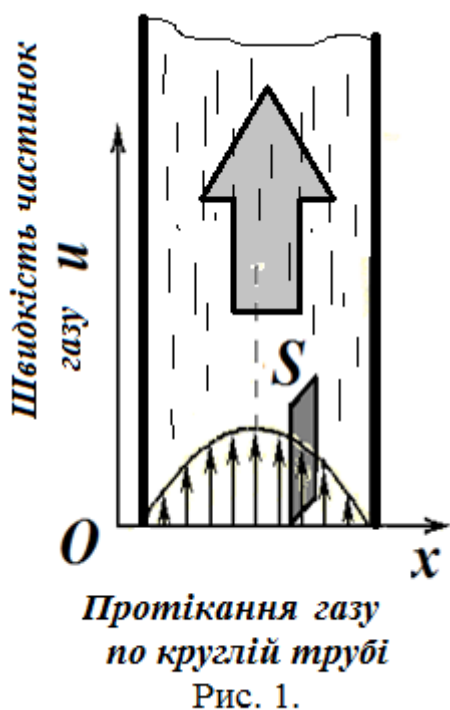
ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОСТІ ПОВІТРЯ ШЛЯХОМ ВИТІКАННЯ ЧЕРЕЗ КАПЛЯР

Приналежності: установка для визначення в'язкості повітря, секундомір.

Мета роботи: експериментальне визначення коефіцієнта в'язкості повітря, а також середньої довжини вільного пробігу і ефективного діаметра молекул азоту.

Теоретичний вступ

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



Під час течії газу уздовж труби швидкості різних шарів розподілені так, як показано на рис. 1, де стрілки представляють вектори швидкостей u шарів, перпендикулярних до осі x .

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

Внаслідок теплового руху молекули газу переходять з одного шару в інший, переносячи при цьому свій імпульс mu упорядкованого руху. Внаслідок 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.

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

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

Тут η - динамічна в'язкість, S - площа поверхні, що лежить на межі між шарами (рис. 1), du/dx - швидкість зміни швидкості течії рідини або газу в напрямку x , перпендикулярному до напрямку руху шарів (не зовсім точно називається градієнтом u).

Молекули газу знаходяться в стані хаотичного руху і постійно стикаються одна з одною. Між двома послідовними зіткненнями молекули рухаються рівно-

мірно прямолінійно, проходячи при цьому певний шлях, який називається *довжиною вільного пробігу*. У загальному випадку довжина шляху між послідовними зіткненнями є різною, але внаслідок величезної кількості молекул, що знаходяться в хаотичному русі, можна говорити про *середню довжину вільного пробігу*.

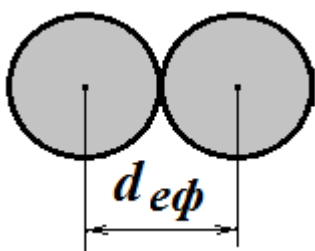


Рис. 2.

Необхідно відзначити, що в рамках моделі ідеального газу молекули вважаються твердими сферами. При зіткненні центри двох молекул зближуються на мінімальну відстань, яку умовно називають ефективним діаметром молекул d_{ef} (рис. 2).

Для середньої довжини вільного пробігу молекулярно-кінетична теорія доводить вираз (див., наприклад, підручники [1,2])

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \cdot d_{ef}^2 p} \quad (3)$$

де p - тиск газу, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - стала Больцмана, T - абсолютна температура, а середня довжина вільного пробігу $\langle \lambda \rangle$ і в'язкість η пов'язані виразом:

$$\langle \lambda \rangle = 1,86 \cdot \frac{\eta}{p} \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (2)$$

де M - молярна маса газу (для азоту $M = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль). $R = 8,31$ Дж/(К моль) - газова стала

З (3) випливає

$$d_{ef} = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2} \pi p \langle \lambda \rangle}} \quad (4)$$

Повітря приблизно на 80% складається з азоту, тому знайшовши в'язкість η **повітря**, можна приблизно визначити середню довжину вільного пробігу (2) і ефективний діаметр (4) молекул **азоту**.

Щоб визначити в'язкість повітря, його прокачують через тонку циліндричну трубку (капіляр). Чим більше в'язкість газу, тим з меншою швидкістю він буде проходити через тонкий отвір капіляра, і тим менше об'єм газу, що пройшов за одиницю часу через капіляр.

Опис установки

В'язкість повітря визначається за допомогою установки, зображеної на рис. 3, де 1 - аспіратор (процес відбору газу називається аспірацією), 2 - манометр, 3 - капіляр, 4, 5 - крани, 6 - пробка, 7 - шкала аспілятора. Щоб визначити в'яз-

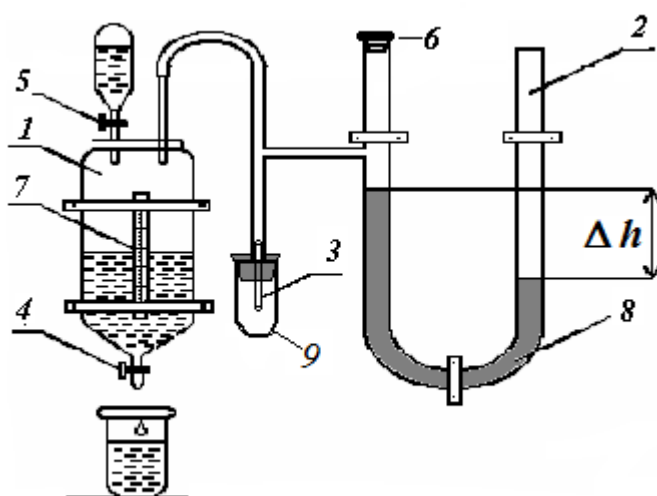


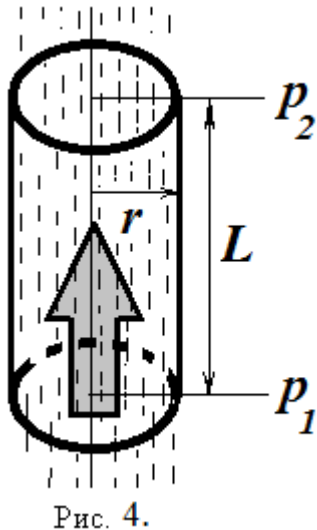
Рис. 3.

кість, повітря пропускають через капіляр 3. Це можна здійснити за допомогою *аспіратора 1*. Якщо відкрити кран 4, то вода буде вилитися з аспіратора, а над поверхнею води в аспіраторі створюється знижений тиск повітря.

За допомогою гумових і скляних трубок аспіратор з'єднується з відкритою знизу посудиною 9, яка вміщує капіляр і захищає його від пошкоджень. Трубка з капілярним наконечником 3. проходить через отвір у гумовому корку, який закриває посудину 9 зверху.

При витіканні води з аспіратора тиск у верхній частині аспіратора і в лівому коліні манометра зменшується. Внаслідок цього кінці *капіляра 3* перебувають під різними тисками. Тиск біля нижнього відкритого кінця дорівнює атмосферному, біля верхнього - знижений, як в аспіраторі, з яким капіляр з'єднаний трубкою. Різниця тисків сприяє **всмоктуванню повітря в аспіратор через капіляр**. Цю різницю тисків вимірюють за допомогою манометра 2, одне коліно якого відкрито (атмосферний тиск), а інше сполучене з аспіратором (знижений тиск).

Об'єм повітря, що пройшло через капіляр за певний час, дорівнює об'єму води, що витекла з аспіратора. Об'єм води, що витекла, вимірюється за шкалою на аспіраторі.



Згідно з формулою Пуазейля (виведення формули можна знайти в підручниках, наприклад в [3]) в'язкість *газу, що проходить через капіляр*, прямо пропорційна різниці тисків $\Delta p = p_1 - p_2$ біля входу в капіляр і на виході з нього (рис. 3, сильно збільшено) і обернено пропорційна об'єму V газу, що протікає через капіляр за проміжок часу Δt :

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \Delta p \cdot \Delta t}{8 \cdot V \cdot L}, \quad (5)$$

де r - радіус капіляра, L - його довжина.

Різниця тисків біля входу і виходу капіляра (див. рис. 3) дорівнює

$$\Delta p = \rho_v g \Delta h \quad (6)$$

де $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$ - густина води в манометрі, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - прискорення вільного падіння, Δh - середня різниця рівнів рідини в колінах манометра.

З урахуванням (11) підсумкова формула для розрахунку в'язкості повітря має вигляд:

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \rho_v \cdot g \cdot \Delta h \cdot \Delta t}{8 \cdot V \cdot L}. \quad (7)$$

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Визначення в'язкості повітря

1. Відкрити кран 5, вийняти пробку 6 і зрівняти рівні рідини в колінах манометра, наповнити аспіратор на 3/4 водою, потім закрити кран 5 і поставити на колишнє місце пробку 6.

2. Відкрити кран 4 і дочекатися, коли вода почне витікати з аспіраatora по-вільними краплями, а рівні води в колінах манометра припинять рух, після цього виміряти різницю рівнів води в колінах манометра Δh_1 .

3. Включити секундомір і визначити проміжок часу Δt , за який з аспіраatora витече певний об'єм води V . Стільки ж часу повітря протікало через капіляр. Об'єм води, що витекла, виміряти за шкалою на аспіраatori.

4. Виміряти за шкалою манометра кінцеву різницю рівнів води в колінах Δh_2 .

5. Обчислити середню різницю рівнів Δh води в колінах манометра за формулою

$$\Delta h = \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{2}. \quad (8)$$

6. Обчислити в'язкість повітря η за формулою (7). Довжина і радіус капіляра вказані на приладі. Дослід повторити 5 разів. Результати вимірювань і обчислень занести в таблицю.

Остаточний результат записати у вигляді $\eta = (\langle \eta \rangle \pm \Delta \eta)$, Па · с при $\alpha = \dots$

Завдання 2. Визначення середньої довжини вільного пробігу і ефективного діаметра молекул азоту

7. Виміряти температуру t° повітря термометром і атмосферний тиск p барометром.

8. Знаючи обчислене середнє значення в'язкості $\langle \eta \rangle$, за формулою (2) визначити середню довжину вільного пробігу молекул λ , результати занести в таблицю.

9. За формулою (4) визначити ефективний діаметр молекул азоту, результати занести в таблицю.

Таблиця

Довжина капіляра $L =$ радіус капіляра $r =$

N	$\Delta h_1,$ $м$	$\Delta h_2,$ $м$	$\Delta h,$ $м$	V $м^3$	$\Delta t,$ $с$	$\eta,$ $Па \cdot с$	$\langle \eta \rangle$ $Па \cdot с$	$\Delta \eta$ $Па \cdot с$	$E,$ $\%$	$T,$ $К$	$P,$ $Па$	$\lambda,$ $м$	$d_{эфф},$ $м$
1.													
2.													
3.													
4.													
5.													

Контрольні питання.

1. Що називається середньою довжиною вільного пробігу і ефективним діаметром молекул?

2. Чи є ефективний діаметр молекул газу константою? Від чого він залежить?
3. Чому кінці капіляра перебувають під різним тиском? Від чого залежить величина цього тиску?
4. Який механізм виникнення сил в'язкого тертя в газі?
5. У чому суть даного методу визначення в'язкості повітря?
6. Яким способом створюється різниця тисків на кінцях капіляра, через який прокачується повітря?
7. Як залежить в'язкість газу від тиску і температури?

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