

ПРОТОКОЛ IX

МОЛЕКУЛНА ФИЗИКА

Измерване на дължината на
средния свободен пробег на
молекулите на въздух

Лабораторно упражнение №3.2

Виолета Кабаджова,
ККТФ, фак. номер: ЗРН0600026

Физически Факултет,
Софийски Университет "Св. Климент Охридски"
28 май 2023 г.

1 Теоритична част

При движението на един реален флуид възникват сили на вътрешно триене, които се описват чрез ур. 1, където η - коефициент на вътрешно триене, $\left| \frac{\Delta v}{\Delta y} \right|$ - изменението на големината на скоростта, S - площта на триещите се слоеве.

$$F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta y} \right| S \quad (1)$$

Изследваме флуид в тръба, и тъй като той се движи под действие на разликата в налягания в двата края на тръбата, то потокът, който преминава през тръба, може да се опише посредством закона на Поазьой 3.

Използвайки формулата за потока флуид Q , преминаващ през тръбата, (закон на Поазьой 3), обема на изтеклия през тръбата флуид за време t (формула 4), както и изразяването на Δp под формата 2, получаваме работната ни формула 6 за коефициента на вътрешно триене η , която зависи от променливите V , t , Δh , които можем да измерим пряко при протичането на количество флуид през тръба.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g h_1 - \rho g h_2 = \rho g \Delta h \quad (2)$$

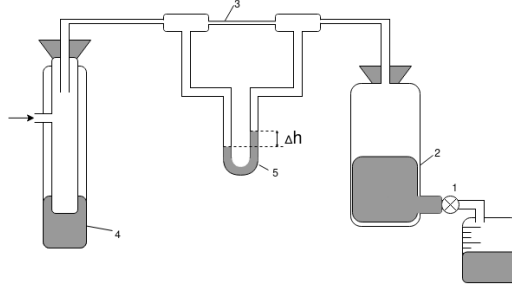
$$Q = \frac{\Delta p}{8\eta l} \pi r^4 \quad (3)$$

$$V = Qt = \frac{\Delta p}{8\eta l} \pi r^4 t \quad (4)$$

$$V = Qt = \frac{\rho g \Delta h}{8\eta l} \pi r^4 t \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\rho g \Delta h}{8Vl} \pi r^4 t \quad (6)$$

От друга страна молекулна-кинетичната теория ни дава връзка между коефициента на вътрешно триене на слоевете на флуид η и дължината на свободния пробег на молекулите $\bar{\lambda}$ чрез ур. 7, където ρ е плътността на флуида, а \bar{u} - средната топлинна скорост на молекулите.



Фигура 1: Схема на опитна постановка; 1 - кран, 2 - стъклен съд, 3 - капилярка, 4 - изсушител, 5 - диференциален манометър

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{u} \bar{\lambda} \quad (7)$$

От закона на Максвел за разпределението на молекулите по големината на скоростта за средната топлинна скорост \bar{u} се получава уравнение 8. Именно от 7 и 8 можем да изследваме дължината на свободния пробег на молекулите на флуид, протичащ през тръба, използвайки ур. 9.

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = 1.6 \sqrt{\frac{kT}{m}} = 1.6 \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \quad (8)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{3\eta}{\rho \bar{u}} = \frac{3\eta}{1.6\rho} \sqrt{\frac{\mu}{RT}} \quad (9)$$

2 Експериментална част

2.1 Експериментална установка

2.2 Задача: Измерване коефициента на вътрешно триене и дължината на свободния пробег на молекулите на въздуха

Коефициентът на вътрешно триене η намираме посредством формула 6 и опитната постановка, илюстрирана на фиг. 1. От стъкления съд 2 се пуска да тече вода с постоянна скорост. Това предизвиква различно

налягане в тръбичките, като от едната страна на манометъра налягането е атмосферно, а от другата - промененото в следствие на теча на вода, което води до навлизане на повече въздух към съответната страна на диференциалния манометър през капилярката ("отдясно" на илюстрация 1). Измерва се обемът на изтеклото количество вода в съда, на който има поставена скала, засича се времето и се изчисляват съответните коефициенти, като резултатите записваме в таблица 1. В същата таблица записваме и изчислената средна дължина на свободния пробег, използвайки формула 9, като от ур.8 получаваме $\bar{u} = 399.02 \pm 0.07 m/s^2$. В таблица 2 са записани константите, използвани при пресмятанията.

| N | h_i , [m] | t_i , [s] | $\eta_i \cdot 10^{-9}$, [-] | $\lambda \cdot 10^{-7}$, [m] |
|---|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 0.105 | 39 | 65 ± 13 | 2.95 ± 0.02 |
| 2 | 0.107 | 35 | 59 ± 12 | 2.70 ± 0.02 |
| 3 | 0.067 | 30 | 32 ± 7 | 1.45 ± 0.02 |
| 4 | 0.126 | 33 | 66 ± 14 | 3.00 ± 0.02 |
| 5 | 0.094 | 40 | 60 ± 12 | 2.71 ± 0.02 |

Таблица 1: Измервания и резултати

| Величина | Стойност и грешка | Мерна единица |
|-------------------------------------|------------------------------|---|
| Обем на изтеклото количество вода V | $(300 \pm 50) \cdot 10^{-6}$ | m ³ |
| Плътност на въздуха ρ_{air} | (1.293 ± 0.0005) | kg · m ³ |
| Земно ускорение g | (9.81 ± 0.005) | m/s ² |
| Дължина на капилярка l | (0.134 ± 0.0005) | m |
| Стайна температура T | (293.15 ± 0.005) | K |
| Моларна маса на въздуха μ_{air} | (0.289 ± 0.0005) | kg/mol |
| Универсална газова константа R | (6.1314 ± 0.00005) | J · mol ⁻¹ · K ⁻¹ |

Таблица 2: Константи, използвани при пресмятанията

Забелязваме, че намерените стойности, макар и всички отразяващи свойствата на едно и също вещество при едни и същи условия не съвпадат в рамките на грешките си. Правим проверка за ламинарно движение, тъй като когато скоростта на движещия се въздух започне да расте, се

достига стойност, при която ламинарното движение преминава в турбулентно и формулата на Поазьой вече не е в сила. Тогава потокът Q за турбулентно движещ се флуид и по-малък от изчисления чрез формула 3, тъй като при турбулентно движение η е значително по-голям. Видът движение може да се определи посредством числото на Рейнолдс (Re), като условието за ламинарно движение на флуид с плътност ρ и коефициент на вътрешно триене η , който протича в цилиндрична тръба с радиус r е $Re = \frac{r\bar{v}\rho}{\eta} < 1200$, където $\bar{v} = \frac{V}{\pi r^2 t}$ - средната скорост на изтичане. При изчисляването на числото на Рейнолдс за горните резултати се получава число от порядъка $(10 - 100) \cdot 10^3$, което води до извода, че при направените измервания движението не е било ламинарно и измерванията трябва да се повторят.