



Politechnika  
Śląska



PRACOWNIA FIZYCZNA 2

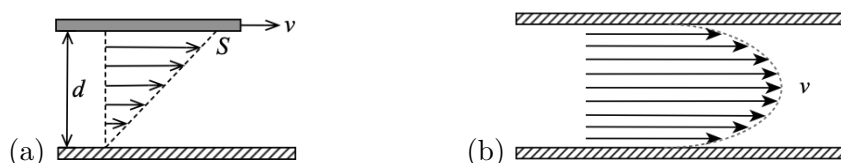
Instytut Fizyki  
Centrum Naukowo Dydaktyczne



## P2-C1. Wyznaczanie współczynnika lepkości powietrza metodą kapilarną

### 1 Wprowadzenie

Zjawisko *lepkości* jest jednym ze zjawisk transportu, związanym z makroskopowym ruchem płynu (gazu lub cieczy). Zachodzi w całej objętości poruszającego się płynu, dlatego nazywany jest również *oporem wewnętrznym*. Opór przepływu lepkiego występuje w dwóch typach zjawisk: przy ruchu płynu względem nieruchomych ścian naczynia, lub przy ruchu ciała względem nieruchomego płynu.



Rys. 1: (a) rozkład prędkości warstw płynu w przypadku ruchu płaskiego przedmiotu po jego powierzchni; (b) rozkład prędkości warstw płynu w kapilarze

Na rysunku 1 (a) przedstawiono przypadek ruchu płaskiego przedmiotu na warstwie płynu o grubości  $L$  z prędkością  $v$ . Ruchowi przeciwdziałają siły tarcia. Siła potrzebna do tego, by ruch przedmiotu był zachowany, jest proporcjonalna do powierzchni styku  $S$  przedmiotu i płynu oraz prędkości  $v$  przedmiotu, i odwrotnie proporcjonalna do grubości warstwy płynu  $d$

$$F = \eta \frac{v}{d} S, \quad (1)$$

gdzie  $\eta$  jest *współczynnikiem lepkości* [1, 2, 3]. Jednostką współczynnika  $\eta$  w układzie SI jest Pa·s. Przepływ uwarstwiony, który można opisać przy pomocy składowych stycznych prędkości nazywa się przepływem *laminarnym*. W przypadku przepływu płynu przez kapilarę, przepływ jest najszybszy w osi kapilary, a prędkość warstw jest tym mniejsza, im mniejsza jest odległość między ścianką i rozważaną warstwą. Kryterium laminarności dla przepływu płynu przez kapilarę o średnicy  $D$  z prędkością  $v$  określa *liczba Reynoldsa*

$$\text{Re} = \frac{\rho D}{\eta} v, \quad (2)$$

uzależniająca własności płynu (gęstość  $\rho$  i współczynnik lepkości  $\eta$ ) od warunków ruchu  $v$  i  $D$ . Dla pokonania sił tarcia trzeba wywołać różnicę ciśnień między końcami kapilary  $\Delta p$ . Objętość cieczy  $V$ , wypływającej laminarnie z kapilary o promieniu  $r$  i długości  $l$  w czasie  $t$ , opisuje *prawo Poisseuille'a*

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{\eta l}. \quad (3)$$

Zjawiska transportu związane są z oddziaływaniami międzycząsteczkowymi podczas zderzeń. W przypadku gazów zjawiska te opisuje się przyjmując model cząsteczek jako idealnie sprężystych kul o zdefiniowanej średnicy, oddziałujących tylko w czasie zderzenia. Pomiędzy zderzeniami cząsteczki gazu o gęstości  $\rho$  pod ciśnieniem  $p$ , przebywają *średnią drogą swobodną*

$$\lambda = \frac{3\eta}{\rho v}, \quad \text{gdzie } \rho = \frac{p\mu}{RT}, \quad (4)$$

mając przy tym *średnią arytmetyczną prędkości* równą

$$v = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (5)$$

gdzie  $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$  – uniwersalna stała gazowa, a  $\mu$  jest masą molową gazu. *Średnica efektywna cząsteczek* to minimalna odległość na jaką zbliżają się do siebie podczas zderzenia dwie cząsteczki tego samego gazu

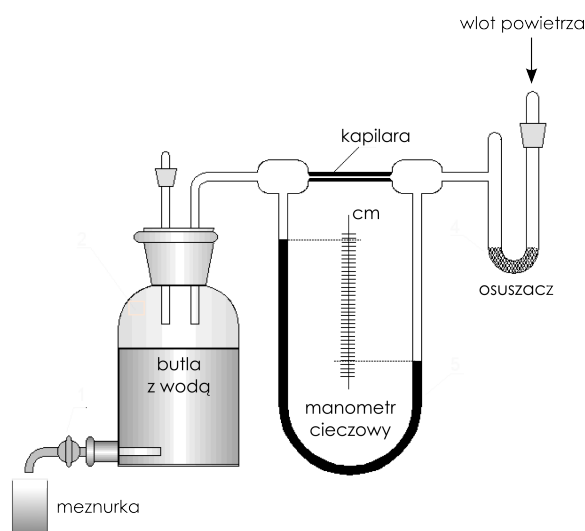
$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi\lambda p}}, \quad (6)$$

gdzie  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  - stała Boltzmanna.

## 2 Układ pomiarowy

Układ pomiarowy do wyznaczania współczynnika lepkości powietrza jest przedstawiony na rys. 2. Jego głównym elementem jest rurka kapilarna o znanym promieniu  $r = 0.4 \text{ mm}$  i długości  $l = 100 \text{ mm}$ . Pomiarowi podlega czas wypływu pewnej objętości wody z butli, który jest taki sam, jak przepływ takiej samej objętości powietrza przez kapilarę pod wpływem różnicy ciśnień między końcami kapilary. Różnica ciśnień jest mierzona pośrednio przy pomocy manometru wodnego, poprzez odczytanie różnicy poziomów  $\Delta h$  słupów wody w ramionach manometru. Objętość  $V$  wypływającej wody mierzy się menzurką.

Głównym celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynnika lepkości powietrza dla temperatury i ciśnienia panujących w pracowni. Ponadto wyznacza się gęstość powietrza, średnią prędkość jego cząsteczek i długość drogi swobodnej pomiędzy zderzeniami, średnicę efektywną cząsteczek powietrza oraz liczbę Reynoldsa dla przepływu powietrza przez rurkę kapilarną.



Rys. 2: Układ pomiarowy

## 3 Pomiary

1. Odczytać temperaturę panującą w laboratorium.
2. Odczytać ciśnienie panujące w laboratorium.
3. Pod zawór butli postawić menzurkę.
4. Otworzyć zawór butli i poczekać aż ustali się szybkość wypływu wody z butli.
5. Postawić menzurkę i przy pomocy stopera zmierzyć czas  $t$ , odpowiadający wypłynięciu z butli określonej objętości wody  $V$  (powyżej 100 ml).
6. Pomiary powtórzyć 10-krotnie. Numer pomiaru oznaczony jest indeksem  $i$ .

temperatura $T$ , °C			
ciśnienie $p_0$ , mmHg			
$i$	$V_i$ , cm <sup>3</sup>	różnica poziomów $\Delta h_i$ , cm	czas wypływu $t_i$ , s
1			
⋮			

#### 4 Opracowanie wyników pomiarów

1. Dla każdej  $i$ -tej trójki danych:  $V_i, \Delta h_i$  i  $t_i$ , obliczyć współczynnik lepkości powietrza

$$\eta_i = \frac{\pi r^4 \rho_w g}{8lV_i} \Delta h_i t_i.$$

2. Określić niepewność pomiarową  $u_b(V)$ ,  $u_b(\Delta h)$  oraz  $u_b(t)$ .
3. Korzystając z prawa przenoszenia niepewności, dla każdej trójki danych  $V_i, \Delta h_i$  oraz  $t_i$  obliczyć niepewność wyznaczonego z nich współczynnika lepkości  $u(\eta_i)$ .
4. Obliczyć średnią ważoną współczynnika lepkości powietrza  $\eta$  i niepewność średniej ważonej  $u(\eta)$  i zapisać wynik wraz z niepewnością w prawidłowym formacie, z jednostką.
5. Obliczyć gęstość powietrza

$$\rho_p = \frac{M}{V} = \frac{p_0 \mu}{RT},$$

gdzie  $\mu = 28.87 \cdot 10^{-3}$  kg/mol - masa molowa powietrza,  $R = 8.31$  J/(mol·K) – uniwersalna stała gazowa.

6. Określić niepewność pomiarową  $u_b(T)$  oraz  $u_b(p_0)$ .
7. Korzystając z prawa przenoszenia niepewności, obliczyć niepewność standardową gęstości powietrza  $u(\rho_p)$  i zapisać wynik wraz z niepewnością w poprawnym formacie, z jednostką.
8. Obliczyć średnią arytmetyczną prędkości cząsteczek powietrza

$$v = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}.$$

9. Korzystając z prawa przenoszenia niepewności, obliczyć niepewność standardową średniej arytmetycznej prędkości cząsteczek powietrza  $u(v)$ . Zapisać wynik wraz z niepewnością w prawidłowym formacie, z jednostką.
10. Obliczyć długość średniej drogi swobodnej cząsteczek powietrza

$$\lambda = \frac{3\eta}{\rho_p v}.$$

11. Korzystając z prawa przenoszenia niepewności, obliczyć niepewność standardową średniej drogi swobodnej cząsteczek powietrza  $u(\lambda)$ . Zapisać wynik wraz z niepewnością w prawidłowym formacie, z jednostką.
12. Obliczyć średnicę efektywną cząsteczek powietrza, wykorzystując wzór

$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi\lambda p_0}},$$

gdzie  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K - stała Boltzmanna.

13. Korzystając z prawa przenoszenia niepewności, obliczyć niepewność standardową średnicy efektywnej cząsteczek powietrza  $u(d)$ .

14. Obliczyć liczbę Reynoldsa dla każdej trójki danych  $V_i, \Delta h_i$  i  $t_i$ :

$$\text{Re}_i = \frac{\rho_p v_p r}{\eta}, \quad v_p = \frac{V_i}{\pi r^2 t_i},$$

gdzie  $v_p$  - prędkość przepływu powietrza przez rurkę kapilarną.

15. Porównać otrzymane wartości z wartością krytyczną  $\text{Re}_{kr} = 1160$ . Czy wszystkie przepływy były laminarne?

## Literatura

- [1] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands. *Feynmana wykłady z fizyki, Tom II, Cz.1*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1974.
- [2] A. K. Wróblewski, J. A. Zakrzewski. *Wstęp do fizyki*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1976.
- [3] T. Dryński. *Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1976.