

## Ćw. M4

### Przepływ laminarny i turbulentny. Pomiar współczynnika lepkości cieczy metodą Stokesa

#### Zagadnienia:

- Oddziaływania międzycząsteczkowe.
- Ciecze idealne i rzeczywiste. Zjawisko lepkości.
- Równanie ciągłości strugi i równanie Bernoulliego.
- Przepływ laminarny i turbulentny.
- Współczynniki lepkości.
- Równanie Poiseuille'a. Opór przepływu.
- Liczba Reynoldsa. Graniczna liczba Reynoldsa.
- Przepływ krwi. Lepkość krwi.

#### Opis ćwiczenia:

Na ciało poruszające się w cieczy działają siły oporu lepkiego hamujące ruch ciała. Jeżeli np. kulka spada w cieczy, to warstwa cieczy bezpośrednio przylegająca do kulki porusza się z prędkością równą prędkości kulki, pociągając za sobą następne warstwy cieczy. Mamy więc do czynienia z przesuwaniem się warstw cieczy względem siebie. Między warstwami cieczy działa siła lepkości, czyli na kulkę poruszającą się w cieczy działa siła oporu lepkiego. Związek między siłą oporu lepkiego a prędkością kulki, jej promieniem i właściwościami cieczy znalazł Stokes i wyraził wzorem:

$$F = 6\pi\eta r v \quad (1)$$

gdzie:

$F$  – siła oporu lepkiego

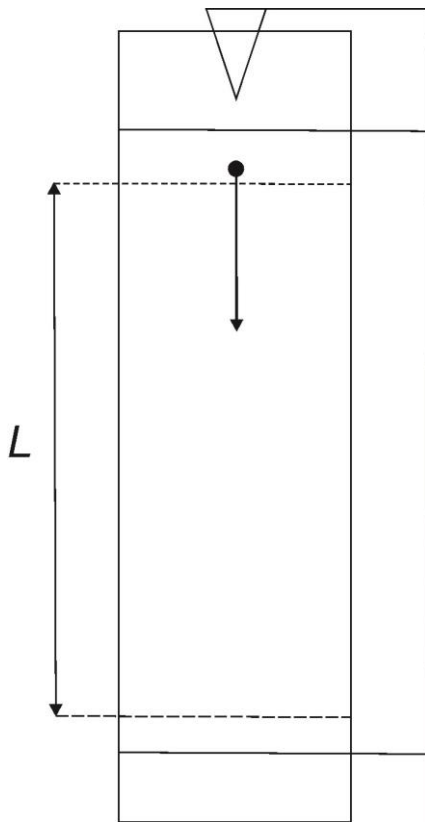
$\eta$  – współczynnik lepkości dynamicznej cieczy

$r$  – promień kulki

$v$  – prędkość kulki

Wzór ten jest słuszny dla ruchu laminarnego, tzn., gdy ruch kulki nie powoduje powstawania wirów, czyli warstwy cieczy przesuwają się równolegle względem siebie.

Do pomiaru lepkości cieczy służy rura szklana ustawiona pionowo. W rurze znajduje się badana ciecz (gliceryna). Do rury wpuszczamy kulkę z materiału o znanej gęstości i o małym promieniu w porównaniu z promieniem rury (aby uniknąć wirów).



Na kulkę o objętości  $q_k$ , poruszającą się w cieczy, działają trzy siły:

1. Siła przyciągania ziemskiego, działająca pionowo w dół:

$$P = mg$$

2. Siła oporu lepkiego, działająca pionowo w górę:

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

3. Siła wyporu skierowana również pionowo w górę:

$$W = \rho_c q_k g$$

W pierwszym momencie kulka w cieczy porusza się ruchem przyspieszonym, ponieważ siła  $P$  jest większa niż suma sił  $F + W$ . Po przebyciu pewnej drogi, wskutek wzrostu prędkości  $v$ , siła  $F$  wzrośnie do takiej wartości, że wraz z siłą  $W$  zrównoważy siłę  $P$ , zatem ruch kuli stanie się jednostajny. Zachodzi wtedy następująca równość:

$$F + W = P \quad (2)$$

**Siła ciężkości:**

$$P = mg = \rho_k q_k g = \rho_k \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (3)$$

gdzie:

$\rho_k$  – gęstość kuli

$q_k$  – objętość kulki

$r$  – promień kulki

$g$  – przyspieszenie ziemskie

**Siła wyporu:**

$$w = \rho_c q_k g = \rho_c \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (4)$$

gdzie:

$\rho_c$  – gęstość cieczy

Podstawiając do wzoru (2) odpowiednie wartości sił ze wzorów (1), (3) i (4) otrzymamy:

$$6\pi r \eta v + \rho_c \frac{4}{3} \pi r^3 g = \rho_k \frac{4}{3} \pi r^3 g$$

$$6\pi r \eta v = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_k - \rho_c)$$

$$\eta = \frac{4\pi r^3 g (\rho_k - \rho_c)}{3 \cdot 6\pi r v}$$

$$\eta = \frac{2r^2 g (\rho_k - \rho_c)}{9v}$$

ponieważ:

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

gdzie:

$L$  – droga po której porusza się kulka

$t$  – czas

stąd:

$$\eta = \frac{d^2 g (\rho_k - \rho_c) t}{18L} \quad (5)$$

$d = 2r$  (średnica kulki)

**Instrukcja:**

1. Do dyspozycji są cztery rodzaje kulek o znanej gęstości. Ilość i rodzaj kulek, które należy wrzucić do rury ustala prowadzący.
2. Na rurze zmierz długość odcinka  $L$  między dwoma zaznaczonymi kreskami. Odcinek ten będzie drogą opadania kulek.
3. Śrubą mikrometryczną zmierz średnicę kulki  $d$ . Ponieważ używane kulki nie są idealne, średnicę każdej kulki zmierz 3 razy w różnych miejscach i oblicz średnią wartość. Wpisz wartość do tabeli.
4. Do rury z badaną cieczą wpuść kulkę i zmierz stoperem czas  $t$  opadania kulki na drodze  $L$ . (Kulek nie wyciągamy z rury).
5. Ze wzory (5) oblicz współczynnik lepkości badanej cieczy.
6. Powtórz pomiary dla kolejnych kulek.
7. Oblicz średnią wartość współczynnika lepkości, podając temperaturę pomiaru.
8. Wyniki zestaw w tabelce.
9. Oszacuj niepewność dla jednego, wybranego pomiaru współczynnika lepkości.
10. Sprawdź w tablicach wartość współczynnika lepkości gliceryny i porównaj z otrzymanym wynikiem.

<b>Lp</b>	<b><math>d</math></b> (m)	<b><math>t</math></b> (s)	<b><math>L</math></b> (m)	<b><math>v</math></b> (m/s)	<b><math>\eta</math></b> (Pa·s)	<b><math>\eta_{sr}</math></b> (Pa·s)	<b><math>T</math></b> (K)