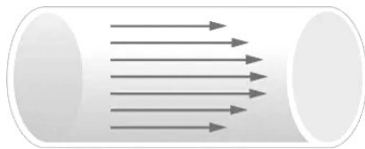


## Wprowadzenie teoretyczne

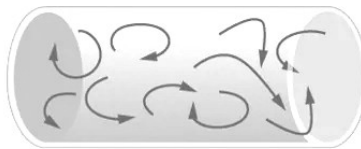
# Doświadczenie „H Ö P P L E R”

**Temat:** Wyznaczenie współczynnika lepkości dynamicznej cieczy przy pomocy wiskozymetru Höpplera.

**Przepływ** cieczy może być **laminarny** - to przepływ uwarstwiony, w którym płyn przepływa w równoległych warstwach, bez zakłóceń między warstwami. Przepływ taki zachodzi przy odpowiednio małej prędkości przepływu. Warstwy poruszają się równoległe do rurociągu.



przepływ laminarny

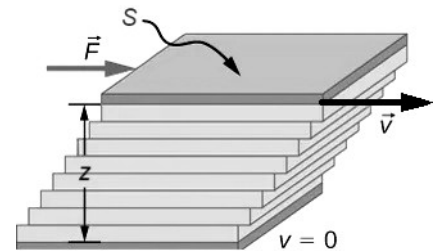


przepływ turbulentny

Natomiast **przepływ turbulentny** płynu to taki, w którym parametry przepływu (prędkość, ciśnienie, gęstość i inne) w poszczególnych punktach przepływu zmieniają się w sposób chaotyczny a elementy płynu mieszają się.

W przypadku przepływu laminarnego naprężenie styczne (ścinające) jest proporcjonalne do zmian prędkości ścinania wraz z odległością między warstwami. Upraszczając: siła  $F$  potrzebna do wywołania różnicy szybkości dwóch warstw  $v$ , odniesiona do powierzchni  $S$  jest proporcjonalna do zmiany tej prędkości  $v$ , a odwrotnie proporcjonalna do odległości  $z$  między warstwami:

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{v}{z}$$



Współczynnikiem tej proporcjonalności jest lepkość dynamiczna  $\eta$ . Jej źródłem są siły tarcia wewnętrznego pomiędzy cząsteczkami cieczy, występujące podczas ruchu jednej warstwy wzdłuż drugiej.

Równanie to stanowi definicję lepkości dynamicznej:  $\eta = \frac{F \cdot z}{S \cdot v}$ , której jednostką jest paskalosekunda:

$$\eta = \left[ \frac{N}{m^2} \cdot \frac{m}{m/s} \right] = \left[ \frac{N}{m^2} \cdot s \right] = [Pa \cdot s]$$

Tradycyjną jednostką w układzie CGS był puaz [P] od nazwiska Jean Léonard Marie Poiseuille (1 P = 0,1 Pa·s).

**Pomiar lepkości przy pomocy wiskozymetru Höpplera** polega na wyznaczeniu czasu opadania kulki wewnątrz rurki pomiarowej wypełnionej badaną cieczą. Przy znanym promieniu  $r$ , ustalonej gęstości kulki  $\rho_{kulki}$  (zwykle jest ona stalowa lub szklana), oraz gęstości analizowanego płynu  $\rho_{płynu}$ , na kulkę będą działały tylko trzy siły. Są to:

- ciężar  $Q = m_{kulki} \cdot g = \frac{4}{3} \pi r_{kulki}^3 \rho_{kulki} \cdot g$ ,
- siła wyporu (prawo Archimedesesa)  $F_w = \rho_{płynu} \cdot V_{kulki} \cdot g = \frac{4}{3} \pi r_{kulki}^3 \rho_{płynu} \cdot g$ , oraz
- siła oporu lepkości, opisana prawem Stokesa  $F_s = 6 \pi \eta r_{kulki} \cdot v$ ,

gdzie:  $g$  to przyspieszenie grawitacyjne, małe  $v$  - prędkość kulki względem płynu a duże  $V$  to objętość kulki. Kulka osiągnie maksymalną prędkość opadania w płynie, gdy siły równoważą się:  $Q = F_w + F_s$ .

Wtedy z powyższych równań otrzymamy:  $v_{max} = \frac{2}{9} \frac{r_{kulki}^2 \cdot g (\rho_{kulki} - \rho_{płynu})}{\eta}$ ,

Ponieważ prędkość jest stosunkiem drogi do czasu, stąd lepkość dynamiczna może być uproszczona:

$$\eta = K (\rho_{kulki} - \rho_{płynu}) \cdot t$$

gdzie:  $K$  jest stałą przyrządu, którą wyznacza się z pomiaru wykonanego dla cieczy o znanej lepkości.

**Pytania do przygotowania:**

## „HÖPPLER”

**Temat:** Wyznaczenie współczynnika lepkości dynamicznej glikolu przy pomocy wiskozymetru Höpplera.

1. Wyjaśnij na czym polega przepływ laminarny cieczy.
2. Wyjaśnij na czym polega przepływ turbulentny cieczy.
3. Podaj definicję i jednostkę lepkości dynamicznej w układzie SI.
4. Opisz budowę i działanie wiskozymetru Höpplera.
5. Jakie siły działają na kulkę opadającą w lepkiej cieczy?
6. Podaj treść prawa Stokesa.
7. Od czego zależy wartość siły oporu działającej na kulisty kształt poruszający się w lepkim płynie?
8. Podaj definicję i jednostkę ciężaru w układzie SI.
9. Wyjaśnij różnicę między ciężarem a masą.
10. Podaj definicję i jednostkę gęstości w układzie SI.
11. Podaj przybliżoną wartość gęstości wody, glikolu, gliceryny.
12. Wyjaśnij różnicę między gęstością i lepkością.
13. Podaj treść i zapisz wzorem prawo Archimedesesa.
14. Wyjaśnij co to jest siła wyporu i od czego zależy.
15. Jaka jest zależność lepkości cieczy od temperatury?

## „HÖPPLER”

**Temat:** Wyznaczenie współczynnika lepkości dynamicznej cieczy przy pomocy wiskozymetru Höpplera.

**Baza teoretyczna**

Lepkość dynamiczną definiujemy jako współczynnik proporcjonalności pomiędzy naprężeniem stycznym (ścinającym) a zmianą prędkości ścinania wraz z odległością między warstwami:

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{v}{z}$$

Dla kulistego obiektu, poruszającego się w cieczy o lepkości  $\eta$ , siła oporu opisana prawem Stokesa jest proporcjonalna do prędkości:

$$F_S = 6 \pi \eta r_{kulki} \cdot v$$

Siły działające na kulkę w wiskozymetrze Höpplera to: ciężar  $Q$ , siła wyporu  $F_w$  i siła lepkości  $F_S$ .

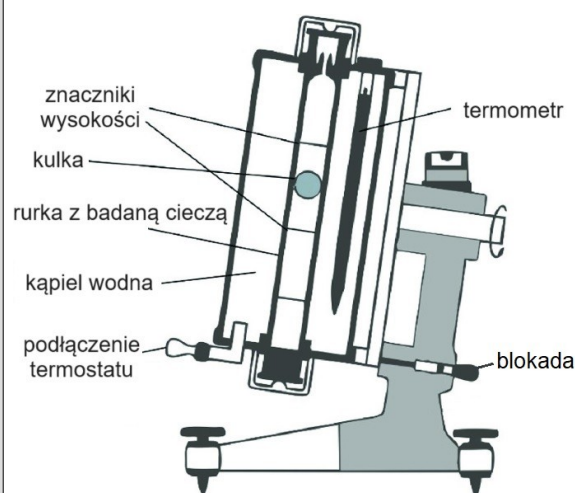
Gdy opadająca kulka nabierze maksymalnej prędkości, siły równoważą się  $Q = F_w + F_S$ , wówczas współczynnik lepkości metodą Höpplera można uprościć do postaci:

$$\eta = K (\rho_{kulki} - \rho_{pływu}) \cdot t$$

gdzie  $K$  jest stałą przyrządu, zależną od długości drogi, rozmiaru kulki i średnicy rurki.

Aby wyznaczyć **współczynnik lepkości** metodą Höpplera należy:

1. Wypoziomować wiskozymetr Höpplera.
2. Odczytać temperaturę  $T$  kąpiel wodnej wewnątrz wiskozymetru.
3. Z tabeli odczytać gęstość gliceryny  $\rho_{pływu}$  dla temperatury  $T$ .
4. Odciągnąć blokadę, obrócić wiskozymetr o  $180^\circ$  i zaczekać na opadnięcie kulki.
5. Obrócić komorę do pierwotnego, zablokowanego położenia.
6. Zmierzyć czas  $t$  opadania kulki na drodze pomiędzy skrajnymi znacznikami na wewnętrznym cylindrze.  
**Uwaga:** Przy pomiarze czasu  $t$  włączać i wyłączać stoper, przyjmując te same graniczne momenty tzn. początek lub koniec kulki.
7. Powtórzyć pomiar 10-krotnie.
8. Wyznaczyć wartości współczynników lepkości  $\eta$ , dla wszystkich zmierzonych czasów  $t$ .
9. Obliczyć średni współczynnik lepkości  $\eta_{\text{śr}}$ .
10. Obliczyć odchylenie standardowe współczynnika lepkości, oraz jego trzykrotność jako niepewność maksymalną.



Schemat wiskozymetru Höpplera.

Zależność gęstości gliceryny od temperatury

Temperatura [°C]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]
18	1259,7
19	1260,4
20	1261,0
21	1261,6
22	1262,3
23	1262,9
24	1263,6
25	1264,2
26	1264,9
27	1265,5
28	1266,1
29	1266,8
30	1267,4

## Sprawozdanie

.....  
Nazwisko i Imię

.....  
Data

**Temat:** Wyznaczenie współczynnika lepkości dynamicznej cieczy przy pomocy wiskozymetru Höpplera.

### 1. Wyniki pomiarów

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t$	[s]										

$$\rho_{\text{płynu}} = \dots \text{ kg/m}^3 \quad \rho_{\text{kulki}} = 8140 \text{ kg/m}^3 \quad K = 7,742 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$$

### 2. Obliczenia przykładowe z jednostkami (odnoszą się do pomiaru nr 3)

$$K(\rho_{\text{kulki}} - \rho_{\text{płynu}}) =$$

$$\eta = K(\rho_{\text{kulki}} - \rho_{\text{płynu}}) \cdot t =$$

### 3. Wyniki obliczeń

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\eta$	[Pa·s]										

### 4. Oblicz:

Wartość średnią współczynnika lepkości glikolu:

$$\eta_{\text{śred.}} =$$

Odchylenie standardowe:

$$\sigma_{\eta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\eta_i - \eta_{\text{śred.}})^2}{N}} =$$

gdzie:  $\eta_i$  – wartość współczynnika lepkości glikolu dla kolejnego pomiaru,

$\eta_{\text{śred.}}$  – średnia wartość współczynnika lepkości glikolu,

$N$  – liczba pomiarów.

### 5. Podsumowanie

Wyznaczona wartość średnia lepkość glikolu wynosi:  $\eta_{\text{śred.}} =$

Niepewność maksymalna wyznaczonej lepkości wynosi:  $3 \cdot \sigma_{\eta} =$

Dodatkowe wnioski, spostrzeżenia, przyczyny niepewności pomiarowych.