

C12. Badanie temperaturowej zależności współczynnika lepkości cieczy.

Celem ćwiczenia jest poznanie zjawiska lepkości cieczy, jej zmian w funkcji temperatury i wpływu na dynamikę ruchu ciał w ośrodkach lepkich oraz doświadczalne wyznaczenie energii aktywacji przepływu lepkiego z pomiaru zależności współczynnika lepkości od temperatury.

Lepkość cieczy, inaczej **tarcie wewnętrzne**, jest siłą oporu, wywołaną wzajemnym oddziaływaniem międzymolekularnym dwóch sąsiednich warstw cieczy, poruszających się względem siebie. Siła ta jest styczna do powierzchni warstw i jest wprost proporcjonalna do pola rozważanej powierzchni warstwy S oraz do szybkości zmiany prędkości przepływu cieczy v odniesionej do odległości między warstwami x (czyli do tzw. **gradientu prędkości** dv/dx). Opisuje to **wzór Newtona**:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} \cdot S \quad (1),$$

gdzie η jest **współczynnikiem lepkości**, zależnym od rodzaju substancji i od temperatury.

Zgodnie z teorią kinetyczno-molekularną lepkość płynu jest wynikiem transportu pędu między warstwami poruszającymi się względem siebie. W wyniku termicznych ruchów cząsteczki z jednej warstwy płynu przenikają do sąsiedniej, przenosząc tym samym swój pęd. W rezultacie warstwa poruszająca się szybciej przyspiesza warstwę wolniejszą i odwrotnie, ta druga spowalnia pierwszą. Tak więc, dla obserwacji zjawiska lepkości konieczne jest wywołanie ruchu cieczy, na przykład w trakcie jej przepływu lub na skutek poruszania się dowolnego przedmiotu w tej cieczy - występuje wtedy tarcie wewnętrzne między cząsteczkami przywierającymi do przedmiotu a otoczeniem.

Rozważmy ten drugi przypadek, czyli np. ruch kulki o promieniu r poruszającej się w lepkiej cieczy pod wpływem zewnętrznej siły. **Siła lepkości** jest wówczas zdefiniowana **wzorem Stokesa**:

$$F = 6\pi\eta r v \quad (2), \quad \text{gdzie } v \text{ jest prędkością kulki.}$$

Mierzac prędkość opadania kulki w lepkiej cieczy można wyznaczyć współczynnik lepkości tej cieczy. Zależność tę wykorzystuje się m.in. w **wiskozymetrze Höpplera**, którym posłużymy się w niniejszym ćwiczeniu.

Na opadającą – w lepkiej cieczy - kulkę, o promieniu r , działają trzy siły:

a/ **siła ciężkości**, skierowana zgodnie z ruchem kulki:

$$Q = mg = \rho_k V_k g = \rho_k \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (3) \quad (\rho_k \text{ i } V_k - \text{to, odpowiednio, gęstość i objętość kulki}),$$

b/ **siła wyporu** Archimedesesa, skierowana przeciwnie do ruchu kulki:

$$W = m_c g = \rho_c \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (4) \quad (\rho_c - \text{gęstość cieczy}),$$

c/ **siła lepkości Stokesa**, skierowana przeciwnie do ruchu kulki i opisana wzorem (2).

Początkowo kulka opada **ruchem przyspieszonym**; w miarę jednak wzrostu jej prędkości, rośnie siła lepkości, która po chwili równoważy, wspólnie z siłą wyporu, siłę ciężkości. Gdy wypadkowa wszystkich trzech sił będzie równa zeru, tzn.: $Q = F + W$ (5), to - zgodnie z **I zasadą dynamiki Newtona** - kulka zacznie poruszać się ruchem jednostajnym, ze stałą prędkością v . Rozpisując (5) otrzymujemy równanie:

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

$$\text{z którego możemy wyznaczyć współczynnik lepkości } \eta: \quad \eta = \frac{2r^2}{9v} (\rho_k - \rho_c) g \quad (7).$$

W ćwiczeniu prędkość v opadania kulki wyznacza się na podstawie pomiaru czasu τ opadania kulki na drodze równej odległości l między zaznaczonymi na wiskozymetrze poziomami, przy czym $v = l/\tau$. Uwzględniając powyższe i wstawiając: $\frac{2r^2 g}{9l} = K^*$, wzór (7) można napisać w postaci:

$$\eta = K(\rho_k - \rho_c) \cdot \tau \quad (8), \quad \text{z którego będziemy korzystać w ćwiczeniu.}$$

*Stałą K można wyznaczyć eksperymentalnie na podstawie pomiarów wykonanych dla cieczy o znanym współczynniku lepkości, jednak najczęściej jest ona podana przez producenta wiskozymetru. Stała ta zawiera również poprawkę na niewielkie - w stosunku do kulki - rozmiary cylindra, w którym kulka opada, a które wpływają na wzrost siły lepkości F .

Lepkość cieczy bardzo **silnie zależy od temperatury**, malejąc z jej wzrostem. Opisuje to eksponencjalna **zależność Arrheniusa**: $\eta = Ce^{\frac{E}{RT}}$ (9), gdzie C jest pewną stałą, E oznacza tzw. **energię aktywacji przepływu lepkiego***, R – stałą gazową, a T – temperaturę w skali Kelvina.

***Energia aktywacji E** – to wysokość bariery potencjalnej, zależna od wielkości oddziaływań międzymolekularnych, którą musi pokonywać cząsteczka przemieszczając się względem sąsiednich cząsteczek. Jej wartość dla jednego mola cząsteczek danej cieczy, można eksperymentalnie wyznaczyć z badań temperaturowej zależności współczynnika lepkości, jak to czynimy w niniejszym ćwiczeniu.

Literatura uzupełniająca:

1. S. Przestalski – Fizyka z elementami biofizyki i agrofizyki– Część 4 rozdz.4

Zobacz też:

symulacje komputerowe na stronie internetowej *Katedry Fizyki i Biofizyki*

(<https://sparrow.up.poznan.pl/kfb/>) (zakładka: Symulacje zjawisk fizycznych).

C12 .Protokół pomiarów i obliczeń

Nr pary	Imię i nazwisko studenta	Wydział
		grupa
data	Imię i nazwisko prowadzącego	Zaliczenie

Wykonanie ćwiczenia

Przyrządy: wiskozymetr wraz z ultratermostatem, stoper

1. Włącz ultratermostat i odczytaj aktualną temperaturę cieczy termostatujucej, która powinna wynosić ok. 25°C. W razie potrzeby obniż temperaturę przełączając ultratermostat w tryb chodzenia przy trybie cyrkulacyjnym (**postępuj zgodnie z instrukcją obsługi ultratermostatu**).
2. Przeprowadź trzykrotnie pomiar czasu τ opadania kulki między oznaczonymi na wiskozymetrze poziomami. Przy obracaniu wiskozymetru zwrócić uwagę na to, aby zachować stały kierunek opadania kulki względem podłoża i nie skręcać węży doprowadzających wodę.
3. Ustaw temperaturę o około 5°C wyższą niż temperatura początkowa. Po osiągnięciu przez układ zadanej temperatury odczekaj ok. 1-2 min na wyrównanie się temperatury między wodą termostatującą a badaną cieczą i przeprowadź trzykrotnie pomiar czasu τ opadania kulki.
4. W podobny sposób przeprowadź serię pomiarów czasów opadania kulki, podwyższając temperaturę o około 5°C, aż do uzyskania temperatury około 50°C.
5. Po zakończeniu pomiarów przełącz ultratermostat w tryb chodzenia do temperatury 25°C.

Tabela

[illegible]

Opracowanie wyników

1. Dla każdej temperatury oblicz średni czas τ_{sr} opadania kulki.
2. Dla każdej temperatury oblicz odpowiadającą jej wartość współczynnika lepkości η , korzystając ze wzoru:

$$\eta = K(\rho_k - \rho_c) \cdot \tau_{sr}$$

gdzie: τ_{sr} - średnie wartości czasów opadania kulki, $K = 5,42 \cdot 10^{-5}$ [N·m/kg], gęstość kulki $\rho_k = 2409$ [kg/m³] oraz gęstość cieczy $\rho_c = 800$ [kg/m³].

Otrzymane wartości η wpisz do tabeli i na kalkulatorze znajdź odpowiadające im wartości logarytmów $\ln \eta$.

3. Temperatuty pomiarów odczytane w skali Celsjusza zamień na temperatury bezwzględne w [K] i oblicz ich odwrotności.
4. W celu znalezienia wielkość energii aktywacji z zależności: $\eta = Ce^{\frac{E}{RT}}$ (*) sporządź wykres (na papierze milimetrowym) zależności $\ln \eta = f(1/T)$ i oblicz współczynnik kierunkowy A otrzymanej prostej. Energię aktywacji E oblicz ze wzoru: $E = A \cdot R$, gdzie $R = 8,31$ [J/(mol K)][#].

[#]**Wyjaśnienie:** wzór (*) po zlogarytmowaniu przyjmuje postać: $\ln \eta = \ln C + \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T}$, która jest równaniem linii

prostej typu: $y = B + Ax$, gdzie $y = \ln \eta$, $x = 1/T$, a współczynnik kierunkowy $A = E/R$. Sporządzając więc wykres liniowej zależności $\ln \eta = f(1/T)$ i znajdując współczynnik kierunkowy otrzymanej prostej, można w prosty sposób wyznaczyć energię aktywacji dla lepkości ($E = A \cdot R$).

(Obliczenia współczynnika kierunkowego A oraz jego błędu ΔA można przeprowadzić korzystając z odpowiedniego programu komputerowego).

Uwaga: Jeśli współczynnik kierunkowy A otrzymanej prostej wyznaczasz z wykresu sporządzonego na papierze milimetrowym, wówczas błąd współczynnika kierunkowego ΔA wyznacz z dokładności odczytu poszczególnych wartości naniesionych na wykresie – patrz „Graficzna analiza wyników” (<https://sparrow.up.poznan.pl/kfb/>).

Po odpowiednim zaokrągleniu znalezionych wartości zapisz:

$$(A \pm \Delta A) = (\dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots) [\dots\dots\dots]$$

6. Błąd bezwzględny ΔE dla wyliczonej wartości energii aktywacji znajdź metodą logarytmiczną, korzystając ze wzoru: $\Delta E = E \left| \frac{\Delta A}{A} \right|$.
7. Zestaw znalezioną wartość E z – odpowiednio zaokrąglonym - błędem bezwzględnym ΔE w postaci: $(E \pm \Delta E)$ jedn.SI