Nr pary	Imię i nazwisko studenta	Wydział kierunek grupa
Data	Imię i nazwisko prowadzącego	Zaliczenie

W7. 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.*

Zagadnienia.
Przepływ cieczy rzeczywistej. Przepływ laminarny i turbulentny. Zjawisko lepkości, definicja i jednostki. Siła Stokesa. Rozkład sił działających na kulkę poruszającą się w cieczy, rysunek. Zależność lepkości od temperatury, energia aktywacji.

Literatura
Jaroszyk Rozdział 6.2.2.; **Przestalski** Rozdział V.4. Ruch cieczy rzeczywistej

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***:

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

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***: $F = 6\pi\eta r v$ (2), gdzie *v* jest prędkością kulki.

Mierząc 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:

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

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

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

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

Początkowo kulka opada ***ruchem przyśpieszonym***; w miarę jednak wzrostu jej prędkości, rośnie siła lepkości, która po chwili równoważy, wspólnie z siłą wyporu, siłę ciężkości.

Gdy wypadkowa wszystkich trzech siła 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: $\rho_k \frac{4}{3}\pi r^3 g = 6\pi\eta r v + \rho_c \frac{4}{3}\pi r^3 g$ (6), z którego możemy wyznaczyć współczynnik lepkości η: $\eta = \frac{2r^2}{9v}(\rho_k - \rho_c)g$ (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: $\eta = K(\rho_k - \rho_c)\cdot\tau$ (8), z którego będziemy korzystać w ćwiczeniu.

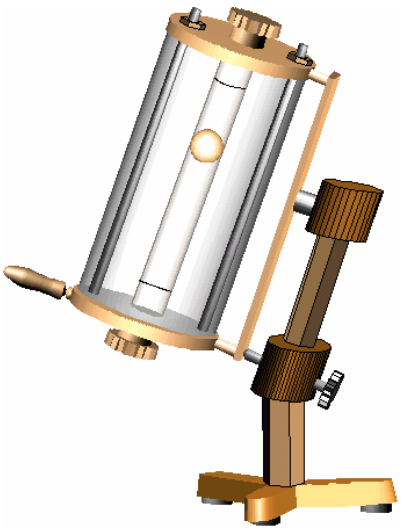
*Stałą *K* można wyznaczyć eksperymentalnie na podstawie pomiarów wykonanych dla cieczy o znanym współczynniku lepkości, jednak najczęściej jest ona podana przez producenta wiskozymetru. Stała ta zawiera również poprawkę na niewielkie - w stosunku do kulki - rozmiary cylindra, w którym kulka opada, a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

Wykonanie ćwiczenia

Przyrządy: wiskozymetr Hoplera (Rys.1), ultratermostat, stoper**.**



Rys.1. Wiskozymetr Hoplera

1. Na termometrze w ultratermostacie odczytujemy temperaturę cieczy termostatującej t_1 (tym samym temperaturę cieczy badanej) i przeprowadzamy trzykrotnie pomiar czasu τ opadania kulki między oznaczonymi na wiskozymetrze poziomami.
2. Włączamy ultratermostat. Za pomocą pokrętła termometru kontaktowego ustalamy temperaturę około 5^0C wyższą niż temperatura otoczenia. Po osiągnięciu przez układ zadanej temperatury (lampka kontrolna na ultratermostacie gaśnie) czekamy ok. 1-2 min na wyrównanie się temperatury między wodą termostatującą a badaną cieczą i przeprowadzamy trzykrotnie pomiar czasu τ opadania kulki.
3. W podobny sposób przeprowadzamy serię pomiarów czasów opadania kulki jeszcze dla trzech innych temperatur, każdorazowo podwyższając temperaturę o około 5^oC do temperatury nie większej niż 50^oC.

Tabela

L.p.	Temperatura			Czas opadania kulki τ [s]					
	t [^{o}C]	***T*** [K]	*1/T* [1/K]	τ_1	τ_2	τ_3	$\tau_{śr}$	η [Nsm^{-2}]	ln η

Opracowanie wyników

1. Dla każdej temperatury obliczamy średni czas $\tau_{śr}$ opadania kulki.
2. Korzystając ze wzoru: $\eta = K(\rho_k - \rho_c)\cdot\tau$ obliczamy – dla każdej temperatury – odpowiadającą jej wartość współczynnika lepkości η, wstawiając do wzoru: średnie wartości czasów opadania $\tau_{śr}$, K= 5,42·10^{-5} [N·m/kg], gęstość kulki ρ_k= 2409 [kg/m^3] oraz gęstość cieczy ρ_c = 800 [kg/m^3].
   Otrzymane wartości η wpisujemy do tabeli i na kalkulatorze znajdujemy odpowiadające im wartości logarytmów $ln\eta$.
3. Temperatury pomiarów odczytane w skali Celsjusza zamieniamy na temperatury bezwzględne w [K] i obliczamy ich odwrotności.
4. W celu znalezienia wielkość energii aktywacji z zależności: $\eta = Ce^{\frac{E}{RT}}$ (*) sporządzamy wykres (na papierze milimetrowym) zależności $ln\eta$ = f(*1/T*) i obliczamy współczynnik kierunkowy *A* otrzymanej prostej. Energię aktywacji *E* obliczamy wówczas ze wzoru: *E=A·R*, przy czym *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·R).*

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

Uwaga: Jeśli współczynnik kierunkowy A otrzymanej prostej wyznaczamy z wykresu sporządzonego na papierze milimetrowym, wówczas błąd współczynnika kierunkowego ΔA wyznaczamy z dokładności odczytu poszczególnych wartości naniesionych na wykresie – patrz „Graficzna analiza wyników" (http://www.up.poznan.pl/kfiz/).

Po odpowiednim zaokrągleniu znalezionych wartości zapisujemy:

(A ± ΔA) = (……..…±……) [……..]

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