

## Lepkość

Jedną z charakterystycznych cech cieczy jest ich lepkość. Przyczyną lepkości są siły przyciągania i odpychania międzycząsteczkowego. Oddziaływania międzycząsteczkowe występujące w cieczech wywołują opór przeciwko sile działającej z zewnątrz. Wskutek takiego oporu w czasie przepływu cieczy obserwujemy zróżnicowanie prędkości jej warstw od prędkości zerowej do maksymalnej.

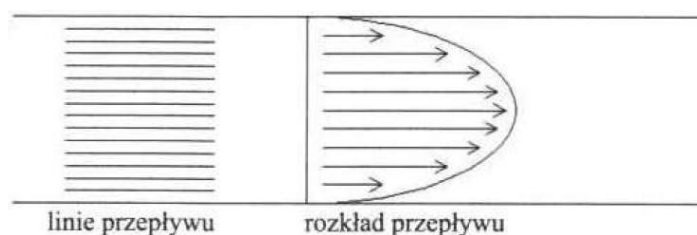
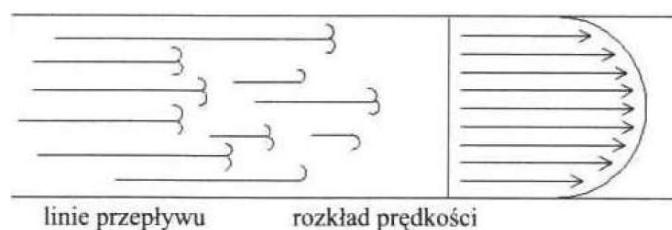


Tabela 1. Laminarny (górną) i turbulentny (dolną) charakter przepływu płynu.



Znane są wzory empiryczne ujmujące zależność lepkości od wielu parametrów. taki jak: temperatura, ciśnienie, stężenie układu, własności cząsteczek itp. Warunkiem koniecznym zarówno do przeprowadzenia pomiarów lepkości, jak i sprawdzenia jej zależności od powyższych parametrów, jest laminarny (warstwowy) przepływ cieczy. O takim przepływie mówimy wówczas, gdy warstwy cieczy poruszają się w kierunku równoległym do głównego kierunku ruchu. Przy takim przepływie cieczy występuje siła wyrównująca prędkości przepływu poszczególnych warstw, zwana siłą tarcia wewnętrznego.

Zgodnie z prawem Newtona siłę tę można wyrazić równaniem:

$$F = \eta S \frac{dv}{dx}$$

gdzie:  $S$  - powierzchnia przesuwanej się warstwy,  $\eta$  - współczynnik proporcjonalności związany z oporem stawianym przez ciecz noszący nazwę współczynnika lepkości,  $dv/dx$  - gradient szybkości

Wielkością pokrewną jest odwrotność lepkości zwana płynnością:

$$\theta = \frac{1}{\eta}$$

Lepkość  $\eta$  definiujemy jako siłę, którą należy przyłożyć do  $1 \text{ m}^2$  powierzchni wewnątrz cieczy, aby nadać jej prędkość  $1 \text{ m/s}$  w stosunku do równoległej do niej warstwy, odległej o  $1 \text{ m}$ . Innymi słowy. jest to opór warstwy cieczy o powierzchni jednostkowej, skierowany przeciwko jednostkowemu gradientowi szybkości:  $dv/dx = 1$ .

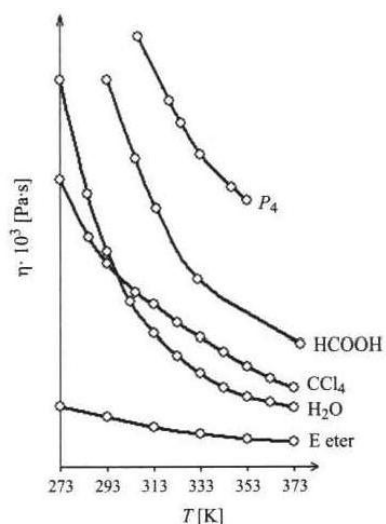
W układzie SI jednostką lepkości jest  $\text{Ns/m}^2$ , a w układzie CGS puaz.

Rozróżniamy dwa rodzaje lepkości:

- dynamiczną (omówiona powyżej),
- kinematyczną, która wyraża się stosunkiem lepkości dynamicznej do gęstości badanej cieczy.

W wypadku czystych cieczy lepkość w danej temperaturze jest wielkością stałą i charakterystyczną; nosi wówczas nazwę lepkości bezwzględnej. Doświadczalne oznaczenia lepkości bezwzględnej sądy trudne, dlatego w odniesieniu do większości cieczy określamy jej wartość względną, mierzoną stosunkiem lepkości cieczy badanej do Lepkości cieczy obranej za wzorzec porównawczy (najczęściej wody).

Zależność lepkości cieczy od parametrów zewnętrznych, np. temperatury i ciśnienia, jest związana z ich wpływem na oddziaływania międzycząsteczkowe. Wzrost temperatury cieczy powoduje wzrost energii kinetycznej cząsteczek, a cząsteczki o większej energii łatwiej pokonują siły przyciągania cząsteczek sąsiednich, stąd też ze wzrostem temperatury, poza nielicznymi wyjątkami, lepkość cieczy maleje (przeciwnie do gazów, w których wartość  $\eta$  wzrasta)



Rysunek 1. Zależność lepkości wybranych cieczy od temperatury.

Opracowano wiele wzorów ujmujących liczbowo tę zależność. W literaturze najczęściej wymieniany jest wzór Arrheniusa-Guzmana mający postać:

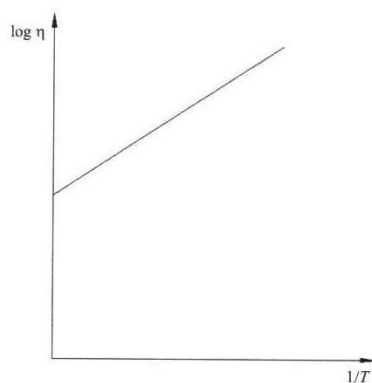
$$\eta = A \exp\left(\frac{B}{RT}\right)$$

Po zlogarytmowaniu wyrażenia i zamianie logarytmów naturalnych na logarytmy dziesiętne Otrzymamy:

$$\log \eta = \log A + \frac{B}{2,303 RT}$$

gdzie:  $\eta$  - lepkość, A, B – stałe charakterystyczne dla danej cieczy

Graficzną ilustrację powyższej zależności stanowi rysunek 2. Z tangensa kąta nachylenia prostej względem osi odciętych znajdujemy wartość stałej B równania. Stała równa się długości odcinka odcinanego na osi rzędnych.



Rysunek 2. Zależność lepkości od temperatury przedstawiona jako  $\log \eta = f(1/T)$ .

Zwiększenie ciśnienia, nawet przy małej ściśliwości cieczy, powoduje zmniejszenie średnich odległości pomiędzy cząsteczkami i w efekcie zwiększenie lepkości. Zmiany te mają w przybliżeniu charakter liniowy.

Kolejnym czynnikiem wpływającym na lepkość cieczy jest jej skład chemiczny. Dotychczasowe wyniki badań w tym kierunku doprowadziły jedynie do podania wzorów empirycznych, ujmujących zależność lepkości od składu mieszaniny ciekłej. Równania te nie mają charakteru ogólnego, dlatego też nie omawiamy ich dokładnie.

Znajomość lepkości cieczy ma nie tylko znaczenie teoretyczne, lecz również wyjątkowo duże zastosowanie praktyczne, np. przy przepływach cieczy, przy zmniejszaniu tarcia części stałych (stosowanie smarów) oraz w wielu zagadnieniach fizykochemicznych i technologicznych. W technice lepkość cieczy często nazywana jest wiskozą.

### Metody pomiaru lepkości

Znane są liczne metody eksperymentalne wyznaczania lepkości cieczy. Najczęściej spotykane można podzielić na dwie grupy:

1. metody oparte na pomiarze prędkości wypływu cieczy z rurek kapilarnych,
2. metody oparte na pomiarze prędkości opadania kulek w badanej cieczy.

Na wstępie omawiania metod pomiarów lepkości cieczy należy zaznaczyć, że bez względu na rodzaj stosowanej aparatury, uzyskane wyniki nie są obarczone błędem uzależnionym od materiału, z którego wykonane są poszczególne części przyrządów. Ponieważ na ciałach stałych (ściankach rurki, powierzchni opadającej kulki) adsorbuje się pewna ilość cieczy, dlatego obserwowane przepływy dotyczą ruchu cieczy w cieczy. Natomiast duże znaczenie dla pomiarów ma przestrzeganie odpowiedniej prędkości przepływu cieczy. Nie wolno bowiem przekraczać tej granicznej prędkości, określonej przez kryterium Reynoldsa, która odpowiada przejściu ruchu laminarnego w burzliwy. W odniesieniu do ruchu burzliwego większość zależności matematycznych dotyczących przepływu lepkiego traci sens.

- Metoda oparta na pomiarze prędkości wypływu cieczy z rurki kapilarnej

Metoda ta wykorzystuje zjawisko powolnego wypływu cieczy pod wpływem różnicy ciśnień ( $\Delta p$ ) panującej na obu końcach rurki kapilarnej. W warunkach takiego wypływu lepkość cieczy badanej zależy od wielu parametrów, które ujmuje znany wzór Poiseuille'w.

$$v = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 \eta l}$$

gdzie:  $v$  - objętość przepływającej cieczy,  $t$  - czas przepływu,  $l$  - długość rurki kapilarnej,  $r$  - promień rurki kapilarnej,  $\Delta p$  - różnica ciśnień na obu końcach rurki.

Z powyższego wzoru możemy obliczyć lepkość cieczy, jeśli znamy wartość pozostałych wielkości:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 v l}$$

Gdy ciecz wypływa pod działaniem własnego ciężaru, przy czym poziom jej mierzony w stosunku do poziomu wylotu rurki kapilarnej obniża się z  $h_1$  do  $h_2$ , możemy do równania podstawić średnią wartość różnicy ciśnień, obliczoną wg wzoru:

$$\Delta p = \frac{h_2 - h_1}{2} d g$$

tak więc:

$$\eta = \frac{\pi r^4 t}{8vl} \cdot \frac{h_2 - h_1}{2} dg$$

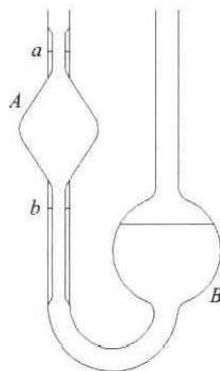
Z równania tego wynika, że pomiar lepkości bezwzględnej można wykonać wówczas, gdy znany jest promień rurki kapilarnej, przy czym powinien on być jednakowy na całej długości rurki. Ponieważ otrzymanie takiej rurki jest trudne, zazwyczaj pomiar wykonujemy w sposób porównawczy, tzn. kolejno, w tym samym aparacie, mierzymy prędkości wypływu jednakowych objętości dwóch różnych cieczy. W obu wypadkach możemy zastosować prawo Poiseuille'a w postaci wcześniejszego wzoru, a dzieląc stronami obydwie równania, otrzymamy:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{d_1 t_1}{d_2 t_2}$$

czyli

$$\eta_1 = \frac{d_1 t_1}{d_2 t_2} \eta_2$$

przy czym indeks (1) odnosi się do cieczy badanej, indeks (2) do cieczy wzorcowej np. H<sub>2</sub>O  
 wyznaczenie lepkości cieczy metodą przepływu polega na pomiarze czasu wypływu określonej objętości cieczy przez kapilarę. Pomiar lepkości metodą wypływu wykonujemy najczęściej przy użyciu wiskozymetru Ostwalda. Jest to aparat zbliżony kształtem do litery U z dwoma zbiornikami A i B połączonymi rurką kapilarną.



Rysunek 3. Wiskozymetr Ostwalda

Poniżej i powyżej zbiornika A zaznaczone są na szkle dwie kreski poziome a oraz b. Celem przeprowadzenia pomiaru do wiskozymetru wprowadza się określoną objętość badanej cieczy, wciąga ją do zbiornika A i mierzy stoperem czas potrzebny do obniżenia się menisku cieczy w lewym ramieniu wiskozymetru (od a do b). Taki sam pomiar wykonuje się z cieczą wzorcową.

- Metoda oparta na pomiarze prędkości opadania kulek w badanej cieczy

Jeżeli kulka porusza się w badanej cieczy ze stałą prędkością, to opór, którego doznaje wskutek tarcia wewnętrznego cieczy, można - w myśl prawa Stokesa - wyrazić równaniem:

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

gdzie: r - promień kulki, v - prędkość opadania kulki

Podczas opadania kulki w ośrodku badanym, na kulkę działają trzy siły: ciężar kulki (Q), siła wyporu (parcie cieczy) (A) i siła tarcia wewnętrznego (F).

Parcie cieczy jest równe ciężarowi wypartej przez kulkę objętości cieczy:

$$A = \frac{4}{3}\pi r^3 d_c g$$

gdzie: r - promień kulki,  $d_c$  - gęstość cieczy, g - przyspieszenie ziemskie.

Siła ciężkości działająca w dół jest równa ciężarowi Q pomniejszonemu o parcie A:

$$Q - A = \frac{4}{3}\pi r^3 (d_k - d_c)$$

Kulka tak długo doznaje przyspieszenia, jak długo siła ciężkości przewyższa tarcie wewnętrzne cieczy. Od momentu zrównania się tych sił, kulka spada ze stałą prędkością v.

Opór F równa się wówczas Q - A, czyli:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 (d_k - d_c) = 6\pi \cdot r \cdot \eta \cdot v$$

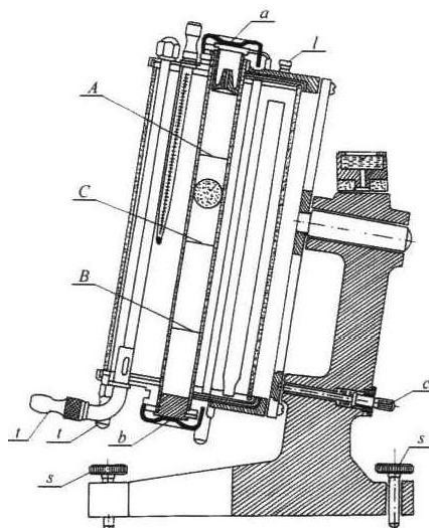
gdzie:  $d_k$  - gęstość kulki,  $d_c$  - gęstość cieczy

Jeżeli prędkość opadania kulki wyrazimy stosunkiem długości drogi S przebytej przez kulkę w czasie t, to po przekształceniu równania otrzymamy:

$$\eta = k(d_k - d_c)t$$

gdzie  $k$  - stała ujmująca wszystkie wielkości charakterystyczne.

Pomiar szybkości opadania kulki pozwala zatem na wyliczenie lepkości badanej cieczy. Pomiary lepkości tą metodą przeprowadza się najczęściej w wiskozymetrze Hopplera:



Rysunek 4. Schemat wiskozymetru Hopplera:  $a, b$  - otwory do napełniania i opróżniania przyrządu,  $t$  - połączenie z termostatem,  $c$  - aretaż.  $l$  - libella.  $s$  - śruby do poziomowania wiskozymetru.

Rys. 2.13. Schemat wiskozymetru Hópplera:  $u, h$  - otwory do nape

Aparat ten składa się z rurki pomiarowej, otoczonej płaszczem wodnym, na której zaznaczone są kreski poziome A, B i C. Obydwa otwory rurki - górny i dolny ( $a$  i  $b$ ) - służą do napełniania i opróżniania przyrządu z badanej cieczy. Pomiary przeprowadza się po uprzednim wypoziomowaniu wiskozymetru za pomocą śrub. Prawidłowe ustawienie aparatu sprawdza się libellą umiejscowioną na korpusie przyrządu. Czas opadania kulki pomiędzy kreskami A i B mierzy się za pomocą stopera. Przy pomiarach mniej dokładnych lub wolniejszym spadku kulki, możemy mierzyć połowę drogi (odcinek AC), należy wówczas w obliczeniach podwoić wartość  $k$ .

Ponieważ pomiary lepkości prowadzi się w określonej temperaturze, dlatego też aparat łączy się z ultratermostatem wodnym zaopatrzonym w urządzenie zapewniające przepływ wody przez płaszcz wiskozymetru. Do każdego wiskozymetru dołączony jest komplet kulek (szklanych lub metalowych) o różnej średnicy i gęstości umożliwiający dobranie najwłaściwszej kulki (warunek: czas opadania kulki winien mieścić się w zakresie od 30-300 s).

Dokonując oceny obydwóch opisanych metod wyznaczania lepkości, można powiedzieć, że metoda z zastosowaniem wiskozymetru Ostwalda jest prostsza i częściej używana, natomiast pomiar lepkości w wiskozymetrze Hóplera jest dokładniejszy.