

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ CHEMICZNY

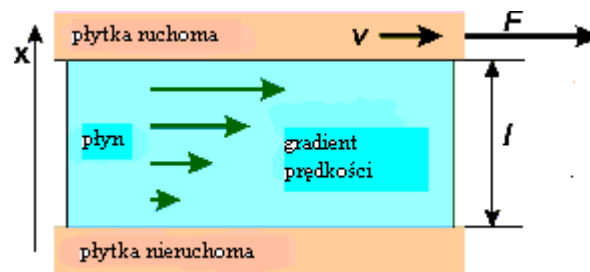
KATEDRA FIZYKOCHEMII I TECHNOLOGII
POLIMERÓW

LABORATORIUM Z FIZYKI

***Wyznaczanie bezwzględnego
współczynnika lepkości cieczy metodą
Stokesa.***

1. Wprowadzenie

Płyny rzeczywiste mają pewną wartość tarcia wewnętrznego, które nazywamy lepkością. Lepkość dotyczy zarówno cieczy jak i gazów. Możemy ją zdefiniować jako tarcie pomiędzy sąsiadującymi warstewkami płynu, gdy przesuwają się one względem siebie. W cieczech lepkość jest spowodowana siłami kohezyjnymi pomiędzy cząstkami, a w gazach jest związana ze zderzeniami cząstek.



Rys.1 Zestaw eksperymentalny do wyznaczenia współczynnika lepkości

Różne płyny mają różną wartość lepkości np. syrop jest bardziej lepki niż woda, smar ma większą lepkość niż olej silnikowy, a ciecze mają większą lepkość niż gazy. Lepkości różnych płynów mogą być wyrażone ilościowo poprzez współczynnik lepkości, η (grecka litera eta), który możemy zdefiniować za pomocą następującego eksperymentu. Cienką warstwę płynu umieszcza się pomiędzy dwoma płytkami, z których jedna jest ruchoma, a druga nieruchoma. Cząstki płynu znajdującego się w bezpośrednim kontakcie z każdą z płytek oddziałują z nimi siłami adhezji. Tak więc górna powierzchnia płynu porusza się z tą samą prędkością co płytka ruchoma, podczas gdy płyn w kontakcie z płytką nieruchomą pozostaje w spoczynku i hamuje ruch warstwy płynu, znajdującego się nad nią, a ta z kolei hamuje ruch następnej itd. Widzimy, że prędkość zmienia się w sposób ciągły od 0 do v . Zmiana prędkości podzielona przez drogę, na której następuje ta zmiana (v/l) nazywana jest gradientem prędkości. Aby przesunąć górną płytkę należy zadziałać odpowiednią siłą, która jest proporcjonalna do powierzchni płynu A , znajdującego się w kontakcie z płytką i do prędkości v , a odwrotnie proporcjonalny do odległości pomiędzy płytkami l , czyli $F \propto vA/l$. Im bardziej lepki jest płyn, tym większa powinna być ta siła. Ostatecznie możemy napisać, że siła ta jest równa:

$$\vec{F} = \eta \cdot \frac{A\vec{v}}{l} \quad (1)$$

Rozwiązując to równanie dla η , otrzymujemy: $\eta = Fl/vA$. W układzie SI jednostką η jest $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = \text{Pa} \cdot \text{s}$. W układzie CGS jednostką jest $\text{dyna} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ i nazywana jest poise (P) [czyt. puaz]. Lepkość jest często podawana w centypoizach* ($1\text{cP} = 10^{-2}\text{P}$). W tabeli 1 podano przykładowe współczynniki lepkości dla różnych płynów. Również temperatura silnie wpływa na lepkość płynów np. lepkość takich cieczy jak olej silnikowy maleje ze wzrostem temperatury.

Tabela 1

Płyn	Temperatura [°C]	Lepkość [Pa's]
Woda	0	$1.8 \cdot 10^{-3}$
Woda	20	$1.0 \cdot 10^{-3}$
Woda	100	$0.3 \cdot 10^{-3}$
Alkohol etylowy	20	$1.2 \cdot 10^{-3}$
Olej silnikowy	30	$200 \cdot 10^{-3}$
Powietrze	20	$0.018 \cdot 10^{-3}$
Wodór	0	$0.009 \cdot 10^{-3}$
Para wodna	100	$0.013 \cdot 10^{-3}$

Najprostszą zależność wiążącą siłę hamującą wraz z gradientem prędkości dla przepływu laminarnego wyprowadził Newton:

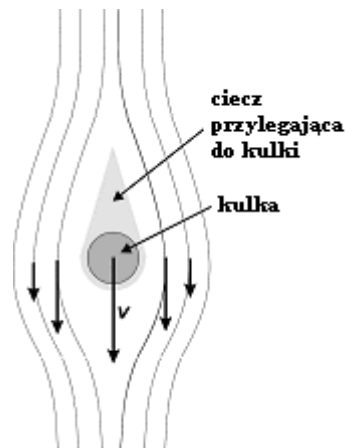
$$\vec{F} = \eta \cdot A \cdot \frac{d\vec{v}}{dx} \quad (2)$$

Jest ono spełnione tylko dla małych prędkości (niska wartość liczby Reynoldsa,

$\text{Re} < 1160$, $\text{Re} = \frac{\rho V}{t \Pi r \eta}$). Ciecze, które spełniają to równanie nazywamy newtonowskimi.

* $1[\text{Pa} \cdot \text{s}] = 10[\text{P}] = 1000[\text{cP}]$

Trudno byłoby obliczyć lepkość płynów bezpośrednio z powyższego równania z powodu trudności w pomiarze gradientu prędkości i niepewności w pomiarze powierzchni kontaktu. Zamiast tego wykorzystuje się wiskozymetr Stokesa, w którym mała metalowa kulka jest wrzucana do szklanej rury, wypełnionej płynem.



Rys.2. Schemat spadku swobodnego kulki w lepkim płynie

Podczas ruchu ciała w ośrodkach lepkich, wskutek oddziaływań międzycząsteczkowych, ciało unosi warstwę ciecży przylegającą do niego, ta natomiast wprawia w ruch następne warstwy ciecży (Rys. 2). Powstaje zatem w ośrodku gradient prędkości prostopadły do kierunku ruchu ciała (np. metalowej kulki). Zjawisko to jest czynnikiem hamującym i określane jest jako tarcie wewnętrzne bądź *lepkość*.

Jeśli prędkość kulki jest wystarczająco mała (możemy założyć, że przepływ jest laminarny) możemy użyć równania Stokesa do obliczenia siły tarcia wewnętrznego, działającej na kulkę:

$$\vec{F}_T = 6\pi\eta r\vec{v} \quad (3)$$

gdzie:

r - promień kulki,

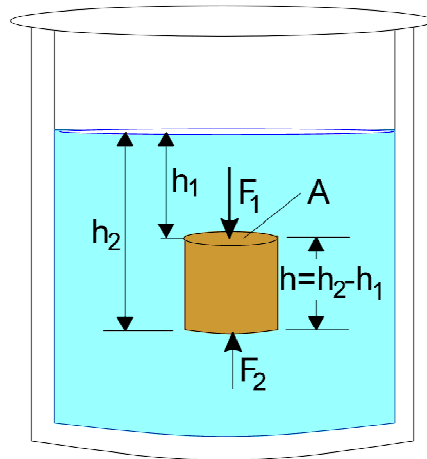
v- prędkość opadania kulki,

Na opadającą kulkę działają jednak także inne siły:

$$\text{siła grawitacji: } \vec{F}_G = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_m \vec{g} \quad (4)$$

gdzie ρ_k to gęstość materiału, z którego wykonana jest kulka (stali).

Drugą siłą jest siła wyporu ośrodka, związana ze wzrostem ciśnienia wraz z głębokością. Tak więc ciśnienie na powierzchni przy dnie obiektu zanurzonego w płynie jest większe niż ciśnienie na górnej powierzchni obiektu (Rys.3.).



Rys.3. Wyznaczanie siły wyporu.

Rozważaną sytuację przedstawiono dla walca zanurzonego całkowicie w płynie o gęstości ρ_p o wysokości h , którego podstawy mają powierzchnię A . Płyn wywiera ciśnienie $P_1 = \rho_p g h_1$ na powierzchnię górną walca. Natomiast siła działająca na górną podstawę walca jest równa: $F_1 = P_1 A = \rho_p g h_1 A$ i jest skierowana w dół. Podobnie płyn działa siłą skierowaną w górę na dolną podstawę walca, równą: $F_2 = P_2 A = \rho_p g h_2 A$. Siła wypadkowa działająca na walec jest to siła wyporu F_w , działająca w górę i opisana równaniem:

$$\vec{F}_w = \vec{F}_2 - \vec{F}_1 = \rho_p \vec{g} A (h_2 - h_1) = \rho_p \vec{g} A h = \rho_p \vec{g} V \quad (5)$$

W przypadku metalowej kulki zanurzonej w cieczy, siła wyporu jest następująca:

$$\vec{F}_w = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_p \vec{g} \quad (6)$$

Początkowo, gdy kulka metalowa zostaje wrzucona przez lejek do cieczy jej prędkość rośnie i porusza się ona ruchem przyspieszonym. Gdy rośnie prędkość, rośnie także siła

tarcia, aż do momentu, gdy siły w równaniu (7) zrównoważą się i kulka zacznie poruszać się ruchem jednostajnym.

$$\Sigma \vec{F} = \vec{F}_G - \vec{F}_w - \vec{F}_T = 0 \quad (7)$$

$$F_G = F_w + F_T \quad (8)$$

Podstawiając równania dla poszczególnych sił (równanie 3, 4 i 6) do równania 8 uzyskujemy równanie 9, służące do obliczania współczynnika lepkości, po uprzednim obliczeniu prędkości kulki na podstawie wykonanych pomiarów.

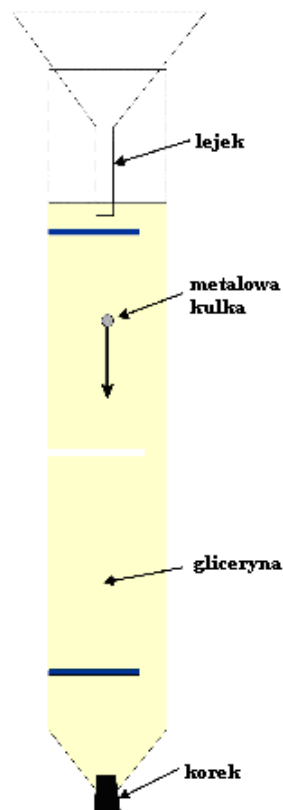
$$\eta = \frac{2r^2 \vec{g} (\rho_k - \rho_p)}{9\vec{v}} \quad (9)$$

Równanie Stokesa jest spełnione dla nieskończenie dużego ośrodka i przepływu laminarnego. Dlatego należy wziąć pod uwagę wpływ ścianek rury, wprowadzając poprawkę, iż wskutek wpływu ścianek cylindra prędkość opadania zmniejsza się tyle

razy ile wynosi wartość ułamka $\frac{1}{1 + 2.4 \frac{r}{R}}$.

2. Pomiary

Doświadczenie przeprowadza się w wiskozymetrze Stokesa (Rys.4.)



Rys.4. Wiskozymetr Stokesa

Doświadczenie należy wykonać według następującej procedury:

1. Napełnić rurę gliceryną
2. Wprowadzić lejek do rury
3. Zmierzyć odległości pomiędzy poziomami rury, zaznaczonymi niebieskimi paskami
4. Zmierzyć średnicę kulki suwmiarką, zważyć ją, a następnie wrzucić przez lejek do rury wiskozymetru
5. Zmierzyć czas spadku kulki pomiędzy wyróżnionymi poziomami
6. Zapisać uzyskany wynik pomiaru w notatniku laboratoryjnym
7. Powtórzyć pomiar dla 15 kulek o małej średnicy
8. Zebrać odpowiednie dane jak gęstość gliceryny, średnica rury, dokładność pomiaru suwmiarki

9. Wyjąć kulki z rury, ciągnąc ostrożnie za korek i wypuszczając trochę gliceryny.
Wlać glicerynę z powrotem do rury.

Wyniki powinny być zamieszczone w tabeli 2.

Tabela 2

Lp.	r [m]	m [kg]	l [m]	t [s]	R [m]	ρ_k [kg/m ³]	ρ_p [kg/m ³]	η [Pa·s]
1.								

3. Wyniki, obliczenia, analiza błędów

Należy obliczyć współczynnik lepkości η gliceryny, wykorzystując równania 3 - 7. A następnie przeprowadzić analizę błędów dla obliczonego współczynnika lepkości korzystając z następującego wzoru:

$$d\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial r}\right)^2 dr^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial l}\right)^2 dl^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial t}\right)^2 dt^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial R}\right)^2 dR^2} \quad (10)$$

Natomiast końcowe wyniki należy przedstawić w formie:

$$\eta = \bar{\eta} \pm d\eta \quad (11)$$

Otrzymaną wartość współczynnika porównać ze współczynnikiem lepkości uzyskanym z tablic.

4. Literatura

1. Szydłowski H., Pracownia fizyczna, PWN, Warszawa, 1994
2. Bobrowski Cz., Fizyka – krótki kurs, WNT, Warszawa, 1993
3. Giancoli D.C., Physics. Principles with Applications, Prentice Hall, 2000
4. Feynman R., Feynmana wykłady z fizyki, Tom 2.2., PWN, Warszawa, 2002

5. Pytania

1. Co to jest lepkość? Jakie rodzaje lepkości są ci znane?
2. Opisz zjawisko spadającej kropli deszczu.
3. Wyprowadź równanie na lepkość.
4. Metody wyznaczenia współczynnika lepkości.
5. Od czego zależy lepkość?
6. Co to jest liczba Reynoldsa?
7. Jakie warunki powinny być spełnione, aby można było korzystać z równania Stokesa?
8. Z czego wynika stosowanie poprawki we wzorze Stokesa?
9. Omów prawo Archimedesesa.
10. Wyprowadź wzór na siłę wyporu.

6. Literatura

1. Szydłowski H., Pracownia fizyczna, PWN, Warszawa, 1994
2. Bobrowski Cz., Fizyka – krótki kurs, WNT, Warszawa, 1993
3. Giancoli D.C., Physics. Principles with Applications, Prentice Hall, 2000
4. Feynman R., Feynmana wykłady z fizyki, Tom 2.2., PWN, Warszawa, 2002