

Nazwisko

Data

Nr na liście

Imię

Wydział

Dzień tyg.

Godzina

Ćwiczenie 412

Wyznaczanie napięcia powierzchniowego cieczy

I. Wyznaczanie napięcia powierzchniowego wody za pomocą kapilary

Wymiary kapilary			Wysokość słupa wody, [mm]				Napięcie pow. wody σ , [N/m]
Długość, h_k [mm]	Objętość, V [cm ³]	Promień, r [mm]	h_1	h_2	h_3	średnia, h	

II. Wyznaczanie napięcia powierzchniowego cieczy metodą wypływu kropli

Masa naczynka wagowego w gramach: $m_p =$

Rodzaj cieczy	Masa naczynka z cieczą,	Masa n kropli, $n =$	Masa jednej kropli	Nap. pow. σ_i , $i=1, 2, 3$
	[g]	[g]	[g]	[N/m]
Woda destylowana				
Woda destylowana z detergentem				
Roztwór wodny kwasu octowego				
Denaturat				

Ćwiczenie 412. Wyznaczanie napięcia powierzchniowego cieczy

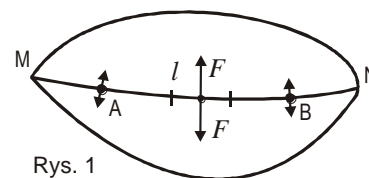
Napięcie powierzchniowe cieczy

Między cząsteczkami cieczy działają przyciągające *siły spójności*, których zasięg oddziaływania jest rzędu kilkudziesięciu średnic cząsteczek. W głębi cieczy, ze względu na równomierne rozłożenie cząsteczek, siły oddziaływań między cząsteczkami znoszą się wzajemnie. Inaczej jest na powierzchni cieczy i tuż pod nią. Ponieważ gęstość gazu ponad cieczą jest mała, na cząsteczki w warstwie powierzchniowej działa wypadkowa siła spójności wywierana przez inne cząsteczki leżące głębiej, która jest zwrócona do wnętrza cieczy, prostopadłe do jej powierzchni. Siła ta wciąga cząsteczki przypowierzchniowe w głąb cieczy, co przejawia się w tym, że ciecz dąży do zmniejszenia swojej powierzchni i, np. w warunkach braku siły grawitacji, krople cieczy przyjmują kształt kulisty, bowiem dla kuli stosunek powierzchni do objętości przyjmuje wartość najmniejszą. Ciśnienie wywierane przez warstwę powierzchniową nazywa się *ciśnieniem wewnętrznym cieczy*.

W wyniku ciśnienia molekularnego, skierowanego w głąb cieczy, w warstewce powierzchniowej występują siły cząsteczkowe leżące w płaszczyźnie tej warstewki — są to siły *napięcia powierzchniowego*. Jeżeli na powierzchni cieczy, rys. 1, poprowadzimy linię MN, to na cząsteczki cieczy leżące wzdłuż tej linii działają stycznie do powierzchni równoważące się siły napięcia powierzchniowego (zaznaczono przykładowo siły działające na cząsteczki w punktach A i B).

Siła działająca na jednostkę długości z jednej strony linii MN nazywana jest *napięciem powierzchniowym cieczy* i oznaczana jako σ (sigma). Gdy na długości l , dowolnego konturu (linii) na powierzchni cieczy, działa całkowita siła F , to napięcie powierzchniowe możemy wyrazić jako

$$\sigma = F/l \quad (1)$$

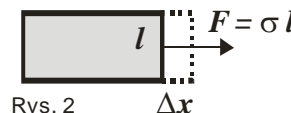


Rys. 1

Jednostką napięcia powierzchniowego jest N/m.

Błona powierzchniowa cieczy pod wpływem siły napięcia powierzchniowego wykazuje tendencję do kurczenia się, podobnie jak w przypadku napiętej błony gumowej. Jednak w przeciwieństwie do rzeczywistej błony, napięcie powierzchniowe cieczy nie zależy od wielkości powierzchni, lecz od rodzaju cieczy i jej temperatury. Dla wody w warunkach pokojowych wynosi ono 0,073 N/m.

Napięcie powierzchniowe wiąże się z pracą wykonaną wbrew siłom spójności, potrzebną do zwiększenia swobodnej powierzchni cieczy. Można łatwo wykazać (rys. 2), że aby zwiększyć pole powierzchni cieczy o ΔS należy wykonać pracę W równą:



Rys. 2

$$W = \sigma \cdot \Delta S.$$

Praca zużyta na zwiększenie powierzchni cieczy magazynowana jest w postaci energii powierzchniowej cieczy, nazywanej także *swobodną energią powierzchniową*, którą można ponownie zamienić na pracę: $\Delta E = W = \sigma \cdot \Delta S$. Stąd mamy drugą definicję napięcia powierzchniowego:

$$\sigma = \Delta E / \Delta S. \quad (2)$$

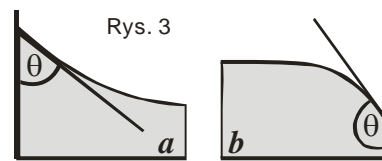
Zatem napięcie powierzchniowe σ liczbowo jest równe pracy potrzebnej do zwiększenia powierzchni cieczy o 1 m^2 . Napięcie powierzchniowe może być wyrażone również w dżulach na metr kwadratowy: $1 \text{ J/m}^2 = 1 \text{ N/m}$.

Poza siłami przyciągania, działającymi pomiędzy cząsteczkami cieczy, występują także siły przyciągania lub odpychania pomiędzy cząsteczkami cieczy i cząsteczkami naczynia. Wskutek istnienia tych sił obserwujemy *zjawisko menisku*, czyli uginania się powierzchni cieczy w pobliżu styku z naczyniem i związane z tym *zjawisko włoskowatości*, polegające na podnoszeniu się lub obniżaniu powierzchni płynu w wąskiej rurce (kapilarze).

Zjawisko włoskowatości oraz kropłowego wypływu cieczy z kapilary wykorzystano w niniejszym ćwiczeniu do wyznaczenia napięcia powierzchniowego wody i innych cieczy.

Zjawisko włoskowatości

Powierzchnia cieczy stykająca się z powierzchnią ciała stałego tworzy pewien kąt θ (teta), rys. 3. Ten kąt, zwany *kątem zwilżania*, zależy od wzajemnego stosunku sił przylegania \vec{F}_p – działających

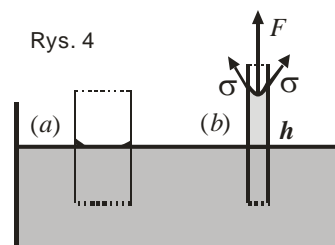


między cząsteczkami cieczy i ciała stałego oraz sił spójności \vec{F}_s – pomiędzy samymi cząsteczkami cieczy. Powierzchnia cieczy układa się prostopadle do siły wypadkowej $\vec{F}_w = \vec{F}_p + \vec{F}_s$.

Gdyby tak nie było, to istniałaby składowa siły wypadkowej równoległa do powierzchni, powodująca przemieszczanie się cząsteczek cieczy (w dużych zbiornikach powierzchnia cieczy jest prostopadła do siły grawitacji). Jeśli $|\vec{F}_p| > |\vec{F}_s|$ to ciecz zwilża naczynie i kąt $\theta < 90^\circ$; obserwujemy

wówczas menisk wklęsły, rys. 3a. Jeśli $|\vec{F}_p| < |\vec{F}_s|$, to ciecz nie zwilża naczynia i $\theta > 90^\circ$; w tym przypadku mamy do czynienia z meniskiem wypukłym, rys. 3b. Przy kącie $\theta = 90^\circ$, powierzchnia cieczy pozostaje płaska. Poniżej podano przykładowe wartości kątów zwilżania:

Powierzchnia graniczna	Kąt zwilżania θ
Woda — szkło (czyste)	0°
Alkohol etylowy — szkło (czyste)	0°
Rtęć — szkło	140°
Woda — srebro	90°
Woda — parafina	107°



Gdy do cieczy zwilżającej (kąt $\theta < 90^\circ$) wstawimy rurkę szeroką (średnica > 10 mm), wówczas powierzchnia swobodna cieczy wewnątrz rurki jest na tym samym poziomie, co na zewnątrz niej – jedynie w sąsiedztwie ścianek daje się zauważyć menisk wklęsły, rys. 4a. W rurce cienkiej, tzw. włoskowatej albo kapilarnej (średnica < 2 mm), zakrzywienie powierzchni cieczy obejmuje cały obszar wewnętrzny rurki i błonka powierzchniowa przybiera kształt powierzchni kulistej, stykającej się ze ściankami rurki pod kątem θ , rys. 4b. Cząsteczki cieczy przylegające do ścianki rurki działają na sąsiednie cząsteczki powierzchniowe siłami napięcia powierzchniowego, stycznymi do powierzchni; wypadkowa tych sił F , skierowana pionowo w górę, wciąga ciecz do kapilary, aż zrównoważy ją ciężar słupka cieczy.

Włoskowatość można wyjaśnić również w nieco inny sposób. Zakrzywiona powierzchnia cieczy dąży do zmniejszenia swojej powierzchni swobodnej ponieważ powierzchnia cząstki kulistej jest większa od powierzchni podstawy. Tendencja spłaszczania powierzchni, zakrzywionej w wyniku działania sił przylegania, wytwarza pod zakrzywioną powierzchnią podciśnienie, równoważone ciśnieniem hydrostatycznym słupka cieczy. Analogicznie można wyjaśnić obniżanie się poziomu cieczy w rurkach, które nie są zwilżane, czyli w przypadku menisku wypukłego — gdy powierzchnia cieczy jest wypukła, pod powierzchnią panuje nadciśnienie.

W przypadku czystych rurek szklanych zetknięcie wielu cieczy, w tym wody, z jej ściankami cechuje tzw. zwilżanie doskonałe, o kącie zwilżania $\theta \approx 0$. Możemy wówczas przyjąć, że siły napięcia powierzchniowego, występujące na obwodzie powierzchni cieczy w kapilarze, działają pionowo do góry, rys. 5. Długość konturu liniowego, na którym one działają, jest równa obwodowi wewnętrznemu rurki $2\pi r$. Całkowita siła napięcia powierzchniowego, $F = 2\pi r \cdot \sigma$, dopóty wciąga ciecz do góry, do wnętrza rurki, dopóki nie zostanie zrównoważona ciężarem słupa cieczy o wysokości h . Warunek zrównoważenia obu sił ma, zatem, postać:

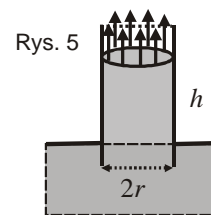
$$2\pi r \cdot \sigma = \pi r^2 h \cdot \rho \cdot g,$$

gdzie ρ – gęstość cieczy, g – przyspieszenie ziemskie.

Z równości tej otrzymujemy wzór na napięcie powierzchniowe cieczy:

$$\sigma = \frac{h\rho g r}{2} \quad (3)$$

W celu wyznaczenia napięcia powierzchniowego σ należy wykonać pomiar promienia kapilary r oraz wzniesienia słupa cieczy h .



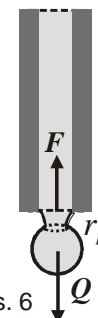
Kropłowy wypływ cieczy

Przy powolnym wypływie cieczy kroplami z pionowej kapilary zauważamy, że pojawiają się początkowo wypukłe powierzchnie kuliste, potem tworzy się przewężenie i kulista kropla odrywa się od rurki, rys. 6. Taki kształt kropli jest wynikiem dążenia siły napięcia powierzchniowego do zamknięcia narastającej masy cieczy wewnątrz minimalnej powierzchni. Oderwanie się kropli następuje wskutek zerwania błonki powierzchniowej na obwodzie przewężenia, pod wpływem ciężaru kropli. Jeżeli obwód przewężenia wynosi $2\pi r_p$, to siła napięcia powierzchniowego w chwili odrywania wynosi

$$F = 2\pi r_p \cdot \sigma$$

i skierowana jest pionowo w górę. Wprowadzając masę kropli m mamy

$$mg = 2\pi r_p \sigma. \quad (4)$$



Wartość promienia przewężenia r_p zależy od promienia kapilary i w pewnym stopniu od napięcia powierzchniowego. Dla cieczy niewiele różniących się napięciem powierzchniowym możemy przyjąć, że promień przewężenia jest taki sam. Dla drugiej cieczy, o współczynniku napięcia powierzchniowego σ_i , warunek odrywania będzie wyglądał następująco:

$$m_i g = 2\pi r_p \sigma_i, \quad (5)$$

gdzie m_i jest masą kropli. Dzieląc stronami (4) i (5) otrzymamy:

$$\sigma_i = \frac{m_i}{m} \sigma. \quad (6)$$

Wzór (6) pozwala wyznaczyć nieznaną napięcie powierzchniowe σ_i cieczy, jeżeli wyznaczymy masę m_i kropli tej cieczy i innej cieczy – m – o znanym napięciu powierzchniowym σ .

Wykonanie zadania

I. Wyznaczanie napięcia powierzchniowego za pomocą rurki włoskowatej

1. Jeżeli promień kapilary nie jest podany, obliczamy go na podstawie objętościowej podziałki na kapilarze (korzystamy ze wzoru na objętość walca $V = \pi r^2 h_k$).
2. Do czystego, szerokiego naczynia (krystalizatora) nalewamy wodę destylowaną.
3. Do wody wkładamy czystą i drożną kapilarę (bez wody w środku), którą zanurzamy głęboko, a następnie częściowo wynurzamy. Można też kapilarę opartą o dno pochylić, a następnie ustawić pionowo bez częściowego wynurzenia.
4. Za pomocą linijki mierzymy różnice poziomów wody w naczyniu i w kapilarze.
5. Pomiar wykonujemy trzykrotnie. Średnią wartość wysokości h podstawiamy do wzoru (3) i obliczamy σ wody (ρ oznacza gęstość wody w temperaturze pokojowej).

II. Wyznaczanie napięcia powierzchniowego metodą wypływu kropeł

1. Ważymy czyste i suche naczynko wagowe — masa m_p .
2. Do czystej biurety (przepłukanej cieczą, która ma być badana) wlewamy (za pomocą lejka) wodę destylowaną. Odkręcając kranik regulujemy szybkość wypływu kropeł i wypuszczamy z kapilary biurety 50 kropeł wody do naczynka wagowego i ważymy. Obliczamy masę m jednej kropli wody.
3. Pomiar opisany powyżej powtarzamy dla trzech innych cieczy (np. woda z detergentem w proporcji kilka kropeł detergentu na 50÷100 cm³ wody, 10 % roztwór kwasu octowego w wodzie, denaturat). Obliczamy masy pojedynczych kropli — m_i , $i = 1, 2, 3$.
4. Ze wzoru (6) obliczamy napięcie powierzchniowe badanych cieczy — σ_i , przyjmując jako napięcie powierzchniowe wody σ wartość wyznaczoną w części I.

Rachunek błędów

I. Pomiar za pomocą kapilary

Błąd bezwzględny $\Delta\sigma$ obliczamy metodą pochodnej logarytmicznej, którą stosujemy do równania (3). Dostajemy wyrażenie:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta r}{r}. \quad (7)$$

Przyjmujemy $\Delta\rho = 0$, $\Delta g = 0$, (podstawiamy wartości tablicowe) zatem

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta r}{r}. \quad (8)$$

Jako Δh podstawiamy błąd maksymalny średniej, powiększony o dokładność odczytu: $\Delta h = \max|h - h_i| + 1 \text{ mm}$. Jeżeli promień kapilary podano, to $\Delta r = 0,01 \text{ mm}$. W przypadku samodzielnego wyznaczania promienia, Δr obliczamy metodą pochodnej logarytmicznej, którą stosujemy do wzoru: $r = \sqrt{\frac{V}{\pi h_k}}$. Otrzymamy:

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta h_k}{h_k},$$

Δh_k – dokładność odczytu długości h_k odcinka kapilary o objętości V , przyjmujemy $\Delta V/V = 0,01$.

Obliczamy błąd bezwzględny $\Delta\sigma$ oraz błąd względny procentowy,

$$B_p = (\Delta\sigma/\sigma) \cdot 100\%.$$

II. Metoda kropłowa

Metodę pochodnej logarytmicznej stosujemy do wzoru (6). Otrzymamy:

$$\frac{\Delta\sigma_i}{\sigma_i} = \frac{\Delta m_i}{m_i} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta\sigma}{\sigma}, \quad (9)$$

$\Delta m_i = \Delta m$ — dokładność ważenia jednej kropli (podwójna dokładność ważenia wszystkich kropli podzielona przez liczbę ważonych kropeł), $\Delta\sigma/\sigma$ wyznaczono powyżej ze wzoru (8). Obliczamy błąd bezwzględny $\Delta\sigma_i$, jak i błąd względny procentowy dla jednej z badanych cieczy:

$$B_{pi} = (\Delta\sigma_i/\sigma_i) \cdot 100\%; \quad i = 1, 2, 3.$$