

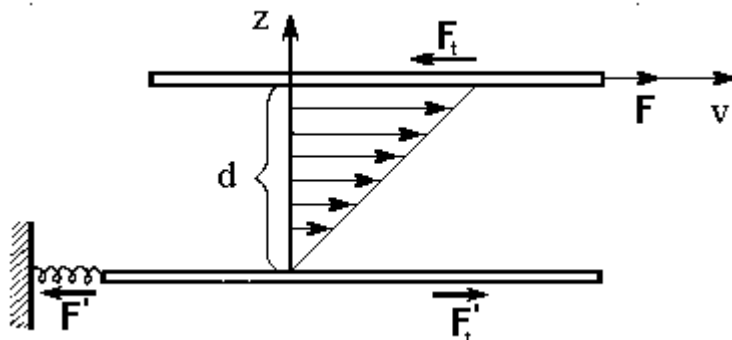
Ćwiczenie nr 37

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA LEPKOŚCI POWIETRZA

I. WSTĘP

Tarcie wewnętrzne

Zjawisko tarcia wewnętrznego (lepkości) można obserwować we wszystkich rzeczywistych cieczech i gazach, gdy np. jedna warstwa ośrodka porusza się względem innej. Prawidłowości, opisujące to zjawisko można łatwo wyprowadzić dla szczególnego przypadku, kiedy badamy siły działające na dwie równoległe płyty, poruszające się w lepkim ośrodku (rys.1):



Rys.1

Aby górna płyta poruszała się względem dolnej ze stałą prędkością v , musi na nią działać siła F , zrównoważona przez równą jej, przeciwnie zwróconą siłę. Jest nią siła tarcia wewnętrznego F_t , której wartość dla danego ośrodka zależy od wartości prędkości v , pola powierzchni płyt S oraz odległości między płytami d i jest dana wzorem:

$$F_t = \eta S v / d$$

Wielkość η , zależna od rodzaju ośrodka i jego stanu (np. temperatury), jest zwana **współczynnikiem tarcia wewnętrznego** (współczynnikiem lepkości lub wprost lepkością) danej cieczy lub gazu.

Dolna płyta również podlega działaniu siły tarcia, jako wynik oddziaływania za pośrednictwem ośrodka, znajdującego się pomiędzy płytami. Można uważać, że stykające się poszczególne warstwy ośrodka działają na siebie siłami tarcia, których wartość zależy od wielkości dv/dz zwanej gradientem prędkości, czyli zmiany prędkości przypadającej na jednostkę drogi mierzonyj w kierunku prostopadłym do wektora prędkości.

Jednostką lepkości w układzie SI jest **Pa s** (paskalosekunda). Oznacza to, że jednostkową lepkość ma taki ośrodek, w którym gradient prędkości o wartości 1m/s na 1m powoduje

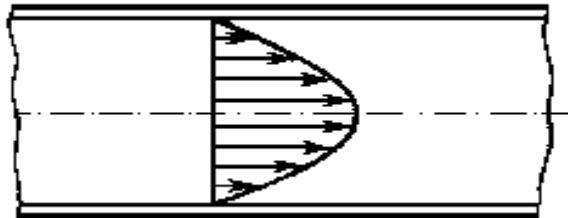
powstanie siły tarcia wewnętrznego o wartości 1N na 1m² powierzchni rozgraniczającej warstwy.

Współczynnik lepkości zależy od temperatury ośrodka – dla cieczy silnie maleje zaś dla gazów rośnie ze wzrostem temperatury. Wskazuje to na różne mechanizmy tarcia wewnętrznego w cieczach i gazach.

Przepływ przez okrągłą rurę

Powyższe rozważania dotyczyły ruchu ośrodka, w którym poszczególne warstwy jakby „ślzgały się” po sobie, nie mieszając się wzajemnie. Taki ruch nazywamy **laminarnym** (warstwowym, stacjonarnym), w odróżnieniu od **turbulentnego** (burzliwego), kiedy prędkość cząstek ośrodka w danym punkcie zmienia się chaotycznie w czasie.

Jeśli rozważyć laminarny przepływ przez rurę o przekroju kołowym, to dzięki siłom tarcia wewnętrznego prędkość cząstek cieczy lub gazu rośnie w miarę wzrostu odległości od ścianek rury i jest największa na osi rury, jak pokazano na rys.2:



Rys.2

Wydajność strumienia czyli objętość V cieczy lub gazu, jaki przepłynął przez poprzeczny przekrój rury w czasie t , jest proporcjonalna do spadku ciśnienia na jednostkę długości rury l oraz do czwartej potęgi promienia r jej przekroju poprzecznego a odwrotnie proporcjonalna do współczynnika lepkości. Zależność tę wyraża **wzór Poiseuille'a** :

$$V/t = \pi r^4 p / 8 \eta l$$

gdzie $p = p_1 - p_2$ jest różnicą ciśnień na końcach rury.

Wzór ten wykorzystać można do obliczenia współczynnika lepkości cieczy lub gazu w warunkach przepływu laminarnego, jeśli stwierdzi się liniową zależność wydajności strumienia V/t od różnicy ciśnień p .

Lepkość gazów

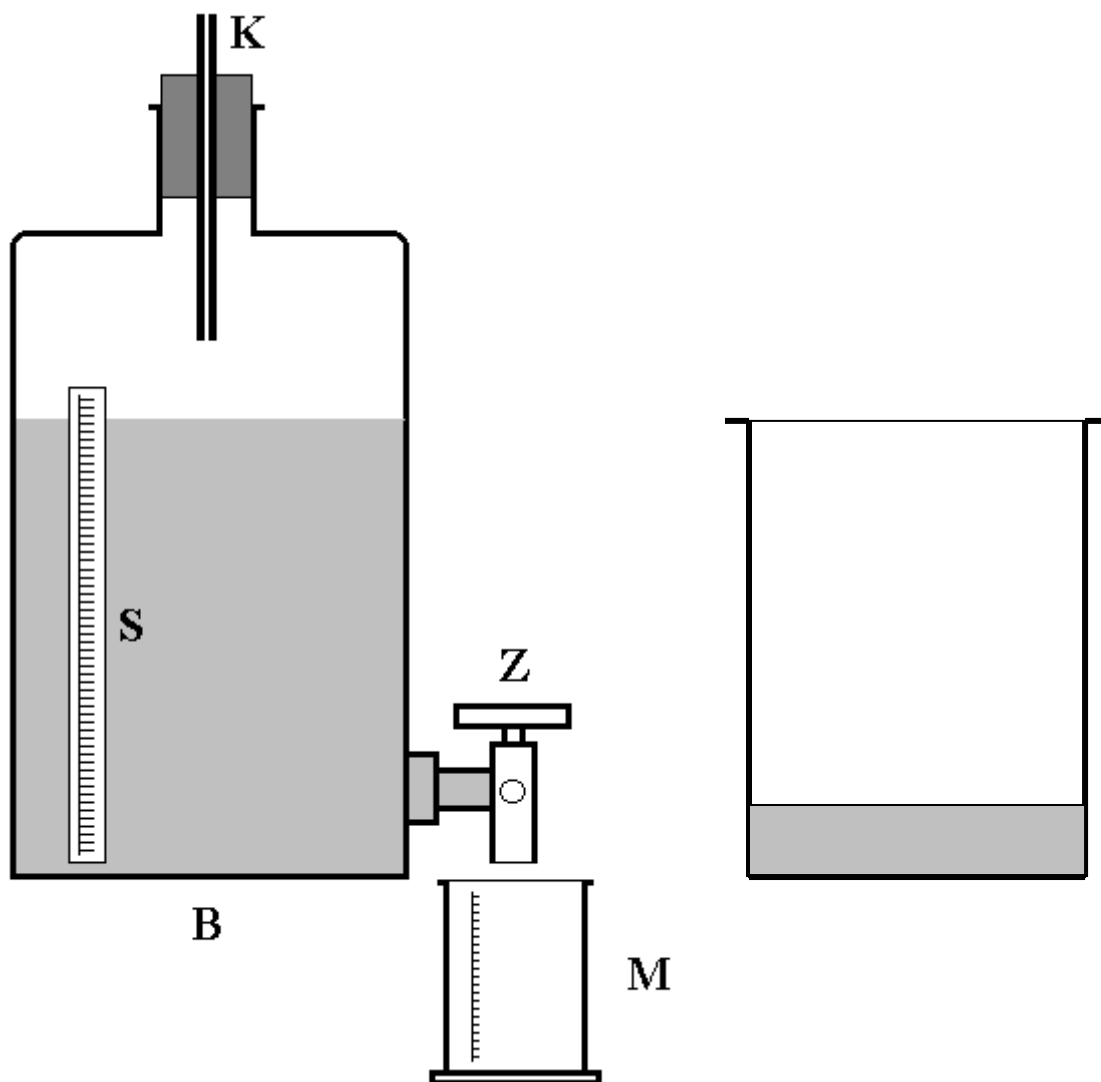
Mechanizm tarcia wewnętrznego w gazach ma odmienny charakter niż w przypadku cieczy. Jeśli rozważyć (podobnie jak dla cieczy), dwie stykające się ze sobą warstwy gazu, poruszające się względem siebie z prędkością v , należy wziąć pod uwagę to, że każda cząsteczka gazu uczestniczy równocześnie w dwóch ruchach – chaotycznym ruchu cieplnym ze średnią prędkością u i uporządkowanym ruchu warstwy z prędkością v , która jest znacznie mniejsza od u . W wyniku ruchu cieplnego cząsteczki ciągle przechodzą z jednej warstwy do drugiej, przekazując swój pęd cząsteczkom tej warstwy. W ten sposób szybsza warstwa jest hamowana a wolniejsza przyspieszana i zachowują się one tak, jakby działały na nie siły tarcia. Można więc wprowadzić współczynnik tarcia wewnętrznego (lepkości), który dla gazów zależy od średniej prędkości ruchu cieplnego u , średnie drogi swobodnej λ i gęstości gazu ρ :

$$\eta = u \rho \lambda / 3$$

Ponieważ średnia droga swobodna jest tym mniejsza im większe ciśnienie gazu (większa gęstość), więc lepkość gazów nie zależy od ciśnienia o ile gazy nie są zbyt rozrzedzone (czyli wtedy, gdy λ jest mała w porównaniu z rozmiarami np. rury, przez którą płynie gaz).

Współczynnik lepkości zależy natomiast od temperatury gazu (tak jak średnia prędkość ruchu cieplnego) czyli jest proporcjonalny do \sqrt{T} . Dla suchego powietrza o temperaturze 20° C, pod ciśnieniem atmosferycznym, współczynnik lepkości ma wartość około 18 $\mu\text{Pa s}$.

II.. OPIS EKSPERYMENTU



Rys.3

Rysunek 3 przedstawia schemat układu do wyznaczania współczynnika tarcia wewnętrznego (lepkości) powietrza. Szklana butla **B**, z zaworem **Z** w dolnej części, napełniona jest wodą. Wysokość poziomu wody można mierzyć za pomocą skali

milimetrowej **S**, przyklejonej do bocznej powierzchni butli. Przez korek zatykający szczelnie butlę przechodzi cienka rurka metalowa (kapilara) **K** o długości $l = 10$ cm i kołowym przekroju wewnętrznym o promieniu $r = 0,35$ mm. Kapilara nie powinna dotykać powierzchni wody. Zawór **Z** ma przekrój wewnętrzny dużo większy niż kapilara.

Kiedy zawór jest zamknięty, ciśnienie powietrza nad powierzchnią wody w butli jest równe ciśnieniu atmosferycznemu. Po otwarciu zaworu, z naczynia zaczyna wypływać woda pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego, zależnego od wysokości poziomu wody nad otworem wylotowym zaworu. Wypływ wody będzie zachodził tak długo, aż sumaryczne ciśnienie gazu i cieczy na poziomie otworu stanie się równe ciśnieniu atmosferycznemu p_a , czyli:

$$p_b + \rho gh = p_a$$

gdzie p_b jest ciśnieniem powietrza w butli, ρ – gęstością wody, g – przyspieszeniem ziemskim zaś h – wysokością słupa wody w danej chwili.

Podczas wypływu wody z butli, na końcach kapilary panuje różnica ciśnień:

$$p = p_a - p_b = \rho gh$$

dzięki której następuje przepływ powietrza przez kapilarę do wnętrza butli. Ta różnica ciśnień zmienia się w czasie wypływu wody, gdyż zmienia się wysokość h . Ponieważ jednak powierzchnia przekroju butli jest duża, a ilość wypływającej wody mała, to zmiana ciśnienia p w czasie pojedynczego pomiaru jest niewielka i można przyjąć jako p we wzorze Poiseuille'a średnią wartość różnicy ciśnień na końcach kapilary na początku i na końcu każdego pomiaru:

$$p = \rho g (h_1 + h_2)/2$$

Objętość powietrza V , jakie przepłynęło przez kapilarę w czasie danego pomiaru t , jest równa objętości wody, jaka w tym czasie wypłynęła przez zawór do menzurki **M**.

III. POMIARY

Zanotować wysokość poziomu wody h_1 odczytaną na skali **S**. Otworzyć kran **K**, włączając równocześnie stoper. Gdy w menzurce **M** będzie 100 cm^3 wody, zatrzymać stoper, zanotować czas wypływu wody t , oraz wysokość poziomu h_2 . Wylać wodę z menzurki do większego naczynia i podstawić ją ponownie pod kran. Powtarzać pomiary, mierząc za każdym razem czas wypływu takiej samej objętości wody (100 cm^3), aż poziom h obniży się prawie do poziomu otworu wylotowego butli (około 3 cm) na skali **S**. Po zakończeniu pomiarów przelać wodę z powrotem do butli nie przekraczając poziomu powyżej końca skali.

IV. OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Dla każdego pomiaru obliczyć średnią wartość $h = (h_1 + h_2)/2$ oraz szybkość wypływu V/t . Wartości te umieścić w tabeli pomiarów.
2. Sporządzić wykres wydajności strumienia V/t od wysokości poziomu h .
3. Do punktów na wykresie dopasować prostą regresji. Obliczyć jej nachylenie a oraz jego niepewność standardową $u(a)$ (patrz: Instrukcja ONP, rozdz. 4.1.1).
4. Wykorzystując wzór Poiseuille'a obliczyć średnią wartość współczynnika lepkości powietrza $\eta = c/a$, (...) gdzie: $c = \pi r^4 \rho g / 8l$. Skorzystać z danych:

$$r = 0,35 \text{ mm}$$

$$\rho = 1,0 \text{ g cm}^{-3}$$

$$l = 10,0 \text{ cm}$$

Wszystkie wartości wyrazić w jednostkach układu SI.

5. Obliczyć złożoną niepewność standardową $u_c(\eta)$ średniego współczynnika lepkości powietrza. Skorzystać z prawa przenoszenia niepewności (patrz: Instrukcja ONP, wzór 15).

V. LITERATURA

- [1]. Sz. Szczeniowski: „Fizyka Doświadczalna”, tom 2
 [2]. S. Frisz i A. Timoriewa - „Kurs Fizyki”, tom 1
 [3]. I. W. Sawieliew, „Kurs Fizyki”, tom 1
 [4]. T. Dryński - „Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki”
 [5]. H. Szydłowski - „Pracownia Fizyczna”

VI. ZAGADNIENIA DO KOŁOKWIUM

Mechanizm tarcia wewnętrznego w cieczach i gazach, definicja współczynnika lepkości i jego jednostki w układzie SI, opis ruchu laminarnego, wzór Poiseuille'a, stosowana metoda wyznaczania współczynnika lepkości powietrza.