



## Lepkość cieczy – jak zmierzyć współczynnik lepkości

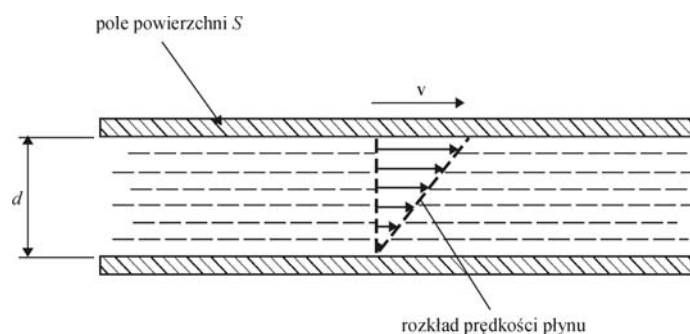
Andrzej Zięba

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH

Spróbujmy zamieszać łyżką w słoiku miodu. Wyraźnie odczuwamy opór, tym większy, im szybciej usiłujemy poruszać łyżką. Zjawisko to jest pod pewnymi względami podobne do siły tarcia między dwiema powierzchniami ciał stałych, i bywa nawet nazywane „tarciem wewnętrznym”. W analogii do zwykłego tarcia, siła oporu lepkiego ma kierunek przeciwny do kierunku ruchu łyżki. Również w obu przypadkach energia mechaniczna zamienia się na ciepło. Poza tym własności siły oporu lepkiego są inne.

Z „kuchennego” doświadczenia wiemy, że zastępując miód olejem jadalnym, a następnie wodą, zaobserwujemy sukcesywne zmniejszenie siły oporu. W analogii do współczynnika tarcia domyślamy się, że istnieje współczynnik, charakteryzujący zdolność cieczy do wytwarzania siły oporu lepkiego. Jest nim *współczynnik lepkości*. Oprócz cieczy, współczynnik lepkości może być określony również dla gazów, dlatego od tego miejsca termin „ciecz” zastępujemy terminem „płyn”, obejmującym zarówno ciecze jak i gazy.

Łyżka w garnku jest układem o skomplikowanej geometrii. By precyzyjnie zdefiniować współczynnik lepkości, trzeba wytworzyć siłę oporu lepkiego w układzie możliwie prostym. Rysunek 1 przedstawia taki układ, złożony z dwu płyt o powierzchni  $S$ , oddalonych na odległość  $d$ , między którymi znajduje się nasz płyn. Umówmy się, że płyta dolna jest nieruchoma, a górna porusza się z prędkością  $v$ . Ponieważ ciecz przykleja się do powierzchni ciała stałego, jej prędkość przy powierzchni dolnej jest zerowa, przy płycie górnej równa  $v$ . Pomiedzy płytami, wartość wektora prędkości zmienia się liniowo (rys. 1), tak że kolejne warstwy „ślizgają się” po sobie, co uzasadnia nazwę „tarcie wewnętrzne”.



Rys. 1. Rysunek pomocniczy do definicji współczynnika lepkości (wg [1])

By podtrzymać ruch, potrzebna jest siła  $F$ . Jest ona proporcjonalna do powierzchni  $S$  oraz prędkości  $v$ , zaś odwrotnie proporcjonalna do odległości między płytami  $d$  (i nie zależy od materiału płyt). Współczynnikiem proporcjonalności w wyrażającym te zależności wzorze

$$F = \eta \frac{S v}{d} \quad (1)$$

jest współczynnik lepkości  $\eta$ . Jego wartość zależy od rodzaju cieczy oraz od jej temperatury.

Tabela 1 podaje wartość  $\eta$  dla różnych płynów. Dla cieczy wartość  $\eta$  silnie rośnie w funkcji temperatury. Wyzwaniem dla producentów olejów silnikowych jest wyprodukowanie oleju, którego współczynnik lepkości jak najslabiej zależy od temperatury – by nie stosować, jak dawniej, osobnego oleju „letniego” i „zimowego”. W przypadku gazów jest odwrotnie – ich lepkość rośnie proporcjonalnie do temperatury. Najbardziej osobliwym płynem jest ciekły hel: jako jedyna substancja pozostaje cieczą aż do temperatury zera bezwzględnego, i w tych najniższych temperaturach wykazuje zjawisko nadciekłości, czyli zupełnego zniknięcia sił hamujących przepływ cieczy.

Tabela 1. Wartości współczynnika lepkości dla wybranych gazów i cieczy (wg [2])

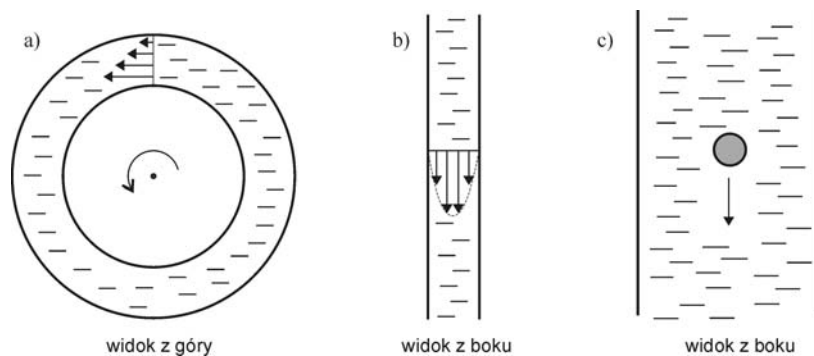
Substancja	$\eta$ [ $10^{-3}$ Pa·s]
Powietrze	0,0185
Argon	0,0226
Ciekły azot (70 K)	0,2039
Aceton	0,3040
Woda (0°C)	1,793
Woda (25°C)	0,8905
Woda (100°C)	0,2818
Oliwa z oliwek	84

Jak zmierzyć współczynnik lepkości? Układ pokazany na rysunku 1 niezbyt się do tego nadaje. Uważny czytelnik spostrzeże, że przesuwanie się płytki spowoduje spiętrzenie płynu przed płytką, zaburzające wyidealizowany obraz przepływu. Poniżej przedstawimy trzy metody, które mogą być realnie użyte do pomiaru współczynnika lepkości.

#### (a) współśrodkowe cylindry

Aby uniknąć kłopotu związanego z brzegami płyt, „zwińmy” je do postaci dwu cylindrów, między które wlewamy badaną ciecz (rys. 2a). Miarą współ-

czynnika lepkości jest moment siły, jaki powstanie w cylindrze środkowym, obracanym z określoną prędkością.



Rys. 2. Wybrane metody pomiaru współczynnika lepkości – strzałki ilustrują wektory prędkości cieczy (rys. a i b) i kulki w cieczy (rys. c)

#### (b) przepływ przez rurkę (kapilarę)

Wyobraźmy sobie przepływ cieczy przez rurkę (rys. 2b) pod wpływem różnicy ciśnień między jej końcami. Prędkość cieczy jest największa na osi rury i maleje do zera przy ściankach. Wyprowadzenie wymagające użycia rachunku różniczkowego pokaże, że objętość  $Q$  cieczy wypływającej z rurki w ciągu sekundy jest proporcjonalna do różnicy ciśnień  $\Delta p$  oraz czwartej potęgi jej promienia  $r$ , zaś odwrotnie proporcjonalna do długości rurki  $l$  i współczynnika lepkości  $\eta$ ,

$$Q = \frac{\pi}{8} \frac{\Delta p r^4}{\eta l} \quad (2)$$

Przepływ cieczy  $Q$  wyznaczamy przez pomiar objętości lub masy cieczy, jaka wypłynie z rurki w określonym czasie. Różnicę ciśnień realizuje się najczęściej jako ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy. Metoda nadaje się do pomiaru lepkości tak cieczy, jak i gazów.

#### (c) metoda spadania kulki

Obliczenie siły oporu lepkiego, jakiego doznaje kula poruszająca się w cieczy lepkiej jest jeszcze trudniejsze, niż dla przypadku przepływu cieczy przez rurkę. Zagadnienie to rozwiązał matematyk brytyjski Stokes, podając wzór na siłę oporu lepkiego

$$F = 6\pi \eta r v \quad (3)$$

gdzie  $r$  jest promieniem kuli, a  $v$  – jej prędkością. Pomiar polega na wyznaczeniu szybkości spadania kulki w cylindrze wypełnionym badaną cieczą (rys. 2c).

Szybkość ta zależy od równowagi trzech sił działających na kulkę: grawitacji, siły oporu lepkiego i siły wyporu Archimedesesa. Ciekawą modyfikacją metody jest wykorzystanie w charakterze kulki banieczek powietrza, poruszających się w cieczy do góry. Wadą metody jest relatywnie duża objętość cieczy niezbędnej do wykonania pomiaru i możliwość zastosowania jej tylko do cieczy o dość dużej lepkości. Opisane trzy metody realizowane są w pracowniach fizycznych [1], [3].

Pomiar lepkości cieczy ma znaczenie dla wielu dziedzin gospodarki. Wykonywany jest przy pomocy przyrządów zwanych lepkościomierzami. (Dawna nazwa viskozymetr jest coraz rzadziej używana). Ze względu na silną zależność lepkości od temperatury, wiele przyrządów wyposażonych jest w termostat do regulacji temperatury.

Na rynku oferowana jest mnogość lepkościomierzy, o zaskakująco różnych zasadach działania [4]. Wszystkie trzy opisane sposoby pomiaru współczynnika lepkości mają swoje odpowiedniki w postaci profesjonalnych przyrządów. Omówmy jeszcze kilka innych zasad konstrukcji lepkościomierzy. Bodaj najprostszym jest odpowiednio zbudowany lejek, lepkość wyznacza się na podstawie czasu wypływu nalanej doń cieczy. Do bardziej wyrafinowanych należy przyrząd wykorzystujący ruchy tłoczka w cylindrze wypełnionym badaną cieczą, przy czym poruszanie tłoczkiem realizowane jest przy pomocy pola magnetycznego. Ciągły pomiar lepkości płynu przepływającego przez rurociąg umożliwia przyrząd wykorzystujący tłumienie drgań odpowiedniego elementu zanurzonego w cieczy. Przypomnijmy w tym miejscu, że właśnie metoda pomiaru szybkości tłumienia powolnych drgań płytki była wykorzystana przez prof. Mięśowicza do badania lepkości ciekłych kryształów [5].

#### Literatura:

- [1] A. Zięba, *Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki*, cz. 1, skrypt AGH nr SU 1608, Kraków 1999.
- [2] *Tablice Fizyczno-Astronomiczne*, opr. W. Mizerski i W. Nowaczek, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 1995.
- [3] H. Szydłowski, *Pracownia Fizyczna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994
- [4] Informacje z www, słowo kluczowe „lepkościomierz”.
- [5] J. Janik, *Ciekłe kryształy*, *Foton 94*, Jesień 2006, s. 4.