

Wyznaczanie gęstości i lepkości cieczy

A. Wyznaczanie gęstości cieczy

Obowiązkowa znajomość zagadnień

Definicje gęstości bezwzględnej (od czego zależy), względnej, objętości właściwej, ciężaru objętościowego. Wyznaczanie gęstości metodą naczyń połączonych.

Zadania do wykonania

- I. Poznanie podstaw teoretycznych przeprowadzanego doświadczenia.
- II. Wykonanie pomiarów wysokości słupów cieczy z wykorzystaniem metody naczyń połączonych.
- III. Zestawienie wyników i obliczenie gęstości badanych cieczy.

Wiadomości wprowadzające

Gęstość (bezwzględna), inaczej zwana **masą właściwą** oznaczamy ρ lub d [kg/m^3 , g/ml] – stosunek masy ciała do jego objętości:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Gęstość substancji zależy od ciśnienia i temperatury; zazwyczaj jest podawana w tablicach pod ciśnieniem 1013hPa (1 atm) i w określonej temperaturze np.: 0°C; 18°C; 20°C; 25°C.

Objętość właściwa v [m^3/kg , cm^3/g] to odwrotność gęstości:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}$$

Gęstość względna stosunek gęstości bezwzględnej danego ciała do gęstości bezwzględnej substancji przyjętej jako wzorzec. Dla ciał stałych i cieczy podaje się zazwyczaj gęstość względną substancji danej w temperaturze **T** pod ciśnieniem **1013hPa**, względem wody o temperaturze **4°C**, natomiast dla gazów – względem powietrza w tych samych warunkach ciśnienia i temperatury.

Ciężar właściwy (bezwzględny) γ [N/m^3] jest to stosunek ciężaru ciała Q do jego objętości V :

$$\gamma = \frac{Q}{V}$$

Wyznaczanie gęstości względnej metodą naczyń połączonych

Ciśnienie wywarne przez słup cieczy na podstawie nie zależy od kształtu naczynia, jeżeli można pominąć napięcie powierzchniowe. Ciśnienie to zależy jedynie od gęstości i od wysokości słupa cieczy.

Ciśnienie p wywarne przez słup cieczy o wysokości h i gęstości ρ wynosi:

$$p = h \cdot \rho \cdot g \quad (1)$$

gdzie g – jest przyspieszeniem ziemskim.

Jeżeli dwa słupy cieczy wywierają na podstawę jednakowe ciśnienie, spełniona jest równość:

$$p_1 = p_2 \quad (2)$$

zatem

$$h_1 \cdot \rho_1 \cdot g = h_2 \cdot \rho_2 \cdot g \quad (3)$$

a stosunek gęstości wynosi więc:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1} \quad (4)$$

Jak widać jest on równy odwrotności stosunku wysokości tych słupów.

Jeżeli jedną z cieczy jest woda o gęstości ρ_2 (w obliczeniach przyjmując gęstość wody równą 1g/cm^3), i wysokości słupa h_2 , gęstość względna drugiej cieczy ρ_1 o wysokości słupa h_1 wynosi:

$$\rho_1 = \rho_2 \frac{h_2}{h_1} \quad (5)$$

Wykonanie ćwiczenia i opracowanie wyników

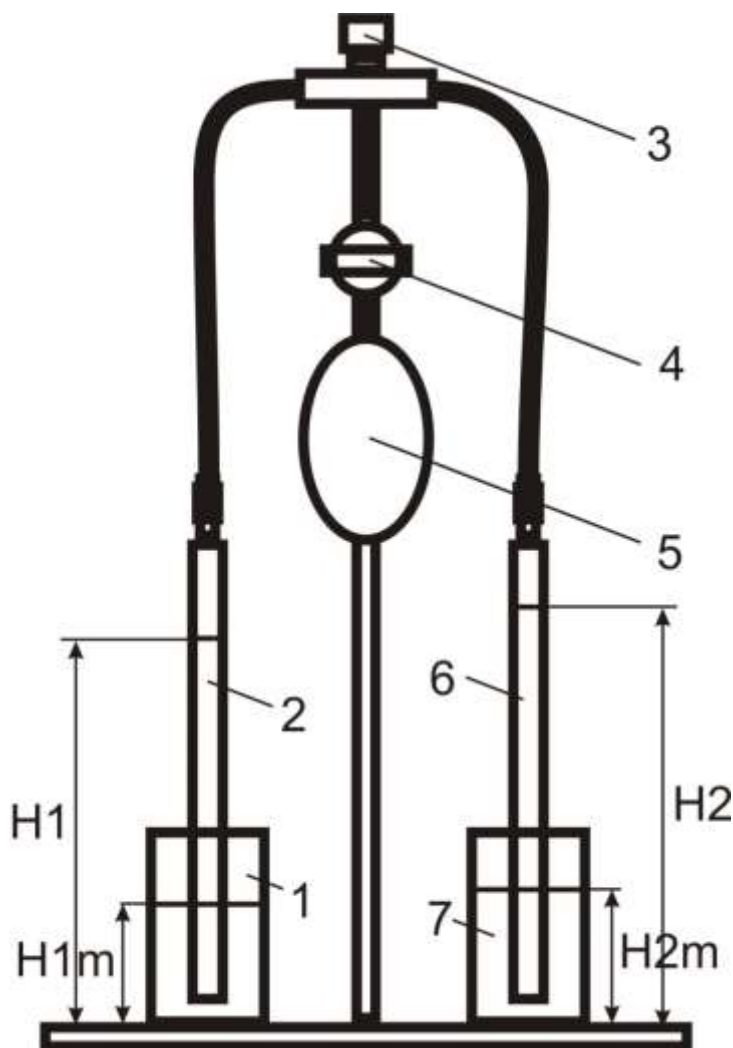
1. Dokonać pomiaru gęstości trzech nieznanymi cieczy wskazanych przez prowadzącego. Gęstość cieczy wzorcowej (wody destylowanej) wynosi $\rho_2 = 1\text{g/cm}^3$.
2. Dla każdej z cieczy przy pomocy aparatu z rysunku 1 wykonać po 3 pomiary.

Układ składa się z dwóch menzurek 1 i 7 (rys.1) w jednej, z nich znajduje się ciecz o znanej gęstości, a w drugiej ciecz o gęstości, która trzeba wyznaczyć.

W celu wykonanie pomiaru należy:

- podstawić menzurki 1 i 7 pod pipety 2 i 6;
- zanurzyć pipety w cieczach poprzez odkręcenie śruby uchwytu, który je trzyma;
- zakręcić zawór wpuszczania powietrza 3;
- wypompować powietrze z układu gruszką 5;

- odkręcić zawór podciśnienia 4 do momentu aż ciecze podniosą się, przy czym należy dążyć do tego aby ich poziom znajdował się w górnej części skal na pipetach;
- odczekać aż poziom obu cieczy się ustabilizuje (przestanie podnosić);
- zmierzyć poziom cieczy w menzurkach ($H1m$, $H2m$) oraz w pipetach ($H1$, $H2$), pomiary dokonać przy miarce liniowej (patrz rys.1).



Rys. 1. Schemat aparatu do wyznaczenia gęstości cieczy.

*1 i 7 menzurki z cieczami, 2 i 6 wyskalowane rurki szklane do odczytu poziomów cieczy,
3 zawór do wpuszczania powietrza, 4 zawór odcinający zasysania powietrza,
5 gruszka wytwarzająca podciśnienie.*

***$H1m$** poziom cieczy 1 w menzurce 1, **$H1$** poziom cieczy 1 po wyssaniu powietrza w rurce 2,*

***$H2m$** poziom cieczy menzurce 6, **$H2$** poziom cieczy 2 po wyssaniu powietrza w rurce 6.*

3. Uzyskane wyniki przedstawić w sprawozdaniu w tabeli przedstawionej poniżej (tabela 1).
4. Obliczyć gęstości badanych cieczy ze wzoru (5), a następnie policzyć średnie arytmetyczne gęstości.

Tabela 1. Tabela do sprawozdania

Ciecz	Pomiar	Wysokość cieczy w menzurce H1m [cm]	Wysokość cieczy w pipecie H1 [cm]	Wysokość cieczy w menzurce H2m [cm]	Wysokość cieczy w pipecie H2 [cm]	$h_1 = H1 - H1m$ [m]	$h_2 = H2 - H2m$ [m]	Gęstość szukanej cieczy [kg/m ³]
I	1							
	2							
	3							
Średnia gęstość cieczy I								
II	1							
	2							
	3							
Średnia gęstość cieczy II								
III	1							
	2							
	3							
Średnia gęstość cieczy III								

DODATEK**Tabela 2. Gęstość wody w zakresie temperatur 0°C - 30°C**

Temperatura [°C]	Gęstość [kg/m ³]	Temperatura [°C]	Gęstość [kg/m ³]	Temperatura [°C]	Gęstość [kg/m ³]
0	999,841	19	998,405	25	997,044
10	999,700	20	998,203	26	996,783
15	999,099	21	997,992	27	996,512
16	998,943	22	997,770	28	996,232
17	998,774	23	997,538	29	995,944
18	998,595	24	997,296	30	995,646

Tabela 3. Średnia wartość gęstości niektórych paliw w temperaturze 15°C

Nazwa	Gęstość [g/cm ³]	Nazwa	Gęstość [g/cm ³]
Benzyna premium	0,720 - 0,760	Olej napędowy	0,825 - 0,840
Benzyna super	0,735 - 0,770	Alkohol metylowy	0,803
Nafta	0,780 - 0,790	Alkohol etylowy	0,794

B. Wyznaczanie bezwzględnego współczynnika lepkości

Obowiązkowa znajomość zagadnień

Prawo **Stokesa**, co to jest lepkość **wewnętrzna**, co to jest **współczynnik lepkości dynamicznej** i od czego zależy. Czego dotyczy poprawka **Ledeburga**. Co to jest liczba Reynoldsa, charakterystyka przepływu laminarnego i turbulentnego.

Zadania do wykonania

- I. Poznanie podstaw teoretycznych zjawiska lepkości.
- II. Wykonanie pomiarów czasu opadania kulki w cieczach o różnej lepkości.
- III. Zestawienie wyników i obliczenie lepkości badanych cieczy.

Wiadomości wprowadzające

Każde ciało poruszające się w cieczy czy gazie doznaje pewnej hamującej siły wskutek tego, że warstewki cieczy przylegające do ciała będącego w ruchu, pociągają za sobą coraz dalsze warstewki sąsiednie. Podobnie jak w przypadku przepływu cieczy przez rurki kapilarne mamy tu do czynienia z przesuwaniem się jednych warstewek cieczy względem drugich. Istnieje spadek prędkości cząsteczek cieczy w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu. Siła, która wywołuje ten spadek prędkości, ma swe źródło w przyciąganiu międzycząsteczkowym. Jest ona czynnikiem hamującym ruch, przypisujemy jej, zatem zwrot przeciwny do ruchu i nazywamy ją **tarciem wewnętrznym cieczy** albo **lepkością** – w odróżnieniu od **tarcia zewnętrznego**, z którym mamy do czynienia wówczas, gdy dwie powierzchnie różnych ciał poruszają się względem siebie.

Prawo **Stokesa**, według którego gładka kulka o promieniu r , poruszająca się w cieczy ze stałą prędkości v , doznaje oporu T skierowanego przeciwnie względem prędkości v , wyraża się wzorem:

$$T = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \text{ [N]} \quad (6)$$

Wielkość η jest niezależna od materiału kulki, zależy natomiast od rodzaju cieczy i bardzo silnie – od jej temperatury. Ruchy termiczne cząstek mają wpływ na siły oddziaływania międzycząsteczkowego. W cieczach wzrost prędkości ruchów termicznych osłabia te siły (η – maleje) w gazach sytuacja jest odwrotna, ze wzrostem temperatury współczynnik lepkości wzrasta, gdyż przy wzroście temperatury rosną prędkości cząsteczek.

Wielkość η jest stała dla danej cieczy i temperatury, nosi nazwę **współczynnika lepkości** lub **współczynnik lepkości dynamicznej**, mierzymy ją w układzie SI w jednostkach [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] dawniej zwanych **puazami P** od nazwiska, **Poiseuille**.

Ciecz ma lepkości jednego $\text{Pa} \cdot \text{s}$, gdy na przesuwanie powierzchni 1m^2 z jednostkowym spadkiem 1s potrzebna jest siła 1N .

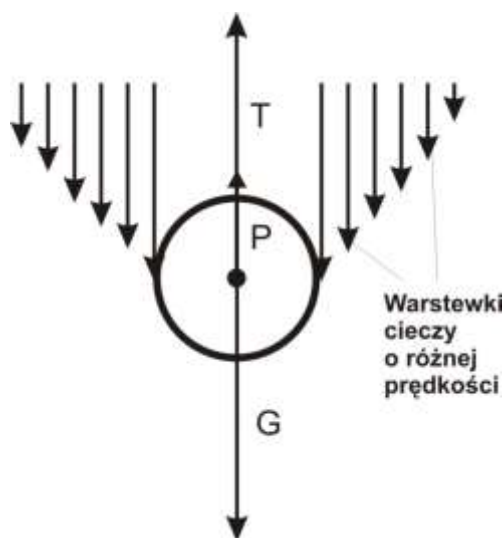
Woda o temp 20°C ma lepkość $10,02 \cdot 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}$, lub **0,01 Puaza**.

Współczynnik lepkości można wyznaczyć dla cieczy bardzo lepkich przez wyznaczeni prędkości spadania kulek w cieczy.

Niech m oznacza masę kuli, V jej objętość ($\frac{4}{3}\pi r^3$), ρ gęstość cieczy. Na kulkę działa w środowisku lepkiem trzy siły:

1. w kierunku pionowym w dół **siła ciężkości** – $G = m \cdot g$;
2. w kierunku pionowym do góry **siła parcia (wyporu)**, która zgodnie z prawem Archimedesesa wynosi – $P = \rho \cdot g \cdot V$;
3. opór środowiska wynikający z **prawa Stokesa** – $T = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$.

Początkowo siła ciężkości, G pomniejszona o siłę wyporu – P udziela kulce dość znacznego przyspieszenia. Równocześnie ze wzrostem prędkości rośnie również siła oporu T wynikająca z tarcia wewnętrznego cieczy i staje się w wkrótce (w cieczach lepkich) równa wypadkowej sile pierwszej.



Rys.1. Rozkład sił działających na kulkę opadającą w cieczy o nieznannej lepkości.

Od tej chwili kulka porusza się ku dołowi ze stałą prędkością v , a siły te równoważą się:

$$6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v - mg + V \cdot \rho \cdot g = 0 \quad (7)$$

Z równania tego można obliczyć współczynnik lepkości:

$$\eta = \frac{(m - \rho \cdot V) \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v} \quad (8)$$

Mając prędkość opadania kulki – v , promień kulki – r , jej masę – m oraz gęstość cieczy – ρ , można obliczyć współczynnik lepkości.

Prędkość opadania kulki v , jest równa drodze, na której to opadanie następuje S do czasu, w którym się odbywa t . Wzór (8) wówczas przyjmuje postać:

$$\eta = \frac{(m - \rho \cdot V) \cdot g \cdot t}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot S} \quad (9)$$

Równanie jest ściśle słuszne jedynie w zastosowaniu do cieczy nieskończenie rozciągliwych. Wzór ten stosuje się wówczas, gdy kulka spada w cieczy znajdującej się w naczyniu o tak dużych wymiarach, że można pominąć wpływ ścian na ruch kulki.

W warunkach laboratoryjnych, jeżeli kulka spada w cylindrze o promieniu R , wprowadzamy poprawkę na „wpływ ścian cylindra”.

Jeżeli kulka spada, w rurze cylindrycznej o promieniu R występujący wówczas wpływ ścianek zmniejsz prędkość spadanie o wartość ułamka:

$$\frac{1}{1 + 2,4 \frac{r}{R}} \quad (10)$$

Poprawka ta, zwana jest poprawką **Ledenburga**.

Po podstawieniu w równaniu (9) poprawki Ledenburga (10) otrzymujemy:

$$\eta = \frac{(m - \rho \cdot V) \cdot g \cdot t}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot S} \cdot \frac{1}{1 + 2,4 \frac{r}{R}} \quad (11)$$

Lepkość kinetyczna (kinematyczna) u – stosunek lepkości dynamicznej do gęstości danego płynu mierzonych w tej samej temperaturze. Dawniej stosowana powszechnie znana jednostka lepkości kinetycznej to **Stokes [St]**, obecnie zgodnie z układem SI m^2/s .

$$u = \frac{\eta}{\rho} \quad (12)$$

Lepkość względna η_{wz} stosunek lepkości dynamicznej płynu $\eta_{\text{płynu}}$ i substancji wzorcowej η_{wzorzec} (np. wody lub powietrza) mierzonych w tej samej temperaturze.

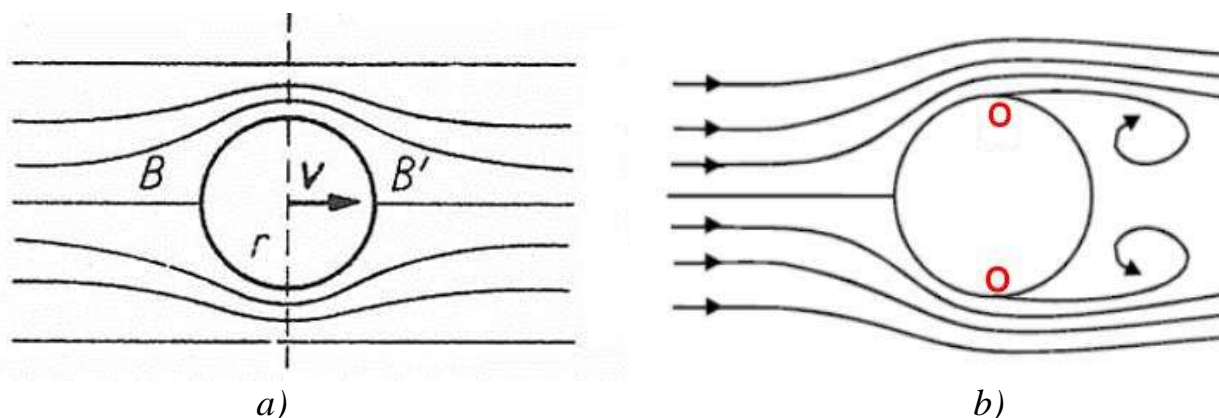
$$\eta_{wz} = \frac{\eta_{\text{płynu}}}{\eta_{\text{wzorzec}}} \quad (13)$$

Płynność φ to odwrotność lepkości dynamicznej.

$$\varphi = \frac{1}{\eta} \quad (14)$$

Rodzaje przepływu cieczy.

Przepływ cieczy w przewodach występuje w postaci **ruchu uwarstwowionego (laminarnego)** (rys.2) polegającego na spokojnym przesuwaniu się warstw cieczy po sobie, i **ruchu burzliwego (turbulentnego)** (rys.3), charakteryzującego się drobnymi drganiami poprzecznymi. Jeżeli średnia prędkość przepływu przekracza pewną wartość graniczną, zwaną prędkością krytyczną, przepływ uwarstwiony przechodzi w burzliwy.



Rys.2. a) Przepływ laminarny w lepkiej cieczy. b) Przepływ turbulentny w lepkiej cieczy.

Kryterium przejścia ruchu uwarstwowionego w burzliwy stanowi bezwymiarowa **liczba Reynoldsa**

$$Re = \frac{v_f \cdot D}{u}$$

Gdzie v_f prędkość strumienia cieczy, D – parametr określający wymiary ciała (np. średnica rury) u współczynnik lepkości kinetycznej.

Wartość krytyczna $Re_{kr} = 2000 - 2400$.

Wykonanie ćwiczenia i opracowanie wyników

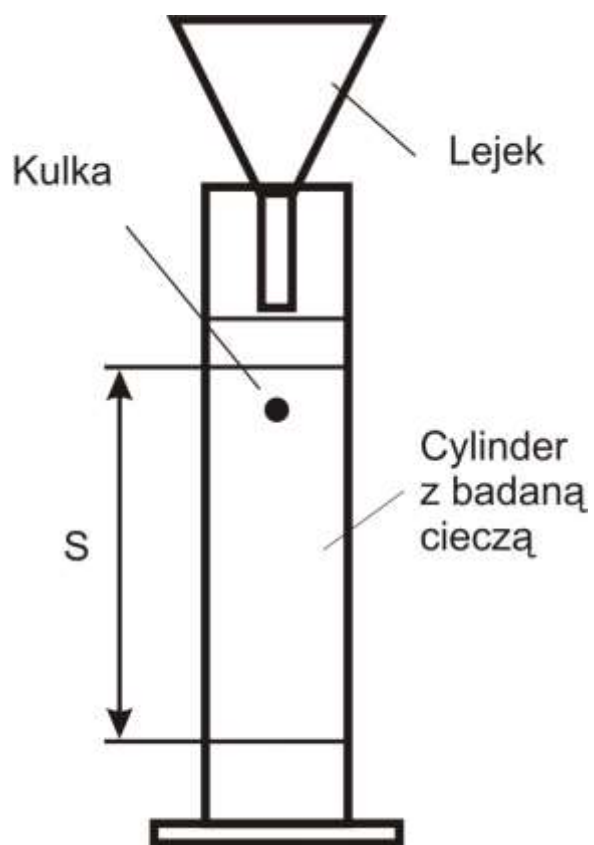
Badana ciecz wypełnia cylinder miarowy, do którego wrzucamy kulkę silikonową o średnicy $D = 26,10\text{mm}$ oraz masie $m = 11,8\text{g}$ i dokonujemy pomiaru czasu t opadania kulki, na wybranej drodze S (rys.3) (dla danej cieczy zawsze wybieramy tą samą drogę).

Dokonujemy po 3 pomiary (wrzucamy kulkę, a następnie ją wyciągamy) czasu opadania w każdym z trzech cylindrów.

Wyniki pomiarów notujemy zgodnie z tabelą 4, wyznaczmy średnie czasy opadania kulek w badanych cieczach. A następnie wyznaczmy współczynnik lepkości dynamicznej (11) oraz lepkości kinetycznej (12), lepkość względną (13) i płynność (14) badanych cieczy dla czasu średniego i zapisujemy w tabeli 5.

Wyprowadzić jednostki obliczonych wielkości!!!

Proszę pamiętać o zmierzeniu wewnętrznej średnicy cylindra R .



Rys.3. Schemat aparatury do wyznaczania lepkości dynamicznej

Tabela 4. Tabela do sprawozdania

Cylinder	Nr pomiaru	Droga opadania kulki S [m]	Czas opadania kuli t [s]
I	1		
	2		
	3		
Średni czas			
II	1		
	2		
	3		
Średni czas			
III	1		
	2		
	3		
Średni czas			

Tabela 5. Tabela do sprawozdania.

Cylinder	Średni czas [s]	Współczynnik lepkości dynamicznej η [Pa s]	Współczynnik lepkości kinetycznej u [m ² /s]	Lepkość względna η_{wz}	Płynność ϕ [1/Pa s]
I					
II					
III					

DODATEK**Tabela 5. Współczynnik lepkości dynamicznej wody do 75°C.**

Temperatura [°C]	Współczynnik lepkości dynamicznej $10^{-3} \cdot [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	Temperatura [°C]	Współczynnik lepkości dynamicznej $10^{-3} \cdot [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	Temperatura [°C]	Współczynnik lepkości dynamicznej $10^{-3} \cdot [\text{Pa} \cdot \text{s}]$
0	1,79	25	0,891	40	0,654
20	1,002	26	0,868	50	0,548
21	0,978	27	0,851	60	0,468
22	0,955	28	0,822	70	0,406
23	0,933	29	0,815	100	0,28
24	0,909	30	0,798	–	–

Tabela 6. Współczynniki lepkości kinematycznej niektórych cieczy.

Substancja	Temperatura [°C]	Współczynnik lepkości kinetycznej [mm ² /s]
Olej przekładniowy samochodowy Titanic	100	14,7
Olej przekładniowy samochodowy Hipol GL-5	100	27,5
Olej do sprężarek tłokowych	40	31 – 74

Tabela 7. Współczynniki lepkości dynamicznej niektórych cieczy.

Substancja	Temperatura [°C]	Współczynnik lepkości 10^3 [Pa·s]
Alkohol etylowy	25	1,07
Smoła	20	107
Rtęć	20	1,554
Gliceryna	25	0,934
Powietrze	0	0,017
Olej maszynowy	20	0,274
Olej cylindrowy	20	2,6
Terpentyna	20	0,00149
Olej parafinowy	18	0,1018
Olej rycynowy	25	0,6200
Olej przekładniowy samochodowy Titanic	–	85
Olej przekładniowy samochodowy Dipol GL-5	-12	150
Olej do sprężarek tłokowych	–	90