

MĚŘENÍ VIZKOZITY

ÚKOL MĚŘENÍ:

1. Zjistěte dynamickou viskozitu vzorku (směs glycerin - voda) v Höpplerově viskozimetru při teplotách 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C a 60 °C.
2. Z daných měření sestrojte graf funkční závislosti $\eta = f(T)$.
3. Sestrojte graf závislosti $\ln \eta$ na $\frac{1}{T}$ a z grafu určete konstanty A, B.
4. Pomocí rovnice regrese $\left(\ln \eta = A + \frac{B}{T} \right)$ a tabulky závislosti dynamické viskozity směsi glycerin - voda na koncentraci určete hmotnostní koncentraci glycerinu.
5. Zjistěte dynamickou viskozitu vzorku rotačním viskozimetrem při jedné teplotě v intervalu mezi 20 °C - 30 °C.
6. Porovnejte hodnotu viskozity pro teplotu, při které byla viskozita vzorku zjišťována na rotačním viskozimetru, s hodnotou viskozity pro tutéž teplotu získanou měřením v Höpplerově tělískovém viskozimetru.

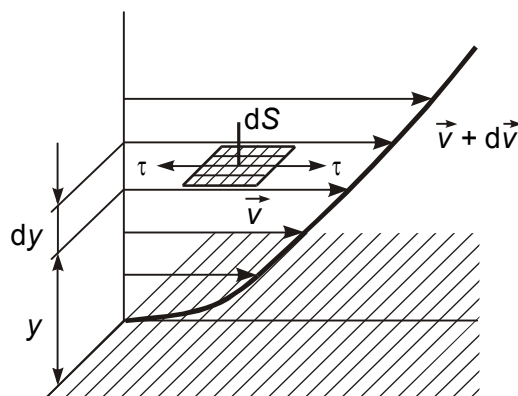
1. TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 Vnitřní tření kapalin. Viskozita

O ideální kapalině předpokládáme, že v ní neexistují tečná - tzv. smyková napětí. Pro reálnou kapalinu to platí pouze tehdy, jsou-li její jednotlivé části vůči sobě v klidu. Proudí-li reálná kapalina, tj. jsou-li její části v relativním pohybu a dvě po sobě se posouvající vrstvy kapaliny mají různou rychlost, dochází mezi nimi ke tření.

Třecí - tečná- síla a tím i tečné (smykové) napětí τ (podíl tečné síly a velikosti styčné plochy) jsou nenulové. Tečné napětí, které je kompenzováno proměnnou rychlostí kapaliny, je tím větší, čím více se mění rychlost od vrstvy k vrstvě. Změnu rychlosti, kterou bychom pozorovali při postupu od vrstvy k vrstvě kolmo ke směru proudění (obr. 1), můžeme charakterizovat podílem dv/dy - gradientem rychlosti ve směru kolmém k proudu. Při tzv. laminárním proudění, při němž probíhají proudová vlákna souběžně a kapalina se nepromíchává, je tečné napětí úměrné gradientu rychlosti:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} . \quad (1)$$



Obr. 1 Gradient rychlosti

Konstanta úměrnosti η se nazývá dynamická viskozita. Její jednotkou je $\text{N m}^{-2} \text{s} = \text{Pa s}$ - pascalsekunda. Podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny nazýváme kinematická viskozita ν

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} . \quad (2)$$

Jednotkou kinematické viskozity je $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

Vztah (1) vyslovil Newton, a proto se kapaliny, pro které je splněn, nazývají newtonské.

Viskozita kapalin závisí na teplotě a tlaku. S rostoucí teplotou klesá, s rostoucím tlakem vzrůstá. Vliv tlaku je však většinou zanedbatelný, kromě tlaků velmi vysokých. Závislost viskozity na teplotě při stálém tlaku můžeme popsat vztahem :

$$\eta = \exp\left(A + \frac{B}{T}\right), \quad (3)$$

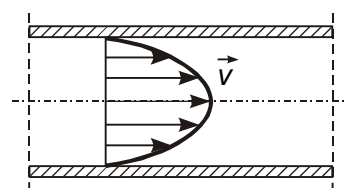
kde T je termodynamická teplota v K a A, B jsou empirické konstanty.

Ke stanovení viskozity využíváme závislosti mezi dynamickými a kinematickými veličinami, jimiž je charakterizováno proudění kapalin.

a) Poiseuilleův vztah

Proudí-li newtonská kapalina malou rychlostí úzkou trubicí, je rozložení vektoru rychlosti v osovému řezu parabolické (obr. 2) a proudění je laminární. Za těchto podmínek odvodil Poiseuille vztah mezi objemem V kapaliny (o dynamické viskozitě η) proteklým trubicí za čas t a úbytkem tlaku Δp na délce L trubice o poloměru R :

$$V = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{L} t .$$



Obr. 2 Laminární proudění (4)

Proudí-li kapalina hustoty ρ kapilárou délky L účinkem vlastního hydrostatického tlaku, lze tlakový úbytek Δp , odpovídající vnitřnímu tření v kapalině, určit z hydrostatického tlakového rozdílu $\rho h g$, zmenšeného o kinetickou energii objemové jednotky v ústí kapiláry, podle Bernoulliovy rovnice:

$$\Delta p = \rho h g - \frac{1}{2} \rho \bar{v}^2, \quad (5)$$

kde střední rychlost proudění je $\bar{v} = V / (\pi R^2 t)$. Z toho pak pro dynamickou viskozitu odvodíme vztah:

$$\eta = \rho \frac{\pi R^4}{8VL} h g t - \frac{\rho V}{16\pi L} \frac{1}{t} . \quad (6)$$

b) Stokesův vzorec

Při pohybu tělesa v kapalině klade kapalina jeho pohybu odpor, který je při pomalém proudění přímo úměrný rychlosti. Pro odpor, který klade kapalina o viskozitě η pohybu koule o poloměru r , odvodil Stokes z pohybové rovnice nestlačitelné kapaliny s vnitřním třením vztah

$$F = 6\pi\eta r v, \quad (7)$$

který platí pro nepřilíš velké rychlosti v pohybu koule, při nichž je obtékání laminární. Padá-li koule hustoty ρ_k v kapalině hustoty $\rho < \rho_k$, působí na ni tíhová síla * zmenšená o vztlak, tedy síla

$$F' = mg - V\rho g = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_k - \rho)g, \quad (8)$$

která ji z počátku zrychluje. Proti ní však působí síla odporu F tím větší, čím větší je rychlost v . Rychlost v bude teoreticky vzrůstat, až dosáhne jisté maximální hodnoty v_m , tzv. mezní rychlosti, při níž bude $F = F'$ a další pohyb koule bude rovnoměrný. Mezní rychlost je tedy dána podmínkou

$$6\pi\eta r v_m = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_k - \rho)g, \quad (9)$$

ze které můžeme vypočítat dynamickou viskozitu kapaliny

$$\eta = \frac{2}{9}g(\rho_k - \rho)\frac{r^2}{v_m}. \quad (10)$$

K měření viskozity byl sestaven velký počet přístrojů rozličných druhů, které nazýváme viskozimetry. Základní podmínkou měření všemi typy viskozimetrů je, že proudění kapaliny musí být laminární. Viskozimetry lze rozdělit na tři základní skupiny: výtokové, založené na vztahu (4) resp. (6), tělískové, založené na vztahu (10) a rotační, jimiž se určuje viskozita na základě odporu, který klade kapalina otáčivému pohybu vhodně volených těles.

1.2 Stanovení závislosti viskozity na teplotě

Ke stanovení teplotní závislosti viskozity musíme určit konstanty A a B ze vztahu (3). Zlogaritmujeme-li obě strany rovnice (3), je závislost $\ln \eta$ na proměnné $\frac{1}{T}$ lineární:

$$\ln \eta = A + \frac{B}{T}. \quad (11)$$

Experimentální body $\left(\frac{1}{T_i}, \ln \eta_i\right)$, $i = 1, 2, \dots, n$, můžeme vynést do grafu a proložit přímkou s ohledem na jejich rozptyl. Dosadíme-li pak libovolné dva body $\left(\frac{1}{T_1}, \ln \eta_1\right)$,

$\left(\frac{1}{T_{II}}, \ln \eta_{II}\right)$ odečtené z grafu do vztahu (12), můžeme určit konstanty A a B ze vztahů:

$$B = \frac{\ln \eta_1 - \ln \eta_{II}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_{II}}},$$

* Hofmann J., Urbanová M.: Fyzika I, Vydavatelství VŠCHT, Praha 1998, str. 147

$$A = \ln \eta_i - \frac{B}{T_i} = \ln \eta_{ii} - \frac{B}{T_{ii}}. \quad (12)$$

Protože počet měření bývá obvykle větší než počet stanovovaných konstant a vzhledem k chybám měření neexistuje taková jedna dvojice konstant A, B , aby pro všechny naměřené hodnoty bodů $\left(\frac{1}{T_i}, \ln \eta_i\right)$ platil přesně vztah (11), můžeme konstanty A, B s ohledem na rozptyl měření určit také metodou nejmenších čtverců (viz článek 2d, kapitola III), nebo skupinovou metodou (viz článek 2b, kapitola III).

2. PRINCIP METODY

2.1 Měření dynamické viskozity Höpplerovým viskozimetrem

Höpplerův viskozimetr je tělískový viskozimetr, viskozita je zjišťována Stokesovou metodou. Dynamická viskozita se určuje z rychlosti pohybu kuličky v měrné trubici, naplněné zkoumanou kapalinou. Trubice je obklopena válcovým pláštěm, kterým protéká temperační kapalina (většinou voda), udržovaná na požadované teplotě pomocí Höpplerova termostatu. Měrná trubice je odkloněna od svislé osy o 10° a opatřena značkami, které slouží k zjištění rychlosti klesající kuličky. Při měření volíme takovou kuličku, aby její pohyb mezi značkami byl rovnoměrný. Na kuličku působí tři síly - tíhová síla F_G , vztlak F_1 a odpor prostředí F_2 (obr. 3).

Při uvážení jejich směrů a sklonu měrné trubice pro jejich složky ve směru pohybu platí:

$$F_G \cos \alpha - F_1 \cos \alpha - F_2 = 0.$$

Tíhová síla je $F_G = m g = \rho_k V g$, vztlačková síla $F_1 = V \rho g$ a odpor prostředí podle Stokesova zákona (7):

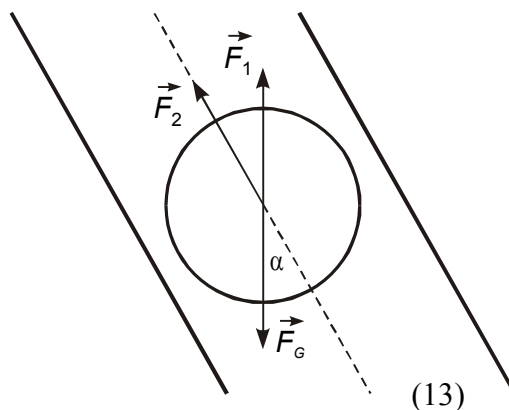
$$F_2 = 6 \pi \eta r v. \quad (14)$$

Dosažením a úpravou dostaneme pro dynamickou viskozitu

$$\eta = \frac{V g (\rho_k - \rho) \cos \alpha}{6 \pi r v} = K (\rho_k - \rho) t, \quad (15)$$

kde je:

- ρ_k - hustota kuličky,
- ρ - hustota zkoumané kapaliny,
- r - poloměr kuličky,
- s - vzdálenost značek na měrné trubici,
- t - doba pohybu kuličky mezi značkami,
- K - konstanta kuličky pro danou vzdálenost s a poloměr kuličky r ,
- $v = \frac{s}{t}$ - rychlost pohybu kuličky v kapalině.



Obr. 3 Síly působící na kuličku v Höpplerově viskozimetru

2.2 Höpplerův termostat

Termostat je určen k regulaci a nastavení stálé teploty. Termostaty dělíme na kapalinové, kovové a vzduchové podle prostředí, které je v nich temperováno. Nejčastěji je používán kapalinový termostat, který lze použít v rozsahu od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V laboratoři se používá průmyslově vyráběný Höpplerův termostat. Temperující lázeň je promíchávána čerpadlem a zahřívána topným tělesem. Elektrický proud tekoucí topným tělesem je zapínán a vypínán regulačním obvodem.

Pomocí kontaktního teploměru nastavíme požadovanou teplotu temperující kapaliny a její přesnou hodnotu odečítáme na vsunutém teploměru. Ve víku termostatu je umístěn přívod chladicí vody - nejčastěji se připojuje k vodovodnímu kohoutku. Stálost teploty temperující lázně je u Höpplerova termostatu $\pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ve víku termostatu jsou dále dva vývody, kterými lze k termostatu připojit další přístroj nebo zařízení, ve kterých chceme udržovat požadovanou teplotu nastavenou na termostatu.

2.3 Měření viskozity rotačním viskozimetrem RC 1

Rotační viskozimetr určuje viskozitu ze silových účinků, kterými na sebe působí dvě válcové plochy (jedna v klidu – V_2 , druhá rotující – V_1), mezi kterými je zkoumaná kapalina. Celý měrný systém je umístěn v temperované nádobce T. Schéma rotačního viskozimetru je na obr. 4.

Pokud je vnější válec V_1 uveden do rotačního pohybu stálou úhlovou rychlostí ω , je cylindrická vrstva měřené kapaliny o poloměru r a výšce h - za předpokladu že rychlost rotace je nízká - namáhána točivým momentem M .

Prostřednictvím kapaliny působí na vnitřní válec V_2 moment síly M .

$$M(r) = \tau \cdot 2\pi r h \cdot r \quad (16)$$

Smykové napětí τ lze vyjádřit pomocí měřeného točivého momentu:

$$\tau(r) = \frac{M}{2\pi r^2 h} \quad (17)$$

Rychlostní gradient D kapaliny je v tomto případě

$$D(r) = r \frac{d\omega}{dr} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (18)$$

kde ω je úhlová rychlost otáčení.

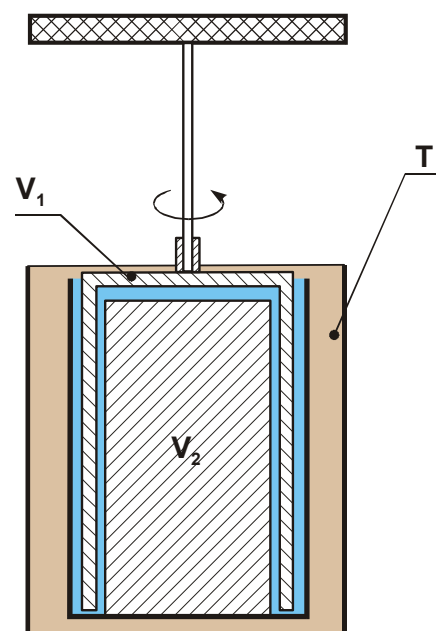
Vložíme-li - pro Newtonské kapaliny - rovnici (18) a (17) do rovnice (16) a integrujeme pro okrajové podmínky:

$$\omega = 0 \text{ pro } r = R_1$$

$$\omega = f \text{ pro } r = R_2, \quad (R_1 \text{ a } R_2 \text{ jsou poloměry obou válců}),$$

získáme poměr mezi měřeným točivým momentem a úhlovou rychlostí:

$$M = \frac{4\pi R_1^2 R_2^2 h}{R_2^2 - R_1^2} f \eta = C f \eta, \quad (19)$$



Obr.4 Rotační viskozimetr

kde C je empirická konstanta přístroje a f frekvence otáčení.

Pokud je provedena korekce pro okrajové jevy, stává se C empirickou konstantou. Je běžné užívat průměrné smykové napětí, které se získá z geometrické τ_g nebo aritmetické τ_a střední hodnoty smykového napětí působícího u povrchu obou válců.

$$\tau_a = M \frac{R_1^2 + R_2^2}{4\pi h R_1^2 R_2^2} \quad \tau_g = M \frac{1}{2\pi R_1 R_2 h} \quad (20)$$

Gradient rychlosti D získáme z výše uvedených vztahů po dosazení z rovnice (19)

$$D_a = f \frac{R_1^2 + R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad D_g = f \frac{2R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (21)$$

3. POSTUP MĚŘENÍ

3.1 Měrnou trubici Höpplerova viskozimetru uzavřeme dole zátkou a šroubovým uzávěrem, naplníme zkoumanou kapalinou asi 2,5 cm pod okraj a opatrně vpustíme pomocí pinzety skleněnou kuličku. Nahoře se do měrné trubice vloží kovová zátká s otvorem na výtok přebytečné kapaliny a trubice se uzavře těsněním a šroubovým uzávěrem. Ve zkoumané kapalině nesmí být bublinky. Pokud se v kapalině vyskytují vzduchové bublinky pod kuličkou, uvolníme je rychlým stlačením kuličky skleněnou tyčinkou. Měření času provádíme přesnými stopkami. Jednotlivá měření by se neměla lišit od střední hodnoty více než o 0,3 %.

Dynamickou viskozitu stanovíme podle vztahu (15):

$$\eta = K (\rho_k - \rho) t .$$

Hodnoty K , ρ_k a ρ jsou uvedeny v laboratoři.

3.2 Změřte viskozitu vzorku rotačním viskozimetrem při laboratorní teplotě a porovnejte s viskozitou zjištěnou Höpplerovým viskozimetrem pro tutéž teplotu. (V případě potřeby použijte lineární interpolaci).

4. POKYNY K ÚLOZE

A. Höpplerův viskozimetr

1. Propláchněte měrnou trubici viskozimetru destilovanou vodou a zkoumanou kapalinou.
2. Zkontrolujte připojení Höpplerova viskozimetru na Höpplerův termostat.
3. Naplňte viskozimetr zkoumanou kapalinou.
4. Nastavte stojan viskozimetru do vodorovné polohy pomocí vestavěné libely.
5. Zkontrolujte, zda je v Höpplerově termostatu dostatek vody, nastavte na kontaktním teploměru požadovanou teplotu a zapněte čerpadlo a topení termostatu..
6. Když vodní lázeň termostatu dosáhne nastavené teploty, zhasne kontrolní žárovka topení termostatu. Vyrovnání teploty zkoumané kapaliny v měrné trubici s teplotou vody z termostatu trvá několik minut, proto pro dosažení požadované teploty ve viskozimetru nechte kuličku několikrát projít měrnou trubicí – dojde k rychlejšímu vyrovnání teplot. Přesnou teplotu v temperačním plášti zjistíte na teploměru zašroubovaném v plášti viskozimetru.

7. Čas pohybu kuličky mezi vzdálenějšími ryskami měřte pětkrát. Pro výpočet viskozity používejte střední hodnoty z těchto měření.
8. Po ukončení měření termostat vypněte a náplň termostatu ochlaďte připojením na vodu.
9. Odšroubujte spodní uzávěr a vypusťte kuličku do zachycovače. Měrnou trubici a kuličku vyčistěte rozpouštědlem, opláchněte destilovanou vodou a vysušte jelenicí. Čištění je nutné provádět opatrně, aby nedošlo k poškození měrné trubice a kuličky.
10. Hustoty zkoumaných kapalin při teplotách 25 °C a 50 °C jsou vyvěšeny v laboratoři. Hustoty při ostatních teplotách stanovte lineární interpolací. Po skončení měření odšroubujeme spodní uzávěr a vypustíme kuličku do zachycovače. Měrnou trubici a kuličku vyčistíme rozpouštědlem a vysušíme. Čištění je nutné provádět opatrně, aby nedošlo k poškození měrné trubice a kuličky

B. Rotační viskozimetr

Podrobný postup pro měření na rotačním viskozimetru je uveden v laboratoři.

5. PŘESNOST MĚŘENÍ

Dynamicickou viskozitu vzorku počítáme na základě nepřímého měření ze vztahu (15), kde konstantu kuličky a zadané hodnoty hustoty kuličky a zkoumané kapaliny budeme považovat za přesné, takže nejistota zjištěné viskozity bude dána pouze nejistotou času

$$u_{\eta} = K(\rho_k - \rho)u_t, \quad (22)$$

kde standardní nejistotu typu A určíme ze vztahů

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n(n-1)}}, \quad (23)$$

$$u_{A,t} = k_s \cdot \bar{s}, \quad (24)$$

kde pro pět měření je $k_s = 1,4$.

Standardní nejistotu typu B odhadneme z chyby stopek, která je 0,2 s.

$$u_{B,t} = \frac{\Delta z_{\max}}{\Theta} = \frac{0,2}{\sqrt{3}}. \quad (25)$$

Kombinovanou nejistotu určíme ze vztahu

$$u_t = \sqrt{u_{A,t}^2 + u_{B,t}^2}. \quad (26)$$

Poznámka:

K numerickému zpracování úlohy lze v laboratoři použít počítač.

Tabulka č.1

Závislost dynamicické viskozity směsi glycerin - voda na koncentraci

$\eta_{20^{\circ}\text{C}}\text{-Pa}\cdot\text{s}$	0,0018	0,0021	0,0025	0,0030	0,0038	0,006	0,011
$\eta_{30^{\circ}\text{C}}\text{-Pa}\cdot\text{s}$	0,0014	0,0016	0,0019	0,0022	0,0027	0,0042	0,0073
glycerin -%hm	20	25	30	35	40	50	60