

## Úloha č. 3 - Měření viskozity, hustoty a povrchového napětí kapalin

### 1 Teorie

#### 1.1 Viskozita kapalin

Dynamická viskozita  $\eta$  kapaliny je způsobena vnitřním třením mezi jednotlivými vrstvami kapaliny. Je mírou toho, jak se reálná kapalina brání tečení.

U newtonovských kapalin dynamická viskozita nezávisí na smykovém tření, ale závisí na teplotě a tlaku. Kinematická viskozita kapaliny  $\nu$  je definován vztahem  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ , kde  $\eta$  je její dynamická viskozita a  $\rho$  její hustota.

Dynamickou viskozitu měříme pomocí Mariottovy láhve, která svoji konstrukcí zaručuje konstantní tlakový rozdíl.

Dynamickou viskozitu pak spočteme pomocí Hagenovy-Poiseuillovy rovnice, přičemž proudění budeme považovat za čistě laminární, takto:

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

kde  $R$  je poloměr trubice,  $L$  její délka,  $p$  tlakový rozdíl mezi konci trubice a  $V$  objem kapaliny, která odtéče za čas  $t$ .

Tlakový rozdíl  $p = p_1 - p_2 = (p_{atm} + h \rho g) - p_{atm} = h \rho g$

Objem  $V$  spočteme ze vztahu  $V = \frac{m}{\rho}$ , kde  $m$  je hmotnost kapaliny, která odtéče za čas  $t$ .

Po dosazení:

$$\eta = \frac{\pi \rho g^2 R^4 h t}{8 m L}$$

Relativní nejistotu dynamické viskozity  $\eta$  dostaneme ze zákona přenosu nejistoty:

$$r(\eta) = \sqrt{16r(R)^2 + r(h)^2 + r(t)^2 + r(m)^2 + r(L)^2}$$

Kinematickou viskozitu měříme pomocí Ubbelohdeho viskozimetru, kterou pak spočteme ze vztahu:

$$\nu = K \cdot t$$

kde  $K$  je časová konstanta viskozimetru a  $t$  je čas, za který kapalina poklesne z risky 1 na risky 2.

Pro nejistotu pak platí vztah:  $u(\nu) = K \cdot u(t)$ .

#### 1.2 Hustota kapalin

Hustotu kapaliny měříme pyknometrickou metodou. Pyknometr je nádoba, která nám umožňuje odměřit stejné objemy různých kapalin.

Požadovanou hustotu  $\rho$  pak dostaneme ze vztahu:

$$\rho = (\rho_c - \rho_V) \frac{m - m_0}{m_c - m_0} + \rho_V$$

kde  $\rho_c$  je hustota známé kapaliny,  $\rho_V$  hustota vzduchu,  $m_0$  hmotnost prázdného piknometru,  $m$  hmotnost piknometru s měřenou kapalinou a  $m_c$  hmotnost piknometru s kapalinou známé hustoty.

Označíme-li  $m_1 = m - m_0$  a  $m_2 = m_c - m_0$ , pak platí  $u(m_1) = u(m) + u(m_0)$  a  $u(m_2) = u(m_c) + u(m_0)$ .

Pro nejistotu hustoty pak platí:

$$r(\rho) = \sqrt{r(m_1)^2 + r(m_2)^2}$$

### 1.3 Povrchové napětí

Povrchové napětí kapaliny je důsledkem kohézních sil uvnitř kapaliny.

Je definováno vztahem  $\sigma = \frac{F}{l}$ , kde  $F$  je síla působící v rovině povrchu kapaliny kolmo na délku  $l$  v povrchu kapaliny.

Povrchové napětí měříme du Noüyho metodou, při které předpokládáme, že povrchové napětí nezávisí na křivosti povrchu kapaliny, kapalina působí na ponořenou část tělesa pouze hydrostatickou silou a povrchovým napětím a kontaktní úhel mezi povrchem kapaliny a svislicí na rozhraní všech tří fází je roven nule.

Povrchové napětí pak spočítáme ze vztahu:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{2l}$$

kde  $F_{max}$  je maximální síla působící na kroužek a  $l$  obvod kroužku.

Relativní nejistotu povrchového napětí pak dostaneme ze vztahu:

$$r(\sigma) = \sqrt{r(F_{max})^2 + r(l)^2}$$

Příčemž relativní nejistotu maximální síly dostaneme po sečtení absolutních odchylek typu A a B:

$$r(F_{max})^2 = \frac{u_A(F_{max})^2 + u_B(F_{max})^2}{F_{max}^2}$$

## 2 Postup měření

Měření probíhalo za těchto podmínek:

teplota ... 23,5 °C

tlak ... 100,0 kPa

vlhkost ... 45 %

### 2.1 Mariottova láhev

Nejprve si z Mariottovy láhve opišeme údaje o  $R$  a  $L$ , změříme výškový rozdíl  $h$  jako rozdíl dvou výšek  $h_1$  a  $h_2$  a zvážíme prázdnou misku.

$$R = (0,570 \pm 0,001) \text{ mm}$$

$$L = (165,0 \pm 0,5) \text{ mm}$$

$$h_1 = (121,5 \pm 0,1) \text{ mm}$$

$$h_2 = (233,6 \pm 0,1) \text{ mm}$$

$$h = (112,1 \pm 0,2) \text{ mm}$$

$$m_0 = (58,458 \pm 0,001) \text{ g}$$

Nyní necháme po čas  $t$  vytékat kapalinu z láhve do misky, přičemž si zapíše čas  $t$  a zvážíme naplněnou misku.

Dopočítáme hmotnost kapaliny, která odtekla za čas  $t$ , její absolutní nejistota bude 0,002 g.

Nejistotu času nebudeme díky kapkovitému (tedy nespojitému) výtoku započítávat. Pro jednotlivá měření pak spočteme dynamickou viskozitu.

Naměřené hodnoty:

$m[\text{g}]$	$t[\text{s}]$
86,578	108
79,240	80
89,255	119
74,113	60
81,599	90

$$\eta_1 = (1,057 \pm 0,008) \cdot 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$$

$$\eta_2 = (1,060 \pm 0,008) \cdot 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$$

$$\eta_3 = (1,064 \pm 0,008) \cdot 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$$

$$\eta_4 = (1,055 \pm 0,008) \cdot 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$$

$$\eta_5 = (1,071 \pm 0,008) \cdot 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$$

## 2.2 Ubbelohdeho viskozimetr

Nejprve si zjistíme časovou konstantu viskozimetru  $K$ .

$$K = 1,063 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2\text{s}^{-2}$$

Pomocí balónku, který nasadíme na trubici B, nasajeme, za zakryté trubice A, kapalinu až nad rysku 1. Poté balónek i trubici A uvolníme a změříme čas  $t$ , za který hladina poklesne z rysky 1 na rysku 2.

$$t = 900 \text{ s}$$

Absolutní nejistotu času stanovíme opět dvojnásobek rakční doby, tedy asi 2 s.

$$\nu = (0,957 \pm 0,002) \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

Ze vztahu  $\eta = \nu \cdot \rho$  pak dopočítáme dynamickou viskozitu.

$$\eta = (0,955 \pm 0,002) \cdot 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$$

## 2.3 Pyknometrická metoda

Nejprve si zvážíme prázdný pyknometr, poté do něj nalijeme požadovanou kapalinu, v našem případě izopropylalkohol a líh, zvážíme i s ní, a poté do něj nalijeme vodu a opět zvážíme.

Absolutní nejistota jednotlivých hmotností je 0,001 g.

Hustotu vzduchu i vody určíme z tabulek.

$$\rho_c = 998,21 \text{ kgm}^{-3}$$

$$\rho_V = 1,29 \text{ kgm}^{-3}$$

$$m_0 = 24,984 \text{ g}$$

$$m_{ipa} = 65,330 \text{ g}$$

$$m_{lih} = 65,527 \text{ g}$$

$$m_c = 74,778 \text{ g}$$

Izopropylalkohol:  $\rho = (809,05 \pm 0,05) \text{ kgm}^{-3}$

Lih:  $\rho = (812,99 \pm 0,05) \text{ kgm}^{-3}$

## 2.4 Noüyho metoda

Z obalu platinového kroužku si přečteme údaj o jeho délce, podle jeho stavu odhadneme odchylku od uvedené hodnoty.

$$l = (60 \pm 1) \text{ mm}$$

Tento kroužek zavěsíme na podvěsné váhy, pod něj položíme nádobu s měřenou kapalinou. Zapneme logování v programu Tensionmeter, kroužek spustíme zcela do kapaliny a poté ho plynule vytáhneme. Nakonec odečteme maximální sílu.

Měření provedeme 10x pro každou z měřených kapalin.

Pro další výpočty pak uvážíme největší z naměřených sil a jako její nejistotu budeme brát pouze nejistotu vah,  $u_B(F_{max}) = 0,1 \text{ mN}$ , nikoliv statistickou nejistotu souboru.

$F_{max} [\text{mN}]$	
voda	líh
8,30	2,84
8,28	2,79
8,44	2,82
8,45	2,80
8,36	2,81
8,31	2,81
8,32	2,76
8,43	2,76
8,44	2,75
8,39	2,75

$$\sigma_{\text{voda}} = (70 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$$

$$\sigma_{\text{líh}} = (24 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$$

## 3 Závěr

Vidíme, že naše naměřené hodnoty dynamické viskozity jsou mírně větší, než tabulkové hodnoty, které jsou udávány pro teplotu  $20^\circ\text{C}$  na  $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$  a pro  $30^\circ\text{C}$  na  $0,798 \cdot 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$ . Dále vidíme, že nám vycházela velmi podobná hodnota dynamické viskozity pro nejrůznější časové intervaly, kolísání bude způsobeno různě velkými zbytkovými hmotnostmi vody, neboť mezi jednotlivými měřeními nebyla miska dokonale vysušena. Vzhledem k nespojitosti vytékání (kapání) vody nemá délka měření vliv na jeho nejistotu.

Naměřená hodnota kinematické viskozity je jen o málo větší než tabulková hodnota, která je pro místní teplotu  $23,5^\circ\text{C}$  udávána na  $0,935 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ .

Obě naměřené hodnoty hustot jsou asi o  $20 \text{ kgm}^{-3}$  vyšší, než jsou udávané tabulkové hodnoty pro  $20^\circ\text{C}$ , izopropylalkohol  $786 \text{ kgm}^{-3}$  a líh  $789 \text{ kgm}^{-3}$ . Tyto odchylky budou způsobeny zbytky lihu a izopropylalkoholu v pyknometru, které následně snížily hmotnost při naplnění vodou.

Naměřená hodnota povrchového napětí vody nám vyšla o málo menší, než je udávaná tabulková hodnota  $72,75; \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$ , zatímco u lihu o něco málo menší než  $22,55; \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$ . Zde bude původcem chyb ne úplně dokonalý stav platinového kroužku a také ignorování korekčního faktoru.