

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 1

Zpracoval: Lukáš Lejdar

Naměřeno: 16. dubna

Obor: F

Skupina: Út 16:00

Testováno:

Úloha č. 3:

Měření viskozity, hustoty a povrchového napětí kapalin

$T = 22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$

$p = 101,35\text{ kPa}$

$\varphi = 47,7\text{ }\%$

1. Úvod

Úloha je zaměřená na základní mechanické vlastnosti kapalin a metody jejich měření. Pokusím se ty nejdůležitější veličiny nejdřív krátce shrnout.

I v kapalině probíhá efekt podobný tření. Molekuly proudící blízko sebe spolu různě interagují a mají tendenci svoji rychlost srovnávat. Tento efekt popisuje Newtonův zákon pro laminárně proudící kapaliny zavedením **dynamické viskozity** η , jako konstantu přímé úměry

$$\tau = \eta \frac{dv_x}{dy}, \quad (1)$$

kde τ je smykové napětí mezi vrstvami kapaliny a $\frac{dv_x}{dy}$ je derivace rychlosti proudění kapaliny ve směru normály k rovině smykového napětí τ . S dynamickou viskozitou se často setkáme v podílu s hustotou kapaliny. Konvenčně tuto veličinu definujeme jako **Kinematickou viskozitu** ν

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

Další důležitou vlastností kapalin je tzv. **povrchové napětí** σ . Definujeme ho jako sílu působící v rovině povrchu kapaliny, kolmo na libovolnou délkovou jednotku v povrchu kapaliny, vztaženou na tuto délku.

$$\sigma = \frac{F}{L} \quad (3)$$

Podle Fowkese a van Osse et al. působí v povrchové vrstvě různé mezimolekulární síly, které aditivně přispívají k celkovému povrchovému napětí. Většinu z nich lze zahrnout do dvou větších kategorií acidobazických interakcí a Van der Walsových sil.

$$\sigma = \sigma^{\text{lw}} + \sigma^{\text{ab}} \quad (4)$$

2. Teorie

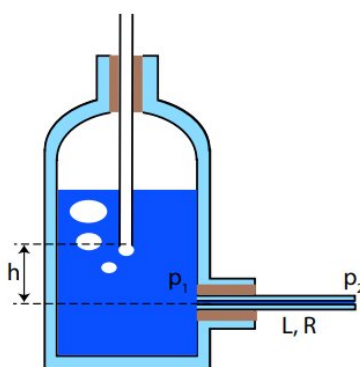
2.1. Absolutní měření viskozity kapalin

Pokud kapalina proudí v kapiláře laminárně, platí zjednodušený tvar Hagenovy – Poiseuillovy rovnice

$$\frac{dV}{dt} = v\pi R^2 = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\eta L} \quad (5)$$

kde Δp je tlakový spád mezi konci trubice, L délka trubice, R poloměr trubice a $\frac{dV}{dt}$ okamžitý průtokový objem. Mariottova láhev z obrázku 1 dokáže zajistit stálý tlakový spád, čímž se vztah dále zjednoduší na tvar

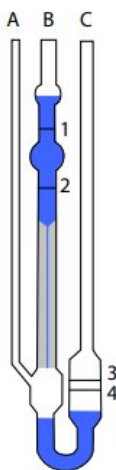
$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta p t}{8VL}. \quad (6)$$



Obrázek 1: Mariottova láhev s kapilárou pro absolutní měření viskozity.

2.2. Ubbelohdeho viskozimetr

Ubbelohdeho viskozimetr na obrázku 2 je právě připravený k měření. Na kapiláře se díky trubici A vytváří tlakový rozdíl $\Delta p = h(t)\rho g + p_{Atm} - p_{Atm}$ a kapalina z trubice B tak může protékat do spodních baněk. Pokud je proudění laminární, platí opět Poiseuillův vztah (4).



Obrázek 2: Ubbelohdeho kapilární viskozimetr

Uvažujme časový interval od momentu t_1 , kdy hladina v trubici B mívá rysku 1 do chvíle t_2 , kdy mívá rysku 2.

$$\eta \frac{dV}{dt} = \frac{\pi R^4}{8L} \Delta p \quad (7)$$

$$\eta A(h) dh = \frac{\pi R^4}{8L} h \rho g dt \quad (8)$$

$$\frac{\eta}{\rho} \int_{h_1}^{h_2} \frac{A(h)}{h} dh = \frac{\pi R^4}{8L} g \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (9)$$

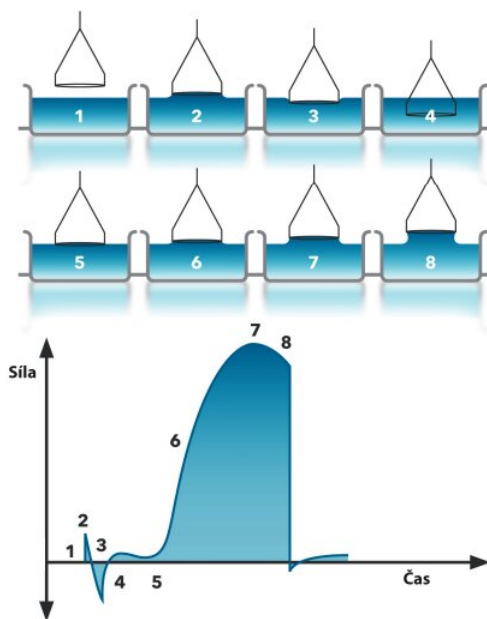
Všechny konstanty vystupující na pravé straně jsou nezávislé na vlastnostech měřené kapaliny, stejně jako Integrál na straně levé. Můžu psát

$$\nu = K(t_2 - t_1), \quad (10)$$

kde ν je kinematická viskozita, $t_2 - t_1$ čas za který odečte kapalina od rysky 1 k rysce 2 a K časová konstanta viskozimetru. Časovou konstantu je pro měření nejdřív potřeba zkalibrovat pomocí kapaliny se známou kinematickou viskozitou.

2.3. Měření povrchového napětí du Noüyho metodou

Du Noüyho metoda spočívá v měření síly působící podél obvodu ponořeného objektu. Na podviesné váhy pověsím železný kroužek, váhy vytáruji a pod kroužek položím misku s kapalinou na desku s vertikálním posuvem. Misku začnu pomalu zvedat, dokud se celý kroužek neponoří a pak ji zase pomalu vytahuji. Celý proces by měl probíhat jako na obrázku 3.



Obrázek 3: Závislost síly působící na kroužek při jeho ponoru a vytahování. Převzato z <http://www.attension.com>

Povrchové napětí bude odpovídat největší síle kterou dokázala kapalina působit na délku kroužku

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{4\pi R} \cdot f\left(\frac{R^3}{V}, \frac{R}{r}\right), \quad (11)$$

kde R je poloměr kroužku a $f\left(\frac{R^3}{V}, \frac{R}{r}\right)$ Harkinsův-Jordanův korekční faktor, který je tabelován pro bezrozměrné veličiny $\frac{R^3}{V}$ a $\frac{R}{r}$; $V = \frac{F_{\max}}{(\rho - \rho_v)g}$ a r je poloměr drátku.

2.4. Měření hustoty metodou ponorného tělíska

Tato metoda využívá Archimedova zákona pro měření hustoty kapaliny. Změříme vztlak působící na plně ponořené těleso v kapalině o známé hustotě a v kapalině s neznámou hustotou. Výslednou hodnotu získáme ze vztahu

$$\rho = \frac{m}{m_{\text{známé}}} \rho_{\text{známé}} \quad (12)$$

2.5. Měření hustoty pyknometrem

Pyknometr je skleněná nádoba, kterou lze naplnit velmi přesným, ale neznámým objemem kapaliny. Zvlášť zvážím hmotnost m prázdného pyknometru, hmotnost m_1 pyknometru naplněného kapalinou o neznámé hustotě ρ_1 a hmotnost m_2 pyknometru naplněného kapalinou o známé hustotě ρ_2 .

$$\rho_1 = (\rho_2 - \rho_{\text{vzduchu}}) \frac{m_1 - m}{m_2 - m} + \rho_{\text{vzduchu}} \quad (13)$$

2.6. Měření složek povrchového napětí metodou kontaktního úhlu přisedlé kapky

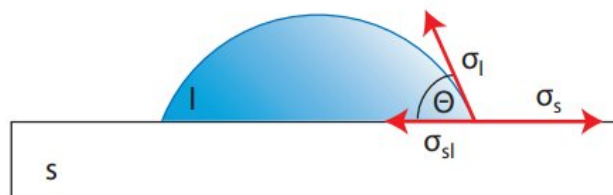
Povrchové napětí nejčastěji měříme na rozhraní kapalina - vzduch, jelikož vzduch nereaguje ani s kapalinou, ani sám se sebou. Nevznikne žádný příspěvek od molekul vzduchu a nic neoponuje přitažlivým silám mezi molekulami kapaliny, které se tím v součtu projeví všechny. Dupreho rovnice (14) naopak popisuje případ, kdy obě látky na rozhraní mají vlastní povrchové napětí σ_s , σ_l a zároveň spolu interagují.

$$\sigma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2\sqrt{\sigma_s^{lw}\sigma_l^{lw}} - 2\sqrt{\sigma_s^{ab}\sigma_l^{ab}} \quad (14)$$

Cílem měření je zjistit, jak se známá hodnota povrchového napětí σ_l rozkládá do složek σ_l^{lw} , σ_l^{ab} ze vztahu (4) a jak bude podle vztahu (14) reagovat s jinými materiály. Kapka nanesená na vhodný povrch jako na obrázku 4, je právě co hledáme. Pro úhel θ , který svírá tečna k profilu kapky v místě styku všech tří fází platí Youngova rovnice

$$\sigma_s = \sigma_{sl} + \sigma_l \cos(\theta), \quad (15)$$

kde σ_l a σ_s jsou povrchové mezifázové energie kapaliny a pevné látky vůči páře kapaliny a σ_{sl} mezifázová povrchové energie rozhraní kapalina – pevná látka.



Obrázek 4: Youngova rovnováha na rozhraní tří fází u přisedlé kapky

Kombinací Youngovy a Dupreho rovnice dostaneme rovnici Youngovu-Dupreho:

$$(1 + \cos(\theta))\sigma_l = 2\sqrt{\sigma_s^{lw}\sigma_l^{lw}} + 2\sqrt{\sigma_s^{ab}\sigma_l^{ab}} \quad (16)$$

Abychom změřili jen jednu složku povrchového napětí, musíme ji nějak izolovat od té druhé. Teflon má například povrchovou energii pouze disperzního charakteru, tj. $\sigma_s = \sigma_s^{lw}$ a na pravé straně rovnice zbude jediná odmocnina. Dál můžeme jako kalibrační kapalinu použít metylenjodid (CH_2I_2), který má povrchovou energii rovněž čistě disperzního charakteru.

$$(1 + \cos \theta_{\text{H}_2\text{O}}) \sigma_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \sqrt{\sigma_s^{\text{lw}} \sigma_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{lw}}} \quad (17)$$

$$(1 + \cos \theta_{\text{kal}}) \sigma_{\text{kal}} = 2 \sqrt{\sigma_s^{\text{lw}} \sigma_{\text{kal}}^{\text{lw}}} \quad (18)$$

Po vydělení obou rovnic dostávám pro disperzní složku povrchové energie vody

$$\sigma_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{lw}} = \frac{(\sigma_{\text{H}_2\text{O}})^2}{\sigma_{\text{kal}}} \left(\frac{1 + \cos \theta_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + \cos \theta_{\text{kal}}} \right)^2 \quad (19)$$

3. Výsledky měření

3.1. Absolutní měření viskozity Mariottovou lahví

Za dobu $t = 128$ s vytekl kapilárou objem $V = 38.2 \pm 3$ cm³ destilované vody. Uvádím taky parametry použité Mariottovy láhve pro výpočet dynamické viskozity ze vztahu (6).

poloměr kapiláry	$R = 0.570 \pm 0.001$ mm
délka kapiláry	$L = 165.0 \pm 0.5$ mm
tlakový spád	$\rho = 112 \pm 4$ kPa

$$\eta = (9.43 \pm 0.03) \cdot 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$$

3.2. Měření Ubbelohdeho viskozimetrem

Laboratorní viskozimetr už je zkalibrovaný pro hodnotu K

$$K = 1.063 \pm 0.0069 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-2}.$$

Provedl jsem 3 měření kinematické viskozity vody. Jedno při laboratorní teplotě a dvě po ponoření celého viskozimetru v ohřáté vodě. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulce 1 a kinematickou viskozitu jsem spočítal ze vztahu (6).

T (°C)	t (m:s)	$\nu_{\text{H}_2\text{O}}$ (m ² s ⁻¹)
25	14:22	$9.16 \pm 0.06 \cdot 10^{-7}$
30	12:25	$7.92 \pm 0.05 \cdot 10^{-7}$
35	11:23	$7.26 \pm 0.05 \cdot 10^{-7}$

Tabulka 1: Změřené hodnoty kinematické viskozity pro různé teploty

3.3. Měření hustoty metodou ponorného tělíska

Na závěsných vahách jsem změřil vztlak ponořeného tělíska v destilované vodě a v lihu. Hustotu dopočítám ze vztahu (12).

tíha tělíska ponořeného v lihu	$m_1 = 36.37 \pm 0.03$ mN
tíha tělíska ponořeného ve vodě	$m_v = 41.08 \pm 0.03$ mN
hustota destilované vody	$\rho_v = 997$ kgm ⁻³

$$\rho_1 = 804.4 \pm 0.9 \text{ kgm}^{-3}$$

3.4. Měření hustoty pyknometrem

Ze vztahu (13) dopočítám hustotu lihu ρ_l , pomocí známé hustoty destilované vody $\rho_v = 997 \text{ kgm}^{-3}$.

hmotnost prázdného pyknometru	$m = 17.728 \pm 0.003 \text{ g}$
hmotnost pyknometru s lihem	$m_l = 38.580 \pm 0.003 \text{ g}$
hmotnost pyknometru s destilovanou vodou	$m_v = 43.740 \pm 0.003 \text{ g}$
hustota vzduchu v laboratoři	$\rho_{vz} = 1.204 \text{ kgm}^{-3}$

$$\rho_l = 799.5 \pm 0.2 \text{ kgm}^{-3}$$

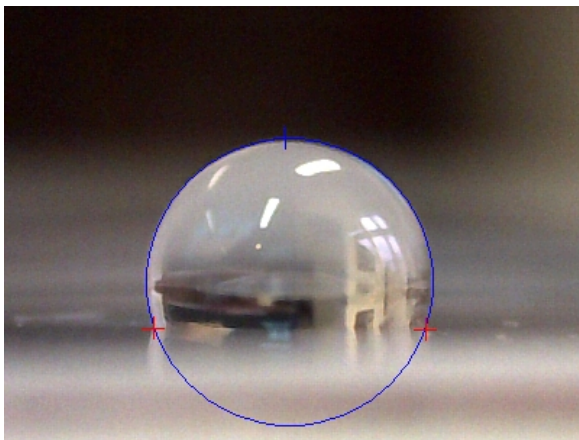
3.5. Měření povrchového napětí du Noüyho metodou

Celkem jsem pro každou kapalinu udělal 10 měření a výsledky i s nejistotou uvedl v tabulce 2. Poloměr kroužku byl $R = 29.0 \pm 0.05 \text{ mm}$ a Harkinsův-Jordanův korekční faktor $f = 0.77$.

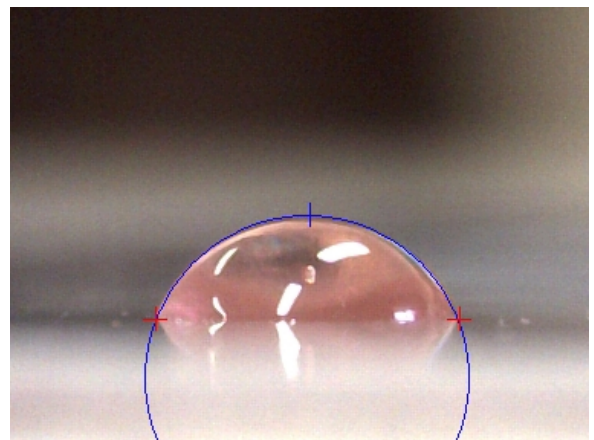
kapalina	$F_{max} \text{ (N)}$	$\sigma \text{ (Nm}^{-1}\text{)}$
líh	12.01 ± 0.2	25.4 ± 0.5
destilovaná voda	34.42 ± 0.2	72.7 ± 0.5

Tabulka 2: Povrchové napětí destilované vody a lihu

3.6. Měření složek povrchového napětí metodou kontaktního úhlu přisedlé kapky



(a) Destilovaná voda



(b) metylenjodid

Obrázek 5: Kapky přisedlé na teflonové podložce

Disperzní složku povrchového napětí vody dopočítám ze vztahu (19).

povrchové napětí metylenjodidu	$\sigma_{\text{kal}} = 50.8 \text{ Nm}^{-1}$
povrchové napětí destilované vody	$\sigma_v = 72.8 \text{ Nm}^{-1}$
změřený úhel přisedlé kapky metylenjodidu	$\theta_v = 68.7^\circ$
změřený úhel přisedlé kapky vody	$\theta_v = 109.5^\circ$

$$\sigma_{\text{H}_2\text{O}}^{lw} = 24.9 \text{ Nm}^{-1}$$

$$\sigma_{\text{H}_2\text{O}}^{ab} = \sigma_{\text{H}_2\text{O}} - \sigma_{\text{H}_2\text{O}}^{lw} = 47.9 \text{ Nm}^{-1}$$

4. Závěr

Pomocí Mariottovy lahve jsem změřil dynamickou viskozitu destilované vody o teplotě 18 °C $\eta = (9.43 \pm 0.03) \cdot 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$. Viskozita vody se v řádech nejistoty mění s teplotou a proto by nemělo smysl měřit přesněji. Tabulky udávají obecnou hodnotu 0.01.

Ubbelohdeho viskozimetrem jsem změřil kinematickou viskozitu vody o teplotě 25 °C, 30 °C a 35 °C. Výsledky jsou uvedené v tabulce 1 a dobře odpovídají tabulkovým hodnotám z odkazu 1.

Určil jsem hustotu lihu zvlášť metodou ponorného tělíska $\rho = 804.4 \pm 0.9 \text{ kgm}^{-3}$ a pyknometrem $\rho = 799.5 \pm 0.2 \text{ kgm}^{-3}$, oproti tabulkové hodnotě 789 kgm^{-3} . Vypadá to, že v naší laboratoři je líh o trochu těžší.

Du Noüyho metodou jsem změřil povrchové napětí lihu $\sigma = 25.4 \pm 0.5 \text{ Nm}^{-1}$ a destilované vody $\sigma = 72.7 \pm 0.5 \text{ Nm}^{-1}$. Nejistotu obou hodnot tvoří převážně nejistota velikosti poloměru kroužku a korekčního faktoru. Mám ale pořád velmi dobrou shodu s tabulkovými hodnotami 22.4 a 72.8 Nm^{-1} . Malou chybu povrchového napětí lihu pravděpodobně způsobily nečistoty v nádobě.

Měřením kontaktního úhlu kapky destilované vody přisedlé na podložce z teflonu jsem určil složky povrchového napětí $\sigma^{lw} = 24.9 \text{ Nm}^{-1}$ a $\sigma^{ab} = 47.9 \text{ Nm}^{-1}$. Tabulkové hodnoty jsou 21.8 a 51.0 Nm^{-1} . I tady výsledek mohly ovlivnit malé nečistoty na podložce.

Reference

- [1] Kinematická a dynamická viskozita vody <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/kinematicka-a-dynamicka-viskozita-vody>.