

## FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

### Fyzikální praktikum 1

**Zpracoval:** Tomáš Plšek, 461281

**Naměřeno:** 4.5.2017

**Obor:** Astrofyzika

**Skupina:** Čt, 8:00

**Úloha:** 3. Měření viskozity, hustoty a povrchového napětí kapalin

$T = 23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

$\varphi = 39,7\text{ }\%$

$p = 98,50\text{ hPa}$

Úkoly:

1. Určete teplotní závislost viskozity destilované vody Ubbelohdeho viskozimetrem.
2. Vypočítejte viskozitu vody měřením času, za který z Mariottovy láhve proteče dané množství vody.
3. Určete hustotu lihu na základě známé hustoty destilované vody pomocí pyknometru.
4. Určete hustotu lihu na základě známé hustoty destilované vody metodou ponorného tělíska.
5. Určete povrchové napětí destilované vody a lihu du Noüyho metodou kroužku.
6. Pomocí měřiče kontaktního úhlu změřte disperzní složku povrchové energie vody a metylen jodidu.

## 1. Úvod<sup>1</sup>

Mechanické vlastnosti kapalin hrají důležitou roli v běžném životě a v průmyslové praxi. Veličiny jako hustota, viskozita, či povrchové napětí kapalin jsou podstatné pro transport kapalin, vstřikování, mísení, při povrchových úpravách materiálů, slouží pro odhad složení kapalin a stanovení jiných fyzikálních vlastností. Patří sem veličiny:

**Hustota (měrná hmotnost)**, která je definovaná jako:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

kde  $m$  je hmotnost elementu látky o objemu  $V$ .

**Dynamická viskozita  $\eta$**  je definována Newtonovým zákonem:

$$\tau = \eta \frac{dv_x}{dy}, \quad (2)$$

kde  $\tau$  je smykové napětí mezi vrstvami kapaliny a  $\frac{dv_x}{dy}$  je derivace rychlosti proudění kapaliny ve směru normály k rovině smykového napětí  $\tau$ .

**Kinematická viskozita  $\nu$**  je definována jako podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (3)$$

**Povrchové napětí, povrchová energie.** Povrchové napětí je definováno jako síla působící v rovině povrchu kapaliny kolmo na libovolnou délkovou jednotku povrchu kapaliny, vztažená na tuto délku:

$$\sigma = \frac{F}{l}. \quad (4)$$

Chceme-li studovat, jak se bude chovat rozhraní dvou látek, musíme znát, jaké mezimolekulární síly uvnitř obou látek existují a zdali jejich molekuly mohou vzájemně interagovat. Výsledné povrchové napětí je tedy rovno:

$$\sigma = \sigma^{lw} + \sigma^{ab}, \quad (5)$$

kde  $\sigma^{lw}$  je povrchové napětí odpovídající působení Van der Waalsových sil a  $\sigma^{ab}$  odpovídá acidobazickým interakcím. Vzájemné interakce mezi dvěma fázemi s, l popisuje adhezní práce (platí pro ni Berthelotovo kombinační pravidlo:

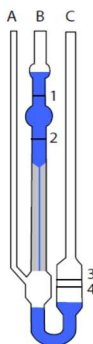
$$W_{sl}^a = 2\sqrt{\sigma_s^{lw}\sigma_l^{lw}} + 2\sqrt{\sigma_s^{ab}\sigma_l^{ab}}, \quad (6)$$

pak tedy dosazením rovnice (6) do Duprého rovnice získáváme vztah pro mezifázové povrchové napětí:

$$\sigma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2\left(\sqrt{\sigma_s^{lw}\sigma_l^{lw}} + \sqrt{\sigma_s^{ab}\sigma_l^{ab}}\right) \quad (7)$$

## 2. Postup měření

### 2.1 Měření viskozity destilované vody Ubbelohdeho viskozimetrem



Obrázek 1: Ubbelohdeho kapilární viskozimetr<sup>1</sup>

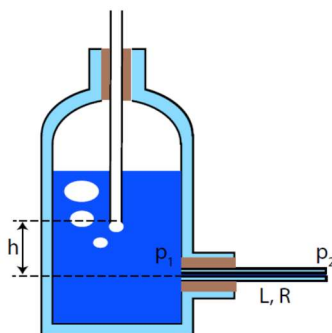
Viskozimetr naplníme destilovanou vodou (aby sahala mezi rysky 3 a 4), k trubici A připojíme hadičku s balónkem a viskozimetr ponoříme do kádinky s kohoutkovou vodou o potřebné teplotě (pro zajištění téměř stejné teploty ve viskozimetru v průběhu experimentu). Prstem zakryjeme trubici A a systematickým vyfukováním balónku a zakrýváním otvoru v něm nasajeme kapalinu do trubice B, a to tak aby sahala nad rysku 1. Uvolníme trubici A i B a měříme čas, za který destilovaná voda poklesne z rysky 1 na rysku 2.

Kinematickou viskozitu určíme ze vztahu:

$$\nu = K \cdot \tau, \quad (8)$$

kde K je časová konstanta viskozimetru (udává ji výrobce;  $K = 1,063 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2 \text{ s}^{-2}$ ,  $r(K)$  0,65 %).

## 2.2 Určení viskozity destilované vody pomocí Mariottovy láhve



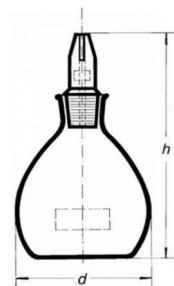
Obrázek 2: Mariottova láhev s kapilárou<sup>1</sup>

Tato metoda spočívá na měření objemu kapaliny, který proteče při tlakovém spádu  $p = p_1 - p_2$  trubicí o délce  $L$  a poloměru  $R$  za čas  $t$ . Zjednodušený tvar pro viskozitu při proudění blízké laminárnímu:

$$\eta = \frac{\pi R^4 p t}{8 V L} \quad (9)$$

Zajistíme stálý tlakový spád v Mariottově láhvi, uvolníme zátku na kapiláře a měříme čas, za který vyteče určité množství destilované vody, které následně zvážíme.

## 2.3 Měření hustoty lihu pyknometrickou metodou



Obrázek 3: Pyknometr<sup>2</sup>

Hustotu lihu určíme pomocí pyknometru – skleněné nádoby se zabroušeným uzávěrem, v němž je kapilára, kterou při zavírání uniká přebytečné množství kapaliny. Metoda spočívá na srovnávání dvou kapalin (jedné o známé a druhé o neznámé hustotě).

Zvážíme prázdný pyknometr, napustíme jej lihem, nasadíme uzávěr, necháme odtéct přebytečné množství kapaliny a zvážíme lihem naplněný pyknometr. Totéž opakujeme pro pyknometr naplněný destilovanou vodou. Pro neznámou hustotu  $\rho_{lih}$  platí:

$$\rho_{lih} = (\rho_{voda} - \rho_{vzduch}) \frac{m_{lih} - m}{m_{voda} - m} - \rho_{vzduch} \quad (10)$$

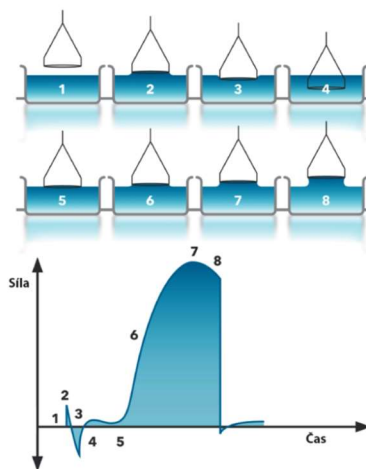
## 2.4 Měření hustoty lihu metodou ponorného tělíska

Na závěsné digitální váhy zavěšíme závaží (v našem případě v podobě rtuťového teploměru) a váhy vytárujeme. Do odměrného válce vhodného tvaru nalijeme kapalinu o neznámé hustotě a postavíme jej pod váhy tak, aby byl teploměr plně ponořen. Odečteme údaj na vahách. Stejný postup opakujeme pro kapalinu a známé hustotě (vodu o určité teplotě). Hustotu neznámé kapaliny spočteme ze tvaru:

$$\rho_{lih} = \frac{m_{lih}}{m_{voda}} \rho_{voda} \quad (11)$$

## 2.5 Určení povrchového napětí destilované vody a lihu du Noüyho metodou

Tato metoda je založena na vnoření objektu vhodného tvaru do zkoumané kapaliny a následném měření přidané síly působící na objekt vlivem jeho kontaktu s kapalinou.



Obrázek 4: Časová závislost síly působící na kroužek v jednotlivých fázích<sup>1</sup>

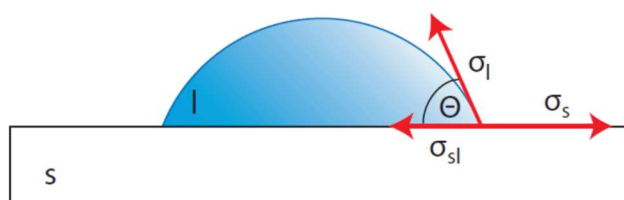
Na závěsné váhy připojené k počítači zavěšíme aluminiový kroužek, pod kroužek postavíme na desku s vertikálním posuvem nádobu se zkoumanou kapalinou, vnoříme kroužek do kapaliny a pomalu jej vynořujeme. Pomocí programu *Tensionmeter* snímáme časovou závislost síly působící na kroužek a z grafu určíme maximální sílu působící na kroužek (Obrázek 4; Fáze 7). Povrchové napětí určíme ze vztahu:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{4\pi R} \cdot f(R^3/V, R/r), \quad (12)$$

kde  $R$  je poloměr kroužku, a  $f(R^3/V, R/r)$  je Harkinsův-Jordanův korekční faktor.

## 2.6 Měření kontaktního úhlu pro určení disperzní složky povrchové energie

Tato metoda vychází z porovnání kontaktního úhlu kapaliny o neznámém povrchovém napětí a kalibrační kapaliny, u které známe obě složky povrchového napětí.



Obrázek 5: Kontaktní úhel na rozhraní tří fází<sup>1</sup>

Při této metodě měření povrchové energie nanese na vhodný vzorek pevné látky několik testovacích kapek a pomocí vhodného softwaru a kamery připojené k počítači určíme kontaktní úhel, který svírá tečna k profilu kapky v místě styku všech tří fází (pevná kapalina, látka a její pára) s rovinou pevné látky. Totéž provedeme i s kalibrační kapalinou (kapalinou a známém povrchovém napětí) a dosadíme do rovnice:

$$\frac{\sigma_{H_2O}^{lw}}{\sigma_{H_2O}} = \frac{\sigma_{kal}^{lw}}{\sigma_{kal}} \frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma_{kal}} \left( \frac{1 + \cos \Theta_{H_2O}}{1 + \cos \Theta_{kal}} \right)^2. \quad (13)$$

### 3. Použité přístroje

Při měření hustoty lihu du Noüyho metodou jsme požili závěsné digitální váhy připojené na počítač a pomocí programu *Tensionmeter* jsme získali časovou závislost síly působící na váhy.

Kontaktní úhel mezi kapkou a povrchem určuje opět pomocí počítače: pomocí ovládacího programu získáme snímek kapky a pomocí záložky *Analysis* určíme kontaktní úhel.

Měřená veličina	Přístroj	Rozsah	Nejistota
hmotnost	digitální váhy	310 g	0.003 g
hmotnost	digitální váhy	3000 g	0.03 g
síla	závěsné digitální váhy	30 000 mN	0.3 mN
teplota	rtuťový teploměr	150 °C	0.03 °C
tlak	barograf	-	~ 0.1 %
čas	stopky	-	-

Tabulka 1: Použité přístroje

### 4. Měření

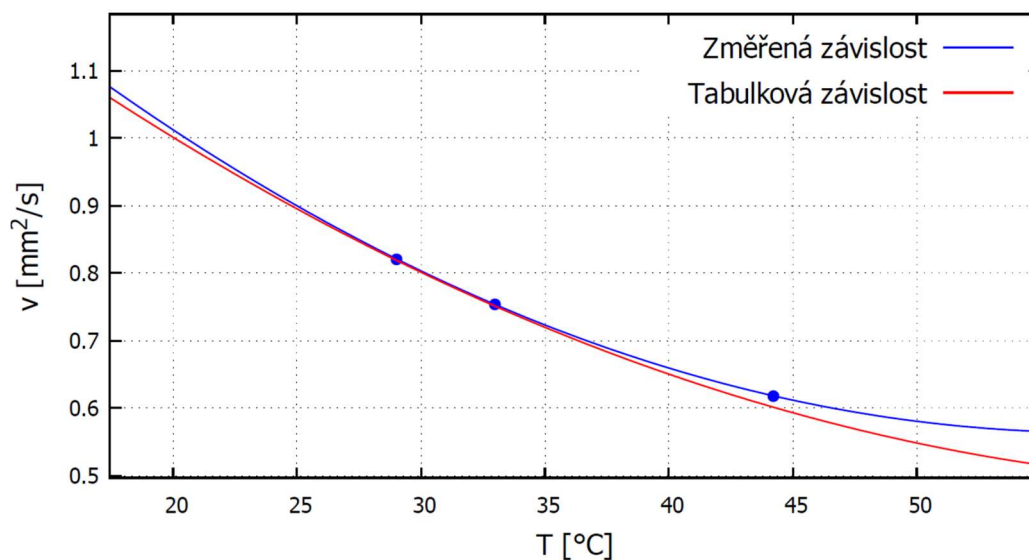
#### 4.1 Měření teplotní závislosti viskozity vody Ubbelohdeho viskozimetrem

Ze tří měření doby, za kterou se destilovaná voda dostala z rysky 1 na rysku 2 (obrázek 1), spočteme hodnoty kinematické viskozity pro různé teploty vody (teplota vody měřena vždy na začátku experimentu) pomocí vzorce (8).

$t$ [°C]	29.0(3)	33.0(3)	44.2(3)
$\tau$ [s]	772	727	582
$\nu$ [mm <sup>2</sup> /s]	0.82(1)	0.743(9)	0.618(6)

Tabulka 2: Hodnoty kinematické viskozity pro dané teploty

Teplotní závislost viskozity destilované vody



Graf 1: Teplotní závislost viskozity destilované vody

## 4.2 Měření viskozity destilované vody pomocí Mariottovy láhve

Pomocí vzorce (9) spočteme hodnotu dynamické viskozity destilované vody. Rozměry trubice  $R$  a  $L$  známe a ostatní potřebné veličiny doměříme:

Měřené veličiny	$R$ [mm]	$L$ [mm]	$p$ [kPa]	$V$ [cm <sup>3</sup> ]
Hodnota	0.570(1)	165.0(5)	98.5(1)	48.926(4)

Tabulka 3: Měřené veličiny pro výpočet dynamické viskozity

Objem destilované vody jsem určil ze známé hmotnosti (rozdíl hmotnosti prázdné a plné kádinky) a hustoty, kterou jsem na základě měření teploty destilované vody interpoloval z tabulek<sup>4</sup>.

$$\text{Dynamická viskozita destilované vody } \eta = 0.941(7) \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

## 4.3 Měření hustoty lihu pyknometrem

Destilovaná voda i lih byly na pokojové teplotě  $T = 23,5^\circ\text{C}$ . Hustotu destilované vody a vzduchu jsem interpoloval podle hodnot z tabulek<sup>4,5</sup>. Ze vzorce (10) jsem dopočítal hledanou hustotu lihu.

$m_{\text{prázdná}}$ [g]	$m_{\text{voda}}$ [g]	$m_{\text{lih}}$ [g]	$\rho_{\text{vzduch}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{voda}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{lih}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
23.576(3)	49.023(3)	44.556(3)	1.191(1)	997.31(7)	821.3(2)

Tabulka 4: Určení hustoty lihu pyknometrickou metodou

$$\text{Hustota lihu } \rho_{\text{lih}} = 821.3(2) \text{ kg/m}^3.$$

## 4.4 Měření hustoty lihu metodou ponorného tělesa

Měření hustoty kapaliny touto metodou je založeno na srovnání vztlakové síly při ponoření daného tělesa ve vodě (popř. jiné kapalině o známé hustotě) s její hodnotou při ponoření do zkoumané kapaliny. Hodnota hustoty vody o teplotě  $30^\circ\text{C}$  interpolujeme z tabulek<sup>4</sup>.

$m_{\text{voda}}$ [g]	$m_{\text{lih}}$ [g]	$\rho_{\text{voda}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{lih}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
0.7013(3)	0.5770(3)	995.65(9)	819.2(6)

Tabulka 5: Určení hustoty lihu metodou ponoření tělesa

$$\text{Hustota lihu } \rho_{\text{lih}} = 819.2(6) \text{ kg/m}^3.$$

## 4.5 Měření povrchového napětí kapaliny du Noüyho metodou

Pomocí 10 měření jsme získali průměrnou maximální sílu působící na kroužek v obou zkoumaných kapalinách. Průměr kroužku je  $D = (58.0 \pm 0.1) \text{ mm}$ , Harkinsův-Jordanův korekční faktor je přibližně  $f(R^3/V, R/r) = 0.77$ . Povrchové napětí určíme ze vzorce (12).

Kapalina	$F_{\text{max}}$ [mN]	$\sigma$ [ $10^{-3} \text{ N/m}$ ]
Voda	36.1(3)	76.2(6)
Lih	13.1(3)	36.1(6)

Tabulka 6: Povrchové napětí destilované vody a lihu

## 4.6 Určení disperzní složky povrchového napětí destilované vody

Pomocí 10 měření kontaktního úhlu zkoumané a kalibrační kapaliny jsme získali hodnoty kontaktních úhlů  $\Theta_{voda} = 84(2)^\circ$  a  $\Theta_{lih} = 62(2)^\circ$ . Pomocí vzorce (13) určíme hodnotu disperzní složky povrchového napětí destilované vody.

Kapalina	$\sigma$ [ $mJm^{-2}$ ]	$\sigma^{lw}$ [ $mJm^{-2}$ ]	$\sigma^{ab}$ [ $mJm^{-2}$ ]
destilovaná voda	72.8	21.7	51.1
methylen iodide	50.8	50.8	0

Tabulka 7: Určení disperzní složky povrchového napětí destilované vody<sup>1)</sup>

## 5. Závěr

Pomocí 3 měření teplotní závislosti **kinematické viskozity** destilované vody Ubbelohdeho viskozimetrem jsem určil teplotní závislost (graf 1). Hodnoty jsem nařitoval polynomy druhého stupně a zjistil jsem, že měřené hodnoty docela dobře odpovídají hodnotám tabulkovým.

Na nejistotě výsledku se podílela pouze nejistota při určení teploty a nejistota fitu, nejistota při určení času (tu však můžeme téměř zanedbat, neboť měříme dostatečně dlouhé časové úseky) a také fakt, že teplota vody, v níž je Ubbelohdeho viskozimetr ponořen, je měřena na začátku experimentu, voda v kádince tedy postupem času chladne.

**Dynamickou viskozitu** destilované vody o teplotě okolí ( $23.5^\circ C$ ) jsem pomocí Mariottovy trubice stanovil na  $\eta = 0.941(7) \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$ .

Na výsledné nejistotě se podílela nejistota při určení rozměrů kapiláry, nejistota určení atmosférického tlaku a výsledná nejistota objemu (nejistota při vážení prázdné a plné kádinky a nejistota hustoty vody pro danou teplotu).

Z tabulek<sup>3</sup> jsem interpoloval hodnotu dynamické viskozity na  $\eta = 0.9330(6) \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$ .

**Hustotu lihu** jsem určil pomocí pyknometru na základě známé hustoty vody  $\rho_{lih} = 821.3(2) kg/m^3$ .

Na výslednou nejistotu má vliv zejména nejistota při měření hmotností prázdného a naplněného pyknometru, nejistota při určení hustoty vzduchu interpolací z tabulek<sup>5</sup>, nejistota určení hustoty destilované vody interpolací z tabulek<sup>4</sup> a také nejistota vymezení objemu kapaliny pyknometrem.

Metodou ponorného tělíska jsem určil hodnotu hustoty lihu  $\rho_{lih} = 819.2(6) kg/m^3$ .

Výslednou nejistotu ovlivnila nejistota určení rozdílu hmotností (vztlakové síly) a nejistota určení hustoty interpolací z tabulek<sup>4</sup> pro danou teplotu s danou nejistotou.

Pro líh tabulky<sup>7</sup> udávají hustotu  $\rho_{lih} = 789.3 kg/m^3$ .

**Povrchové napětí** pro destilovanou vodu jsem stanovil na hodnotu  $\sigma_{voda} = 76.2(6) \cdot 10^{-3} N/m$  a pro líh  $\sigma_{lih} = 27.8(8) \cdot 10^{-3} N/m$ .

Na výsledné nejistoty měla vliv nejistota aritmetického průměru deseti měření síly, nejistota siloměru (vah) a nejistota při měření poloměru kroužku.

<sup>1)</sup> Pro methylen iodide se jedná o tabulkové<sup>1</sup> hodnoty, u vody pouze hodnota celkového povrchového napětí.

Pro teplotu 23.5 °C jsem pro destilovanou vodu po interpolaci z tabulek<sup>6</sup> získal hodnotu  $72.20(5) \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ . Pro líh udávají pro teplotu 20 °C hodnotu  $22.55 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ .

**Disperzní složku povrchového napětí destilované vody** jsem stanovil na hodnotu  $\sigma^{lw} = 21.7 \text{ mJm}^{-2}$  a polární složku  $\sigma^{ab} = 51.1 \text{ mJm}^{-2}$ .

Tabulky udávají hodnoty  $\sigma^{lw} = 21.8 \text{ mJm}^{-2}$  a  $\sigma^{ab} = 51.0 \text{ mJm}^{-2}$ .

## 6. Zdroje

<sup>1</sup> ZDENĚK BOCHNÍČEK, JANA JURMANOVÁ, PAVEL KONEČNÝ, ZDENĚK NAVRÁTIL A LUBOŠ POLÁČEK. *Fyzikální praktikum I, Návodů k úlohám*. Brno, 2013. Dostupný z [https://is.muni.cz/www/108960/trans/navody/skripta\\_fp1.pdf](https://is.muni.cz/www/108960/trans/navody/skripta_fp1.pdf).

<sup>2</sup> VERKON. Pyknometry, Pyknometr podle Gay-Lussaca. Dostupný z <http://www.verkon.cz/pyknometry/>.

<sup>3</sup> CONVERTER. Převody jednotek, fyzikální tabulky, životopisy fyziků a Nobelova cena; Viskozita vody v závislosti na teplotě. Dostupný z <http://www.converter.cz/tabulky/viskozita-vody.htm>.

<sup>4</sup> COVERTER. Převody jednotek, fyzikální tabulky, životopisy fyziků a Nobelova cena; Závislost hustoty destilované vody na teplotě. Dostupný z <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-vody.htm>.

<sup>5</sup> COVERTER. Převody jednotek, fyzikální tabulky, životopisy fyziků a Nobelova cena; Vzduch. Dostupný z <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>.

<sup>6</sup> CONVERTER. Převody jednotek, fyzikální tabulky, životopisy fyziků a Nobelova cena; Povrchové napětí. Dostupný z <http://www.converter.cz/tabulky/povrchove-napeti.htm>.

<sup>7</sup> CONVERTER. Převody jednotek, fyzikální tabulky, životopisy fyziků a Nobelova cena; Hustota kapalin. Dostupný z <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-kapalin.htm>.