

## Úkol

### Pracovní úkol

1. Změřte dynamickou viskozitu parafinového oleje Stokesovou metodou.
2. Změřte dynamickou viskozitu ricinového oleje Stokesovou metodou.
3. Ověřte, zda jsou pro dané experimentální uspořádání splněny podmínky platnosti Stokesova vzorce pro odpor prostředí při pohybu koule.
4. Hustotu skleněných kuliček určete pyknometrickou metodou.

### Klíčová slova

viskozita, Reynoldsovo číslo, Stokesova metoda měření viskozity, měření hustoty (pyknometrem)

### Pokyny k měření

1. Průměr kuliček  $d$  změřte dílenským mikroskopem.
2. Před měřením zvolte pro každou kapalinu odpovídající velikost kuliček. Tuto volbu proveďte na základě odhadu splnění podmínek platnosti Stokesova vzorce. Pro odhad použijte hodnotu viskozity z tabulek.

## Teorie

### Stokesova metoda měření viskozity

Při pomalém pohybu tělesa ve viskózní tekutině, tj. nedochází-li k turbulentnímu proudění, která má v dostatečně velkém okolí tělesa stejnou rychlost, působí na těleso odporová síla, která je v případě koule rovná [1]

$$F = 3\pi\eta dv \quad (1)$$

(Stokesův vzorec), kde

- $\eta$  ..... dynamická viskozita tekutiny  
 $d$  ..... průměr koule  
 $v$  ..... rychlost koule vůči tekutině

K turbulentnímu proudění nedochází, je-li Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{d\rho v}{\eta} \quad (2)$$

kde

- $\rho$  ..... hustota tekutiny

mnohem menší než 1 [2]. Uvažujeme-li kouli padající volným pádem válcovou nádobou s viskózní tekutinou, jsou-li síly na ni působící (tj. tíha, vztlačková a odporová síla) v rovnováze a nedochází-li při pádu k turbulentnímu proudění, přejde (1) v [2]:

$$\eta = \frac{gd^2(\rho_t - \rho)}{18v(1 - 2,4\frac{d}{\phi})} \quad (3)$$

kde

- $g$  ..... tíhové zrychlení  
 $\rho_t$  ..... hustota koule  
 $\phi$  ..... průměr nádoby

Rychlost koule vůči tekutině lze určit jako

$$v = \frac{h}{t} \quad (4)$$

kde

- $h$  ..... dráha pádu koule  
 $t$  ..... doba pádu koule

**Pyknometrická metoda měření hustoty**

Pyknometrická metoda spočívá ve změření hmotností tělesa, pyknometru naplněného kapalinou a pyknometru s tělesem naplněného kapalinou. Hustota tělesa je rovna [1]

$$\rho_t = \frac{\rho_k - \rho_{vz}}{1 - \frac{m_3 - m_2}{m_1}} + \rho_{vz} \quad (5)$$

kde

$\rho_k$  ... hustota kapaliny  
 $\rho_{vz}$  ... hustota vzduchu  
 $m_1$  ... hmotnost tělesa  
 $m_2$  ... hmotnost pyknometru s kapalinou  
 $m_3$  ... hmotnost pyknometru s tělesem a kapalinou

**Zpracování souboru různě přesných měření (špatně)**

Pro odhad estimátorů souboru různě přesných měření jsem použil metodu maximální věrohodnosti [3]. Očekávanou hodnotu určím jako aritmetický průměr očekávaných hodnot jednotlivých měření:

$$\mu[x] = \frac{\sum_{i=1}^{n[x]} \mu_i[x]}{n[x]} \quad (6)$$

a chybu očekávané hodnoty určím jako

$$\varepsilon[x] = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n[x]} (\varepsilon_i[x]^2 + 9(\mu_i[x] - \mu[x])^2)}}{n[x]} \quad (7)$$

kde

$$\varepsilon_i[x] = \sqrt{\Delta_i[x]^2 + (3\sigma_i[x])^2} \quad (8)$$

je chyba  $i$ -tého měření a

$\mu_i[x]$  ... očekávaná hodnota  $i$ -tého měření veličiny  $x$   
 $\Delta_i[x]$  ... chyba měřidla pro  $i$ -té měření veličiny  $x$   
 $\sigma_i[x]$  ... standardní odchylka  $i$ -tého měření veličiny  $x$   
 $n[x]$  ... počet měření veličiny  $x$

**Postup měření****Měření viskozity**

Dynamickou viskozitu parafrínového, resp. ricinového oleje jsem změřil podle (3). Kuličku jsem nechal padat ve válcové nádobě s příslušným olejem.

Přes každou z obou nádob jsem navléknul vodorovně dvě gumičky, a vytvořil tak značky pro pozdější měření dob pádu kuliček. Horní gumičku jsem umístil dostatečně nízko pod hladinu, aby se před měřením stihly vyrovnat síly. Vzdálenost značek jsem v obou případech změřil pásovým měřidlem. Posuvným měřidlem jsem změřil vnitřní průměry obou nádob na jejich horním konci.

Dílenským mikroskopem jsem změřil vzdálenosti rovnoběžných rovin tečných k povrchu kuličky (dále jen průměr kuličky), ve dvou kolmých směrech. Kuličku jsem vhodil do nádoby (středem horní podstavky) s příslušným olejem a ručními stopkami jsem změřil dobu pádu mezi gumičkami.

Jako tíhové zrychlení jsem použil tabelovanou hodnotu.

Označím

$Re_{p,m}$  ... Reynoldsovo číslo malé kuličky padající v parafrínovém oleji  
 $Re_{p,v}$  ... Reynoldsovo číslo velké kuličky padající v parafrínovém oleji  
 $Re_{r,m}$  ... Reynoldsovo číslo malé kuličky padající v ricinovém oleji  
 $Re_{r,v}$  ... Reynoldsovo číslo velké kuličky padající v ricinovém oleji  
 $\eta_p$  ... dynamická viskozita parafrínového oleje  
 $\eta_r$  ... dynamická viskozita ricinového oleje  
 $\eta_{p,m,i}$  ...  $i$ -té měření dynamické viskozity parafrínového oleje malou kuličkou

$\eta_{r,m,i}$	.... $i$ -té měření dynamické viskozity ricinového oleje malou kuličkou
$\eta_{r,v,i}$	.... $i$ -té měření dynamické viskozity ricinového oleje velkou kuličkou
$d_{p,m,i}$	.... průměr $i$ -té malé kuličky do parafinového oleje
$d_{r,m,i}$	.... průměr $i$ -té malé kuličky do ricinového oleje
$d_{r,v,i}$	.... průměr $i$ -té velké kuličky do ricinového oleje
$t_{p,m,i}$	.... doba pádu $i$ -té malé kuličky v parafinovém oleji
$t_{r,m,i}$	.... doba pádu $i$ -té malé kuličky v ricinovém oleji
$t_{r,v,i}$	.... doba pádu $i$ -té velké kuličky v ricinovém oleji
$h_p$	..... vzdálenost značek na nádobě s parafinovým olejem
$h_r$	..... vzdálenost značek na nádobě s ricinovým olejem
$\rho_p$	..... hustota parafinového oleje
$\rho_r$	..... hustota ricinového oleje
$\rho_m$	..... hustota malých kuliček
$\rho_v$	..... hustota velkých kuliček
$\phi_p$	..... průměr nádoby s parafinovým olejem
$\phi_r$	..... průměr nádoby s ricinovým olejem

Vhodnou velikost kuliček pro jednotlivé oleje jsem určil na základě odhadu Reynoldsova čísla měřeného pro každou kombinaci zvlášť (podle (2)). Jako vhodné jsem určil oba typy kuliček padajících v ricinovém oleji ( $Re_{r,m} \approx 0,003^1$ ,  $Re_{r,v} \approx 0,02$ ), pro parafinový olej jsem vyloučil velké kuličky ( $Re_{p,v} \approx 3$ ) a rozhodl se měřit malými kuličkami, i když i v tomto případě považuji Reynoldsovo číslo za příliš velké ( $Re_{p,m} \approx 0,7$ ). Ve všech zvolených kombinacích je Reynoldsovo číslo menší než 1. Srovnáním „vodorovných“ a „svislých“ průměrů kuliček lze zjistit, že v obou případech mají dostatečně přesné tvar koule. Tím jsem ověřil podmínky platnosti vzorce (3).

### Měření hustoty kuliček

Hustotu velkých, resp. malých kuliček jsem změřil podle (5). Jako kapalinu v pyknometru jsem použil destilovanou vodu. Pro hustotu vzduchu a destilované vody jsem použil tabelované hodnoty.

Změřil jsem teplotu destilované vody. Analytickými vahami jsem změřil hmotnost souboru kuliček (kuličky jsem vložil do misky), následně hmotnost pyknometru naplněného destilovanou vodou (povrch pyknometru jsem před vážením usušil). Pak jsem do pyknometru nasypal pomocí nálevky soubor kuliček, třepáním odstranil vzduchové bublinky z pyknometru a analytickými vahami změřil jeho hmotnost (povrch jsem opět před vážením usušil).

Měření jsem opakoval pro obě velikosti kuliček.

Označím:

$\rho_k$	..... hustota destilované vody
$m_{1,m}$	... hmotnost souboru malých kuliček
$m_{2,m}$	... hmotnost pyknometru s dest. vodou před vložením malých kuliček
$m_{3,m}$	... hmotnost pyknometru s dest. vodou a souborem malých kuliček
$m_{1,v}$	.... hmotnost souboru velkých kuliček
$m_{2,v}$	.... hmotnost pyknometru s dest. vodou před vložením velkých kuliček
$m_{3,v}$	.... hmotnost pyknometru s dest. vodou a souborem velkých kuliček

## Výsledky měření

### Podmínky měření

místo:	Praha, Ke Karlovu 3
čas:	10.3.2008
teplota vzduchu:	22,7 °C
atmosférický tlak:	97,4 kPa
vlhkost vzduchu:	31,0%

<sup>1</sup> Použil jsem dynamickou viskozitu parafinového oleje  $1,018 \cdot 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a ricinového oleje  $9,89 \cdot 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  při teplotě 20 °C, udávanou [4].

**Přesnost přístrojů**

ruční stopky:	0,01 s
dílenský mikroskop:	0,01 mm
pásové měřidlo:	1 mm
posuvné měřidlo:	0,1 mm
analytické váhy:	0,2 mg
teploměr:	0,1 °C

**Ostatní pomůcky**

2 válcové nádoby s parafinovým, resp. ricinovým olejem, 4 gumičky, misky s malými, resp. velkými skleněnými kuličkami, pyknometry, nálevka, sítko, destilovaná voda

**Hustota parafinového oleje při teplotě 22 °C**

$$\rho_p = 850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (\text{budu považovat za neomezeně přesné})$$

zdroj: tabulka v místnosti praktika

**Hustota ricinového oleje**

$$\rho_r = 950 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (\text{budu považovat za neomezeně přesné})$$

zdroj: zadání úkolu

**Hustota destilované vody při teplotě 21 °C**

(destilovaná voda měla teplotu přibližně 21,4 °C)

$$\rho_k = 998,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (\text{budu považovat za neomezeně přesné})$$

zdroj: tabulka v místnosti praktika

**Hustota vzduchu za daného tlaku a teploty**

$$\rho_{vz} = 1,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (\text{chybu nebudu uvažovat, protože by výslednou chybu měření ovlivnila jenom nepatrně})$$

zdroj: [5]

**Tíhové zrychlení v Praze**

$$g = 9,810 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (\text{budu považovat za neomezeně přesné})$$

zdroj: [5]

**Hmotnost souboru velkých kuliček**

$$m_{1,v} = 3,1585 \text{ g}$$

přístroj:	analytické váhy
přesnost přístroje:	$\Delta[m_{1,v}] = 0,0002 \text{ g}$
chyba měření:	$\varepsilon[m_{1,v}] = \Delta[m_{1,v}]$
očekávaná hodnota:	$\mu[m_{1,v}] = 3,1585 \text{ g}$
výsledek měření:	$m_{1,v} = (3,1585 \pm 0,0002) \text{ g}$

**Hmotnost souboru malých kuliček**

$$m_{1,m} = 3,1864 \text{ g}$$

přístroj:	analytické váhy
přesnost přístroje:	$\Delta[m_{1,m}] = 0,0002 \text{ g}$
chyba měření:	$\varepsilon[m_{1,m}] = \Delta[m_{1,m}]$
očekávaná hodnota:	$\mu[m_{1,m}] = 3,1864 \text{ g}$
výsledek měření:	$m_{1,m} = (3,1864 \pm 0,0002) \text{ g}$

**Hmotnost pyknometru s dest. vodou před vložením velkých kuliček**

$$m_{2,v} = 11,6189 \text{ g}$$

přístroj:	analytické váhy
přesnost přístroje:	$\Delta[m_{2,v}] = 0,0002 \text{ g}$
chyba měření:	$\varepsilon[m_{2,v}] = \Delta[m_{2,v}]$
očekávaná hodnota:	$\mu[m_{2,v}] = 11,6189 \text{ g}$
výsledek měření:	$m_{2,v} = (11,6189 \pm 0,0002) \text{ g}$

**Hmotnost pyknometru s dest. vodou před vložením malých kuliček**

$$m_{2,m} = 11,5224 \text{ g}$$

přístroj:	analytické váhy
přesnost přístroje:	$\Delta[m_{2,m}] = 0,0002 \text{ g}$
chyba měření:	$\varepsilon[m_{2,m}] = \Delta[m_{2,m}]$
očekávaná hodnota:	$\mu[m_{2,m}] = 11,5224 \text{ g}$
výsledek měření:	$m_{2,m} = (11,5224 \pm 0,0002) \text{ g}$

**Hmotnost pyknometru s dest. vodou a souborem velkých kuliček**

$$m_{3,v} = 13,5281 \text{ g}$$

přístroj:	analytické váhy
přesnost přístroje:	$\Delta[m_{3,v}] = 0,0002 \text{ g}$
chyba měření:	$\varepsilon[m_{3,v}] = \Delta[m_{3,v}]$
očekávaná hodnota:	$\mu[m_{3,v}] = 13,5281 \text{ g}$
výsledek měření:	$m_{3,v} = (13,5281 \pm 0,0002) \text{ g}$

**Hmotnost pyknometru s dest. vodou a souborem malých kuliček**

$$m_{3,m} = 13,4547 \text{ g}$$

přístroj:	analytické váhy
přesnost přístroje:	$\Delta[m_{3,m}] = 0,0002 \text{ g}$
chyba měření:	$\varepsilon[m_{3,m}] = \Delta[m_{3,m}]$
očekávaná hodnota:	$\mu[m_{3,m}] = 13,4547 \text{ g}$
výsledek měření:	$m_{3,m} = (13,4547 \pm 0,0002) \text{ g}$

**Hustota malých kuliček**

$\rho_m$  určím podle (5).

Chybu měření určím podle zákona šíření chyb [1, str. 44, (3,43)].

$$\rho_m = (2533,9 \pm 0,6) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

**Hustota velkých kuliček**

$\rho_v$  určím podle (5).

Chybu měření určím podle zákona šíření chyb [1, str. 44, (3,43)].

$$\rho_v = (2521,4 \pm 0,6) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

**Průměr nádoby s parafinovým olejem**

Tab. 1: Průměr nádoby s parafinovým olejem

č.m.	1	2	3	4	5
$\phi_p$ [mm]	77,7	77,7	77,6	77,6	77,6

přístroj:	posuvné měřidlo
přesnost přístroje:	$\Delta[\phi_p] = 0,1 \text{ mm}$
standardní odchylka:	$\sigma[\phi_p] = 0,02 \text{ mm}$
krajní statistická chyba:	$3\sigma[\phi_p]$
chyba měření:	$\varepsilon[\phi_p] = \sqrt{\Delta[\phi_p]^2 + (3\sigma[\phi_p])^2}$
očekávaná hodnota:	$\mu[\phi_p] = 77,6 \text{ mm}$ (aritmetický průměr hodnot ze souboru)
výsledek měření:	$\phi_p = (77,6 \pm 0,1) \text{ mm}$

**Průměr nádoby s ricinovým olejem**

Tab. 2: Průměr nádoby s ricinovým olejem

č.m.	1	2	3	4	5
$\phi_r$ [mm]	77,6	77,7	77,7	77,1	77,6

přístroj:	posuvné měřidlo
přesnost přístroje:	$\Delta[\phi_r] = 0,1 \text{ mm}$
standardní odchylka:	$\sigma[\phi_r] = 0,1 \text{ mm}$
krajní statistická chyba:	$3\sigma[\phi_r]$
chyba měření:	$\varepsilon[\phi_r] = \sqrt{\Delta[\phi_r]^2 + (3\sigma[\phi_r])^2}$
očekávaná hodnota:	$\mu[\phi_r] = 77,5 \text{ mm}$ (aritmetický průměr hodnot ze souboru)
výsledek měření:	$\phi_r = (77,5 \pm 0,4) \text{ mm}$

**Vzdálenost značek na nádobě s parařinovým olejem**

$$h_p = 204,5 \text{ mm}$$

přístroj:	pásové měřidlo
přesnost přístroje:	$\Delta[h_p] = 1 \text{ mm}$
chyba měření:	$\varepsilon[h_p] = \Delta[h_p]$ (statistická chyba je malá ve srovnání s přesností přístroje)
očekávaná hodnota:	$\mu[h_p] = 204,5 \text{ mm}$
výsledek měření:	$h_p = (204,5 \pm 1,0) \text{ mm}$

**Vzdálenost značek na nádobě s ricinovým olejem**

$$h_r = 204,5 \text{ mm}$$

přístroj:	pásové měřidlo
přesnost přístroje:	$\Delta[h_r] = 1 \text{ mm}$
chyba měření:	$\varepsilon[h_r] = \Delta[h_r]$ (statistická chyba je malá ve srovnání s přesností přístroje)
očekávaná hodnota:	$\mu[h_r] = 204,5 \text{ mm}$
výsledek měření:	$h_r = (204,5 \pm 1,0) \text{ mm}$

**Pády kuliček v parařinovém oleji**

Tab. 3: Pády malých kuliček v parařinovém oleji

$d_{p,m,i} [\text{mm}]$	1,570	1,470	1,465	1,560	1,540	1,600
$d_{p,m,i} [\text{mm}]$	1,540	1,520	1,510	1,540	1,575	1,620
$t_{p,m,i} [\text{s}]$	3,72	3,63	3,68	3,68	3,56	3,50
$\eta_{p,m,i} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	0,042	0,038	0,038	0,042	0,041	0,043
$\varepsilon[\eta_{p,m,i}] [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	0,003	0,004	0,004	0,003	0,004	0,003

$\eta_p$  jsem změřil podle (3).

přístroje:	dílenský mikroskop, ruční stopky
přesnosti přístrojů:	$\Delta[d_{p,m,i}] = 0,01 \text{ mm}$ $\Delta[t_{p,m,i}] = 0,2 \text{ s}$ (přesnost ručních stopek jsem určil jako přesnost experimentátora)
chyba měření:	$\varepsilon[\eta_p] = 0,004 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (podle (7))
očekávaná hodnota:	$\mu[\eta_p] = 0,041 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (podle (7))
výsledek měření:	$\eta_p = (0,041 \pm 0,004) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

**Pády kuliček v ricinovém oleji**

Tab. 4: Pády malých kuliček v ricinovém oleji

$d_{r,m,i} [\text{mm}]$	1,480	1,605	1,490	1,555	1,520	1,410
$d_{r,m,i} [\text{mm}]$	1,495	1,510	1,460	1,515	1,520	1,530
$t_{r,m,i} [\text{s}]$	89,50	89,53	89,63	88,59	87,41	87,44
$\eta_{r,m,i} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	0,88	0,96	0,86	0,93	0,89	0,84
$\varepsilon[\eta_{r,m,i}] [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	0,03	0,18	0,06	0,08	0,01	0,21

Tab. 5: Pády velkých kuliček v ricinovém oleji

$d_{r,v,i} [\text{mm}]$	2,525	2,580	2,590	2,605	2,595
$d_{r,v,i} [\text{mm}]$	2,530	2,595	2,555	2,625	2,650
$t_{r,v,i} [\text{s}]$	33,75	33,53	34,44	34,22	32,85
$\eta_{r,v,i} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	0,98	1,02	1,04	1,07	1,03
$\varepsilon[\eta_{r,v,i}] [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	0,01	0,02	0,05	0,03	0,07

$\eta_r$  jsem změřil podle (3).

přístroje:	dílenský mikroskop, ruční stopky
přesnosti přístrojů:	$\Delta[d_{r,m,i}] = 0,01 \text{ mm}$ $\Delta[d_{r,v,i}] = 0,01 \text{ mm}$ $\Delta[t_{r,m,i}] = 0,2 \text{ s}$ (přesnost ručních stopek jsem určil jako přesnost experimentátora) $\Delta[t_{r,v,i}] = 0,2 \text{ s}$ (přesnost ručních stopek jsem určil jako přesnost experimentátora)
chyba měření:	$\varepsilon[\eta_r] = 0,10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (podle (7))
očekávaná hodnota:	$\mu[\eta_r] = 0,95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (podle (7))
výsledek měření:	$\eta_r = (0,95 \pm 0,10) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

## Diskuse

[4] udává hodnotu dynamické viskozity parařínového oleje:  $1,018 \cdot 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a ricinového oleje:  $9,89 \cdot 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  při teplotě  $20^\circ\text{C}$  a tlaku  $101,325 \text{ kPa}$ .

Změřená hodnota dynamické viskozity ricinového oleje se shoduje v rámci chyby s tabelovanou hodnotou. Značná část nepřesnosti měření byla způsobena nepřesností měření doby pádu, tedy reakční dobou člověka.

Naproti tomu změřená hodnota dynamické viskozity parařínového oleje je oproti tabelované přibližně poloviční. Nabízí se pochopitelně vysvětlení vyšší teplotou při měření (viz *podmínky měření*), rozdíl teplot je však malý v porovnání s rozdílem viskozit. Měření bylo pravděpodobně zatíženo systematickou chybou, způsobenou příliš velkým Reynoldsovým číslem, a tedy nesplněním podmínky platnosti vzorce (3).

[4] udává hustotu skla:  $2200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} - 3900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Naměřené hustoty velkých i malých skleněných kuliček spadají do tohoto intervalu.

## Závěr

Stokesovou metodou jsem změřil dynamickou viskozitu parařínového oleje:

$$\eta_p = (4,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

a ricinového oleje:

$$\eta_r = (9,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

Při měření viskozity ricinového oleje byly splněny podmínky platnosti modifikovaného Stokesova vzorce, v případě měření viskozity ricinového oleje bylo Reynoldsovo číslo příliš velké.

Pyknometrickou metodou jsem změřil hustotu malých skleněných kuliček:

$$\rho_m = (2,5339 \pm 0,0006) \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

a hustotu velkých skleněných kuliček:

$$\rho_v = (2,5214 \pm 0,0006) \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

## Reference

- [1] BROŽ, Jaromír. *Základy fyzikálních měření (I)*. 1. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n. p., 1967.
- [2] LANDAU, L., LIFŠIC, E. *Statističeskaja fizika*. Moskva: Nauka, 1951.
- [3] KAY, Steven M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*. Prentice Hall, Ch. 7, 1993. ISBN 0-13-345711-7.
- [4] KOTLÍK, B., LANK, V., RŮŽIČKOVÁ, K., VONDRA, M., VOŠICKÝ, Z. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro SŠ a nižší ročníky víceletých gymnázií*. 1. vydání. Havlíčkův Brod: Fragment, 2003. ISBN 80-7196-264-3.
- [5] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. 1. vydání. Praha: Prometheus, spol. s r. o., 2005. ISBN 80-7196-264-3.