

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM I.

Úloha č. VI

Název: Studium reologického chování látek

Pracoval: Pavel Ševeček

stud. skup.: F/F1X/11

dne: 12. 4. 2012

Odevzdal dne:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 – 5	
Teoretická část	0 – 1	
Výsledky měření	0 – 8	
Diskuse výsledků	0 – 4	
Závěr	0 – 1	
Seznam použité literatury	0 – 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval:..... dne

1 Pracovní úkol

1. Měřením na rotačním viskozimetru zjistěte, zda jsou kapaliny připravené pro měření newtonovské.
2. Pomocí rotačního viskozimetru určete viskozitu newtonovské kapaliny.
3. Pro neneutronovskou kapalinu změřte závislost zdánlivé viskozity na rychlosti otáčení rotoru a graficky znázorněte.
4. Změřte teplotní závislost viskozity glycerinu pomocí kuličkového viskozimetru v oboru teplot od 25 °C do 35 °C. Graficky znázorněte závislost $\eta = \eta(T)$.
5. Pyknometrickou metodou určete hustotu glycerinu a stanovte podíl vody v glycerinu. Změřenou viskozitu glycerinu srovnajte s tabelovanou hodnotou.

2 Teorie

Pro newtonovské tekutiny platí přímá úměrnost mezi rychlostí smykové deformace D a smykovým napětím σ

$$\sigma = \eta \cdot D \quad (1)$$

kde η - dynamická viskozita tekutiny - je konstantní (při konstantní teplotě), nezávislá na rychlosti deformace. Pokud tato přímá úměrnost není splněna, mluvíme o nenewtonovských tekutinách. V takovém případě je viskozita tekutiny závislá na rychlosti deformace, pro některé nenewtonovské tekutiny platí

$$\eta = m \cdot D^{n-1} \quad (2)$$

kde m, n jsou pro danou tekutinu konstanty. Je-li $n < 1$, hovoříme o pseudoplastické kapalině, je-li $n > 1$, jedná se o dilatantní kapalinu.

Viskozita tekutiny je závislá na termodynamické teplotě T , platí vztah:

$$\eta(T) = \eta_0 \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon_A}{kT}\right) \quad (3)$$

kde η_0 je konstanta, ε_A je aktivační energie, k je Boltzmannova konstanta. Pokud tuto rovnici zlogarimujeme a vyjádříme $\ln \eta$ jako funkci proměnné $t = \frac{1}{T}$, dostaneme lineární závislost

$$(\ln \eta)(t) = \ln \eta_0 + \frac{\varepsilon_A}{k} \cdot t \quad (4)$$

ze které můžeme určit ε_A .

2.1 Rotační viskozimetr

Viskozimetr HAAKE Viscotester 7 je schopen měřit viskozitu měřením odporu, který klade kapalina rotujícímu tělesu. Je-li v kapalině ponořeno těleso tvaru válce o výšce l a poloměru r , otáčející se s úhlovou rychlostí ω , pak kapalina na těleso působí momentem

$$M = \frac{\eta}{4\pi r^2 l \omega} \quad (5)$$

kde η je hledaná viskozita kapaliny. Více v [1].

2.2 Kuličkový viskozimetr

Pohybuje-li se kulička o poloměru r rychlostí v v kapalině o viskozitě η , působí na ni mimo gravitační a vztlakové síly také odporová síla daná Stokesovým vztahem:

$$F_s = 6\pi\eta r v \quad (6)$$

Známe-li navíc hustotu kuličky a hustotu kapaliny, ve které se kulička pohybuje, můžeme z rychlosti kuličky určit viskozitu kapaliny, a to podle vztahu

$$\eta(\tau) = K(\rho_1 - \rho_2)\tau \quad (7)$$

kde K je konstanta pro danou kuličku, ρ_1 je hustota kuličky, ρ_2 hustota roztoku a τ doba, za kterou projde kulička mezi ryskami.

2.3 Pyknometrická metoda

Hustotu roztoku glycerin-voda změříme pyknometrickou metodou. Nejprve zvažíme samotný pyknometr (hmotnost m_1), poté pyknometr naplněný vodou o hustotě ρ_2 (hmotnost m_2) a nakonec pyknometr naplněný roztokem o hledané hustotě ρ (hmotnost m_3). Hustotu ρ potom určíme vztahem

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \rho_2 \quad (8)$$

3 Měření

Nejprve změříme hustotu roztoku glycerin-voda pyknometrickou metodou. Hustota vody je při teplotě 23 °C rovna $\rho_2 = 997 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Změřím postupně hmotnosti m_0, m_1, m_2 jak je uvedeno v teorii, dostávám:

- $m_0 = 24,8 \text{ g}$

- $m_1 = 49,7 \text{ g}$

- $m_2 = 56,2 \text{ g}$

Počítám s chybou měření hmotnosti $\Delta m = 0,1 \text{ g}$. Výslednou hustotu pak určím podle vztahu (8), chybu hustoty určím podle zákona přenosu chyb dle [2].

$$\rho = (1257 \pm 9) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Z tabulky [3] pak můžeme odečíst koncentraci roztoku; vidíme, že nejlépe odpovídá koncentrace 97 %.

Nyní potřebujeme znát funkční závislost $\rho(t)$. K tomu využijeme opět tabulky [3], kde jsou uvedeny hustoty 97 procentního roztoku pro $t = 25 \text{ °C}$ a $t = 30 \text{ °C}$, označíme příslušné hustoty ρ_{25} a ρ_{30} . Pokud budeme předpokládat, že se hustota mění lineárně, dostaneme pro hustotu ρ vztah:

$$\rho(t) = \rho_{25} + \frac{t - 25}{30 - 25} \cdot (\rho_{30} - \rho_{25}) \quad (9)$$

3.1 Rotační viskozimetr

Měříme viskozitu 97% roztoku glycerin-voda a škrobu. Chyba viskozity udávaná výrobcem je $\Delta\eta = 1 \%$ z rozsahu. Měření provádíme s různými rotory (označené L1, L2, L3) a při různých rychlostech. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1 a 2, zobrazeny jsou v grafech 1 a 2.

rotor	$\omega [2\pi\cdot\text{s}^{-1}]$	$\eta [\text{mPa}\cdot\text{s}]$
L1	3	724 ± 20
	6	720 ± 10
L2	30	732 ± 10
	30	880 ± 30
L3	20	870 ± 20
	50	840 ± 15
	60	820 ± 12
	100	780 ± 10

Tabulka 1: Hodnoty viskozity η roztoku glycerin-voda, měřené při úhlové rychlosti ω .

Z grafů 1 a 2 můžeme rozhodnout, zda jsou měřené kapaliny newtonovské.

U roztoku glycerin-voda (graf 1) pozorujeme velké rozdíly mezi naměřenými viskozitami; proložíme-li však naměřenými body přímkou, dostáváme tuto funkční závislost:

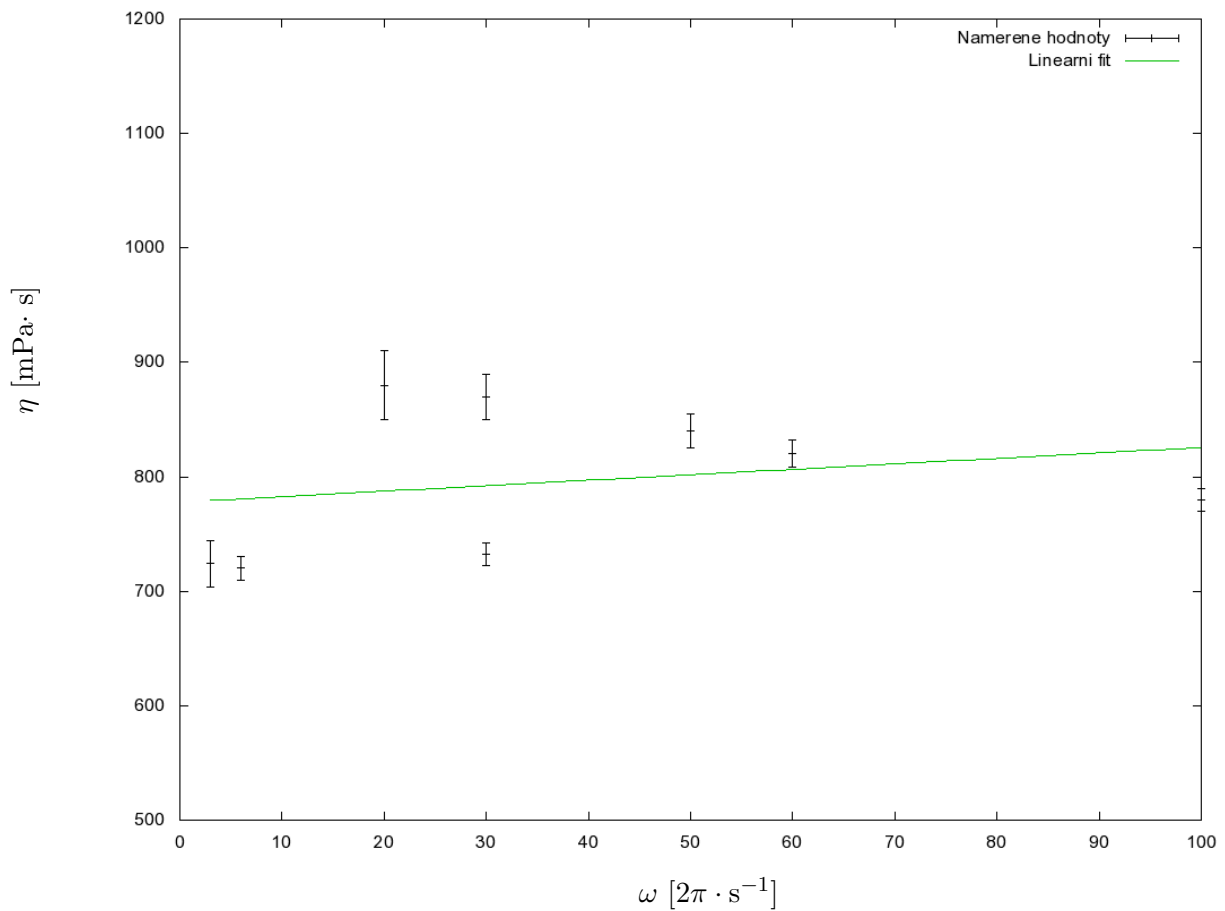
$$f(x) = (0,4 \pm 0,8) \cdot x + (777 \pm 39)$$

Zdá se, že viskozita spolu s úhlovou rychlostí roste, chyba lineárního členu je však obrovská (až 200 %), můžeme tedy předpokládat, že je viskozita konstantní, a její hodnota je

$$\eta = (795 \pm 56) \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

rotor	ω [$2\pi \cdot s^{-1}$]	η [mPa·s]
L2	4	1510 ± 50
	5	1430 ± 40
	6	1374 ± 30
	10	1233 ± 25
	12	1192 ± 20
	20	1128 ± 15
L3	12	1180 ± 50
	20	1120 ± 40
	30	1040 ± 30
	50	1010 ± 20
	60	960 ± 13
	100	910 ± 10

Tabulka 2: Hodnoty viskozity η škrobu, měřené při úhlové rychlosti ω .

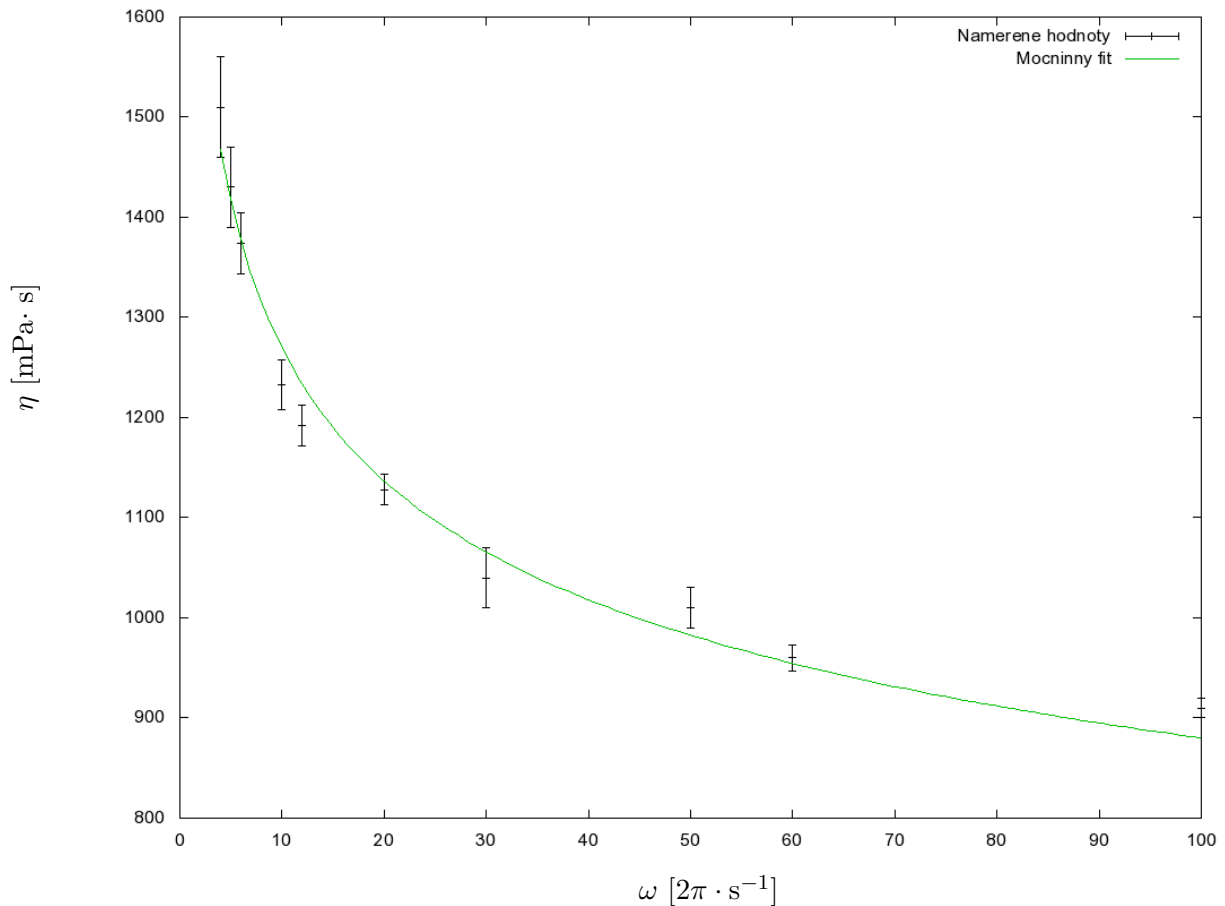


Obrázek 1: Závislost viskozity glycerinu η na rychlosti otáčení ω . Naměřenými hodnotami je proložena funkce $f(x) = a \cdot x + b$.

U škrobu (graf 2) vidíme, že viskozita s rostoucí ω klesá, jedná se tedy o kapalinu neneutronovskou. V grafu jsou naměřené hodnoty proloženy funkcí

$$f(x) = (1830 \pm 39) \cdot x^{(-0,159 \pm 0,008)}$$

a je vidět, že se shodují velice dobře.



Obrázek 2: Závislost viskozity škrobu η na rychlosti otáčení ω . Naměřenými hodnotami je proložena funkce $f(x) = m \cdot x^n$.

3.2 Kuličkový viskozimetr

Předpokládáme tedy, že roztok má koncentraci 97 % a že závislost hustoty roztoku na teplotě je dána vztahem (9). Měříme tedy čas, za který projde kulička mezi druhou a třetí ryskou, kdy už lze rychlost kuličky považovat za mezní. Kvůli tomu je potřeba opravit vztah (7), neboť měříme poloviční čas, vycházíme tedy ze vztahu

$$\eta(\tau) = 2K(\rho_1 - \rho_2)\tau \quad (7')$$

Chyba měření času je přibližně $\Delta\tau = 0,3$ s, neboť není příliš jasné, kdy přesně projde dolní okraj kuličky přes rysku. Chybu viskozity tedy určím jednoduše

$$\Delta\eta = 2K(\rho_1 - \rho_2)\Delta\tau \quad (10)$$

Měříme postupně pro teploty od 25 do 35 °C, zvyšujeme po 1 stupni. Naměřené výsledky jsou uvedeny v tabulce 1. Závislost $\eta(T)$ je zobrazena v grafu 3, závislost $\ln \eta(\frac{1}{T})$ je v grafu 4. Chybu $\frac{1}{T}$ spočteme podle zákona přenosu chyb:

$$\Delta \frac{1}{T} = \frac{\Delta T}{T^2} \quad (11)$$

Chybu $\ln \eta$ spočteme stejným způsobem:

$$\Delta \ln \eta = \frac{\Delta \eta}{\eta} \quad (12)$$

t [°C]	T [K]	τ [s]	ρ [kg·m ⁻³]	η [mPa·s]	$\frac{1}{T}$ [10 ⁻³ s ⁻¹]	$\ln \eta$ [mPa·s]	η_0 [mPa·s]
25	298	55,0	1250	534 ± 3	3,35	6,28 ± 0,01	506
26	299	47,4	1249	461 ± 3	3,34	6,13 ± 0,01	467
27	300	44,0	1249	427 ± 3	3,33	6,06 ± 0,01	431
28	301	40,9	1248	397 ± 3	3,32	5,98 ± 0,01	399
29	302	37,1	1248	361 ± 3	3,31	5,89 ± 0,01	369
30	303	35,6	1247	345 ± 3	3,30	5,84 ± 0,01	342
31	304	32,5	1246	315 ± 3	3,29	5,75 ± 0,01	316
32	305	30,5	1246	297 ± 3	3,28	5,69 ± 0,01	293
33	306	28,5	1245	277 ± 3	3,27	5,62 ± 0,01	271
34	307	26,5	1245	258 ± 3	3,26	5,55 ± 0,01	252
35	308	24,9	1244	242 ± 3	3,25	5,49 ± 0,01	233

Tabulka 3: Naměřené a odvozené veličiny při měření kuličkovým viskozimetrem. η_0 udává očekávanou viskozitu podle [4].

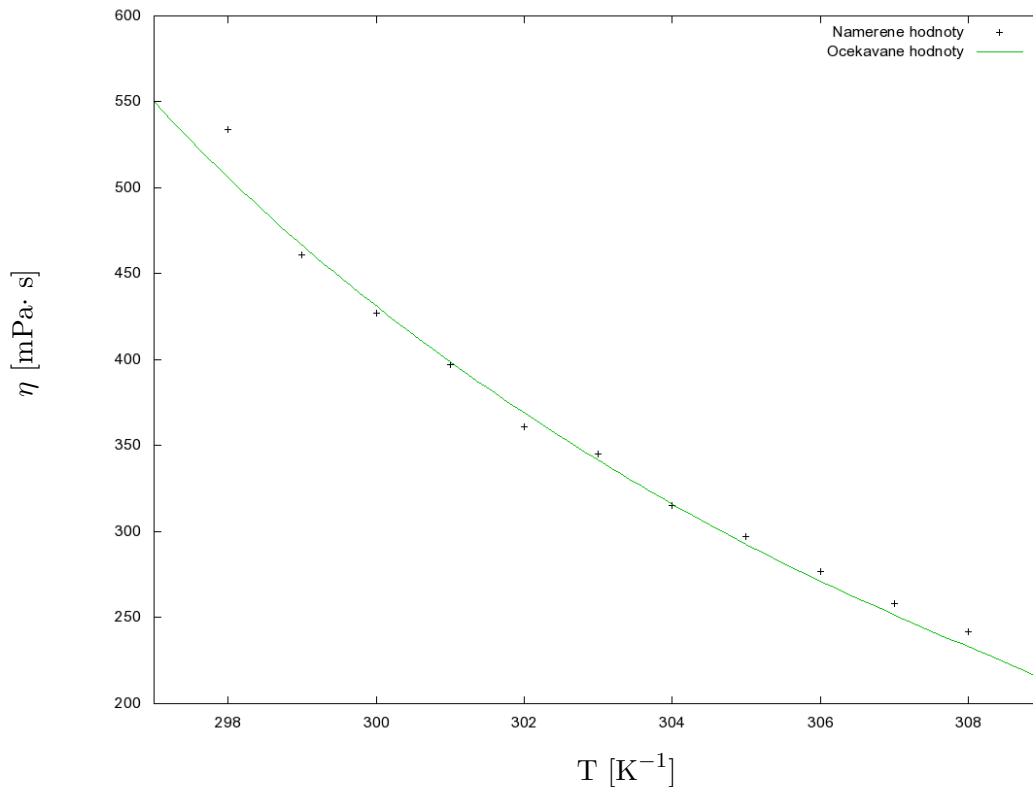
Proložíme-li hodnotami $\ln \eta$ a $\frac{1}{T}$ lineární funkci $f(x) = a \cdot x + b$, můžeme ze vztahu (4) určit aktivační energii ε_A . Koeficienty fitu vychází:

$$f(x) = (6,9 \pm 0,2) \cdot 10^3 \cdot x + (-17,0 \pm 0,6)$$

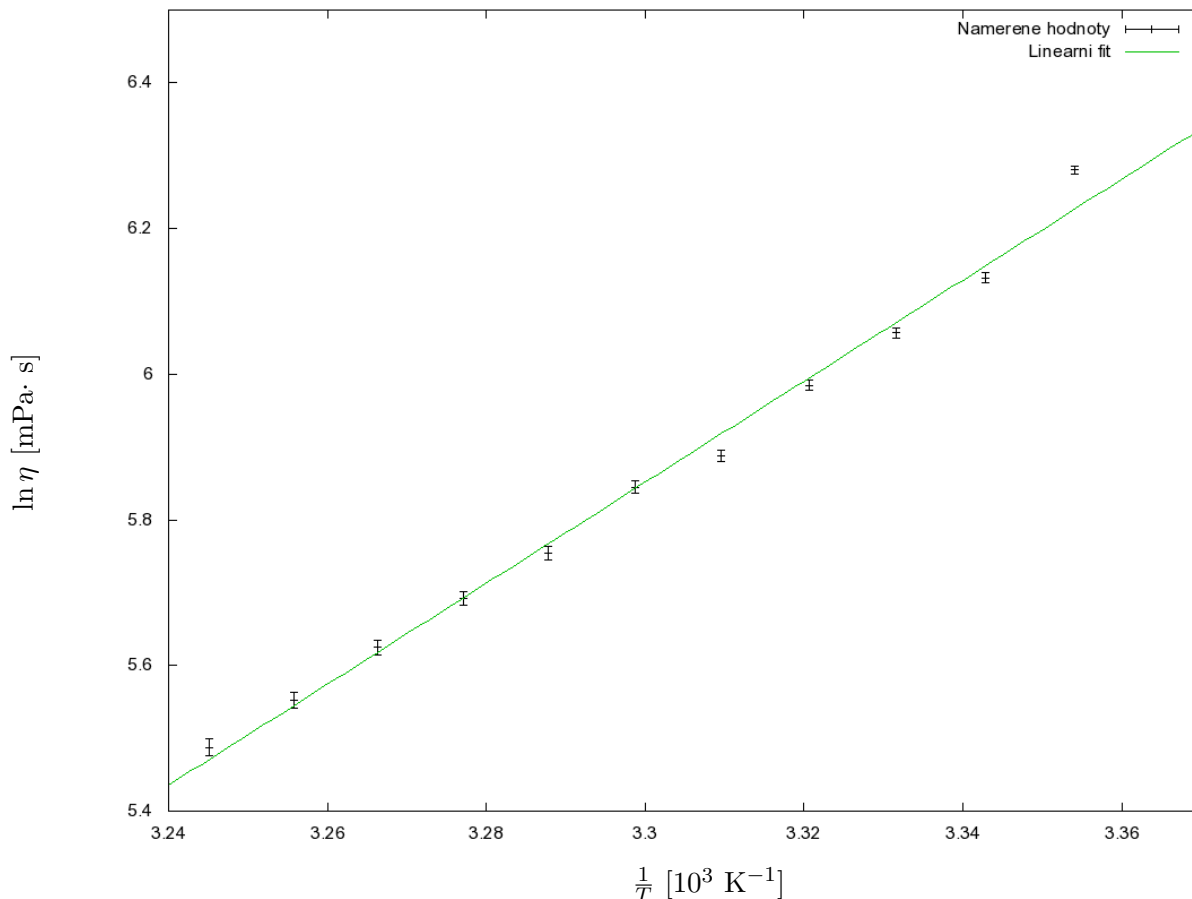
Dosadíme-li tedy Boltzmannovu konstantu $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$, dostáváme aktivační energii

$$\varepsilon_A = a \cdot k = (9,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

V tabulce 3 je pro porovnání uvedena také očekávaná viskozita η_0 , získaná z [4]. Hodnoty viskozity pro 97% roztok při teplotách 0 až 100 °C jsem proložil polynomem osmého stupně (který je vidět v grafu 3) a dopočítal tak očekávané hodnoty viskozity při teplotách 25 až 35 °C.



Obrázek 3: Závislost viskozity η na termodynamické teplotě T . Křivka v grafu představuje očekávané hodnoty viskozity podle [4].



Obrázek 4: Závislost $\ln \eta$ na $\frac{1}{T}$. Hodnotami je proložena lineární funkce, ze které lze určit aktivační energii ε_A .

4 Diskuze

Značná chyba nastává při odečítání koncentrace roztoku z tabulky [3]. V tabulce jsou uvedeny pouze hustoty při teplotách 20 a 25 °C, pro hustotu při teplotě 23 °C tedy musíme použít aproximovanou hodnotu a odtud odečíst koncentraci. Je však potřeba zaokrouhlit na celá procenta, čímž se opět dopoušíme značné chyby, neboť viskozita s rostoucí koncentrací roste velmi rychle. Podíváme-li se do tabulky [4], vidíme, že pro koncentraci 97 % je viskozita při 20 °C 765 mPa·s, pro koncentraci 100 % je to 1410 mPa·s, tedy téměř dvojnásobek. Zaokrouhlením na celá procenta tedy může vzniknout chyba až 10 %.

4.1 Rotační viskozimetr

Měření viskozity roztoku glycerin-voda pomocí rotačního viskozimetru nevyšlo příliš přesně. Přestože viskozita η by měla být při dané teplotě konstantní, z grafu 1 vidíme, že se naměřené hodnoty značně liší. Proto je také relativní chyba výsledné viskozity téměř 10 %. Nevidíme však žádný růst nebo klesání viskozity η v závislosti na ω , hodnoty jsou rozmístěny na obě strany od střední hodnoty. Při měření se viskozity pohybovaly mezi 10 % a 75 % z nastaveného rozsahu, můžeme tedy vyloučit chybu způsobenou špatným nastavením rozsahu. Je možné, že roztok nebyl teplotně homogenní, a protože je viskozita na teplotě značně závislá (viz. graf 3), dostal jsem pokaždé trochu jiný výsledek.

Naměřená viskozita je tedy $\eta = 795 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, očekávaná viskozita je $\eta_0 = 594 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. Výsledek je tedy řádově stejný jako očekávaná hodnota, chyba je však značná.

Měření škrobu vyšlo podstatně lépe než u roztoku glycerin-voda, jak lze vidět z grafu 2. Naměřené hodnoty se v rámci chyby shodují s mocninným fitem. Z tohoto důvodu můžeme vyloučit možnost, že viskozimetr špatně měří kvůli chybné kalibraci.

Škrob je tedy zřejmě neneutronovská kapalina, viskozita značně závisí na rychlosti otáčení ω .

4.2 Kuličkový viskozimetr

Měření viskozity roztoku glycerin-voda pomocí kuličkového viskozimetru vyšlo podstatně přesněji, než pomocí rotačního viskozimetru. Z tabulky 3 a grafu 3 lze vidět, že naměřené hodnoty viskozity η se velmi přesně shodují s očekávanými hodnotami η_0 . Chyba měření je nízká, protože viskozita je zde funkcí pouze času, a chyba měření času $\Delta\tau = 0,3$ s je téměř zanedbatelná vzhledem k časovým intervalům měření. Opět jsou zde přítomny systematické chyby, které byly zmíněny výše (špatné určení koncentrace, aproximace hustoty), přesto však výsledek příliš neovlivnily.

5 Závěr

Byla změřena viskozita roztoku glycerin-voda pomocí rotačního viskozimetru

$$\eta = (795 \pm 56) \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

Přibližně tak bylo potvrzeno, že glycerin je newtonovská kapalina. Při měření viskozity škrobu se ukázalo, že je škrob neneutronovská kapalina a jeho viskozita tak závisí na rychlosti smykové deformace. Tato závislost je vidět v grafu 2.

Pomocí kuličkového viskozimetru byla změřena závislost viskozity roztoku glycerin-voda, výsledek je uveden v tabulce 3 a grafu 3. Pomocí vztahu (4) byla určena aktivační energie

$$\varepsilon_A = (9,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

Pyknometrickou metodou byla určena hustota roztoku glycerin-voda

$$\rho = (1257 \pm 9) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Reference

- [1] Studijní text k fyzikálnímu praktiku I, úloha VI
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_106.pdf
- [2] J. English, *Úvod do praktické fyziky I*. Praha: Matfyzpress, 2006.
http://www.mff.cuni.cz/fakulta/mfp/download/books/english_-_uvod_do_prakticke_fyziky_1.pdf
- [3] Tabulka hustot roztoků glycerin-voda
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/glyc_density.pdf
- [4] Tabulka viskozit roztoků glycerin-voda
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/glyc_viscosity.pdf