

1 Pracovní úkoly

1. Měřením na rotačním viskozimetru zjistěte, zda jsou kapaliny připravené pro měření newtonovské.
2. Pomocí rotačního viskozimetru určete viskozitu newtonovské kapaliny.
3. Pro nenewtonovskou 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 $\eta = \eta(T)$. Určete aktivační energii.
5. Pyknometrickou metodou určete hustotu glycerinu a stanovte podíl vody v glycerinu. Změřenou viskozitu glycerinu srovnajte s tabelovanou hodnotou.

2 Teoretická část

2.1 Reologické chování látek

Rovnice toku popisuje chování viskózní tekutiny udáním závislosti smykového napětí τ a rychlostí deformace D . Jestliže tekutina splňuje Newtonův viskózní zákon, závislost mezi τ a D je lineární. Takové kapaliny říkáme *newtonovské*

$$\tau = \eta D \quad (1)$$

Konstanta úměrnosti η se nazývá dynamická viskozita tekutiny a je nezávislá na deformační rychlosti. Lze ji určit z grafu závislosti $\tau(D)$.

Kapalinám, pro které vychází viskozita podle vztahu (1) pro různé rychlosti deformace různá říkáme *nenewtonovské*. Viskozita tu není materiálovou konstantou, ale funkcí rychlosti deformace.

Viskozita je transportním jevem, při kterém dochází k přenosu hybnosti mezi vrstami proudící kapaliny. Tento proces je tepelně aktivovaný. Závislost dynamické viskozity na teplotě lze vyjádřit jako

$$\eta(T) = C \exp\left(\frac{\varepsilon_A}{k_B T}\right), \quad (2)$$

kde C je konstanta, ε_A je aktivační energie, k_B Boltzmannova konstanta a T termodynamická teplota.

2.2 Rotační viskozimetr

Rotační viskozimetr je přístroj, jehož rotor (typicky vyměnitelný) je ponořen do viskózní kapaliny, otáčí se (typicky proměnnou rychlostí) a je měřena síla potřebná pro překonání odporu proti otáčení. Na základě znalosti rychlosti otáčení a geometrie rotoru je možno určit kroutící moment rotoru a z něj viskozitu kapaliny. Moment síly M je odečítán čidlem umístěným přímo na hnací ose rotoru. Pro moment síly M platí vztah

$$M = \tau S r, \quad (3)$$

kde S je plocha pláště válce a r je poloměr válce. Po dosazení získáme vztah

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 l}, \quad (4)$$

kde l je výška válce. Rychlost deformace D závisí na úhlové rychlosti otáčení ω pro válec rotující v nekonečném prostření

$$D = 2\omega \quad (5)$$

Dosadíme-li z (5) a (4) do (1), dostaneme vztah pro dynamickou viskozitu

$$\eta = \frac{M}{4\pi r^2 l \omega}. \quad (6)$$

2.3 Kuličkový viskozimetr

Kuličkový viskozimetr je přístroj, pomocí kterého lze určit viskozitu průhledné newtonovské kapaliny. Měříme čas, který potřebuje volně padající kulička, aby urazila přesně definovanou vzdálenost. Na kuličku padající ve viskózní kapalině působí tři síly: tíhová síla G , vztlaková síla F_{vz} a odporová hydrodynamická síla F_x . Pro malé rychlosti lze odporovou hydrodynamickou sílu vyjádřit jako

$$F_x = 6\pi\eta r v, \quad (7)$$

kde η je dynamická viskozita kapaliny, r je poloměr kuličky a v je rychlost pádu. Tento vzorec platí pro kuličku padající v neohraničeném prostředí malou rychlostí, tedy při laminárním obtékání. Při pádu kuličky roste rychlost v až do mezní rychlosti, při které je výslednice sil nulová. Po dosažení mezní rychlosti je pohyb kuličky přibližně rovnoměrný.

Dynamická viskozita η (v jednotkách mPa·s) se vypočítá využitím vztahu

$$\eta = K (\rho_1 - \rho_2) t, \quad (8)$$

kde K je konstanta kuličky (dána ve specifikaci přístroje), ρ_1 hustota kuličky, ρ_2 hustota zkoumané kapaliny a t čas, za který kulička urazí dráhu vymezenou ryskami.

2.4 Měření hustoty pyknometrickou metodou

Pyknometr je nádobka se zátkou určená k přesnému měření objemu, nebo k měření hustoty kapalin, nebo drobných nenasákavých tělísek. Při měření naplníme pyknometr, přebytečnou kapalinu necháme odtéct kapilárou v zátce a pyknometr pečlivě osušíme.

Při měření hustoty ρ_2 kapaliny nejprve změříme hmotnost prázdného pyknometru m_1 , poté zvážíme pyknometr naplněný kapalinou o známé hustotě ρ . Poté zvážíme hmotnost m_3 pyknometru naplněného kapalinou o hledané hustotě. Poměr hmotností téhož objemu různých kapalin je stejný jako poměr jejich hustot. Odtud plyne [2]

$$\rho_2 = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \rho \quad (9)$$

3 Výsledky měření

Měření probíhalo za teploty $(24, 3 \pm 0, 4)^\circ\text{C}$, vzdušné vlhkosti $(36 \pm 3)\%$ a atmosférického tlaku $(980 \pm 2)\text{hPa}$.

K měření jsme používali rotační viskozimetr *HAAKE Viscotester 7*, který je vybaven čtyřmi různými rotory (L1 - L4), rychlost otáčení je možno volit v rozsahu 0,1 - 200 otáček za minutu. Lze měřit viskozitu v rozsahu $10 - 6 \cdot 10^6$ mPa·s s relativní chybou 1% ze zvoleného rozsahu [1]. Naplnili jsme odměrný válec 600 ml kapaliny a ponořili rotor až po rysku, která na něm byla vyznačena.

Používali jsme také kuličkový viskozimetr *HAAKE*, který se skládá ze skleněného válce a sady čtyř kuliček. Používali jsme ocelovou kuličku o hmotnosti 16,12 g, hustotě $\rho = 8,125 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, průměru 15,59 mm a konstantě $K = 0,1144 \text{ mPa}\cdot\text{cm}^{-3}\text{g}^{-1}$. Skleněný válec byl naplněn měřenou kapalinou a obklopen vodní lázní, kterou jsme kapalinu zahřívali. Ve viskozimetru byl umístěn teploměr. Měření probíhalo tak, že jsme viskozimetr otočili a stopkami měřili dobu pádu kuličky mezi vyznačenými ryskami.

V tabulkách 1 a 2 jsou zanesena měření viskozity škrobu a glycerinu rotačním viskozimetrem. Naměřená hodnota viskozity glycerinu se nemění s rychlostí otáčení rotoru, je to tedy newtonovská kapalina. Viskozita škrobu se mění, je to tedy nenewtonovská kapalina. Úhlová rychlost otáčení je v grafu uvedena v jednotkách rpm, což je počet otáček za minutu.

Dynamickou viskozitu glycerinu jsme určili dle nejpřesnějšího měření na $(843 \pm 10) \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Pro nenewtonovskou kapalinu jsme změřili závislost zdánlivé viskozity na rychlosti otáčení rotoru pro rotory L2 a L3. Závislosti jsme vykreslili do grafů (Obr. 1 a Obr.2) Rozhodli jsme se závislosti vykreslovat do dvou různých grafů, protože v jednom nebyl patrný vývoj viskozity pro rotor L2.

Pro měření hustoty pyknometrickou metodou jsme použili údaj z [5] pro hustotu vody $\rho = 997,04 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Naměřené hmotnosti jsme zapsali do tabulky 3 a vypočítali jsme hustotu roztoku glycerinu s vodou. Po porovnání s tabulkou [3] jsme usoudili, že náš roztok byl ve složení 98% glycerinu (hustota $\rho_2 = 1252,90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pro teplotu $25 \text{ }^\circ\text{C}$). Tabulka [4] udává pouze hodnoty viskozity roztoku glycerinu a vody pro teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Naše naměřená hodnota viskozity se nachází přibližně uprostřed tohoto intervalu, což dobře odpovídá teplotě glycerolu, kterou jsme odhadli jako teplotu vzduchu v místnosti.

Změřili jsme teplotní závislost viskozity glycerinu pomocí kuličkového viskozimetru a zanesli data do tabulky 4. Hodnoty viskozity jsou uvedeny s chybou, kterou jsme spočítali pomocí metody přenosu chyb. Chybu, vzniklou v důsledku naší reakční doby jsme odhadli na $0,7 \text{ s}$. Chybu jsme počítali dle vzorce

$$s_\eta = \sqrt{\frac{s_K}{K} + \frac{s_{\rho_1}}{\rho_1} + \frac{s_{\rho_2}}{\rho_2} + \frac{s_t}{t} \bar{K} (\bar{\rho}_1 - \bar{\rho}_2) \bar{t}}, \quad (10)$$

kde s_X značí chybu veličiny X a \bar{X} značí střední hodnotu veličiny X . Graf jsme proložili křivkou ve tvaru

$$f(T) = C \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (11)$$

kde A vyjadřuje výraz ε_A/k_B . Vyšly nám hodnoty $C = (1,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-9}$ a $A = (7528 \pm 85) \text{ K}$. Po přenásobení A Boltzmannovou konstantou dostáváme $\varepsilon_A = (10,38 \pm 0,09) \cdot 10^{-20} \text{ J}$.

4 Diskuze výsledků

Zjištění, že glycerin je newtonovská kapalina a škrob neneutronovská jsme očekávali. Chyba byla dána přesností rotačního viskozimetru

Tabelované hodnoty dynamické viskozity glycerolu jsou pouze pro teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $30 \text{ }^\circ\text{C}$, hodnota viskozity glycerolu se v tomto intervalu změní o 100%. Naše naměřená hodnota do tohoto intervalu spadá, vzhledem k rozptylu hodnot ale těžko usuzovat na to, jak přesně jsme měřili. Chyba je daná pouze přesností rotačního viskozimetru.

Závislost zdánlivé viskozity škrobu na rychlosti otáčení rotoru vypadá tak, jak bychom podle teorie očekávali, s rostoucí rychlostí otáčení rotoru klesá zdánlivá viskozita. Chyba je daná přesností rotačního viskozimetru.

Hustotu glycerolu nejvíce ovlivňovala chyba tabelované hodnoty hustoty destilované vody.

Měření teplotní závislosti glycerolu kuličkovým viskozimetrem nejvíce ovlivňovala naše reakční doba, kterou jsme odhadli na $0,7 \text{ s}$ ($0,35 \text{ s}$ pro začátek měření a $0,35 \text{ s}$ pro konec měření). Pro naměřenou hodnotu aktivační energie jsme nenašli odpovídající tabelovanou hodnotu.

5 Závěr

Určili jsme, že glycerin je newtonovská kapalina a škrob je neneutronovská kapalina. Pomocí rotačního viskozimetru jsme určili dynamickou viskozitu glycerinu na $(843 \pm 10) \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Pro škrob jsme proměřili závislost zdánlivé viskozity na úhlové rychlosti otáčení dvou různých rotorů. Závislosti jsme vynesli do grafů (viz obrázky 1 a 2).

Změřili jsme teplotní závislost viskozity glycerinu pomocí kuličkového viskozimetru v oboru teplot od $25 \text{ }^\circ\text{C}$ do $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Proložili jsme tuto závislost funkcí

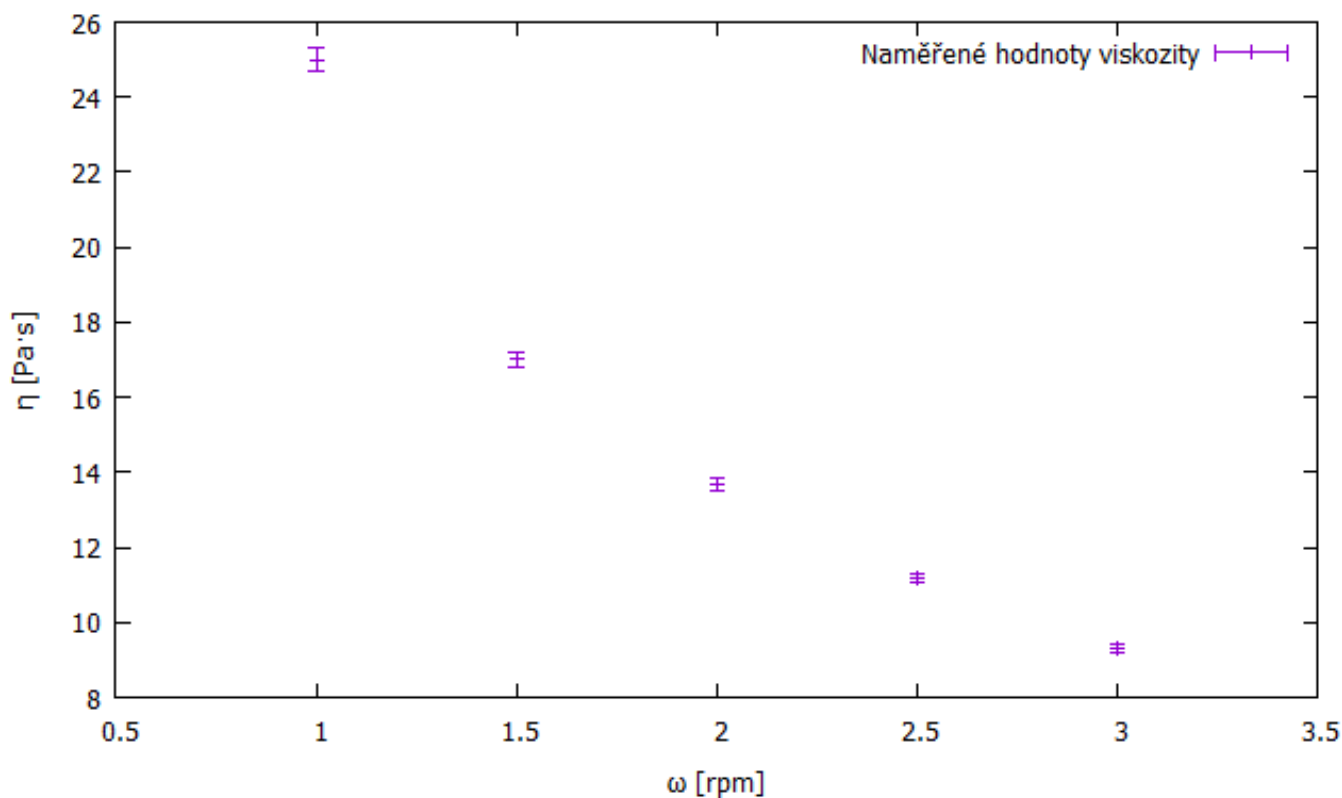
$$f(T) = C \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (12)$$

pro hodnoty $C = (1,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-9}$ a $A = (7528 \pm 85) \text{ K}$. Z hodnoty A jsme potom vypočítali aktivační energii $\varepsilon_A = (10,38 \pm 0,09) \cdot 10^{-20} \text{ J}$.

Pyknometrickou metodou jsme určili hustotu glycerolu na $\rho_2 = (1252,86 \pm 0,01) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Usoudili jsme, že je to 98% roztok glycerinu ve vodě. Naše naměřená hodnota viskozity glycerolu je v souladu s tabelovanou hodnotou.

6 Seznam použité literatury

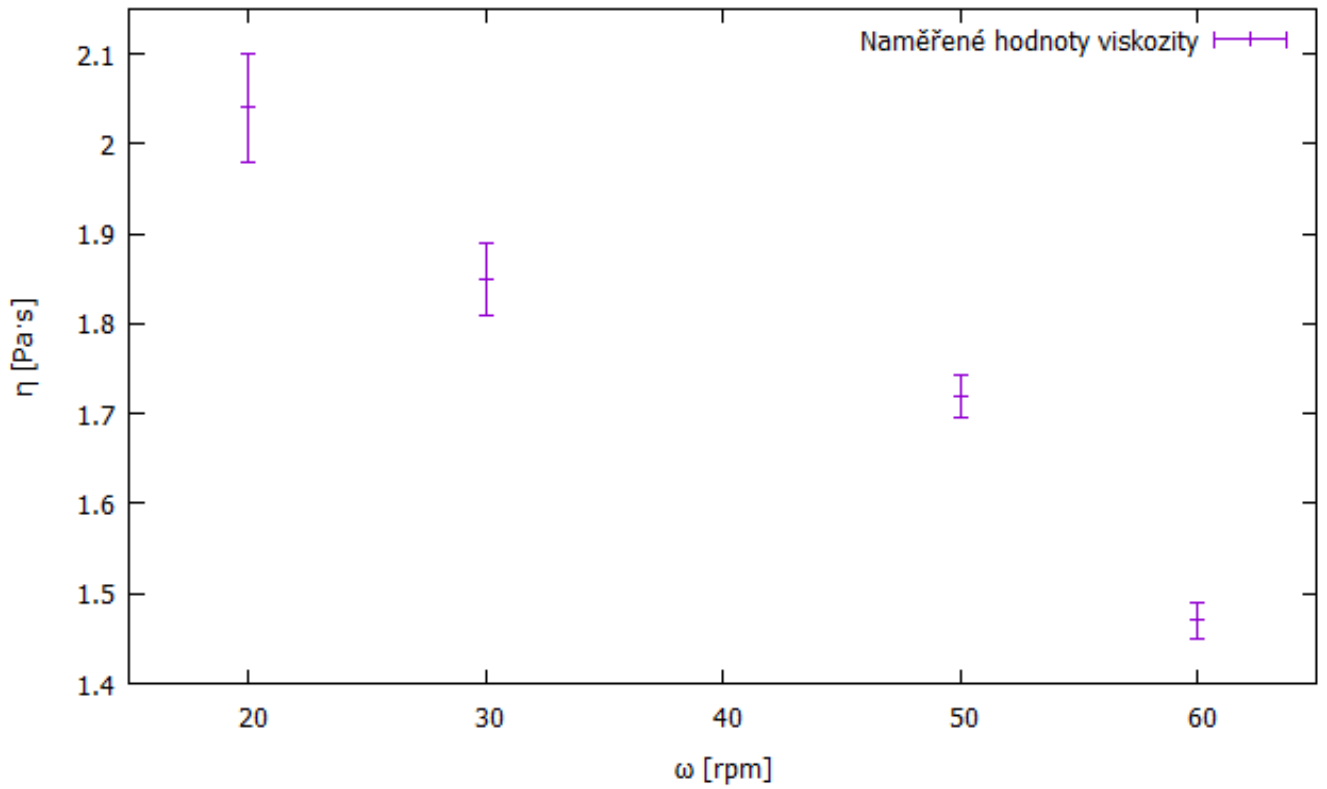
- [1] Studijní text k Fyzikálnímu praktiku I., úloha VI,
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_106.pdf [17.4.2018]
- [2] Studijní text k Fyzikálnímu praktiku I., pyknometrická metoda pro určení hustoty kapalin,
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_106_pyknometr.pdf [17.4.2018]
- [3] Studijní text k Fyzikálnímu praktiku I., Tabulka hustot roztoku glycerinu a vody,
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/glyc_density.pdf [17.4.2018]
- [4] Studijní text k Fyzikálnímu praktiku I., Tabulka viskozit roztoku glycerinu a vody,
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/glyc_density.pdf [17.4.2018]
- [5] BROŽ J., ROSKOVEC V. a VALOUCH M: Fyzikální a matematické tabulky, SNTL, 1. vyd. Praha 1980



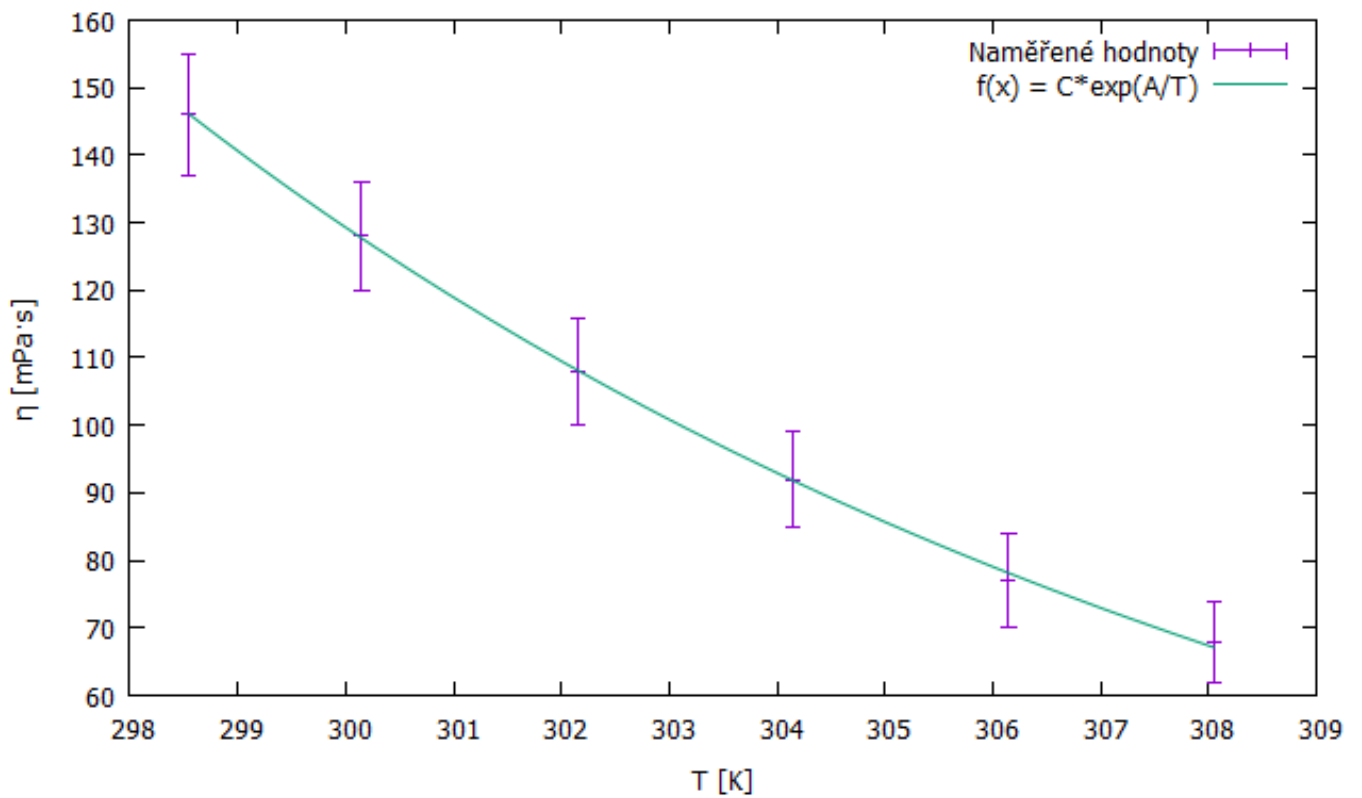
Obrázek 1: Graf závislosti naměřené zdánlivé viskozity η škrobu na úhlové rychlosti ω otáčení rotoru L2.

Tabulka 1: Charakteristiky měření rotačním viskozimetrem a naměřená dynamická viskozita glycerinu

rotor	otáčky [rpm]	maximální rozsah [mPa·s]	teplota [°C]	η [mPa·s]
L1	3	2000	23,9	(843±20)
L1	5	1200	23,9	(841±12)
L1	6	1000	24,0	(843±10)



Obrázek 2: Graf závislosti naměřené zdánlivé viskozity η škrobu na úhlové rychlosti ω otáčení rotoru L3.



Obrázek 3: Graf závislosti viskozity naměřené kuličkovým viskozimetrem na teplotě

Tabulka 2: Charakteristiky měření rotačním viskozimetrem a naměřená dynamická viskozita škrobu

rotor	otáčky [rpm]	maximální rozsah [mPa·s]	teplota [°C]	η [mPa·s]
L3	20	6000	23,9	(2040±60)
L3	30	4000	23,8	(1850±40)
L3	50	2400	23,9	(1720±24)
L3	60	2000	24,0	(1470±20)
L2	1,0	30000	23,7	(25000±300)
L2	1,5	20000	23,8	(17000±200)
L2	2,0	15000	23,6	(13680±150)
L2	2,5	12000	23,6	(11160±120)
L2	3,0	10000	23,5	(9300±100)

Tabulka 3: Naměřené hmotnosti při určování hustoty glycerinu pyknometrickou metodou a vypočtená hodnota hustoty

m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	ρ_2 [kg·m ⁻³]
(28,768 ± 0,001)	(53,592 ± 0,001)	(59,961 ± 0,001)	1252,86

Tabulka 4: Naměřené doby pádu kuličky při určování viskozity glycerinu kuličkovým viskozimetrem

T [°C]	Čas t [mm:ss]	η [mPa·s]
25,4	3:06,01	(146±9)
27,0	2:42,93	(128±8)
29,0	2:17,82	(108±8)
31,0	1:57,56	(92±7)
33,0	1:38,46	(77±7)
34,9	1:26,84	(68±6)