

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE		KATEDRA FYZIKY	
LABORATORNÍ CVIČNÍ Z FYZIKY			
Jméno Anna Sereda		Datum měření 28.04.20	
Stud. rok 2019-2020	Ročník I	Datum odevzdání 06.05.20	
Stud. skupina 35	Lab. skupina	Klasifikace	
Číslo úlohy	Název úlohy Měření viskozity kapalin Stokesovou metodou		



B3B02FY1

Protokol 1 : Měření viskozity kapalin Stokesovou metodou

1 Zadání

1.1 Úkol měření

Změřte dynamickou viskozitu glycerinu a ricinového oleje pomocí Stokesova viskozimetru.

1.2 Měřicí přístroje a jejich přesnost

Tabulka 1: Přesnost použitých přístrojů / veličiny

nazév přístroje	přesnost
Metr / L	2 mm
Hustoměr EXA THERM / ρ	5 kdm ⁻³
Mikrometr SOMET / d	0,01 mm
Váhy KERN ABT 320-4M / m	0,1 mg
Ruční stopky CASIO / t	0,01 s
Laboratorní teploměr / T	0,1 °C

1.3 Postup měření

Postup měření je stejný jak pro obě kapaliny (viz návod pro dáne laboratorní měření).

1. Do Petriho misky si odpočítejte 12 kuliček a změřte jejich poloměr
2. Pomocí předvážek určete přibližnou hmotnost Petriho misky s kuličkami. Na analytických vahách zjistěte hmotnost kuliček tak, že nejdříve zvážíte Petriho miskou s kuličkami a pak **stejnou** Petriho miskou bez kuliček.
3. Na „zkumavce s měřenou kapalinou si nastavte a změřte vzdálenost gumových kroužků, mezi kterými budete měřit dobu pádu kuliček. Horní kroužek umístěte alespoň 5 cm pod hladinu.
4. Pomocí dvojité olovnice zkontrolujte a případně nastavte svislý směr „zkumavky .
5. Pomocí stopek změřte dobu pádu kuliček mezi gumovými kroužky. Nejmenší a největší naměřenou hodnotu vyřaďte.
6. Pomocí hustoměru odečtěte hustotu kapaliny.
7. S ohledem na výraznou teplotní závislost viskozity na teploměru odečtěte teplotu a uveďte ji u výsledku vašeho měření.

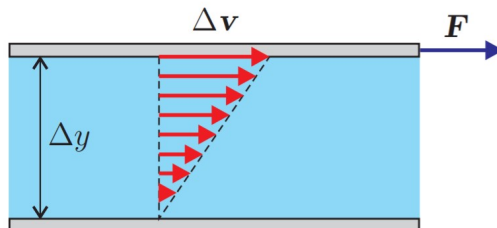
2 Teoretický rozbor úlohy

2.1 Viskozita

Viskozita je jednou ze základních charakteristik kapalin a odlišuje je od pevných látek. Jde o veličinu charakterizující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, větší viskozita znamená větší brzdění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině.

Pro ideální kapalinu má viskozita nulovou hodnotu. Kapaliny s nenulovou viskozitou se označují jako **viskózní** (vazké). Viskozita tělesných tekutin se většinou udává v relativních jednotkách, kdy 1 = viskozita vody. Viskozita např. plazmy je 2 (2 krát vyšší než viskozita vody), viskozita krve je vzhledem k obsahu krvinek vyšší než u plazmy a její průměrná hodnota je 4.[2]

Pokud se mezi dvěma rovnoběžnými deskami nachází viskózní tekutina (viz obr. 1) a desky se navzájem pohybují různými rychlostmi, je k udržení konstantní rychlosti třeba působit silou.



Obrázek 1: Demonstrace působení třecí síly kapaliny k udržení konstantní rychlosti (převzato z návodu [1])

Z pozorování lze vyvodit závěr, že proti vzájemnému pohybu desek působí kapalina třecí silou, pro jejíž velikost platí [1]

$$F = \eta S \frac{\Delta v}{\Delta y}, \quad (1)$$

kde Δv je vzájemná rychlost obou desek, Δy je jejich vzdálenost, S plocha a koeficient úměrnosti η nazýváme součinitel dynamické viskozity dané kapalinou [1].

Newtonsky vzorec (1), platí pouze pro newtonovské kapaliny právě tehdy, když $\frac{\rho \cdot \Delta v \Delta y}{\eta} < 1500$, kde ρ je hustota kapaliny. Při splnění této podmínky gradient rychlosti je konstantní.[1]

V mnoha případech je rozložení rychlostí v proudící tekutině složitější než v předchozím případě. Pro tyto účely je výhodné používat vzorec (1) v obecnějším (diferenciálním) tvaru

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

kde $\tau = \frac{F}{S}$ je smykové napětí. Kapalinám, pro které je tečné napětí přímo úměrné gradientu rychlosti, platí pro ně vztah (2), říkáme newtonovské a patří mezi ně např. voda, minerální oleje, lín, atd. I reálné plyny mají malou viskozitu, která je příčinou aerodynamického odporu. Viskozita tekutin je výrazně závislá na teplotě. Zatímco u kapalin s teplotou klesá, u plynů s teplotou roste.

2.2 Odpor prostředí

Odpor prostředí je soubor všech sil, kterými plyn nebo kapalina působí proti pohybu těles v něm. Odpor je způsoben třením, které vzniká při kontaktu tělesa a prostředí.

Protože pohyb je relativní, je jedno, jestli se těleso pohybuje v nehybném plynu nebo kapalině, nebo jestli je těleso v klidu a kolem něj proudí plyn nebo kapalina (v takovém případě se často hovoří o obtékání těles). Rozhodující je relativní rychlost mezi tělesem a tekutinou.

Lze dokázat, že při obtékání libovolného tělesa ideální tekutinou nebo při pohybu tělesa v klidné ideální tekutině nepůsobí na těleso odporová síla. Sledujeme-li např. pohyb koule v ideální tekutině, zjistíme, že proudové čáry jsou kolem tělesa rozloženy symetricky. Na zadní straně tělesa jsou proudnice stejně uspořádány jako na přední straně tělesa. Na základě této symetrie lze dokázat, že na těleso působí zepředu i zezadu stejná tlaková síla a výslednice působících sil je nulová. Závěr, že na těleso pohybující se ideální tekutinou nepůsobí odporová síla, je platný nejen pro kouli, ale pro těleso libovolného tvaru. Tento paradoxní teoretický jev bývá nazýván d'Alembertův paradox (d'Alembertovo paradoxon).

Příkladem může být pomalý pohyb koule v nekonečném prostředí. Pokud můžeme proudění kolem koule považovat za laminární, tzn. při nevelkých rychlostech, pak platí Stokesův vztah pro odporovou sílu

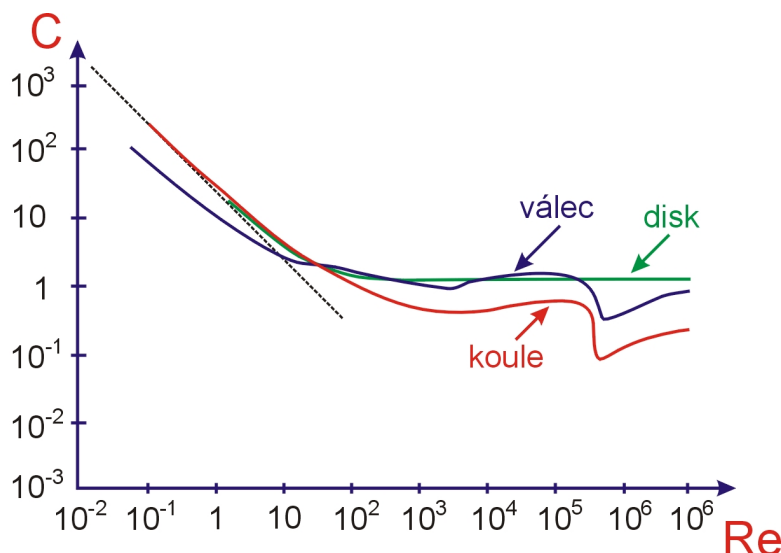
$$F = 6\pi\eta r v, \quad (3)$$

kde η je dynamická viskozita, r označuje poloměr pohybující se koule a v je rychlost pohybu koule [1]. Obecně se pro popis odporové síly pro různé tvary těles a různé rychlosti používá Newtonův vzorec

$$F = \frac{1}{2} \rho S v^2 C(Re), \quad (4)$$

kde S je čelní průřez a $C(Re)$ je činitel odporu, který zohledňuje tvar a kvalitu povrchu tělesa (stanovuje se experimentálně).

Počáteční pokles funkcí v oblasti $Re < 1$ odpovídá oboru, kde platí Stokesův zákon (tečna křivky odpovídající

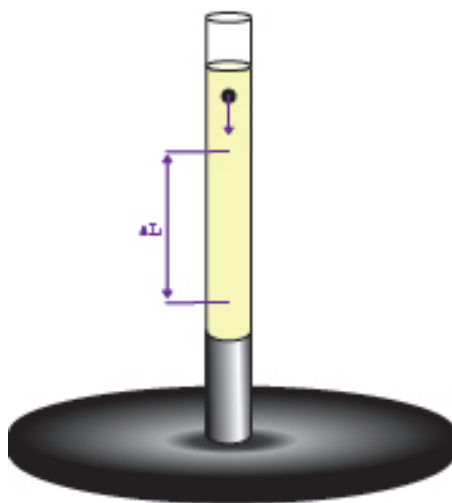


Obrázek 2: Graf závislosti pro obtékání válec, kouli a disk (převzato z <https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta>)

zákonu přesně je vyznačena čárkovaně). Pozvolnější pokles až do hodnoty je přechodovou oblastí mezi platností Stokesova zákona a Newtonova odporového vzorce. Oblast mezi $Re = 10^3$ až 10^5 , kde hodnota součinitele odporu C je přibližně konstantní.

2.3 Stokesův viskozimetr

Princip určení kinematické viskozity podle Stokese spočívá v měření doby pádu kuličky o dané hustotě a poloměru spuštěné v přístroji zvaném Stokesův viskozimetr, který je naplněn měřenou kapalinou. Kapalina je zahřátá na určitou teplotu viskozita se s teplotou mění). Měří se doba ΔT , kterou urazí kulička mezi dvěma značkami o vzdálenosti ΔL [3]. K výpočtu viskozity se používá vzorec:



Obrázek 3: Stokesův viskozimetr

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 (\rho_k - \rho) \frac{\Delta T}{\Delta L} \quad (5)$$

za předpokladu, že jsou splněny následující podmínky [1]:

1. Značky jsou umístěny v takové vzdálenosti, že pohyb kuličky mezi nimi lze považovat za rovnoměrný.
2. Poloměr nádoby je výrazně větší než poloměr kuličky, ta by se neměla pohybovat v blízkosti stěny.
3. Platí $Re < 1$. V opačném případě je třeba zvolit kuličku s menší hustotou a poloměr

3 Měření

3.1 Nejistoty měření

U každého výpočtu je třeba si uvažovat toho, že měření proběhlo nepřesně. Chyba měření je rozdíl mezi skutečnou hodnotou měřené veličiny a hodnotou zjištěnou měřením. Každé měření je zatíženo určitou chybou a ke správné hodnotě se pouze přibližuje. Během měření se uplatňují vlivy, které se projeví odchylkou mezi skutečnou a naměřenou hodnotou reálně měřené veličiny. Do jaké míry je rozdílnost správné a naměřené hodnoty závislá na přesnosti měřicího přístroje a přesnosti měřicí metody.

Pro kombinovanou standardní nejistotu platí:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (6)$$

Symbolem $u_c(\bar{x})$ se značí kombinovaná standardní nejistota, která udává interval, ve kterém se s poměrně velkou pravděpodobností může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny. Kombinovaná standardní nejistota u_c udává pouze 68% pravděpodobnost správného výsledku. Pro její výpočet je potřeba uvést ještě několik dalších definic.

Standardní nejistota aritmetického průměru \bar{x} je určena metodou typu A a vychází ze statistické analýzy opakované série měření. Odhad výsledné hodnoty pro počet měření n ($n \geq 1$) je vyjadřován aritmetickým průměrem.

Aritmetický průměr je statistická veličina, která v jistém smyslu vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor mnoha hodnot. Obvykle se vyjadřuje pruhem nad hodnotou a počítá se podle vzorce

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (7)$$

tzn. součet všech hodnot vydělený jejich počtem.

Nejistota tohoto odhadu se určí jako směrodatná odchylka této hodnoty podle vztahu:

$$u_A(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

Vyhodnocování nejistot typu B je založeno na jiných než statistických přístupech. Nejistota typu B se odhaduje na základě všech dostupných informací. Například údaje výrobce měřicí techniky, zkušenosti z předchozích sérií měření, z poznatků o chování materiálů, údaje získané při kalibraci a třeba nejistoty referenčních údajů v příručkách. Vychází se z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů.

$$u_B = \frac{\Delta_x}{\sqrt{12}}, \quad (9)$$

kde Δ_x je nejmenší dílek měřidla použitého ke zjištění hodnoty x .

3.2 Poloměr kuličky

Měření provedeme pomocí mikrometru a označíme d_r jako průměr kuličky použité pro měření v ricinovém oleji a d_g jako průměr kuličky použité pro měření v glycerínu. Z tabulky číslo dva vidíme, že aritmetický průměr d_r a d_g je totožný, takže pro usnadnění označíme průměr kuličky obecně jako d . Z této hodnoty dopočítáme poloměr kuličky r , jako

$$r = \frac{1}{2}d = \frac{1}{2}1.986 = 0.993\text{mm} = (9.93 \cdot 10^{-2})\text{m} \quad (10)$$

Tabulka 2: Průměr kuličky

Číslo měření	d_r [mm]	d_g [mm]
1	1.98	1.99
2	1.99	1.99
3	1.99	1.98
4	1.99	1.98
5	1.98	1.99
6	1.99	1.99
7	1.99	1.99
8	1.99	1.97
9	1.98	1.99
10	1.97	1.99
11	1.99	1.98
12	1.99	1.99
Průměr:	1.987	1.987

Dopočítáme nejistotu měření průměru kuličky. V tabulce 1 vidíme že nejmenší dílek mikrometru je $\Delta_r = 0.01\text{mm}$. Použijeme vzorce z části 3.1 a spočítáme nejistoty. Nejistota měření mikrometrem je

$$u_B = \frac{\Delta_r}{\sqrt{12}} = \frac{0.01\text{mm}}{\sqrt{12}} = (2.9 \cdot 10^{-6}) \text{ m}. \quad (11)$$

Nejistota typu A je:

$$u_A(\bar{d}) = \sqrt{\frac{1}{11} \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} = (1.5 \cdot 10^{-6}) \text{ m}. \quad (12)$$

Dopočítáme kombinovanou nejistotu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = (3.3 \cdot 10^{-6}) \text{ m} \quad (13)$$

Pro průměr kuličky získáváme následující výsledek:

$$d_r = (1.99000 \pm 0.00033) \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (14)$$

$$d_g = (1.99000 \pm 0.00033) \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (15)$$

kde číslo uvedené za symbolem \pm vyjadřuje kombinovanou standardní nejistotu.

3.3 Teplota prostředí

Laboratorním teploměrem v místnosti byla naměřená teplota 20°C s nejistotou

$$u_B = \frac{\Delta_T}{\sqrt{12}} = \frac{0.1}{\sqrt{12}} = 0.029^\circ\text{C} \quad (16)$$

Tedy teplotu v místnosti budeme uvažovat

$$T = (20,000 \pm 0.029)^\circ\text{C} \quad (17)$$

kde číslo uvedené za symbolem \pm vyjadřuje nejistotu přístroje.

3.4 Délka pádu

Měření bylo provedeno metrem, tedy s nejistotou

$$u_B = \frac{\Delta_l}{\sqrt{12}} = \frac{2}{\sqrt{12}} = 0.58 \text{ mm} = 5.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}. \quad (18)$$

Vybraná délka mezi značkami je 50cm, tedy včetně nejistoty

$$L = (500.00 \pm 0.58) \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad (19)$$

kde číslo uvedené za symbolem \pm vyjadřuje nejistotu přístroje.

3.5 Doba pádu

V obou případech měření doby pády proběhalo pomocí měření stopek. Vypočteme nejistotu měření.

$$u_B = \frac{\Delta_t}{\sqrt{12}} = \frac{0.01}{\sqrt{12}} = 0.0029 \text{ s} = (2.9 \cdot 10^{-3}) \text{ s} \quad (20)$$

3.5.1 Ricinový olej

Podle naměřených hodnot v tabulce 3 a vzorce 8, spočítáme nejistotu typu A:

$$u_A(t_r) = 0.1265 \text{ s} = (12.65 \cdot 10^{-2}) \text{ s} \quad (21)$$

pomocí rovnic 16, 17 a vzorce 6 spočítáme kombinovanou nejistotu:

$$u_c(t_r) = 0.1265 \text{ s} \quad (22)$$

Tabulka 3: Doba pádu kuličky (ricinový olej)

Číslo měření	t_r [s]
1	33.64
2	33.32
3	34.04
4	34.19
5	33.32
6	32.64
7	33.15
8	32.99
9	33.02
10	32.90
11	33.30
12	33.98
Průměr:	33.366

$$t_r = (33.37 \pm 0.13) \text{ s}, \quad (23)$$

kde číslo uvedené za symbolem \pm vyjadřuje kombinovanou standardní nejistotu.

3.5.2 Glycerín

Tabulka 4: Doba pádu kuličky (glycerin)

Číslo měření	t_g [s]
1	51.88
2	52.57
3	53.46
4	51.44
5	52.20
6	51.38
7	52.81
8	52.87
9	51.27
10	53.15
11	51.57
12	52.25
Průměr:	52.212

Podle naměřených hodnot v tabulce 4 a vzorce 8, spočítáme nejistotu typu A:

$$u_A(t_g) = 0.2003 \text{ s} \quad (24)$$

pomocí rovnic 16, 17 a vzorce 6 spočítáme kombinovanou nejistotu:

$$u_c(t_g) = 0.2003 \text{ s} \quad (25)$$

$$t_g = (52.21 \pm 0.20) \text{ s}, \quad (26)$$

kde číslo uvedené za symbolem \pm vyjadřuje kombinovanou standardní nejistotu.

3.6 Hustota kuličky

K výpočtu hustot kuliček použijeme obecný vzorec pro výpočet hustoty

$$\rho = \frac{M}{V}, \quad (27)$$

kde ρ je hustota látky, M je hmotnost tělesa a V je jeho objem. Dosadíme hodnoty d vzorce a dopočítáme

$$\rho_k = \frac{m_{12}}{2\pi d^3}, \quad (28)$$

kde m_{12} je hmotnost kuliček a \bar{d} je jejich průměr. Dopočítáme

$$\rho_{kr} = 7960 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (29)$$

$$\rho_{kg} = 7965 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (30)$$

Pro výpočet nejistoty hustoty kuliček dostáváme vzorec

$$u_C(\rho_k) = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 d^6} u_C(m_{12})^2 + \frac{9m_{12}^2}{4\pi^2 d^8} u_C(d)^2}, \quad (31)$$

$$u_C(\rho_{rk}) = 42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (32)$$

$$u_C(\rho_{rk}) = 42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (33)$$

3.7 Hustota kapaliny

pro měření hustoty kapaliny byl použit Hustoměr EXA THERM, spočítáme chybu měření

$$u_b(\rho) = \frac{5}{\sqrt{12}} = 1,44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (34)$$

tedy hustota kapalin s úvahou přesnosti měření je

$$\rho_r = (965.0 \pm 1.4) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (35)$$

$$\rho_g = (1265.0 \pm 1.4) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (36)$$

3.8 Hmotnost kuličky

Na analytických vahách jsme zvažili 12 kuliček v misce, poté miskou prázdnou. Jako výsledek jsme dostáli:

$$m_{12r} = 0,3918 \text{ g} \quad (37)$$

$$m_{12g} = 0,3920 \text{ g} \quad (38)$$

Dopočítáme nejistotu :

$$u_B(m) = \frac{\Delta}{\sqrt{12}} = (2,9 \cdot 10^{-5}) \text{ g} = (2,9 \cdot 10^{-8}) \text{ kg}, \quad (39)$$

kde Δ je rozlišovací schopnost (přesnost) daného měření. Výsledně budeme si uvažovat hmotnost

$$m_{12r} = (3900,00 \pm 0,29) \cdot 10^{-4} \text{ g} \quad (40)$$

$$m_{12g} = (3900,00 \pm 0,29) \cdot 10^{-4} \text{ g} \quad (41)$$

kde číslo uvedené za symbolem \pm vyjadřuje standardní nejistotu přístroje.

4 Výpočet viskozity a nejistot

K výpočtu viskozity použijeme vzorec 5, který již byl uveden v teoretickém rozboru úlohy, ale pro přehlednost vypíšeme ho ještě jednou,

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2(\rho_k - \rho)\frac{\Delta T}{\Delta L}. \quad (42)$$

Za hustotu kuličky ρ_k dosadíme $\rho_k = \frac{3m}{4\pi r^3}$ a dostaneme vztah:

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2\left(\frac{3m}{4\pi r^3} - \rho\right)\frac{\Delta T}{\Delta L}, \quad (43)$$

který použijeme k výpočtu kombinované nejistoty.
Gravitační konstantu považujeme za $g = 9,81\text{m s}^{-2}$.

4.1 Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovanou nejistotu vypočteme pomocí parciálních derivací dle následujícího vzorce:

$$u_c^2(Z) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 u^2(X_i), \quad (44)$$

kde funkce $Z = f(X_1, \dots, X_n)$ odpovídá η . Do parciálních derivací dosadíme průměrné hodnoty naměřených veličin a za $u(X_i)$ nejistotu i -té veličiny (u_C , příp. u_B). Platí tedy:

$$u_C(\eta) = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial m}\right)^2 u^2(m) + \left(\frac{\partial \eta}{\partial r}\right)^2 u^2(r) + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \Delta t}\right)^2 u^2(\Delta t) + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \Delta L}\right)^2 u^2(\Delta L) + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \rho}\right)^2 u^2(\rho)} \quad (45)$$

Vypočteme si parciální derivace:

$$\frac{\partial \eta}{\partial m} = \frac{g\Delta t}{6\pi r\Delta L} \quad (46)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \rho} = -\frac{egr^2\Delta t}{9\Delta L} \quad (47)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial r} = -\frac{g\Delta t(3m + 8\pi\rho r^3)}{18\pi\Delta Lr^2} \quad (48)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \Delta t} = -\frac{g(4\pi\rho r^3 - 3m)}{18\pi\Delta Lr} \quad (49)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \Delta L} = -\frac{g\Delta t(3m - 4\pi\rho r^3)}{18\pi\Delta L^2r} \quad (50)$$

4.2 Výpočet viskozity a kombinované nejistoty

Pro lepší přehlednost a usnadnění práce uvedeme přehled naměřených hodnot a nejistot pro ně.

Tabulka 5: Přehled naměřených hodnot a vypočtených nejistot

	Naměřená/průměrná hodnota	Nejistota
Poloměr kuličky	0.993mm	0.0033mm
Hmotnost kuličky (ricinový olej)	$m_{12r} = 0,3918g$	$2,9 \cdot 10^{-5}g$
Hmotnost kuličky (glycerin)	$m_{12g} = 0,3920g$	$2,9 \cdot 10^{-5}g$
Teplota prostředí	$20^\circ C$	$0.029^\circ C$
Délka pádu	50cm	0.058mm
Čas pádu (ricinový olej)	33.37s	0.13s
Čas pádu (glycerin)	52.21s	0.20s
Hustota (ricinový olej)	$965 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$1,44\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Hustota (glycerin)	$1265 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$1,44\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

$$u_C(\eta) = \sqrt{509744 \cdot 1.1 \cdot 10^{-11} + 1.2 \cdot 8.41 \cdot 10^{-7} + 2.1^2 \cdot 10^{-8} + 5.6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-7} + 4.02 \cdot 34 \cdot 10^{-7}} = 2.99 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s \quad (51)$$

$$u_C(\eta) = \sqrt{1405292 \cdot 1.1 \cdot 10^{-11} + 299.2 \cdot 8.41 \cdot 10^{-9} + 5.05 \cdot 2.1 \cdot 10^{-8} + 4.518 \cdot 10^{-7} + 9.34 \cdot 10^{-7}} = 4.818 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s \quad (52)$$

5 Závěr

Pro každou z kapalin byla zjištěna tato hodnota dynamické viskozity:

$$\eta_r = (1002,8 \pm 3.0) \text{ mPa s} \quad (53)$$

$$\eta_g = (1502,8 \pm 4.8) \text{ mPa s}, \quad (54)$$

kde číslo uvedené za symbolem \pm vyjadřuje kombinovanou standardní nejistotu. Tabulková hodnota při 20°C pro ricinový olej je $\eta_r = 989 \text{ mPa s}$ a pro glycerin je $\eta_g = 1480 \text{ mPa s}$. V našem případě hodnoty odchylka viskozity od tabulkové hodnoty je 1,4% pro ricinový olej a 1.5% pro glycerin. Dány rozdíl je v rámci normality, takže hodnoty odpovídají předpokladu. Rozdíl našeho výsledku a hodnot z tabulek mohl být způsoben jak numerickými chybami v průběhu výpočtu, tak lidskou chybou v podobě nepřesného změření doby pádu kuličky kapalinou.

A Zpracovávání naměřených údajů

Naměřenou fyzikální veličinu vždy představujeme spolu s nejistotou měření, která představuje jak přesně tato veličina byla určena. Zpravidla výsledek zapisujeme ve tvaru:

$$x = (\bar{x} \pm u_c)[x], \quad (55)$$

kde \bar{x} je nejlepší odhad naměřené veličiny, u_c je kombinovaná standardní nejistota tohoto odhadu (která je uvedena na maximálně dvě platné cifry) a $[x]$ je jednotka ve které dány veličiny jsou měřeny. Kulaté závorky vyjadřují, že obě veličiny se vztahují k jednotce $[x]$.

Počet platných cifer u odhadu měřené veličiny upravíme tak, aby obě čísla byla zapsána se stejnou přesností a tedy i se stejným počtem desetinných míst.

Přesnost zapisovaného čísla vyjadřujeme pomocí tzv. počtu platných cifer.

Počet platných cifer se udává pomocí následujícího algoritmu:

1. Nenulová číslice nejvíce vlevo je nejvíce významná platná číslice
2. Číslo neobsahující desetinnou čárku má nejméně významnou číslice nejvíce vpravo
3. Číslo obsahující desetinnou čárku má nejméně významnou číslice (včetně nuly) nejvíce vpravo
4. Počet platných čísel je počet číslic mezi nejvíce a nejméně významnou cifrou

Reference

- [1] Milan Červenka : Návod k laboratorní úloze: Měření viskozity kapalin Stokesovou metodou, 29. ledna 2013.
- [2] David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker Fyzika 1 2013: nakladatelství VUTIUM, ISBN 978-80-214-4123-1.
- [3] Nevěčná, T., Praktikum z fyzikální chemie. Olomouc: UP, PřF, 1990.