

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM I

Úloha č.XII

Název: Měření viskozity

Pracovala: Jana Ringelová

stud. skup. F/1-Y/15

dne 7.4.2005

Odevzdal dne: vráceno:

Odevzdal dne: vráceno:

Odevzdal dne:

Posuzoval: dne výsledek klasifikace

Připomínky:

Pracovní úkoly

1. Změřte dynamickou viskozitu destilované vody při pokojové teplotě metodou výtoku kapaliny kapilárou z Mariotteovy láhve.
2. Určete teplotní závislost kinematické viskozity destilované vody v oboru teplot od 20 °C do 60 °C metodou Ubbelohdeova viskozimetru.
3. Sestrojte graf teplotní závislosti kinematické viskozity. Určete aktivační energii děje.

Teorie a popis metod měření

Dynamická viskozita η vyjadřuje úměrnost mezi tečným napětím τ a gradientu rychlosti ve směru kolmém k proudu při laminárním proudění kapaliny:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}. \quad (1)$$

Kinematická viskozita je definována takto:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (2)$$

kde ρ je hustota dané kapaliny.

Změnu viskozity s teplotou můžeme podle [1] charakterizovat vztahem

$$\nu(T) = \nu_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_A}{kT}\right), \quad (3)$$

kde ε_A je aktivační energie.

Po zlogaritmování rovnice (3) dostáváme rovnici přímky v proměnných $\ln \nu$ a $\frac{1}{T}$:

$$\ln \nu = \ln \nu_0 + \frac{\varepsilon_A}{k} \frac{1}{T} \quad (4)$$

Metoda výtoku kapaliny z Mariotteovy lahve

Měřila se dynamická viskozita destilované vody při pokojové teplotě pomocí Mariotteovy lahve. Voda se nechala vytékat vodorovnou kapilárou pod stálým tlakem, který zajišťuje konstrukce Mariotteovy lahve (do lahve vniká vzduch trubičkou, která je v konstantní výšce h nad osou kapiláry.) Hydrostatický přetlak vody je $p = h\rho g$. Hodnotu viskozity lze určit z Poiseuilleova vztahu

$$V = \frac{\pi r^4 p t}{8\eta l}, \quad (5)$$

kde r je poloměr kapiláry, l její délka a V objem vody, který vytekl z kapiláry za dobu t . Z toho lze vyjádřit dynamickou viskozitu

$$\eta = \frac{\pi r^4 h \rho g t}{8V l} \quad (6)$$

Aby platil vztah (5), musí být Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{r \rho v}{\eta} = \frac{V \rho}{\pi r t \eta} \quad (7)$$

menší než 10^3 .

Výška h se změří katetometrem, objem V odměrným válcem a čas t na digitálních stopkách. Délka a průměr kapiláry byly zadány.

Metoda Ubbelohdeova viskozimetru

Tato metoda posloužila k určení závislosti kinematické viskozity destilované vody na teplotě. Ubbelohdeův viskozimetr byl ponořen ve vodní lázni, jejíž teplota byla postupně měněna. Při měření se určuje čas, za který proteče kapilárou viskozimetru určité množství vody. Pro kinematickou viskozitu potom podle [1] platí

$$\nu = At, \quad (8)$$

kde A je kalibrační konstanta viskozimetru určená měřením pro kapalinu známé viskozity a hustoty je uvedena na zkušebním listě viskozimetru.

Naměřené hodnoty v proměnných $\ln \nu$ a $\frac{1}{T}$ a metodou lineární regrese (popsáno v [3]) určím hodnotu směrnice grafu, která je podle (3) rovna $\frac{\varepsilon A}{k}$, čímž získám hodnotu aktivační energie transportního děje.

Podmínky experimentu

Teplota v místnosti $(24,7 \pm 0,1)^\circ\text{C}$

Vlhkost vzduchu $(29,0 \pm 0,5)\%$

Tlak vzduchu $(9,93 \pm 0,01) \cdot 10^4\text{Pa}$

Naměřené hodnoty

Metoda výtoku kapaliny z Mariotteovy lahve

Voda, jejíž viskozitu jsem měřila, měla teplotu $(25,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. Katetometrem jsem změřila výšku h_1 ústí trubice se vzduchem, výšku h_2 spodní "hrany" trubice obsahující kapiláru a výšku h_3 horní "hrany" této trubice. Předpokládám, že osa kapiláry je totožná s osou trubice. Potom pro hodnotu h z rovnice (6) platí

$$h = h_1 - \frac{h_2 + h_3}{2} \quad (9)$$

Přesnost katetometru je dost velká, daleko více se projevujeto, že trubička není zakončena rovným řezem. Chybu určení h tedy odhaduji na 1mm.

Byly naměřeny tyto hodnoty:

$$h_1 = 924,67\text{mm} \quad h_2 = 877,92\text{mm} \quad h_3 = 885,45\text{mm}$$

Ze vztahu (9) dostavame

$$h = (43 \pm 1)\text{mm}.$$

Hodnotu tíhového zrychlení jsem určila z [2] jako $g = 9,81077\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; jeho chyba je vůči ostatním zanedbatelná. Hustota vody přidané teplotě je přibližně $\rho = 997,0\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; předpokládám, že její chyba je zanedbatelná. Délka a poloměr kapiláry byly zadány:

$$l = (147,4 \pm 0,1)\text{mm}, \quad r = (0,645 \pm 0,015)\text{mm}$$

Vodu jsem nechávala odkapávat do odměrného válce až po rysku 50 ml; chyba této hodnoty objemu mohla vzniknout zejména tím, že ve válci zůstalo trochu vody po předchozím měření. Proto

$$V = (50,0 \pm 0,5)\text{ml}.$$

č.měření	$t[s]$
1	240.33
2	236.95
3	236.05
4	234.19
5	233.03
6	236.45
7	233.67
8	235.10
9	234.82
10	233.73

Tabulka 1: Naměřené hodnoty doby t plnění odměrného válce o objemu V

Měřila jsem čas t než se válec naplnil, naměřené hodnoty uvádím v tabulce 1. Chybu měření času danou reakční dobou člověka odhaduji na $s_m = 0,2s$. Průměrná hodnota a směrodatná odchylka jsou

$$\bar{t} = 235,4s, \quad s_{sm} = 2,1s.$$

Celková chyba je

$$s_t = \sqrt{s_m^2 + s_{sm}^2} = 2,1s.$$

Dostávám výslednou hodnotu

$$t = (235,4 \pm 2,1)s.$$

Nyní ze vztahu (6) určím viskozitu vody. Její chybu určím z lineárního zákona hromadění chyb, protože většina chyb má původ systematický. Pro relativní chyby platí

$$\delta\eta = 4\delta r + \delta h + \delta t + \delta V + \delta l = 0,136$$

Pro viskozitu destilované vody při teplotě 25°C dostáváme

$$\eta = (0,91 \pm 0,12) \cdot 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}.$$

Metoda Ubbelohdeova viskozimetru

Kalibrační konstanta přístroje uvedená ve zkušebním listě je

$$A = 0,002997\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

Měřila jsem dobu průchodu kapaliny kapilárou viskozimetru pro zadaný rozsah teplot, teplotu jsem postupně měnila přibližně po 5°C . Chyba měření času daná reakční dobou člověka je $0,2s$, chyba měření teploty je $0,5^\circ\text{C}$.

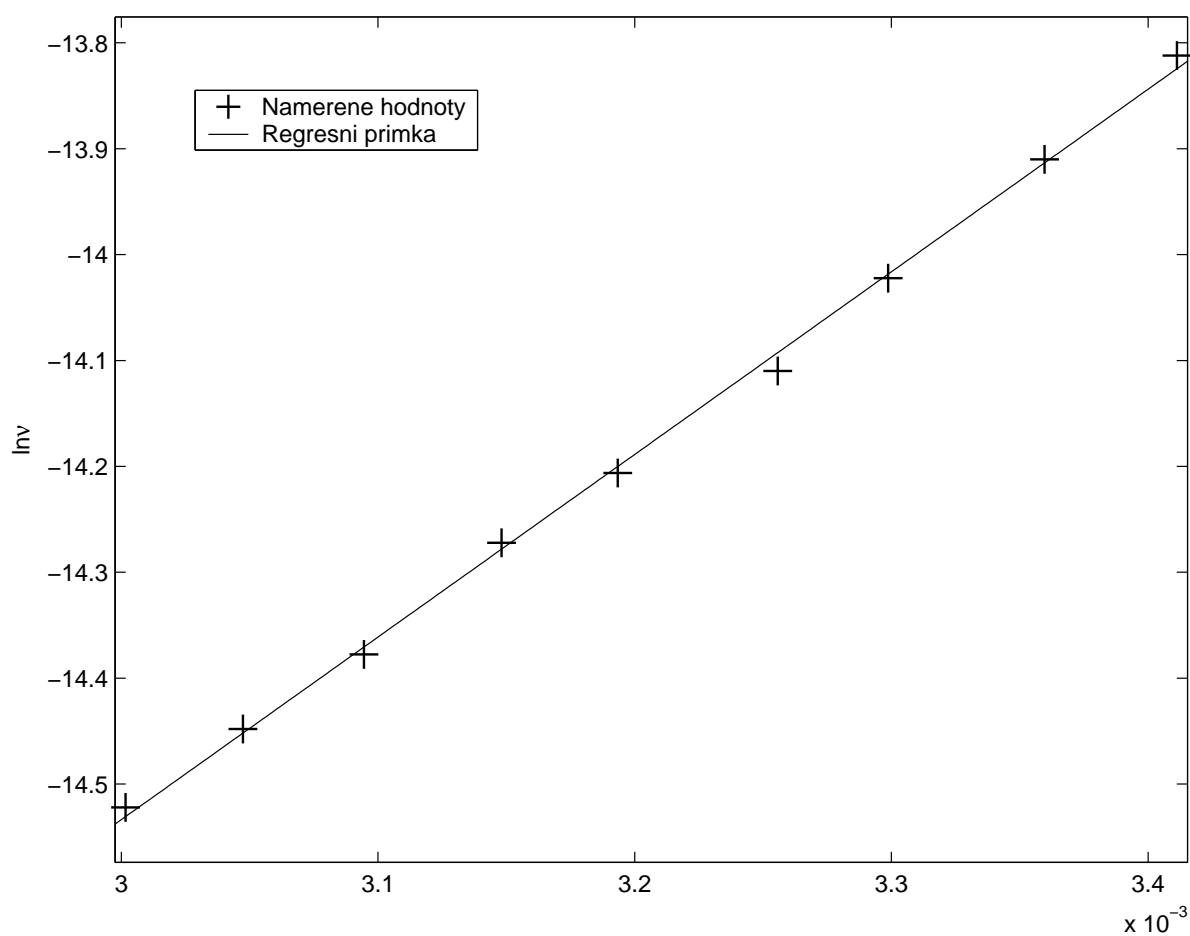
Naměřené hodnoty času t při teplotách T , $\ln \nu$ a $1/T$ se směrodatnými odchylkami uvádím v tabulce 2. Směrodatné odchylky byly určeny ze vztahů

$$s_{\ln \nu} = \frac{s_\nu}{\nu} = \frac{As_t}{\nu} = \frac{s_t}{t}, \quad s_{1/T} = \frac{s_T}{T^2}.$$

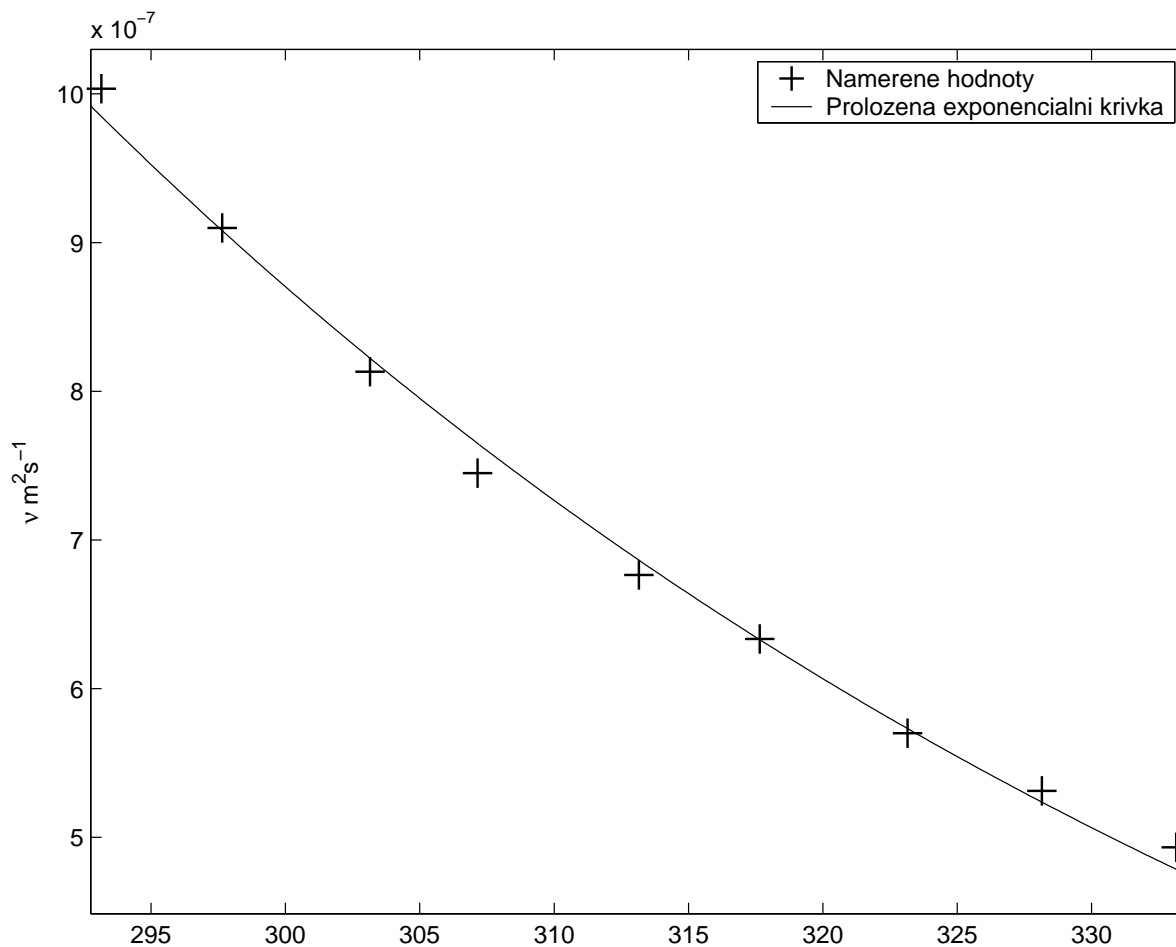
Naměřené hodnoty viskozity ν v závislosti na teplotě T jsem zpracovala v proměnných $\ln \nu$ a $\frac{1}{T}$ (v nichž je závislost podle teorie lineární) metodou lineární regrese, popsanou

T [K]	t [s]	$1/T$ [K ⁻¹]	$s_{1/T}$ [K ⁻¹]	$\ln \nu$	$s_{\ln \nu}$
293.15	334.85	0.0034112	5.8182e-006	-13.812	0.00059728
297.65	303.58	0.0033597	5.6436e-006	-13.91	0.0006588
303.15	271.32	0.0032987	5.4407e-006	-14.0224	0.00073714
307.15	248.56	0.0032557	5.2999e-006	-14.11	0.00080463
313.15	225.73	0.0031934	5.0988e-006	-14.2063	0.00088601
317.65	211.36	0.0031481	4.9553e-006	-14.2721	0.00094625
323.15	190.2	0.0030945	4.7881e-006	-14.3776	0.0010515
328.15	177.25	0.0030474	4.6433e-006	-14.4481	0.0011283
333.15	164.61	0.0030017	4.505e-006	-14.5221	0.001215

Tabulka 2: Naměřené doby t průchodu kapaliny kapilárou viskozimetru v závislosti na teplotě T , vypočtené hodnoty $\ln \nu$ a $1/T$. $s_{1/T}$ a $s_{\ln \nu}$ jsou směrodatné odchylky příslušející veličinám v jejich indexu.



Obrázek 1: Graf 1: Závislost kinematické viskozity ν na teplotě T v proměnných $\ln \nu$ a $\frac{1}{T}$.



Obrázek 2: Graf 1: Závislost kinematické viskozity ν na teplotě T .

v [3]. Statistická chyba daná rozptylem naměřených hodnot od přímky (určena lineární regresí) je o podstatně větší než chyba měření. chybu měření můžeme tedy vzhledem k této chybě zanedbat. Pro koeficienty lineární funkce ze vztahu (4) tedy dostáváme

$$\ln \nu_0 = (-19,7 \pm 0,2), \quad \frac{\varepsilon_A}{k} = (1724 \pm 60)\text{K}.$$

Naměřené hodnoty a spočítaná lineární závislost v proměnných $\ln \nu$ a $\frac{1}{T}$ jsou vyneseny v grafu 1.

Pro hodnotu aktivační energie transportního děje dostáváme

$$\varepsilon_A = (23,8 \pm 0,8) \cdot 10^{-21}\text{J} = (0,149 \pm 0,005)\text{eV}.$$

V grafu 2 uvádím závislost kinematické viskozity vody na teplotě. Proloženou exponenciální křivku jsem získala z vypočtených koeficientů ze vztahu (3).

Diskuse

Metoda výtoku kapaliny z Mariottého lahve

Metoda výtoku kapaliny z Mariottého lahve se ukázala jako nepřiliš přesná. Největší chybu způsobila nepřesnost určení poloměru kapiláry, neboť ve vztahu (6) se vyskytuje ve čtvrté

mocnině. Dále k chybě nezanedbatelně přispívá nepřesnost určení h (nerovný řez na konci trubice a vytváření bublin u jejího ústí) a V . Přesnost měření objemu by šlo vylepšit důkladným vysušením odměrného válce po každém měření, aby v něm nezůstávaly kapky. Pro výpočet viskozity jsem užívala vztah (6), který však platí pouze pro Reynoldsovo číslo (7) menší než 10^3 . Pro tento experiment vychází $Re \approx 120$, vztah (6) lze tedy použít. Výsledná hodnota dynamické viskozity je v rámci chyby ve shodě s tabulkovou hodnotou dynamické viskozity destilované vody při teplotě 25°C , která je podle [2] $\eta = 0,894 \cdot 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$.

Metoda Ubbelohdeova viskozimetru

Měření viskozity touto metodou se ukázalo jako velice přesné. Při měření bylo akorát třeba dbát, aby se ustavila teplotní rovnováha mezi vodní lázní a kapalinou ve viskozimetru. Na výsledek má největší vliv rozptyl naměřených hodnot způsobený náhodnými chybami; větším počtem měření by bylo možné dosáhnout přesnějších výsledků.

Z grafu 2 můžeme odečíst kinematickou viskozitu vody při 25°C , $\nu = 0,906 \cdot 10^{-6}\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, tomu odpovídá dynamická viskozita $\eta = 0,903 \cdot 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$, která je v dobré shodě s tabulkovou hodnotou.

Závěr

Změřila jsem dynamickou viskozitu destilované vody při teplotě 25°C metodou výtoku kapaliny z Mariotteovy lahve

$$\eta = (0,91 \pm 0,12) \cdot 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}.$$

Proměřila jsem závislost kinematické viskozity destilované vody na teplotě v rozmezí od 20°C do 60°C metodou Ubbelohdeova viskozimetru. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2 a vyneseny v grafech 1 a 2. Z grafu 1 jsem metodou lineární regrese určila hodnotu aktivační energie transportního děje

$$\varepsilon_A = (23,8 \pm 0,8) \cdot 10^{-21}\text{J} = (0,149 \pm 0,005)\text{eV}.$$

Reference

- [1] Studijní text k Fyzikálnímu praktiku I, Úloha XII
<http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt112.htm>
- [2] G. W. C. Kaye, T. H. Laby, Tables of Physical and Chemical Constants, Longman, London 1966
- [3] J. English, prezentace k semináři Úvod do praktické fyziky
<http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/mereni.zip>