

1 Pracovní úkol

1. Pro tři vodorovné trubice s různými poloměry kruhového průřezu, které jsou opatřeny manometrem, změřte závislost objemového průtoku Q_V na úbytku statického tlaku Δp na vyšetřované délce trubice l ve směru proudění.
2. Sestrojte graf závislosti $Q_V = Q_V(p)$.
3. Ze směrnice závislosti $Q_V = Q_V(p)$ v oblasti laminárního proudění určete poloměr trubice.
4. Upravený poloměr dosadte do vztahů pro výpočet Re a k .
5. Sestrojte graf závislosti $k = k(Re)$, kde k je součinitel odporu trubice a Re je Reynoldsovo číslo. Do grafu vynesete teoretickou závislost pro laminární i turbulentní proudění.

2 Teoretický úvod

Laminární i turbulentní proudění kapaliny budeme zkoumat v několika trubicích různých průměrů sledováním závislosti průtoku na tlaku v trubici. Také můžeme pozorovat přechodovou oblast mezi laminárním a turbulentním v trubici.

Na následující obrázku je znázorněna aparatura, která se skládá z vodorovné trubice o poloměru r , která má ve vzdálenosti l od svého konce manometrickou trubici s milimetrovou stupnicí. V bodě A je trubice napojena na přítok vody s nastavitelným průtokem.

Výška h , do které vystoupá voda v manometru je přímo úměrná úbytku statického tlaku Δp , tedy rozdílu tlaku v ústí a tlaku uvnitř trubice ve vzdálenosti l od ústí. Rozdíl tlaků je dán jednoduchým vztahem pro hydrostatický tlak v kapalině [1]

$$\Delta p = h \rho g, \quad (1)$$

kde ρ je hustota měřené kapaliny (vody) a g je místní tíhové zrychlení.

Obrázek 1: Schéma aparatury

Objemový průtok kapaliny trubicí Q_V lze změřit nepřímou metodou

$$Q_V = \frac{V}{t} = \pi r^2 v_s, \quad (2)$$

kde V je objem vody v odměrném válci přitekly za čas t a v_s je střední rychlost proudění kapaliny v trubici.

Zda je proudění laminární či turbulentní nám pomáhá určit Reynoldsovo číslo. Avšak pouze přibližně. Reynoldsovo číslo je bezrozměrné a je dáno vztahem

$$\text{Re} = \frac{r \rho v_s}{\eta}, \quad (3)$$

kde dynamickou viskozitu proudící kapaliny značíme η . Dosadíme-li za v_s z (2), máme

$$\text{Re} = \frac{\rho Q_V}{\pi \eta r}. \quad (4)$$

Kritická hodnota Reynoldsova čísla je přibližně 2000 [1]. Při menší hodnotě je proudění laminární, v opačném případě je turbulentní a v případě, že leží hodnota blízko této kritické hodnoty (tedy v přechodové oblasti), nemusí být proudění stabilní a může „náhodně“ přecházet mezi laminárním a turbulentním.

Při laminárním proudění je určuje průtok kapaliny Poiseullova rovnice [1]

$$Q_V = \frac{\pi r^4}{8 \eta l} \Delta p. \quad (5)$$

Označíme-li $f = \frac{\pi r^4}{8 \eta l}$ jako směrnici grafu závislosti Q_V na Δp . Poloměr trubice ze směrnice f pak určíme pomocí vztahu

$$r = \sqrt[4]{\frac{8 f \eta l}{\pi}}. \quad (6)$$

Závislost (5) však platí pouze pro laminární proudění a po překročení kritické hodnoty Reynoldsova čísla (tedy pro turbulentní proudění) je hodnota Q_V výrazně nižší, než by závislost předpovídala.

Zavedeme si součinitel odporu trubice k . Úbytek tlaku lze vyjádřit vztahem

$$\Delta p = k \frac{l \rho v_s^2}{2r}. \quad (7)$$

Z rovnic (2), (3), (5) a (7) můžeme algebraickými úpravami eliminovat ostatní veličiny a dostaneme

$$k = \frac{16}{\text{Re}}. \quad (8)$$

To je čistě teoretická závislost. Pro turbulentní proudění v hladkostěnných trubicích lze použít aproximativní vzorec

$$k \approx \frac{0,133}{\sqrt[4]{\text{Re}}}. \quad (9)$$

Z rovnice (7) lze k vyjádřit následovně

$$k = \frac{2 \Delta p r}{\rho l v_s^2} = \frac{2 \pi^2 r^5 \Delta p}{\rho l Q_V^2}. \quad (10)$$

3 Měření

3.1 Rozměry trubic

Poloměry trubic byly měřeny plastovým posuvným měřidlem s uvedenou přesností 0,1 mm, ale ve skutečnosti byla výsledná chyba větší, protože posuvné měřidlo bylo poměrně opotřebované. Proto je potřeba chybu měřidla složit se směrodatnou chybou.

Průměr byl měřen vždy pětkrát, ale v měření pro trubicí C se vyskytla jedna hodnota, která nespadá do 3s kritéria, proto byla z výpočtů vyřazena a průměr byl naměřen ještě jednou.

Tabulka 1: Měření poloměru trubice A, B a C

měření	$\frac{d_A}{\text{mm}}$	$\frac{d_B}{\text{mm}}$	$\frac{d_C}{\text{mm}}$
1.	$2,4 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,1$
2.	$2,5 \pm 0,1$	$2,8 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,1$
3.	$2,3 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,1$	$3,4 \pm 0,1$
4.	$2,7 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,1$
5.	$2,7 \pm 0,1$	$2,8 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,1$
6.	–	–	$2,9 \pm 0,1$
průměr	2,52	2,82	3,30
směrdat.ch.	0,09	0,08	0,13
výsledek	$2,52 \pm 0,14$	$2,82 \pm 0,13$	$3,30 \pm 0,17$

Standardní chyba výsledku je vypočtena složením směrodatné chyby a chyby měřidla, směrodatná chyba je samozřejmě ještě vynásobena Studentovým koeficientem pro pět měření.

Vzdálenost l byla pro všechny tři trubice změřena svinovacím metrem s přesností 0,5 mm.

$$l_A = (24,90 \pm 0,05) \text{ cm},$$

$$l_B = (25,00 \pm 0,05) \text{ cm},$$

$$l_C = (21,50 \pm 0,05) \text{ cm}.$$

3.2 Teplota vody

Vytékající voda byla pravidelně (na začátku měření každé ze tří trubic a pak na konci měření poslední trubice) měřena rtuťovým teploměrem.

Tabulka 2: Měření teploty

t °C
$23,0 \pm 0,5$
$23,0 \pm 0,5$
$23,0 \pm 0,5$
$23,0 \pm 0,5$

Vidíme, že lze předpokládat, že po celou dobu měření byla teplota vody konstantní a její hodnota byla $t = (23,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$. Hustota vody při této teplotě je [3]

$$\rho = (997,5 \pm 0,2) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}. \quad (11)$$

Dynamická viskozita vody při této teplotě je (premen: [3])¹

$$\eta = (930 \pm 10) \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}. \quad (12)$$

3.3 Závislost průtoku na tlaku

Průtok byl měřen nepřímou metodou – pomocí stopek a odměrných válců. Na stopkách byl měřen čas, po který byla nechána téct voda do odměrného válce. Většinou byl čas zvolen tak, aby byl válec pokud možno naplněn co nejvíce, z důvodu minimalizace relativní chyby. Byly k dispozici odměrné válce s různými kapacitami a přesnostmi. Pro každý průtok byl proto zvolen vhodný odměrný válec tak, aby byla ta větší relativní chyba (chyba měření času nebo chyba měření objemu vody ve válci) co nejmenší.

Nejprve bylo potřeba zjistit přibližnou směrodatnou odchylku měření průtoku, se kterou budou všechna naše měření zatížena. Proto bylo pro trubici C a výšku sloupce v manometru $h_0 = (2,00 \pm 0,05) \text{ cm}$ změřen průtok pětikrát za sebou přičemž nebyl měněn přítok z přívodní trubice.

Tabulka 3: Měření rozptylu

V	t	Q
ml	s	$10^{-6} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
34	12,5	2,72
49	17,4	2,82
118	40,6	2,91
122	41,9	2,91
118	40,8	2,89

Hodnoty jsou v tabulce uváděny bez chyb², protože se teď zajímáme o standardní směrodatnou odchylku a ne o chyby měřidel. Tato chyba (relativní) vychází³ $0,015 = 1,5 \%$.

Při měření výšky vodního sloupce v manometru se stávalo že při určitých hodnotách průtoku (tj. průtoku blízko hranice laminárního a turbulentního proudění) hladina „náhodně“ oscillovala v nějakém intervalu. Z tohoto důvodu nebylo možné stanovit přesnou výšku vodního sloupce a proto byla zaznamenána pouze střední hodnota, okolo které hladina oscillovala, včetně přibližné maximální odchylky od této hodnoty, kterou budeme značit Δh . Hodnota Δh v případě stabilního (buď čistě laminárního nebo turbulentního) proudění nebyla zaznamenávána a implicitně bylo předpokládáno, že $\Delta h = 0$. V případě nestabilního proudění byly hodnoty Δh i h měřeny pozorováním po dobu cca 15 s a následným kvalifikovaným odhadem střední hodnoty výšky h během tohoto času včetně její standardní výchytky Δh .

Chyba výšky h byla ve stabilních případech 0,05 cm (tato hodnota není zahrnuta v následujících tabulkách) a v nestabilním přechodovém stavu je třeba tuto chybu sečíst s odhadovanou výchytkou Δh . Hodnoty naměřených časů jsou v tabulce uvedeny kvůli přehlednosti bez chyb, všechny mají stejnou standardní chybu 0,3 s.

Chyba Δp byla vypočtena podle gaussovým zákonem jako

$$\sigma_{\Delta p} = h \rho g \sqrt{\left(\frac{\sigma_h + \Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{g}\right)^2}. \quad (13)$$

Je použita standardní hodnota tíhového zrychlení v Praze $g = (9,810 \pm 0,005) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

¹Chyba byla vypočtena jako $\sigma_\rho = \frac{\partial \rho(t)}{\partial t} \sigma_t$ resp. $\sigma_\eta = \frac{\partial \eta(t)}{\partial t} \sigma_t$. Jelikož ale závislost $\rho(t)$ resp. $\eta(t)$ nelze popsat jednoduše analyticky, byla pro výpočet použita numerická derivace z tabulkových hodnot.

²Chyba objemu byla 0,5 ml pro první dvě a 1 ml pro poslední tři hodnoty a chyba času standardně 0,3 s.

³Po započtení Studentova koeficientu.

3.3.1 Trubice A

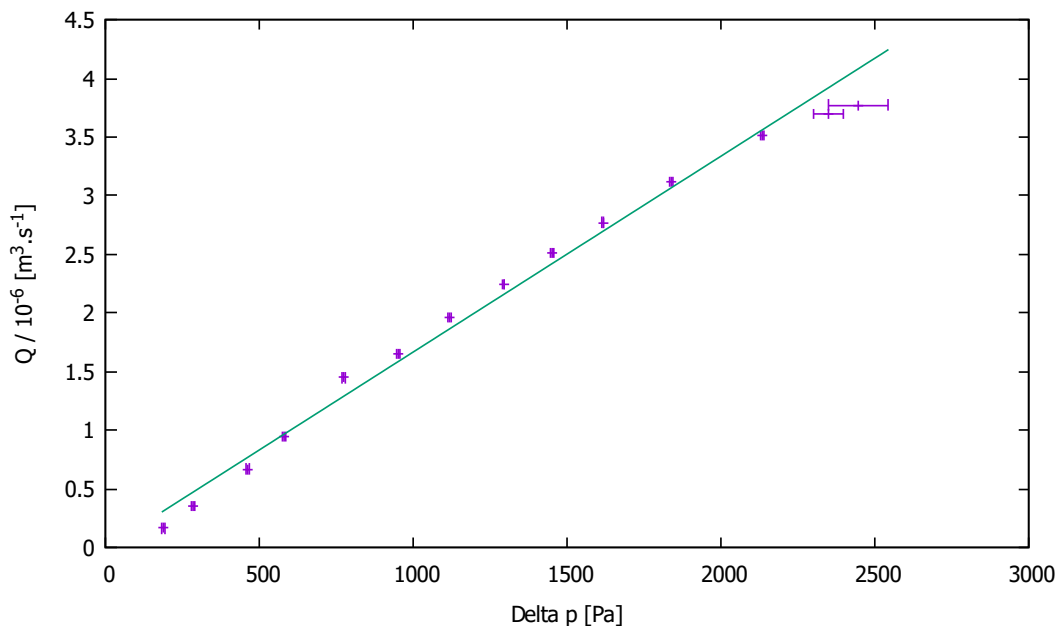
Tabulka 4: Trubice A

měření	$\frac{h}{\text{cm}}$	$\frac{\Delta h}{\text{cm}}$	$\frac{V}{\text{ml}}$	$\frac{t}{\text{s}}$	$\frac{\Delta p}{\text{Pa}}$	$\frac{Q}{10^{-6}\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}$
1	1,9	—	8,4 ± 0,1	51,5	186 ± 5	0,163 ± 0,002
2	2,9	—	9,8 ± 0,1	28,1	284 ± 5	0,35 ± 0,01
3	4,7	—	20,5 ± 0,3	30,7	460 ± 5	0,67 ± 0,01
4	5,9	—	21,0 ± 0,3	22,2	577 ± 5	0,95 ± 0,02
5	7,9	—	22,0 ± 0,3	15,2	773 ± 5	1,45 ± 0,03
6	9,7	—	45,0 ± 0,5	27,2	949 ± 5	1,65 ± 0,03
7	11,4	—	46,0 ± 0,5	23,5	1116 ± 5	1,96 ± 0,03
8	13,2	—	134 ± 1	59,8	1292 ± 5	2,24 ± 0,02
9	14,8	—	170 ± 1	67,7	1448 ± 5	2,51 ± 0,02
10	16,5	—	158 ± 1	57,0	1615 ± 5	2,77 ± 0,02
11	18,8	—	160 ± 1	51,3	1840 ± 5	3,12 ± 0,03
12	21,8	—	148 ± 1	42,1	2133 ± 5	3,52 ± 0,03
13	24,0	0,5	170 ± 1	46,0	2350 ± 50	3,70 ± 0,03
14	25,0	1	186 ± 1	49,3	2400 ± 100	3,77 ± 0,03

Data byla proložena lineární závislostí procházející počátkem $Q_A(\Delta p) = f_A \Delta p$. Při fitu byly zohledněny i chyby jednotlivých naměřených hodnot tlaku a průtoku. Směrnice $f_A = \frac{\pi r^4}{8\eta l}$ včetně standardní chyby (vypočtené programem Gnuplot) je

$$f_A = (1,67 \pm 0,04) \cdot 10^{-9} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s}. \tag{14}$$

Graf 1: Závislost průtoku na rozdílu tlaků pro trubici A



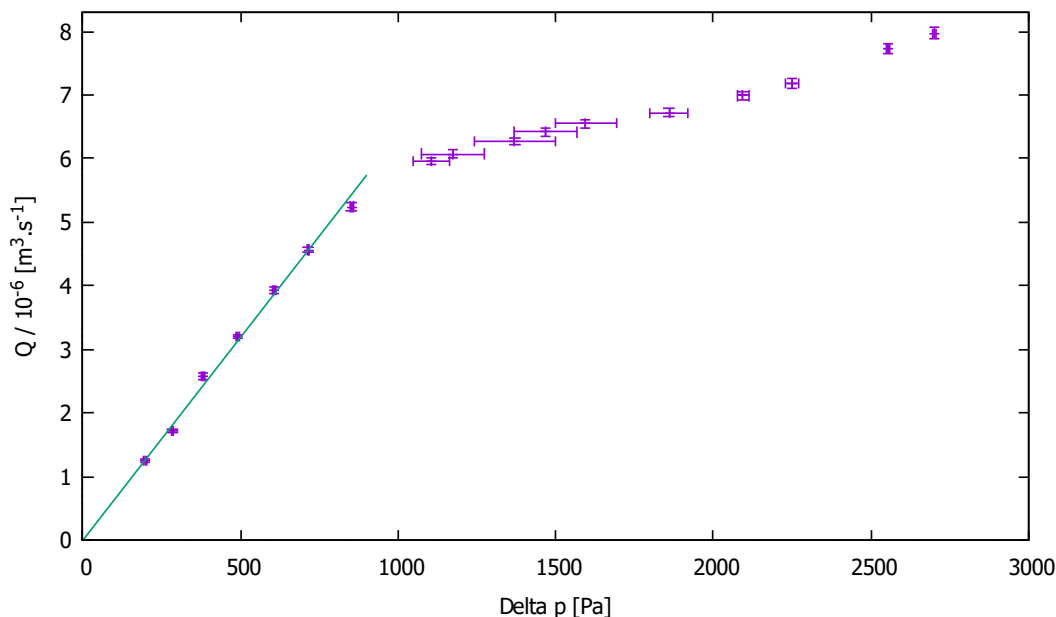
Errorbary průtoku nejsou v grafu vyneseny, protože jsou tak malé, že by prakticky nebyly vidět.

3.3.2 Trubice B

Tabulka 5: Trubice B

měření	$\frac{h}{\text{cm}}$	$\frac{\Delta h}{\text{cm}}$	$\frac{V}{\text{ml}}$	$\frac{t}{\text{s}}$	$\frac{\Delta p}{\text{Pa}}$	$\frac{Q}{10^{-6}\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}$
1	2,0	—	42,0 ± 0,5	33,5	196 ± 5	1,25 ± 0,02
2	2,9	—	48,0 ± 0,5	27,9	284 ± 5	1,72 ± 0,03
3	3,9	—	48,0 ± 0,5	18,6	382 ± 5	2,58 ± 0,05
4	5,0	—	154 ± 1	48,1	489 ± 5	3,20 ± 0,03
5	6,2	—	154 ± 1	39,2	607 ± 5	3,93 ± 0,04
6	7,3	—	162 ± 1	35,5	714 ± 5	4,56 ± 0,05
7	8,7	—	174 ± 1	33,2	851 ± 5	5,24 ± 0,06
8	11,3	0,6	206 ± 1	34,6	1110 ± 60	5,95 ± 0,06
9	12,0	1	226 ± 1	37,2	1200 ± 100	6,08 ± 0,06
10	14,0	1,3	224 ± 1	35,7	1400 ± 200	6,27 ± 0,06
11	15,0	1	240 ± 1	37,4	1500 ± 100	6,42 ± 0,06
12	16,3	1	234 ± 1	35,7	1600 ± 100	6,55 ± 0,06
13	19,0	0,6	250 ± 1	37,2	1860 ± 60	6,72 ± 0,06
14	21,4	0,2	230 ± 1	32,9	2090 ± 20	6,99 ± 0,07
15	23,0	0,2	204 ± 1	28,4	2250 ± 20	7,18 ± 0,08
16	26,1	—	228 ± 1	29,5	2550 ± 5	7,73 ± 0,09
17	27,6	—	224 ± 1	28,1	2701 ± 5	7,97 ± 0,09

Graf 2: Závislost průtoku na rozdílu tlaků pro trubici B



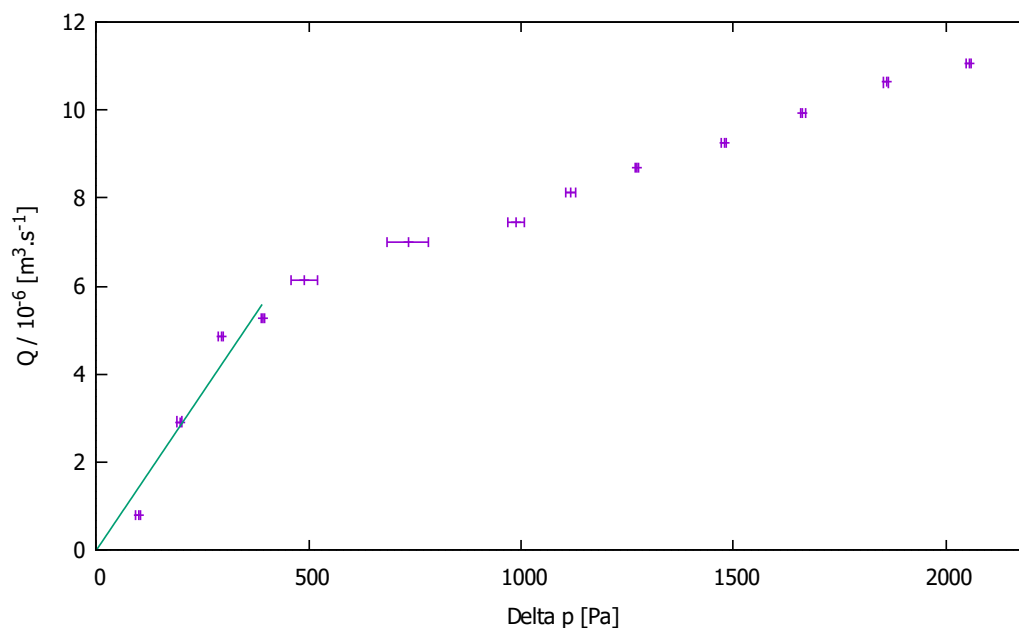
$$f_B = (6,38 \pm 0,08) \cdot 10^{-9} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s} . \tag{15}$$

3.3.3 Trubice C

Tabulka 6: Trubice C

měření	$\frac{h}{\text{cm}}$	$\frac{\Delta h}{\text{cm}}$	$\frac{V}{\text{ml}}$	$\frac{t}{\text{s}}$	$\frac{\Delta p}{\text{Pa}}$	$\frac{Q}{10^{-6}\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}$
1	1,0	—	45,0 ± 0,5	56,4	98 ± 5	0,80 ± 0,01
2	2,0	—	122 ± 1	41,9	196 ± 5	2,91 ± 0,03
3	3,0	—	160 ± 1	32,9	294 ± 5	4,86 ± 0,05
4	4,0	—	180 ± 1	34,2	391 ± 5	5,26 ± 0,05
5	5,0	0,3	202 ± 1	32,9	490 ± 30	6,14 ± 0,06
6	7,5	0,5	206 ± 1	29,4	730 ± 50	7,01 ± 0,08
7	10,1	0,2	360 ± 1	48,3	990 ± 20	7,45 ± 0,05
8	11,4	0,1	460 ± 1	56,6	1120 ± 10	8,13 ± 0,05
9	13,0	—	500 ± 1	57,5	1272 ± 5	8,70 ± 0,05
10	15,1	—	460 ± 1	49,7	1478 ± 5	9,26 ± 0,06
11	17,0	—	600 ± 1	60,4	1664 ± 5	9,93 ± 0,05
12	19,0	—	640 ± 1	60,2	1859 ± 5	10,63 ± 0,06
13	21,0	—	680 ± 1	61,5	2055 ± 5	11,06 ± 0,06

Graf 3: Závislost průtoku na rozdílu tlaků pro trubici C



$$f_C = (14,3 \pm 1,1) \cdot 10^{-9} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s} . \quad (16)$$

Pro trubice B a C byly všechny hodnoty včetně jejich chyb vypočteny stejným způsobem, jako v případě trubice A, kromě směrnice f . Protože při měření trubice B i C docházelo v určitém místě k přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním, bylo při lineárním fitu zohledněno pouze několik (7 pro B resp. 4 pro C) prvních hodnot.

Z jednotlivých směrnic f_A , f_B a f_C lze podle vztahu (6) vypočítat jednotlivé poloměry trubice

$$r_A = (1,00 \pm 0,03) \text{ mm}, \quad (17)$$

$$r_B = (1,39 \pm 0,04) \text{ mm}, \quad (18)$$

$$r_C = (1,70 \pm 0,05) \text{ mm}, \quad (19)$$

kde je uvedena standardní chyba vypočítaná gaussovým zákonem šíření chyb⁴

3.4 Upravené poloměry

Porovnání poloměrů trubice změřených přímo (nepřesným posuvným měřidlem) a určených ze směrnice závislosti $Q_V(p)$.

Tabulka 7: Porovnání poloměrů měřených přímo a pomocí směrnice

r	šuplerou	směrnicí
trubice A	$(1,26 \pm 0,07) \text{ mm}$	$(1,00 \pm 0,03) \text{ mm}$
trubice B	$(1,41 \pm 0,07) \text{ mm}$	$(1,39 \pm 0,04) \text{ mm}$
trubice C	$(1,65 \pm 0,09) \text{ mm}$	$(1,70 \pm 0,05) \text{ mm}$

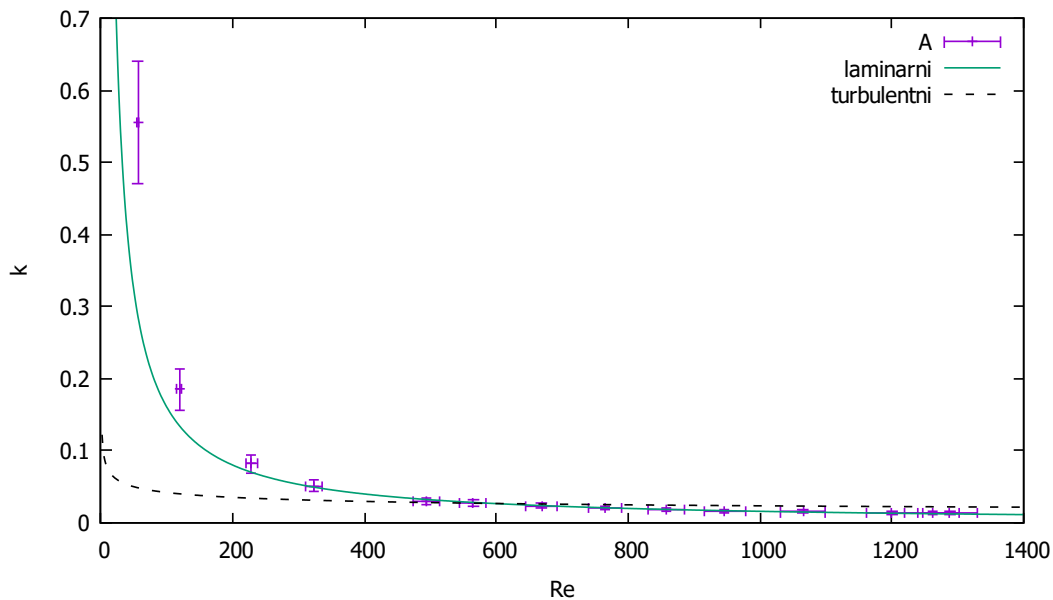
3.5 Výpočet Re

Zjištěné poloměry nyní dosadíme do vztahu (4) pro výpočet Re a do (7) pro výpočet koeficientu k . Vypočtené hodnoty zde nejsou uvedené v tabulkách, z následujících grafů, je lépe vidět hledaná závislost. Všechny standardní chyby byly vypočteny gaussovým zákonem o šíření chyb a chybové úsečky jsou zaneseny v grafu⁵. Pro trubici A je uveden i graf s logaritmickou svislou osou, jelikož z něj lze hodnoty mnohem lépe vyčíst

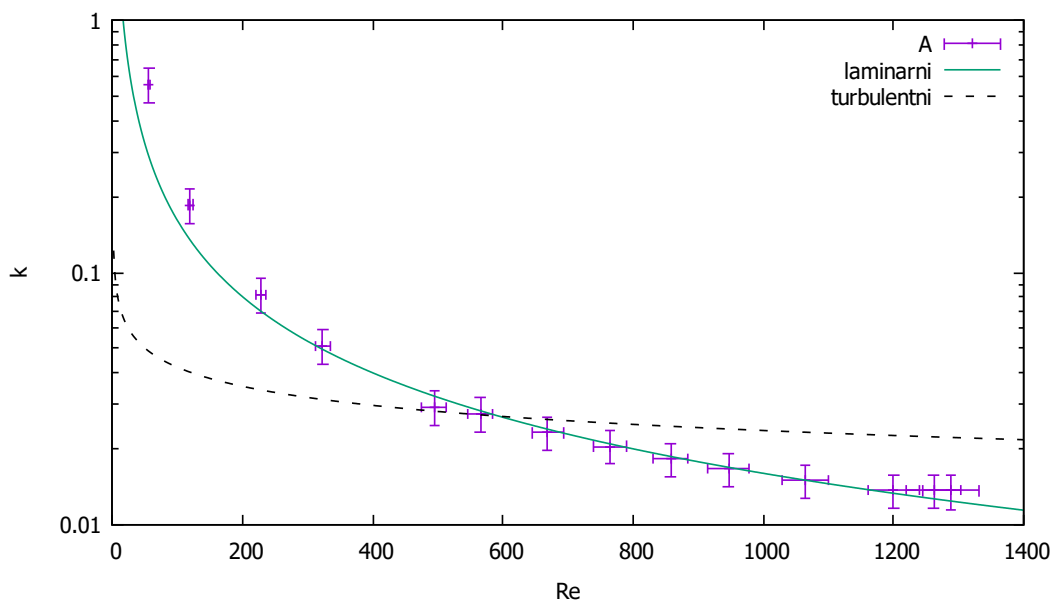
$${}^4\sigma_r = r \sqrt{\frac{\sigma_f^2}{(4f)^2} + \frac{\sigma_\eta^2}{(4\eta)^2} + \frac{\sigma_l^2}{(4l)^2}}$$

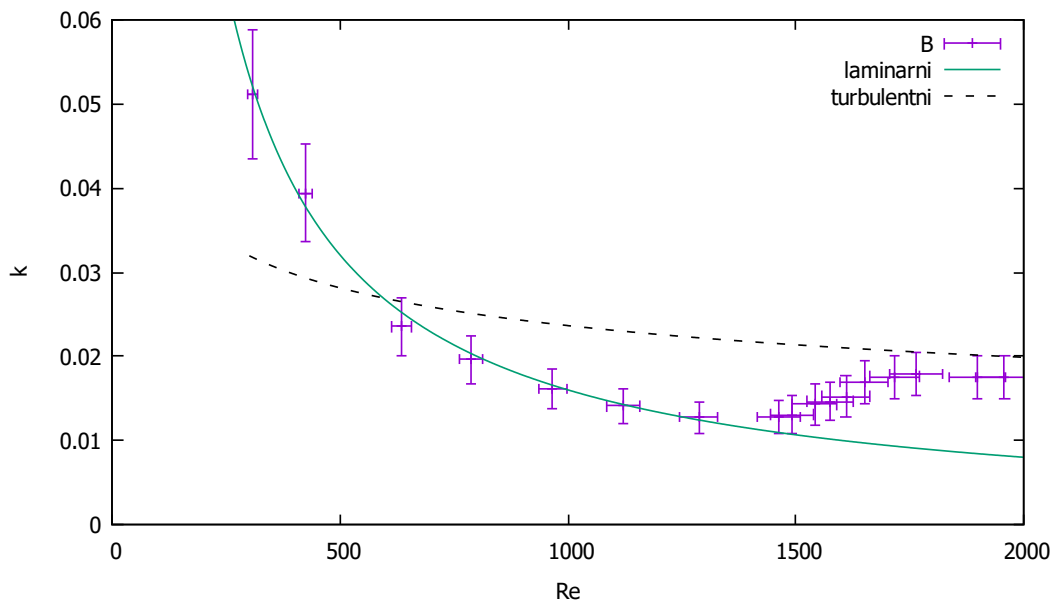
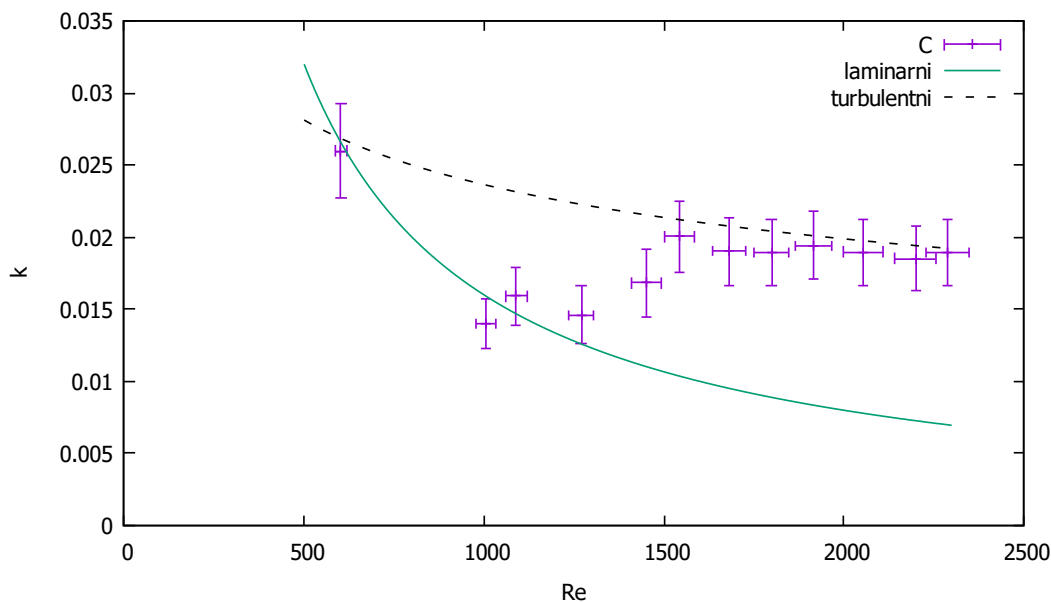
$${}^5\sigma_{\text{Re}} = \frac{\rho Q_V}{\pi \eta r} \sqrt{\left(\frac{\sigma_\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Q_V}}{Q_V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\eta}{\eta}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_r}{r}\right)^2} \text{ a } \sigma_k = \frac{2r \Delta p}{l \rho v_s^2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta p}}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{2\sigma_{v_s}}{v_s}\right)^2}$$

Graf 4: Závislost k na Re pro trubici A



Graf 5: Závislost k na Re pro trubici A (semilogaritmický graf)



Graf 6: Závislost k na Re pro trubici BGraf 7: Závislost k na Re pro trubici C

4 Diskuze výsledků

Z hodnot a grafů naměřených závislostí průtoku na rozdílu tlaků lze poměrně snadno vyčíst, kde se nachází přechodová oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním. To bylo možno poznat i při samotném měření, protože v přechodové oblasti hladina vody (tedy rozdíl hydrostatických tlaků) oscilovala a stejně tak i proud, který vytékal.

Ve všech případech se laminární část podařilo proložit lineární závislostí a následně spočítat přesněji hodnoty poloměru trubice, jak je vidět v tabulce (8). Kromě poloměru trubice A se tyto hodnoty shodují s naměřenými průměry posuvným měřidlem. Pro trubici A se poloměry naměřené oběma různými způsoby liší. To je pravděpodobně způsobeno systematickou chybou, protože použité posuvné měřidlo bylo poměrně opotřebované, jeden

konec jeho „břítu“ byl zkroucený a částečně ulomený⁶, hodnota průměru by tedy měla být o něco menší, než hodnoty naměřené posuvným měřidlem.

Zde je porovnání experimentálně naměřených směrnic f_f pro laminární část proudění v jednotlivých trubicích a hodnoty vypočtené z teoretického vztahu (6) (ty označíme f_r)

Tabulka 8: Porovnání směrnic f z fitů závislostmi a směrnic vypočtených teoreticky

	f_f $10^{-9}\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s}$	f_r $10^{-9}\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s}$
trubice A	$1,67 \pm 0,04$	$1,7 \pm 0,2$
trubice B	$6,38 \pm 0,08$	$6,3 \pm 0,7$
trubice C	$14,3 \pm 1,1$	$14,6 \pm 1,4$

Hodnoty souhlasí přestože je měření zatíženo nemalou chybou, protože manometrická trubice nefunguje dokonale na kapalinách proudících vyššími rychlostmi a u ústí manometrické trubice mohou vznikat různé turbulence, které ovlivní tlak v daném místě a tedy i výšku vody v manometru.

Dále z grafů (4) až (7) (tj. závislost $k(\text{Re})$ pro všechny tři trubice) je vidět, že v oblasti laminárního proudění vztah (8) poměrně dobře vystihuje funkční závislost. V přechodové části se hodnoty odtrhují od této funkce a blíží se k teoretické funkci (9) pro turbulentní proudění. Této funkce se nadále drží (to je vidět hlavně z grafu (7)).

Pro přesnější měření závislosti $k(\text{Re})$ by bylo potřeba zpřesnit měření průtoku (tedy času a objemu vyteklé vody)⁷ i měření rozdílů tlaků. Manometr není ideálním zařízením na měření tlaku v proudící kapalině a proto by bylo třeba sáhnout po přesnějším měřidle.

4.1 Pracovní podmínky

místo:	Praha, Ke Karlovu 3
datum:	15.3.2018
atmosférický tlak:	$(976,40 \pm 0,05)$ hPa
teplota vzduchu:	$(24,40 \pm 0,05)$ °C

Z těchto podmínek je důležitá hlavně teplota, na které závisí dynamická viskozita a hustota vody. Během měření se teplota ale téměř neměnila, což ověřilo i měření teploty vytékající vody.

5 Závěr

Úspěšně se podařilo naměřit $Q_V(\Delta p)$, výsledky měření vystihují grafy (1), (2) a (3).

Poloměry trubice určené ze směrnice závislosti $Q_V(\Delta p)$ jsou v tabulce (7) a až na první trubici se shodují s hodnotami naměřenými posuvným měřidlem.

Závislost $k(\text{Re})$ je pro jednotlivé trubice v grafech (4) až (7) a vidíme, že pro laminární proudění se shoduje s teoretickou křivkou. V přechodové oblasti se hodnota k nachází mezi oběma závislostmi a dále s blíží k teoretické závislosti (9).

⁶Průměr trubice A byl měřen jako poslední a právě před tímto měřením se z jedné měřicí pacičky plastového posuvného měřidla odlomil malinký kousek nalomeného plastu, což by vysvětlovalo tuto systematickou chybu pouze u hodnoty pro trubici A.

⁷Toho lze dosáhnout jednoduše měřením delších časových intervalů. Jen by bylo potřeba použít větší odměrné válce a mít na měření dostatek času.

6 Seznam použité literatury

- [1] SLAVÍNSKÁ, D., I. STULÍKOVÁ a P. VOSTRÝ. *Fyzikální praktikum I - Mechanika a molekulová fyzika*. Praha: SPN, 1989.
- [2] BROŽ, J. a KOL. *Základy fyzikálních měření I*. 1. vyd. Praha: SPN, 1983, 669 s.
- [3] J. MIKULČÁK, J. CHARVÁT, M. MACHÁČEK a F. ZEMÁNEK. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2003
- [4] B. VYBÍRAL. *Zpracování dat fyzikálních měření* Hradec Králové: MAFY, 2002