

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření součinitele tření při proudění vody v trubkách různých
materiálů

Measurement of the Friction Coefficient in Water Flow in the Pipes
of Different Materials

Student: Veronika Horová

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Veronika Horová**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Měření součinitele tření při proudění vody v trubkách různých materiálů**
Measurement of the Friction Coefficient in Water Flow in the Pipes of Different Materials
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše odborné literatury zabývající se požadovaným tématem (třecí ztráty při laminárním a turbulentním proudění).
2. Měření tlaku a průtoku vody. Metody měření a měřidla. Měření průtoku s použitím přepadu.
3. Návrh experimentální měřicí tratě k měření součinitele tření při proudění vody v trubkách.
4. Provedení měření součinitele tření při proudění vody v trubkách různého materiálu.
5. Vyhodnocení výsledků měření součinitele tření (grafy, tabulky).

Seznam doporučené odborné literatury:

1. DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin - učební text*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1508-4.
2. *Návod k měření místních ztrát*. Online: <http://www.338.vsb.cz/PDF/SKRIPTA01.pdf>
3. JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1995. 155 s.
4. JENČÍK, J., KUHN, L. *Technická měření ve strojírenství*. Praha: SNTL Praha, 1982. 580 s.
5. NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL Praha, 1987. 354 s.
6. NOSKIEVIČ, J., JANALÍK, J., RÝC, Z., ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin - příručka pro laboratorní cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1987. 152 s. ISBN-80-03-00308-3.
7. VINOPAL, S., KOLÁŘ, V. *Hydraulika průmyslových armatur*. Praha: SNTL Praha, 1963. 650 s.
8. MILLER, D. S. *Internal Flow Systems*. BHRA (Information Services), 1990. 396p. ISBN 0-947711-77-5.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16.5.2016.....

Veronika Horová
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 16.5.2016

Veronika Horová
Přemyslovců 1260/42
Ostrava
709 00


.....
podpis

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HOROVÁ, V. *Měření součinitele tření při proudění vody v trubkách různých materiálů: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2016, 60 s. Vedoucí práce: Bojko, M.

Bakalářská práce se zabývá měřením součinitele tření při proudění vody v trubkách různých materiálů. Teoretická část se zabývá prouděním skutečné kapaliny a charakteristikou součinitele tření. Jsou uvedeny vzorce pro určení součinitele tření podle různých autorů. Teoretická část se také zabývá problematikou přepadů a jejich charakteristikou. Praktická část obsahuje návrh, sestavení a praktické měření na experimentální trati. Dále je uveden popis a postup měření. Pro názornost jsou naměřené a vypočtené hodnoty převedeny do grafické podoby.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

HOROVÁ, V. *Measurement of the Friction Coefficient in Water Flow in the Pipes of Different Materials: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2016, 60 p. Thesis head: Bojko, M.

The content of this thesis is measurement of the frictional coefficient in water flow in the pipes of different materials. The theoretical part deals with the issue of real liquid flow and characteristic of frictional coefficient. There are cited formulas for determining the friction coefficient according to different authors. The theoretical part also deals with the weir issue and their characteristic. The practical part contents design, assembly and practical measuring on the measuring track. There are listed description of a measuring track and process of measuring. For illustration, the measured and calculated values are converted into graphical form.

Obsah

Seznam použitého značení.....	8
1 Úvod.....	10
2 Proudění skutečné (vazké) kapaliny.....	12
2.1 Třecí ztráty v potrubí.....	13
2.2 Charakteristika laminární proudění.....	14
2.3 Charakteristika turbulentní proudění.....	16
3 Charakteristika součinitele tření.....	18
3.1 Definice součinitele tření dle Nikuradseho.....	18
3.2 Definice součinitele tření dle Moodyho.....	19
4 Vzorce pro výpočet součinitele tření.....	21
4.1 Laminární proudění.....	21
4.2 Turbulentní proudění.....	21
5 Přepady.....	24
5.1 Ostrohranné přepady.....	27
5.1.1 Výpočet přepadu přes ostrou hranu, Bazinův přeliv.....	27
5.1.2 Nedokonalý přepad přes ostrou hranu.....	30
5.1.3 Ostrohranné přelivy s bočním zúžením.....	32
5.2 Jezové přelivy.....	33
6 Měření tlaku.....	34
7 Měření průtoku.....	35
8 Návrh experimentální měřicí tratě.....	36
8.1 Postup měření.....	39
9 Vyhodnocení měření (Δp , λ).....	40
9.1 Měření $\Delta p=f(Q_V)$	40
9.2 Vyhodnocení součinitele tření z měření a podle empirických vztahů.....	50
10 Závěr.....	56
11 Citovaná literatura.....	59

12	Seznam příloh	60
----	---------------------	----

Seznam použitého značení

Označení	Název	Jednotka
H	rozdíl úrovní horní a dolní hladiny	[m]
K	součinitel tvaru průřezu	[1]
Q_v	objemový průtok	[m ³ s ⁻¹]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
S	obsah	[m ²]
V	objem	[m ³]
b	šířka přepadu	[m]
d	vnitřní průměr potrubí	[m]
d_h	hydraulický průměr	[m]
e_z, Y_z	měrná ztrátová energie	[J·kg ⁻¹]
g	gravitační zrychlení	[m·s ⁻²]
h	přepadová výška	[m]
h	výška vodní hladiny	[m]
h_z	ztrátová výška	[m]
k	absolutní drsnost	[m]
k_r	relativní drsnost	[1]
l	délka potrubí	[m]
m	Bazinův součinitel přepadu	[1]
o	obvod	[m]
p_0	atmosférický tlak	[Pa]
p_z	tlaková ztráta	[Pa]

s	výška přelivné hrany nad dolním dnem	[m]
t	čas	[s]
t	tloušťka přepadové stěny	[m]
v_0	přítoková rychlost	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
v	střední rychlost tekutiny	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
α	Coriolisovo číslo	[1]
ζ	ztrátový součinitel	[1]
η	součinitel dynamické viskozity	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
λ	součinitel tření	[1]
μ	součinitel přepadu	[1]
ν	součinitel kinematické viskozity	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
ρ	hustota	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
σ_{skl}	součinitel sklonu přelivné stěny	[1]
σ_z	součinitel zatopení	[1]

1 Úvod

Cílem bakalářské práce je měření součinitele tření při proudění vody v trubkách různého materiálu. K měření jsem sestavila měřicí trať. Na této trati pak probíhalo vlastní praktické měření. V úvodní kapitole popisují proudění skutečné (vazké) kapaliny, které můžeme rozdělit na laminární proudění a turbulentní proudění. Dále charakterizují vztah pro výpočet třecích ztrát v potrubí a Bernoulliho rovnici.

V kapitole pojednávající o charakteristice součinitele tření se na Moodyho diagramu rozdělí tři oblasti proudění, a to laminární proudění, přechodová oblast a turbulentní proudění. Dále jsou v tabulce uvedeny vzorce pro určení součinitele tření podle jednotlivých autorů. Uvedeny jsou vzorce pro hydraulicky hladké potrubí (součinitel tření závisí pouze na Reynoldsově čísle), pro přechodovou oblast (součinitel tření závisí na Reynoldsově čísle, i na poměrné drsnosti), pro hydraulicky drsné potrubí (součinitel tření závisí pouze na poměrné drsnosti) a univerzální rovnice pro turbulentní proudění.

Další kapitolou literární rešerše jsou přepady, kde popisují jednotlivé části přepadu (koruna přepadu, přepadový paprsek). Jsou zde uvedena jednotlivá rozdělení přepadů, a to například podle tvaru a tloušťky přepadové stěny, podle polohy hladiny za přepadem, podle polohy přepadové hrany vzhledem ke směru proudění kapaliny.

Dále jsou popsány některé typy měřících přístrojů pro měření tlaku (tlakoměry) a měřidla pro měření průtoku. Teoretická část obsahuje i vlastní návrh experimentální měřicí tratě, její popis a postup měření.

Praktická část představuje vlastní průběh měření a vyhodnocení $\Delta p = f(Q_V)$, $\Delta p = f(Re)$, $\lambda = f(Re)$. Dále je zde vyhodnocení součinitele tření z měření, určení součinitele tření ze vztahů pro laminární a pro turbulentní proudění a určení součinitele tření z empirických vztahů. Nejprve jsem navrhla experimentální měřicí trať. Trať se skládá ze dvou nádrží, trubek různých materiálů (DEKA ABS-GF, pozink, PVDF, GF DEKAPUR PVC-U) a měřicího přístroje, v tomto případě U-trubice. Podle návrhu jsem trať sestavila. Měření probíhalo tak, že v jedné nádrži se udržovala konstantní výška hladiny. V druhé nádrži se pomocí odměrné nádoby určoval průtok. Voda z jedné nádrže proudila trubkou, na které byla dvě odběrná místa. Do těchto míst byla napojena U-trubice pro měření tlakové difference. Z trubky voda vtékala do druhé nádrže, ve které byl přepad. Přes přepad voda proudila do menší části nádrže. V této malé části nádrže jsem pomocí odměrné metody měřila průtok. Měřila jsem čas, za který se naplnil určitý objem menší části nádrže. Poté

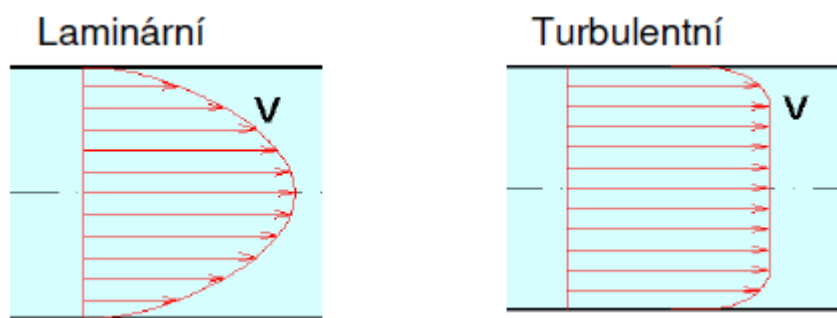
jsem podle obecně známých vztahů vypočítala ostatní veličiny. Všechny výsledky jsou vyhodnoceny pomocí tabulek a grafů.

2 Proudění skutečné (vazké) kapaliny

Skutečná kapalina může proudit ve dvou režimech, a to v režimu laminárním, nebo turbulentním. Při laminárním proudění se částice kapaliny pohybují ve vrstvách, ale nepřemísťují se po průřezu.

Při turbulentním proudění se částice navíc pohybují i po průřezu, tzn., že mají podélnou složku rychlosti i turbulentní (flukтуаční) složku rychlosti.

Důkaz o existenci obou těchto proudění je Reynoldsův pokus. Při něm se obarvená tekutina přivádí malou trubičkou do potrubí s proudící tekutinou a vyšetřuje se její pohyb. Pokud kapalina v potrubí proudí malou rychlostí, barevný proud zůstane neporušen a pozorujeme laminární proudění. Při vyšších rychlostech se částice barevného proudu mísí a dochází k proudění turbulentnímu.



Obr. 2.1 - rychlostní profil potrubí [1]

Laminární a turbulentní proudění se od sebe liší rychlostním profilem (Obr. 2.1) a velikostí hydraulických ztrát. Rychlostní profil u laminárního proudění je rotační paraboloid, zatímco rychlostní profil turbulentního proudění se blíží obdélníku. Reynoldsovo kritické číslo určuje přechod z laminárního proudění na turbulentní a je dáno vztahem:

$$Re = \frac{v \cdot d_h}{\nu} \quad (2.1)$$

kde,

v - střední rychlost tekutiny

d_h - hydraulický průměr

ν - kinematická viskozita kapaliny

Hydraulický průměr určíme podle vztahu:

$$d_h = \frac{4 \cdot S}{O} \quad (2.2)$$

kde,

S - vnitřní průřez potrubí

O - omočený obvod

Pokud hydraulický průměr dosadíme do rovnice (2.1), můžeme určit Reynoldsovo číslo i pro potrubí jiného, než kruhového průřezu.

Kritická hodnota Reynoldsova čísla pro proudění kapaliny v potrubí kruhového průřezu je $Re_{krit} = 2320$. Pro Reynoldsova čísla nižší než $Re = 2320$ definujeme režim laminární a pro vyšší Re turbulentní režim proudění.

2.1 Třecí ztráty v potrubí

Prouděním skutečných kapalin potrubím vznikají vlivem viskozity hydraulické odpory (ztráty). Tento pojem zahrnuje všechny účinky, způsobující rozptyl energie. Tato rozptýlená (ztrátová) energie se může projevit jako úbytek kinetické energie, nebo tlakový úbytek, nebo jako snížení polohové energie.

Pro rozptýlenou ztrátovou energii můžeme definovat vztah:

$$e_z = Y_z = \frac{p_z}{\rho} = g \cdot h_z = \frac{v^2}{2} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \quad (2.3)$$

kde,

ζ - ztrátový součinitel

λ - součinitel tření

$\frac{p}{\rho}$ - měrná tlaková energie

$\frac{v^2}{2}$ - měrná kinetická energie

gh - měrná potenciální energie

e_z, Y_z - měrná ztrátová energie

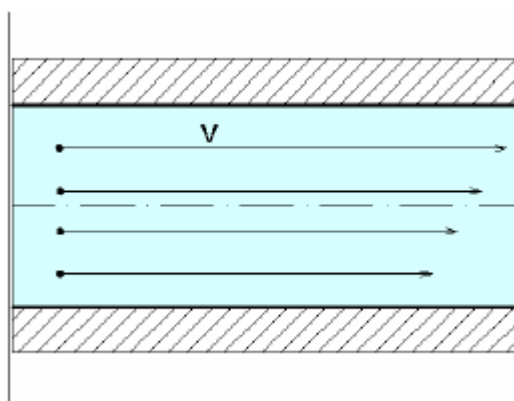
Ztrátová energie vystupuje při výpočtech v Bernoulliho rovnici pro skutečnou (vazkou) kapalinu. Vstupní část měřeného potrubí dosadíme do rovnice vlevo a označujeme ji indexy 1. Na pravé straně rovnice je potom výstupní část potrubí označena indexy 2. Měrnou ztrátovou energii dosadíme na pravou stranu Bernoulliho rovnice, která je definována vztahem:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + e_z \quad (2.4)$$

Odpory (ztráty) dělíme na třecí odpory a místní odpory. Příčinou třecích odporů jsou třecí síly. Tyto odpory závisí na délce potrubí, kanálu, apod. V místech, kde se mění směr rychlosti, velikost rychlosti, nebo velikost i směr rychlosti vznikají místní odpory. Příčinou může být změna průtočného průřezu, zakřivené potrubí, nebo armatury. Dochází přitom ke vzniku vířivé oblasti.

2.2 Charakteristika laminární proudění

U laminárního proudění třecí ztráty rostou s délkou potrubí. Samozřejmě také závisí na režimu proudění, tzn. i na Reynoldsově čísle.



Obr. 2.2 - laminární proudění [1]

Velikost tlakové ztráty (ztrátové výšky) můžeme u laminárního proudění odvodit analyticky. V tomto případě vycházíme z rovnice pro střední rychlost v potrubí, kterou následně upravujeme.

$$v = v_s \quad (2.5)$$

$$v = \frac{p_z \cdot d^2}{32 \cdot \eta \cdot L} \quad (2.6)$$

Z této rovnice následně vyjádříme tlakovou ztrátu a upravíme do následující podoby.

$$\begin{aligned} p_z &= \frac{32 \cdot \eta \cdot L \cdot v}{d^2} = \frac{32 \cdot \eta \cdot L \cdot v}{d^2} \cdot \frac{v}{v} \cdot \frac{\rho}{\rho} \cdot \frac{2}{2} = \frac{64}{v \cdot d} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \\ &= \frac{64}{\text{Re}} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \end{aligned} \quad (2.7)$$

kde,

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} - \text{součinitel tření} \quad (2.8)$$

Dynamickou viskozitu definujeme podle vztahu:

$$\eta = \rho \cdot \nu \quad (2.9)$$

Poté můžeme odvodit tzv. Darcy-Weisbachovu rovnici pro ztrátovou výšku.

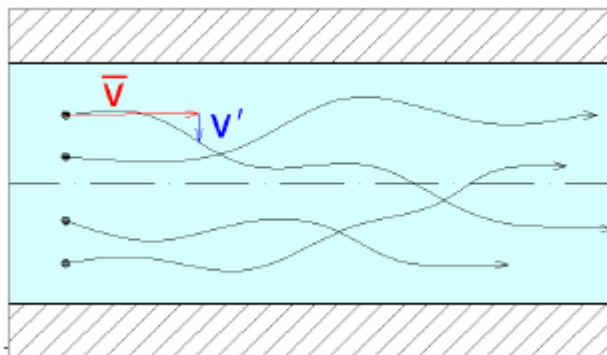
$$h_z = \frac{p_z}{\rho \cdot g} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.10)$$

kde,

$$\zeta = \lambda \cdot \frac{L}{d} - \text{ztrátový součinitel}$$

2.3 Charakteristika turbulentního proudění

U turbulentního proudění jsou ztráty třením větší než u proudění laminárního v důsledku většího tečného napětí.



Obr. 2.3 - turbulentní proudění [1]

Ztráty třením můžeme vyjádřit stejně jako u laminárního proudění, a to ztrátovou výškou (2.10) tzv. (Darcy-Weisbachova rovnice), nebo tlakovou ztrátou (2.7). Součinitel tření u turbulentního proudění nezávisí jen na Reynoldsově čísle, ale také na relativní (bezrozměrné) drsnosti.

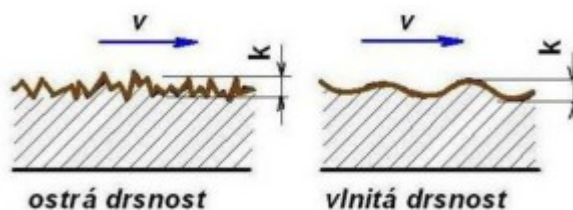
kde,

$\varepsilon = \frac{d}{k}$ - poměrná drsnost

$k_r = \frac{k}{d}$ - relativní (bezrozměrná) drsnost

k - absolutní drsnost stěny potrubí

Absolutní drsnost stěny potrubí definujeme jako střední hodnotu nerovností na stěně potrubí. Je závislá na opracování, druhu materiálu a provozních podmínkách. Na tvar výstupků má podstatný vliv také velikost součinitele tření. Definujeme dvě drsnosti, a to vlnitou drsnost a ostrou drsnost (viz Obr. 2.4).



Obr. 2.4 - druhy drsností [2]

Absolutní drsnost potrubí k		
Materiál potrubí	Původní stav (mm)	Korodovaný stav (mm)
Tažené trubky mosazné, měděné, hliníkové	0,0015 až 0,003	0,003 až 0,1
Bezešvé trubky ocelové	0,04 až 0,1	0,1 až 0,9
Tažené trubky ocelové	0,03 až 0,12	0,12 až 0,9
Svařované trubky ocelové	0,05 až 0,1	0,1 až 0,9
Pozinkované trubky ocelové	0,15 až 0,5	0,5 až 3,5
Vodovodní potrubí po 20-ti a více letech v provozu		0,6 až 3,0
Skleněné trubky, trubky z plastů	0,001 5 až 0,01	
Pryžové hadice	0,01 až 0,03	
Betonové potrubí	0,3 až 6,0	

Tab. 2.1 - absolutní drsnost materiálů potrubí [2]

Hodnoty absolutní drsnosti některých materiálů potrubí v původním stavu a v korodovaném stavu jsou uvedeny v Tab. 2.1.

Pro výpočet součinitele tření u turbulentního proudění byly rovnice stanoveny na základě experimentálního měření. Blasius v roce 1913 odvodil empirický vztah pro hydraulicky hladké potrubí $k=0$, (viz. literatura [1],[2]).

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (Re_k \leq Re \leq 8 \cdot 10^4) \quad (2.11)$$

Podle Nikuradseho výsledků experimentů, platí pro hladké potrubí vztah:

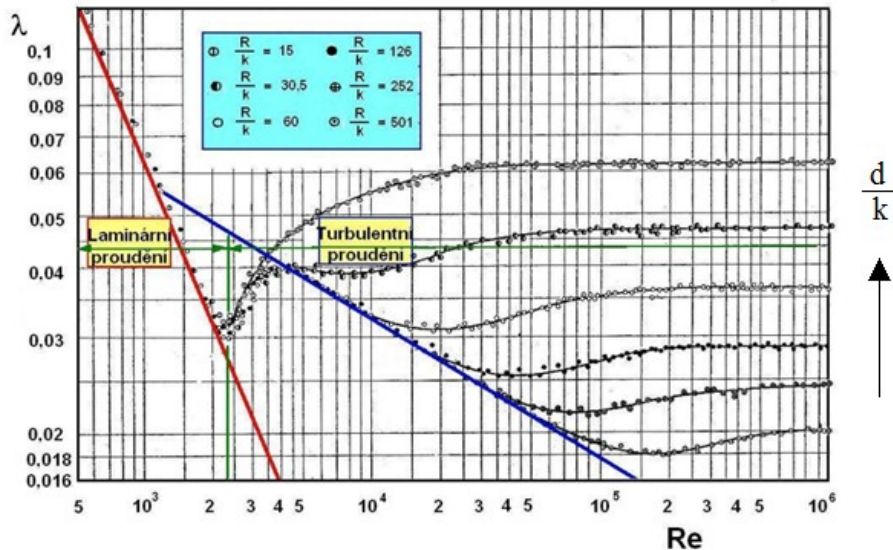
$$\lambda = \frac{1}{[2 \log(Re\sqrt{\lambda}) - 0,8]^2} \quad (Re > 6 \cdot 10^4) \quad (2.12)$$

3 Charakteristika součinitele tření

3.1 Definice součinitele tření dle Nikuradseho

V období 1930 až 1933 se Nikuradse experimentálně zabýval součinitelem tření. K tomu používal bronzové potrubí různých průměrů a různých poměrných drsností s kruhovým průřezem. První měřil v hladkém potrubí. Poté lepil tříděná písková zrna a tím měnil drsnost potrubí. Výsledky Nikuradseho měření můžeme vidět na Obr. 3.1. Červenou čarou je znázorněna oblast laminárního proudění. Modrou čarou na obrázku je znázorněna Blasiova přímka, představující průběh součinitele tření pro hladké potrubí. Jak můžeme vidět na obrázku (Obr. 3.1), od Blasiovy přímky se odvíjí křivky pro různé poměrné drsnosti ε . Při rostoucím Reynoldsově čísle se tyto křivky stávají rovnoběžnými s vodorovnou osou. Můžeme říci, že v této oblasti už součinitel tření nezávisí na Reynoldsově čísle, ale na poměrné drsnosti potrubí a má stálou hodnotu. Tato oblast se nazývá vyvinuté turbulentní proudění a Nikuradse vyjádřil pro tuto oblast vztah pro určení součinitele tření.

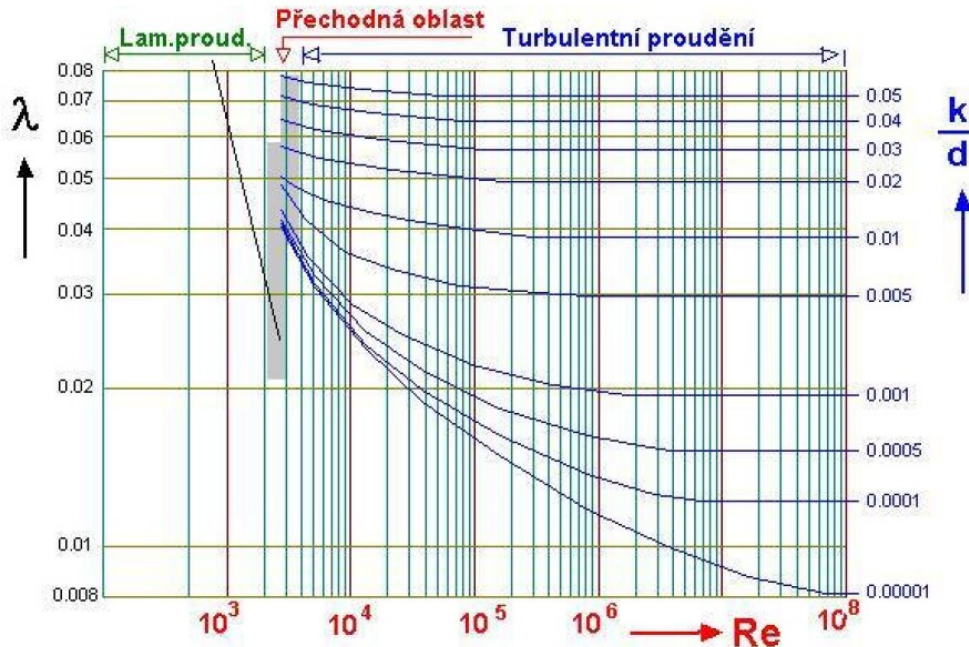
$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \log \frac{d}{k} + 1,138\right)^2} \quad \left(\frac{k}{d} \text{Re} \sqrt{\lambda} > 191,2\right) \quad (3.1)$$



Obr. 3.1 - výsledky Nikuradseho experimentu [2]

3.2 Definice součinitele tření dle Moodyho

Moodyho diagram je grafické zpracování závislosti součinitele tření na relativní drsnosti a Reynoldsově čísle (viz. Obr. 3.2). Moodyho diagram je přesnější pro popis přechodové oblasti pro běžnou drsnost než Nikuradseho diagram.



Obr. 3.2 - Moodyho diagram $\lambda=f(Re, kr)$ [2]

Na Moodyho diagramu můžeme vidět tři oblasti proudění

- Laminární proudění
- Přechodová oblast
- Turbulentní proudění

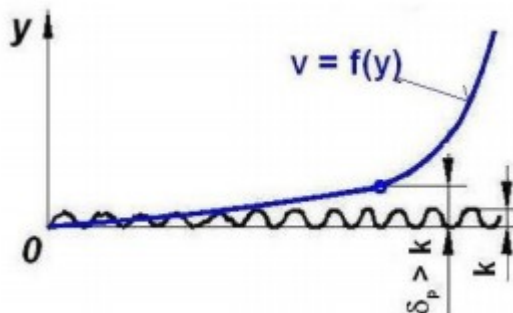
Pro **laminární proudění** je typické, že součinitel tření je funkcí Reynoldsova čísla. Laminární proudění definujeme do $Re < 2320$.

V oblasti **turbulentního proudění** rozeznáváme další tři oblasti, pro které existují empirické vztahy, které jsou uvedeny v následující kapitole.

Z důvodu, že drsnost má vliv na součinitele tření, rozdělujeme turbulentní proudění ještě na tři oblasti.

- Hydraulicky hladká stěna
- Oblast přechodová
- Hydraulicky drsná stěna

V případě **hydraulicky hladkého potrubí** zakryje vazká podvrstva nerovnosti povrchu potrubí (výstupky drsnosti jsou tak malé, že je zakryje laminární podvrstva). Tím pádem nemají vliv na třecí ztráty. Nemají vliv na proudění v turbulentním jádru. Součinitel tření je zde závislý pouze na Reynoldsově čísle.



Obr. 3.3 - Hydrodynamicky hladký povrch [2]

V **oblasti přechodové** začínají nerovnosti vystupovat z vazké podvrstvy. Součinitel tření už nezávisí jen na Reynoldsově čísle, ale také na poměrné drsnosti. Tuto oblast najdeme mezi přímkou Blasiovou a křivkami pro různé drsnosti (nachází se mezi oblastí hydraulicky hladkého a hydraulicky drsného potrubí).

V **hydraulicky drsném potrubí** už nerovnosti vystupují z vazké podvrstvy a zasahují do turbulentního jádra. Součinitel nezávisí na Reynoldsově čísle, ale závisí jen na relativní drsnosti.

4 Vzorce pro výpočet součinitele tření

4.1 Laminární proudění

Pro oblast laminárního proudění je typické, že součinitel tření je funkcí Reynoldsova čísla (2.1). Laminární proudění pozorujeme jen do Reynoldsova čísla 2320. Toto platí pro potrubí kruhového průřezu, bez přestupu tepla.

$$\lambda = f(Re) \quad (4.1)$$

$$\lambda = \frac{K}{Re} \quad (4.2)$$

Křivku součinitele tření popisuje Hagen-Poiseuilleův zákon (rovnice (4.2)).

Pro různé průřezy potrubí, udává konstanta K součinitel tvaru průřezu potrubí. Pro kruhový průřez potrubí je $K = 64$, pro čtvercový 57, pro mezikruží 96.

4.2 Turbulentní proudění

Při turbulentním proudění používáme pro určení součinitele tření následující empirické vzorce (Tab. 4.1, Tab. 4.2, Tab. 4.3, Tab. 4.4).

Hydraulicky hladké potrubí

Podle literatury [2], [3], [4], platí vztahy, kdy součinitel tření závisí pouze na Reynoldsově číslu.

Nikuradse	$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}$	$10^5 < Re < 10^7$	(4.3)
Blasius	$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}$	$4 \cdot 10^3 < Re < 10^5$	(4.4)
McAdams	$\lambda = \frac{0,184}{Re^{0,2}}$	$3 \cdot 10^4 < Re < 10^6$	(4.5)
Lees	$\lambda = 0,00714 + \frac{0,61}{Re^{0,35}}$	$4 \cdot 10^3 < Re < 1,5 \cdot 10^6$	(4.6)
Drew et. al	$\lambda = 0,0056 + \frac{0,5}{Re^{0,32}}$	$4 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^6$	(4.7)
Herrman	$\lambda = 0,0054 + \frac{0,395}{Re^{0,3}}$	$2 \cdot 10^4 < Re < 2 \cdot 10^6$	(4.8)
Prandtl-Nikuradse	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log \frac{Re \cdot \sqrt{\lambda}}{2,51}$	$2300 < Re < 4 \cdot 10^6$	(4.9)
Konakov	$\lambda = (1,8 \cdot \log Re - 1,5)^{-2}$	$2300 < Re < 10^6$	(4.10)

Altšul	$\lambda = \frac{1}{(1,82 \cdot \log(\text{Re}) - 1,64)^2}$	(4.11)
---------------	---	--------

Tab. 4.1 - vztahy pro hydraulicky hladké potrubí

Přechodová oblast

Podle literatury [1], [2], [4] platí, že součinitel tření v přechodové oblasti závisí na Reynoldsově čísle, i na poměrné drsnosti.

Altšul	$\lambda = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{\text{Re}} + \frac{k}{d} \right)^{0,25}$	(4.12)
Moody	$\lambda = 0,0055 \cdot \left(1 + \left(2 \cdot 10^4 \cdot \frac{k}{d} + \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{\frac{1}{3}} \right)$	(4.13)
Filonenko	$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{k}{d} \right)^{0,25}$	(4.14)
Colebrook-White	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log \left(0,27 \cdot \frac{k}{d} + \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} \right)$	(4.15)
Frankel	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{k}{3,71 \cdot d} + \left(\frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} \right)$	(4.16)

Tab. 4.2 - vzorce pro přechodovou oblast

Hydraulicky drsné potrubí

U Hydraulicky drsného potrubí závisí součinitel tření jenom na poměrné drsnosti.

Kármán	$\lambda = \frac{8}{\left(4,75 + 5,75 \cdot \log \frac{d}{2 \cdot k} \right)^2}, \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{3,71 \cdot d}{k} \right)$	(4.17)
Nikuradse	$\lambda = \frac{0,25}{\left(\log \frac{3,7 \cdot d}{k} \right)^2}, \quad \lambda = \frac{0,1}{\left(1,14 + 2 \cdot \log \frac{d}{k} \right)^2},$ $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{3,71 \cdot d}{k} \right)$	(4.18)

Tab. 4.3 - vzorce pro hydraulicky drsné potrubí

Turbulentní proudění – univerzální rovnice

V literatuře [4], [5] je uvedeno, že během pár let od uvedení Moodyho diagramu (viz. Obr. 3.2) se autoři snažili nalézt univerzální rovnice pro výpočet součinitele tření, které by platili pro celou oblast turbulentního proudění.

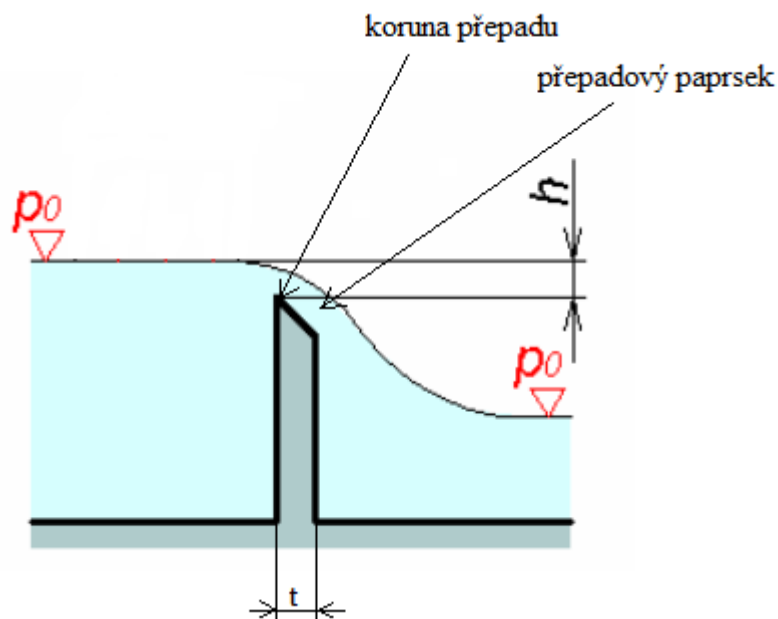
Wood (1966)	$\lambda = a + b \cdot \text{Re}^{-c}$	$\text{Re} > 10^4, 10^{-5} < k_r < 0,04$	(4.19)
Kde $a = 0,53 \cdot \frac{k}{d} + 0,094 \cdot \left(\frac{k}{d}\right)^{0,225}$, $b = 88 \cdot \left(\frac{k}{d}\right)^{0,44}$, $c = 1,62 \cdot \left(\frac{k}{d}\right)^{0,134}$			
Swamee-Jain (1976)	$\lambda = \frac{0,25}{\left[\log\left(\frac{k}{d} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}}\right)\right]^2}$	$5000 \div 10^7$ $k_r = 0,00004 \div 0,05$	(4.20)
Churchill (1977)	$\lambda = 8 \cdot \left(\left(\frac{8}{\text{Re}}\right)^{12} + (A + B)^{-\frac{3}{2}}\right)^{\frac{1}{12}}$	Platí pro všechny poměrné drsnosti a všechna Reynoldsova čísla.	(4.21)
Kde $A = \left[-2 \cdot \log\left(\left(\frac{k}{3,7}\right) + \left(\frac{7}{\text{Re}}\right)^{0,9}\right)\right]^{16}$, $B = \left(\frac{37530}{\text{Re}}\right)^{16}$			
Chen (1979)	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{k}{3,7056 \cdot d} - \frac{5,0452}{\text{Re}}\right) \cdot \log\left(\frac{1}{2,8257} \cdot \left(\frac{k}{d}\right)^{1,1098} + \frac{5,8506}{\text{Re}^{0,8981}}\right)$		(4.22)
Barr (1981)	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{k}{3,7 \cdot d} + \frac{4,518 \cdot \log\left(\frac{\text{Re}}{7}\right)}{\text{Re} \cdot \left(1 + \frac{\text{Re}^{0,52}}{29} \cdot \left(\frac{k}{d}\right)^{0,7}\right)}\right)$		(4.23)
Zigrang-Sylvester (1982)	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{k}{3,7 \cdot d} - \frac{5,02}{\text{Re}} \cdot \log\left(\frac{k}{3,7 \cdot d} + \frac{13}{\text{Re}}\right)\right)$		(4.24)
Haaland (1983)	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8 \cdot \log\left[\left(\frac{k}{3,7 \cdot d}\right)^{1,11} + \frac{6,9}{\text{Re}}\right]$		(4.25)
Manadilli (1997)	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left[\frac{k}{3,7 \cdot d} + \frac{95}{\text{Re}^{0,983}} - \frac{96,82}{\text{Re}}\right]$		(4.26)
Romeo a kolektiv (2002)	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{k}{3,7065 \cdot d} - \frac{5,0272}{\text{Re}} \cdot A\right)$		(4.27)
Kde $A = \log\left(\frac{k}{3,827 \cdot d} - \frac{4,567}{\text{Re}} \cdot \log\left(\left(\frac{k}{7,7918}\right)^{0,9924} + \left(\frac{5,3326}{208,815 + \text{Re}}\right)^{0,9345}\right)\right)$			

<p>Evangleids, Papaevangelou, Tzimopoulos (2010), (1)</p>	$\lambda = \frac{0,2479 - 0,0000947 \cdot (7 - \log \cdot \text{Re})^4}{\left(\log\left(\frac{k}{3,615 \cdot d} + \frac{7,366}{\text{Re}^{0,9142}}\right)\right)^2}$	<p>(4.28)</p>
--	--	---------------

Tab. 4.4 - univerzální rovnice

5 Přepady

Přepad se může popsat jako výtok kapaliny nahoře otevřeným otvorem, nebo otvorem, ve kterém hladina nesahá až k jeho hornímu obrysu. Přepad můžeme vytvořit vložením stěny napříč proudem s volnou hladinou. Vložená stěna způsobuje zvyšování hladiny vody, které přes stěnu přepadá. Přepad, neboli přeliv je konstrukce, přes kterou voda přepadá. Přepadovou (přelivnou) hranou, neboli korunou přepadu, nazýváme nejvyšší část přepadu (Obr. 5.1). Proud vody, který proudí přes stěnu přepadu se nazývá přepadový paprsek. Horní hladina je hladina o atmosférickém tlaku p_0 , h je přepadová výška.



Obr. 5.1 - přepad

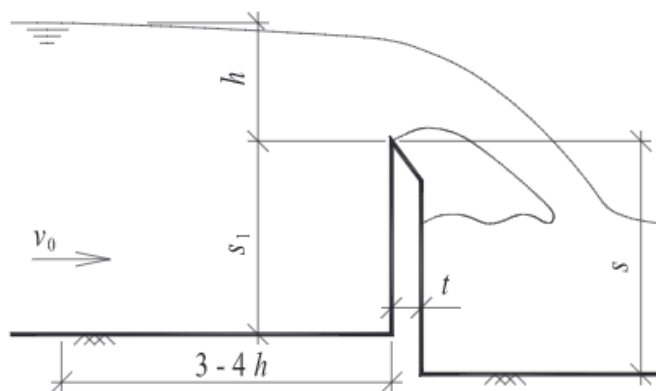
Obecný obrázek přepadu s popsány částmi přepadu je vidět na Obr. 5.1.

..

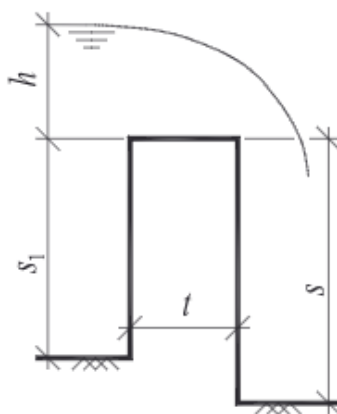
Proudění přes přeliv je ve značné míře ovlivněno tvarem a tloušťkou přepadové stěny.

Z tohoto důvodu podle ní přepady dělíme na tyto typy:

- ostrohranné přelivy (Obr. 5.2);
- jezové nebo přehradní přelivy (ty mohou být lichoběžníkového a obdélníkového příčného průřezu, nebo proudnicové přelivy), (Obr. 5.3)
- přelivy přes širokou korunu;
- zvláštní typy přelivů (např. boční přeliv, nebo šachtový přeliv)



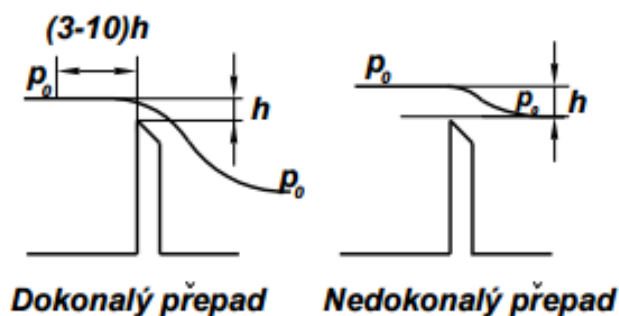
Obr. 5.2 - ostrohranný přepad [7]



Obr. 5.3 - jezový, přehradní přepad [7]

Další dělení provádíme podle polohy hladiny za přepadem, a to na:

- přepad dokonalý – průtok přepadem není ovlivněn spodní hladinou a spodní hladina je pod korunou přepadu (Obr. 5.4)
- přepad nedokonalý (zatopený) – průtok je ovlivněn spodní hladinou, spodní hladina je v tomto případě výše než koruna přepadu (Obr. 5.4)

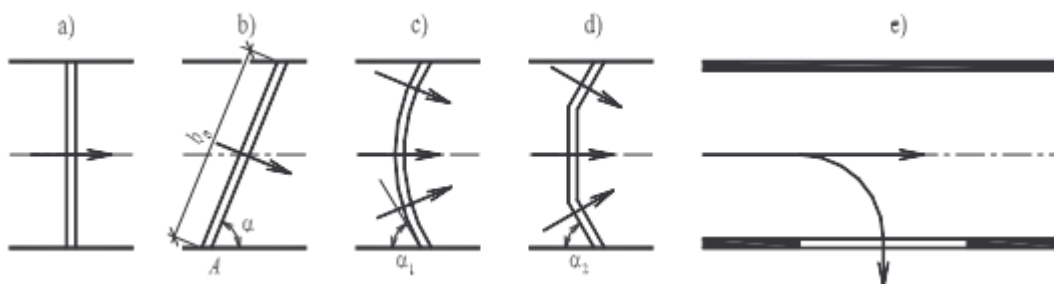


Obr. 5.4 - přepad dokonalý a nedokonalý [3]

Další dělení přepadů je podle polohy přelivné hrany:

Tyto přepady dělíme podle polohy přepadové hrany vzhledem ke směru proudění kapaliny na:

- Přelivy čelné – přelivná stěna je kolmo k proudu
- Přelivy šikmé, lomené, křivočaré
- Boční – přelivná stěna je rovnoběžná s proudem, nebo je odkloněná od osy proudu, ale vodní tok nepřehrazuje



Obr. 5.5 - Typy přepadů: a) čelný; b) šikmý; c) obloukový; d) lomený; e) boční [7]

Další dělení přepadů:

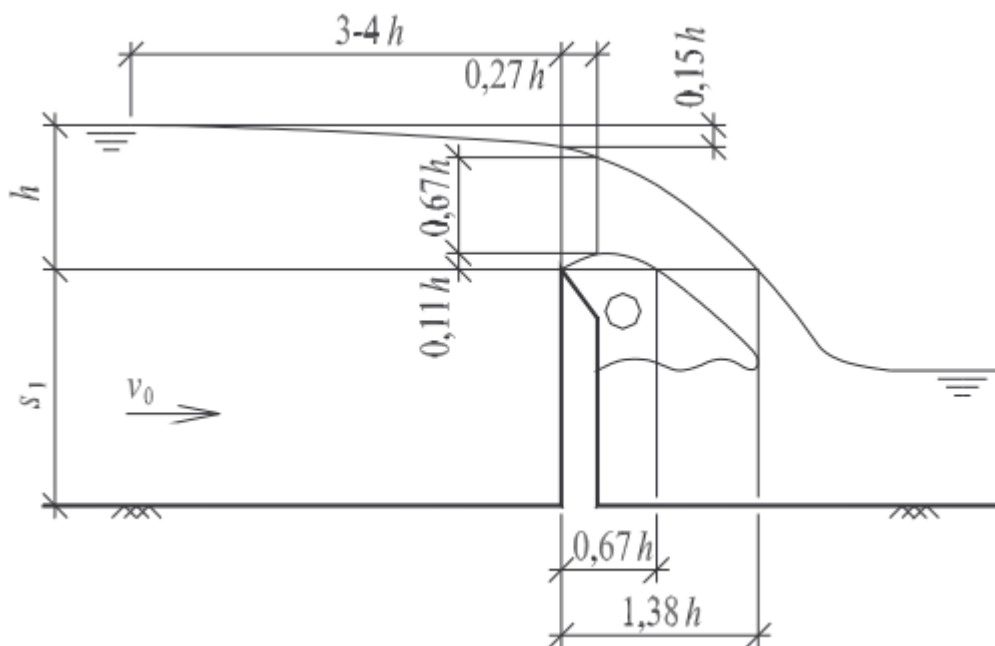
- Přelivy pevné
- Přelivy pohyblivé – lze měnit výšku přelivné stěny, nebo velikost otvoru, ze kterého voda vytéká

5.1 Ostrohranné přepady

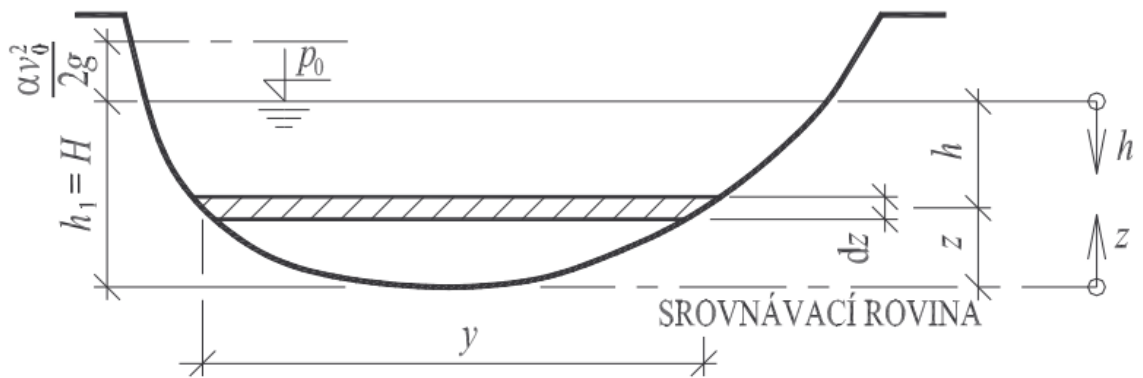
Tento přepad nastává v případě, kdy je tloušťka přelivné stěny $t < 0,66h$ (Obr. 5.1). Tyto přepady jsou zejména používány pro měření průtoku. A to z důvodu, že jsou nejlépe experimentálně ověřené. Pokud chceme dosáhnout přesných výsledků, je třeba zajistit dokonalý přepad, volný přepadový paprsek a uklidnění přítoku (to zajistíme například dlouhým přímým přítokovým žlabem). Přelivná stěna musí být hladká a svislá, z jedné strany do břítu.

5.1.1 Výpočet přepadu přes ostrou hranu, Bazinův přeliv

Charakteristika přepadu přes ostrou hranu (Bazinův přeliv) je patrná z (Obr. 5.6). Pro Bazinův přeliv využíváme stejného postupu jako při výtoku velkým otvorem ve svislé stěně. Pro celkový průtok pro otvory ve svislé stěně platí rovnice (5.1).



Obr. 5.6 - Bazinův přepad [7]



Obr. 5.7 - přepad přes přeliv obecného průřezu [7]

$$Q = \mu \sqrt{2g} \int_{h_2}^{h_1} \left(h + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \right)^{\frac{1}{2}} y dh \quad (5.1)$$

kde,

μ - výtokový součinitel

h_1 - hloubka dolní hrany otvoru

h_2 - hloubka horní hrany otvoru

v_0 - přítoková rychlost

Pro výpočet ostrohranného přepadu integrujeme rovnici (5.1) v mezích od nejnižšího bodu přelivné hrany po hladinu [7]. Dostaneme následující rovnici.

$$Q = \mu \sqrt{2g} \int_0^{h_1} \left(h + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \right)^{\frac{1}{2}} y dh, \text{ kde } y = y(H-h) \quad (5.2)$$

Pokud máme obdélníkový profil vodorovné přelivné stěny $y(H-h) = b = \text{konst.}$, můžeme rovnici integrovat. V rovnici je h přepadová výška. Integrací dostaneme pro průtok Weisbachovou rovnici.

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left[\left(h + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{\alpha v_0^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (5.3)$$

kde,

μ - součinitel přepadu

h - přepadová výška

v_0 - přítoková rychlost

$k = \frac{\alpha v_0^2}{2g}$ - přítoková rychlostní výška

$h_0 = h+k$ - energetická přepadová výška

s_1 - výška stěny

Po zjednodušení rovnice (5.3) dostaneme rovnici:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left[h_0^{\frac{3}{2}} - k^{\frac{3}{2}} \right] \quad (5.4)$$

Pokud nepočítáme s přítokovou rychlostí, dostaneme Poleniovu nebo Dubuatovu rovnici:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} \quad (5.5)$$

Typ přelivu, přepadová výška h , výška stěny s_1 a tlak v prostoru pod paprskem mají vliv na součinitel přepadu. Pokud se prostor pod paprskem zavzdušní, jev se stabilizuje a vznikne volný přepadový paprsek se stálým tvarem.

Bazinův přeliv je takový ostrohranný přeliv, který je bez bočního zúžení a má zavzdušněný prostor pod přepadovým paprskem. Je to základní ostrohranný přeliv, který byl důkladně prozkoumán. To je důvod, proč se Bazinův přeliv stal základním měrným přelivem.

Rovnice pro přepadové množství přes přepad, kterou Bazin odvodil používáme i pro výpočet dalších typů přelivů. Při jejím odvození vycházíme z rovnice (5.3). Z této rovnice zanedbáme $-k^{\frac{3}{2}} = -\left(\frac{\alpha v_0^2}{2gh}\right)^{\frac{3}{2}}$, protože je tento člen zanedbatelný proti $h_0^{\frac{3}{2}}$. Potom vytkneme $h^{\frac{3}{2}}$ a označíme $\frac{2}{3} \mu = m_0$. Dostaneme

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} \left(1 + \frac{\alpha v_0^2}{2gh} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (5.6)$$

Poté můžeme ještě zjednodušit dosazením $m = m_0 \left(1 + \frac{\alpha v_0^2}{2gh}\right)^{\frac{3}{2}}$, pak dostaneme

$$Q = mb\sqrt{2gh^{\frac{3}{2}}} \quad (5.7)$$

Kde m je Bazinův součinitel přepadu. V tomto součiniteli jsou zahrnuty ztráty, vliv přítokové rychlosti a kontrakce na přepadu [7]. Podle Bazina se součinitel vypočítá jako:

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h}\right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+s_1}\right)^2\right] \quad (5.8)$$

Platí pro $0,1 \text{ m} < h < 1,24 \text{ m}$

$0,2 \text{ m} < b < 2 \text{ m}$

$0,2 \text{ m} < s_1 < 2 \text{ m}$

Pokud je přelivná stěna nakloněná o určitý úhel od svislice, musíme rovnici (5.7) rozšířit o součinitel sklonu přelivné stěny. Dostaneme vzorec:

$$Q = \sigma_{skl} mb\sqrt{2gh^{\frac{3}{2}}} \quad (5.9)$$

Hodnoty součinitele sklonu přelivné stěny jsou v (Tab. 5.1).

odklon	proti vodě				po vodě		
δ	45°	30°	15°	0°	15°	30°	45°
σ_{skl}	0,925	0,940	0,965	1,000	1,035	1,075	1,115

Tab. 5.1 - Součinitel sklonu pro Bazinův přeliv [7]

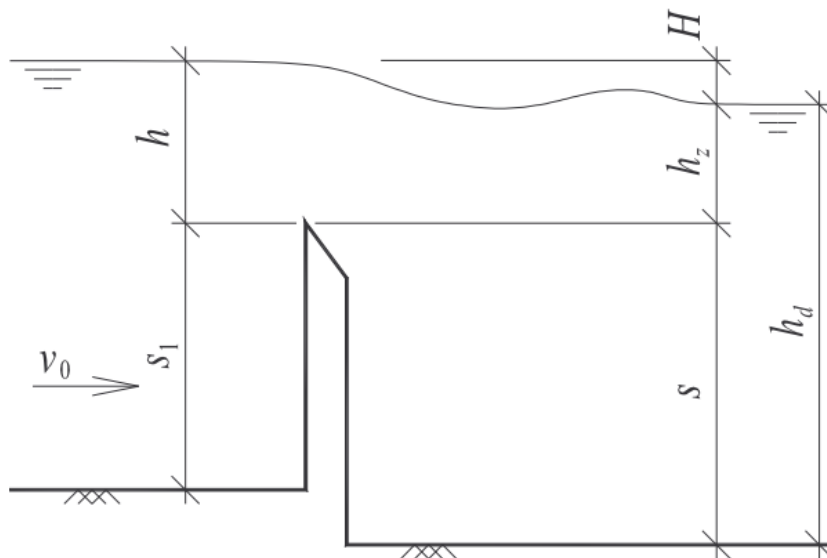
5.1.2 Nedokonalý přepad přes ostrou hranu

Nedokonalý (zatopený) přepad přes ostrou hranu je přepad, jehož hladina dolní vody je výše než přelivná hrana. Přepadové množství se snižuje. Snižuje ho hladina dolní vody. Při tomto přepadu vzniká vodní skok, který se nachází za přepadovým paprskem. Jsou tři typy vodního skoku a to vzdutý, vlnovitý a oddálený. Pouze v případě vzdutého a vlnovitého skoku nastává zatopení. V případě oddáleného vodního skoku je přepad dokonalý, protože paprsek dopadá na dno. Pro výpočet nedokonalých přepadů používáme rovnici:

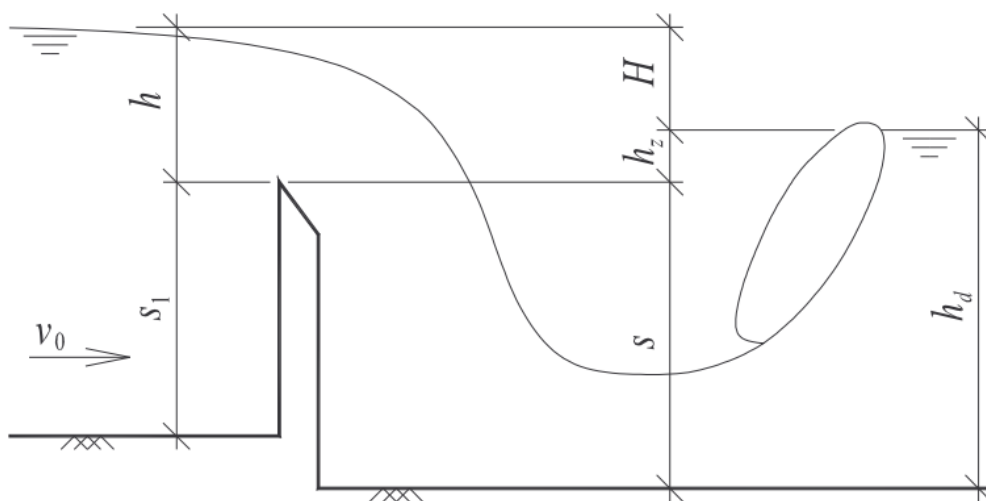
$$Q = \sigma_z mb\sqrt{2gh^{\frac{3}{2}}} \quad (5.10)$$

kde,

$$\sigma_z = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{h_z}{s}\right)^3 \sqrt{\frac{H}{h}} \quad (5.11)$$



Obr. 5.8 - přepad přes ostrou hranu: vzdutý, vlnovitý (nedokonalý přepad) [7]



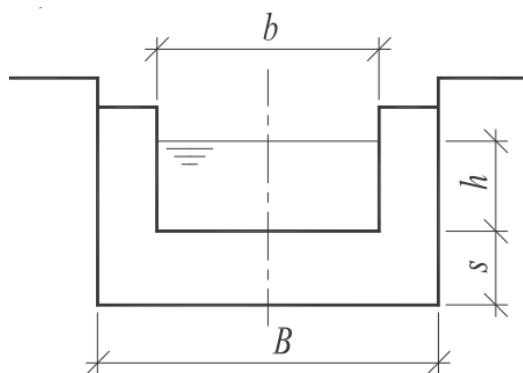
Obr. 5.9 - přepad přes ostrou hranu: oddálený vodní skok (dokonalý přepad) [7]

Nedokonalý přepad se k měření průtoku nedoporučuje. Není tak dobře prozkoumán, jako přepad dokonalý a měření hladin je složitější.

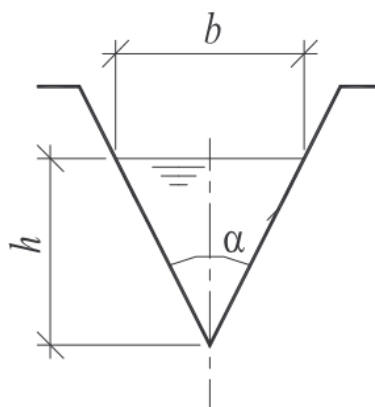
5.1.3 Ostrohranné přelivy s bočním zúžením

Tyto přelivy vznikají tak, že se do stěny přelivu vyřezávají různé tvary. Nejčastěji to bývá obdélník, trojúhelník, lichoběžník, kruh, parabola, atd.

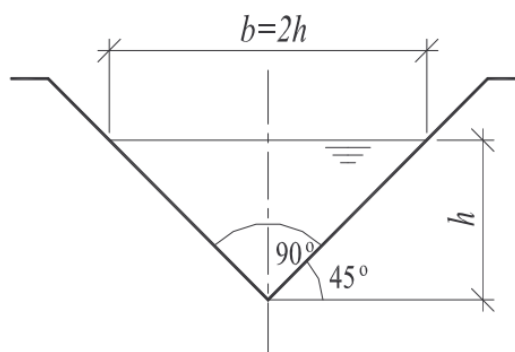
- a) **Obdélníkový (Ponceletův) přeliv** – používá se v malých vodních tocích, nebo v kanálech, které mají obdélníkový průřez pro měření průtoku (Obr. 5.10)
- b) **Trojúhelníkový (rovnoramenný) přeliv** – je přesnější než Ponceletův v případě měření malých průtoků (Obr. 5.11)
- c) **Thomsonův přeliv** – speciální případ trojúhelníkového přelivu (Obr. 5.12)
- d) **Lichoběžníkový přeliv** – vzniká sloučením obdélníkového a trojúhelníkového přelivu



Obr. 5.10 - obdélníkový přepad [7]



Obr. 5.11 - trojúhelníkový přepad [7]



Obr. 5.12 - Thomsonův přepad [7]

5.2 Jezové přelivy

Literatura [9] a [8] uvádí, že jezy jsou víceúčelové stavby umístěné v korytě toku. Mohou být pohyblivé nebo pevné. Jezy slouží ke vzdouvání vody k různým vodohospodářským účelům. Většinou se budují tam, kde je potřeba úprava přilehlého úseku toku. Mohou se budovat samostatně, většinou se však budují na středních, nebo velkých tocích. V takovém případě se v této lokalitě staví i jiné účelové objekty jako je vodní elektrárna, odběrné zařízení, nebo plavební komora a ty pak dohromady tvoří jeden celek. Potom se pro tento celek užívá termín zdymadlo. Nepoužívají se ostrohranné přelivy, protože jsou pro vzdouvání vody staticky nevhodné. Z tohoto důvodu se na tocích jako vzdouvací konstrukce používají:

Pevné jezy – masivní přelivy, nelze manipulovat s hladinami

Pohyblivé jezy – používají se pohyblivé hradící konstrukce (uzávěry), lze manipulovat s hladinami

Jezy mají svůj specifický účel a dá se jimi ovlivnit vodní tok. Používají se například ke zmenšení příliš velkého sklonu dna toku, k soustředění spádu pro využití vodní energie ve vodní elektrárně. Dále se používají k zajištění potřebných plavebních hloubek v toku, stabilizaci hladiny podzemní vody, zlepšení biologické samočisticí schopnosti toku, nebo se jimi vytváří vhodné podmínky pro rekreaci (vodní sporty).

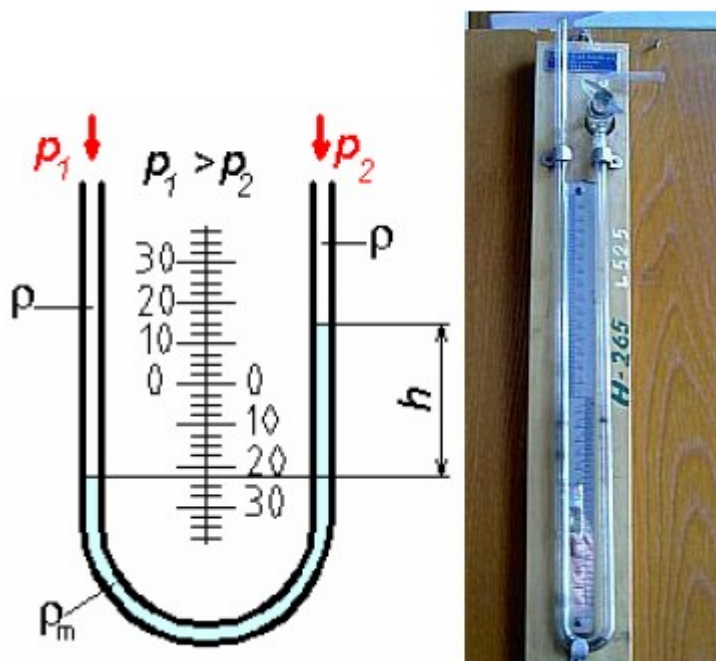
6 Měření tlaku

K měření tlaku v provozech i pro laboratorní podmínky existuje velké množství měřicích přístrojů. Podle literatury [1] můžeme tlakoměry dělit podle různých hledisek. Například podle druhu měřeného tlaku, to známe tlakoměry absolutního tlaku, vakuometry (měří absolutní tlak, který je menší než tlak atmosférický), barometry (měří atmosférický tlak), diferenční tlakoměry (měří rozdíl dvou tlaků, které působí současně), a další. Dále dělíme podle druhu výstupního signálu na mechanické, hydrostatické a elektrické. Nejznámější dělení měřidel tlaku je však podle funkčního principu.

Podle tohoto rozdělujeme tlakoměry na:

- **Kapalinové tlakoměry**

Tyto tlakoměry jsou velmi přesné. Jejich principem je účinek hydrostatického tlaku a měření se převádí na měření výšky sloupce kapaliny. Jsou to například U-trubicové tlakoměry (Obr. 6.1), nebo nádobkové tlakoměry.



Obr. 6.1 - schéma U-trubicového tlakoměru [1]

- **Pístové tlakoměry**

Měření tlaku se u pístových tlakoměrů převádí na měření síly. Jsou to například trubicové tlakoměry (deformačním prvkem je Bourdonova trubice), nebo membránové tlakoměry.

- **Deformační tlakoměry**

Tyto tlakoměry se nejvíce používají v průmyslu. Fungují tak, že měřený tlak způsobí pružnou deformaci tlakoměrného členu, a její velikost je poté úměrná hodnotě měřeného tlaku.

- **Elektrické tlakoměry**

Jsou to moderní snímače, využívající principu tlakové závislosti elektrických veličin. Mezi ně řadíme například odporové tenzometry, u kterých změna deformace vyvolá změnu elektrického odporu.

7 Měření průtoku

K měření průtoku se využívá různých fyzikálních principů, jak je uvedeno v literatuře [1]. Z toho důvodu existuje celá řada různých přístrojů. Rozlišujeme

- **Objemová měřidla**

Založeny na odměřování objemu tekutiny v odměrné nádobě. Měření se provádí opakovaným plněním a vyprazdňováním nádoby, kde počet měřicích cyklů je měřítkem proteklého množství. Mezi objemová měřidla řadíme pístové průtokoměry, membránové plynoměry a bubnové plynoměry.

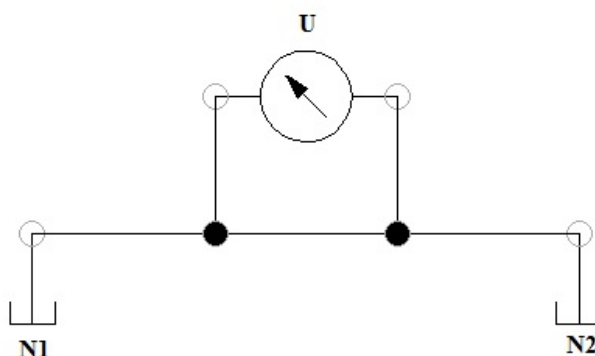
- **Průtokoměry s měřením tlakové difference**

V potrubí dojde ke zúžení průtočného průřezu a diferenčním tlakoměrem snímáme rozdíl tlaků před a za zúžením. Tento rozdíl statických tlaků je závislý na velikosti průtoku. Do této skupiny měřidel řadíme rychlostní sondy, průřezová měřidla (clona, dýza, Venturiho trubice), a kapilární průtokoměr.

8 Návrh experimentální měřicí tratě

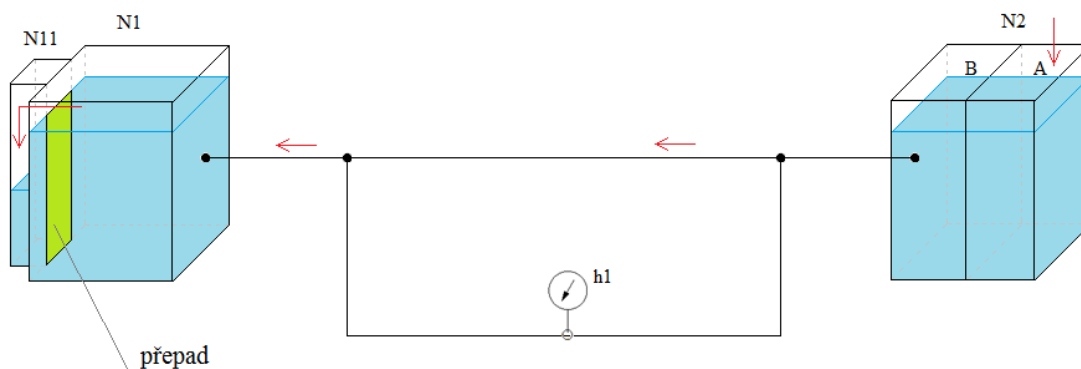
Návrh a zhotovení experimentální měřicí tratě k měření součinitele tření při proudění vody v trubkách bylo provedeno v budově Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v laboratoři E306, Katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení.

Smyslem měření bylo změřit součinitel tření při proudění vody v trubkách různých materiálů, a to konkrétně plast (DEKA ABS-GF), pozink, plast (PVDF) a plast (GF DEKAPUR PVC-U). Každá trubka měla stejnou délku. Průměr jednotlivých trubek se minimálně lišil.



Obr. 8.1 - hydraulické schéma experimentální měřicí trati

Hydraulické schéma experimentální měřicí trati je znázorněno Obr. 8.1. Jsou zde označeny obě nádrže, N1 a N2. Písmenem U je označena U-trubice.



Obr. 8.2 - schéma experimentální měřicí tratě

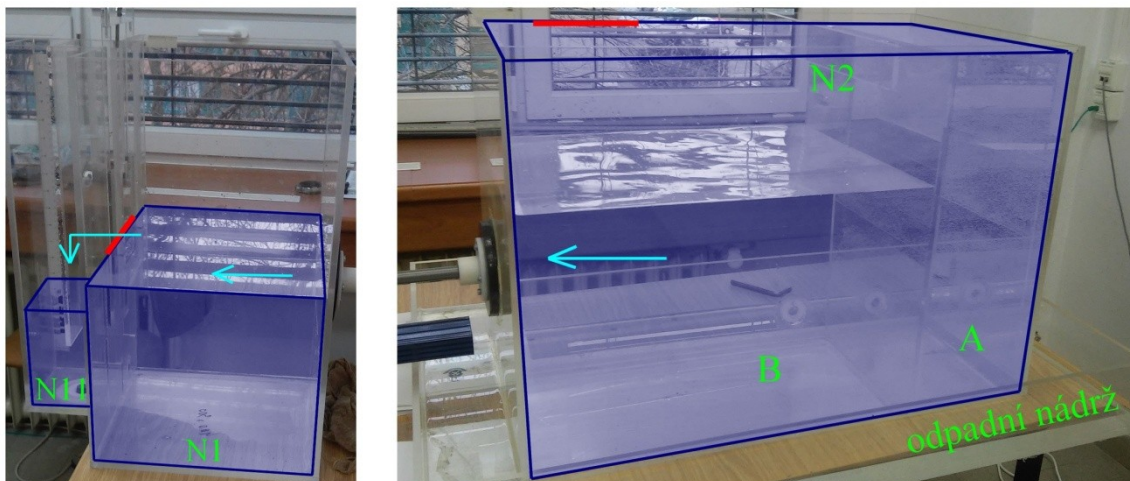
Na experimentální měřicí trati (Obr. 8.2) byla měřena tlaková diference mezi odběry tlaku (výšky hladin U-trubice). Pomocí odměrné metody (v nádrži N11) jsem změřila průtok. To jsem provedla tak, že jsem měřila čas, za který se naplnil určitý objem nádrže N11. Tyto změřené veličiny budou použity k dalšímu zpracování a vyhodnocení součinitele tření při proudění vody.

K měření jsem sestavila experimentální měřicí trať (podle schématu viz. Obr. 8.1) složenou ze dvou nádrží. Mezi nádrže se postupně vkládaly čtyři trubky z různých materiálů (DEKA ABS-GF, pozink, PVDF, GF DEKAPUR PVC-U). Na každé z trubek byla dvě odběrná místa. První odběrné místo je za nádrží N2 a druhé před nádrží N1. Do těchto odběrných míst byla napojena U-trubice, pomocí níž jsem měřila tlakový rozdíl. Měření probíhalo tak, že nádrž N2 jsem zaplnila vodou až po výšku přepadu (viz. Obr. 8.4 - červené označení). Poté jsem do ní pomalu dolévala vodu, která proudila přes přepad do odpadní nádrže. V průběhu měření byla hladina vody v nádrži N2 v konstantní výšce. Z nádrže N2 voda proudila trubkou do nádrže N1. V nádrži N1 byl nastavený přepad na určitou výšku. Přes tento přepad voda proudila do odměrné nádrže N11 (viz. Obr. 8.3). Nádrž N11 je menší část nádrže N1, jak je patrné z Obr. 8.2.



Obr. 8.3 - malá nádrž N11

Malá nádrž N11, ve které se provádí měření průtoku pomocí odměrné metody je znázorněna na Obr. 8.3. Zelenou barvou je znázorněn přepad. Červenou šipkou je naznačen směr proudění vody do nádrže N11.



Obr. 8.4 - nádrže N11, N1, N2

Fotky reálných nádrží N11, N1 a N2 jsou na Obr. 8.4. Červenou barvou jsou vyznačeny přepady. Světle zelenou jsou vyznačeny popisky. Světle modrými šipkami je naznačen směr proudění vody.



Obr. 8.5 - U-trubice

U-trubice pro měření tlakového rozdílu, potřebného k určení výsledného součinitele tření je na Obr. 8.5.

8.1 Postup měření

- Experimentální trať naplníme vodou, tak aby v nádrži N2 byla hladina do výšky vyznačeného přepadu – červeně (viz. Obr. 8.4).
- Experimentální měřicí trať odvzdušníme tak, že odpojíme hadice od U-trubice a necháme vodu vytékat. Až nebude v trati ani v odběrných hadičkách napojených do U-trubice žádná vzduchová bublina připojíme hadičky zpět.
- Nastavíme výšku přepadu v nádrži N1. V nádrži N1 musí být hladina vody níže než přepad (viz. Obr. 8.4).
- Do nádrže N2 pomalu doléváme vodu, která odtud bude protékat trubkou do nádrže N1. V nádrži N2 je přepad, přes který proudí voda do odpadní nádrže (viz. Obr. 8.4), tzn. v nádrži N2 udržujeme konstantní výšku hladiny.
- Měříme čas, za který se naplní určitý objem malé nádrže N11 vodou, která proudí přes přepad z nádrže N1. Odměrnou metodou jsem změřila průtok. Odečítala jsem čas, za který se naplní určitý objem nádrže N11 (Obr. 8.3).
- Mezitím průběžně odečítáme výšku hladin na U-trubice viz. Obr. 8.5 (z výšek se následně vypočítá tlakový rozdíl, jako střední hodnota)

9 Vyhodnocení měření (Δp , λ)

Pro vyhodnocení měření tlakové ztráty a součinitele tření jsem postupovala podle následujících kroků:

- Měření $\Delta p=f(Q_V)$ pro různé trubky (DEKA ABS-GF, pozink, PVDF, GF DEKAPUR PVC-U). Měření tlakového rozdílu pomocí U-trubice a měření průtoku odměrnou metodou (odměřuji určitý objem v nádrži N11 a měřím čas, za který se tento objem naplní)
- Vyhodnocení součinitele tření z měření
- Stanovení součinitele tření z empirických vzorců

9.1 Měření $\Delta p=f(Q_V)$

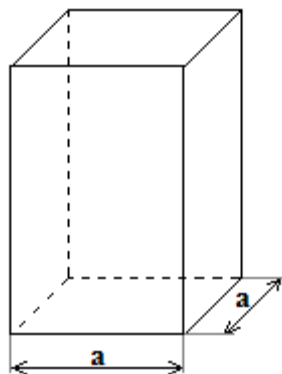
Pro všechny čtyři trubky využívám stejný postup výpočtů, podle stejných vztahů.

Trubka 1 (DEKA ABS-GF, plast)

K výpočtům měření potřebujeme znát některé důležité hodnoty. Potřebujeme znát hustotu vody, gravitační zrychlení, obsah podstavy nádrže N11 (viz. Obr. 9.1), vnitřní průměr trubky a délku potrubí.

ρ (hustota)	1000	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
g (tíhové zrychlení)	9,81	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
S_n (nádrže N11)	0,0144	m^2
d (vnitřní průměr trubky)	0,0117	m
S_t (trubky)	0,000108	m^2
l (délka potrubí)	3,935	m
a (hrana nádrže N11)	0,12	m
ν (kinematická viskozita)	1×10^{-6}	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$

Tab. 9.1 - hodnoty pro trubku 1



Obr. 9.1 - schéma nádrže N11

Obsah nádrže N11

$$S_n = a \cdot a = 0,12 \cdot 0,12 = 0,0144 \text{ m}^2 \quad (9.1)$$

Obsah trubky (pomocí vnitřního průměru trubky)

$$S_t = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{0,0117}{2}\right)^2 = 0,000108 \text{ m}^2 \quad (9.2)$$

Vzorce použité pro výpočet následných parametrů v Tab. 9.2:

Rozdíl výšek Δh

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 348 - 245 = 103 \text{ mm} = 0,103 \text{ m} \quad (9.3)$$

Tlakový rozdíl Δp

$$\Delta p = \Delta h \cdot \rho \cdot g = 0,103 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 1010,43 \text{ Pa} \quad (9.4)$$

Objem vody v nádrži N11

$$V = h \cdot S_n = 0,25 \cdot 0,0144 = 0,0036 \text{ m}^3 \quad (9.5)$$

h - výška sloupce vody v nádrži N11

Objemový průtok

$$Q_V = \frac{V}{t} = \frac{0,0036}{105} = 0,00003429 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (9.6)$$

t - čas, za který se naplní objem V vody v nádrži N11

Rychlost proudění vody v trubce

$$v = \frac{Q_V}{S_t} = \frac{0,00003429}{0,000108} = 0,318898 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (9.7)$$

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{0,318898 \cdot 0,0117}{10^{-6}} = 3731,105 \quad (9.8)$$

Výše určené hodnoty jsou v Tab. 9.2 pro přepadovou výšku 321 mm.

přepadová výška = 321 mm

t [s]	105	čas						
h [m]	0,25	výška sloupce vody v nádrži N11						
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q_v [m ³ ·s ⁻¹]	v [m·s ⁻¹]	Re [-]
348	245	103	0,103	1010,43	0,0036	0,00003429	0,318898	3731,105
345	249	96	0,096	941,76				
346	250	96	0,096	941,76				
347	250	97	0,097	951,57				
353	249	104	0,104	1020,24				
354	250	104	0,104	1020,24				
								981

Tab. 9.2 - trubka 1 (321 mm)

Naměřené a určené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 9.2. Hodnoty h1 a h2 jsou výšky sloupců hladin v U-trubici. Hodnota Δh je jejich rozdíl. Dále je v tabulce určen tlakový rozdíl, objem, průtok, rychlost proudění vody a Reynoldsovo číslo.

Pro další přepadové výšky využíváme stejného postupu jako pro výšku 321 mm.

Naměřené a určené hodnoty pro trubku 1 a přepadovou výšku 350 mm jsou uvedeny v Tab. 9.3.

přepadová výška = 350 mm

t [s]	135	čas						
h [m]	0,28	výška sloupce vody v nádrži N11						
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q _v [m ³ .s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	Re [-]
350	267	83	0,083	814,23	0,004032	0,0000299	0,277795	3250,207
378	297	81	0,081	794,61				
380	298	82	0,082	804,42				
381	298	83	0,083	814,23				
385	304	81	0,081	794,61				
385	304	81	0,081	794,61				
387	304	83	0,083	814,23				
				804,42				

Tab. 9.3 - trubka 1 (350 mm)

Hodnoty pro přepadovou výšku 400 mm jsou uvedeny v Tab. 9.4.

přepadová výška = 400 mm

t [s]	243	čas						
h [m]	0,34	výška sloupce vody v nádrži N11						
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q _v [m ³ .s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	Re [-]
385	337	48	0,048	470,88	0,004896	0,00002015	0,187402	2192,6
385	338	47	0,047	461,07				
387	339	48	0,048	470,88				
388	342	46	0,046	451,26				
389	343	46	0,046	451,26				
390	344	46	0,046	451,26				
392	345	47	0,047	461,07				
395	350	45	0,045	441,45				
396	351	45	0,045	441,45				
397	352	45	0,045	441,45				
398	353	45	0,045	441,45				
398	354	44	0,044	431,64				
				451,26				

Tab. 9.4 - trubka 1 (400 mm)

Hodnoty pro přepadovou výšku 420 mm jsou uvedeny v Tab. 9.5.

přepadová výška = 420 mm

t [s]	324	čas							
h [m]	0,35	výška sloupce vody v nádrži N11							
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q _v [m ³ .s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	Re [-]	
400	365	35	0,035	343,35	0,00504	0,00001556	0,144685	1692,816	
400	366	34	0,034	333,54					
400	367	33	0,033	323,73					
401	368	33	0,033	323,73					
403	370	33	0,033	323,73					
403	371	32	0,032	313,92					
403	373	30	0,03	294,3					
403	373	30	0,03	294,3					
405	375	30	0,03	294,3					
406	376	30	0,03	294,3					
408	377	31	0,031	304,11					
408	377	31	0,031	304,11					
408	377	31	0,031	304,11					
409	377	32	0,032	313,92					
				311,81786					

Tab. 9.5 - trubka 1 (420 mm)

Naměřené a určené hodnoty pro zvýšenou výšku přepadu na 440 mm pro trubku 1 jsou uvedeny v Tab. 9.6.

přepadová výška = 440 mm

t [s]	529	čas							
h [m]	0,37	výška sloupce vody v nádrži N11							
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q _v [m ³ .s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	Re [-]	
407	389	18	0,018	176,58	0,005328	0,00001007	0,09368	1096,056	
408	391	17	0,017	166,77					
409	392	17	0,017	166,77					
410	393	17	0,017	166,77					
411	394	17	0,017	166,77					
411	395	16	0,016	156,96					
411	396	15	0,015	147,15					
412	397	15	0,015	147,15					
				161,865					

Tab. 9.6 - trubka 1 (440 mm)

Naměřené a určené hodnoty pro poslední výšku přepadu 454 mm jsou uvedeny v Tab. 9.7.

přepadová výška = 454 mm

t [s]	998	čas						
h [m]	0,38	výška sloupce vody v nádrži N11						
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q _v [m ³ .s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	Re [-]
413	408	5	0,005	49,05	0,005472	0,0000055	0,050998	596,6777
413	409	4	0,004	39,24				
414	410	4	0,004	39,24				
415	410	5	0,005	49,05				
415	411	4	0,004	39,24				
416	411	5	0,005	49,05				
416	411	5	0,005	49,05				
416	411	5	0,005	49,05				
417	412	5	0,005	49,05				
418	413	5	0,005	49,05				
418	413	5	0,005	49,05				
418	413	5	0,005	49,05				
								46,5975

Tab. 9.7 - trubka 1 (454 mm)

Trubka 2 (pozink)

Pro trubku z pozinku platí stejné hodnoty jako pro trubku 1 (viz. Tab. 9.1). Liší se pouze vnitřní průměr. Vnitřní průměr trubky 2 je $d=0,01166$ m.

Naměřené a určené hodnoty pro přepadovou výšku 321 mm jsou uvedené v Tab. 9.8.

přepadová výška = 321 mm

t [s]	80	čas							
h [m]	0,25	výška sloupce vody v nádrži N11							
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q_v [m ³ .s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	Re [-]	
386	287	99	0,099	971,19	0,0036	0,000045	0,42143	4913,875	
386	288	98	0,098	961,38					
386	287	99	0,099	971,19					
				967,92					

Tab. 9.8 - trubka 2 (321 mm)

Naměřené a určené hodnoty pro trubku 2 a přepadovou výšku 350 mm jsou uvedené v Tab. 9.9.

přepadová výška = 350 mm

t [s]	101	čas							
h [m]	0,28	výška sloupce vody v nádrži N11							
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q_v [m ³ .s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	Re [-]	
379	299	80	0,08	784,8	0,004032	0,00003992	0,373863	4359,239	
380	300	80	0,08	784,8					
380	301	79	0,079	774,99					
380	301	79	0,079	774,99					
				779,895					

Tab. 9.9 - trubka 2 (350 mm)

Naměřené a určené hodnoty pro trubku 2 a přepadovou výšku 400 mm jsou uvedené v Tab. 9.10.

přepadová výška = 400 mm

t [s]	151	čas							
h [m]	0,34	výška sloupce vody v nádrži N11							
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q_v [m ³ .s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	Re [-]	
371	332	39	0,039	382,59	0,004896	0,00003242	0,303653	3540,593	
373	333	40	0,04	392,4					
376	337	39	0,039	382,59					
376	339	37	0,037	362,97					
376	339	37	0,037	362,97					
				376,704					

Tab. 9.10 - trubka 2 (400 mm)

Naměřené a určené hodnoty pro přepadovou výšku 420 mm jsou uvedené v Tab. 9.11.

přepadová výška = 420 mm

t [s]	199	čas							
h [m]	0,35	výška sloupce vody v nádrži N11							
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q_v [m ³ .s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	Re [-]	
378	355	23	0,023	225,63	0,00504	0,00002533	0,237187	2765,598	
379	358	21	0,021	206,01					
381	359	22	0,022	215,82					
383	360	23	0,023	225,63					
384	361	23	0,023	225,63					
385	363	22	0,022	215,82					
				219,09					

Tab. 9.11 - trubka 2 (420 mm)

Naměřené a určené hodnoty pro přepadovou výšku 440 mm jsou uvedené v Tab. 9.12.

přepadová výška = 440 mm

t [s]	356	čas						
h [m]	0,37	výška sloupce vody v nádrži N11						
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q_v [m ³ .s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	Re [-]
390	376	14	0,014	137,34	0,005328	0,000014966	0,140161	1634,277
391	378	13	0,013	127,53				
394	380	14	0,014	137,34				
395	381	14	0,014	137,34				
396	383	13	0,013	127,53				
397	384	13	0,013	127,53				
399	385	14	0,014	137,34				
399	389	10	0,01	98,1				
403	392	11	0,011	107,91				
405	393	12	0,012	117,72				
405	394	11	0,011	107,91				
406	395	11	0,011	107,91				
407	396	11	0,011	107,91				
								121,4931

Tab. 9.12 - trubka 2 (440 mm)

Naměřené a určené hodnoty pro poslední výšku přepadu 454 mm jsou uvedené v Tab. 9.13.

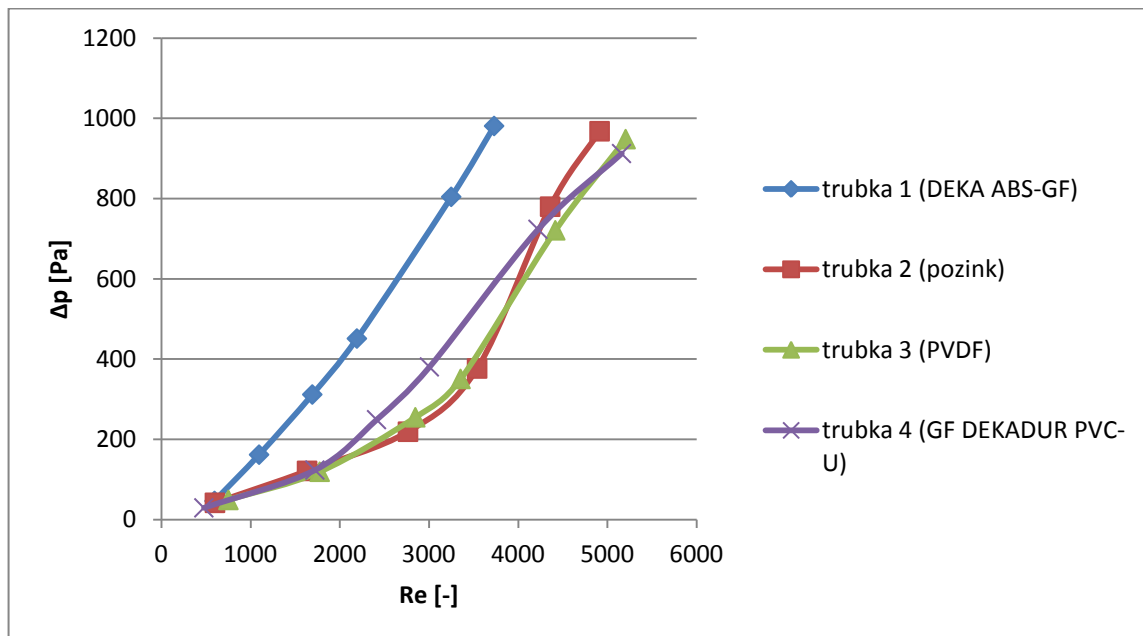
přepadová výška = 454 mm

t [s]	915	čas						
h [m]	0,35	výška sloupce vody v nádrži N11						
h1 [mm]	h2 [mm]	Δh [mm]	Δh [m]	Δp [Pa]	V [m ³]	Q_v [m ³ .s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	Re [-]
410	407	3	0,003	29,43	0,00504	0,000005508	0,051585	601,4798
413	407	6	0,006	58,86				
413	408	5	0,005	49,05				
413	410	3	0,003	29,43				
414	410	4	0,004	39,24				
415	410	5	0,005	49,05				
415	410	5	0,005	49,05				
415	411	4	0,004	39,24				
415	411	4	0,004	39,24				
416	412	4	0,004	39,24				
416	412	4	0,004	39,24				
								41,91545

Tab. 9.13 - trubka 2 (454 mm)

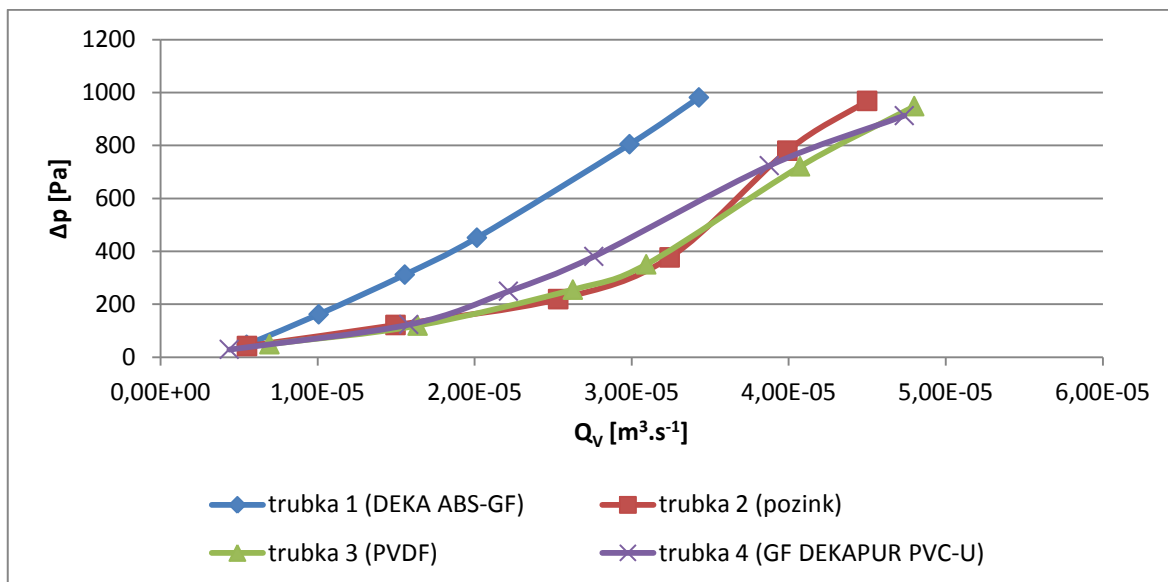
Tabulky naměřených a vypočítaných hodnot pro další dvě trubky (trubka 3 – PVDF, trubka 4 – GF DEKAPUR PVC;-U) jsou uvedeny v přílohách A a B.

Závislosti tlakové ztráty na Reynoldsově čísle pro všechny 4 trubky jsou zobrazeny v Graf 9.1.



Graf 9.1 - graf závislosti tlakové ztráty na Re

Závislost tlakové ztráty na průtoku je zobrazena v Graf 9.2.



Graf 9.2 - závislost tlakové ztráty na průtoku

9.2 Vyhodnocení součinitele tření z měření a podle empirických vztahů

Pro vyhodnocení součinitele tření používáme dva vzorce pro laminární proudění a pro turbulentní proudění.

Pro laminární proudění použijeme vzorec (2.8)

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \lambda_{\text{lam}}$$

Pro turbulentní proudění (Reynoldsovo číslo je větší než 2320) určíme součinitel podle Blasia (2.11)

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\text{Re}}} = \lambda_{\text{turb}}$$

Vyhodnocení součinitele tření podle naměřených hodnot určíme z rovnice pro tlakovou ztrátu (2.7):

$$p_z = \rho \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2}$$

$$\lambda = \frac{p_z \cdot d \cdot 2}{\rho \cdot l \cdot v^2}$$

Tyto vzorce použijí pro výpočet součinitele tření u všech měření. Postup výpočtů pro všechny trubky a všechny přepadové výšky je stejný.

V některých případech se součinitele tření značně liší. To je způsobeno tím, že se nacházíme v přechodové oblasti mezi laminárním a turbulentním prouděním. Z tohoto důvodu jsem použila vzorce pro součinitel tření v přechodové oblasti. Pro příklad výpočtu využijeme trubku 1 a přepadovou výšku 350 mm (viz. Tab. 9.14). Stejný postup použijí i u dalších trubek.

Lees (4.6)

$$\lambda = 0,00714 + \frac{0,61}{\text{Re}^{0,35}} = 0,00714 + \frac{0,61}{3250,207^{0,35}} = 0,043128 \quad (9.9)$$

Drew et. al (4.7)

$$\lambda = 0,0056 + \frac{0,5}{\text{Re}^{0,32}} = 0,0056 + \frac{0,5}{3250,207^{0,32}} = 0,043197 \quad (9.10)$$

Konakov (4.10)

$$\lambda = (1,8 \cdot \log(\text{Re}) - 1,5)^{-2} = (1,8 \cdot \log(3250,207) - 1,5)^{-2} = 0,043017 \quad (9.11)$$

Altšul (4.11)

$$\lambda = \frac{1}{(1,82 \cdot \log(\text{Re}) - 1,64)^2} = \frac{1}{(1,82 \cdot \log(3250,207) - 1,64)^2} = 0,04429 \quad (9.12)$$

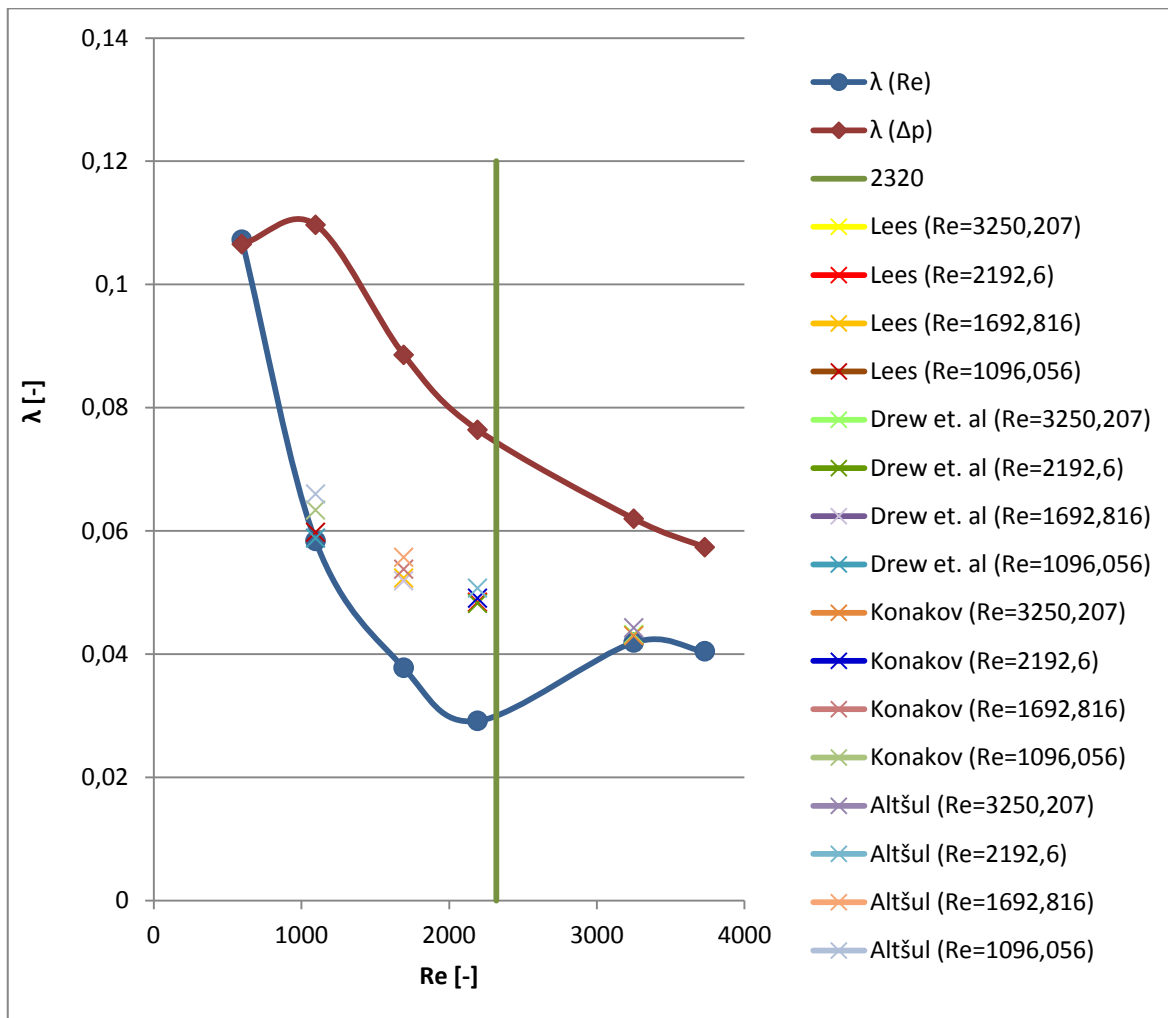
Trubka 1 (DEKA ABS-GF)

Hodnoty součinitele tření podle vztahů pro laminární a turbulentní proudění a podle naměřených hodnot jsou uvedeny v Tab. 9.14. V případě, kdy se nacházíme v přechodové oblasti jsou uvedeny i vypočítané součinitele tření v přechodové oblasti podle některých autorů (rovnice (9.9), (9.10), (9.11), (9.12))

		λ (Re)	λ (Δp)	λ (Lees)	λ (Drew et. al)	λ (Konakov)	λ (Altšul)	
TRUBKA 1 (DEKA ABS-GF)	přepadová výška [mm]	321	turbulentní 0,040483412					
		350	turbulentní 0,041904313	0,06198744	0,043128	0,043197458	0,04301763	0,04429
		400	laminární 0,029189092	0,07641012	0,048444	0,048244497	0,04908281	0,050714
		420	laminární 0,037806824	0,08857767	0,052359	0,051924941	0,05379522	0,055728
		440	laminární 0,058391169	0,1096807	0,059789	0,058838218	0,06339388	0,0660
		454	laminární 0,107260587	0,10654323				

Tab. 9.14 - součinitelé tření pro trubku 1

Průběh závislosti součinitele tření na Reynoldsově čísle pro trubku 1 (DEKA ABS-GF) je znázorněn v Graf 9.3.



Graf 9.3 - závislost součinitele tření na Reynoldsově čísle pro trubku 1

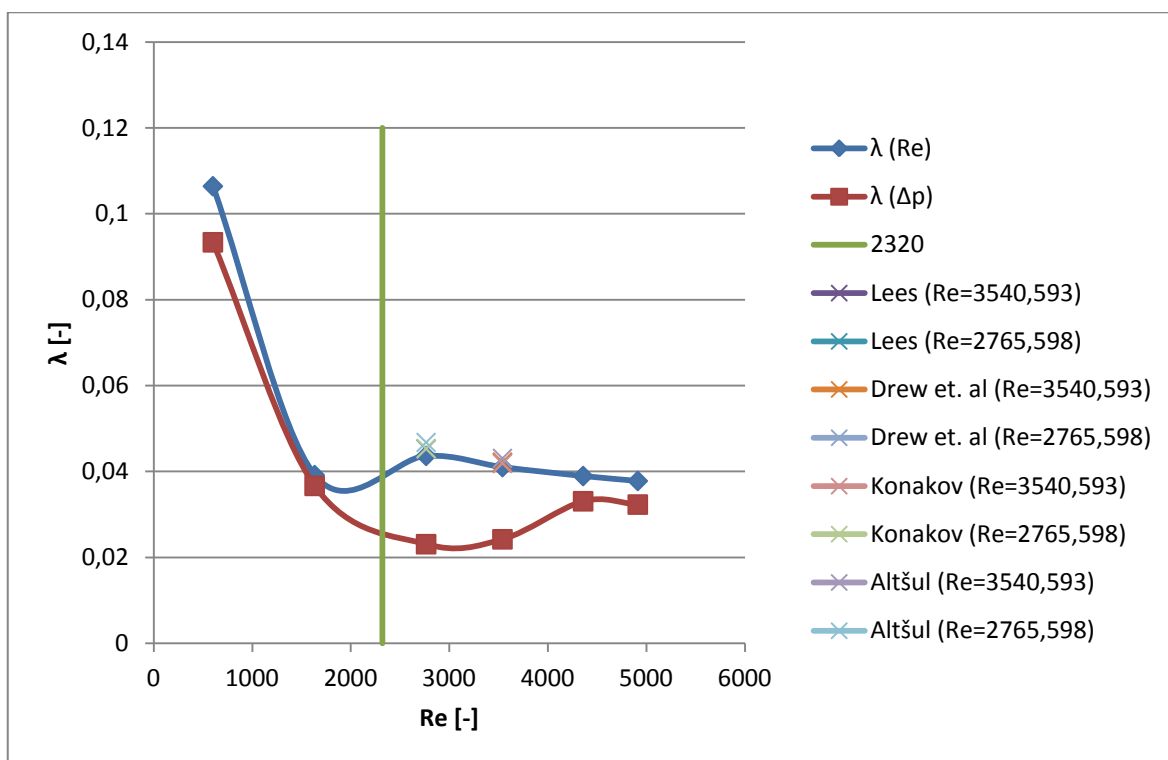
Trubka 2 (pozink)

Stejným způsobem jako u trubky 1 jsem určila hodnoty pro trubku 2 (viz. Tab. 9.15).

		λ (Re)	λ (Δp)	λ (Lees)	λ (Drew et. al)	λ (Konakov)	λ (Altšul)	
		TRUBKA 2 (pozink)	přepadová výška [mm]	321	turbulentní 0,03779031	0,03229775		
350	turbulentní 0,03893891			0,03306706				
400	turbulentní 0,041017338			0,02421191	0,042066	0,042181851	0,04184829	0,043056
420	turbulentní 0,043630402			0,02307945	0,045221	0,045191095	0,04536157	0,046769
440	laminární 0,039161037			0,03665058				
454	laminární 0,106404247			0,09334973				

Tab. 9.15 - součinitelé tření pro trubku 2

Průběh závislosti součinitele tření na Reynoldsově čísle pro trubku 2 je znázorněn v Graf 9.4.



Graf 9.4 - závislost součinitele tření na Reynoldsově čísle pro trubku 2

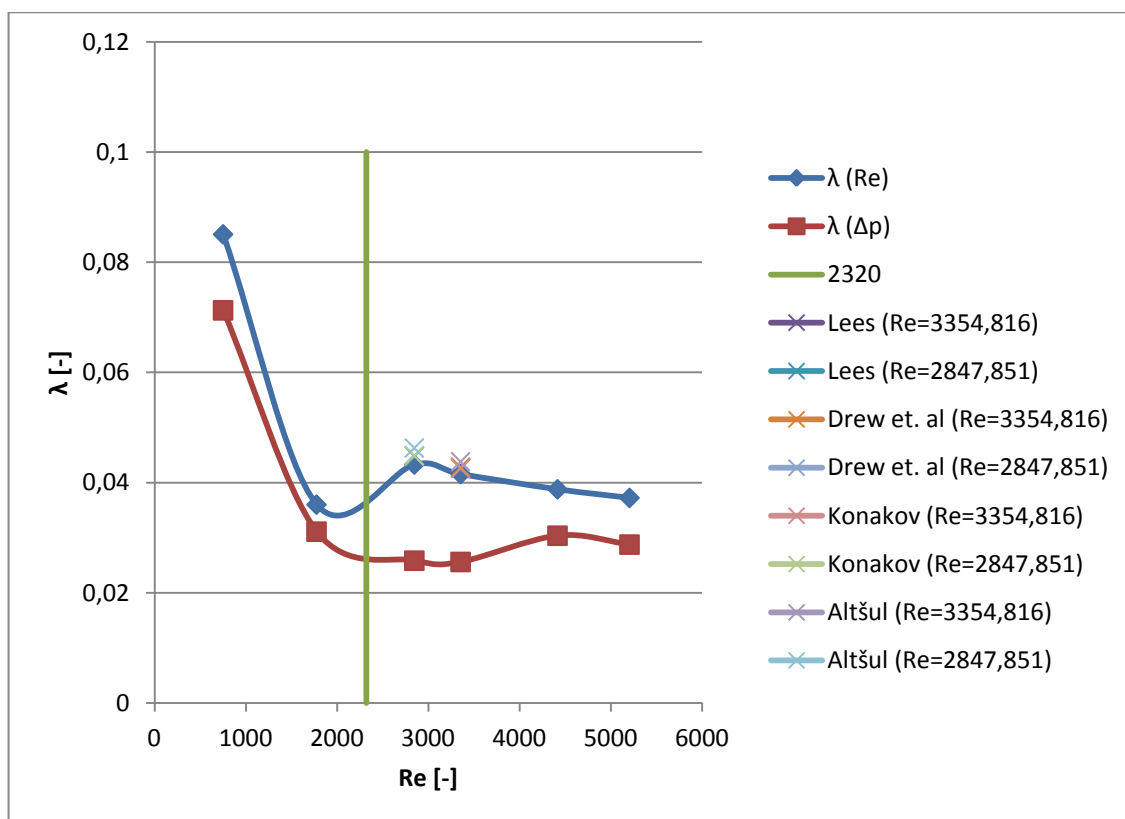
Trubka 3 (PVDF)

Stejným postupem jako u trubky 1 jsem určila hodnoty pro trubku 3 (viz. Tab. 9.16).

		λ (Re)	λ (Δp)	λ (Lees)	λ (Drew et. al)	λ (Konakov)	λ (Altšul)	
		TRUBKA 3 (PVDF)	přepadová výška [mm]	321	turbulentní 0,037249089	0,02877854		
350	turbulentní 0,038810983			0,03039423				
400	turbulentní 0,041573759			0,02562696	0,042731	0,042818255	0,04257912	0,043827
420	turbulentní 0,043311892			0,0258641	0,044832	0,044821525	0,04492209	0,046303
440	laminární 0,036038585			0,03112474				
454	laminární 0,085075167			0,07128107				

Tab. 9.16 - součinitelé tření pro trubku 3

Průběh závislosti součinitele tření na Reynoldsově čísle pro trubku 3 je znázorněn v Graf 9.5



Graf 9.5 - závislost součinitele tření na Reynoldsově čísle pro trubku 3

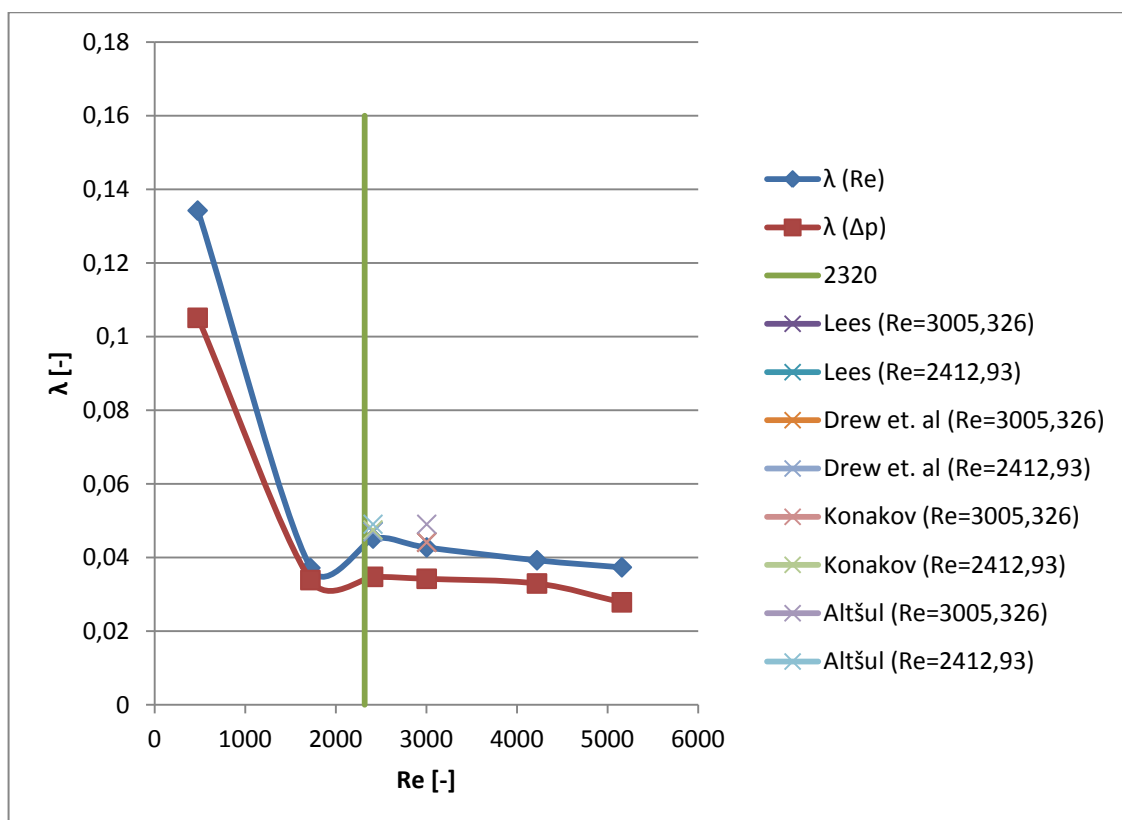
Trubka 4 (GF DEKAPUR PVC-U)

Stejným způsobem jako u trubky 1 jsem určila hodnoty pro trubku 4 (viz. Tab. 9.17).

		λ (Re)	λ (Δp)	λ (Lees)	λ (Drew et. al)	λ (Konakov)	λ (Altšul)
TRUBKA 4 (GF DEKAPUR PVC-U)	přepadová výška [mm]						
	321	turbulentní 0,037332781	0,0278299				
	350	turbulentní 0,039250101	0,03294536				
	400	turbulentní 0,042733019	0,03421735	0,044129	0,044151803	0,0441315	0,045467
	420	turbulentní 0,045144026	0,03474898	0,047083	0,046957634	0,0474945	0,049028
	440	laminární 0,037178616	0,03386841				
454	laminární 0,134205735	0,10507545					

Tab. 9.17 - součinitelé tření pro trubku 4

Průběh závislosti součinitele tření na Reynoldsově čísle pro trubku 4 je znázorněn v Graf 9.6



Graf 9.6 - závislost součinitele tření na Reynoldsově čísle pro trubku 4

10 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo změřit součinitel tření při proudění vody v trubkách různých materiálů. Měření bylo provedeno na VŠB-TUO na Katedře hydromechaniky a hydraulických zařízení v učebně E306.

V teoretické části bakalářské práce jsem se zabývala prouděním skutečné (vazké) kapaliny. Zabývala jsem se charakteristikou součinitele tření. Byl vysvětlen Moodyho diagram, který popisuje tři oblasti proudění. Následně jsem do tabulek uvedla vzorce pro výpočet součinitele tření podle jednotlivých autorů. Jsou uvedeny vzorce pro hydraulicky hladké potrubí, pro přechodovou oblast, pro hydraulicky drsné potrubí a univerzální rovnice pro turbulentní proudění.

V další části bakalářské práce jsem se zabývala problematikou přepadů. Popsala jsem jednotlivé části přepadu. Jsou zde uvedené rozdělení přepadů podle několika kritérií, a to například podle tvaru a tloušťky přepadové stěny, podle polohy hladiny za přepadem, podle polohy přepadové hrany vzhledem ke směru proudění kapaliny. Poté jsem popsala některé typy měřicích přístrojů pro měření tlaku a pro měření průtoku.

V praktické části jsem navrhla experimentální měřicí trať a postup měření součinitele tření při proudění vody v trubkách. Poté jsem sestrojila měřicí trať podle návrhu, na které jsem následně provedla měření všech trubek. Trubky byly z různých materiálů, a to DEKA ABS-GF, pozink, PVDF, GF DEKAPUR PVC-U. Měření tlakového rozdílu jsem provedla pomocí U-trubice, která byla napojena na dvě odběrná místa. Z trubek voda proudila do nádrže, kde byl přepad. Postupně jsem měnila výšku přepadu. Objemový průtok jsem měřila odměrnou metodou v odměrné nádrži. Z naměřených a vypočtených hodnot jsem sestrojila tabulky pro každou trubku a jednotlivé přepadové výšky. Z těchto tabulek jsem sestrojila grafické závislosti tlakového spádu na průtoku $\Delta p = f(Q_V)$, tlakového spádu na Reynoldsově čísle $\Delta p = f(Re)$ a součinitele tření na Reynoldsově čísle $\lambda = f(Re)$. Při měření jsem se pohybovala v rozsahu $Re <476,879; 5205,749>$ a $\Delta p <29,43; 981>$ Pa.

Z grafů závislosti součinitele tření na Reynoldsově čísle $\lambda = f(Re)$ můžeme vidět, že při laminárním proudění součinitel tření prudce klesá. Po překonání hranice kritické hodnoty Reynoldsova čísla 2320 vidíme značné ustálení hodnoty součinitele tření. Toto odpovídá výsledkům Nikuradseho experimentu (viz. Obr. 3.1), kdy můžeme říct, že v této oblasti už součinitel tření nezávisí na Reynoldsově čísle, ale na poměrné drsnosti potrubí a má stálou hodnotu. V grafech závislosti $\lambda = f(Re)$ pro trubky 2, 3 a 4 vidíme, že výsledkem je dobrá

shoda mezi experimentálně určenými hodnotami součinitelem tření a mezi hodnotami určenými podle empirických vztahů. Zejména pro trubku 4 (GF DEKAPUR PVC-U) viz Graf. 9.6. Tuto závislost jsem určila pomocí obecně známých vztahů pro laminární a turbulentní proudění, které jsou definovány v teoretické části bakalářské práce.

Poděkování

Na závěr bych chtěla poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Marianovi Bojkovi, Ph.D. za užitečné rady a odborné vedení při psaní této bakalářské práce.

11 Citovaná literatura

- [1] **Drábková, Sylva.** Mechanika tekutin. *Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení.* [Online] 2007. <http://www.338.vsb.cz/PDF/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>. ISBN 978-80-248-1508-4.
- [2] **Janalík, Jaroslav a Štáva, Pavel.** Mechanika tekutin. *Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení.* [Online] 2002. <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>. ISBN 80-248-0038-1.
- [3] **Drábková, Sylva a Kozubková, Milada.** Cvičení z Mechaniky tekutin. *Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení.* [Online] 2004. <http://www.338.vsb.cz/studium9a.htm>.
- [4] **Pospíšil, M.** Měření třecích ztrát vodní trati. *Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení.* [Online] 2012. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jana Jablonská, Ph.D. <http://hdl.handle.net/10084/94032>.
- [5] **Rao, A. R. a Kumar, B.** Friction Factor for Turbulent Pipe Flow. [Online] http://eprints.iisc.ernet.in/9587/1/Friction_Factor_for_Turbulent_Pipe_Flow.pdf.
- [6] **Papaevangelou, G., Evangelides, C. a Tzimopoulos, C.** A new explicit relation for friction coefficient F in Darcy-Weisbach equation. [Online] <http://goo.gl/K8vkVE>.
- [7] **Jandora, J., Stara, V. a Starý, M.** *Hydraulika a hydrologie.* 2. vydání. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2011. str. 188. ISBN 978-80-7204-739-0.
- [8] **Gabriel, P., a další.** *Jezy.* 1. vydání. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1989. str. 456.
- [9] **Průcha, M.** *Jezy.* 1. vydání. Praha : ČVUT, 1980. str. 292.

12 Seznam příloh

Příloha A Vyhodnocení měření Δp , λ pro trubku 3 (PVDF)

Příloha B Vyhodnocení měření Δp , λ pro trubku 4 (GF DEKAPUR PVC-U)