



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

STANOVENIE TLAKOVEJ STRATY PRI PRÚDENÍ KVAPALINY V TRUBICI S VEĽMI VYSOKOU DRSNOSŤOU

PRESSURE DROP IN THE FLOW OF THE LIQUID IN THE TUBE WITH VERY HIGH
ROUGHNESS

BAKALÁRSKA PRÁCA
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN HABR

VEDÚCI PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLADIMÍR HABÁN, PhD.

BRNO 2013

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá príčinami vzniku tlakovej straty v potrubí a možnosťami jej výpočtu. Práca ďalej pojednáva o faktoroch vplyvujúcich na veľkosť tlakovej straty a možnostiach jej zníženia. Výsledkom práce je porovnanie jednotlivých metód výpočtu tlakovej straty v potrubí s výpočtom podľa Darcyho-Weisbachovho vzťahu.

Kľúčové slová

tlaková strata, drsnosť potrubia, korózia, inkrustácia, Darcyho-Weisbachova rovnica

ABSTRACT

The thesis deals with sources of the head loss in pipe and options of its calculation. Factors influencing the head loss and possibilities of decreasing pressure drop in pipe are also discussed in the thesis. The result of thesis contains comparison of calculation methods of head loss with calculation using Darcy-Weisbach equation.

Key words

head loss, pipe roughness, corrosion, incrustation, Darcy-Weisbach equation

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

HABR, M. *Stanovenie tlakovej straty pri prúdení kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 34 s. Vedúci bakalárskej práce doc. Ing. Vladimír Habán, PhD.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Stanovenie tlakovej straty pri prúdení kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

Dátum

Martin Habr

POĎAKOVANIE

Ďakujem týmto vedúcemu tejto bakalárskej práce, pánovi doc. Ing. Vladimírovi Habánovi, PhD., za cenné rady a pripomienky k jej vypracovaniu.

OBSAH

ÚVOD	3
1 TEORETICKÁ ČASŤ.....	4
1.1 Druhy strát	4
1.2 Darcyho-Weisbachova rovnica.....	5
1.2.1 Typy prúdenia	5
1.2.2 Režimy turbulentného prúdenia	6
1.2.3 Kvalita povrchu	8
1.2.4 Stratový súčiniteľ	11
1.2.5 Korekčný súčiniteľ veku potrubia	11
1.2.6 Výpočet tlakovej straty.....	13
1.3 Alternatívne spôsoby výpočtu tlakovej straty	13
1.3.1 Chézyho rovnica.....	14
1.3.2 Hazenova-Williamsova rovnica	15
1.3.3 Scobeyova rovnica	15
1.3.4 Lévyho rovnica.....	15
1.3.5 Glaukerova-Stricklerova rovnica	16
1.4 Možnosti zníženia tlakovej straty v trubici s veľmi drsným povrchom	16
1.4.1 Zmenšenie drsnosti povrchu potrubia	16
1.4.2 Ochrana potrubia pred koróziou.....	17
1.4.3 Zmena parametrov potrubnej siete	19
1.4.4 Využitie hydrofóbných povrchov.....	19
2 VÝPOČTOVÁ ČASŤ	20
2.1 Teória výpočtu tlakovej straty na modelovom potrubí.....	20
2.1.1 Modelové potrubie	20
2.1.2 Postup pri výpočte	21
2.1.3 Porovnanie výsledkov	21
2.2 Výpočet tlakovej straty.....	23
2.2.1 Darcyho-Weisbachova metóda	23
2.2.2 Manningova metóda	23

Stanovenie tlakovej straty pri prúdení kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou

2.2.3	Pavlovského metóda.....	24
2.2.4	Hazenova-Williamsova metóda	25
2.2.5	Scobeyova metóda.....	26
2.2.6	Lévyho metóda	26
2.2.7	Glaukerova-Stricklerova metóda.....	27
ZÁVER.....		28
CITOVANÉ ZDROJE.....		30
POUŽITÉ SKRATKY A SYMBOLY		32
ZOZNAM PRÍLOH		34

ÚVOD

Úlohou projektanta potrubnej siete je zabezpečiť čo najmenšiu ekonomickú náročnosť daného diela. K tomu je potrebné správne určiť veľkosť energetickej straty sprevádzanej poklesom tlaku v potrubí. Cieľom tejto práce je vytvoriť rešerš pojednávajúci o možnostiach výpočtu tlakovej straty v potrubí s veľmi drsným povrchom. Táto je v hydraulicky dlhých potrubných sieťach spôsobená najmä stratami trením po dĺžke. Aby bolo možné v potrubnej sieti zabezpečiť požadované parametre tlaku, resp. prietoku je potrebné vedieť tieto straty správne určiť.

Teoretická časť vysvetľuje mechanizmus vzniku tlakových strát pri prúdení. Veľkosť tlakovej straty úzko súvisí s kvalitou povrchu vnútornej steny potrubia, ktorá sa s dobou prevádzky potrubia neustále zhoršuje vplyvom korozívnych účinkov prepravovanej vody a usádzaním inkrustov. Preto je v tejto časti popísaný postup pri zisťovaní kvality povrchu potrubia a možnosti odstránenia a zníženia nárastu jeho drsnosti. V ďalšom sú uvedené možnosti výpočtu tlakových strát, a postup riešenia pri jednotlivých metódach výpočtu.

Vo výpočtovej časti je popísané modelové potrubie, pomocou ktorého sú alternatívne spôsoby výpočtu tlakovej straty porovnané s Darcyho-Weisbachovou metódou, ktorá sa v súčasnosti používa najčastejšie. Pri jednotlivých metódach sú uvedené hodnoty parametrov zohľadňujúcich kvalitu povrchu potrubia. Výsledky sú spracované do grafov uvedených v prílohe.

V závere práce sú zhodnotené jednotlivé spôsoby výpočtu tlakovej straty, limity a vhodnosť použitia jednotlivých metód a možnosti zníženia energetických (tlakových) strát v potrubí.

1 TEORETICKÁ ČASŤ

1.1 Druhy strát

Pri prúdení skutočnej kvapaliny v potrubí dochádza dôsledkom jej viskozity k energetickým stratám – mechanická energia sa mení na tepelnú, ktorú už nie je možné využiť. Rozlišujú sa dva druhy energetických strát:

- straty trením – vznikajú trením medzi rôznou rýchlosťou sa pohybujúcimi vrstvami viskózne kvapaliny a trením o pevné vedenie prúdu po celej jeho dĺžke,
- miestne straty – vznikajú deformáciou rýchlostného poľa zmenou smeru prúdenia (v ohyboch, spätných klapkách, ventiloch, pri zmene prierezu potrubia) [1, str. 35].

Pri výpočte energetickej straty medzi dvoma bodmi potrubnej siete sa vychádza z Bernoulliho rovnice pre prúdenie v ose potrubia:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot z_2 + Y_s \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}, \quad (1.1)$$

kde $v_{1(2)}$ je počiatočná (koncová) rýchlosť prúdenia kvapaliny, $p_{1(2)}$ tlak v bode 1 (2), ρ hustota kvapaliny, g gravitačné zrýchlenie $z_{1(2)}$ výška v bode 1 (2) a Y_s stratová merná energia na úseku 1-2 [2, str. 73].

Stratovú mernú energiu je možné vyjadriť ako súčet strát trením po dĺžke a miestnych strát, teda

$$Y_s = Y_{st} + Y_{sm} \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}. \quad (1.2)$$

Potrubia podľa dĺžky rozdelíme na:

- hydraulicky krátke – uvažujú sa straty trením po dĺžke, aj straty miestne,
- hydraulicky dlhé – miestne straty sú zanedbateľné vzhľadom k stratám trením po dĺžke.

Potrubie, na ktorom bude vykonaný výpočet v kapitole 2 má charakter hydraulicky dlhého potrubia, preto v ďalšom nebudú rozobrané miestne straty.

1.2 Darcyho-Weisbachova rovnica

Darcyho-Weisbachova rovnica sa pri výpočte strát trením používa najčastejšie, preto jej bude venovaná samostatná kapitola. Touto metódou je možné dosiahnuť presné výsledky, je však potreba dostatočne presne poznať kvalitu povrchu potrubia. Podľa Darcyho-Weisbachovej rovnice je strata trením po dĺžke možné vyjadriť nasledovne:

$$Y_{st} = \left(\sum \zeta_t + \sum \zeta_m \right) \cdot \frac{v^2}{2} = \sum_{j=1}^n \left(\lambda_j \cdot \frac{L_j \cdot v_j^2}{D_{hj} \cdot 2} \right) [J \cdot kg^{-1}], \quad (1.3)$$

pričom ζ_t predstavuje koeficient strát trením po dĺžke, ζ_m koeficient miestnych strát, v_j rýchlosť prúdenia kvapaliny j -teho úseku, λ_j stratový súčiniteľ trenia po dĺžke na j -tom úseku, L_j dĺžku úseku číslo j , D_{hj} hydraulický priemer zodpovedajúci úseku j a n počet úsekov [2, str. 73].

V prípade jediného hydraulicky dlhého úseku potrubia kruhového prierezu sa vzťah zjednoduší na

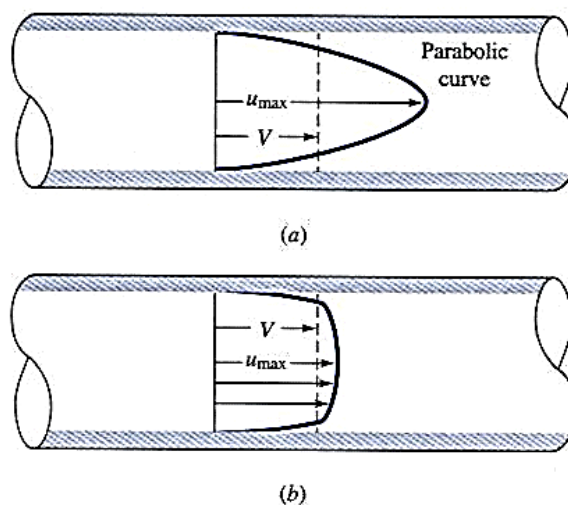
$$Y_{st} = Y_s = \lambda \cdot \frac{L \cdot v^2}{2 \cdot D} [J \cdot kg^{-1}]. \quad (1.4)$$

Dĺžkové straty závisia od typu prúdenia, rýchlosti prúdenia kvapaliny, absolútnej drsnosti povrchu potrubia, viskozity kvapaliny a dĺžke potrubia. Tieto parametre je potrebné určiť.

1.2.1 Typy prúdenia

Pri ustálenom prúdení nemá kvapalina v celom priereze potrubia rovnakú rýchlosť. Na stenách sa kvapalina prakticky nepohybuje, naopak v strede prierezu dosahuje najväčšiu rýchlosť. Rozlišujeme dva typy prúdenia:

- laminárne – nastáva pri nízkych rýchlostiach prúdenia a pri kvapalinách s vysokou viskozitou (napr. olej, ropa). Je charakteristické tým, že sa častice pohybujú po súbežných, nepretínajúcich sa trajektóriách. Rýchlostný profil v reze potrubia má tvar kvadratickej paraboly (viz. obr. 1.1),
- turbulentné – v praxi najbežnejšie, je charakterizované neusporiadanosťou, vzájomným premiešavaním a prenosom hybností a vlastností prúdiaceho média [1, str. 37]. Rýchlostný profil je vidieť na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Rýchlostné profily: a) laminárne prúdenie b) turbulентné prúdenie [3]

Či sa jedná o laminárne alebo turbulентné prúdenie sa určuje podľa Reynoldsovho čísla Re , ktoré vyjadruje vplyv vnútorného trenia v dôsledku viskozity kvapaliny pri prúdení:

$$Re = \frac{v_s \cdot D_h}{\nu} \quad [-], \quad (1.5)$$

kde v_s predstavuje strednú rýchlosť profilu, ν kinematickú viskozitu danej kvapaliny a D_h hydraulický priemer potrubia, definovaný ako pomer štvornásobku plochy prierezu potrubia a jeho omočeného obvodu [2, str. 102]. Pre kruhový prierez je možné písať:

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{O} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}}{\pi \cdot D} = D \quad [m], \quad (1.6)$$

teda hydraulický priemer sa rovná priemeru potrubia D .

Kritická hodnota Reynoldsovho čísla pre vodu Re_k leží na hranici laminárneho a turbulентného prúdenia. Je daná hodnotou $Re_k = 2320$. Ak je $Re < Re_k$, jedná sa o laminárne prúdenie. V opačnom prípade ide o turbulентné prúdenie.

1.2.2 Režimy turbulентného prúdenia

Turbulентné prúdenie sa v praxi vyskytuje vo väčšine prípadov. Rozdeľuje sa na tri režimy, rozdelené hranicami A a B určené z Kármánovho vzťahu pre hrúbku laminárnej podvrstvy [2, str. 106]:

$$\delta = \frac{32,5 \cdot D_h}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \quad [mm].$$

(1.7)

Laminárna podvrstva je tenká vrstva pri stene potrubia, v ktorej je premiešavanie média značne obmedzené. Trajektórie jednotlivých častíc sú rovnobežné a predstavujú oblasť laminárneho prúdenia [1, str. 40].

V nasledujúcich vzťahoch sa bude vyskytovať pojem strednej výšky nerovností k a relatívnej drsnosti povrchu k_r . Medzi týmito veličinami platí vzťah:

$$k_r = \frac{k}{D_h} [-]. \quad (1.8)$$

Hranica A oddeľuje 1. a 2. oblasť turbulentného prúdenia a je určená z Kármánovej podmienky:

$$\delta = 5 \cdot k \text{ [mm]}, \quad (1.9a)$$

tzn. hrúbka laminárnej podvrstvy δ minimálne päťnásobne prevyšuje absolútnu hodnotu strednej výšky nerovností k , pričom nad touto hranicou sa jedná o hydraulicky hladké potrubie. Po dosadení podmienky (1.9a) do (1.7) je možné vyjadriť hodnotu Reynoldsovho čísla na hranici A ako:

$$Re_A = \frac{6,5}{k_r \cdot \sqrt{\lambda}} [-]. \quad (1.10a)$$

Hranica B oddeľuje 2. a 3. režim turbulentného prúdenia. Vychádza z podmienky:

$$\delta = \frac{k}{6} \text{ [mm]}, \quad (1.9b)$$

teda hrúbka laminárnej podvrstvy je maximálne šesťnásobne nižšia než absolútna drsnosť k , pričom nad touto hranicou sa jedná o hydraulicky drsné potrubie [2, str. 106]. Po dosadení podmienky (1.9b) do (1.7) sa vyjadří Reynoldsove číslo na hranici B ako:

$$Re_B = \frac{195}{k_r \cdot \sqrt{\lambda}} = 30 \cdot Re_A [-]. \quad (1.10b)$$

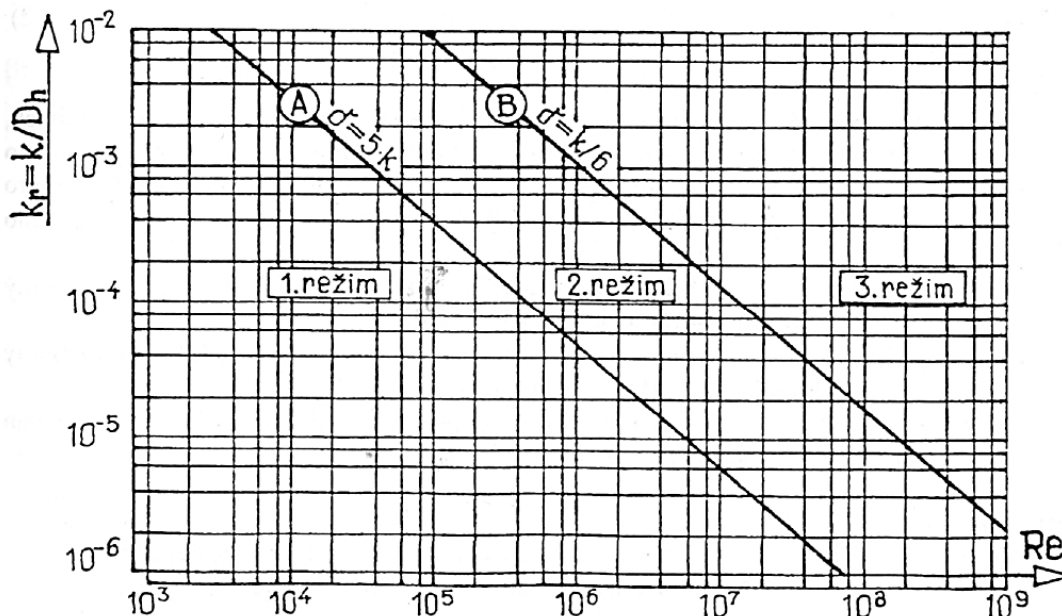
Pri prúdení v hydraulicky hladkom potrubí (1. režim) sú vrcholy nerovností utopené v laminárnej podvrstve, tým pádom nemajú vplyv na veľkosť dĺžkových strát. Straty v tejto oblasti závisia len od Re .

Prechodná oblasť (2. režim) tvorí prechod medzi hydraulicky hladkým a hydraulicky drsným potrubím. V tejto oblasti straty závisia ako aj od hodnoty Re tak od k , resp k_r .

Pri prúdení v oblasti hydraulicky drsného potrubia (3. režim) výčnelky profilu drsnosti výrazne prevyšujú laminárnu podvrstvu a zasahujú do turbulentného jadra, čím majú rozhodujúci vplyv na veľkosť strát. Vplyv hodnoty Re na dĺžkové straty je v tejto oblasti zanedbateľná.

Stanovenie tlakovej straty pri prúdení kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou

Cieľom tejto práce je určiť tlakovú stratu v potrubí s veľmi drsným povrchom. Je potrebné zistiť, o ktorú oblasť prúdenia sa jedná a podľa toho zvoliť vhodný vzťah pre stratový súčiniteľ λ (viz. kap. 1.2.4). Režim prúdenia je možné určiť z kritérijného diagramu (viz. obr. 1.2).



Obr. 1.2 Kritérijný diagram [2, str. 105]

1.2.3 Kvalita povrchu

Veľkosť straty kinetickej energie prúdiacej kvapaliny, súvisiacej s poklesom tlaku v potrubí v značnej miere ovplyvňuje kvalita povrchu potrubia. Geometria povrchu je daná úchyľkami, ktoré sa rozdeľujú na:

- úchyľky tvaru (spôsobené zlým upnutím pri obrábaní, prehnutím, chybami pri vedení obrábacieho stroja),
- vlnitosť (vzniká chvením obrábacieho stroja/nástroja, nesprávnym upnutím),
- drsnosť (rozdeľuje sa na periodickú – spôsobenú tvarom obrábacieho nástroja a aperiodickú).

Najvýznamnejší vplyv na akosť povrchu má drsnosť povrchu [4, str. 16]. Usadzovaním častíc na vnútornej strane potrubia a jej koróziou vzniká náhodný (aperiodický) profil. Pri zisťovaní jeho drsnosti je vhodné využiť bezdotykový snímač. Pri dotykovom meraní by tvrdý hrot poškodzoval skorodovanú vrstvu a tým znehodnocoval výsledok merania.

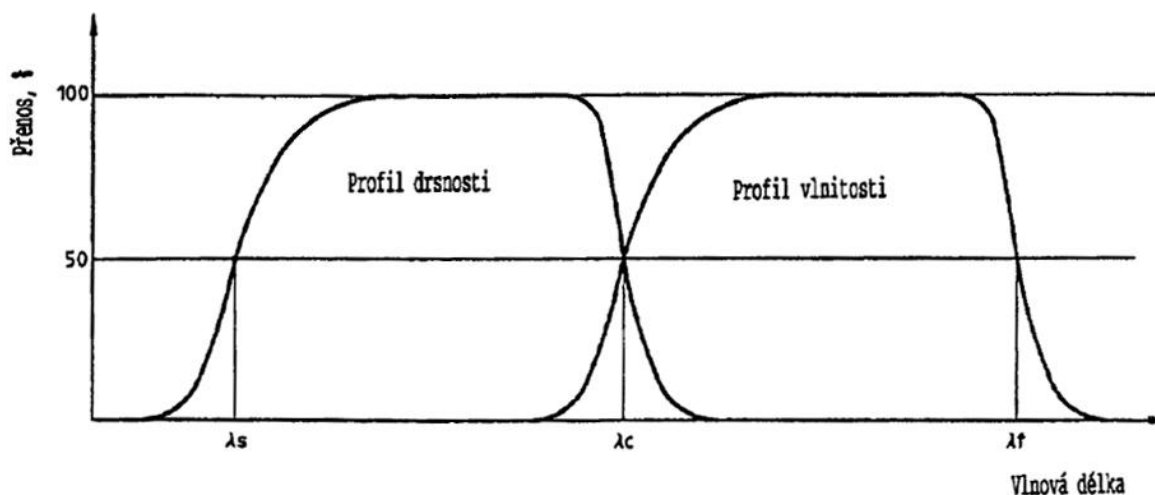
Po nasnímaní povrchu sa získa primárny profil. Sú v ňom zahrnuté všetky druhy úchyľiek. Tieto sa separujú aplikovaním frekvenčných filtrov. Pracujú na princípe odfiltrovania častí profilu s väčším rozstupom než je medzná vlnová dĺžka (tzv. cut-off). To znamená, že na vlnovej dĺžke λ sa prenáša 75 % amplitúdy sínusového tvaru profilu pri použití predpísaného filtra [4, str. 63]. Ako je vidieť na obr. 1.3, pre dosiahnutie spoľahlivých výsledkov je nevyhnutné správne určiť hodnotu základnej dĺžky. Pri nesprávnom určení medznej vlnovej dĺžky (pri filtrovaní profilu vlnitosti od profilu drsnosti sa jedná o λ_c)

Stanovenie tlakovej straty pri prúde kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou

dochádza k značnému prenosu profilu vlnitosti frekvenčným filtrom, čo má za následok skreslenie výsledného profilu. Praktické hodnoty základnej dĺžky, závislej na meranej veličine drsnosti povrchu sú uvedené v tab. 1.1 [4, str. 64].

Tab. 1.1 Základné dĺžky l pre veličiny Ra , Rz , Rt

l [mm]	Ra [μm]	Rz, Rt [μm]
0,08	do 0,025	do 0,010
0,25	cez 0,05 do 0,4	cez 0,010 do 1,6
0,8	cez 0,4 do 3,2	cez 1,6 do 12,5
2,5	cez 3,2 do 12,5	cez 12,5 do 50
8,0	cez 12,5 do 100	cez 50 do 400

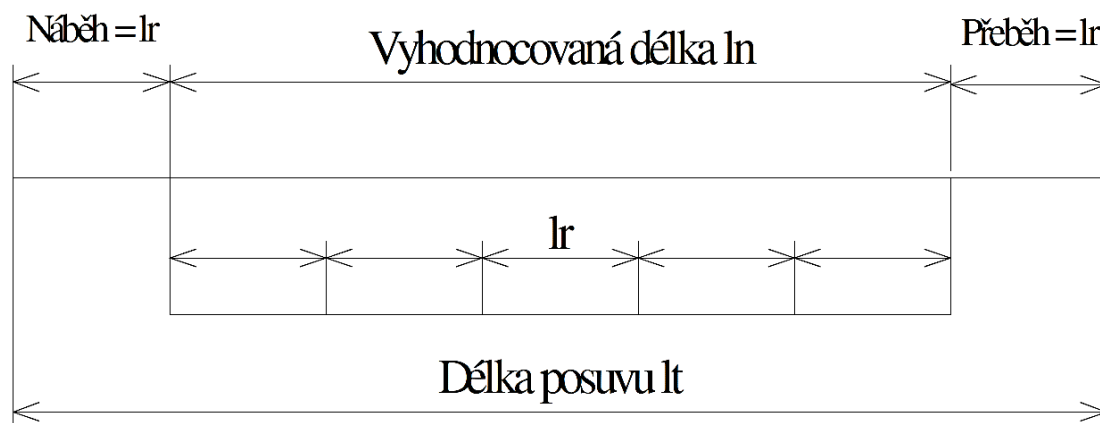


Obr. 1.3 Prenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [5, str. 10]

Dĺžka posuvu meracieho prístroja l_t sa skladá z nábehu, prebehu a vyhodnocovanej dĺžky l_n , ktorej veľkosť je spravidla

$$l_n = 5 \cdot l \text{ [mm]}. \quad (1.11)$$

Rozdelenie snímanej dĺžky na jednotlivé intervaly je vidieť na Obr. 1.4:



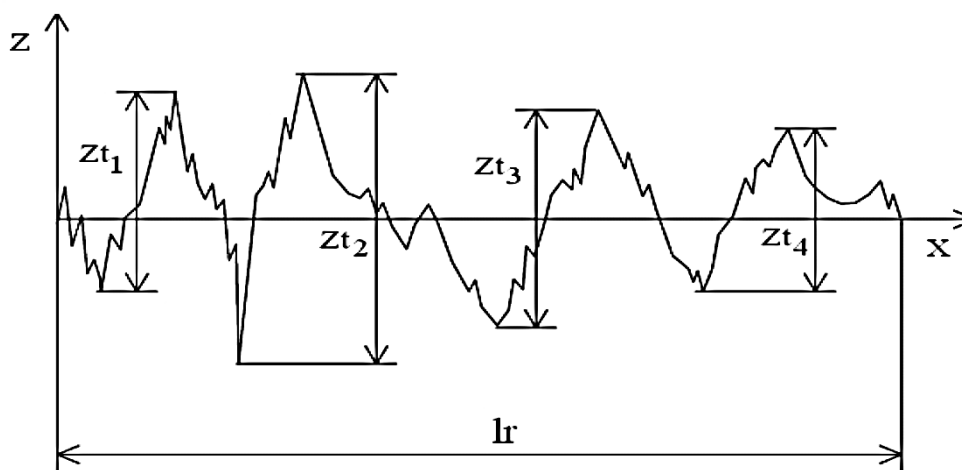
Obr. 1.4 Grafické znázornenie posuvu snímača [5, str. 12]

Po odfiltrovaní zložiek vlnitosti a úchyľky tvaru je možné z profilu drsnosti odčítať parameter R_c . Podľa normy ISO 4287-1:1984 bolo možné použiť aj parameter R_z , označujúci výšku nerovností z desiatich bodov. Pre hodnotenie kvality povrchu vnútornej steny potrubia sa využíva absolútna drsnosť, ktorá je daná strednou výškou nerovností k . Podľa definície je prakticky identická s parametrom R_c .

Parameter R_c je definovaný ako priemerná hodnota výšok Z_t , ktoré vzniknú ako súčet výšky výstupku a hĺbky priehlbiny prvku profilu prvkov profilu v rozsahu základnej dĺžky [5, str. 15] (viz. obr. 1.5). Matematicky sa R_c vyjadří ako

$$R_c = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m Z_{t_i} [\mu\text{m}], \quad (1.12)$$

pričom m je počet prvkov profilu drsnosti a Z_t ich výška.

Obr. 1.5 Priemerná výška prvkov profilu R_c [5, str. 15]

Je potrebné spomenúť, že nie vždy majú parametre drsnosti povrchu rozhodujúci vplyv na stratu energie prúdiacej kvapaliny. Pri veľmi jemne opracovanom povrchu je výška nerovností v pomere k ich rozstupe taká malá, že ich frekvenčný filter vyhodnocuje ako profil vlnitosti.

1.2.4 Stratový súčiniteľ

V prípade, že je známy typ a režim prúdenia, absolútna aj relatívna drsnosť povrchu, je posledným krokom k zisteniu tlakovej straty v novom potrubí určenie súčiniteľa dĺžkových strát λ . Existuje preň veľa empirických a poloempirických vzťahov.

V prechodnej oblasti turbulentného prúdenia je s vysokou presnosťou možné využiť vzťah podľa Swameeho–Jaina [6, str. 28]:

$$\lambda = 0,25 \cdot \left[\log \left(\frac{k_r}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad [-], \quad (1.13)$$

kde k_r je relatívna drsnosť potrubia. Vzťah platí za nasledujúcich podmienok:

$$5000 < Re < 10^7, 4 \cdot 10^{-5} < k_r < 5 \cdot 10^{-2}$$

Pre porovnanie bude použitý vzťah podľa Churchilla doporučený v [7], ktorý dostatočne presne platí vo všetkých oblastiach prúdenia a je daný ako:

$$\lambda = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^2} \right]^{\frac{1}{12}} \quad [-],$$

$$A = \left[2,457 \cdot \ln \frac{1}{\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot \frac{k}{D_h}} \right]^{16}, B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}, \quad (1.14)$$

kde Re je Reynoldsovo číslo, k absolútna drsnosť a D_h hydraulický priemer potrubia.

Pozn.: Uvedené vzorce platia len pre vodu. V prípade prúdenia iného prúdiaceho média je nutné vyhľadat' v odbornej literatúre zodpovedajúce vzťahy.

1.2.5 Korekčný súčiniteľ veku potrubia

Pri výpočte tlakovej straty v novom potrubí sa stratový súčiniteľ λ získaný pomocou vzťahov v predchádzajúcej kapitole dosadí do Darcyho-Weisbachovej rovnice (1.4).

Pri potrubí, ktoré je dlhší čas v prevádzke dochádza k jeho starnutiu. Starnutie potrubia je spôsobené rozrušovaním povrchu stien unášanými časticami, usadzovaním suspendovaných a rozpustených látok a inkrustáciou potrubia vylučovaním najmä vápenných solí. Tento proces vedie k vzniku sekundárneho profilu drsnosti, ktorý vykazuje horšie kvalitatívne charakteristiky ako primárny (vytvorený pri výrobe potrubia). Preto je pri vhodných výpočtoch so starším potrubím energetické straty vynásobiť korekčným súčiniteľom zohľadňujúcim vek potrubia. Tento je podľa [6, str. 13] definovaný takto:

$$m = e^{a \cdot t} \quad [-], \quad (1.15)$$

kde e je Eulerovo číslo, a súčiniteľ agresivity vody a t doba prevádzky potrubia v rokoch. Súčiniteľ agresivity vody nadobúda pre čistú vodu hodnotu $a = 0,01$ a pre agresívnu vodu $a =$

Stanovenie tlakovej straty pri prúdení kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou

0,015. Agresivita vody vyjadruje pôsobenie vody za daných podmienok na sledovaný materiál [8, str. 147]. Agresívna voda má výrazný vplyv na degradáciu vnútornej steny potrubia.

Starnutie potrubia je spojené s nárastom drsnosti povrchu. Colebrook a White vytvorili hypotézu, podľa ktorej drsnosť potrubia stúpa lineárne s dobou prevádzky potrubnej siete, čo je možné vyjadriť nasledovne:

$$k = k_0 + b \cdot t \text{ [mm]}, \quad (1.16)$$

kde k je drsnosť po t - rokoch prevádzky potrubia, k_0 jeho počiatková drsnosť a b miera nárastu drsnosti. Miera nárastu drsnosti má na výslednej absolútnej drsnosti rozhodujúci vplyv. Je možné ju zistiť jedine experimentálne.

Colebrook a White objavili závislosť medzi mierou nárastu drsnosti a hodnotou pH vody prúdiacej v potrubí, ktorú interpretovali ako:

$$b = 0,0833 \cdot e^{1,9-0,5 \cdot pH} \text{ [mm} \cdot \text{rok}^{-1}]. \quad (1.17)$$

Ako však sami priznali, táto závislosť nepopisuje mieru nárastu drsnosti dostatočne presne.

Ďalší, kto sa zaoberal popisom miery nárastu drsnosti v závislosti na čase bol Lamont. Lamont vykonal pokusy, z ktorých stanovil závislosť medzi mierou nárastu drsnosti a Langelierovým indexom:

$$b = 304,8 \cdot 10^{-(4,08+0,38 \cdot LI)} \text{ [mm} \cdot \text{rok}^{-1}]. \quad (1.18)$$

Langelierov index je bezrozmerná veličina, ktorá charakterizuje agresivitu vody. Je daný ako rozdiel medzi nameraným pH a hodnotou pH, ktorú by pri danej vodivosti, chemickom zložení a teplote mala voda mať, aby nespôsobovala degradáciu steny potrubia. Čím má voda Langelierov index vyšší, tým výraznejšie ovplyvňuje materiál potrubia. Podľa znamienka Langelierovho indexu rozoznávame vody, ktoré spôsobujú koróziu potrubia ($LI < 0$) a vody tvoriace povlak uhličitanu vápenatého – inkrustov na stenách potrubia ($LI > 0$) [9]. Vzťah (1.17) platí len pre hodnoty $LI < 0$. Neodporúča sa extrapolácia do kladných hodnôt LI . V tab. 1.2 je popísaný vplyv prúdiacej vody na potrubie v závislosti od veľkosti LI [10].

Tab. 1.2 Miera agresivity vody v závislosti od Langelierovho indexu LI

Typ č.	Názov	Miera nárastu drsnosti [mm·rok ⁻¹]	LI
1	slabý vplyv	0,025	0,0
2	stredný vplyv	0,076	-1,3
3	značný vplyv	0,25	-2,6
4	veľmi silný vplyv	0,76	-3,9

Vo výnimočných prípadoch sa môže stať, že sa s vekom kvalita vnútornej steny potrubia nezhoršuje, ale naopak. Unášané častice vyhladia povrch potrubia, čo má za následok zníženie strát trením po dĺžke. Jedná sa však iba o prípad, kedy prúdiace médium nespôsobuje koróziu potrubia.

1.2.6 Výpočet tlakovej straty

Doposiaľ boli uvádzané vzťahy pre výpočet straty energie v jednotkách $[J \cdot kg^{-1}]$. Straty trením je však možné vyjadriť aj pomocou stratovej výšky h_s alebo tlakovej straty (resp. stratového tlaku) p_s .

Pre získanie stratovej výšky sa energetická strata podelí gravitačným zrýchlením g , ako je uvedené v literatúre [1, str. 35], teda:

$$h_s = \lambda \cdot \frac{L \cdot v^2}{2 \cdot D \cdot g} \quad [m], \quad (1.19)$$

kde λ je koeficient trenia, L dĺžka potrubia, v rýchlosť prúdenia média, D priemer potrubia a g gravitačné zrýchlenie.

Zo stratovej výšky sa použitím rovnice pre hydrostatický tlak a dosadením rovnice pre stratovú výšku h_s (1.19), vyjadří stratový tlak p_s :

$$p_s = h_s \cdot \rho \cdot g = \lambda \cdot \frac{L \cdot v^2 \cdot \rho}{2 \cdot D} = Y_{st} \cdot \rho \quad [Pa], \quad (1.20)$$

kde Y_{st} predstavujú stratu mechanickej energie trením po dĺžke (v hydraulicky dlhom potrubí sú rovné celkovým stratám Y_s) a ρ hustota prúdiacej kvapaliny.

1.3 Alternatívne spôsoby výpočtu tlakovej straty

Darcy-Weisbachova rovnica je v súčasnosti používaná najčastejšie kvôli jej presnosti. Táto presnosť je však závislá na určení absolútnej drsnosti povrchu. V prípade, že nie je možné dostatočne presne zistiť drsnosť povrchu vnútornej steny potrubia je možné využiť iné spôsoby výpočtu tlakovej straty. Vo vzťahoch uvedených v tejto kapitole nefiguruje priamo drsnosť povrchu – kvalita povrchu sa určuje podľa materiálu potrubia a jeho veku.

Strata mechanickej energie je v niektorých z nasledujúcich metód výpočtu určená pomocou hydraulického sklonu i_e – sklonu čiary energie, ktorý predstavuje úbytok energetickej výšky na jednotku dĺžky potrubia [1, str. 29] :

$$i_e = \frac{h_s}{L} = \frac{p_s}{L \cdot \rho \cdot g} \quad [-], \quad (1.21)$$

pričom h_s je stratová výška a L dĺžka potrubia na ktorej je pozorovaná daná stratová výška. Ďalej použité vzťahy budú uvedené už v tvare upravenom pre výpočet stratového tlaku p_s .

1.3.1 Chézyho rovnica

Chézyho rovnica sa v značnej miere využíva pri gravitačnom prúdení, tj. prúdení s voľnou hladinou (kanalizácie, korytá riek apod.). To však nevyklučuje jej použitie pri tlakovom prúdení v potrubí. Na rozdiel od hydraulického priemeru D_h v Darcyho-Weisbachovej rovnici, v Chézyho rovnici vystupuje hydraulický polomer R . Tento je definovaný ako podiel plochy prierezu potrubia a jeho omočeného obvodu. Po porovnaní so vzťahom pre hydraulický priemer (1.6) je možné písať vzťah:

$$R = \frac{S}{O} = \frac{D_h}{4} = \frac{D}{4} \quad [m], \quad (1.22)$$

platiaci pre kruhový prierez potrubia, pričom D je jeho priemer.

Samotná Chézyho rovnica má tvar:

$$v = C \cdot \sqrt{R \cdot i_e} \quad [m \cdot s^{-1}], \quad (1.23)$$

kde C je rýchlostný súčiniteľ, R hydraulický priemer a i_e hydraulický sklon. Chézyho rovnicu je možné použitím rovnice (1.21) upraviť tak, aby vyjadrovala stratový tlak p_s :

$$p_s = \frac{v^2 \cdot L \cdot \rho \cdot g}{R \cdot C^2} \quad [Pa], \quad (1.24)$$

Vzťah pre rýchlostnú konštantu C je daný:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y \quad [-], \quad (1.25)$$

kde n predstavuje Manningov drsnostný súčiniteľ a exponent y má podľa Manninga hodnotu:

$$y = \frac{1}{6} \quad [-]. \quad (1.26a)$$

Ako exponent y v Chézyho rovnici je možné použiť aj vzťah podľa Pavlovského [11]:

$$y = 2,5 \cdot \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \cdot \sqrt{R} \cdot (\sqrt{n} - 0,1) \quad [-]. \quad (1.26b)$$

Manningov drsnostný súčiniteľ n závisí na materiáli potrubia a stupni jeho degradácie. Hodnoty pre jednotlivé povrchy sú uvedené v kapitole 2.2.1.

1.3.2 Hazenova-Williamsova rovnica

Parametrom hodnotiacim kvalitu povrchu je Hazenov-Williamsov koeficient C_{HW} . Zohľadňuje typ materiálu a dobu prevádzky potrubia. Hazenova-Williamsova rovnica poskytuje dostatočne presné výsledky ak je rýchlosť prúdenia vody v potrubí menšia ako $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a priemer potrubia D je od 50 mm do 300 mm. Rovnica má po prevedení na stratový tlak tvar:

$$p_s = 10,643 \cdot \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1,85} \frac{L}{D^{4,87}} \cdot \rho \cdot g \text{ [Pa]}, \quad (1.27)$$

kde Q je prietok, C_{HW} Hazenov-Williamsov koeficient, L dĺžka potrubia, D priemer potrubia, ρ hustota prúdiacej vody a g gravitačné zrýchlenie [12].

1.3.3 Scobeyova rovnica

Scobeyova metóda výpočtu tlakovej straty bola používaná najmä v 30. rokoch 20. storočia v USA. Preto je kvalita jej výsledkov nižšia ako pri metódach výpočtu používaných dnes - v porovnaní s použitím Darcyho-Weisbachovej rovnice. Scobeyova rovnica má v metrických jednotkách tvar:

$$p_s = 2,5869 \cdot K_S \cdot \frac{v^{1,9}}{D^{1,1}} \cdot \frac{L}{1000} \cdot \rho \cdot g \text{ [Pa]}, \quad (1.28)$$

pričom v je rýchlosť prúdenia kvapaliny, D priemer potrubia, L dĺžka potrubia a K_S Scobeyov koeficient popisujúci typ potrubia [13, str. 79]. Parameter K_S zohľadňuje typ povrchu potrubia a jeho vek nasledujúcim spôsobom:

$$K_S = K'_S \cdot e^{a \cdot t}, \quad (1.29)$$

kde a má podobný význam ako vo vzťahu (1.15), teda charakterizuje agresivitu vody. Pre hodnoty parametra a v závislosti od typu vody viz. str. 10. Hodnota K'_S sa nazýva Scobeyho koeficient pre nové potrubie a pohybuje sa v rozmedzí od 0,32 (v špeciálnych prípadoch aj 0,30) pre hladké potrubie po 0,52 pre drsnejšie povrchy [13].

1.3.4 Lévyho rovnica

Lévy stanovil ďalší z empirických vzťahov určených pre výpočet energetickej straty v potrubí. Pôvodná rovnica definuje sklon čiary energie i_e . Po prevedení na stratový tlak vyzerá nasledovne:

$$p_s = \frac{Q^2 \cdot L \cdot \rho \cdot g}{\left\{ \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \alpha \cdot \left[\frac{D}{2} \cdot \left(1 + \beta \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2} [Pa], \quad (1.30)$$

kde parametre α a β určujú kvalitu povrchu steny potrubia. V Lévyho metóde výpočtu tlakovej straty sa nerozlišuje medzi liatinovým a ocelovým potrubím, iný materiál by však nemal byť použitý. Uvedené koeficienty platia pri rozmeroch potrubia od DN 500 do DN 700 a v prípade, že prepravovaným médiom je voda [14].

1.3.5 Glaukerova-Stricklerova rovnica

Pri výbere z empirických vzťahov pre výpočet tlakovej straty v potrubí je možné použiť aj Glaukerovu-Stricklerovu rovnicu, ktorá má po prevedení na stratový tlak p_s tvar:

$$p_s = 6,35 \cdot \left(\frac{v}{K_{GS} \cdot D^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \cdot L \cdot \rho \cdot g [Pa], \quad (1.31)$$

pričom K_{GS} je Glaukerov-Stricklerov koeficient definujúci kvalitu potrubia [14].

1.4 Možnosti zníženia tlakovej straty v trubici s veľmi drsným povrchom

Snahou projektanta, resp. prevádzkovateľa je zabezpečiť čo najmenšiu ekonomickú náročnosť danej potrubnej siete. To je možné dosiahnuť minimalizovaním tlakovej straty v potrubí. Zmenšenie strát trením po dĺžke je možné dosiahnuť:

- zmenšením drsnosti povrchu vnútornej steny potrubia,
- antikoroóznou ochranou,
- úpravou parametrov potrubnej siete,
- využitím hydrofóbných povrchov.

1.4.1 Zmenšenie drsnosti povrchu potrubia

S rastúcou dobou prevádzky potrubia rastie aj drsnosť jeho vnútornej steny. Túto je možné odstrániť:

- fyzicky – zavedením čistiacej hadice do potrubia,
- chemicky – pridaním čistiacich látok do kvapaliny v potrubnej sieti.

Fyzické čistenie potrubia spočíva v odstraňovaní vodného kameňa, resp. skorodovaného povrchu potrubia vysokotlakým paprskom vody. Pre zvýšenie účinnosti je možné do vody pridať abrazívne častice. Nevýhodou fyzického čistenia potrubia je možnosť použitia len na krátkych úsekoch. Fyzické čistenie potrubia býva v súčasnosti doplnené o niektorú z metód bezvýkopovej sanácie potrubia – vnútorným nástrekom asphaltovej či cementovej výstelky, alebo vrstvy epoxidovej živice [15]. V súčasnosti sa s výhodou využíva ďalšia z bezvýkopových technológií sanácie potrubia – relining. Relining spočíva v zavedení nového potrubia menšieho priemeru do pôvodného. Maximálna dĺžka v'ťahovaného úseku je 700m. Najpoužívanejšie je HDPE potrubie [16].

Pri chemickom čistení potrubia je do potrubnej siete zavedená chemická zmes na báze fosfátov a kremičitanov, ktorá odstraňuje vytvorené nánosy korózie alebo vodného kameňa. Taktiež je možné použiť kyslé čistiace látky odstraňujúce vodný kameň. Po ich aplikácii je ale nutné použiť neutralizátor, ktorý neutralizuje zvyšnú kyslosť [17].

Vyčistenie potrubia zníži jeho drsnosť, nie je však možné dosiahnuť pôvodnú kvalitu povrchu.

1.4.2 Ochrana potrubia pred koróziou

Nárast drsnosti povrchu potrubia je úzko spätý so vznikom korózie. Tú je možné definovať ako fyzikálno-chemickú interakciu kovu a prostredia vedúcu k zmenám vlastností kovu, ktoré môžu vyvolávať významné zhoršenie funkcie kovu, prostredia alebo technického systému, ktorého sú kov a prostredie zložkami.

Korózia sa rozdeľuje na:

- chemickú – dochádza len k chemickým reakciám, prebieha v elektricky nevodivom prostredí,
- elektrochemickú – vzniká pri nej elektrický článok, ktorého súčasťou je uvažovaný kovový materiál, prebieha v elektricky vodivom prostredí,
- atmosférickú – dej prebieha pod veľmi tenkou vrstvou vody nasýtenej rozpustnými zložkami atmosféry (SO_2 , CO_2 , NH_3),
- morskú – hlavnou zložkou korózneho prostredia je morská voda [18, str. 11].

Aby sa zabránilo korózii potrubia je možné využiť tieto metódy:

- použitie ochranných povlakov,
- chemická úprava vody,
- voľba materiálu potrubia,
- katódová ochrana,
- voľba trasy potrubnej siete.

Katódová ochrana a voľba vhodnej trasy pre potrubie sa využíva najmä pri potrubiach, ktoré sú uložené v zemi. Tieto potrubia sú ohrozené elektrochemickou koróziou, ktorá

Stanovenie tlakovej straty pri prúdení kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou

poškodzuje vonkajšiu stenu potrubia [19, str. 33]. Nakoľko kvalita vonkajšej steny potrubia nemá vplyv na veľkosť hydraulických strát v potrubnom systéme, tieto metódy nie sú z hľadiska zníženia tlakovej straty podstatné.

Chemickou úpravou vody je možné znížiť obsah chemických látok spôsobujúcich koróziu potrubia a tým obmedziť jej koróznym vplyvom na potrubie. To je možné realizovať hlavne v cirkulačných obvodoch pridaním inhibítora korózie na báze ťažkorozpustných polyfosfátov. Správnym dávkovaním tejto látky do cirkulačného okruhu je možné znížiť koróziu ocele až o 70% [19, str. 96].

Voľba materiálu potrubia, ktorý je odolný voči korózii je najúčinnnejšia, avšak ekonomicky najnáročnejšia možnosť protikoróznej ochrany, preto sa pri diaľkových potrubiach nepoužíva.

V praxi najpoužívanejšia metóda protikoróznej ochrany je použitie ochranných povlakov. Tieto je možné rozdeliť na:

- anorganické,
- organické,
- práškové náterové hmoty (PNH).

Anorganické ochranné povlaky sa nazývajú tiež konverzné, pretože nanášaný kov sa na povrchu mení na zlúčeninu, ktorú zvyčajne tvorí oxid, fosforečnan, chróman, resp. ich kombinácia. Možnosti použitia anorganických ochranných náterov sú:

- fosfátovanie,
- chemická alebo elektrochemická oxidácia (černenie, chromatovanie, eloxovanie),
- silikátovanie,
- chemické farbenie,
- pasivácia [18, str. 17].

Použitie organických ochranných náterov patrí v praxi medzi najpoužívanejšie. Pri protikoróznej ochrane potrubí sa používajú tieto typy organických náterov:

- olejové,
- asfaltové,
- polystyrénové,
- polymerátové,
- epoxidechtové,
- chlórkaučukové [19, str. 82].

Posledným typom ochranných povlakov sú práškové náterové hmoty. Radia sa do skupiny tzv. priemyslových náterových hmôt. Jedná sa o práškové hmoty obsahujúce živice, pigmenty a ďalšie látky, ktoré sa na povrch nanášajú pomocou stlačeného vzduchu.

Stanovenie tlakovej straty pri prúdení kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou

Podľa nosnej zložky rozlišujeme PNH na báze epoxidov, polyesterov, polyuretánov a akrylátov [18, str. 24].

V praxi sa pri potrubíach uložených v zemi často používa kombinácia katódovej aj pasívnej ochrany, tj. použitie ochranných náterov, ktoré sa nanášajú z oboch strán potrubia. V miestach, kde nehrozí znečistenie organickými je možné pri priemeroch potrubia do DN 200 použiť PVC, resp. PE [15, str. 9].

1.4.3 Zmena parametrov potrubnej siete

V praxi sa vyskytuje požiadavka na udržanie konštantného objemového prietoku Q_V počas prevádzky potrubia. Objemový prietok potrubím je daný ako:

$$Q_V = S \cdot v = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v \quad [m^3 \cdot s^{-1}], \quad (1.32)$$

kde S je plocha prierezu potrubia a v rýchlosť prúdiacej kvapaliny. Postupom času sa s rastúcim hydraulickým odporom potrubia znižuje rýchlosť prúdenia, čo má za následok zmenšenie objemového prietoku potrubím. Objemový prietok klesá taktiež v dôsledku zmenšovania prierezu prietocnej plochy S , nakoľko dochádza vplyvom korózie a inkrustácie k tvorbe sekundárneho povrchu na stene potrubia. Tento jav je výrazný najmä pri trubiciach malého priemeru.

Ako je vidieť zo vzťahu (1.20), tlaková strata je pri potrubí danej dĺžky a kvality povrchu reprezentovanej stratovým súčiniteľom λ závislá len na rýchlosti prúdiacej kvapaliny v a priemere potrubia D . Aby bola opäť dosiahnutá požadovaná hodnota objemového prietoku, je možné buď zvýšiť rýchlosť prúdenia kvapaliny v potrubí alebo zväčšiť jeho priemer.

Nakoľko tlaková strata p_s kvadraticky rastie s rýchlosťou prúdenia a lineárne klesá so zväčšujúcim sa priemerom potrubia D , výhodnejším sa zdá byť zväčšenie priemeru potrubia tak, aby nadobudol objemový prietok Q_V požadovanú hodnotu. Treba však brať do úvahy, že zmena priemeru potrubia súvisí s jeho fyzickou výmenou. Preto je treba zvážiť aj ekonomickú výhodnosť tohto riešenia.

1.4.4 Využitie hydrofóbných povrchov

V súčasnosti prebieha výskum v oblasti využitia hydrofóbných povrchov za účelom zníženia hydraulických strát v potrubnej sieti. Je snaha tieto povrchy aplikovať najmä v čerpadlách, kde je kvalitou povrchu možné výrazne upraviť vznikajúce hydraulické straty. Nanesením hydrofóbného náteru sa zmení drsnosť povrchu steny, preto je pri vyhodnocovaní strát potrebné odlišiť vplyv tejto zmeny a vplyv použitia hydrofóbného povrchu. Nevýhodou týchto povrchov môže byť ich nízka životnosť, nakoľko je nanoštruktúra hydrofóbného povrchu vystavená abrazívnym účinkom prúdiacej kvapaliny, ktorá ju poškodzuje.

2 VÝPOČTOVÁ ČASŤ

2.1 Teória výpočtu tlakovej straty na modelovom potrubí

2.1.1 Modelové potrubie

Aby bolo možné porovnať tlakovú stratu vypočítanú pomocou rôznych metód, je potrebné definovať modelové potrubie, na ktorom budú straty počítané. Uvažované úseky potrubia sú vodorovne uložené, priame s kruhovým prierezom, ktorý sa po dĺžke nemení. Priemer potrubia sa pohybuje v intervale DN 50 – DN 1000. Potrubie je dlhé 100m. Absencia miestnych hydraulických odporov a dĺžka potrubia zaručujú, že sa jedná o hydraulicky dlhé potrubie – celková strata energie je rovná stratám trením po dĺžke.

Uvažované úseky oceleového potrubia zodpovedajú dobe prevádzky 10 a 20 rokov. Úseky liatinového potrubia sú charakterizované dobou prevádzky 10, 20 a 40 rokov. Vnútorňa stena potrubia nebola ošetrovaná žiadnym ochranným náterom. Počiatočná drsnosť vnútornej steny povrchu potrubia k_0 je volená podľa odporúčenia v literatúre.

V potrubí prúdi voda s teplotou 12°C pri rýchlosti 1 m·s⁻¹. Uvedená hodnota rýchlosti prúdenia vody je odporučená pre oceľové potrubia s požiadavkami na zníženú hlučnosť [20]. Navyše v tomto prípade zaručuje, že sa bude jednať výhradne o turbulentné prúdenie v prechodnej oblasti (viz. kap. 2.1.2). Stratový súčiniteľ λ je možné spočítať pomocou vzťahu podľa Swameeho-Jaina. Voda je klasifikovaná ako „čistá“, takže korekčný súčiniteľ doby prevádzky potrubia a nadobúda hodnotu 0,01 (viz. str. 10). Parametre jednotlivých úsekov modelového potrubia a prúdiacej vody sú zhrnuté v nasledujúcich tabuľkách:

Tab. 2.1 Parametre jednotlivých úsekov modelového potrubia

Označenie úseku potrubia	Doba prevádzky potrubia [rok]	Materiál potrubia
O ₁₀	10	oceľ
O ₂₀	20	
L ₁₀	10	liatina
L ₂₀	20	
L ₄₀	40	

Tab. 2.2 Parametre vody prúdiacej v potrubí

Teplota vody	Hustota vody ρ	Kinematická viskozita ν	Rýchlosť prúdenia v
12°C	999,4 kg·m ⁻³	1,24·10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹	1 m·s ⁻¹

2.1.2 Postup pri výpočte

Výpočet tlakovej straty bol vykonaný v programe Microsoft Excel. Boli zadané vstupné parametre pre vodu a jednotlivé úseky modelového potrubia. Interval priemeru potrubia (0,05m - 1m) bol rozdelený po 0,05m na 191 častí, pričom pre každý priemer z tohto intervalu bol, po overení Kármánovej podmienky pre prechodnú oblasť prúdenia (viz. rov. (1.10a) a rov. (1.10b)), spočítaný stratový súčiniteľ λ podľa Swameeho-Jaina (viz. vzťah (1.13)) a stratový tlak p_{ssj} z Darcyho-Weisbachovej rovnice (viz. rovnica 1.20), ktorý bol následne zväčšený korekčným súčiniteľom veku potrubia podľa vzťahu (1.15). Táto hodnota bola zvolená ako teoreticky presná a teda tvorí základ pre porovnanie s inými metódami výpočtu tlakovej straty. Ďalej bol za účelom porovnania tlakovej straty spočítaný relatívny rozdiel tlaku pri použití vzťahu pre stratový súčiniteľ λ podľa Churchilla Δp_{SCH} (viz. vzťah 1.14). Hodnoty počiatkovej drsnosti steny potrubia k_0 boli podľa doporučenia v literatúre volené hodnoty uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 2.3 Hodnoty počiatkovej drsnosti potrubia [2, str. 105], [22]

Materiál	k_0 [mm]
Oceľ zváraná (do priemeru 6 m)	0,5
Liatina nová	1,0

2.1.3 Porovnanie výsledkov

Pri alternatívnych metódach výpočtu tlakovej straty bol na každom priemere zo zvoleného intervalu spočítaný podľa príslušného vzťahu stratový tlak p_s . Následne bol vyčíslený relatívny rozdiel tlaku, daný ako rozdiel stratového tlaku p_{ssj} vypočítaného podľa Swameeho-Jaina a tlaku spočítaného danou metódou p_s podelený stratovým tlakom p_{ssj} . Výsledok po prevedení na percentá vyzerá nasledovne:

$$\Delta p_s = \frac{p_s - p_{ssj}}{p_{ssj}} \cdot 100 [\%]. \quad (2.1)$$

Ako bolo spomenuté, Darcy-Weisbachova rovnica je pri výpočte energetických strát najpoužívanejšia, a to aj vďaka jej vysokej presnosti. Aby bolo možné z relatívneho rozdielu tlaku zistiť, naľko je tá-ktorá metóda presná, bol pre potreby porovnania spočítaný relatívny rozdiel tlaku pri podľa Churchilla Δp_{SCH} . Tento vzťah platí v prechodovej oblasti s dostatočnou presnosťou a teda rozdiel medzi stratovým tlakom spočítaným podľa Swameeho-Jaina a Churchilla je možné považovať za dostatočne malý.

Ak platí:

$$|\Delta p_s| \leq |\Delta p_{SCH}|, \quad d \in \langle D_1, D_2 \rangle, \quad (2.2)$$

je možné povedať že na danom intervale priemeru potrubia je metóda dostatočne presná.

Relatívny rozdiel tlaku danej metódy Δp_s pri určitom priemere potrubia výrazne závisí na voľbe parametrov charakterizujúcich stav potrubia. Tie je často možné voliť z veľmi širokého intervalu, čo môže spôsobiť značné rozdiely vo výsledkoch. Ktorá hodnota vstupného parametra je najvhodnejšia bolo zistené zavedením celkového relatívneho rozdielu tlaku P , ktorý je definovaný:

$$P = \int_{0,05}^1 |\Delta p_s| dD \text{ [m]}. \quad (2.3)$$

Nakoľko vzťahy pre Δp_s nie sú pre analytickú integráciu vhodné, je z hľadiska porovnania presnosti jednotlivých metód výpočtu je možné integráciu previesť na sumáciu po jednotlivých priemeroch potrubia, odstupňovaných po 0,05 m:

$$P = \sum_{i=1}^{191} \Delta p_{si} \text{ [-]}, \quad (2.4)$$

kde Δp_{si} predstavuje relatívny rozdiel tlaku na i -tom priemere potrubia D_i .

Čím je P na uvažovanom intervale priemeru potrubia D menší, tým je menšia odchýlka od teoreticky presného výsledku získaného pomocou Swameeho-Jainovho vzťahu pre koeficient trenia λ (1.13). Pomocou P sa získa optimálna hodnota vstupného parametra označená indexom „opt“, ktorú je možné považovať za najvhodnejšiu pre daný typ výpočtu a potrubia. Môže nastať prípad, kedy optimálna hodnota daného parametra nebude ležať v intervale odporúčanom v literatúre. Z tohto dôvodu sú v grafoch vykreslené aj krivky pre minimálnu a maximálnu hodnotu parametra definujúceho kvalitu povrchu steny trubice.

V grafoch (viz. príloha 1 až 6) je vykreslený relatívny rozdiel tlaku pre danú výpočtovú metódu pri použití optimálneho vstupného parametra Δp_s , relatívny rozdiel tlaku pri použití vzťahu podľa Churchilla Δp_{SCH} a pre porovnanie krivky relatívneho rozdielu tlaku pri použití minimálnej a maximálnej doporučenej hodnoty parametra charakterizujúceho kvalitu povrchu. Ak nie je zadaný interval, ale konkrétna hodnota pre daný parameter, je namiesto maximálnej a minimálnej doporučenej hodnoty vykreslená hodnota stratového tlaku pri použití zadanej hodnoty parametra.

2.2 Výpočet tlakovej straty

2.2.1 Darcyho-Weisbachova metóda

Pri výpočte tlakovej straty použitím Darcyho-Weisbachovej rovnice boli pre absolútnu počiatočnú drsnosť potrubia k_0 zvolené hodnoty uvedené v tabuľke 2.3. Použitím Churchillovho vzorca pre výpočet koeficientu trenia λ bola po vyčíslení tlakovej straty zistená relatívna odchýlka od teoreticky presnej hodnoty Δp_s . Táto sa pohybovala pre všetky typy oceľového potrubia v rozmedzí od -0,033 % pre priemer DN 50 po -0,025 % pre DN 1000 a pre všetky varianty liatinového potrubia od -0,0465 % pre DN 50 po -0,0346 % pre DN 1000. Dôvod, prečo Δp_s nezávisí na dobe prevádzky potrubia je, že oba vzťahy porovnávané pomocou (2.1) vychádzajú z rovnakej rovnice. V skutočnosti sa teda porovnávajú výpočtové vzťahy pre λ , ktoré je v tomto prípade možné ovplyvniť veľkosťou Reynoldsovho čísla Re a absolútnej drsnosti k .

2.2.2 Manningova metóda

Manningova metóda vychádza z Chézyho rovnice (1.23). Pri výpočte rýchlostnej konštanty C (1.25) je použitý Manningov drsnostný súčiniteľ n . Pre uvažované materiály modelového potrubia nadobúda n nasledujúce hodnoty:

Tab. 2.4 Odporúčené hodnoty Manningovho súčiniteľa n [14]

Materiál	n
Oceľ zvaraná	0,011 - 0,014
Liatina	0,015 - 0,025

Pomocou celkového relatívneho rozdielu tlaku P (2.4) boli zistené optimálne hodnoty Manningovho drsnostného súčiniteľa n_{opt} pre jednotlivé typy potrubia.

Tab. 2.5 Optimálne hodnoty parametra n_{opt} zistené Manningovou metódou

Typ potrubia	O ₁₀	O ₂₀	L ₁₀	L ₂₀	L ₄₀
n_{opt}	0,012	0,013	0,013	0,014	0,015

Pri potrubí O₁₀ relatívny rozdiel tlaku Δp_s so zväčšujúcim sa priemerom klesá z hodnoty 10,7 % po -6,6 %. Od priemeru potrubia DN 500 je možné pozorovať záporný relatívny rozdiel tlaku Δp_s . To signalizuje, že je tlaková strata vypočítaná Manningovou metódou nižšia ako teoreticky presná hodnota tlakovej straty vyčíslená podľa Swameeho-Jaina. Analýzou potrubia O₂₀ bolo zistené, že Δp_s klesá z hodnoty 17,6 % do mierne záporných hodnôt (-0,79 %).

Stanovenie tlakovej straty pri prúde kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou

Ako je vidieť z tab. 2.4, pri potrubí L₁₀ a L₂₀ optimálna hodnota Manningovho súčiniteľa n_{opt} neleží v intervale doporučenom v literatúre. To naznačuje, že Manningov súčiniteľ pre liatinu pracuje s vyššou počiatočnou drsnosťou potrubia k_0 . Pri použití minimálneho doporučeného súčiniteľa $n = 0,015 \Delta p_s$ pri potrubí L₁₀ rastie od 37% pre potrubie DN 50 po 40,4 % pre DN 115, kde začne klesať až po hodnotu 26 % pre potrubie DN 1000. Pri potrubí L₂₀ má krivka Δp_s podobný tvar, rozdielne sú hodnoty: pre DN 50 24,5 %, maximum pri DN 115 dosahuje hodnotu 27 % a relatívny rozdiel tlaku pre DN 1000 predstavuje 14,1 %. Pri potrubí L₄₀ je minimálna doporučená hodnota súčiniteľa $n = 0,015$ zároveň optimálnou. Pri uvažovaní potrubia s priemerom menším ako DN 400 je relatívny rozdiel tlaku Δp_s kladný s maximálnou hodnotou 6,8 %. So zväčšujúcim sa priemerom Δp_s klesá až po hodnotu -4 %.

2.2.3 Pavlovského metóda

Podobne ako Manningova metóda, aj Pavlovského metóda výpočtu tlakovej straty využíva Chézyho rovnicu (1.23). Rozdielny je výpočet exponenta y , ktorý je v tomto prípade možné určiť z rovnice (1.26b). Po vypočítaní exponenta y , stratového tlaku p_s , a relatívneho rozdielu tlaku Δp_s boli určené optimálne koeficienty drsnostného súčiniteľa podľa Pavlovského. Doporučené hodnoty sú rovnaké ako v predošlej kapitole (viz. tab. 2.3)

Tab. 2.6 Optimálne hodnoty parametra n_{opt} zistené Pavlovského metódou

Typ potrubia	O ₁₀	O ₂₀	L ₁₀	L ₂₀	L ₄₀
n_{opt}	0,013	0,013	0,013	0,014	0,015

Pri potrubí O₁₀ je Δp_s kladný na celej dĺžke intervalu priemerov potrubia. Pohybuje sa v rozmedzí hodnôt od 4,5 % pre DN 1000 po maximum 17 % pri potrubí DN 80. Podobne ako v prípade potrubia O₁₀ pri Manningovej výpočtovej metóde, je aj pri potrubí O₂₀ Δp_s od DN 50 záporný s minimom -5,4 % pre najväčšie uvažované potrubie. Maximum Δp_s je, podobne ako v predošlom prípade, možné pozorovať pri priemere DN 80 s hodnotou 5,9 %.

Čo sa týka potrubia L₁₀ a L₂₀, zistené optimálne hodnoty Pavlovského drsnostného súčiniteľa n_{opt} nespádajú do intervalu doporučeného v literatúre (viz. tab. 2.3). Po zmene súčiniteľa n na minimálnu hodnotu udávanú pre liatinu nadobúda relatívny rozdiel tlaku Δp_s s rastúcim priemerom potrubia hodnoty od 47,9 % po 26,7 % v prípade potrubia L₁₀. V prípade potrubia L₂₀ hodnoty Δp_s s rastúcim priemerom klesajú z 33,8 % po 14,7 % s výnimkou potrubia s priemerom menším ako DN 80, pri ktorom je možné pozorovať klesajúci charakter po hodnotu 33,1 % zodpovedajúcu najmenšiemu uvažovanému priemeru potrubia. Pri potrubí L₄₀ je optimálny drsnostný súčiniteľ podľa Pavlovského n_{opt} zhodný s minimálnou hodnotou udávanou v literatúre. S rastúcim priemerom potrubia klesá relatívny rozdiel tlaku Δp_s z hodnoty 12,8 % na -3,7 %. Výnimkou je opäť úzky interval malých priemerov potrubia, kde so znižujúcim sa priemerom klesá Δp_s na hodnotu 12,5 %.

2.2.4 Hazenova-Williamsova metóda

Pre všetky uvažované typy modelového potrubia má krivka relatívneho rozdielu tlaku Δp_s so zväčšujúcim sa priemerom potrubia rastúci charakter.

V prípade oceľového potrubia bola v literatúre pre Hazenovu-Williamsovú metódu výpočtu zadaná konkrétna hodnota parametra popisujúceho kvalitu povrchu potrubia [12]. V oboch prípadoch bola táto hodnota vyššia ako zistená optimálna hodnota $C_{HW,opt}$. V prípade potrubia O₁₀ Δp_s rastie z -17,2% po 14,8% rozdiel tlaku, s tlakovou stratou rovnej teoreticky presnej hodnote podľa Swameeho-Jaina pri potrubí s priemerom 190 mm. Pri potrubí O₂₀ je Δp_s na celom intervale priemeru potrubia kladný, a to v rozpätí od 8,6 % po 50,6 %.

Liatinovému potrubiu bol v literatúre pre parameter C_{HW} priradený interval zodpovedajúci dobe prevádzky potrubia. Pri potrubí L₁₀ je krajná hodnota zadaného intervalu zároveň aj optimálnou, čo už však neplatí pre L₂₀ a L₄₀, kde optimálna hodnota Hazenovho-Williamsovho parametra nespadá do intervalu doporučeného v literatúre [21]. Pri potrubí L₁₀ nadobúda Δp_s hodnoty od -30,7 % po 4,6 % s nulovou hodnotou pri priemere potrubia 580 mm. Analýzou potrubia L₂₀ za použitia najbližšieho koeficientu C_{HW} zahrnutého intervalom daným v literatúre bol zistený Δp_s v rozmedzí od -28,9 % po 7,5 % s nulovou hodnotou pri priemere potrubia 450 mm. Δp_s vypočítaný na potrubí L₄₀ rastie z hodnoty -17,8 % cez nulový bod pri priemere 120 mm po hodnotu 27,4 %.

Hodnoty parametra C_{HW} doporučené v literatúre sú zhrnuté v tabuľke 2.6. Tabuľka 2.7 obsahuje optimálne hodnoty parametra $C_{HW,opt}$ zistené výpočtom.

Tab. 2.7 Hodnoty parametra C_{HW} uvedené v literatúre

Materiál	Doba prevádzky v rokoch	C_{HW}
Oceľ zváraná	10	110
	20	90
Liatina	10	107 – 113
	20	89 – 100
	40	64 – 83

Tab. 2.8 Zistené optimálne hodnoty parametra $C_{HW,opt}$

Typ potrubia	O ₁₀	O ₂₀	L ₁₀	L ₂₀	L ₄₀
$C_{HW,opt}$	116	110	107	101	92

2.2.5 Scobeyova metóda

Scobeyova metóda výpočtu tlakovej straty je spomedzi uvedených alternatívnych spôsobov výpočtu najpodobnejšia Darcyho-Weisbachovej metóde, nakoľko vek potrubia zohľadňuje pomocou korekčného súčiniteľa veku potrubia (viz. kapitola 1.2.5). Scobeyov súčiniteľ K_S vychádza zo základnej hodnoty K'_S definovanej pre daný typ potrubia. Pre nové oceľové potrubie so spojitým povrchom vnútornej steny (s absenciou nitov, resp. iných výstupkov spôsobujúcich zväčšenie hydraulického odporu) nadobúda podľa [13, str. 87] $K'_S = 0,32$. V prípade liatinového potrubia príslušný Scobeyov koeficient nebol nájdený.

Pre oba typy oceľového potrubia je optimálna hodnota $K'_S = 0,37$. Použitím zadanej hodnoty $K'_S = 0,32$ pri akomkoľvek type oceľového potrubia rastie hodnota Δp_s z hodnoty -44,9 % pre rozmer potrubia DN 50 po -6,7 % pre DN 1000.

Nakoľko pre liatinové potrubie nebol nájdený koeficient K'_S , Δp_s bol vyčíslený pre optimálnu hodnotu tohto koeficienta, teda $K'_S = 0,43$. Tento so zväčšujúcim sa priemerom rastie z hodnoty -41,1 % po 8,5 % s nulovou hodnotou pri priemere DN 600.

Skutočnosť, že vek potrubia nemá vplyv na veľkosť Δp_s , je spôsobená použitím korekčného súčiniteľa veku potrubia m (viz. kap. 1.2.5) v oboch porovnávaných vzťahoch.

2.2.6 Lévyho metóda

Lévyho rovnica využíva pre charakterizovanie stavu steny potrubia dva parametre: α a β . Tieto sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 2.9 Doporučené hodnoty parametrov α a β [14]

Stav potrubia	α	β
Nové	36,4	1
Málo používané	25	2
Veľmi používané	20,5	3

Pomocou celkového rozdielu tlaku P bolo zistené, že potrubie O₁₀ najviac zodpovedá definícii „nového“ potrubia, pričom relatívny rozdiel tlaku Δp_s rastie z hodnoty -41,8 % pre DN 50 po -9,8 % pre DN 1000. Potrubie O₂₀ je možné považovať za „málo používané“, pričom Δp_s je takmer na celom intervale rozmerov potrubia kladný s rastúcou tendenciou od DN 50, kde Δp_s predstavuje -1,8 %, po DN 500 s maximálnou hodnotou $\Delta p_s = 25,3$ %, odkiaľ Δp_s klesá po hodnotu 22,2 %.

Ako liatinové potrubie L₁₀, tak aj L₂₀ je možné považovať za „málo používané“, kdežto potrubie L₄₀ najlepšie zodpovedá „veľmi používanému“ potrubiu. Pre všetky typy liatinového potrubia má Δp_s tvar konkávnej krivky. V prípade potrubia L₁₀ predstavuje Δp_s pri DN 50 -13,7 %, v maxime pri DN 600 dosahuje 18,5% hodnotu a klesá na 17,0 % pri DN

Stanovenie tlakovej straty pri prúdení kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou

1000. Pri potrubí L₂₀ rastie Δp_s z hodnoty -21,9 % po 7,2 % pre DN 600 a klesá na 5,8% hodnotu zodpovedajúcu DN 1000. Pri potrubí L₄₀ rastie Δp_s z -15,1% hodnoty po 4,9 % pre DN 350 a klesá na -0,2 % pre najväčšie uvažované potrubie.

2.2.7 Glaukerova-Stricklerova metóda

Parametrom definujúcim materiál a vek potrubia je v Glaukerovej-Stricklerovej rovnici bezrozmerné číslo K_{GS} . V literatúre nebola doporučená konkrétna hodnota tohto parametra, ale interval charakterizujúci to-ktoré potrubie (viz. tab. 2.10). Pre vykreslenie kriviek Δp_s s použitím minimálnych a maximálnych hodnôt K_{GS} boli vybrané krajné hodnoty pre daný materiál potrubia. Podobne ako v predošlých prípadoch bola pre každý typ potrubia po spočítaní celkového rozdielu tlaku P stanovená optimálna hodnota Glaukerovho-Stricklerovho koeficientu $K_{GS, opt}$. Zistené hodnoty sú zhrnuté v tabuľke 2.11.

Tab. 2.10 Zadané hodnoty parametra K_{GS} [14]

Materiál	Stav potrubia	K_{GS}
Oceľ zváraná	Nové	80 – 90
	Staré	70 – 80
Liatina	Nové	80 – 90
	Staré	65 – 75

Tab. 2.11 Vypočítané optimálne hodnoty parametra $K_{GS, opt}$

Typ potrubia	O ₁₀	O ₂₀	L ₁₀	L ₂₀	L ₄₀
$K_{GS, opt}$	83	79	77	73	67

Ako je zrejmé z porovnania tabuliek 2.10 a 2.11, potrubie O₁₀ je možné považovať za „nové“, Δp_s s rastúcim priemerom potrubia klesá z hodnoty 11,7 % po -6,0 %. Krivka Δp_s má pri potrubí O₂₀ taktiež klesajúci charakter, a to z hodnoty 11,5 % po -6,1 %. Podľa tab. 2.10 sa však už jedná o „staré“ potrubie.

Hodnota Δp_s pri potrubí L₁₀ rastie z 3,1 % po maximum 5,2 % zodpovedajúce priemeru DN 115 odkiaľ s ďalším nárastom priemeru potrubia klesá na nulu pri DN 500 až po hodnotu -5,4 %. Výpočet na potrubí L₂₀ ukázal rovnaký tvar krivky Δp_s , s počiatočnou hodnotou 3,8 %, maximum 5,9 % pri DN 115, nulovým prechodom pri priemere potrubia 535 mm a hodnotou -4,8 % pre najväčší uvažovaný rozmer. Pri potrubí L₄₀ je tvar krivky Δp_s rovnaký ako v predošlých dvoch prípadoch, pričom pre DN 50 predstavuje 0,9 %, maximálnu hodnotu 2,9 % dosahuje pri DN 115, nulovú hodnotu pri priemere DN 350 a -7,4 % pri DN 1000.

ZÁVER

S rastúcou dobou prevádzky potrubnej siete dochádza k degradácii vnútornej steny potrubia. V závislosti od chemických vlastností vody sa na stene potrubia vytvára sekundárny profil drsnosti tvorený vrstvou usadených solí (inkrustov), alebo zoxidovaného kovu (koróziou). Vzniknutý povrch je možné chemicky či manuálne odstrániť, alebo je možné pristúpiť k výmene potrubia, resp. zvoliť relining potrubia. Výhodnejšie však je predchádzať nárastu drsnosti, napr. zavedením cementovej výstelky alebo vhodnou voľbou materiálu potrubia. Zväčšenie drsnosti povrchu potrubia má za následok zvýšenie tlakovej straty. Výpočet tlakovej straty bol vykonaný na modelovom potrubí definovanom v kapitole 2.1.1.

Ak je daná počiatočná drsnosť potrubia k_0 (ktorá zodpovedá parametru drsnosti povrchu R_c), s výhodou je pre výpočet tlakovej straty možné použiť Darcyho-Weisbachovu rovnicu. Pre zohľadnenie veku potrubia je možné použiť korekčný súčiniteľ veku potrubia m (viz. kapitola 1.2.5), alebo zvýšiť k_0 mierou nárastu drsnosti potrubia b podľa Lamonta (1.18). Kvalita výsledkov vypočítanej tlakovej straty potom závisí od presnosti zvoleného vzťahu pre koeficient trenia λ a zistených chemických vlastností prúdiacej tekutiny. Nevýhodou korekčného súčiniteľa veku potrubia m je malé množstvo dostupných parametrov a , ktoré kvantifikujú degradačný účinok prepravovanej vody na stenu potrubia a v prípade použitia miery nárastu drsnosti potrubia b nemožnosť rozšíriť použitie Lamontovho vzorca pre vodu s kladným Langelierovým indexom LI , tj. pre vodu spôsobujúcu vznik inkrustov v potrubí. Výhodou Darcyho-Weisbachovej rovnice je aj zohľadnenie kinematickej viskozity kvapaliny ν . To umožňuje použiť výpočet aj v prípadoch, kedy je prepravovaná horúca voda.

V prípade, že nie je možné zistiť drsnosť potrubia k , prichádza do úvahy použitie vzorcov, v ktorých je kvalita steny potrubia charakterizovaná iným parametrom. Tento zvyčajne závisí na type materiálu potrubia a dobe jeho prevádzky. Pri Manningovej a Pavlovského metóde sa podľa materiálu potrubia vyberie z daného intervalu hodnota drsnostného súčiniteľa n , ktorý následne vystupuje v rovnici pre výpočet tlakovej straty. V prípade liatinového potrubia je tento interval značne široký, čo môže v prípade zvolenia nevhodnej hodnoty parametra n viesť k veľmi rozdielnym výsledkom. V prípade Hazenovej-Williamsovej rovnice sa zohľadňuje ako materiál potrubia, tak aj jeho vek. Podľa odporúčenia v literatúre sa pre oceľové resp. liatinové potrubie vyberie príslušná hodnota, resp. interval hodnôt parametra C_{HW} . Priemer trubice, na ktorej je vykonávaný výpočet tlakovej straty by mal ležať medzi DN 50 a DN 300. Z dôvodu jednotnosti podmienok, za ktorých je vykonaný výpočet tlakovej straty bola tlaková strata vypočítaná aj pre potrubie väčšieho priemeru. Pri Scobeyovej metóde výpočtu tlakovej straty sa podľa typu potrubia zvolí Scobeyov súčiniteľ pre nové potrubie K'_s . Tlaková strata sa koriguje súčiniteľom veku potrubia, podobne ako v prípade Darcyho-Weisbachovej rovnice. Nepresnosť výsledkov môže byť spôsobená neaktuálnosťou výpočtovej metódy, nakoľko sa táto využívala najmä v tridsiatych rokoch 20. storočia. Lévyho rovnica je použiteľná len pri liatinovom a oceľovom potrubí s priemerom DN 500 – DN 700, pričom parametre α a β zohľadňujú dobu prevádzky potrubia. Pri výpočte bolo zistené, že pri uvažovaní väčšieho priemeru potrubia ako je doporučené v literatúre

Stanovenie tlakovej straty pri prúdení kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou

nedochádza k nárastu relatívneho rozdielu tlaku Δp_s , ale naopak, k jeho miernemu poklesu. Nevýhodou Lévyho metódy je málo dostupných parametrov popisujúcich jednotlivé stavy povrchu steny potrubia. Glaukerova-Stricklerova rovnica pre výpočet tlakovej straty koeficientom K_{GS} zohľadňuje typ aj vek potrubia. Pre dosiahnutie presných výsledkov je však potrebné správne zvoliť hodnotou K_{GS} z daného intervalu.

V nasledujúcej tabuľke sú pre porovnanie presnosti výpočtov podľa jednotlivých metód uvedené hodnoty celkového relatívneho rozdielu tlaku P pri použití optimálnych hodnôt koeficientov vychádzajúcich z odporučení v literatúre. V prípadoch, kedy optimálna hodnota koeficientu definujúceho stav potrubia ležala mimo odporučený interval, resp. nezhodovala sa s konkrétnou zadanou hodnotou, je hodnota P pri použití optimálneho koeficientu uvedená v zátvorke a za orientačnú je možné považovať celkový relatívny stratový tlak P pri použití najbližšej hodnoty daného súčiniteľa spadajúceho do zadaného intervalu, resp. hodnoty danej v literatúre.

Tab.1 Zistené hodnoty celkového relatívneho rozdielu tlaku P

Typ potrubia	Metóda výpočtu tlakovej straty						
	Darcy-Weisbach	Manning	Pavlovský	Hazen-Williams	Scobey	Lévy	Glauker-Strickler
O₁₀	0,052	8,4	19,3	18,2 (9,1)	32,7 (15,5)	29,6	8,4
O₂₀		12,7	6,0	78,6 (9,1)		42,8	8,4
L₁₀	0,071	63,3 (5,7)	43,6 (12,4)	11,5	17,7	29,9	5,7
L₂₀		39,1 (9,5)	68,3 (6,5)	11,9 (11,5)		12,2	5,7
L₄₀		6,0	7,9	30,1 (12,3)		6,1	6,6

Tabuľka 1 dáva predstavu o tom, ako vyzerá celkový rozdiel tlaku P na zvolenom intervale priemeru potrubia D . Ako sa správajú jednotlivé krivky relatívneho rozdielu tlaku Δp_s na určitých častiach intervalu je popísané v kapitole 2.2. Graficky je závislosť Δp_s na priemere potrubia spracovaná v prílohe, odkiaľ je možné pri známej dovolenej odchýlke rozdielu tlaku zhodnotiť vhodnosť použitia danej metódy a parametra definujúceho kvalitu povrchu steny potrubia. Taktiež je možné pre určitý podinterval priemeru D zvoliť vhodnejšiu hodnotu príslušného koeficientu, pri ktorom bude Δp_s na danom podintervale menší.

Pri hodnotení výsledkov výpočtu tlakovej straty je treba brať do úvahy fakt, že veľkosť Δp_s výrazne závisí od zvolenej počiatkovej drsnosti trubice k_0 , od rýchlosti prúdenia kvapaliny v a od zvoleného intervalu priemerov potrubia. Pri zmene ktoréhokoľvek z uvedených parametrov dochádza k modifikácii optimálnych hodnôt koeficientov vystupujúcich v rovniciach pre výpočet tlakovej straty. Ako je zrejme z výsledkov tejto práce, porovnávací Δp_s spočítaný podľa Churchilla je niekoľkonásobne nižší ako pri výpočte pomocou alternatívnych metód. Je však potrebné prihliadnuť k skutočnosti, že ako Swamee-Jain, tak Churchill používajú pri výpočte Darcyho-Weisbachovu rovnicu, kdežto každá z alternatívnych metód výpočtu pracuje s vlastnou rovnicou a rozdielnym popisom stavu potrubia. V prípadoch uvedených vyššie môže byť ich použitie vhodné.

CITOVANÉ ZDROJE

- [1] HORNÍKOVÁ, H. *Hydromechanika: Vybrané kapitoly a príklady*. Nitra: SPU, 2005, 144s. ISBN 80-8069-543-1.
- [2] ŠOB, F. *Hydromechanika*. 2. vyd. Brno: CERM, 2008. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [3] Power Law Profiles in Pipes. *Queen's university: Faculty of Engineering and Applied Science* [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://me.queensu.ca/People/Sellens/PowerLaw.html>
- [4] BUMBÁLEK, B. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989, 338 s.
- [5] BEDNÁŘ, L. *Kontrola struktury povrchu*. Brno, 2006. 57 s. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedúci práce Ing. Jiří Pernikář, CSc.
- [6] ŠTEFAN, D. *Hydraulické ztráty v potrubí*. Brno, 2009. 42 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav energetický. Vedoucí práce Ing. Pavel Rudolf, PhD.
- [7] VAVRO, K. *Tok tekutín v potrubných systémoch*. Bratislava: STU, 2004, s. 49. ISBN 80-227-2018-6.
- [8] ŠVERĚPA, O. Koróze a možnosti protikorozi ochrany teplovodných řadů. In: *Koróze vodohospodářských zařízení a ochrana proti ní*. Praha: ČSVTS, 1979, s. 133-149.
- [9] Langelier index. *Government of Newfoundland and Labrador* [online]. 8.3.2013 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.env.gov.nl.ca/env/waterres/quality/drinkingwater/langlier.html>
- [10] WALSKI, T. et al. *Predicting internal roughness in water mains* [online]. 1988 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA194321>
- [11] JANDORA, J. *Tabulky z hydrauliky*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-2007-3.
- [12] Escoamento de um Fluido Real. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. *Departamento de Engenharia* [online]. 2007 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: http://www.deg.ufla.br/site/_adm/upload/file/Hfcontinua2007.pdf
- [13] SCOBAY, F. *Technical Bulletin: The flow of water in riveted steel and analogous pipes* [online]. 1930, č. 150 [cit. 2013-04-08]. ISSN 0082-9811. Dostupné z: http://books.google.sk/books?id=fau-4_G31MoC
- [14] JARDIM, S. Perdas de carga por atrito: Fórmulas empíricas. In: *Universidade Católica do Rio Grande do Sul* [online]. 2011 [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: http://www.feng.pucrs.br/professores/jardim/ENGENHARIA_CIVIL_-_Hidraulica_Geral/Aula_02.pdf
- [15] *Příčiny koróze a protikorozi ochrana vodovodního potrubí a armatur*. Brno: CERM, 2000. ISBN 80-7204-227-0.
- [16] Relining. *Insituform - Hulín* [online]. 2013 [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: <http://www.insituform.sk/index.php/produkty/relining.html>
- [17] Čistenie vodovodného potrubia od kameňa a nečistôt. *JM KTN servis* [online]. 2013 [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: <http://www.jmktkn.sk/cistenie-vodovodneho-potrubia-od-vodneho-kamena-a-necistot>

- [18] KULHANOVA, V. *Korozní odolnost vybraných povrchových úprav ve vodném prostředí s obsahem chloridu*. Brno, 2010. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Ing. Jaromír Tulka, CSc.
- [19] *Koroze vodohospodářských zařízení a ochrana proti ní*. Praha: ČSVTS, 1979, 150 s. 57-457-79 /1738/.
- [20] JELENÍKOVÁ, I. Příčiny porúch u vodovodov v budovách. In: *Juniorstav* [online]. 2011 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/1.4/Jelenikova_Ivana_CL.pdf
- [21] Hazen-Williams Coefficients. *The Engineering Toolbox* [online]. 7.9.2012 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-coefficients-d_798.html
- [22] Absolutní drsnost potrubí pro různé materiály. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Ústav chemického inženýrství* [online]. 29.3.2004 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/uchi/e_tabulky/drsnost.html

POUŽITÉ SKRATKY A SYMBOLY

a	[-]	súčiniteľ agresivity vody
b	[mm·rok ⁻¹]	miera nárastu drsnosti potrubia
h_s	[m]	stratová výška
i_e	[-]	hydraulický sklon
k	[mm]	absolútna drsnosť potrubia
k_0	[mm]	počiatočná drsnosť potrubia
k_r	[-]	relatívna drsnosť potrubia
l	[mm]	základná dĺžka
ln	[mm]	vyhodnocovaná dĺžka
lt	[mm]	dĺžka posuvu meracieho prístroja
m	[-]	korekčný súčiniteľ veku potrubia
n	[-]	Manningov drsnostný súčiniteľ
p_s	[Pa]	stratový tlak
t	[rok]	doba prevádzky potrubia
v	[m·s ⁻¹]	rýchlosť prúdenia
y	[-]	exponent Chézyho rýchlostnej konštanty
z	[m]	výška
C	[-]	Chézyho rýchlostná konštanta
C_{HW}	[-]	Hazenov-Williamsov koeficient
D, D_h	[m]	priemer potrubia, hydraulický priemer
K_{GS}	[-]	Glaukerov-Stricklerov koeficient
K_S	[-]	Scobeyov koeficient
K'_S	[-]	Scobeyov koeficient pre nové potrubie
L	[-]	dĺžka potrubia
LI	[-]	Langelierov index

Stanovenie tlakovej straty pri prúde kvapaliny v trubici s veľmi vysokou drsnosťou

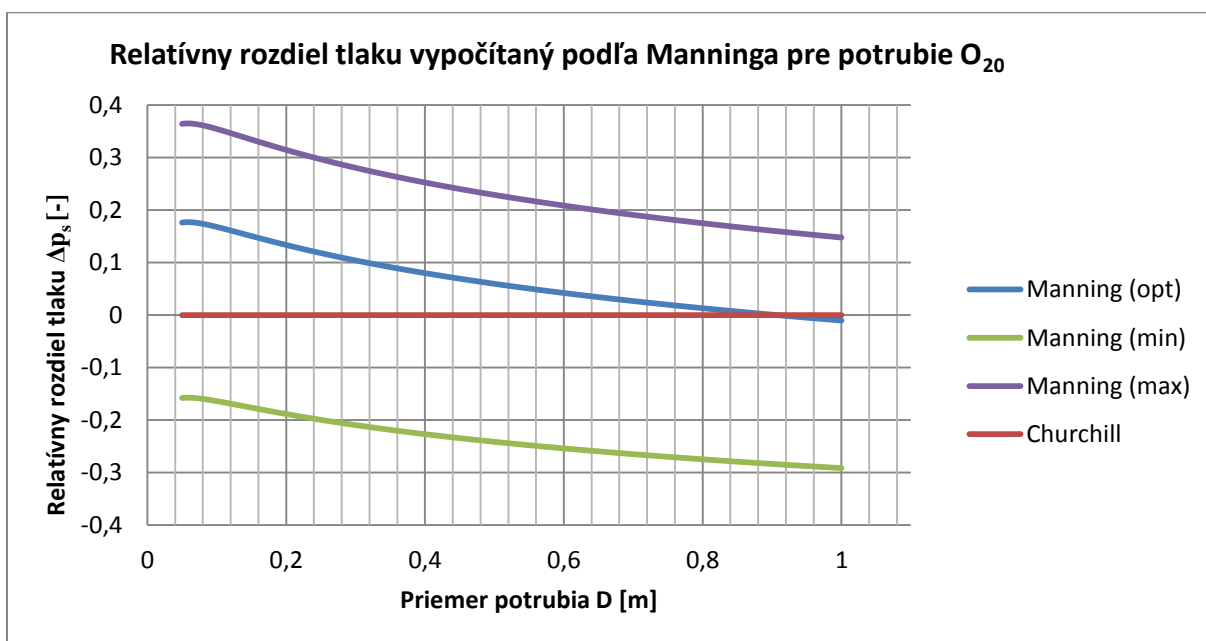
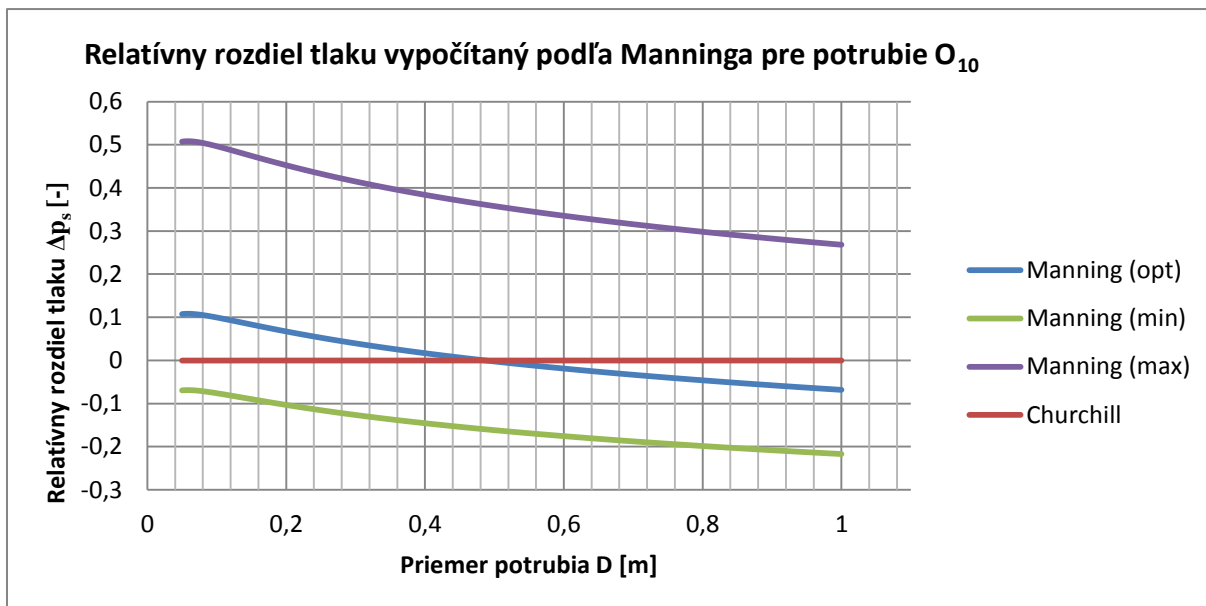
O	[m]	omočený obvod
P	[-]	celkový relatívny rozdiel tlaku
Q, Q_V	[m ³ ·s ⁻¹]	objemový prietok
R	[m]	hydraulický polomer
R_a	[μm]	priemerná aritmetická úchylka profilu
R_c	[μm]	priemerná výška prvkov profilu
Re	[-]	Reynoldsove číslo
R_t	[μm]	celková výška profilu
R_z	[μm]	najväčšia výška profilu
S	[m ²]	prietočná plocha prierezu
Y_s	[J·kg ⁻¹]	stratová merná energia
Y_{sm}	[J·kg ⁻¹]	energetická strata spôsobená miestnymi stratami
Y_{st}	[J·kg ⁻¹]	energetická strata spôsobená stratami trením po dĺžke
α, β	[-]	Lévyho koeficienty
δ	[mm]	hrúbka laminárnej podvrstvy
λ	[-]	koeficient trenia
ν	[m ² ·s ⁻¹]	kinematická viskozita
ζ_m	[-]	stratový súčiniteľ miestnych strát
ζ_t	[-]	stratový súčiniteľ trením po dĺžke
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota kvapaliny
Δp_s	[-]	relatívny rozdiel tlaku

ZOZNAM PRÍLOH

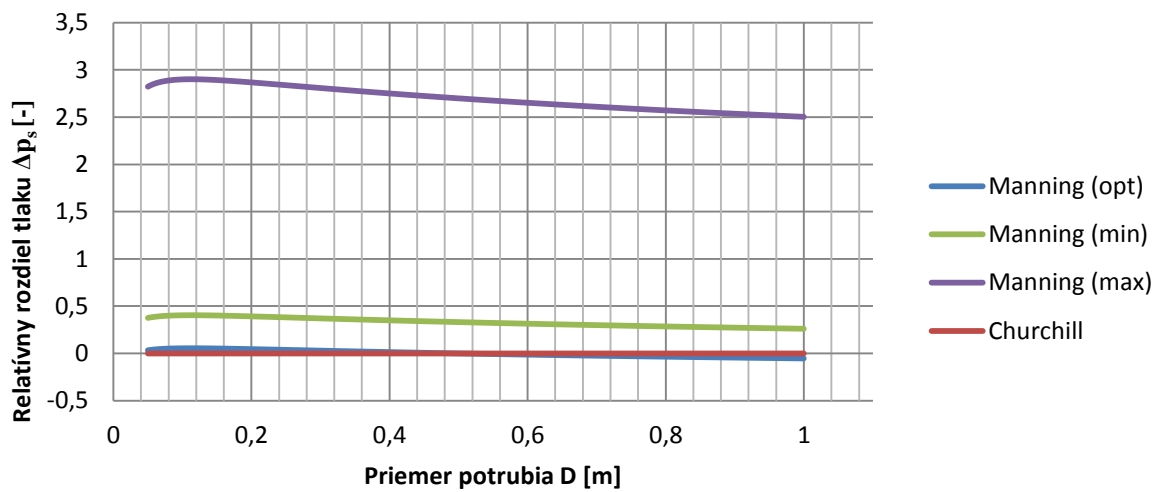
1. Výpočet tlakovej straty Manningovou metódou
2. Výpočet tlakovej straty Pavlovského metódou
3. Výpočet tlakovej straty Hazenovou-Williamsovou metódou
4. Výpočet tlakovej straty Scobeyovou metódou
5. Výpočet tlakovej straty Lévyho metódou
6. Výpočet tlakovej straty Glaukerovou-Stricklerovou metódou

PRÍLOHA 1

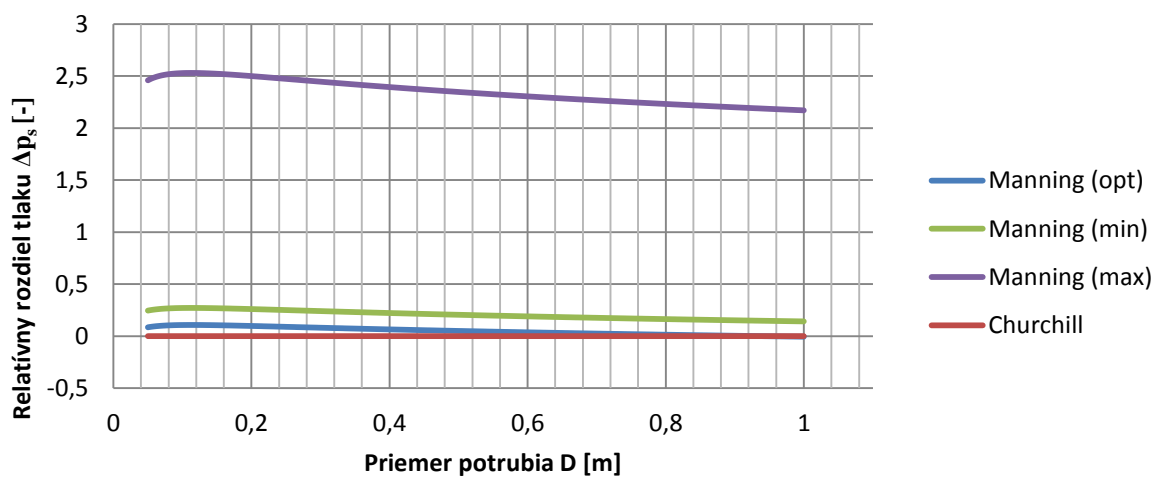
VÝPOČET TLAKOVEJ STRATY MANNINGOVOU METÓDOU



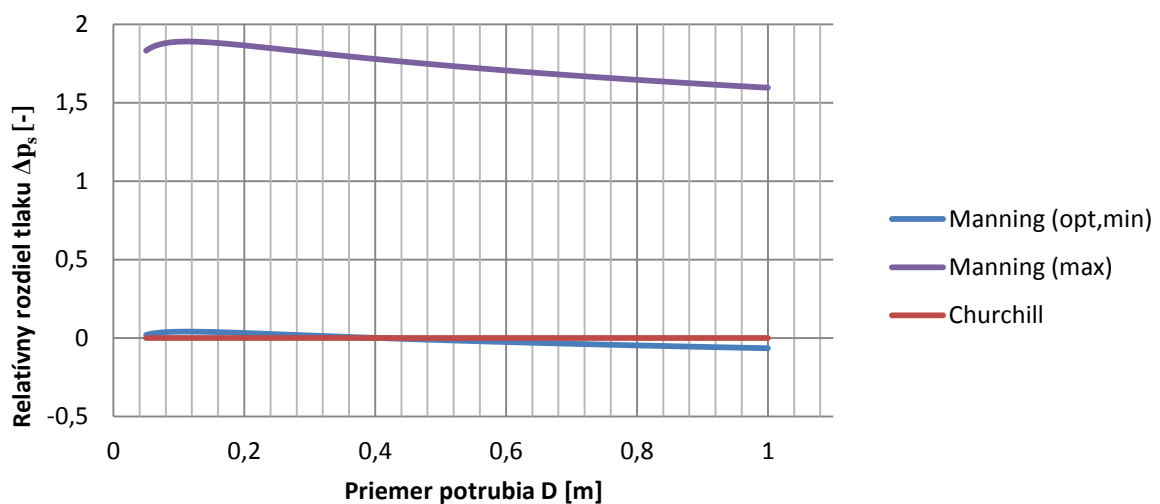
Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Manninga pre potrubie L₁₀



Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Manninga pre potrubie L₂₀

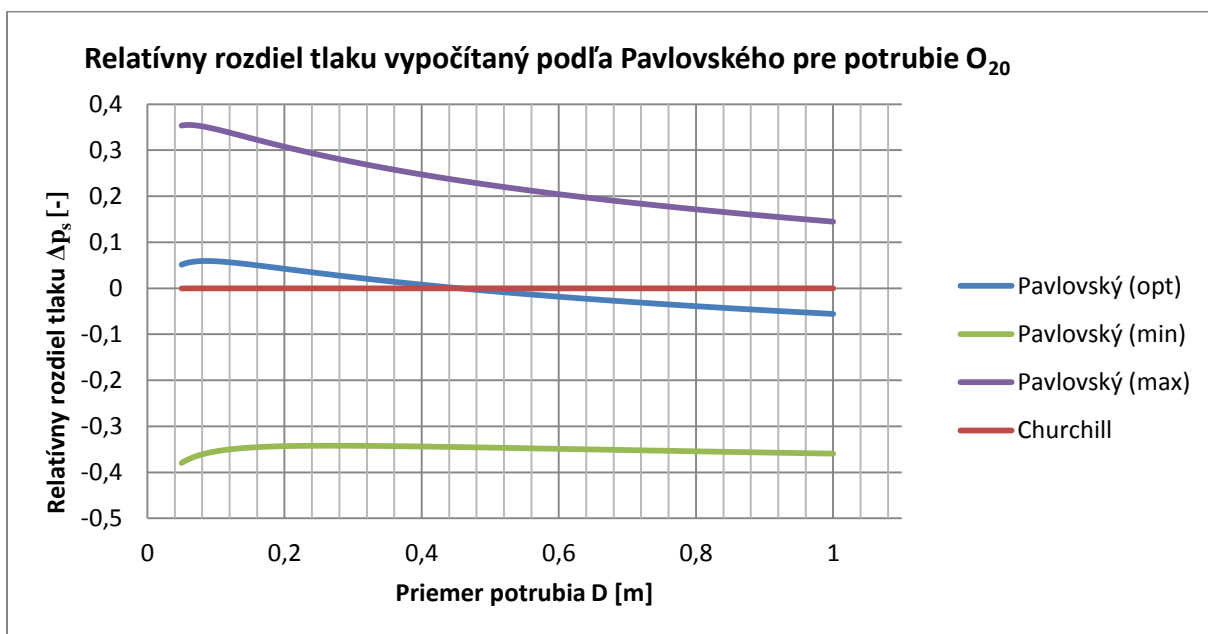
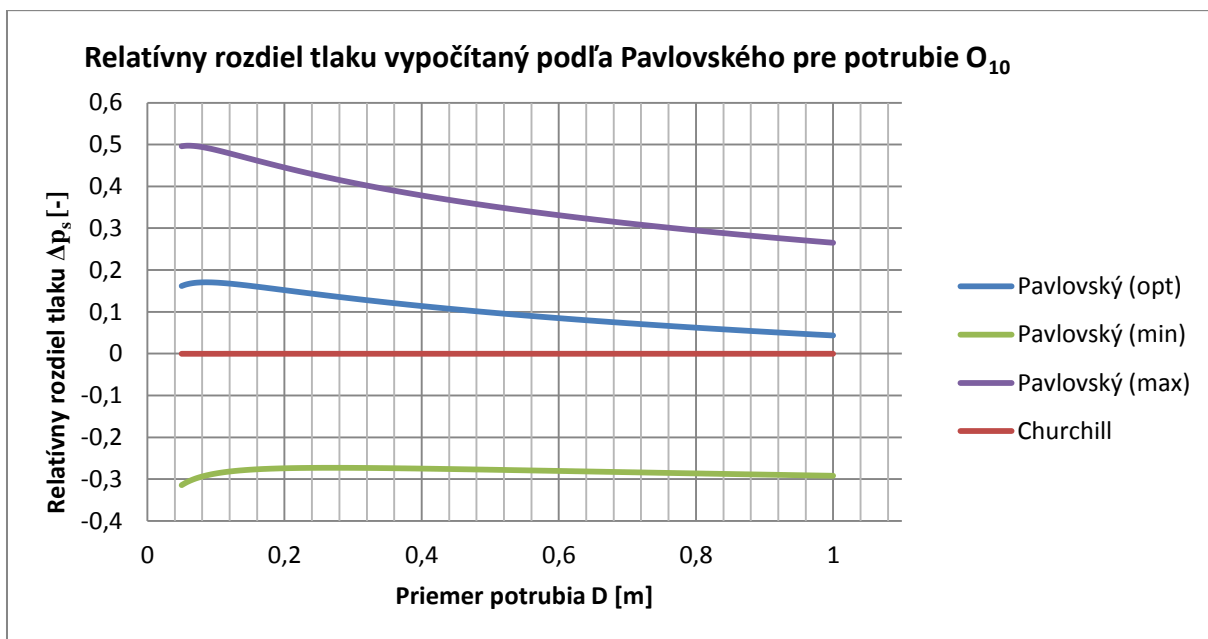


Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Manninga pre potrubie L₄₀

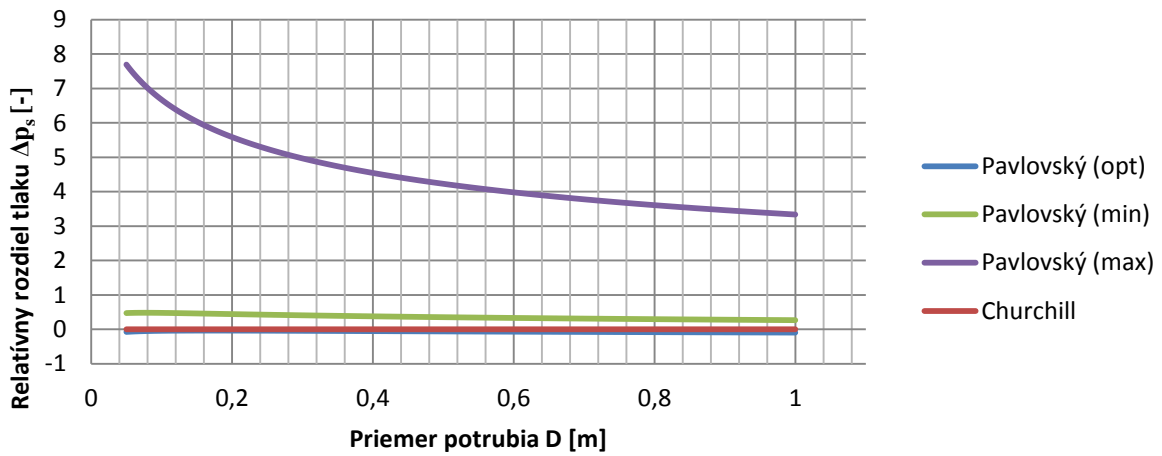


PRÍLOHA 2

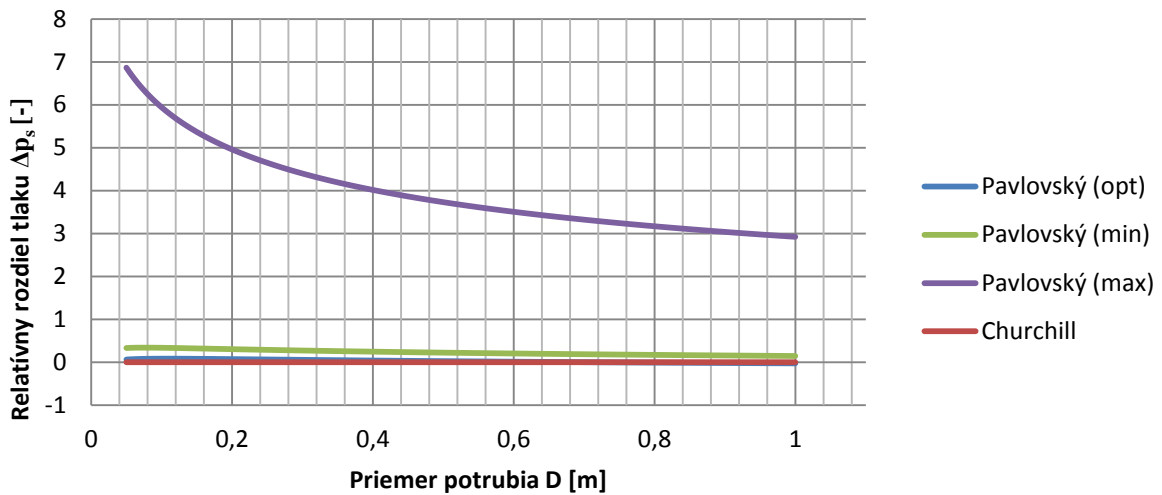
VÝPOČET TLAKOVEJ STRATY PAVLOVSKÉHO METÓDOU



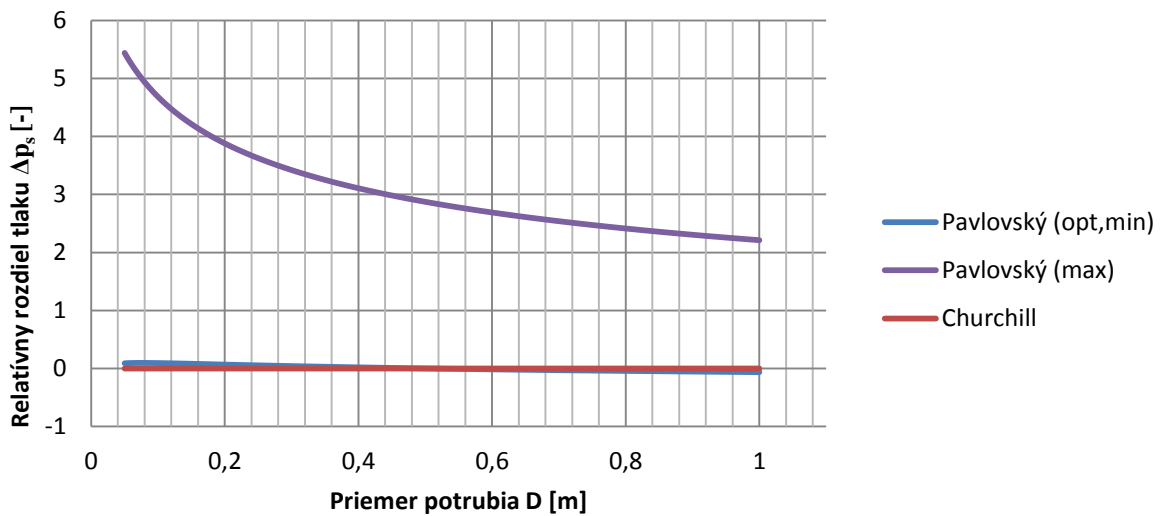
Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Pavlovského pre potrubie L₁₀



Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Pavlovského pre potrubie L₂₀

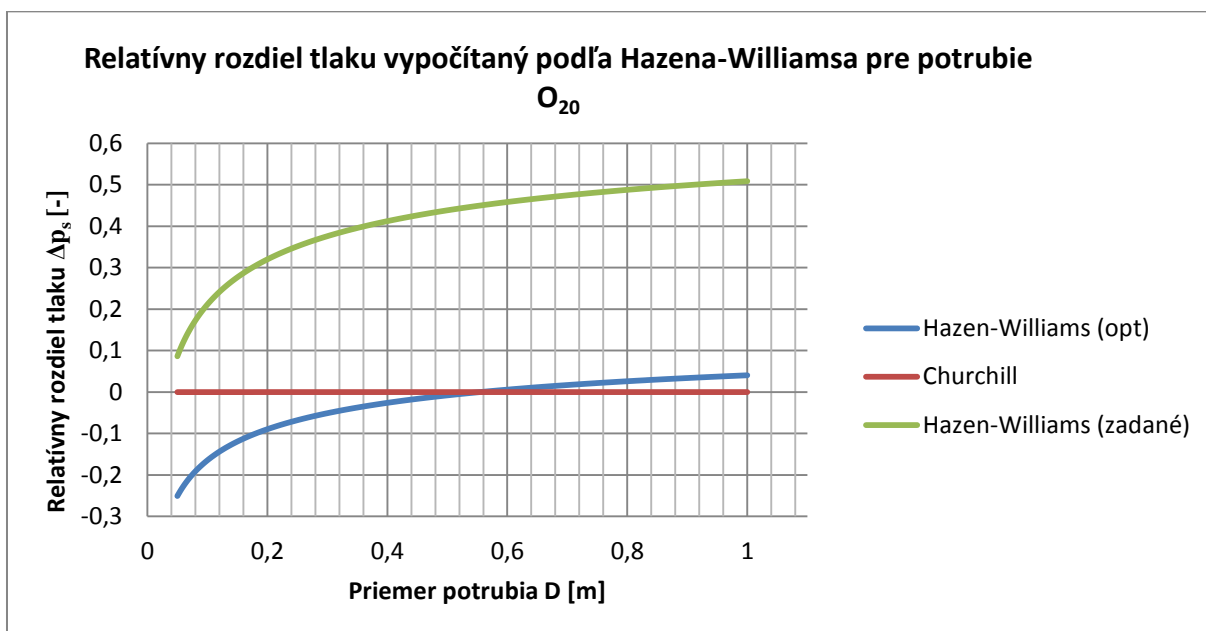
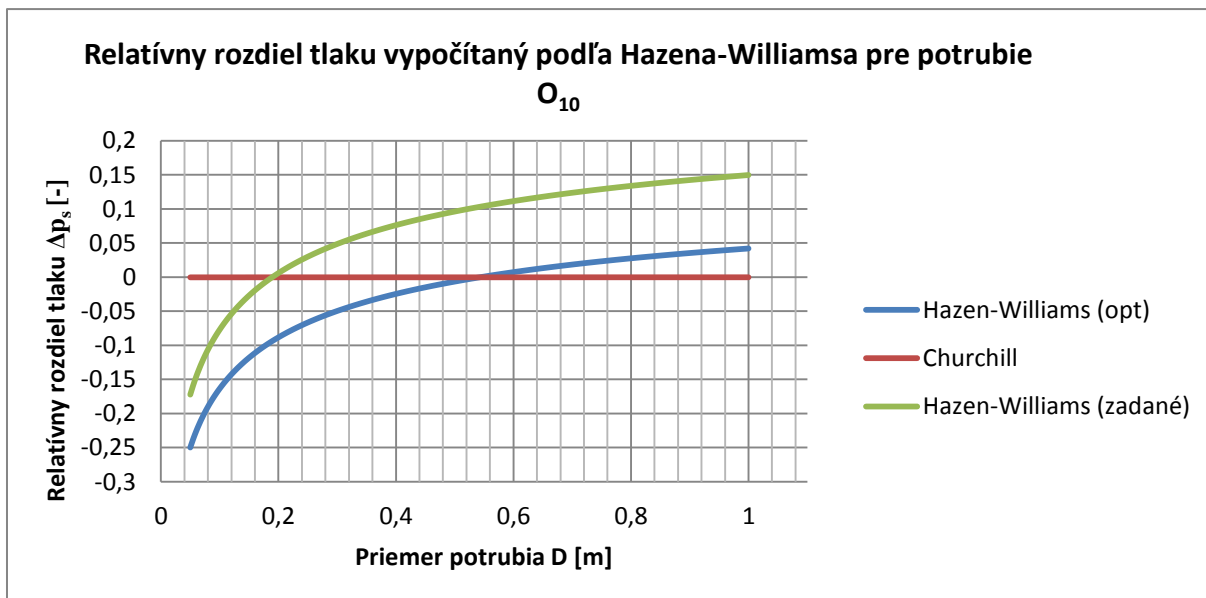


Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Pavlovského pre potrubie L₄₀



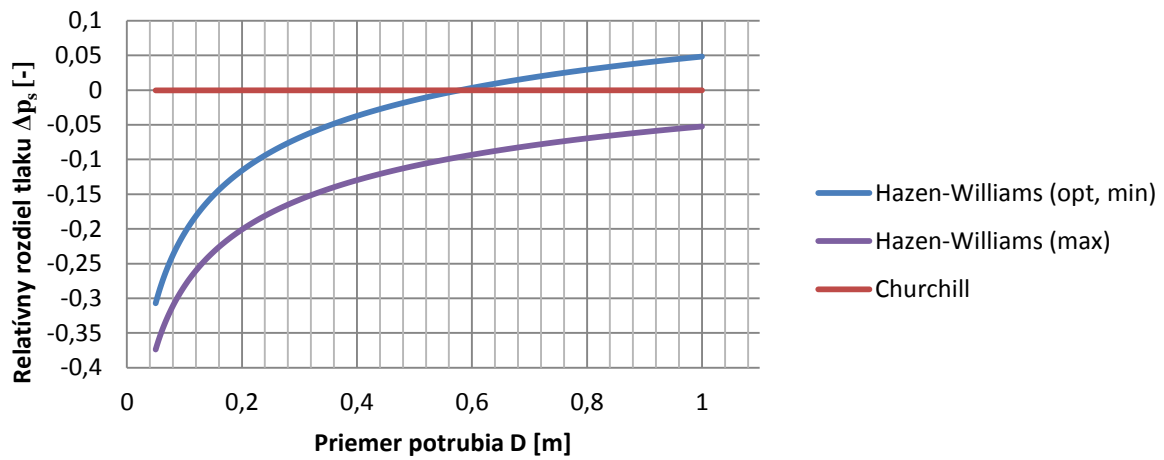
PRÍLOHA 3

VÝPOČET TLAKOVEJ STRATY HAZENOVOU-WILLIAMSOVOU METÓDOU



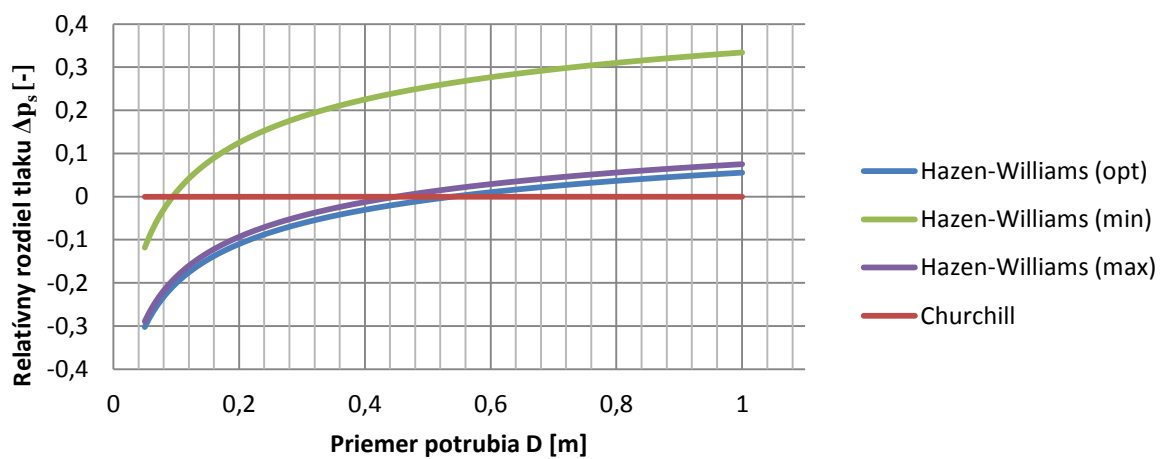
Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Hazena-Williamsa pre potrubie

L_{10}



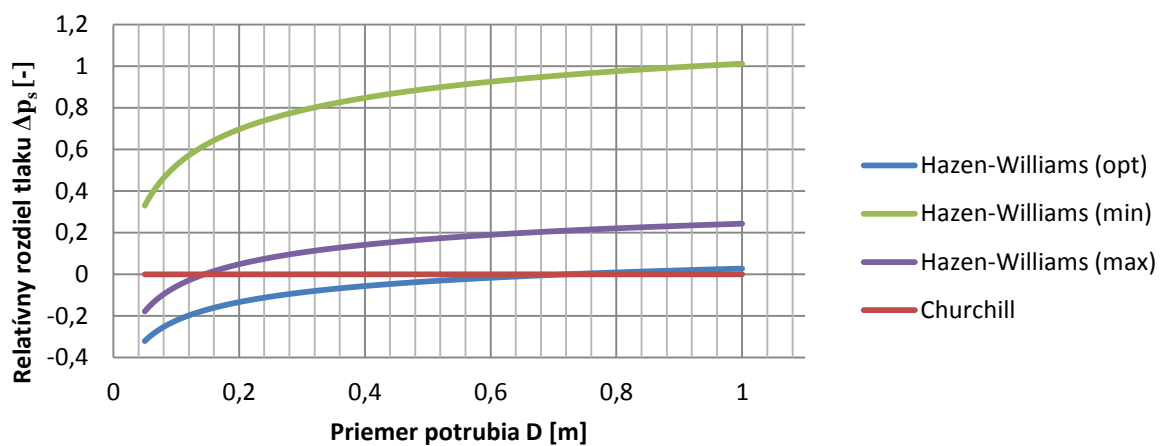
Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Hazena-Williamsa pre potrubie

L_{20}



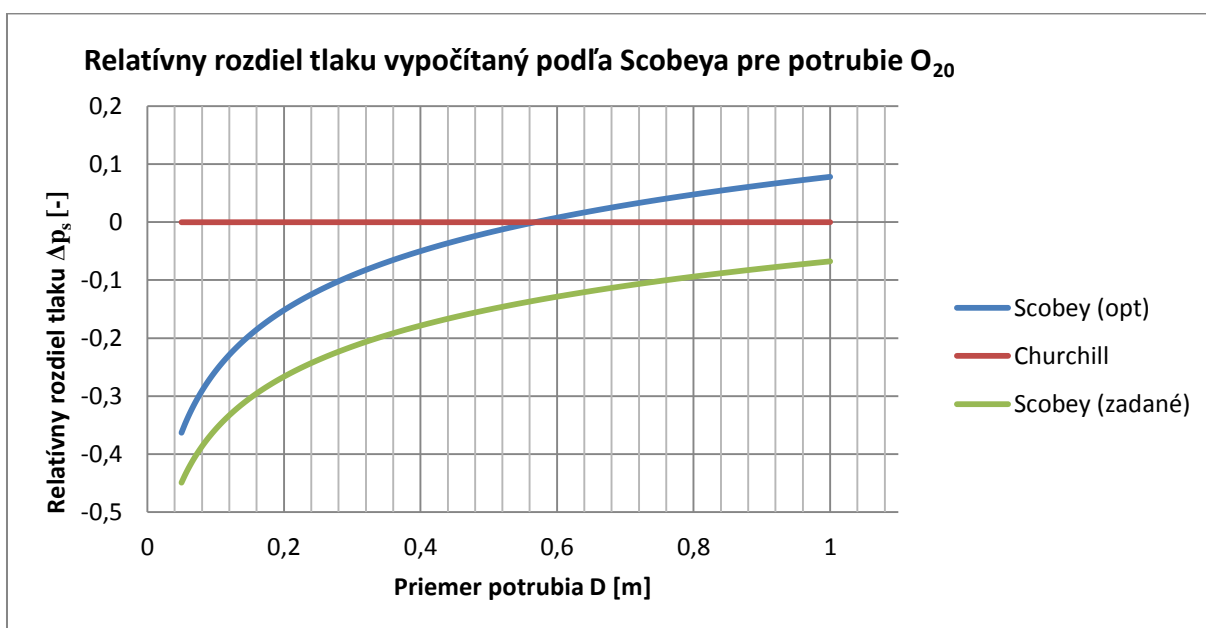
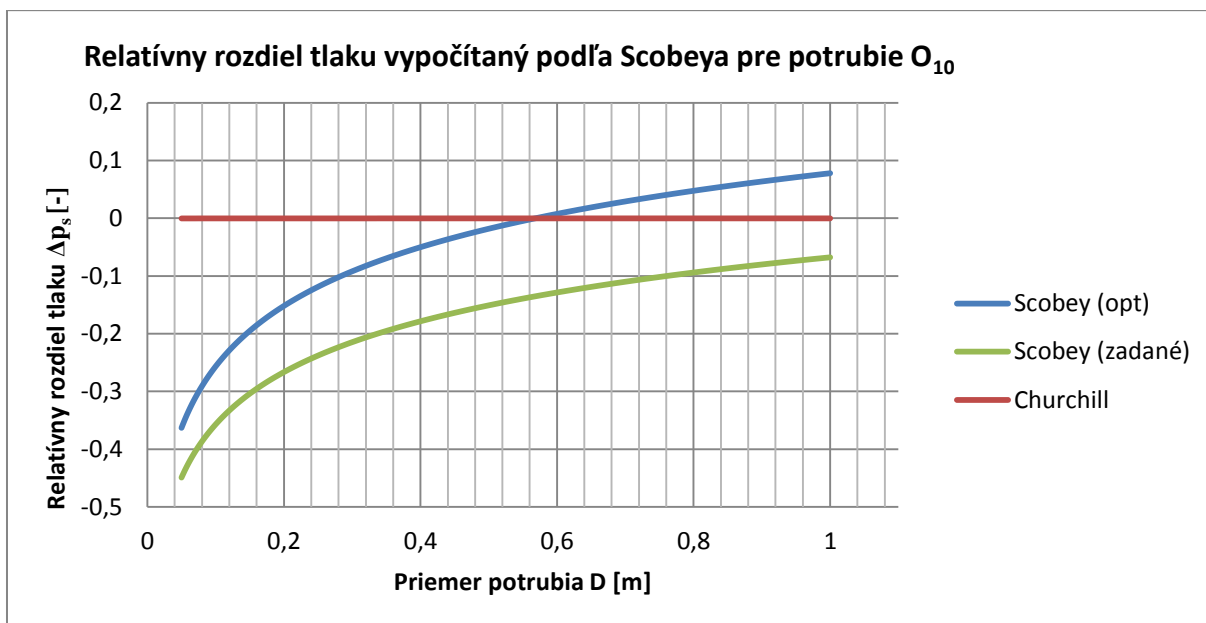
Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Hazena-Williamsa pre potrubie

L_{40}

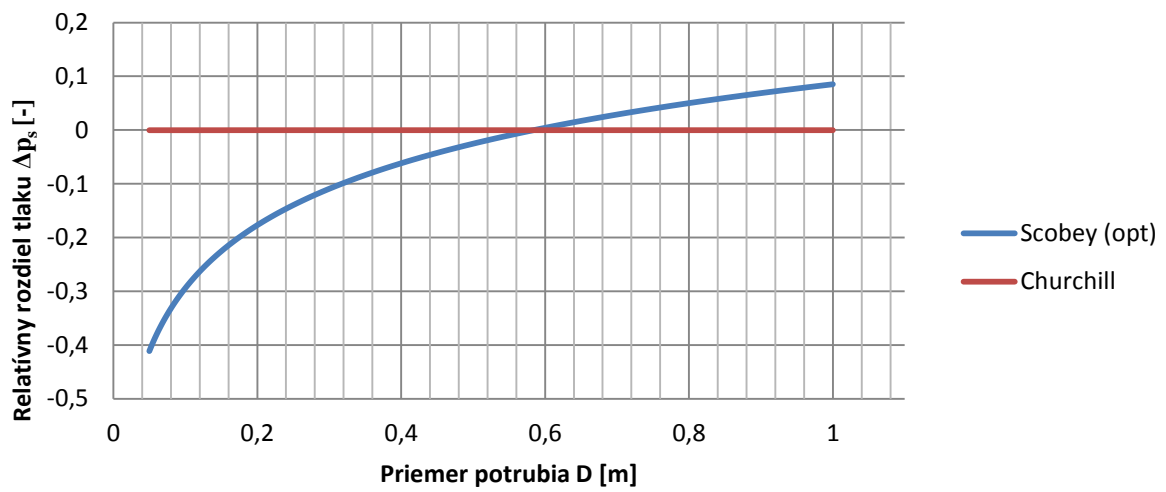


PRÍLOHA 4

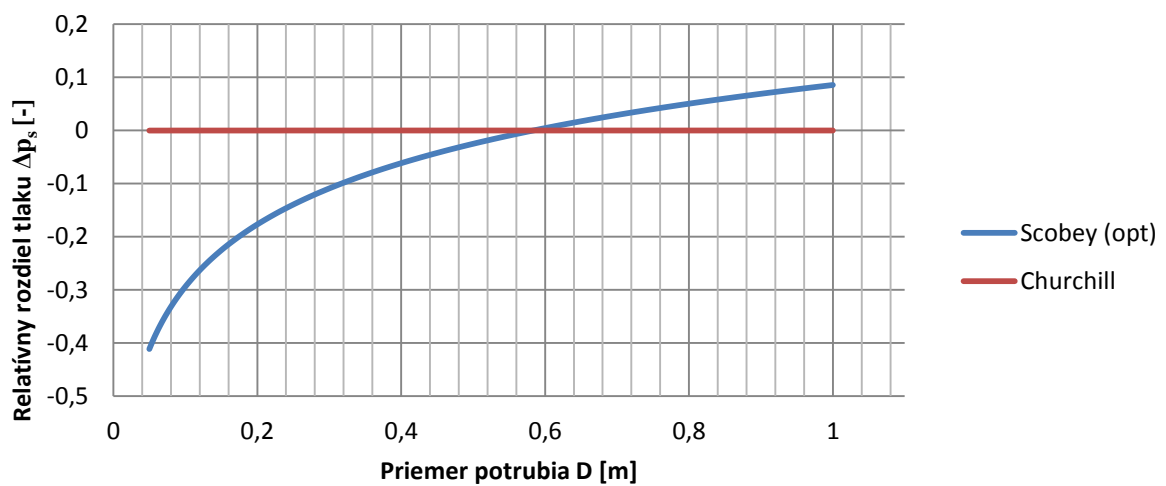
VÝPOČET TLAKOVEJ STRATY SCOBEOVOU METÓDOU



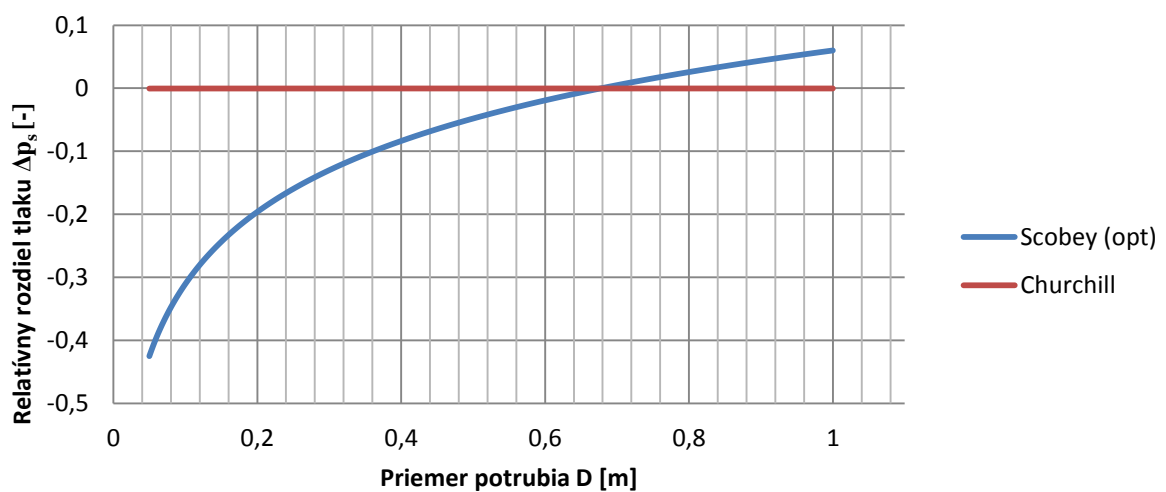
Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Scobeya pre potrubie L₁₀



Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Scobeya pre potrubie L₂₀

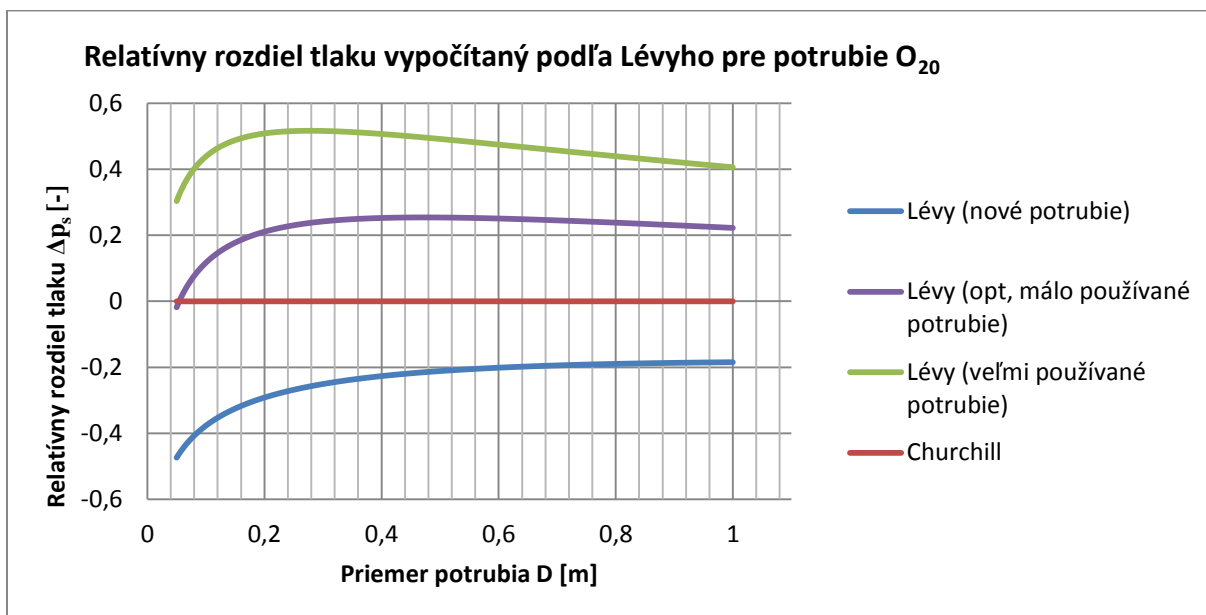
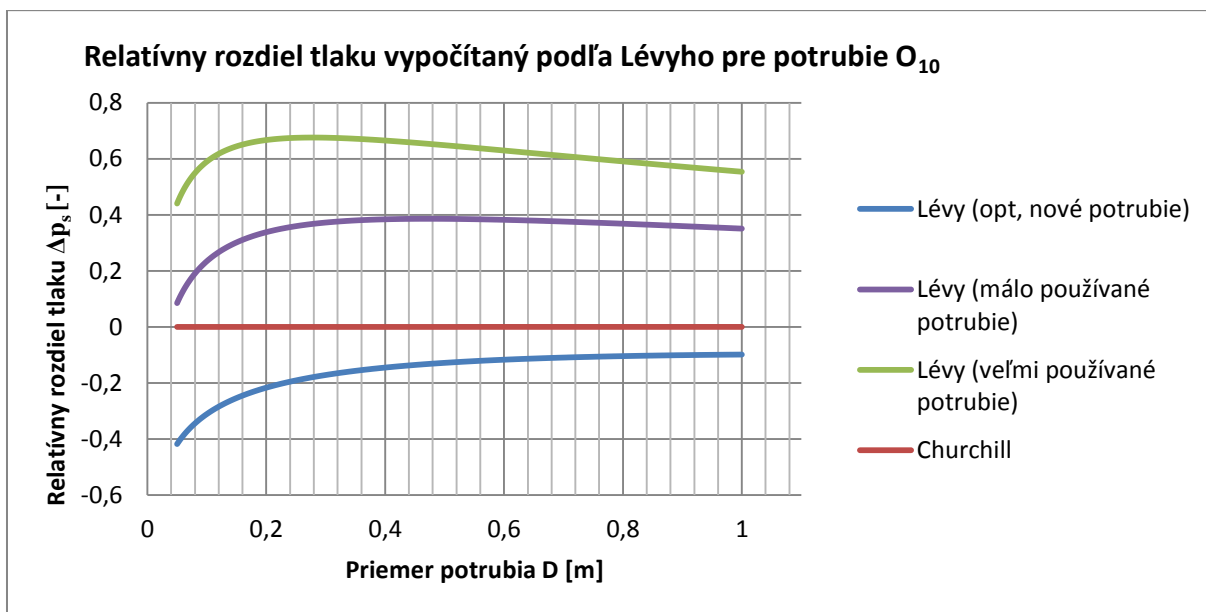


Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Scobeya pre potrubie L₄₀

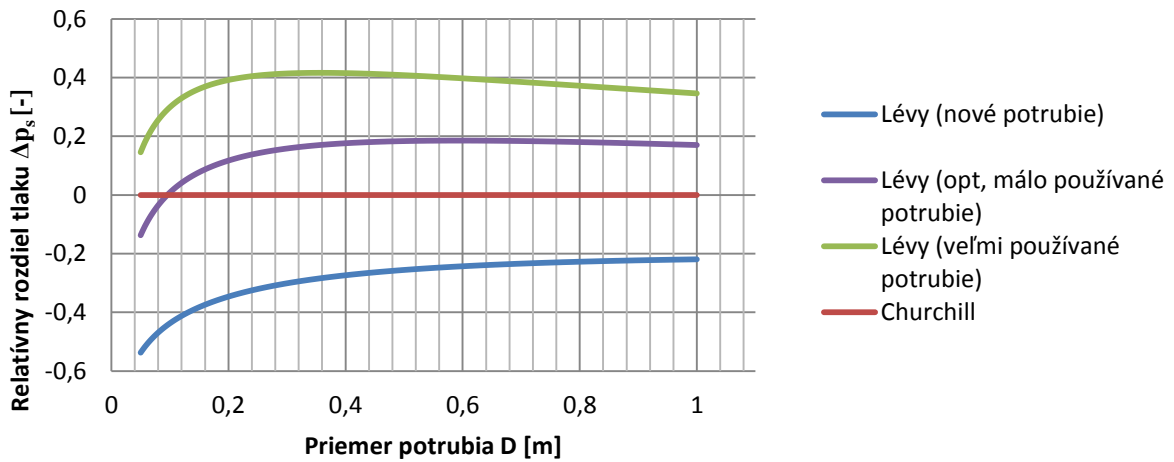


PRÍLOHA 5

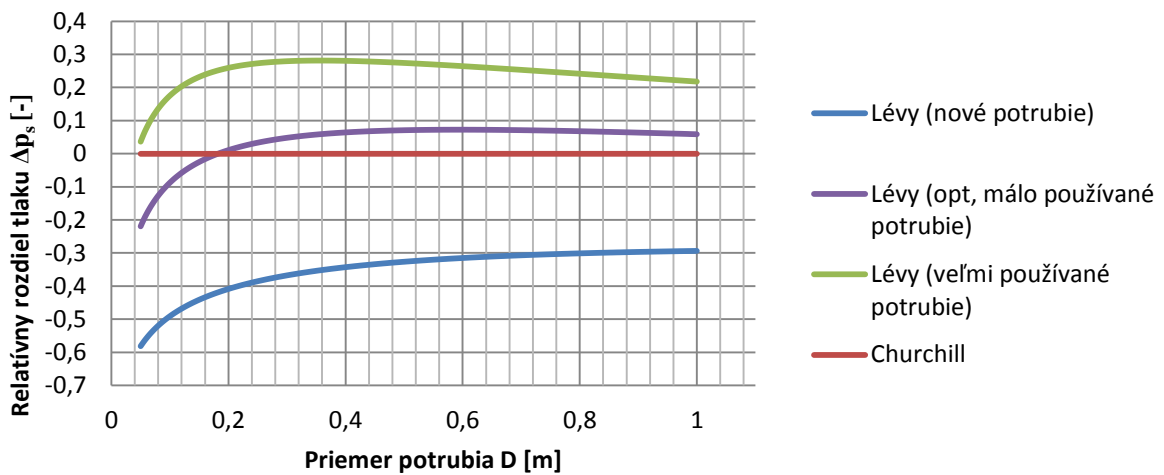
VÝPOČET TLAKOVEJ STRATY LÉVYHO METÓDOU



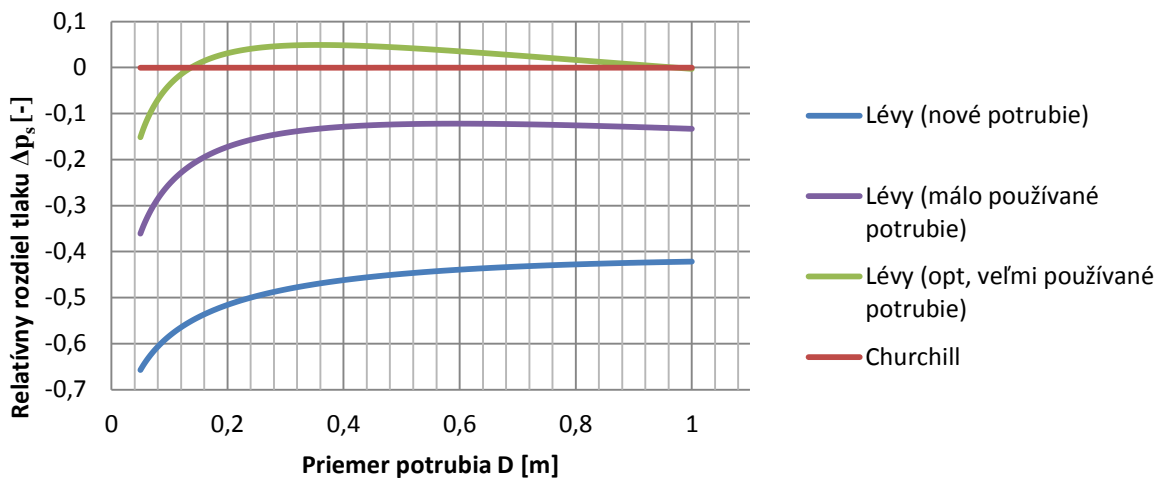
Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Lévyho pre potrubie L₁₀



Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Lévyho pre potrubie L₂₀

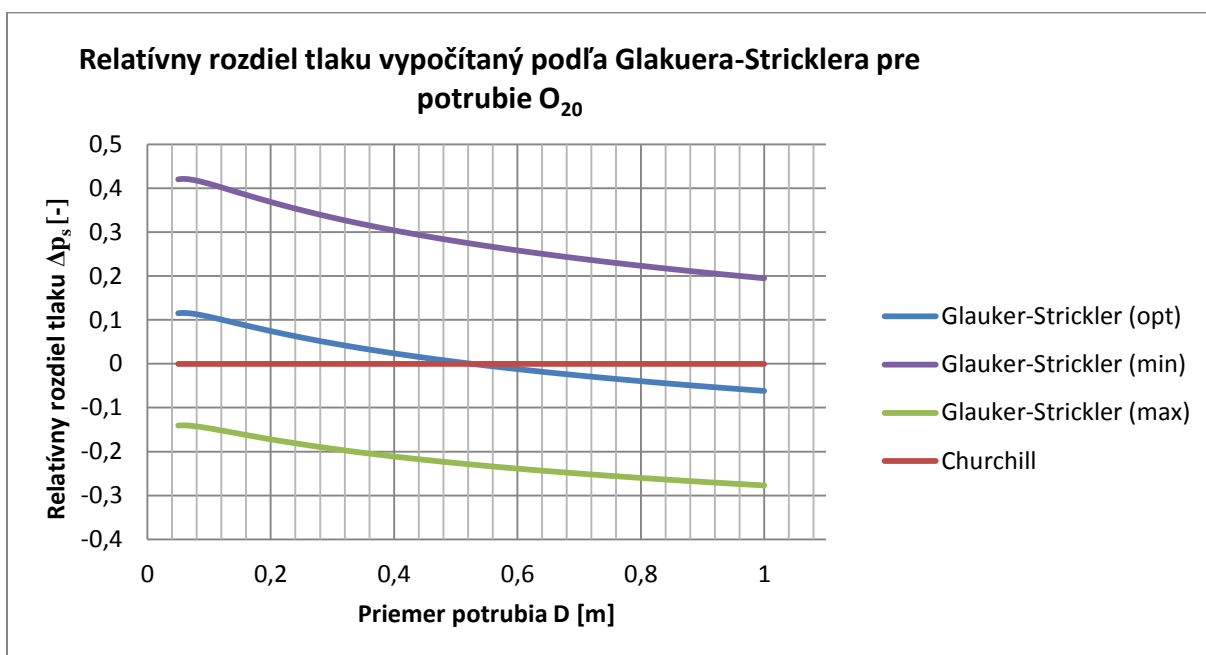
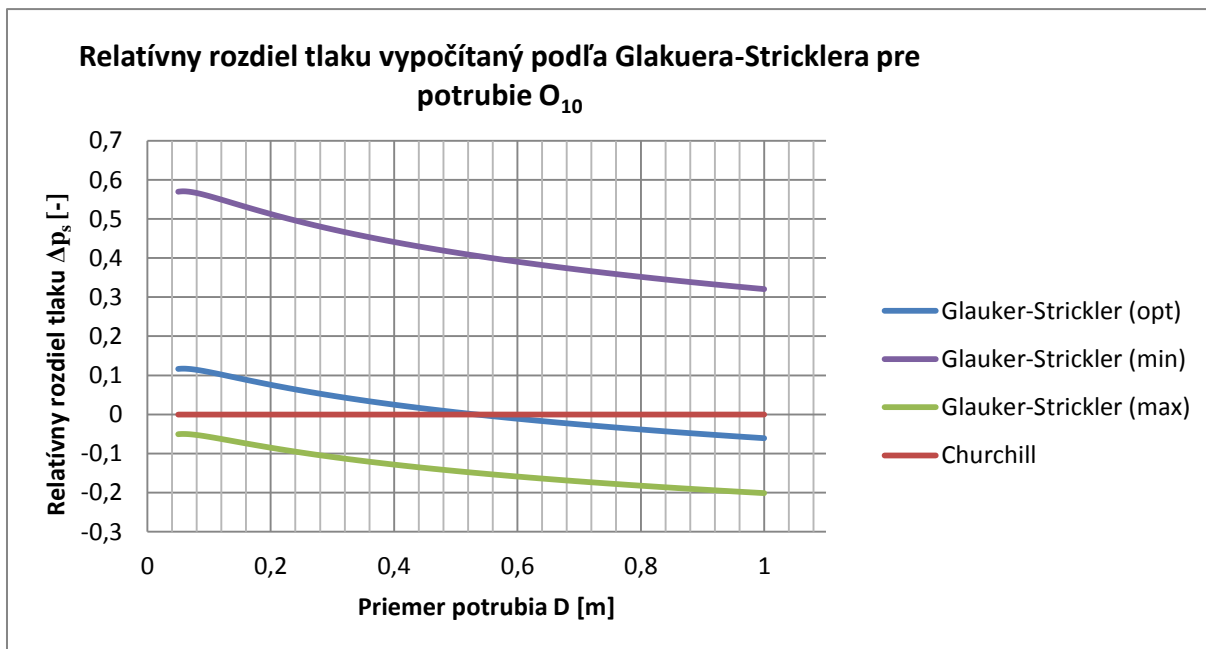


Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Lévyho pre potrubie L₄₀

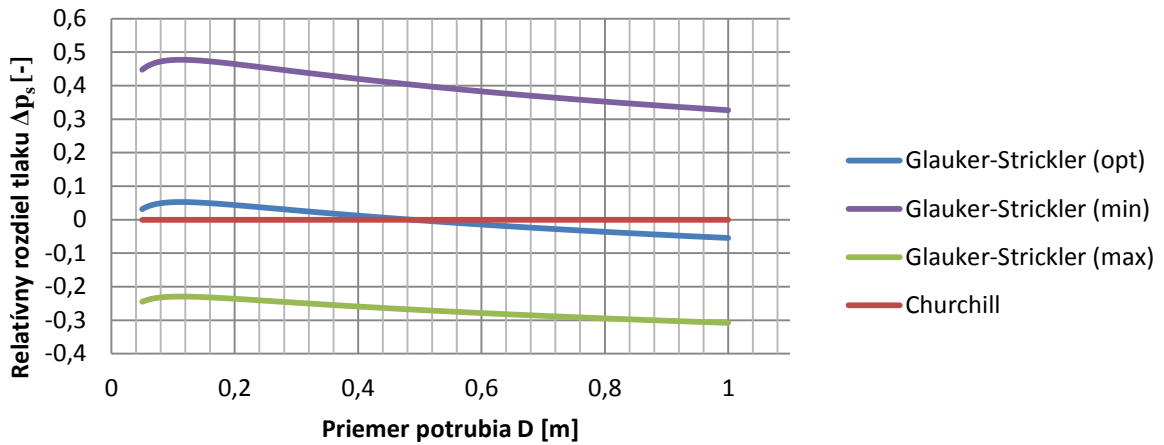


PRÍLOHA 6

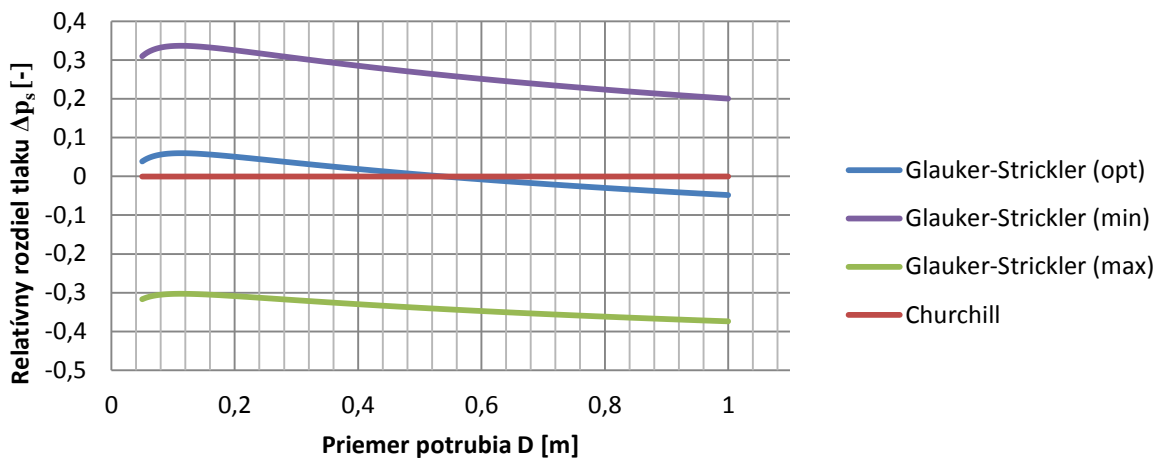
VÝPOČET TLAKOVEJ STRATY GLAUKEROVOU-STRICKLEROVOU METÓDOU



Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Glaukera-Stricklera pre potrubie L_{10}



Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Glaukera-Stricklera pre potrubie L_{20}



Relatívny rozdiel tlaku vypočítaný podľa Glaukera-Stricklera pre potrubie L_{40}

