

DISIPÁCIA MECHANICKEJ ENERGIE PRI TOKU TEKUTÍN V POTRUBÍ

Ciele práce

Pre danú časť potrubnej siete a ventilu určte nasledujúce závislosti a veličiny:

1. Závislosť súčiniteľa disipácie mechanickej energie trením λ od Re čísla.
2. Ekvivalentnú relatívnu drsnosť stien.
3. Závislosť súčiniteľa miestnej disipácie mechanickej energie ε_{dis} v danej armatúre od Re čísla.
4. Prietokovú charakteristiku ventilu.

Teoretická časť

Disipácia mechanickej energie trením

Pri prúdení tekutiny potrubnou sieťou sa časť jej mechanickej energie premení na teplo pôsobením trecích síl medzi tekutinou a stenami potrubia ako aj medzi samotnou tekutinou. Takýto jav nazývame disipácia mechanickej energie. Určenie veľkosti disipácie mechanickej energie je jednou z najdôležitejších úloh pri návrhu každej potrubnej siete. Veľkosť disipovanej energie závisí od rýchlosti prúdenia tekutiny, jej vlastností ako aj od kvality a tvaru steny potrubia, armatúry. Ak túto energiu vzťahujeme na jeden kilogram tekutiny, ktorá prejde cez daný úsek potrubia, dostaneme špecifickú disipáciu mechanickej energie ε_{dis} [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]

Za predpokladu ustáleného izotermického prúdenia tekutiny v rovných potrubíach kruhového prierezu môžeme ε_{dis} vyjadriť z bilancie mechanickej energie tekutiny:

$$\varepsilon_{dis} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (2.1)$$

kde ΔP – strata tlaku trením, [Pa]

ρ – hustota tekutiny, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Špecifickú disipáciu mechanickej energie môžeme zapísať aj ako násobok špecifickej kinetickej energie:

$$\varepsilon_{dis} = \lambda \frac{L}{d} \frac{w^2}{2} \quad (2.2)$$

Kde λ – súčiniteľ trenia, [-]

L – dĺžka potrubia, [m]

d – vnútorný priemer potrubia, [m]

w – priemerná rýchlosť prúdenia tekutiny v potrubí, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Zavedením rovnice (2.2) sa problém určenia disipácie mechanickej energie trením previedol na problém určenia hodnoty súčiniteľa trenia λ .

Pre súčiniteľ trenia pri **laminárnom prúdení** bol odvodený Darcy–Weisbachov vzťah:

$$\lambda = \frac{A}{Re} \quad (2.3)$$

kde Re je Reynoldsovo číslo definované vzťahom:

$$Re = \frac{d w \rho}{\mu} \quad (2.4)$$

a μ je dynamická viskozita, [Pa·s]

Hodnota bezrozmerného parametra A závisí od tvaru prierezu potrubia. Pre potrubie kruhového prierezu je $A = 64$.

Na výpočet súčiniteľa trenia v **turbulentnej oblasti** existuje viacero vzťahov. Rovnica, ktorú navrhol Chen, je doteraz z nich najpresnejšia a vyhovuje v širokom intervale hodnôt Re :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \log \left(\frac{n}{3,7065} - \frac{5,0452}{Re} \log \left(\frac{n^{1,1098}}{2,8257} - \frac{5,8506}{Re^{0,8981}} \right) \right) \quad (2.5)$$

kde n je relatívna drsnosť potrubia:

$$n = \frac{\varepsilon}{d} \quad (2.6)$$

a ε je ekvivalentná výška výstupkov a priehlbín steny potrubia, [m]

Hodnotu súčiniteľa trenia, či sa jedná o laminárne alebo turbulentné prúdenie, je možné určiť z experimentálnej závislosti $\lambda=f(Re, n)$, ktorú nájdeme pod názvom Moodyho diagram [15].

Z Moodyho diagramu [15] a z rovnice (2.5) je zrejmé, že na rozdiel od laminárnej oblasti prúdenia, v turbulentnej oblasti relatívna drsnosť potrubia n silne ovplyvňuje hodnotu súčiniteľa trenia λ .

Určenie relatívnej drsnosti potrubia. Pri veľkej turbulentii prúdu tekutiny (veľké hodnoty Re) je hrúbka laminárnej podvrstvy δ omnoho menšia ako ekvivalentná výška výstupkov steny potrubia ε . Súčasne to znamená, že laminárna podvrstva prakticky už nemá vplyv na disipáciu mechanickej energie, a teda disipácia energie nie je závislá od turbulencie prúdu (od Re), ale len od drsnosti potrubia n (automodelová oblasť). Dobré to vidieť z priebehu čiar v Moodyho diagrame [15].

Preto pre $Re \rightarrow \infty$ rovnica (2.5) nadobúda tvar:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \log \left(\frac{n}{3,7065} \right) = 2 \log \frac{1}{n} + 1,14 \quad (2.7)$$

Rovnica (2.7) je Kármánova rovnica pre úplne vyvinutý turbulentný tok v drsnom potrubí, platná pre

$$Re > \frac{764}{n} \left(\log \frac{3,7}{n} \right)^2$$

Rovnica (2.7) sa používa na určovanie relatívnej drsnosti n stien potrubí. Zmeria sa disipácia mechanickej energie ϵ_{dis} pri vyvinutom turbulentnom prúdení a pri známej priemernej rýchlosti prúdenia w sa z rovnice (2.2) vypočíta λ . Z rovnice (2.7) sa potom vypočíta relatívna drsnosť potrubia n .

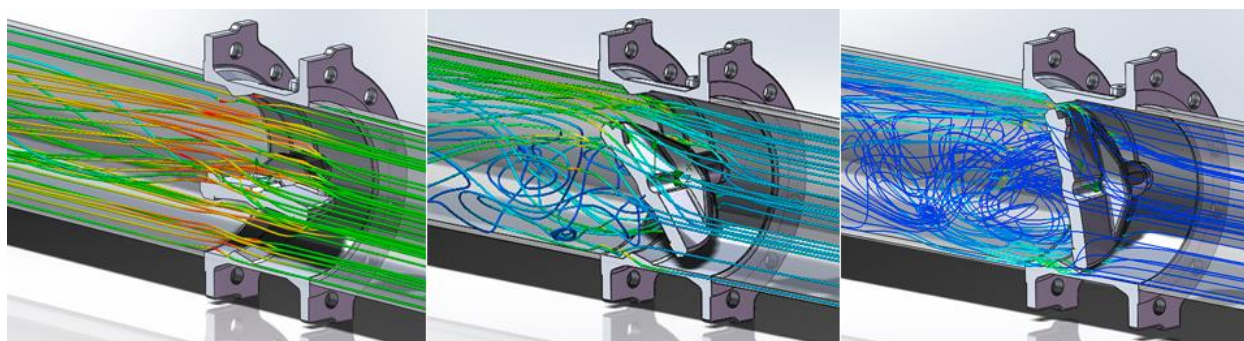
Miestna disipácia mechanickej energie vzniká tam, kde sa náhle mení rýchlostné pole t. j. menia sa gradienty rýchlosti a vzniká, resp. sa zväčšuje turbulencia. Mechanická energia sa v týchto miestach premieňa na vnútornú energiu pôsobením trecích síl. K tomuto javu dochádza v rôznych armatúrach potrubia (ventily, kolená, redukcie, odbočky a pod.), kde sa mení prierez toku. Špecifická miestna disipácia mechanickej energie $(\epsilon_m)_{dis}$ sa vyjadruje ako násobok špecifickej kinetickej energie:

$$(\epsilon_m)_{dis} = \frac{\Delta P_m}{\rho} = \xi \frac{w^2}{2} \quad (2.8)$$

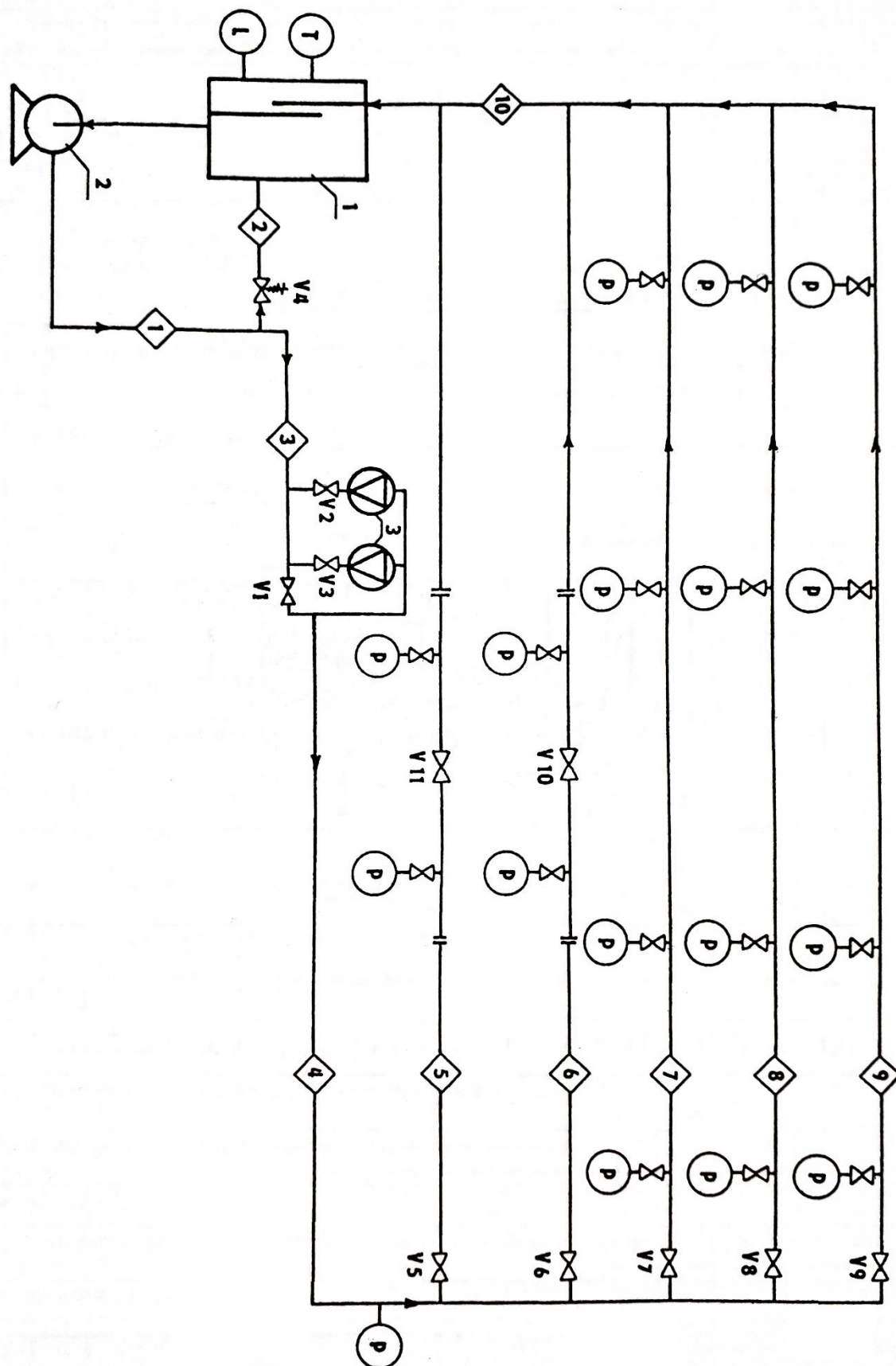
Kde ΔP_m – strata tlaku trením v armatúre, [Pa]

ξ – súčiniteľ miestneho odporu.

Tým sa problém určenia mernej miestnej disipácie mechanickej energie previedol na problém určenia súčiniteľa miestneho odporu. V literatúre sa uvádzajú priemerné hodnoty súčiniteľov miestneho odporu, ktoré sú platné pre celú skupinu podobných armatúr a zväčša pre turbulentné prúdenie. V prípade, že presnosť týchto hodnôt je nedostatočná, alebo ak ich treba určiť pre nové armatúry alebo špeciálne podmienky, obvykle sa určuje experimentálne. Zmeria sa miestna strata tlaku ΔP_m a rýchlosť prúdenia w a z rovnice (2.8) sa vypočíta hodnota súčiniteľa miestneho odporu.

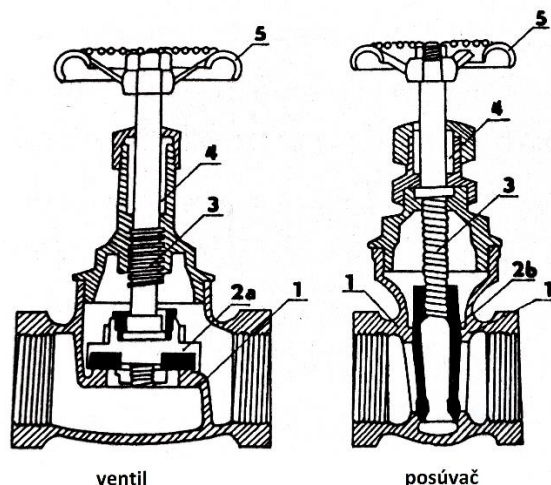


Obrázok 1. Zmena rýchlostného poľa pri prúdení tekutiny cez ventil



Obrázok 2. Schéma zariadenia

Schéma zariadenia je na obr. 2. Z nádrže 1 sa čerpadlom 2 dopravuje voda cez potrubnú sieť. Prietok vody sa reguluje niektorým z ventilov V2, V3 prípadne V1 a meria sa rotametrami 3. Voda preteká potrubiami č. 1, 3, 4, ďalej jedným z potrubí č. 5, 6, 7, 8, alebo 9 a vracia sa potrubím č. 10 do zásobnej nádrže 1. Rozdiel tlakov v zadaných úsekoch potrubí alebo armatúrach sa merajú elektronickými diferenčným tlakomerom. Tlakomer sa hadicami pripojí k odberom tlaku P. Teplota vody sa meria teplomerom T v nádrži 1.



Obrázok 3. Rez ventilom a posúvačom

1-sedlo ventilu alebo posúvača, 2a-kuželík ventilu, 2b-platnička posúvača, 3-závitovka, 4-upchávka, 5-koleso

ZADANIE PRÁCE

1. Zistíte závislosť hodnoty súčiniteľa disipácie mechanickej energie trením od Re čísla pre vetvu potrubia.....a úsek.....
2. Určte 100 (1 - α) %-ný interval spoľahlivosti nameranej závislosti $\lambda = f(Re)$ pre istoty $\alpha = \dots$
3. Určte hodnotu relatívnej drsnosti n potrubia zadaného v bode 1.
4. Porovnajete tri z nameraných hodnôt súčiniteľa disipácie mechanickej energie trením so zodpovedajúcimi hodnotami vypočítanými z rovnice (2.7) alebo (2.3).
5. Zistíte závislosť hodnoty súčiniteľa miestnej disipácie mechanickej energie od Re čísla vo vetve pre.....(ventil.....pri počte otočení ventilu o π).
6. Nameranú hodnotu súčiniteľa miestnej disipácie mechanickej energie porovnajete s hodnotami udávanými v literatúre.
7. Vypočítajte krajné chyby κ všetkých meraní veličín w , Re , λ , ξ . Vyberte veličinu, ktorú treba presnejšie merať aby sa zmenšila krajná chyba výsledku.
8. Vypočítajte disipáciu mechanickej energie za jednotku času, ku ktorej dochádza v danom úseku rovného potrubia a vo ventile pri najväčších meraných prietokoch vody.
9. Zmerajte a graficky zobrazte prietokovú charakteristiku ventilu V-10.

Pracovný postup

A. Príprava zariadenia na meranie

1. Podľa dokumentácie priloženej k zariadeniu skontrolujeme úplnosť zariadenia a príslušenstva. Oboznámime sa so zariadením podľa časti Opis zariadenia. Od vedúceho cvičenia si vyžiadame zadanie a súhlas na začatie merania.

2. Skontrolujeme stav vody v zariadení. V prípade nedostatku vody v nádrži 1 doplníme vodu až po hornú značku na stavoznaku nádrže.

3. Odvzdušnenie zariadenia. Pred začatím merania treba z celého potrubného systému odstrániť vzduch. Vzduchové bubliny a „vankúše“ zmenšujú prierez potrubia, ktorým preteká voda, a teda vytvárajú miestne odpory. Okrem toho v potrubíach a hadiciach manometrov zmenšujú priemernú hustotu tekutiny. V dôsledku toho ani pri nulovom prietoku vody potrubiami by neboli rozdiely tlakov v manometroch nulové. Na pokyn vedúceho cvičenia, vypínačom spustíme čerpadlo 2 a prepláchneme vodou tie potrubia, v ktorých máme namerať rozdiely tlakov. Urobíme to tak, že otvoríme uzatvárací ventil príslušného potrubia, t. j. jeden z ventilov V5 až V9 a otvorením ventilu V1, V2, resp V3 vpustíme vodu do potrubia. V prípade že sa má merať v potrubí č. 6, musí byť otvorený aj ventil V10. K miestam merania tlaku v zadanom úseku potrubia, alebo ventilu, alebo armatúry pripojíme manometre a otvoríme príslušné ventily. Pred meraním je však nevyhnutné aj každú pripojovaciu hadicu k tlakomeru úplne naplniť vodou tak, že sa prepláchne. Uzavrieme ventily V1, V2 a V3 a prekontrolujeme, či manometre boli dobre odvzdušnené. Ak potrubím nepreteká voda, rozdiel tlakov v tých manometroch, ktoré budeme používať, musí byť nulový. V opačnom prípade musíme odvzdušnenie potrubí a manometrov zopakovať.

4. Zapojenie potrubnej siete podľa zadania práce.

Nakreslíme schému potrubia. Osobitne zvýrazníme tie časti potrubia, ktorými musí prúdiť voda a odlíšime ventily, ktoré sú otvorené, od ventilov, ktoré musia byť uzavreté. Zapojenie musí byť také, aby voda pretekala len jedným z potrubí č. 5, 6, 7, 8 a 9.

B. Meranie

1. Zostavenie programu merania

Teplomerom T zmeriame teplotu vody na začiatku merania (t_1). Pokles tlaku pri toku kvapaliny potrubím alebo cez armatúry nameriame pri zadanom počte menších prietokov, ako je maximálne dosiahnuteľný prietok cez dané potrubie alebo armatúru. Maximálny prietok určíme tak, že pri spustenom čerpadle pomaly zväčšujeme prietok cez zvolené potrubie postupným otváraním ventilov V2 a V3 až dosiahneme maximálny prietok merateľný rotametrami 3. Hodnotu tohto prietoku určíme sčítaním prietokov indikovaných obidvoma rotametrami

2. Pri meraní disipácie mechanickej energie trením na rovnom potrubí č. 7, 8 alebo 9 nastavíme ventilmi V2 a V3 alebo zvolený prietok vody cez zadané potrubie. Údaje o prietoku vody V namerané rotametrami 3 a hodnoty poklesu tlaku ΔP v zadanom úseku potrubia zapisujeme do tab. 1. Na zistenie závislosti hodnôt súčiniteľa trenia λ od Re čísla vykonáme 10 meraní tlakovej straty pri rôznych objemových prietokoch vody. Tieto merania opakujeme ešte 4- krát, pričom nastavujeme rovnaké prietoky aké boli v prvej sérii meraní. Získame tak po 5 opakovaných meraní tlakovej straty pri každom prietoku. Prietoky rovnomerne zväčšujeme od najmenšieho (ešte merateľného), po najväčší dosiahnuteľný prietok. Teplomerom T zmeriame teplotu vody na konci merania

(t_2) a vypočítame jej strednú hodnotu t_s . Pri tejto teplote určíme viskozitu μ a hustotu vody ρ . Do tabuľky uvedieme aj údaje o zadanom potrubí a odhady krajných chýb merania alebo určenia jednotlivých veličín. Pri odhadoch krajných chýb sa riadime zásadami uvedenými v kap. I.

3. Pri meraní miestnej disipácie mechanickej energie na ventile alebo posúvači V10 alebo inej armatúre postupujeme podobne ako pri meraní disipácie energie trením opísanej predtým, len s rozdielom, že pred začatím merania nastavíme zadané otočenie ventilu, alebo vmontujeme zadanú armatúru do potrubia 5. Pritom bude stačiť, keď straty tlaku ΔP pri rôznych prietokoch V kvapaliny nameriame iba raz, bez opakovania. Pri meraní prietokovej charakteristiky regulačného ventilu zmeriame prietok kvapaliny cez tento ventil pri 10 rôznych hodnotách otočenia ventilu. Na meranie straty tlaku použijeme elektronické diferenčný manometer. Namerané údaje zapisujeme do tab. 2 a tab. 3.

C. Ukončenie merania

Vypneme motor čerpadla a uzavrieme ventily a kohúty

D. Bezpečnostné opatrenia Ak na zariadení vznikne porucha, okamžite vypneme motor čerpadla. Potom uzavrieme ventily a kohúty. Poruchu hlásime vedúcemu cvičenia.

SPRACOVANIE NAMERANÝCH ÚDAJOV

Disipácia mechanickej energie trením v rovnom potrubí č. 7, 8 alebo 9.

1. Nakreslíme schému potrubnej siete. Osobitne zvýrazníme tie potrubia, ktorými počas merania prúdila voda, a odlíšime ventily, ktoré boli otvorené, od ventilov, ktoré boli uzavreté.

2. Pre každú skupinu piatich opakovaných meraní tlakovej straty pri určitom nastavenom prietoku, uvedených v tab. 1, vypočítame aritmetický stred. Ďalej vypočítame strednú rýchlosť prúdenia w v potrubí č. 7, 8 alebo 9, z objemového prietoku odčítaného zo stupnice rotametra:

$$w = \frac{4\dot{V}}{\pi d^2} \quad (2.9)$$

kde d je priemer potrubia

Pre každé meranie vypočítame hodnotu Re čísla pre potrubie zo vzťahu (2.4) a súčiniteľ trenia λ zo vzťahu (2.2). Ďalej vypočítame krajné chyby κ_w a κ_{Re} , zo vzťahov pre rotameter

$$\kappa_w = \frac{\kappa_V}{\dot{V}} + 2 \frac{\kappa_d}{d} \quad (2.10)$$

$$\kappa_{Re} = Re \left(\frac{\kappa_d}{d} + \frac{\kappa_\mu}{\mu} + \frac{\kappa_\rho}{\rho} + \frac{\kappa_w}{w} \right) \quad (2.11)$$

Z priemerných hodnôt ΔP pri každom nastavenom prietoku $\dot{V}$ vypočítame tiež krajinú chybu súčiniteľa trenia κ_λ , podľa vzťahu

$$\kappa_{Re} = \lambda \left(\frac{\kappa_{\Delta P}}{\Delta P} + 2 \frac{\kappa_w}{w} + \frac{\kappa_d}{d} + \frac{\kappa_L}{L} + \frac{\kappa_\rho}{\rho} \right) \quad (2.12)$$

Vypočítané hodnoty veličín uvedieme v tab. 4 a v grafe zobrazíme závislosť $\lambda=f(Re)$. Stupnice na obidvoch osiach sú logaritmické.

3. Pre súbor 50 meraní určených hodnôt súčiniteľa trenia λ , rovnica (2.1) (2.2), vypočítame intervaly spoľahlivosti a zobrazíme ich na grafe závislosti $\lambda=f(Re)$. Tieto intervaly vypočítame pre každý z desiatich nastavovaných prietokov.

4. Ak je splnená podmienka platnosti rovnice (2.7), vypočítajte z nej hodnotu relatívnej drsnosti stien daného potrubia n pre hodnotu súčiniteľa trenia λ , nameranú pri najväčšom prietoku. Ak táto podmienka nie je splnená, vypočítajte relatívnu drsnosť z rovnice (2.6) pri najväčšom prietoku.

5. Pre tri prietoky tekutiny, ktoré sme nastavili pri meraní (najväčší, najmenší a niektorý zo stredu intervalu) vypočítame hodnoty λ z rovnice (2.6) alebo (2.3) a porovnáme ich s nameranými hodnotami. Výsledky uvedieme v tab. 6.

Miestna disipácia mechanickej energie vo ventile V10 alebo v armatúre.

6. Pre každé z 10 meraní uvedených v tab. 2 vypočítame strednú rýchlosť prúdenia w v potrubí č. 5 alebo 6, Re číslo a krajné chyby merania týchto veličín κ_w a κ_{Re} rovnakým spôsobom, ako je uvedené v bode 2. Vypočítame hodnotu súčiniteľa miestnej disipácie energie zo vzťahu (2.8). Krajnú chybu každého merania veličiny vypočítame zo vzťahu

$$\kappa_{\xi} = \xi \left(\frac{\kappa_{\Delta P_V}}{\Delta P_V} + 2 \frac{\kappa_w}{w} \right) \quad (2.13)$$

Vypočítané hodnoty veličín uvedieme v tab. 5 a v grafe zobrazíme závislosť $\xi=f(Re)$. Stupnice na obidvoch osiach sú logaritmické.

7. Vypočítame hodnotu váhového aritmetického streda nameraných hodnôt súčiniteľa miestnej disipácie ξ a porovnáme s hodnotou udávanou v [15] alebo v inej literatúre.

8. Vypočítame rýchlosť disipácie mechanickej energie

$$\frac{E_{dis}}{\tau} = \dot{V} \rho \varepsilon_{dis} \quad (2.14)$$

ku ktorej dochádza v danom úseku rovného potrubia alebo vo ventile, alebo v inej armatúre pri najväčších meraných prietokoch vody.

Zobrazíme nameranú prietokovú charakteristiku ventilu resp. posúvača ako závislosť objemového prietoku od otočenia ventilu, $\dot{V}=f(\text{otvorenia ventilu})$

Tabuľka 1 Záznam o meraniach disipácie mechanickej energie na rovnom potrubí č. v úseku

Počet meraní=		$L=$ m		$d=$ m			
$t_1=$ °C		$t_2=$ °C		$t_s=$ °C			
$\mu=$ Pa.s		$\rho=$ kgm ⁻³					
$\kappa_V=$ m ³ s ⁻¹		$\kappa_P=$ Pa		$\kappa_d=$ m			
$\kappa_\rho=$ kgm ⁻³		$\kappa_\mu=$ Pa.s		$\kappa_L=$ m			
Meranie	Rotameter $\dot{V}$ [m ³ s ⁻¹]	Potrubie ΔP [Pa]					
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

Tabuľka 2 Záznam o meraniach disipácie mechanickej energie vo ventile V10

Počet meraní=		Otvorenie ventila=	π	d =	m
t_1 =		t_2 =	$^{\circ}\text{C}$	t_s =	$^{\circ}\text{C}$
μ =		ρ =	kgm^{-3}		
κ_V =		κ_P =	Pa	κ_d =	m
κ_P =		kgm^{-3}			
Meranie	Rotameter $\dot{V} \text{ [m}^3\text{s}^{-1}\text{]}$	Ventil V10 ΔP_V [Pa]			
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Tabuľka 3 Záznam o meraní prietokovej charakteristiky ventilu V10

Meranie	Otvorenie ventilu π	Rotameter $\dot{V}$ [m ³ s ⁻¹]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Tabuľka 4 Hodnoty veličín vypočítaných z meraní na potrubí č. v úseku

	$L=$ m				$d=$ m						
Meranie	w [m.s ⁻¹]	κ_w [m.s ⁻¹]	Re	κ_{Re}	λ						κ_λ
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

Tabuľka 5 Hodnoty veličín vypočítaných z meraní vo ventile V10

	Otvorenie ventilu= π			$d=$ m		
Meranie	w [m.s ⁻¹]	κ_w [m.s ⁻¹]	Re	κ_{Re}	ξ	κ_ξ
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Tabuľka 6 Konečné výsledky meraní a výpočtov

Disipácia mechanickej energie trením						
Potrubie	Úsek	L [m]	D 10^3 [m]	t [°C]	ρ [kg.m ⁻³]	μ 10^3 [Pa.s]
Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt			Re	λ_{nam}	λ_{vyp}	δ [%]
Drsnosť potrubia			Relatívna drsnosť n	Výška výstupkov ε [m]	Namerané pri Re	$Re_{hraničné}$ pre rov. (2.7)
Rýchlosť disipácie mechanickej energie			Prietok V [m ³ .s ⁻¹]		Rýchlosť disipácie E_{dis}/τ [W]	
Miestna disipácia mechanickej energie						
Armatúra	otvorenie ventila [°]	d [m]	t [°C]	ρ [kg.m ⁻³]	μ [Pa.s]	
Porovnanie nameranej strednej hodnoty s hodnotou v literatúre			ξ_{nam}	ξ_{lit}	δ [%]	
Rýchlosť disipácie mechanickej energie			Prietok $\dot{V}$ [m ³ .s ⁻¹]		Rýchlosť disipácie E_{dis}/τ [W]	