

Meranie prietoku kvapalín

Cieľ práce:

Namerať na laboratórnom zariadení údaje, ktoré sú potrebné na určenie prietokov kvapalín vybranými zariadeniami: clona, dýza, venturimeter, rotameter. Na základe nameraných údajov určiť:

1. Kalibračnú krivku prietokomera, t. j. závislosť prietoku kvapaliny cez prietokomer od rozdielu tlakov pred a za prietokomerom, alebo od polohy plaváka rotametra.
2. Závislosť prietokového súčiniteľa α od charakteru prúdenia určeného Reynoldsovým číslom.
3. Disipáciu mechanickej energie v prietokomeri.

Teoretická časť

Meranie prietoku kvapalín môže byť priame a nepriame. Pri priamom meraní sa meria objem alebo hmotnosť kvapaliny, ktorá za určitý čas natečie do zásobnej nádrže s definovaným objemom, alebo možnosťou váženia. Tento postup nie je vždy možné realizovať či už z dôvodov bezpečnosti, alebo praktičnosti (hlavne v technológii, kde je potrebné merať a regulovať prietok tekutiny, vo všeobecnosti kvapaliny alebo plynu, si ťažko možno predstaviť prerušenie potrubia a merania objemu, alebo hmotnosti pretečenej tekutiny za určitý čas). Preto sa v praxi používa nepriame meranie prietoku tekutiny. Pri nepriamom spôsobe merania prietoku sa meria niektorá fyzikálna veličina, ktorá má súvis s prietokom tekutiny.

V minulosti sa najviac na meranie prietokov kvapalín používali prietokomery založené na vložení prekážky do toku kvapaliny. Vložením prekážky do toku tekutiny sa rýchlosť tekutiny v mieste prekážky zvýši a tým narastie aj kinetická energia tekutiny. Z bilancie mechanickej energie vyjadrenej Bernoulliho rovnicou vyplýva, že sa v horizontálnom potrubí musí znížiť tlaková energia a teda aj tlak tekutiny. Vo všeobecnosti môže byť prekážka pevná, alebo pohyblivá.

S vývojom techniky a technológie sa vyvinuli prietokomery, ktoré merajú prietok na základe zmeny niektorých fyzikálnych veličín napríklad vzniku napätia (indukčné prietokomery), rýchlosti šírenia sa zvuku (ultravukové prietokomery), zmeny teploty (termické prietokomery), vzniku vírov (vírové prietokomery), hmotnostného prietoku (Coriolisov hmotnostný prietokomer) a podobne.

Stručné charakteristiky:

Indukčné prietokomery pracujú na základe známeho fyzikálneho javu o elektromagnetickej indukcii. Pri prietoku kvapaliny cez prietokomer s budiacim magnetickým poľom dochádza medzi elektródami ku vzniku indukovaného napätia, ktoré je priamo úmerné rýchlosti prúdenia tekutiny. Používajú sa pre elektricky vodivé kvapaliny s vodivosťou od približne $1 \mu\text{S/cm}$,

napríklad: voda, odpadová voda, kal, kašovitá zmes, pasta, kyseliny, lúhy, nápoje, džúsy, ovocné šťavy, technologická voda, buničina, celulóza, vápenný kal, atď.

Ultrazvukové prietokomery pracujú na princípe porovnania času prechodu ultrazvuku v smere a proti smeru prúdenia tekutiny a preto sú schopné merať prietok kvapaliny bez ohľadu na zmeny ich fyzikálnych vlastností. Sú určené na meranie prietoku kvapalín v širokom teplotnom interval (od -40 do 150°C).

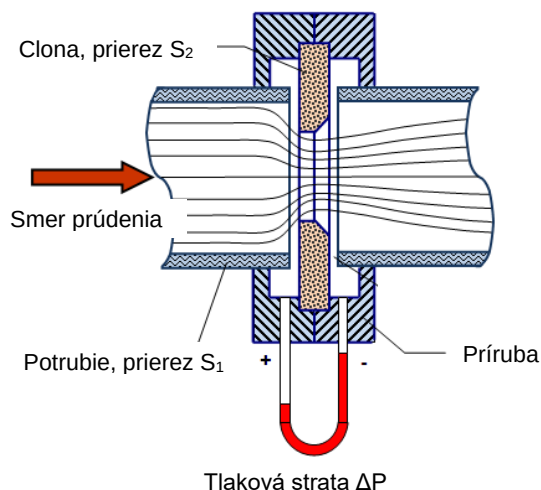
Vírové prietokomery pracujú na princípe Karmanovej vírovej trati, t.j. pri obtekaní prekážky sa na stranách prekážky vytvárajú víry, ktoré sú odnášané prúdením, pričom frekvencia ich uvoľňovania je úmerná strednej rýchlosti prúdenia (pre $Re > 3800$). Uvoľňovaním vírov sa vytvára podtlak, ktorý spôsobuje vychýľovanie senzora umiestneného za prekážkou. Senzor prietokomera prenáša pohyb na diferenčný kapacitný senzor, ktorý vytvára elektrické impulzy a tie sú merané. Sú vhodné na meranie objemových prietokov nasýtenej alebo prehriatej pary, plynov, vodivých i nevodivých kvapalín, meranie prietoku tlakového vzduchu.

Coriolisove hmotnostné prietokomery pracujú na princípe kontrolovaného vytvárania Coriolisových síl. Tie vznikajú v systéme, keď sa superponujú priamočiare a rotačné pohyby a sú úmerné zmene hmotnosti a teda aj hmotnostného prietoku. Meraná látka preteká dvomi paralelnými rúrkami, ktoré kmitajú v opačnej fáze. Coriolisovej sily vytvárané na rúrkach spôsobujú fázové posunutie kmitania. Bez prúdenia meranej látky kmitajú obe rúrky v rovnakej fáze, ale pri prietoku sa kmitanie rúrky na strane nátoky oneskoruje a na strane výtoky zrýchľuje. Fázový posun je úmerný hmotnostnému prietoku a sníma sa pomocou elektrodynamických snímačov na strane nátoky a výtoky. Tieto prietokomery sú určené pre presné a spoľahlivé meranie hmotnostného prietoku plynov, zmesí plynov, suspenzií, vodivých a nevodivých kvapalín, petrochemických produktov a ďalších médií, pretože sú nezávislé na teplote, tlaku, viskozite, vodivosti média.

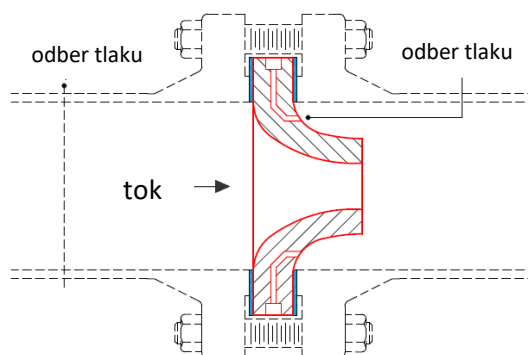
Termické prietokomery: Základným princípom je sledovanie ochladzovacieho efektu pretekajúceho plynu na dvoch termických snímačoch. Plyn, pretekajúci meracím úsekom, pôsobí na termické snímače, kde jeden funguje ako klasický teplomer a druhý je vo funkcii vyhrievača. Elektronika vyhodnocuje aktuálnu teplotu plynu a zároveň sa snaží udržiavať rovnakú teplotnú diferenciu medzi snímačmi. Čím je väčší hmotnostný prietok plynu, tým je výraznejší ochladzovací efekt a tým väčší prúd je potrebný na vyhriatie jedného snímača teploty, bežne Pt100. Meraný prúd je priamo úmerný hmotnostnému prietoku.

Meranie prietoku kvapaliny ak je prekážka v prúde nehybná

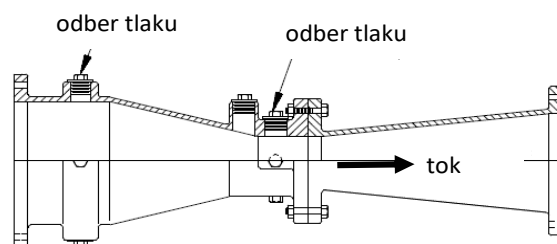
Pri tomto spôsobe zisťovania prietoku kvapaliny sa meria zmena tlaku v mieste prekážky a pred prekážkou. Na takomto princípe pracuje clona, dýza a venturimeter. Všetky prekážky sú kruhového tvaru rovnako ako potrubie. Na základe prierezu potrubia, voľného prierezu otvoru v mieste prekážky a nameranej zmeny tlaku možno vypočítať prietok kvapaliny cez otvor v prekážke.



Obrázok 3.1. Schéma clony



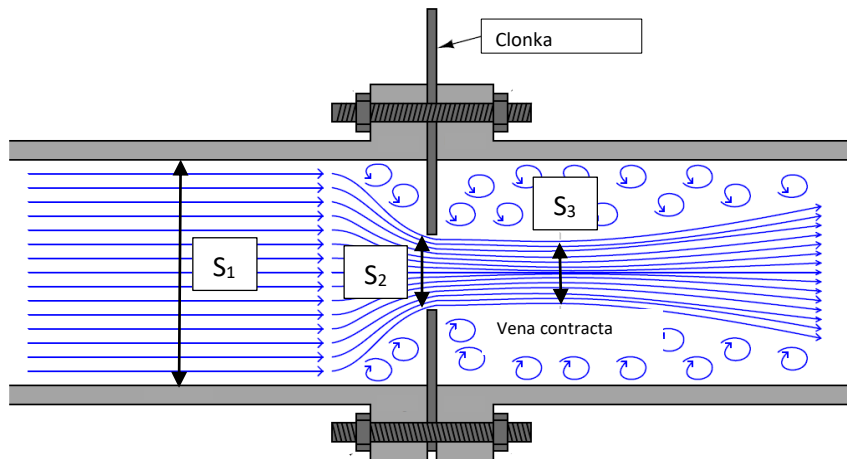
Obrázok 3.2. Schéma dýzy



Obrázok 3.3. Schéma venturimetra

Najčastejšie sa z uvedených prietokomerov používa clona. Clona je najjednoduchšie meracie zariadenie, má jednoduchú konštrukciu aj inštaláciu. Rýchlosť tekutiny v hrdle clony sa zväčší bez väčších strát energie. Keď sa však rýchlosť kvapaliny za clonou spomaľuje, mieša sa pritom s pomalšie prúdiacou tekutinou, za clonou vzniká intenzívna turbulencia a pritom sa väčšina nadbytočnej kinetickej energie premieňa na teplo (disipácia). Zvyčajne sa len 5 až 10% nadbytočnej kinetickej energie premení na tlakovú energiu. Preto je zmenšenie tlaku na clonke veľké, čo je výhoda pri malých prietokoch (citlivosť na zmenu prietoku), ale pri veľkých prietokoch to môže byť významná nevýhoda.

Plocha prierezu sa znižuje z prierezu potrubia S_1 na S_2 v otvore clonky a na S_3 v mieste najväčšieho zúženia (*vena contracta*) ako je to znázornené na Obrázku 3.4.



Obrázok 3.4. Prúdenie v clone

Plochu prierezu vo “*vena contracta*” S_3 možno vzhľadom na prierez clonky vyjadriť pomocou vzťahu:

$$c_c = \frac{S_3}{S_2} \quad (3.1.)$$

kde c_c je koeficient kontrakcie prúdu kvapaliny. Bilancia mechanickej energie ideálnej tekutiny, ktorá nekoná prácu má tvar

$$\frac{w_1^2}{2a_1} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{w_2^2}{2a_2} + \frac{P_2}{\rho} \quad (3.2.)$$

Z rovnice kontinuity a bilancie mechanickej energie bol odvodený pre horizontálne umiestnenú clonu vzťah pre prietok kvapaliny clonou. Z praktického hľadiska je jednoduchšie uvažovať miesto 2 v priereze clony ako vo “*vena contracta*”. Vyjadrením w_1 z rovnice kontinuity pre nestlačiteľnú tekutinu dostaneme pre rýchlosť prúdenia v otvore clonky vzťah:

$$w_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4 \right]}} \quad (3.3.)$$

kde w_2 je rýchlosť prúdenia v clonke, m.s^{-1} ,

P_1 je tlak v priereze potrubia S_1 pred prekážkou, Pa

P_2 je tlak v priereze clonky, Pa

ρ je hustota tekutiny, kg.m^{-3} .

Ak sa však v reálnej tekutine zohľadní disipácia mechanickej energie pri prietoku clonkou, kontrakcia prúdu za otvorom clony (v priereze S_3 je rýchlosť vyššia ako v S_2), tlak P_2 sa nemeria

presne v otvore clonky ale o niečo ďalej a rozdelenie rýchlosti v prúde tekutiny (súčiniteľ α_i pri kinetickom člene v Bernoulliho rovnici), možno rovnicu (3.3) zapísať v tvare:

$$w_2 = c \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4 \right]}} \quad (3.3a.)$$

resp. pre hmotnostný prietok kvapaliny možno napísať:

$$\dot{m} = c \cdot S_2 \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_3)} \quad (3.4.)$$

kde c je korekčný factor, alebo bezrozmerový prietokový súčiniteľ, ktorý pri podrobnejšej analýze možno vyjadriť nasledovne:

$$c = c_{dis} c_c \sqrt{\frac{\alpha_2}{1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \left(c_c \frac{S_2}{S_1} \right)^2}} \quad (3.5.)$$

kde c_{dis} je súčiniteľ disipácie mechanickej energie v clone,

c_c je súčiniteľ kontrakcie v clone,

α_1, α_2 sú konštanty zo vzťahov pre kinetickú energiu prúdu.

Pri danej konštrukcii zúženia a jeho umiestnení v potrubí sa prietokový súčiniteľ vyjadruje ako funkcia Re čísla toku v potrubí a bezrozmerového zúženia potrubia d_2/d_1

$$c = f\left(Re_1, \frac{d_2}{d_1}\right) \quad (3.6)$$

kde d_1 a d_2 sú priemery potrubia a otvoru prietokomera.

Vo vzťahu (3.6) je $Re_1 = \frac{d_1 w_1 \rho}{\mu}$

w_1 je rýchlosť tekutiny v potrubí, $m \cdot s^{-1}$

μ je dynamická viskozita tekutiny, $Pa \cdot s$.

Z konštrukcie prietokomerov na obr. 3.1. až 3.3. je zrejmé, že k najväčšej miestnej disipácii mechanickej energie a k zmenám prierezu prúdu zotrvačnosťou tekutiny dochádza v clone, menšia je v dýze a najmenšia vo venturimetri. Preto aj prietokový súčiniteľ c , bude mať pre clonu najmenšie a pre venturimeter najväčšie hodnoty.

Vzťahy (3.1.) až (3.3.) platia nielen pre clonu, ale aj pre dýzu a venturimeter. Prietokový súčiniteľ c je funkciou Re čísla a jeho hodnota sa môže meniť so zmenou prietoku tekutiny. Za týchto podmienok je určenie prietoku pomocou nameranej zmeny tlaku ($P_1 - P_3$) z rovnice (3.4.) nepohodlné a nepresné. Na odstránenie tejto nevýhody sa používajú prietokomery zostrojené

podľa normy STN. Tie sú skonštruované tak, že v predpokladanom rozsahu prietokov tekutiny je hodnota prietokového súčiniteľa c konštantná a známa.

V prípade, že nie je možné pre dané podmienky skonštruovať prietokomer podľa normy, či už pre veľký rozsah prietokov alebo preto, že potrubie kde sa má nainštalovať nespĺňa podmienky predpísané normou, je potrebné hodnoty prietokového súčiniteľa namerať a vyjadriť ako závislosť od bezrozmerného čísla Re_1 .

Iná možnosť je namerať závislosť objemového prietoku $\dot{V}$ od zmeny tlaku (P_1-P_2). V takom prípade je vhodné túto závislosť upraviť na bezrozmerný (kriteriálny) tvar [1].

Veličiny, ktoré opisujú tok tekutiny prietokomermi sú: (P_1-P_2), $\dot{V}$, ρ , μ , d_1 , d_2 . Rozmerovou analýzou možno získať kriteriálnu závislosť:

$$f\left(\frac{\dot{V}\rho}{\mu d_1}, \frac{(P_1-P_2)d_1^2\rho}{\mu^2}, \frac{d_2}{d_1}\right) = 0 \quad (3.8.)$$

Ktorú možno zapísať aj ako funkciu:

$$f\left(Re_1, EuRe_1^2, \frac{d_2}{d_1}\right) = 0 \quad (3.9.)$$

Pre určitý prietokomer v určitom potrubí je hodnota d_2/d_1 daná a konštantná. Medzi zostávajúcimi dvoma premennými predpokladáme mocninovú závislosť:

$$Re_1 = a (Eu \cdot Re_1^2)^b \quad (3.10.)$$

kde
$$Eu = \frac{(P_1-P_2)}{\rho w_1^2}$$

w_1 je stredná rýchlosť tekutiny v clone, $m.s^{-1}$

$$P_1-P_2 = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

Δh – rozdiel hladín zvislého kvapalinového U manometra,

a , b – parametre, ktoré sa pre daný prietokomer vypočítajú napríklad metódou najmenších štvorcov z nameraných hodnôt Re_1 a $(Eu \cdot Re_1^2)$ (pozri úvodnú kapitolu).

Tento spôsob hodnotenia nameraných údajov je výhodný pri aplikácii rovnakej clony na inú tekutinu, ako bola clona kalibrovaná, prípadne na nenormovanú clonu. Na základe objemových prietokov nameraných pri kalibrácii sa vypočítajú hodnoty Re čísla a z nameraných rozdielov tlakov (P_1-P_2) sa vypočítajú hodnoty

$$Eu \cdot Re_1^2 = \frac{\dot{V}^2 \rho^2 (P_1 - P_2) d_1^4}{\mu^2 d_1^2 \rho \dot{V}^2} = \frac{(P_1 - P_2) d_1^2 \rho}{\mu^2} \quad (3.11)$$

Tak sa získajú súradnice bodov bezrozmernovej kalibračnej závislosti clony pre danú kvapalinu.

Pri meraní prietokov rôznych tekutín takto nakalibrovanou clonou, ktorá nespĺňa normu sa potom z nameraného rozdielu tlakov P_1-P_2 vypočíta hodnota kritéria $Eu \cdot Re_1^2$ a z kalibračnej závislosti sa odčíta hodnota Re_1 . Z nej sa vypočíta objemový prietok pretekajúcej tekutiny.

Meranie prietoku kvapaliny ak je prekážka v prúde pohyblivá

Prekážka v prúde tekutiny sa pohybuje tak, že ňou vyvolané zvýšenie rýchlosti tekutiny a teda aj jej kinetickej energie, je stále a nemení sa so zmenou prietoku. Súčasne to znamená, že sa nezmení ani rozdiel tlaku pred prekážkou a tlaku v mieste prekážky.

Rotameter je meracie zariadenie v ktorom je prekážkou voľne nadnášané teleso (plavák) vo vertikálnom kanáli so zväčšujúcim sa prierezom smerom nahor. Pretože efektívna tiaž plaváka (rozdiel tiaž mínus vztlak) sa nemení, plavák zotrúva v takom priereze kanálu, kde je rozdiel tlakov, ktorý vyvolá, konštantný (nezávislý od prietoku). Ináč povedané, keď sa ustáli rovnováha síl pôsobiach na plavák. Z polohy plaváka sa určuje objemový prietok tekutiny.



Obr. 3.5. Schéma rotametru s vyznačením síl pôsobiach na plavák a príklad reálneho zariadenia.

V prípade rotametru je veľmi často kanálom kónická rúrka kruhového prierezu a teda aj teleso tvoriace prekážku je kruhového prierezu. Na výpočet objemového prietoku $\dot{V}$ bol odvodený vzťah, ktorý vychádza z bilancie mechanickej energie [1].

$$\dot{V} = c_r S_a \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot V_s (\rho_s - \rho)}{S_s \rho}} \quad (3.12.)$$

kde:

c_r je prietokový súčiniteľ,

S_a – plocha prierezu medzikružia (štrbiny) medzi plavákom a stenou rúrky, m^2 ,

V_s objem plaváka, m^3 ,

S_s – prierez plaváka, m^2 ,

D_s – priemer plaváka, m

ρ_s hustota materiálu plaváka, kg.m^{-3} ,

ρ - hustota kvapaliny, kg.m^{-3} ,

Hodnota prietokového súčiniteľa c_r závisí of Reynoldsovho čísla pre prúdenie tekutiny medzikružím tvoreným stenou rúrky a plavákom ako aj od tvaru plaváka.

$$c_r = f(Re_a) \quad (3.13)$$

kde Re_a je Reynoldsovo číslo pre prúdenie tekutiny medzikružím a jeho hodnota sa počíta z ekvivalentného priemeru medzikružia.

Rotametre sa často konštruujú tak, aby hodnota prietokového súčiniteľa c_r bola konštantná v čo najširšom rozsahu prietokov. Pre konštantné c_r je pre určitý rotameter a určitú tekutinu objemový prietok len funkciou prierezu medzikružia

$$S_a = \frac{\pi}{4} (d_r^2 - d_s^2)$$

d_r je priemer rúrky kónického rotametra a je funkciou polohy plaváka h

$$d_r = f(h) \quad (3.14)$$

Pri dostatočne presne vyrobenej rúrke rotametra možno funkciu (3.14) určiť len z nameraného horného a dolného priemeru rúrky.

Ak hodnota c_r nie je konštantná v celom predpokladanom rozsahu prietokov tekutiny, zvyčajne je najvýhodnejšie rotameter “nakalibrovať”, t. j. namerať závislosť medzi objemovým prietokom a polohou plaváka.

$$\dot{V} = f(h)$$

ZADANIE PRÁCE

1. Pre clonu priemeru $d_2 = 0,02$ m, cez ktorú preteká voda:
Zistite závislosť prietokového súčiniteľa α_c od Re čísla. Závislosť znázorníte graficky.
Zistite interval konštantnosti prietokového súčiniteľa α_c .
Namerajte závislosť objemového prietoku $\dot{V}$ od rozdielu hladín Δh_c U–manometra pripojeného k clone. Závislosť znázorníte graficky.
Vypočítajte parametre a , b v rovnici (3.10).
Prepočítajte nameranú kalibračnú krivku pre tok brómbenzénu pri teplote 18°C .
Vypočítajte hodnotu disipácie mechanickej energie v clone pri najväčšom nameranom prietoku.
2. Pre dýzu priemeru $d_2 = 0,02$ m, cez ktorú preteká voda:
Zistite závislosť prietokového súčiniteľa α_d od Re čísla. Závislosť znázorníte graficky.
Zistite interval konštantnosti prietokového súčiniteľa α_d .
Namerajte závislosť objemového prietoku $\dot{V}$ od rozdielu hladín Δh_d U–manometra pripojeného k dýze. Závislosť znázorníte graficky.
Vypočítajte parametre a , b rovnice (3.10).
Prepočítajte nameranú kalibračnú krivku pre tok brómbenzénu pri teplote 18°C .

Vypočítajte hodnotu disipácie mechanickej energie v dýze pri najväčšom nameranom prietoku.

3. Pre venturimeter s priemerom hrdla $d_2 = 0,021$ m, cez ktorý preteká voda:
Zistite závislosť prietokového súčiniteľa α_v od Re čísla. Závislosť znázornite graficky.
Zistite interval konštantnosti prietokového súčiniteľa α_v .
Namerajte závislosť objemového prietoku $\dot{V}$ od rozdielu hladín Δh_v U-manometra pripojeného k venturimetru. Závislosť znázornite graficky.
Vypočítajte parametre a , b v rovnici (3.10).
Prepočítajte nameranú kalibračnú krivku pre tok brómbenzénu pri teplote 25°C.
Vypočítajte hodnotu disipácie mechanickej energie vo venturimetri pri najväčšom nameranom prietoku.
4. Pre rotameter s priemerom plaváka $d_s = 0,0435$ m, s hustotou materiálu plaváka $\rho_s = 8325$ kg.m⁻³, s objemom plaváka $V_s = 4,74 \cdot 10^{-5}$ m³ a so závislosťou priemeru rúrky d_r v m, od polohy plaváka h v m v tvare $d_r = 0,051 \cdot h + 0,044$ cez ktorý preteká voda:
Zistite závislosť prietokového súčiniteľa α_r od Re čísla. Závislosť znázornite graficky.
Určte interval konštantnosti prietokového súčiniteľa α_r .
Namerajte závislosť objemového prietoku $\dot{V}$ od polohy plaváka rotametra. Závislosť znázornite graficky.
Vypočítajte hodnotu disipácie mechanickej energie v rotometri pri najväčšom nameranom prietoku.

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

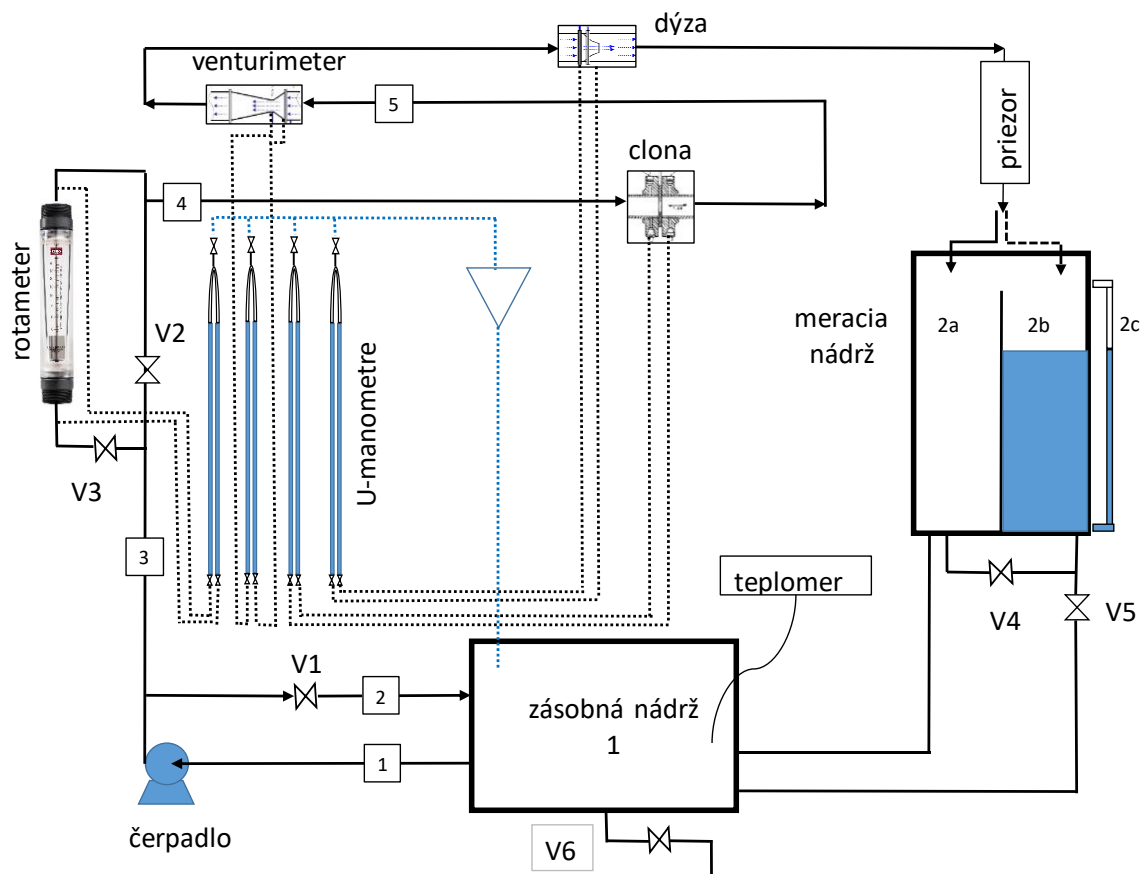
Opis zariadenia

Schéma zariadenia je na obrázku 3.6. Zo zásobnej nádrže (1) sa voda dopravuje čerpadlom cez potrubnú sieť k meracím zariadeniam. Požadovaný prietok vody sa nastavuje ventilom V_1 na vetve 2 (ventilom V_1 sa redukuje prietok vody v recirkulačnom potrubí a zvyšuje sa prietok do potrubnej siete). Voda môže prúdiť cez clonu, venturimeter a dýzu, cez otvorený ventil V_2 pri zatvorení ventilu V_3 , prípadne sa do potrubnej siete zapojí aj rotameter otvorením ventilu V_3 a zatvorením ventilu V_2 . Cez potrubnú sieť sa voda dostane do meracej nádrže (2) na priame meranie prietoku vody (2b) a vracia sa do zásobnej nádrže (1). V prípade, že sa nemeria prietok vody, tak voda preteká časťou 2a meracej nádrže do zásobnej nádrže (ventil V_4 je uzatvorený). Meracia nádrž je vybavená stavoznakom. Teplota vody sa meria v zásobnej nádrži. Sklenený priezor slúži na kontrolu prietoku vody, prípadne na kontrolu prítomnosti vzduchových bublín v systéme. U-manometrami sa meria zmena tlaku vody v rotometri, venturimetri, dýze a clone.

Pracovný postup

A. Príprava zariadenia na meranie

1. **Skontrolujeme úplnosť zariadenia** podľa dokumentácie priloženej k zariadeniu. Zoznámime sa so zariadením podľa Opisu zariadenia. Od vedúceho cvičenia si vypýtame súhlas na začatie merania.
2. **Skontrolujeme stav hladiny vody v zásobnej nádrži**. Ak nie je vody dosť, doplníme ju po súhlase vedúceho cvičenia.



Obrázok 3.6. Schéma zariadenia

3. **Odvzdušnenie zariadenia.** Pred začatím merania je potrebné zariadenie odvzdušniť, teda naplniť vodou tak, aby v ňom neboli vzduchové bubliny a vzduchové “vankúše”, ktoré sa v potrubí správajú ako miestne odpory (zmenšenie prierezu potrubia) a v ramenách U-manometra, prípadne v prírodných hadiciach zmenšujú priemernú hustotu stĺpca kvapaliny. Dôsledkom prítomnosti vzduchu v systéme nie je v U-manometroch nulový rozdiel hladín meracej kvapaliny ani pri nulovom prietoku vody. Skontrolujeme, či sú ventily V1, V2, V3 vo výtlačnom potrubí zatvorené. Od vedúceho cvičenia si vyžiadame súhlas na zapnutie čerpadla. Vypínačom (je umiestnený na stĺpe pri práci číslo 3) zapneme čerpadlo a postupne otvárame ventil V1, čo umožní cirkuláciu vody “na krátko” (by pass). Otváraním ventilov V2, V3 umožníme vode prúdiť v potrubnej sieti a jej prietok zvyšujeme uzatváraním ventilu V1. Vodu necháme prúdiť systémom a kontrolujeme priezor, či sa tam ešte objavujú bubliny. Prietok vody systémom zmenšíme otváraním ventilu V1. Dbáme na to, aby sa zariadenie nezavzdušnilo, teda sledujeme, či je v priezore stále voda. Odvzdušníme tie U-manometre aj s prírodnými hadicami, ktoré budeme pri práci podľa zadania používať. Odvzdušnenie U-manometrov sa robí pri zníženom prietoku vody v systéme tak, že sa postupne preplachujú jednotlivé ramená U-manometra otvorením príslušného ventilu v hornej časti U-manometra. Voda sa vypúšťa cez hadičku do zberného lievika spojeného so zásobnou nádržou. Odvzdušnenie je ukončené, keď hadičkou už neprechádzajú vzduchové bubliny. Hladiny vody v U-manometri nastavíme približne do polovice výšky rúrky. Použijeme pritom balónik, ktorý nasadíme na hadičku v hornej časti U-manometra. Pri zníženom prietoku vody v systéme, otvorených kohútov v spodnej časti U-manometra, otvoríme kohút v hornej časti a vzduchovým balónikom natlačíme vzduch do U-manometra tak, aby hladiny boli približne v polovici stupnice. Potom kohút na hlave

U-manometra uzatvoríme. To, či bol potrubný systém aj U-manometre dobre odvzdušnený skontrolujeme tak, že uzavrieme ventily V_2 a V_3 a skontrolujeme, či je nulový rozdiel hladín meracej kvapaliny v ramenách U-manometrov. Ak hladiny nie sú vyrovnané, process odvzdušnenia musíme zopakovať.

4. **Zapojenie potrubnej siete podľa zadania práce.** Potrubnú sieť zapojíme tak, aby sa súčasne dalo merať na zadaných prietokomeroch.

B. Meranie

Na určenie závislostí prietokových súčiniteľov α od Re , resp. c_r od Re a závislostí objemových prietokov od zmeny tlaku alebo polohy plaváka rotametra, vykonáme najmenej 15 meraní pri rôznych objemových prietokoch vody. Prietoky rovnomerene zvyšujeme od najmenšieho merateľného až po najvyšší dosiahnuteľný prietok. Pri clone, dýze a venturimetri je najmenší prietok rovný nule a najväčší dosiahnuteľný prietok je daný najväčším merateľným rozdielom výšok hladín U-manometrov. Pri rotometri udáva rozsah prietokov rozsah jeho stupnice.

Zostavenie programu merania

Prietok vody v systéme cez obidva zadané prietokomery zvyšujeme zatváraním ventilu V_1 . Hornú hranicu prietoku vody sme dosiahli vtedy, keď rozdiel výšok hladín meracej kvapaliny v niektorom z U-manometrov dosiahol maximálnu merateľnú výšku, alebo je plavák rotametra v hornej polohe, prípadne, že sa prietok vody nedá zvyšovať preto, že je ventil V_1 úplne zatvorený. Takto zistený maximálny rozdiel hladín v U-manometroch rozdelíme na 15 hodnôt. Pri meraní postupujeme od najmenej hodnoty rozdielu hladín po maximálnu a zapisujeme namerané hodnoty do pripravených tabuliek.

Postup merania

Pri zapnutom čerpadle nastavíme ventilom V_1 taký prietok vody, aby bol vo vybranom U-manometri požadovaný rozdiel hladín Δh . Nastavenú hodnotu odčítame pred meraním a po meraní príslušného prietoku, ($\Delta h_{1c,d,v,r}$, $\Delta h_{2c,d,v,r}$). Pri meraní na rotometri zapisujeme aj polohu plaváka pred a po meraní príslušného prietoku (h_1 , h_2). Prietok vody obidvoma zadanými prietokomermi súčasne určíme priamym meraním prietoku tak, že zmeriame objem natečenej vody v meracej nádrži 2b za čas zmeraný stopkami. Presmerovanie prúdenia vody do meracej nádrže sa robí manuálne otočným ramenom potrubia na privode vody do meracej nádrže. Objem vody V pritečenej do nádrže zistíme z rozdielu výšok hladín indikovaných stavoznakom na začiatku a konci merania (počas merania objemu sú ventily V_4 , V_5 zatvorené. Ventily sa otvoria pri vypúšťaní vody z meracej nádrže do zásobnej nádrže 1. Takto zmeriame všetkých 15 prietokov a príslušných meraných veličín. Namerané údaje zapíšeme do tabuľky meraných údajov (Tabuľka 3.1. alebo 3.2.).

Pri meraní je dôležité merať veličiny čo najpresnejšie (pozri úvodnú kapitolu). Preto je potrebné odhadnúť vhodný objem natečený do meracej nádrže, aby čas merania bol dostatočne dlhý a tým minimalizovať chybu merania.

Teplotu vody cirkulujúcu v systéme zmeriame teplomerom na začiatku aj na konci merania a pri výpočtoch fyzikálnych vlastností použijeme strednú hodnotu.

C. Ukončenie merania

Otvoríme ventil V_1 a vypneme motor čerpadla.

D. Bezpečnostné opatrenia

V prípade, že na zariadení vznikne porucha, vypneme motor čerpadla. Potom uzavrieme ventily a kohúty. Poruchu nahlásime vedúcemu cvičenia.

SPRACOVANIE NAMERANÝCH ÚDAJOV

1. Nakreslíme schému potrubnej siete s vyznačením smeru prúdenia vody. Označíme ventily, ktorými voda prúdi.
2. Pre každé z meraní vypočítame nasledovné hodnoty veličín a parametrov:
hodnotu objemového prietoku určenú z meraného objemu a meraného času $\dot{V} = V/\tau$

$$\text{Reynoldsovo číslo pre prúdenie v potrubí } Re_1 = \frac{4\dot{V}\rho}{\pi\mu d_1}$$

Strednú hodnotu rozdielu výšok hladín v manometri $\Delta h_{c,d,v}$ resp. polohy plaváka rotametru h_r a zmenu tlaku tekutiny v danom prietokomere

$$\Delta P_{c,v,d} = \Delta h_{c,d,v,r} \rho \cdot g$$

$$\text{Hodnotu bezrozmerového kritéria } Eu \cdot Re_1^2 = \frac{\rho d_1^2 \Delta P_{c,v,d}}{\mu^2}$$

$$\dot{m} = c \cdot S_2 \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)}$$

Hodnoty prietokových (korekčných) súčiniteľov pre obidva prietokomery, vypočítame podľa rovnice (3.4.)

$$c_{c,d,v} = \frac{\dot{V}\rho}{S_2 \sqrt{2 \rho (P_1 - P_2)}}$$

resp. podľa rovnice (3.13)

$$c_r = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} (d_r^2 - d_s^2) \sqrt{\frac{2gV_s(\rho_s - \rho)}{\frac{\pi}{4} d_s^2 \rho}}}$$

3. Pre obidva prietokomery určíme interval hodnôt Reynoldsových čísel, v ktorých sú hodnoty prietokového súčiniteľa c , resp. c_r konštantné.
4. Vypočítame relatívnu odchýlku desiateho merania objemového prietoku, δ_v tak, že porovnáme hodnotu nameranú s hodnotou vypočítanou zo vzťahov 3.4. alebo 3.13. pre už známe c , resp. c_r .
5. Pre clonu, dýzu alebo venturimeter vypočítame hodnoty parametrov a , b v rovnici 3.10.
6. Na základe nameraných hodnôt Re_1 a ($Eu \cdot Re_1^2$) pre vodu pri podmienkach merania (teplota vody – ρ , μ) prepočítajte kalibračný graf pre clonu, dýzu, alebo venturimeter pre tok brómbenzénu pri teplote 18°C cez prietokomer nasledovne:

[illegible]

Tabuľka 3.4. Konečné výsledky meraní a výpočtov

Zadanie práce			
T °C	ρ kg.m ⁻³	μ Pa.s	d ₁ m
$\dot{V}$ m ³ .s ⁻¹	d _s m	ρ_s kg.m ⁻³	d _r =.....h _r +..... m
Prietokomer			
d ₂ /m			
Interval hodnôt α , resp. c _r			
Hodnota α resp. c _r je konštantná v interval Re ₁ , resp. Re _a čísiel			
Relatívna odchýlka 10teho merania objemového prietoku δ_v /%			
Maximálna nameraná hodnota $\dot{V}$ /m ³ .s ⁻¹			
Maximálna nameraná hodnota ΔP_{strat} /Pa			
Ročná disipácia energie E _{dis} /kWh			

DISKUSIA A ZÁVER

V diskusii k práci uvedenej v protokole je potrebné zhodnotiť namerané údaje a ich spracovanie. Diskusiu je potrebné viesť v duchu teoretického základu pre meranie prietoku a kalibrácie prietokokmerov. Je potrebné zhodnotiť presnosť získaných závislostí, resp. grafov. Rovnako je potrebné zhodnotiť význam oblastí konštantnosti prietokových súčiniteľov.

Zo záveru práce musí byť zrejmé čo bolo cieľom práce, v akej miere sa ho podarilo dosiahnuť, čo spôsobovalo najväčšie problémy pri meraní a vyhodnotení a ako sa získané výsledky zhodujú s teoretickými poznatkami o meraní prietoku tekutín priamou aj nepriamymi metódami.

Literatúra

[1] Kossaczky E., Surový J., Chemické inžinierstvo I., Alfa, SNTL, Bratislava, 1972

Kontrolné otázky

Princíp priameho a nepriameho merania prietoku kvapalín

Opíšte činnosť prietokomerov zo zadania

Merané veličiny, ich jednotky a spôsob ich merania

Vzťahy na určenie prietoku kvapaliny v danom prietokomere pre reálne kvapaliny.

Čo reprezentuje korekčný faktor, resp. súčiniteľ prúdenia.

To, čo nám indikuje U-manometer na clone, dýze resp. venturimetri je rozdiel tlakov alebo strata tlaku.