

5. Мерење температуре флуида

Температура представља једну од основних величина стања флуида.

Струјном температуром дефинише се температура коју има неко тело, које се креће потпуно изједначеном брзином са флуидом, без губитака топлоте зрачењем.

У пракси је немогуће измерити струјну температуру чак и када би се сонда кретала заједно са флуидом, јер ма какав облик имала температурска сонда, уроњена у флуид, она производи локалне сметње, услед чега се појављује различито релативно струјање између детектора температурске сонде и струје, које проузрокује променљиву температуру флуида у близини сонде.

Тотална температура одређује се на основу већ изведеног израза за струјање у адијабатским условима

$$T_t = T + \frac{c^2}{2c_p} = T + T_{din}$$

где су: T_t - тотална (зауоставна), T - струјна и T_{din} - динамичка температура.

Присуство сонде за мерење температуре у струји ремети струјање, ствара локалне сметње. Најачи утицај је у близини сонде тако да сонда не мери температуру T_t већ неку нижу температуру T_p (температура пробе, сонде). Узрок овоме одступању је:

- утицај граничног слоја – несавршен пренос топлоте конвекцијом са струје на детектор сонде, рад смицања у граничном слоју,
- губитак топлоте кондукцијом (провођење топлоте) кроз држач сонде,
- губитак топлоте зрачењем од сонде на околину или обрнуто од околине на њу.

Аналитичким путем тешко је утврдити одступање T_p од T_t , па се то изводи експерименталним путем.

Корекциони фактор (фактор успостављања) температурске сонде дефинише се као однос

$$K_T = \frac{T_p - T}{T_t - T}$$

и он се одређује калибрацијом.

Односно

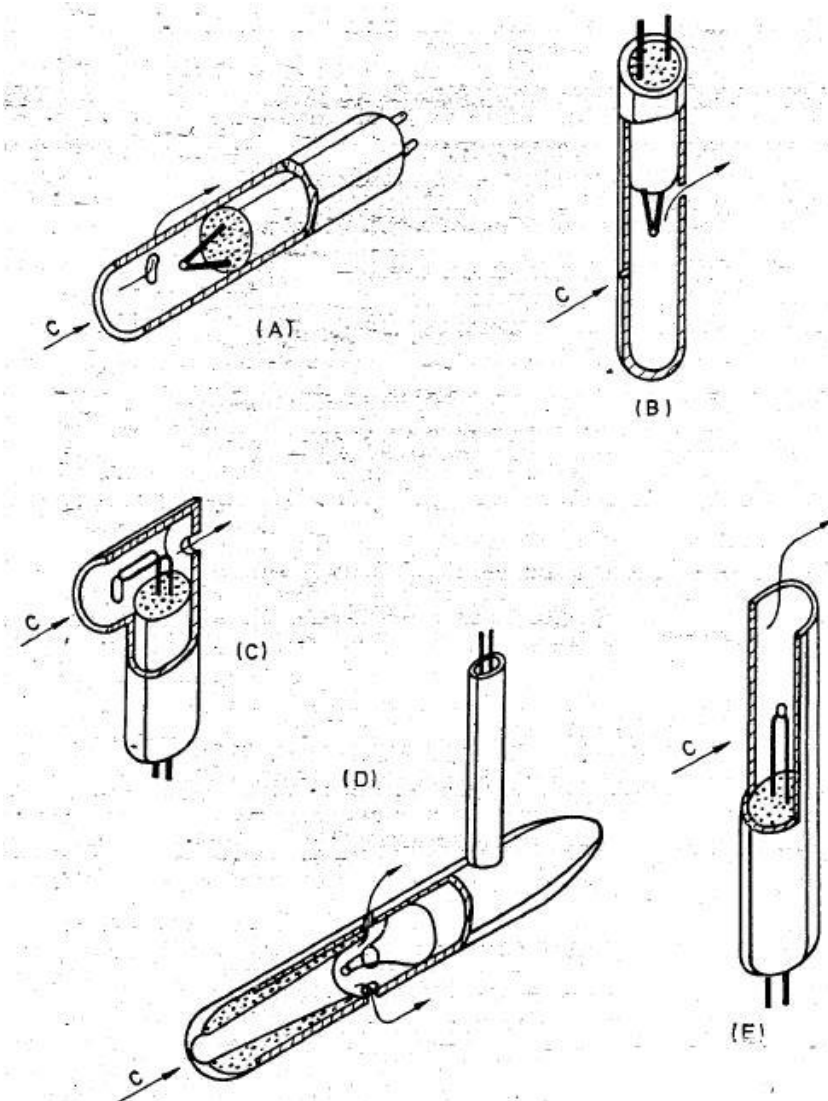
$$T_p = T + K_T \frac{c^2}{2c_p}$$

У зависности од температуре која се мери и брзине струјања флуида (прецизније гаса) разликујемо три области мерења температуре:

- мерење температуре мање од 200°C. Примењују се голи детектори.
- мерење температуре у распону од 200°C до 400°C и при великим брзинама. Примењују се зауставне сонде (са заштитним оклопом) у којима се брзина струјања смањује, како би се смањио утицај кинетичке енергије јер се из једначине

$$T_i - T_p = (1 - K_T) \frac{c^2}{2c_p}$$

види да је за мале брзине, без обзира на вредност величине K_T , $T_i \sim T_p$.

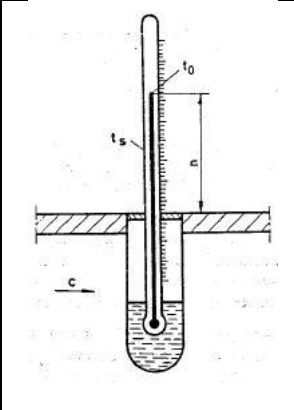
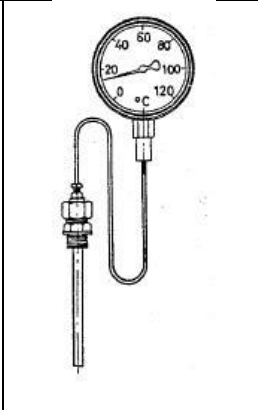
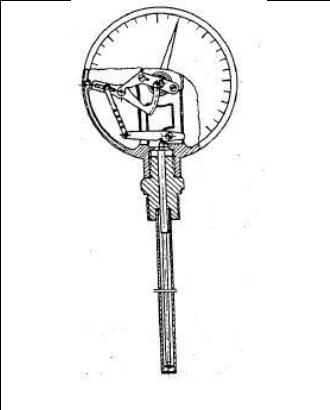
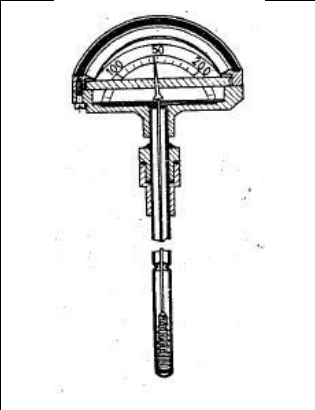


Слика 24. Типови зауставних сонди [1]

- мерење високих температура при великим брзинама флуида. Примењују се специјалне сонде, смањених димензија, од одговарајућег материјала отпорног на високе температуре.

Мерила за мерење температуре флуида:

- термометри на принципу топлотног ширења - дилатациони термометри,

			
стаклени (живин) термометар	термометри са цевном опругом	термометри на принципу ширења метала штапни (метални) термометри	биметални термометри

Постоје и: мано термометри, гасни термометри...

- електрични термометри: електрични отпорни термометри (RTD – resistance temperature detector) – најзаступљенији у индустрији и то PRT (од платине, Pt), термистори (NTC, PTC), термоелементи, термопарови. О овим врстама термометара биће речи у другом делу предмета - Сензори.



Електрични отпорни термометри [17]

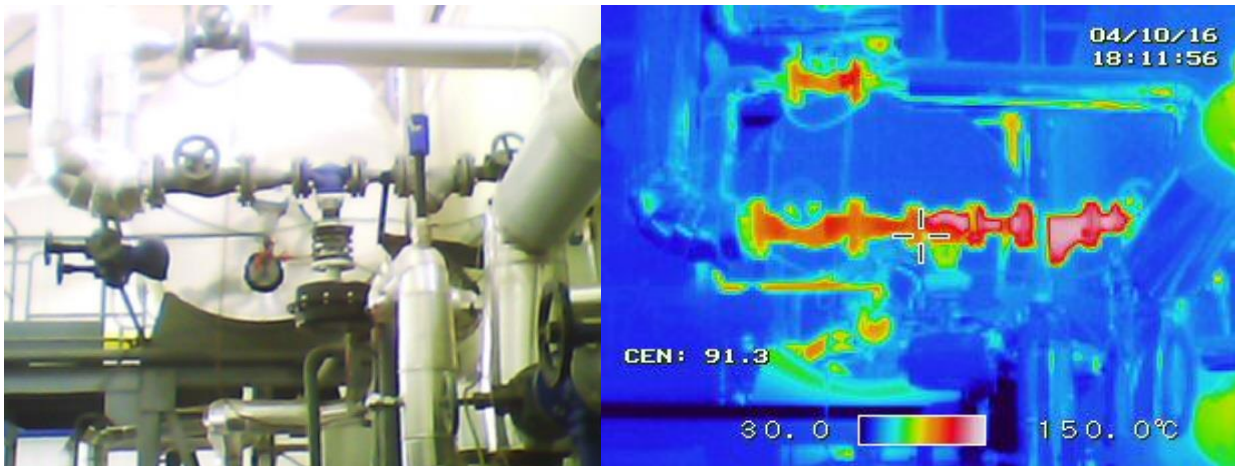
- пирометри (мерење температуре на основу закона о зрачењу – оптички пирометри, пирометар на зрачење – инфрацрвени термометар, термоизијска камера).



Инфрацрвени термометар - мерење температуре на површини



Термовизијска камера - мерење расподеле температуре на површини



Мерење расподеле температуре на површини

Калибрација термометара обавља се: у референтним тачкама или упоредном калибрацијом (референтна сонда).

6. Мерење протока

Проток је важна физичка величина и један од основних струјно-техничких параметара, стога је мерење протока веома значајно. Мерење протока флуида присутно је осим у индустрији, и при дистрибуцији одређених флуида (вода, гас...) у домаћинствима, у медицини, пољопривреди, итд. Најчешће се мери проток воде, нафте, бензина, кисеоника, ваздуха, азота, угленмооксида, угљендиоксида, метана, итд.

Мерење протока може да се врши на многе начине, односно постоји велики број различитих типова мерила протока. У зависности од начина мерења протока, мерила протока (протокомере) можемо поделити на следеће, најзначајније, групе код којих се мерење протока врши:

1. Тежинском методом
2. Волуметријском (запреминском) методом
3. Пригушницама
4. Лебдећим телом – ротаметрима
5. Мерењем профила брзина у попречном пресеку цеви помоћу сонди
6. Ротационим турбинским колима
7. Електромагнетном методом
8. Ултразвучном методом
9. Кориолисовом методом
10. Вртложењем флуида (вортекс методом)
11. Термалном методом
12. Преливима, итд.

Наведена мерила протока имају и своја одређена подручја примене. Избор одговарајућег мерила протока зависи од карактеристика флуида, карактеристика, уградње и одржавања самог мерила, услова околине, економских услова...

6.1. Запреминско мерење протока

После тежинске методе, запреминско мерење протока може се сматрати једном од најпрецизнијих метода мерења протока. Када је инсталација прецизно конструисана, одржавана и коришћена, може бити достигнута непрецизност реда од $\pm 0,1\%$ до $\pm 0,2\%$ (са сигурношћу до 95%).

Запреминска метода заједно са тежинском методом спада у примарне методе мерења протока и најчешће се примењују за калибрацију других мерила протока. Принцип мерења протока овим методама састоји се у одређивању масе тј. запремине течности, која, у одређеном временском интервалу напуни до извесне висине резервоар. У првом случају резервоар се постави на вагу, а у другом се запремина флуида у резервоару утврђује мерењем висинске разлике течности (или на водоказном стаклу које се претходно искилибрише или помоћу давача нивоа течности).

Теоријски гледано, нема ограничења за примену волуметријске методе, али се у пракси она ипак користи за протоке мање од $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ и спроводи се искључиво у лабораторијским условима.

У оквиру волуметријске методе постоји: статичка хидрометријска метода (метода при којој се чиста запремина скупљене течности одређује из мерења нивоа течности непосредно пре и после пребацивања воде, за мерени интервал времена, у хидрометријски резервоар одређене запремине) и динамичка хидрометријска метода (метода по којој се чиста запремина прикупљене течности одређује из мерача, док течност протиче у хидрометријском резервоару - у овој методи нема потребе за левком).

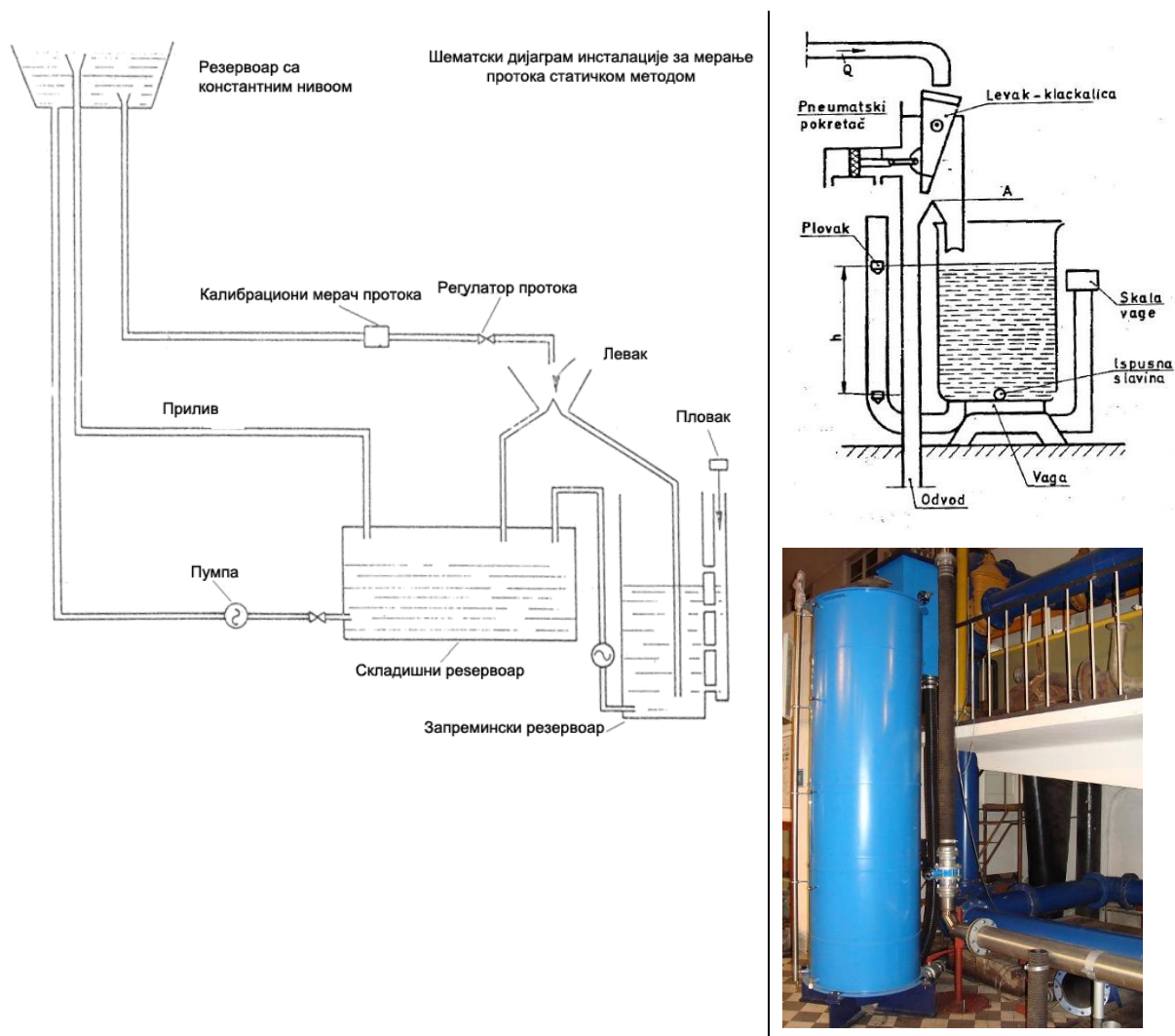
Стабилизатор протока: Уређај који је уграђен у мерну инсталацију и има улогу одржавања стабилног протока, а у њега се цевоводом доводи течност.

Статичка хидрометријска метода

Принципи мерења протока волуметријском статичком методом су:

- Одређивање почетне запремине течности у волуметријском резервоару V_0 ;
- Скретање млаза у волуметријски (запремински) резервоар, све док количина течности у њему не задовољи услов за тражену тачност, померањем левка стартује се тајмер за мерење времена пуњења резервоара;
- Одређивање коначне запремине течности садржане у волуметријском резервоару.

Запремина у почетном као и у крајњем тренутку добија се читањем нивоа течности у резервоару, и на основу препоруке о примарном подешавању која даје везу између нивоа и запремине течности. На основу овога добијамо проток преко запремине прикупљене течности у резервоару и времена пуњења.



Слика 25. Шематски приказ инсталације за мерење протока статичком волуметријском методом

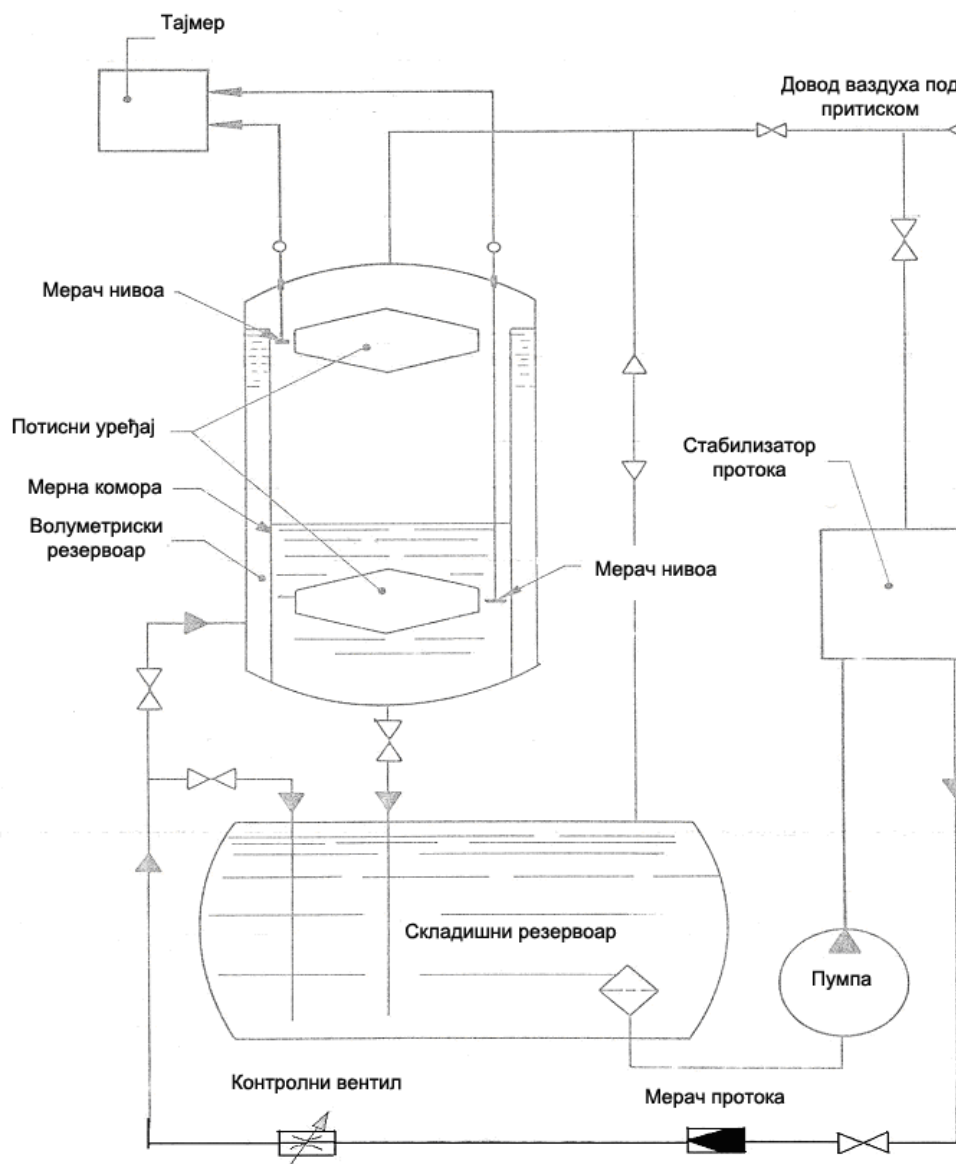
Веома је важно утврдити временски интервал, тј. почетак пуњења и завршетак пуњења резервоара. За ту сврху може да се користи аутоматизована клацкалица, која се може покретати пнеуматски или електрично. У моменту када левак клацкалице пролази поред граничне ивице А (слика 25, десно) укључује се, односно, искључује се електрична штопера. Левак је уређај који скреће млаз, или у хидрометријски резервоар или до његовог by-pass-а без мењања протока за време трајања мерења.

Тачно одређивање специфичне тежине флуида је исто тако важно. За случај примене волуметријске методе, потребно је резервоар претходно калибрисати тј. довести у везу запремину у односу на висину течности.

Динамичка хидрометријска метода

Принципи на којима се заснива мерење протока на основу динамичке методе су:

- Пустити течност у резервоар до претходно одређеног почетног нивоа (и према тој запремини), после које се пали тајмер;
- Прекинути проток (искључити тајмер) код друге крајње, претходно одређене, границе и затим испустити прикупљену течност.



Слика 26. Шематски приказ инсталације за мерење протока динамичком волуметријском методом

Запремина која се испразни током времена пуњења једнака је разлици запремина V_1 и V_0 које су садржане у волуметријском резервоару, који је напоњен до нивоа z_1 и z_0 . Средња вредност волуметријског протока Q , током времена пуњења, износи

$$Q = \frac{V_1 - V_0}{t}$$

где је t време пуњења (које се према стандарду коригује како би се узела у обзир било каква временска грешка) и $t_{min} = 30 s$.

У доњој табели су дати периоди (у годинама, мо – месеци, а – не захтева се, осим уколико се сумња на промену одређених критичних димензија мерила) између две калибрације за одређена мерила протока.

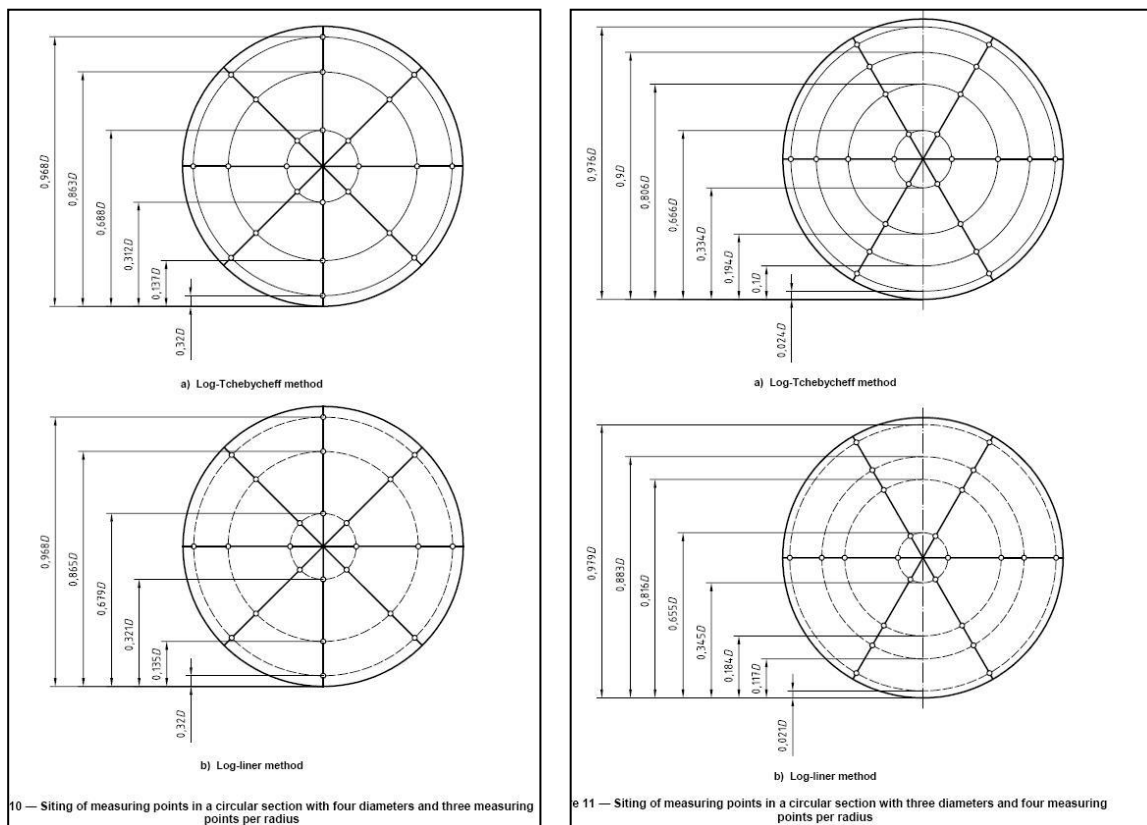
Equipment	Period
Flow rate	
Weighing tank	1
Volumetric tank	10
Venturi	a
Nozzle	a
Orific plate	a
Turbine	1
Electromagnetic	1
Weir	a
Current meter	2
Ultrasonic	6 mo

6.2. Мерење протока класичним сондама

Проток може да се одреди и мерењем профила брзина, нпр. помоћу Пито-статичке сонде. Стандардом ISO 3966 дефинисане су мерне тачке тј. позиције у које се поставља глава сонде. Захтева се минимум два управна мерна пречника (мерна правца), са минимум 3 мерне тачке дуж полупречника цеви и мерном тачком у центру попречног пресека цеви (пожељна због цртања профила брзине). Стандардом су прописане три методе за одређивање брзине струјања, односно протока, и то: графичком интеграцијом, нумеричком интеграцијом и аритметичком методом.

При одређивању брзине струјања аритметичком методом, распоред мерних тачака дуж пречника усваја се према “Log-linear” или “Log-Chebyshev” методи. У оквиру обе методе дефинисане су мерне тачке за случај када постоји одређени број мерних праваца.

На слици 27. приказан је распоред мерних тачака дуж радијуса према Log-linear и Log-Chebyshev методи (при мерењу протока код вентилатора), и то за случај мерења на три мерна пречника цеви (мерна правца) постављена под углом од 60° , са по минимум 4 тачке дуж једног полупречника, као и на четири мерна правца са по минимум 3 тачке дуж једног полупречника.



Слика 27. Распоред мерних тачака дуж радијуса према Log-linear и Log-Chebyshev методи [ISO...]

На основу динамичког притиска, који мери Пито-статичка сонда, одређује се брзина нестишљивог струјања у свакој мерној тачки према изразу

$$c_i = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_d}{\rho_v}}$$

где је Δp_d - динамички притисак одређен Пито-статичком сондом.

Средња брзина c_{SR} у мерном попречном пресеку цеви одређена је као аритметичка средина брзина у мерним тачкама

$$c_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i$$

Проток Q , одређује се преко израза

$$Q = c_{sr} \cdot A.$$

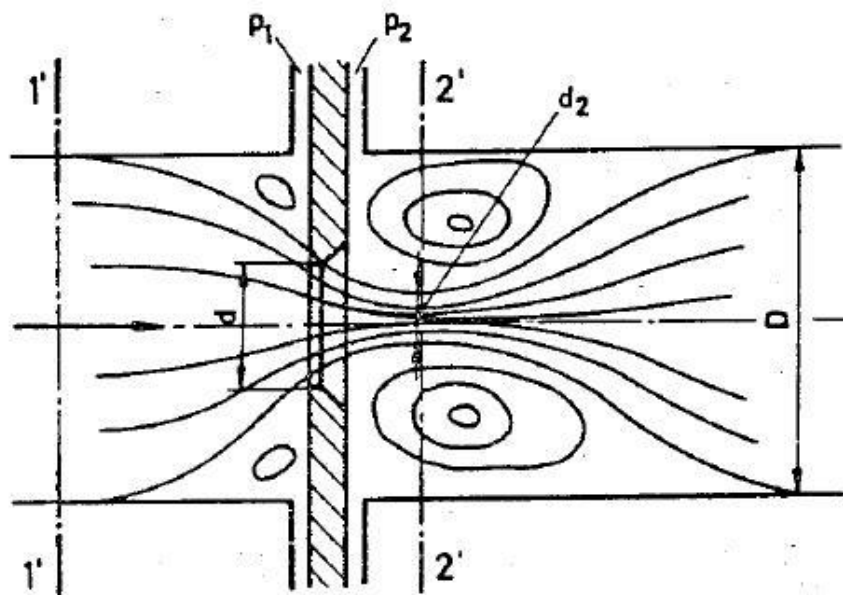
6.3. Мерење протока пригушницама

Ако се неки локални отпор угради у цевовод, он ће на том месту проузроковати локални пад притиска (сужењем попречног пресека настаје локално убрзање струје флуида). Мерењем разлике притисака између улаза у пригушницу и дотичног места са сниженим притиском одређује се проток.

При мерењу протока користе се стандардни типови пригушница: бленда, млазница и вентуриметар.

6.3.1. Нормиране пригушнице по VDI-нормама (DIN 1952)

На слици 28. шематски је приказано струјање кроз пригушницу (бленду).



Слика 28. Струјање кроз бленду [1]

Са индексом прим означимо случај идеалног некомпесибилног струјања невискозног флуида

$$\frac{p_1'}{\rho} + \frac{c_1'^2}{2} = \frac{p_2'}{\rho} + \frac{c_2'^2}{2}$$

$$c_1' A_1 = c_2' A_2$$

$$c_1' = c_2' \frac{A_2}{A_1} \frac{A}{A} = c_2' \frac{A_2}{A} \frac{A_1}{A_1} = c_2' \cdot \mu \cdot m$$

где су: μ - коефицијент контракције, m - коефицијент отвора пригушнице

$$\mu = \frac{A_2}{A} = \left(\frac{d_2}{d} \right)^2; m = \frac{A}{A_1} = \left(\frac{d}{D} \right)^2$$

односно одговарајуће површине попречних пресека су

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4}, A = \frac{\pi d^2}{4}, A_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$$

Следи

$$c_2' = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1' - p_2')}{\rho}}$$

За реалан, вискозан флуид би било

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + \zeta \frac{c_2^2}{2}$$

$$c_1 A_1 = c_2 A_2$$

$$c_1 = c_2 \cdot \mu \cdot m$$

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

односно

$$c_2 = \frac{\varphi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = \varphi c_2'$$

где је са φ означен поправни коефицијент брзине тј. брзински коефицијент корелације брзина код вискозног и невискозног флуида (утицај трења, одступање мерних пресека 1 и 2 од теоријских 1' и 2', ...).

Масени проток је

$$\dot{m} = \rho c_2 A_2 = \rho c_2 \mu A = A \frac{\mu \varphi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} = \alpha A \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}$$

где је α проточни коефицијент пригушнице

$$\alpha = \frac{\mu \varphi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}}$$

и који се одређује таблично у функцији од $\alpha = f(\text{Re}, m^2)$.

За практичну примену када је у питању компресибилно струјање за однос притисака

$$\frac{p_2}{p_1} \leq 0,99$$

уводи се поправни коефицијент тј. коефицијент експанзије ε који се одређује

таблично у зависности од $\varepsilon = f\left(\frac{p_2}{p_1}, m, \kappa\right)$ па је

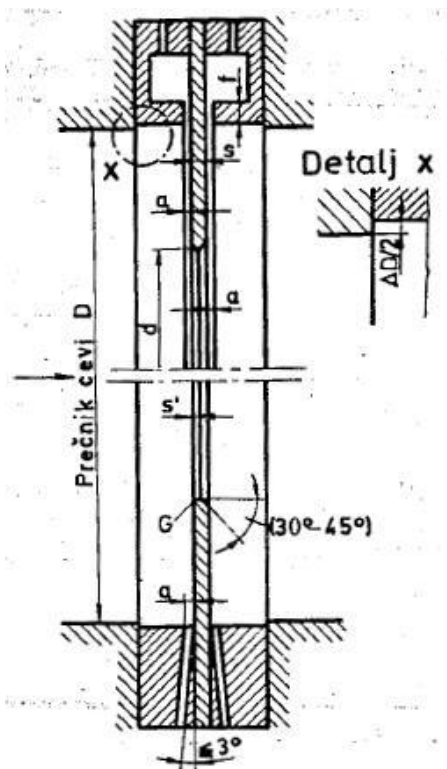
$$\dot{m} = \alpha \varepsilon A_d \sqrt{2 \rho_1 (p_1 - p_2)}$$

$$Q = \alpha \varepsilon A_d \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_1}}$$

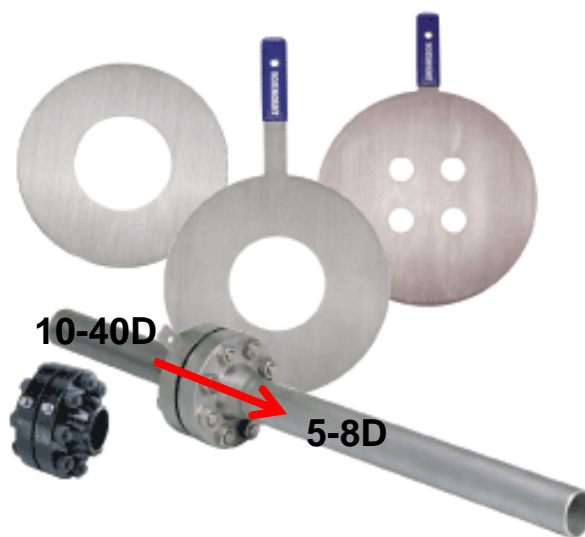
где је $A_d = A$.

Димензије пригушнице, начин уградње као и прикључци за мерење притиска, дефинисани су нормама.

Нормирана бленда:



Примењује се за цевоводе пречника $50\text{mm} \leq D \leq 1000\text{mm}$, коефицијент отвора је $0,05 \leq m \leq 0,64$.



[17]

Таблично су дате вредности за проточни коефицијент за хидраулички глатке цеви $\alpha_0 = f(R_{eD}, m)$, док је за храпаву цев $\alpha = \alpha_0 K_{tr}$. Корекција K_{tr} се узима ако је релативна

храпавост $\frac{\Delta}{D} \geq \left(\frac{\Delta}{D}\right)_{gr}$.

За поправни коефицијент K_{tr} дати су следећи емпиријски обрасци:

- За $10^4 \leq R_{eD} \leq 10^6$

$$K_{tr} = 1 + \frac{r_0 m^2}{100} \left[1 + \frac{(\lg R_e - 6)^2}{4} \right]$$

- За $R_{eD} \geq 10^6$

$$K_{tr} = 1 + \frac{r_0 m^2}{100}$$

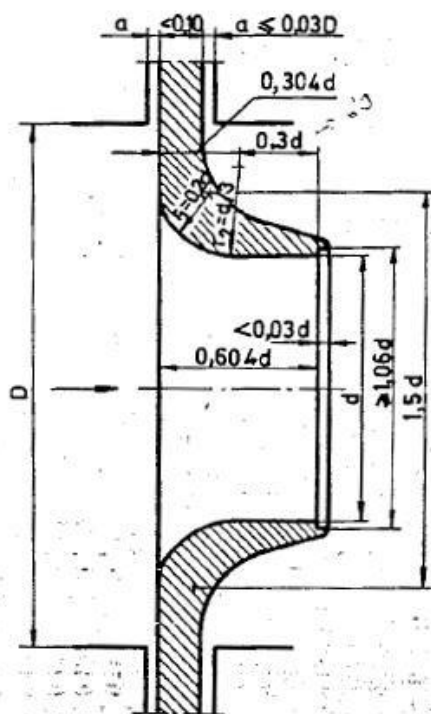
Коефицијент r_0 зависи само од релативне храпавости па је за бленду

$$r_0 = 7 \lg \left(\frac{\Delta}{D} \cdot 10^4 \right) - 4$$

Коефицијент експанзије узима се из таблица $\varepsilon = f \left(\frac{p_2}{p_1}, m, \kappa \right)$.

При уградњи пригушнице, постављају се оштри услови у погледу правога дела мерне деонице. Нпр. ако је испред бленде кривина под углом од 90° , при $m=0,1$ праве деонице цевода са узводне и низводне стране треба да износе $10D$ и $5D$, односно за $m=0,6$ оне треба да износе $40D$ и $8D$.

Нормирана млазница



Normirana mlaznica za $m \leq 0,444$

Препоручује се за цевоводе пречника $50\text{mm} \leq D \leq 500\text{mm}$, коефицијент отвора је $0,1 \leq m \leq 0,64$.

Масени проток

$$\dot{m} = \alpha \varepsilon A_d \sqrt{2 \rho_1 (p_1 - p_2)}$$

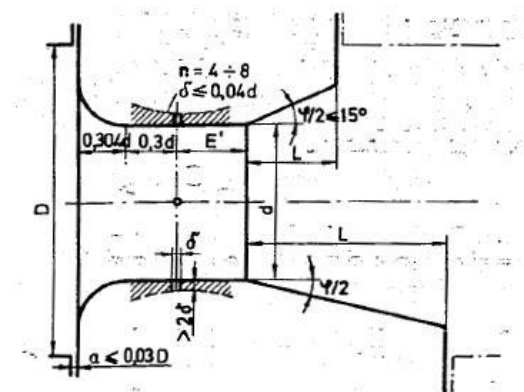
Проточни коефицијент $\alpha = \alpha_0 K_{tr}$

Коефицијент r_0

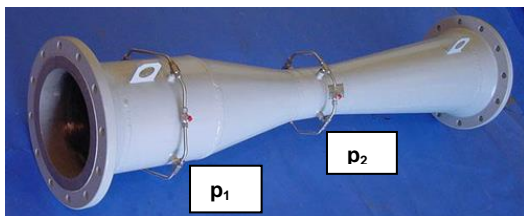
$$r_0 = 4,51g \left(\frac{\Delta}{D} \cdot 10^4 \right) - 2,5$$

Коефицијент експанзије узима се из таблица $\varepsilon = f \left(\frac{p_2}{p_1}, m, \kappa \right)$.

Нормирани вентуриметар (вентури млазник и вентури цев)



Препоручује се за цевове пречника $65mm \leq D \leq 500mm$, коефицијент отвора је $0,1 \leq m \leq 0,6$.



Проточни коефицијент $\alpha = \alpha_0 K_{tr}$. Поправни коефицијент K_{tr} и коефицијент експанзије ε узимају се из таблица за млазнице.

Један од најважнијих задатака пројектовања хидрауличног постројења је прорачун струјних губитака. Пригушница која је уграђена у постројње изазива пад притиска. Губици енергије притиска у пригушници одређују се као

$$\Delta p_g = \varphi_g (p_1 - p_2)$$

где је φ_g - коефицијент губитка притиска у пригушницама (коефицијент корелације између пада и губитка), одређује се из таблица у зависности од врсте пригушнице и коефицијента отвора m .

6.3.2. Нормиране пригушнице по ISO-нормама (ISO 5167)

Масени проток одређује се помоћу израза

$$\dot{m} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho_1(p_1-p_2)}$$

где су: $\beta = \frac{d}{D}$ и C - проточни коефицијент који се одређује преко израза за одређени

тип пригушнице $C = f(\beta, Re_D, L_1, L_2)$.

Бленде

Постоје три типа прикључака за мерење притисака испред и и за бленде: на растојању D (пре бленде) и $D/2$ (после бленде), на прирубници и угаони.

Проточни коефицијент C рачуна се према изразу

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A)\beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} \\ + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1})(1 - 0,11A) \frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0,031(M'_2 - 0,8M'_2{}^{11})\beta^{1,3}$$

када је $D < 71,12$ mm у претходној једначини са десне стране, након последњег члана, додаје се још

$$+ 0,011(0,75 - \beta) \left(2,8 - \frac{D}{25,4} \right)$$

где су:

$$L_1 = \frac{l_1}{D}, \quad L_2' = \frac{l_2}{D}, \quad Re_D = \frac{cD}{\nu};$$

$$M'_2 = \frac{2L'_2}{1-\beta},$$

$$A = \left(\frac{19\,000\beta}{Re_D} \right)^{0,8}$$

За угаоне прикључке: $L_1 = L_2' = 0$; за прикључке на растојању D и $D/2$: $L_1 = 1$ $L_2' = 0,47$ и за прикључке на прирубници

$$L_1 = L'_2 = \frac{25,4}{D}$$

Код гасова коефицијент експанзије, за $p_2/p_1 \geq 0,75$, се рачуна као

$$\varepsilon = 1 - \left(0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8 \right) \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\kappa} \right]$$

Млазнице и Вентури млазнице

Проточни коефицијент

$$C = 0,990 - 0,2262\beta^{4,1} - \left(0,00175\beta^2 - 0,0033\beta^{4,15} \right) \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{1,15}$$

Коефицијент експанзије

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\kappa\tau^{2/\kappa}}{\kappa-1} \right) \left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4\tau^{2/\kappa}} \right) \left(\frac{1-\tau^{(\kappa-1)/\kappa}}{1-\tau} \right)}$$

Вентуриметри

За пречнике цеви $50 \text{ mm} \leq D \leq 250 \text{ mm}$, коефицијент отвора је $0,4 \leq \beta \leq 0,75$, $2 \times 10^5 \leq Re_D \leq 1 \times 10^6$ и усваја се да је $C = 0,995$

За пречнике цеви $100 \text{ mm} \leq D \leq 800 \text{ mm}$, коефицијент отвора је $0,3 \leq \beta \leq 0,75$; $2 \times 10^5 \leq Re_D \leq 2 \times 10^6$ усваја се да је $C = 0,984$.

За пречнике цеви $200 \text{ mm} \leq D \leq 1\,200 \text{ mm}$, коефицијент отвора $0,4 \leq \beta \leq 0,7$, $2 \times 10^5 \leq Re_D \leq 2 \times 10^6$ усваја се да је $C = 0,985$.

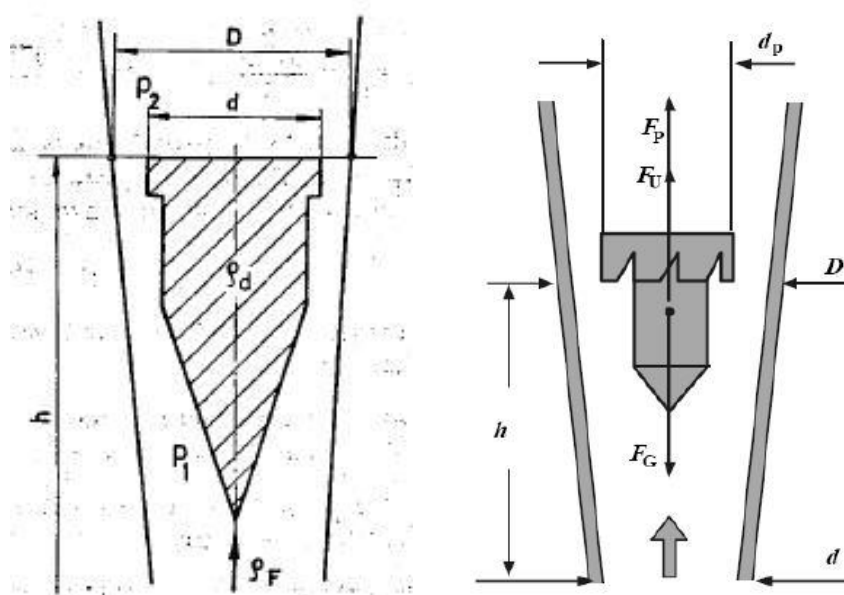
Поред ISO и VDI норми, у употреби су и руске ГОСТ-норме за мерење протока пригушницама (РД 50-213-80).

6.4. Мерење протока лебдећим телом – ротаметром

Ови мерачи примењују се за мерење малих протока течности и гасова. Најчешће се примењују као погонски инструменти, поуздани су, раде са великом тачношћу и дугим

веком трајања. Мерила протока са лебдећим телом представљају у ствари пригушницу са променљивим пресеком (ради на принципу пада притиска).

Као пригушница служи лебдеће тело које је смештено у вертикалну цев која је конична. Кроз цев протиче флуид, који струји кроз зазор између лебдећег тела и зида цеви, услед чега се ствара узгонска сила која држи равнотежу са тежином тела. Положај лебдећег тела зависи од протока флуида. Сваком положају одговара равнотежа између узгонске силе и тежине тела. Скала мерача може бити линерна, или не, већ према изведеном углу конуса цеви. Обавезна је калибрација протокомера. Испоручује се у сету (конуси различитих димензија, различитих лебдећих тела...).



Слика 29. Ротаметар [1]

Равнотежа сила (слика 29. лево)

$$\vec{F}_u + \vec{F}_p = \vec{F}_G$$

$$F_p = \rho_F g V$$

$$F_G = \rho_d g V$$

$$F_u = C_Y A_d (p_1 - p_2)$$

где је: C_Y - коефицијент узгона лебдећег тела, па је

$$(\rho_d - \rho_F) g V = C_Y A_d (p_1 - p_2)$$

$$p_1 - p_2 = \Delta p = (\rho_d - \rho_F) \frac{g V}{C_Y A_d}$$

Масени проток је

$$\dot{m} = K' (A_D - A_d) \sqrt{2 \rho_F \Delta p}$$

односно

$$\dot{m} = K(A_D - A_d) \sqrt{2\rho_F(\rho_d - \rho_F) \frac{gV}{A_d}}$$

где је: V - запремина лебдећег тела; $K = \frac{K'}{\sqrt{C_Y}}$ - проточни коефицијент мерила; и

одговарајуће површине попречног пресека $A_D = \frac{\pi D^2}{4}$, $A_d = \frac{\pi d^2}{4}$.

Види се да је

$$\dot{m} = \text{const}(A_D - A_d) = f(h)$$

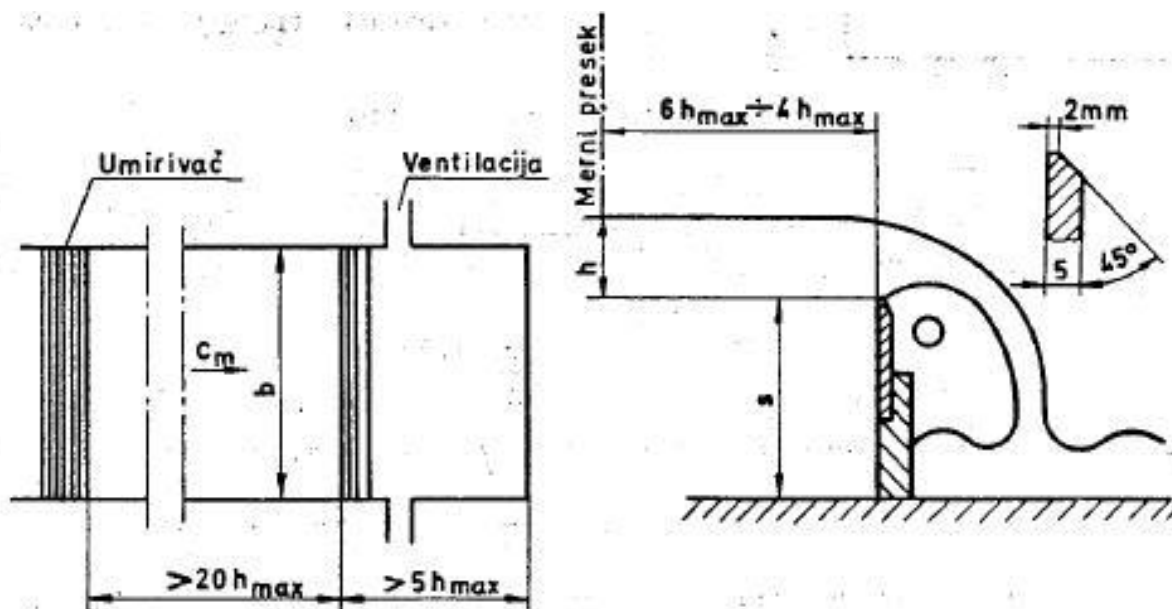
Ако се подеси $\dot{m} = \text{const} \cdot h$ добија се параболични облик цеви.

6.5. Мерење протока преливом

Прелив представља преграду у отвореном току флуида. Најчешће коришћени преливи су правоугаони и троугласти прелив.

Правоугаони прелив

Познат је још под називом Reubock-ов прелив, са хоризонталном оштром преливном ивицом, са глатким зидовима доводног канала и са потпуном контракцијом преливног млаза. Примењује се за веће вредности протока.



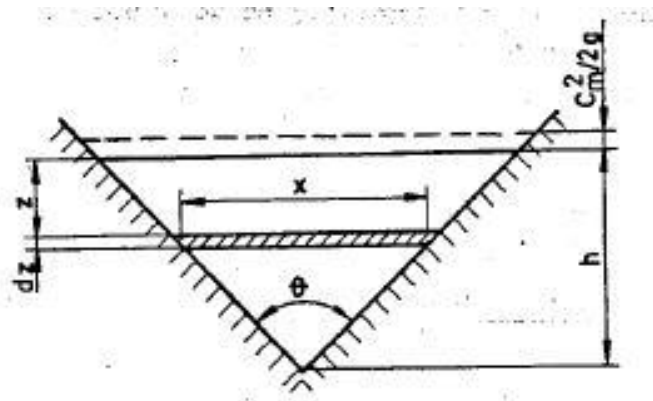
Слика 30. Правоугаони прелив [1]

Преливни млаз мора бити потпуно вентилиран тако да је притисак испод млаза приближно једнак атмосферском. Средња брзина дотока воде $c_m < 0,45 \text{ m/s}$. Постоје

изрази за масени проток који је у функцији од висине прелива, висине преливне преграде и ширине прелива $\dot{m} = f(h, s, b)$

Троугласти прелив

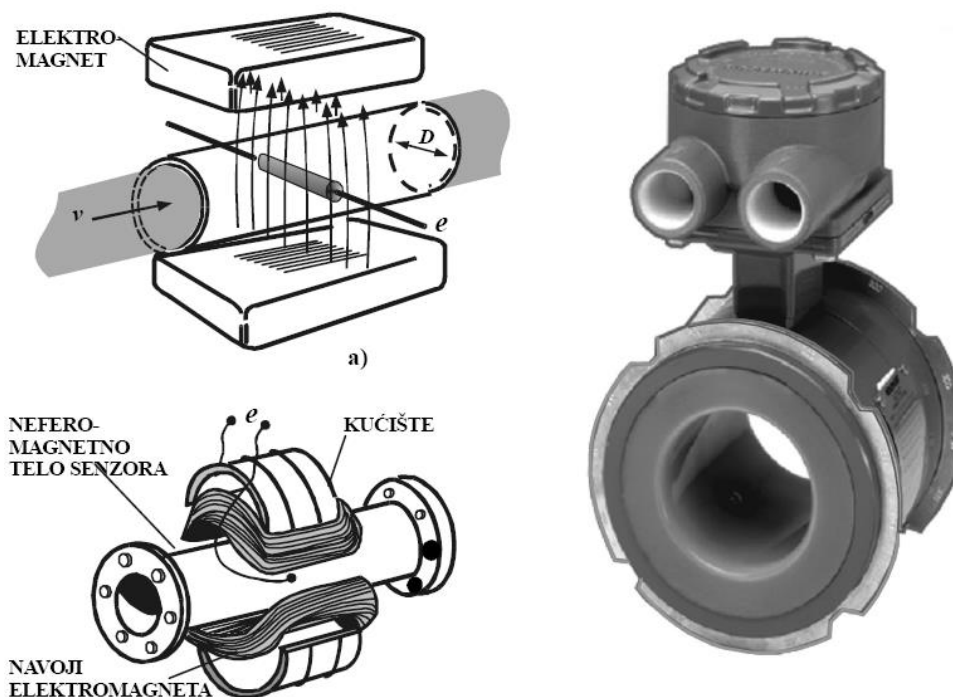
Користи се за мање вредности протока. Масени проток је у функцији од висине и угла прелива $\dot{m} = f(\theta, h)$.

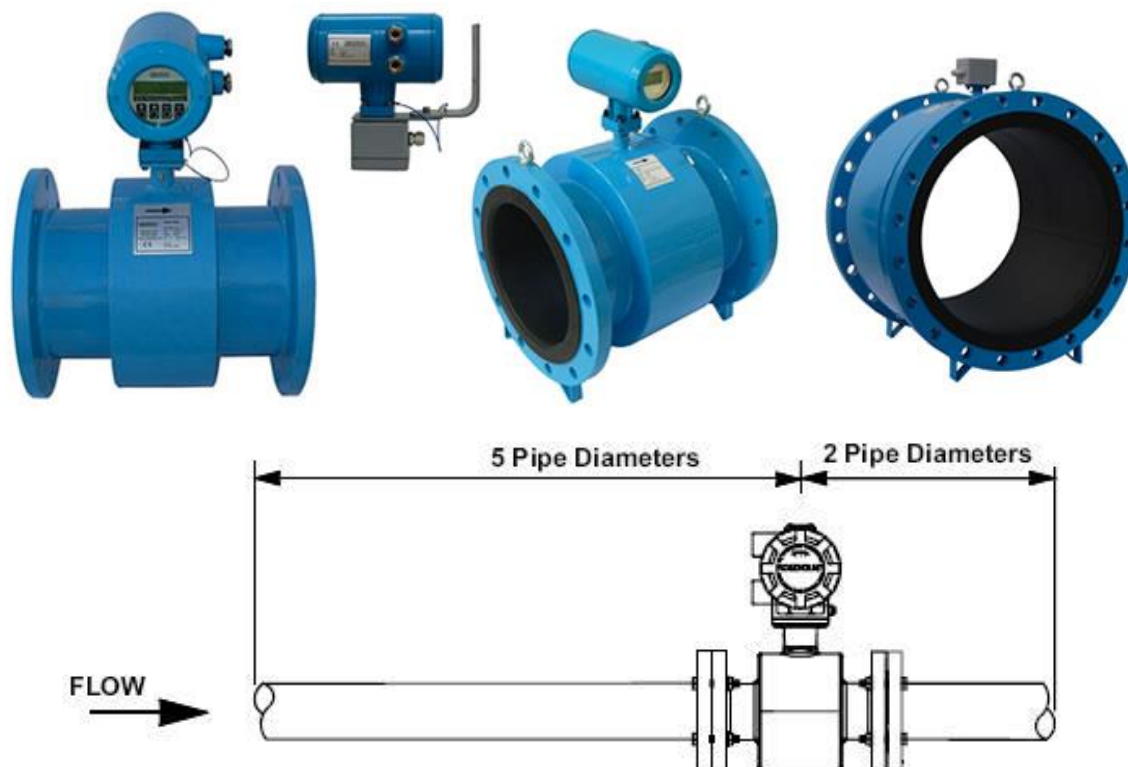


Слика 31. Троугласти прелив [1]

6.6. Електромагнетна мерила протока

Кретањем флуида у магнетном пољу, у складу са Фарадејевим законом индукције, ствара се напон - електромоторна сила. Уколико је поље нормално на електрично изоловану цев, кроз коју се креће флуид, напон се може мерити између две електроде постављене на зид цеви.





[17]

Користе се за мерење протока проводних течности (могу и отпадне воде) и не поседују ни један покретни део. Мерило се састоји од примарног уређаја - сензора (кроз који протиче флуид) и секундарног уређаја - трансмитера (који претвара сигнал од примарног уређаја у стандардизовани сигнал). Излазни сигнал је пропорционалан запреминском протоку. Имају тачност до 0,25% мереног протока.

Индуковани напон је:

$$U = kBDc$$

односно запремински проток је:

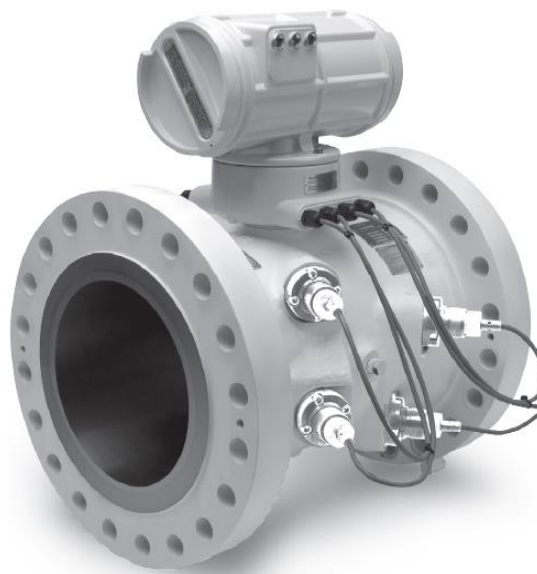
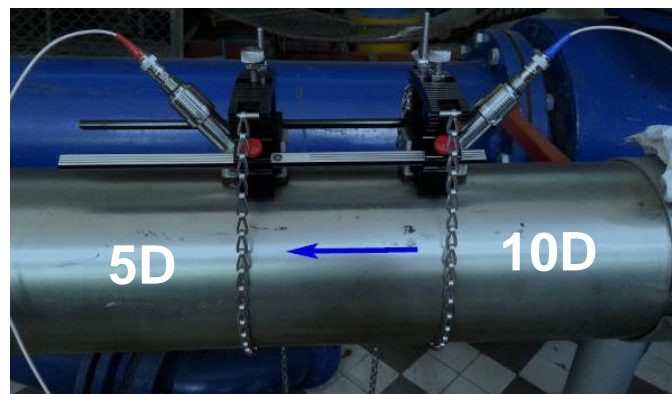
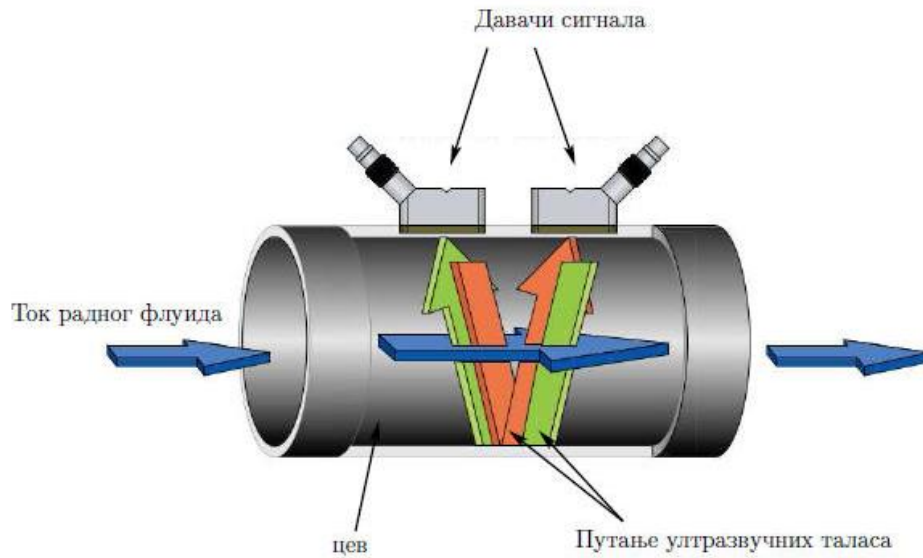
$$Q = \frac{D^2 \pi}{4} c = K \frac{U}{B}$$

где је B – интензитет магнетног поља / густина магнетног флукса.

6.7. Ултразвучна мерила протока

Постоје две групе мерила код којих су ултразвучни сензори брзине тока флуида на бази времена пропагације (или време проласка таласа кроз флуид) или на бази Доплеровог ефекта.

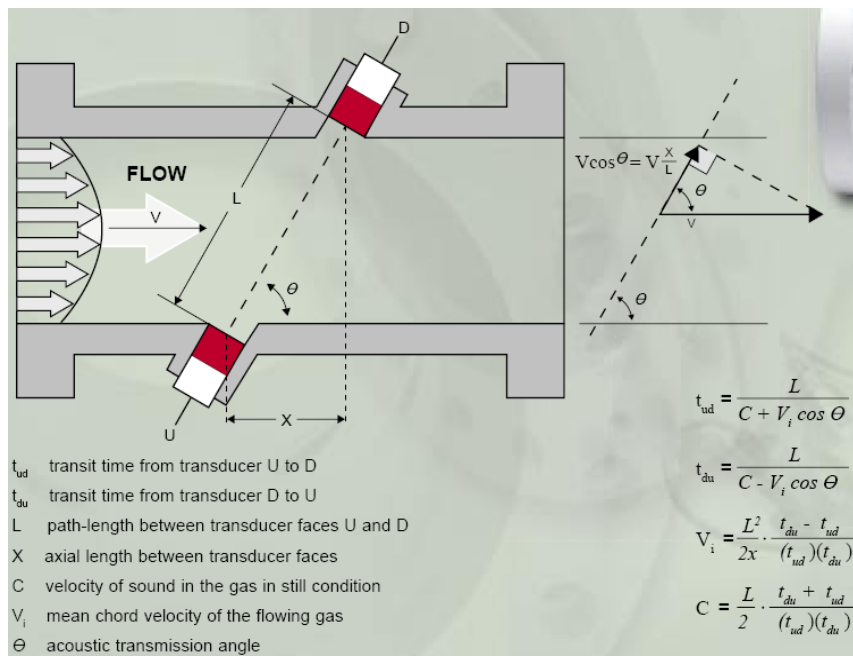
Прва група мерила је пројектовна за рад са чистим течностима, а могу да се користе и за гасове. Мери се разлика времена проласка два ултразвучна импулса емитована узводно и низводно (постављена су два пара предајник-пријемник, један пар емитује ултразвук у правцу тока флуида, а други у супротном правцу).



Ултразвучно мерило протока [17]

При кретању флуида талас се узводно успорава а низводно убрзава. На основу различитих времена проласка таласа кроз флуид срачунава се вредност протока:

$$Q = k \frac{t_1 - t_2}{t_1 t_2}$$



Ултразвучни сензори брзине тока флуида на бази времена путовања [17]

Код друге група мерила - на бази Доплеровог ефекта – долази до промене фреквенције емитованог таласа приликом рефлексије од покретних честица флуида. Захтева се присуство ваздушних мехурића или чврстих честица у течности које служе за расипање емитованог ултразвука.

6.8. Кориолисова мерила протока

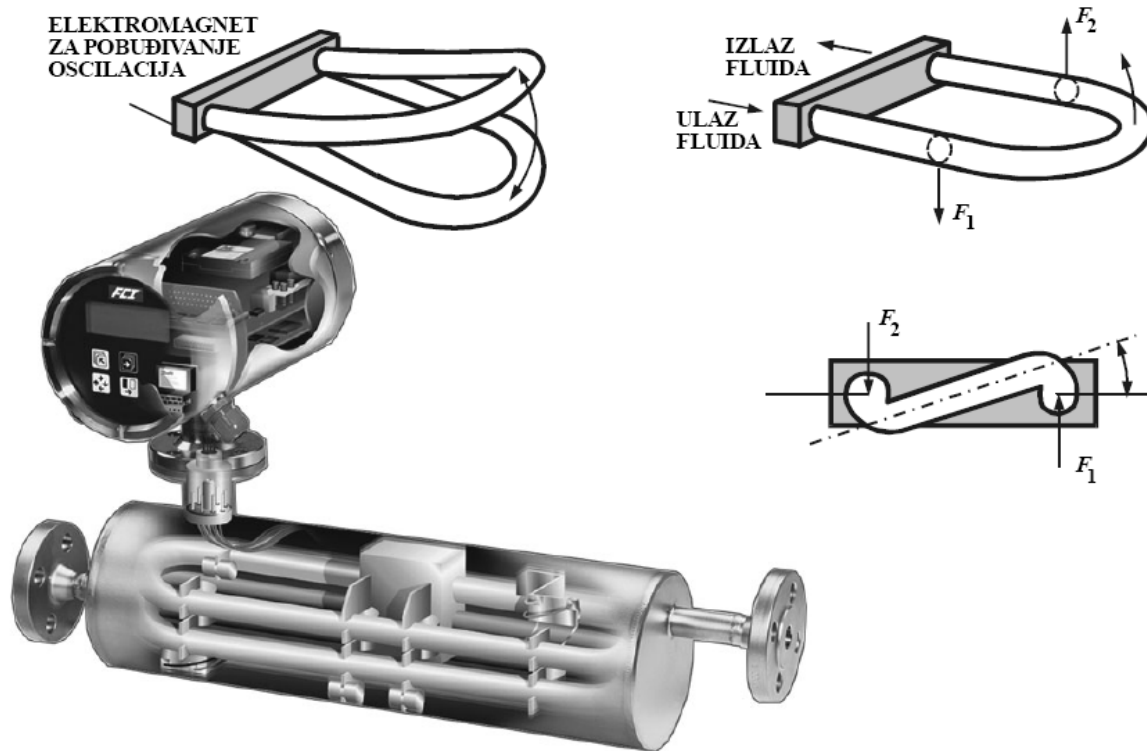
Кориолисови протокометри се користе за мерење масеног протока, као и густине и температуре течности.

Мерило поседује осцилаторни или вибрирајући елемент, при чему су Кориолисове силе повезане са комбинацијом радијалних и кружних кретања. Мерењем обртног момента потребног за стварање Кориолисових сила у флуиду, добија се вредност масеног протока.

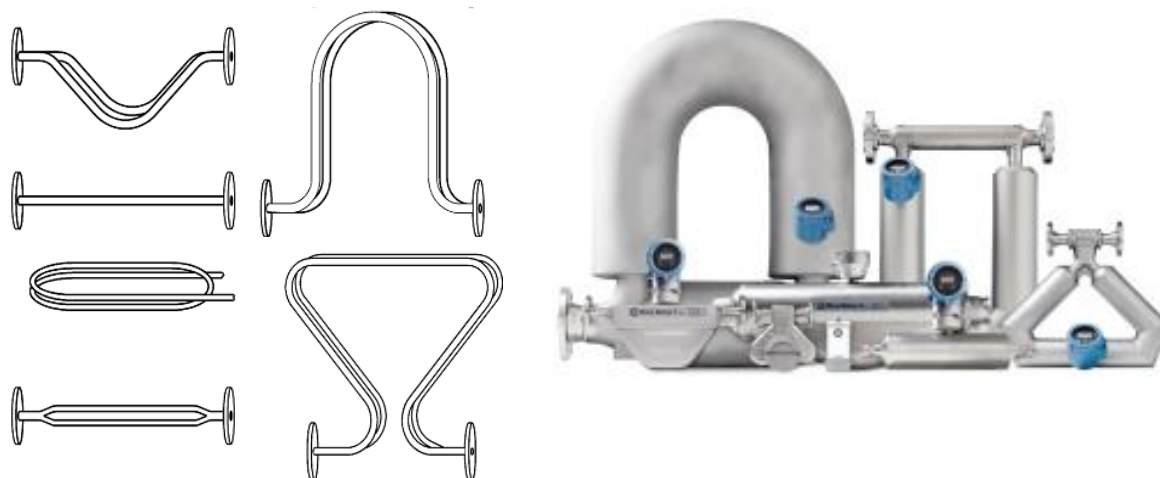
Постоје различите конструкције мерила, код којих најчешће права или кружна цев принудно осцилује (вибрирање се остварује спољашњим електромеханичким

системом), нормално на правац кретања течности. Услед деловања Кориолисове силе долази до увртања цеви, које је пропорционално масеном протоку.

$$F_c = - m a_c = - 2m[\omega \times v_r]$$



Магнетни сензор мери величину увртања, и потпуно је линеаран у целом опсегу мерења. Мерило је релативно неосетљиво према утицају карактеристика флуида, и може се мерити проток у оба смера. Обезбеђују најтачније мерење протока – до 0.1% мерене масе и најбољу поновљивост.



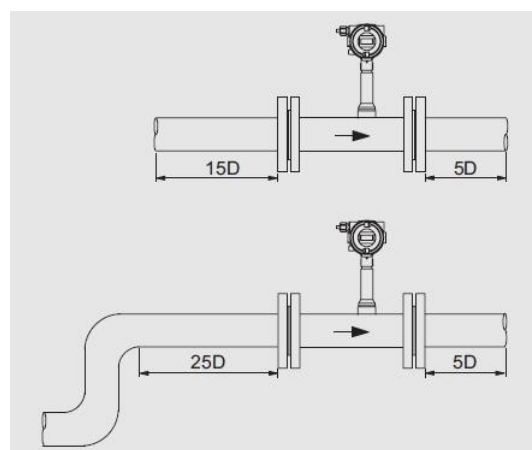
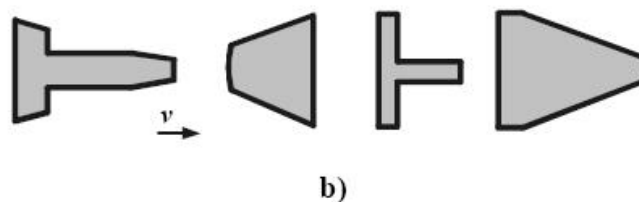
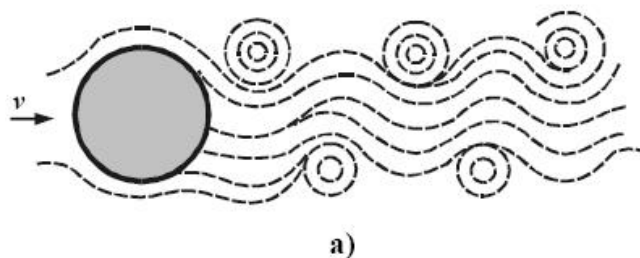
Слика 32. Најчешћи облици цеви код Кориолисових мерача протока [17]

6.8.1. Вртложна мерила

Када флуид у цеви опструјава чврсто тело (причвршћеног управно у цеви), иза њега се формирају вртлози чија је фреквенција пропорционална брзини струјања флуида и вредности Струхаловог броја, а обрнуто карактеристичној димензији уметнутог тела.

$$f = St \frac{c}{d}$$

Постоји велики број различитих типова вртложних мерила, различитих карактеристика и различитих облика уметнутог тела (доња слика под б)). Фреквенције вртлога мере се сензором, који се може налазити у уметном телу или низводно од њега, и то ултразвучним, термалним, сензором притиска итд.



[17]

6.8.2. Избор мерила протока

Карактеристике флуида	хемијски састав, вишефазност, проводљивост, компресибилност, притисак, температура, густина, вискозност,...
Радни услови	мерни опсег Q: max, min, радни; цевовод: D (унутрашњи, спољашњи), материјал, фланше (прирубнице), праве деонице, смер струјања; положај; утицај локалних вибрација,...
Окружење	притисак и температура околине, струјање флуида пумпањем или гравитацијом, стабилност протока, монтирана опрема, максимални пад притиска, електричне сметње,...
Карактеристике мерила	тачност, поновљивост, линеарност, пад притиска, опсег примене, време одзива, материјал,...
Економски услови	цена; трошкови: уградње, експлоатације, одржавања, еталонирања; период: калибрације, гаранције и испоруке; препоруке произвођача;...
Остало	информације о произвођачу, информације о кориснику и специфичност примене, подаци о електро напајању,...

Мерило	Опсег	Тачност	Праве деон.	Пара	Гас	Течност			
						Проводљива		Непроводљива	
	Q_{max}/Q_{min}	%	xD/yD			Чиста	Муљ	Чиста	Муљ
Вортекс	1:20	0,7-1	15/5	+	+	+		+	
Ротаметар	1:10	1,6	-	+	+	+		+	
Пригушница	1:5	0,6-2	10/5	+	+	+	+	+	+
Пито ст. сонда				+	+	+		+	
Турбинско	1:20	0,5-1	15/5	+	+	+		+	
Термално	1:150	1	15/5		+				
Кориолис	1:100	0,1	-		+	+	+	+	+
Прелив	1:20		-			+		+	
УЗ – преносиви	1:10	1-3	5/3		+	+	+	+	+
Ултразвучно	1:100	1-3	10/3			+	+	+	+
Електромагн.	1:100	0,2	3/2			+	+		

7. Мерење фреквенције обртања, силе, момента и снаге погонских и гоњених машина [1]

Струјање флуида остварује се помоћу струјних машина, код којих је неопходно познавање степена корисности. Нпр., код пумпе унутрашњи степен корисности једнак је односу хидрауличке и унутрашње снаге (која се мери на вратилу између пумпе и електромотора)

$$\eta_i = \frac{P_h}{P_i} = \frac{\rho Q Y}{P_i}$$

Унутрашња снага, снага на вратилу између пумпе и електромотора, одређује се нпр. мерењем момента и кружне фреквенце обртања

$$P = M\omega; \omega = \frac{\pi n}{30}$$

Мерење снаге може да се обави и помоћу електричних машина, нпр. мерење снаге се врши помоћу два ватметра. При томе се измерена снага умањује за губитке електричне машине (губици: у баку, у гвожђу, на трење у лежајевима, вентилациони) који зависе од струје, напона и брзине обртања, како би се добила снага на вратилу.

Мерила за мерење фреквенције обртања

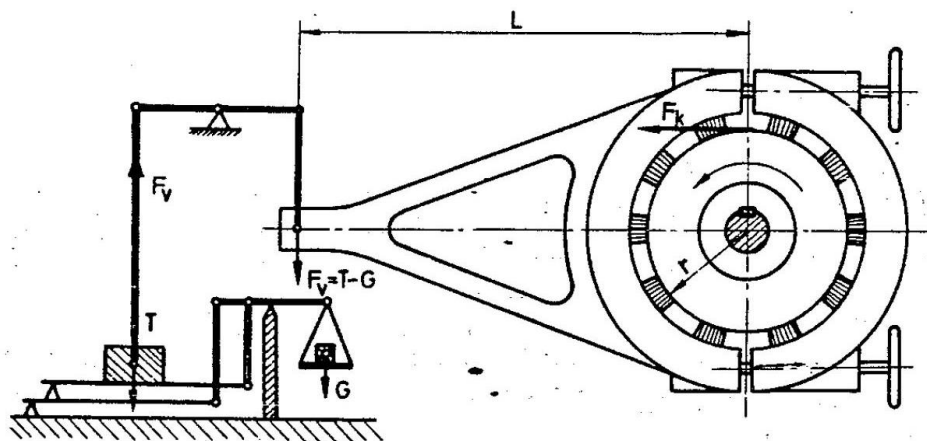
- 1) Механичка мерила (Ручни бројач брзине обртања – мери број обртаја за неко време $n = N / T$; Ручни тахометар; Тахометар на принципу вртложних струја).
- 2) Електронска мерила (као давач импулса користе се фотоелектрични, индуктивни, механички и други давачи).

Мерила за мерење момента

- 1) Помоћу Prony-јеве кочнице

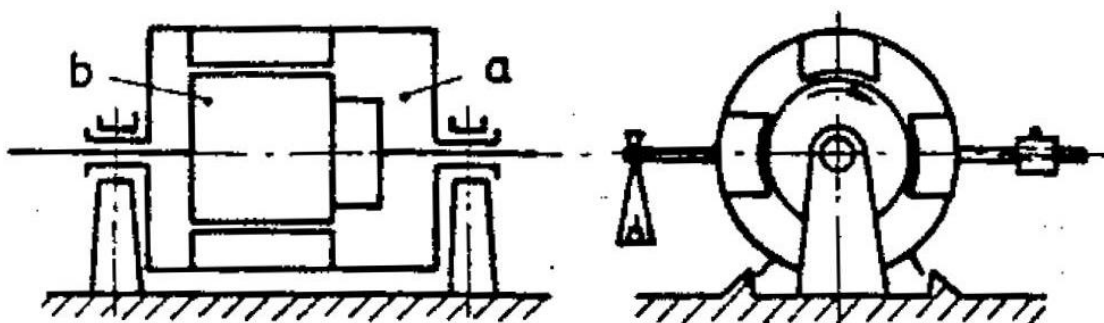
Мерење момента се базира на трењу. На вратило се навлаче челични добош и кочиона облога. Момент на обиму добоша са радијусом r који ствара сила F_k , једнак је моменту на крају полуге L који ствара сила F_v .

$$M = F_k r = F_v L$$



Слика 33. Мерење момента помоћу Prony-јеве кочнице [1]

- 2) Хидраулична кочница.
- 3) Електрична кочница (динамометри) – помоћу двоструког лежишта је омогућено обртање статора.



Слика 33. Електрична кочница (динамометар) [1]

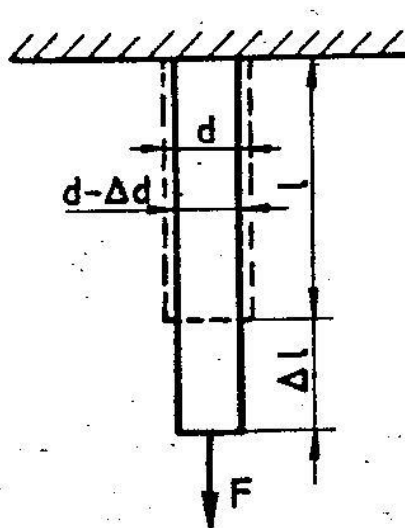
- 4) Торзиони динамометар – за мерење момента се користи увијање вратила, услед еластичности материјала од којег је вратило израђено. Стањено вратило, које је део мерила, уграђује се између спојница вратила машина.

Примена мерних трака за мерење сила и момената

О мерним тракама детаљније ће бити речи у другом делу предмета – Сензори, па ће се дати пар напомена.

На одређена места машинских елемената лепе се жичани елементи који могу да се деформишу, што изазива промену отпора.

Уколико се посматра штап одређене дужине L , пречника d на који делује сила F , могу се дефинисати одређене карактеристичне величине:



$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ - јединично (специфично) издужење или деформација

$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0}$ - контракција материјала

$\mu = \frac{\psi}{\varepsilon}$ - Poisson-ова константа (коэффицијент)

Могуће је наћи, за сваки материјал, зависност напона у материјалу и издужења. Карактеристични напони у материјалу су: σ_p - граница пропорционалности; σ_E - граница еластичности; σ_v - граница пластичности (течења) и σ_m - затезна чврстоћа

Коефицијент правца праволинијског дела зависности напона у материјалу и издужења $\text{tg} \varphi = E$ - је модул еластичности, односно

$$\text{tg} \varphi = E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \Rightarrow \sigma = \varepsilon E$$

Стога, мерне траке се користе у области Хooke-овог закона, и оне представљају отпорне даваче чији се отпор линеарно мења у функцији од издужења. Веза између ових величина је

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} = K \varepsilon$$

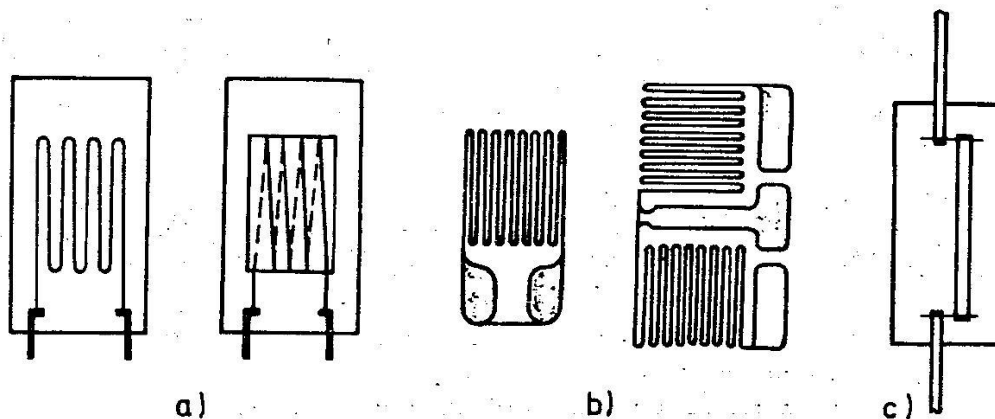
где је: $\Delta R/R$ - релативна промена отпора мерне траке, K - коефицијент пропорционалности тзв. фактор осетљивости мерне траке.

Проблем мерења деформација се своди на проблем мерења отпора!

Врсте мерних трака:

- a) жичане ($K = 2$)
- b) фолијске ($K = 2$)
- c) полупроводничке ($K = 200$)

Код прве две врсте танка жица или фолија се лепи за подлогу специјалним лепком и пресвлачи заштитном фолијом.

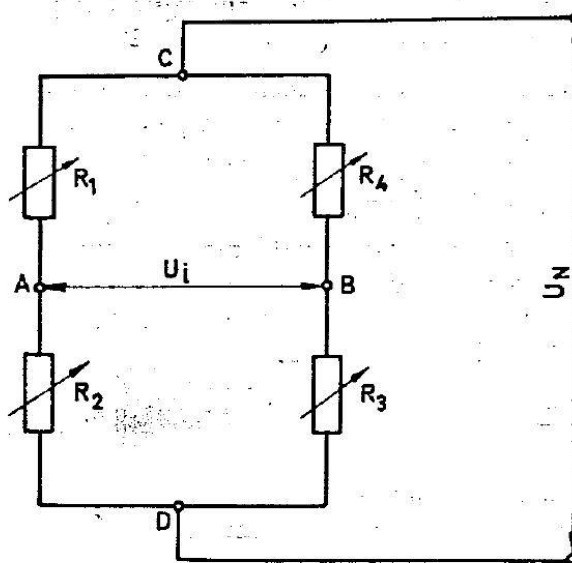


Слика 33. Врсте мерних трака: а) жичане, б) фолијске и с) полупроводничке

Принцип мерења мерних трака заснива се на вези (мерење истезања материјала помоћу мерних трака)

$$\Delta R = K \varepsilon R.$$

За релативно мало истезање добија се мала промена отпора, која се најефикасније може мерити преко Wheatson-овог мост, који се састоји од 4 гране и који се напаја, у тачкама С и D, константним једносмерним или наизменичним напоном u_N .



Излазни напон је

$$u_i = u_N \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2) - (R_3 + R_4)}$$

Мост је у равнотежи када је

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

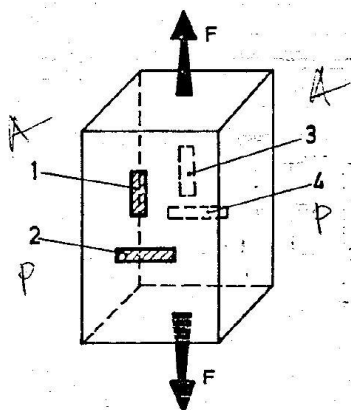
Када се сваки од отпора промени за ΔR

$$u_i = u_N \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

и ако се замени $\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon$, добија се

$$u_i = u_N \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Мерење сила помоћу мерних трака:

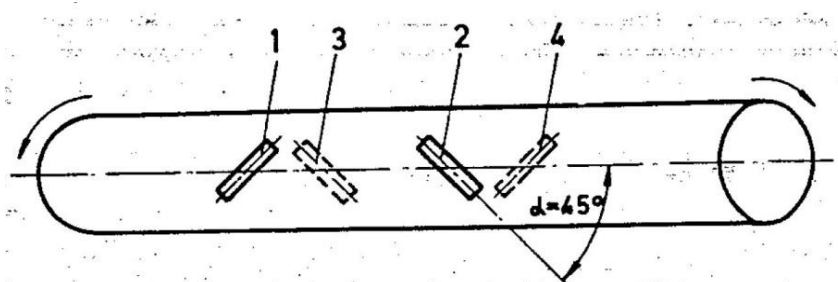


Траке 1 и 3 су активне, а 2 и 4 су пасивне.

$$u_i = u_N \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = u_N \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - (-\mu \varepsilon_1) + \varepsilon_3 - (-\mu \varepsilon_3)) = u_N \frac{K}{4} \varepsilon (2 + 2\mu)$$

$$F = \sigma A = \varepsilon EA = \frac{u_i}{u_N} \frac{4EA}{K} \frac{1}{(2 + 2\mu)}$$

Мерење момента помоћу мерних трака:



Коришћена литература:

1. Основе технике мерења, Иво Вушковић, Машински факултет Универзитета у Београду, 1977.
2. Предавања из предмета Техника мерења, Мирослав Бенишек, Машински факултет Универзитета у Београду.
3. Техника мерења – збирка задатака из струјно-техничких мерења, Бенишек М., Недељковић М., Килибарда Р., Герасимовић Д., Машински факултет Универзитета у Београду 2000, (пето издање).
4. Fachlabor für Strömungsmaschinen, Pfeleiderer-Institut für Strömungsmaschinen TU Braunschweig WS 2003/04.
5. Чантрак Ђ. Анализа вртложног језгра и структуре турбуленције у правој цеви кружног попречног пресека иза кола аксијалних вентилатора применом PIV, LDA и HWA метода, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2012.
6. ISO 5198:1987 Centrifugal, mixed flow and axial pumps – Code for hydraulic performance tests – Precision Class
7. ISO 5801:2007 Industrial fans - Performance testing using standardized airways
8. ISO 4185:1980 Measurement of liquid flow in closed conduits - Weighing method
9. ISO 8316:1987 - Measurements of liquid flow in closed conduits - Method by collection of the liquid in a volumetric tank
10. SRPS ISO 5167-1:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements
11. SRPS ISO 5167-2:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 2: Orifice plates
12. SRPS ISO 5167-3:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 3: Nozzles and Venturi nozzles
13. SRPS ISO 5167-4:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 4: Venturi tubes
14. ISO 3966:2008 - Measurement of fluid flow in closed conduits - Velocity area method using Pitot static tubes
15. www.dantecdynamics.com/
16. <http://www.tsi.com>
17. <http://www.emerson.com>