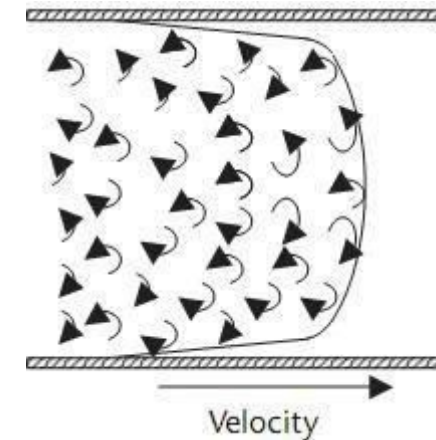
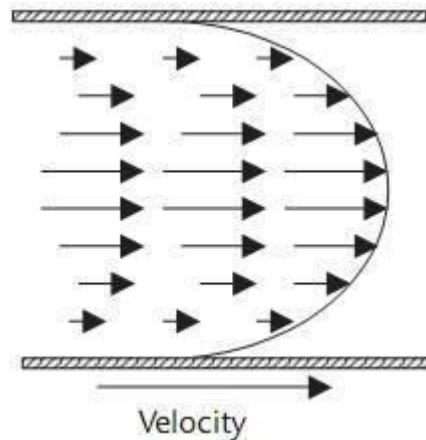
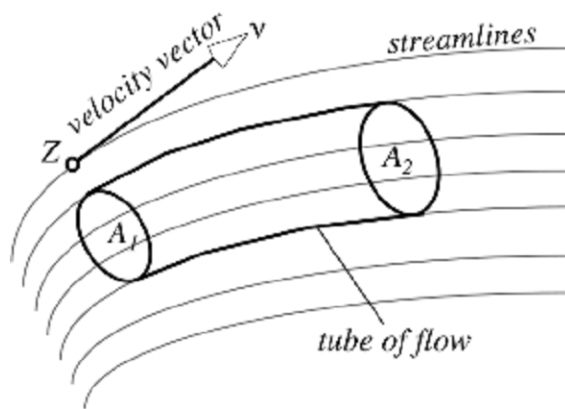
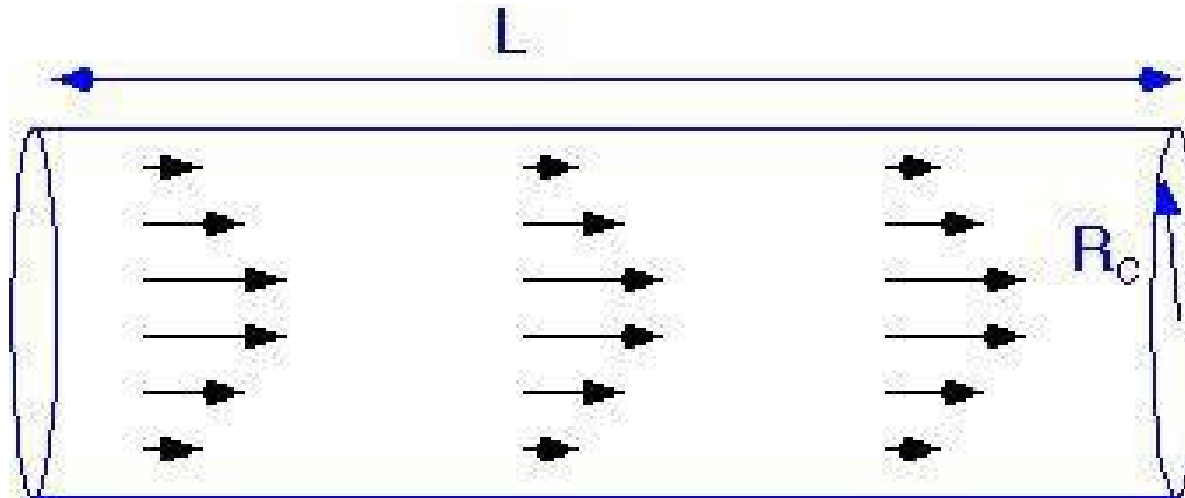


SENZORI PROTOKA

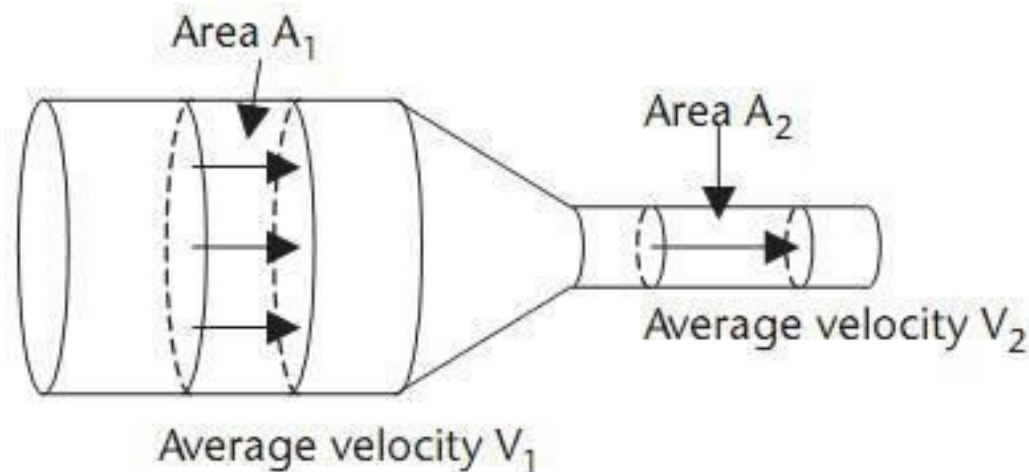
- Merenje protoka je veoma bitno u velikom broju industrijskih aplikacija.
- Posebno su značajna obračunska merenje, jer se cena gasova i tečnosti određuje na osnovu protoka kroz cevi.
- Najčešće se meri protok vode, nafte, benzina, raznih rastvora, kiseonika, vazduha, azota, ugljenmonoksida, ugljendioksida, metana, vodene pare, itd.
- Laminarno kretanje
- Turbulentno kretanje .
- Da li je brzina kretanja ista duž poprečnog preseka fluida?



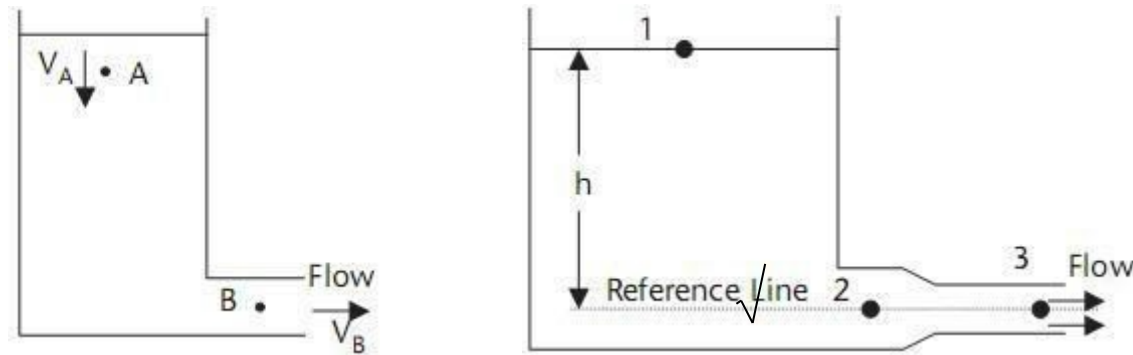
- Za brzinu fluida uzima se srednja vrednost fluida duž poprečnog preseka. Kada je kretanje laminarno, čestice se kreću glatko u okviru sloja. Pri trubulentnom kretanju, čestice se više ne kreću u slojevima, a profil brzine više nije paraboličan već približno ravan.



- Način kretanja fluida određen je Reynoldsovim brojem (R):
 - $R < 2000$ tok je sigurno laminaran,
 - $2000 < R < 5000$, tok može biti ili laminaran, ili turbulentan ili mešavina oba, što zavisi od drugih faktora,
 - $R > 5000$ tok je sigurno turbulentan.
- Jednačina kontinuiteta: $Q = Av = \text{const}$, gde je Q zapreminski protok.
- Za stišljive fluida $Q_m = \rho Av = \text{const}$, gde je Q_m maseni protok.



- Bernulijeva (*Bernouilli*) jednačina.



- Bernulijeva jednačina ne uzima u obzir gubitke koji se javljaju usled viskoznog trenja i na barijerama kao što su ventili, prevoji, suženjima, itd.
- Izraz za protok treba modifikovati koeficijentom C_D koji zavisi od veličine i oblika prigušnice (*orifice*, često i merna blenda) i predstavlja izlazne gubite: $Q = C_D A v$.
- Gubici usled trenja (viskoznog između slojeva i u dodiru sa zidom cevi):

$$h_{L, \text{friction}} = \frac{f L v^2}{2 D g}, \text{ gde je } L \text{ dužina cevi, a } f \text{ faktor trenja.}$$

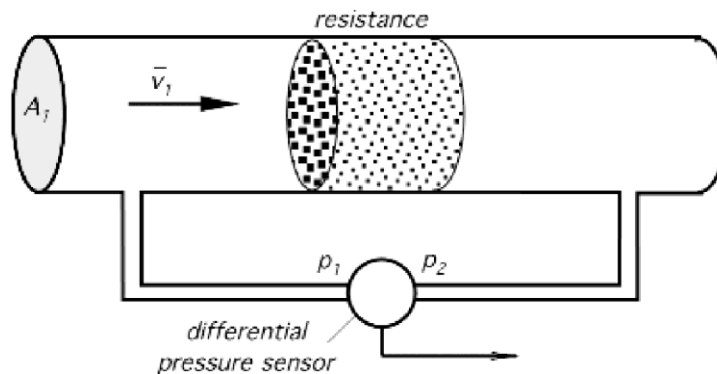
- Gubici na spojevima (spoj dve cevi):

$$h_{L, \text{fitting}} = \frac{K v^2}{2 D g}, \text{ } K \text{ faktor sprege.}$$

- Rad ovih protokometara zasnovan je na Bernulijevoj jednačini.
- Pad pritiska je direktno srazmeran protoku, a koeficijent proporcionalnosti predstavlja otpornost cevi.
- Otpornost unosi prigušnica, Venturijeva cev, Dalova cev, cev sa pregibom, itd.

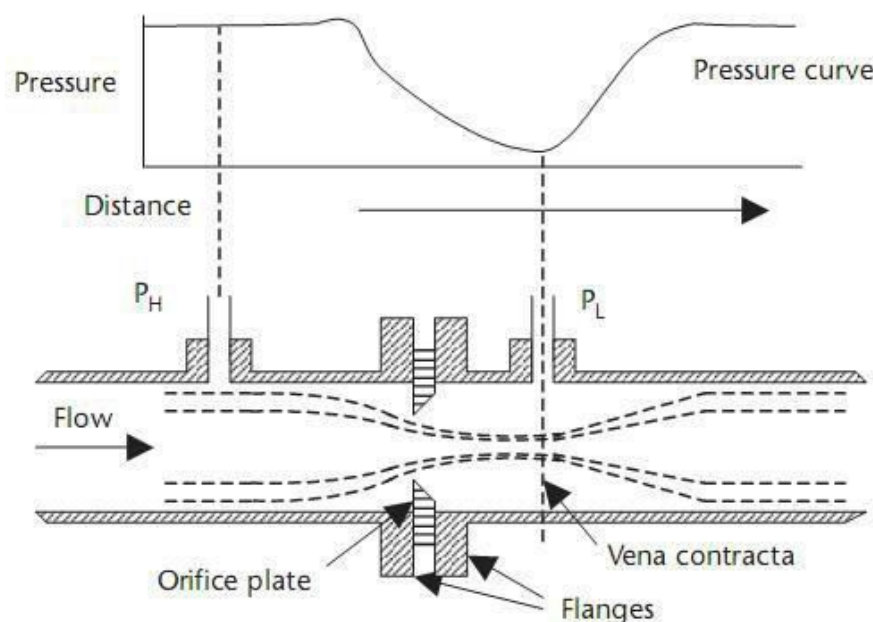
- Usled otpornosti povećava se brzina na delu cevi:

$v_2 = Rv_1$, gde je R otpornost dela cevi



- Protok se može izračunati po sledećoj formuli: $Q = \xi A_2 \Delta p$, gde je ξ koeficijent koji se određuje kalibracijom i zavisi od temperature.
- Prednost ovih merača protoka je što nema pokretne delove, ali unose pad pritiska.

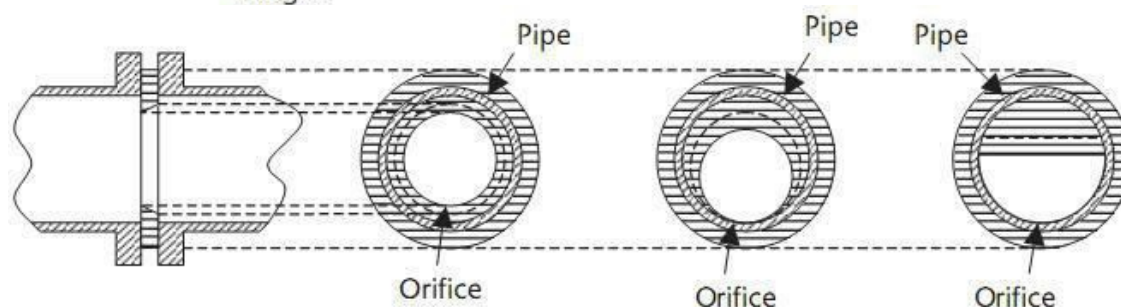
- Protokometri sa prigušnicom (mernom blendom) – između spoja dva dela cevi unosi se dijafragma koja sužava poprečni prečnik cevi.
- Ispred i iza dijafragme javlja se pad pritiska koja se meri nekim od merača diferencijalnog pritiska.



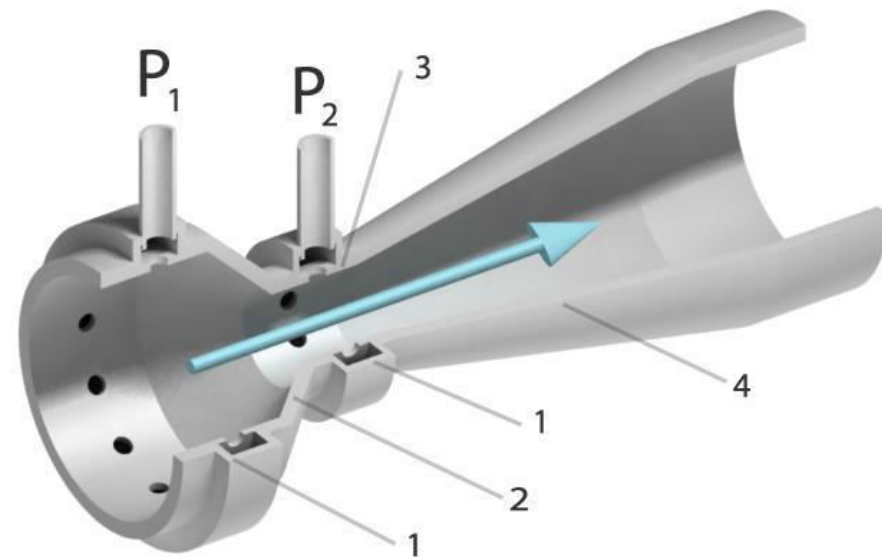
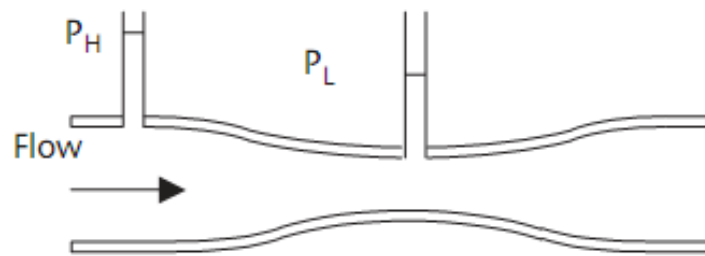
- Protok se računa po sledećoj formuli:

$$Q = K \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_s}{d_p} \right)^2 \sqrt{\Delta p}$$

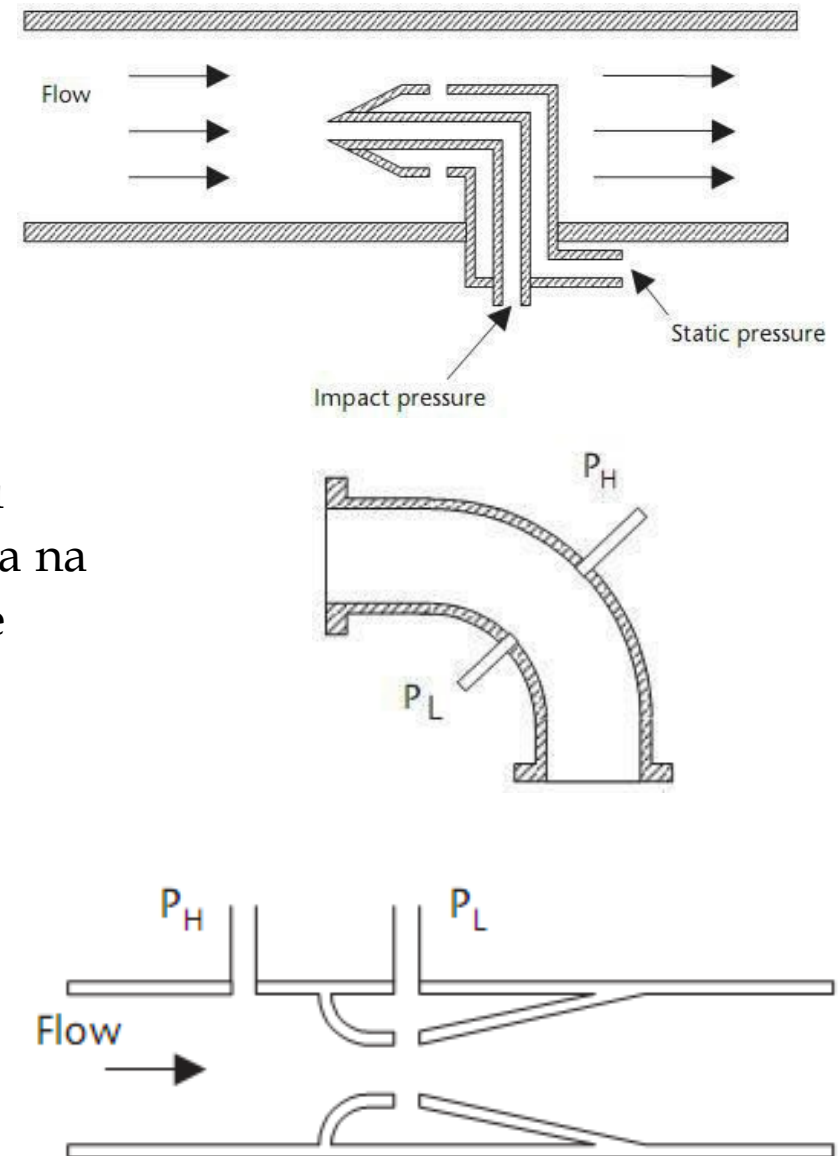
- gde je d_s prečnik prigušnice, a d_p prečnik cevi, K koeficijent koji se određuje kalibracijom.



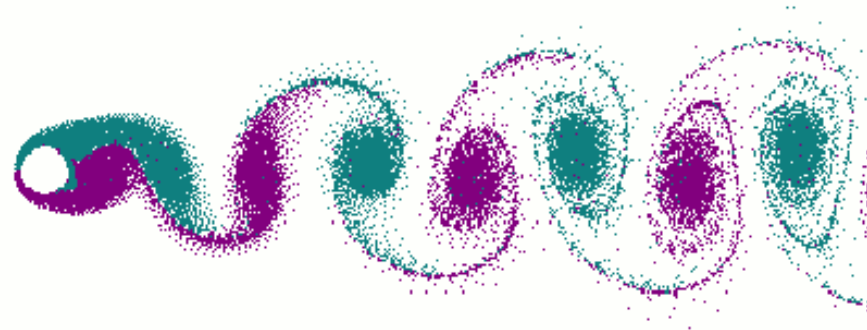
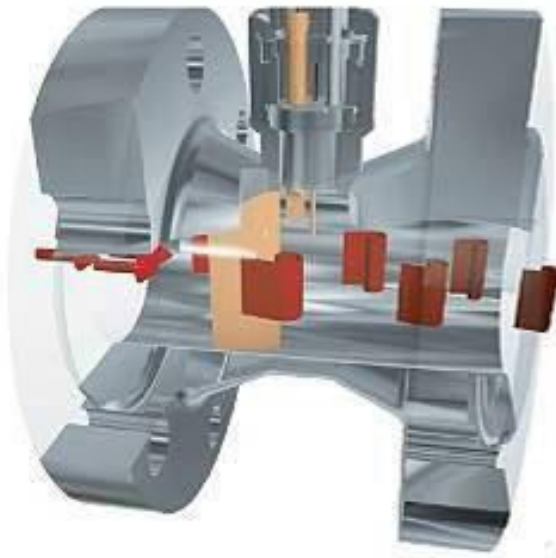
- Protokometri sa Venturijevom cevi predstavljaju cev sa suženjem.
- Diferencijalni pritisak se meri na najširem i najužem delu cevi.
- Venturijeva cev je preciznija od drugih merača protoka na bazi diferencijalnog pritiska, unosi manje gubitke pritiska i stvara manje turbulencije, ali je i najskuplja.
- Može se koristiti i za merenje protoka tečnosti u kojoj je suspendovana veća količina čvrste supstance.



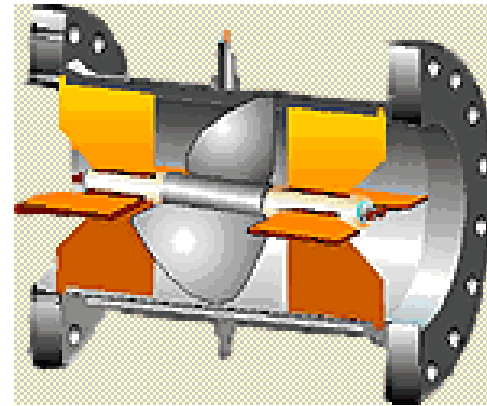
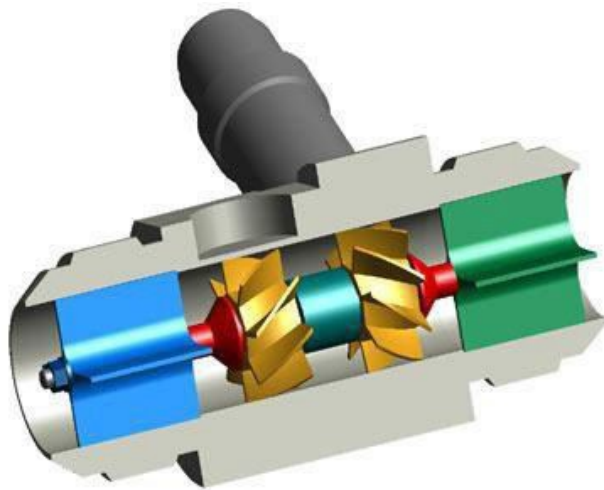
- Pitoova cev – meri se razlika pritiska koja se javlja usled zaustavljanja fluida na vrhu Pitoove cevi. Mora se kalibrirati nakon postavljanja, jer Pitoova cev kviri profil brzine proticanja fluida.
- Protokometri na bazi cevi sa pregibom. U toku kretanja fluida kroz cev javlja se razlika pritiska na spoljašnoj i unutrašnjoj strani krivine. Protok je srazmeran toj razlici pritisaka.
- Dalova (*Dall*) cev – unosi najmanje gubitke, odnosno stvara najmanji pad pritiska. Odnos otvora prigušnici d i prečnika cevi D kreće se između 0.2 i 0.6. Veća vrednost d/D daje veću osetljivost, ali povećava pad pritiska i može izazvati turbulencije.



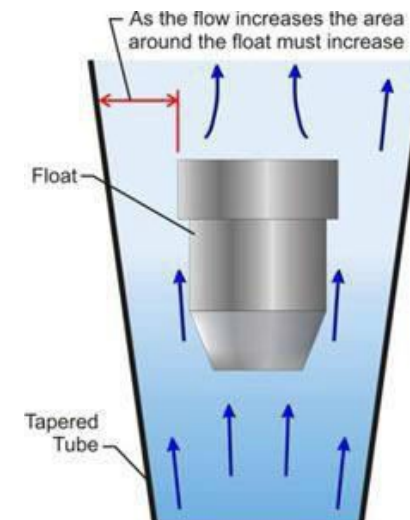
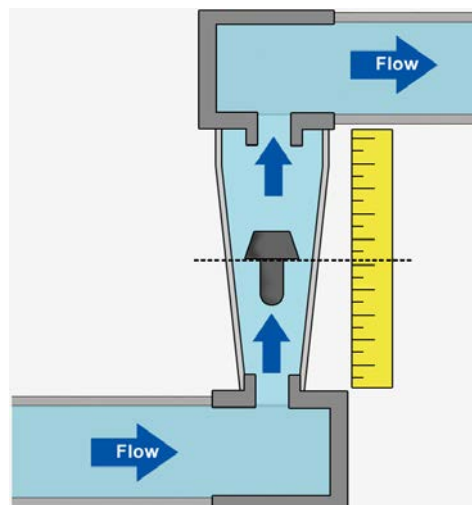
- Merači protoka na bazi merenje frekvencije turbulencije (*vortex*) – koriste se za merenje većih brzina strujanja fluida. U cev se unosi prepreka, iza koje se stvara turbulentno kretanje, frekvencija vrtloga je direktno proporcionalna brzini fluida. Frekvencije vrtloga se mogu meriti ultrazvučnim senzorom. Za male brzine strujanja, merenje postaje nestabilno, jer se frekvencija vrtloga drastično smanjuje.



- Turbina se unosi u cev i postavlja u njen centar. Ugaona brzina obrtanja turbine direktno je proporcionalna brzini fluida. Turbina se obično pravi od metala, a ugaona brzina se meri ili blizinskim ili Holovim senzorom. Mana je što dolazi do većeg pada pritiska. Da bi se savladale otporne sile, protok fluida mora stvoriti dovoljan moment da bi okretao turbinu, pa turbina ne reaguje na male brzine proticanja fluida.

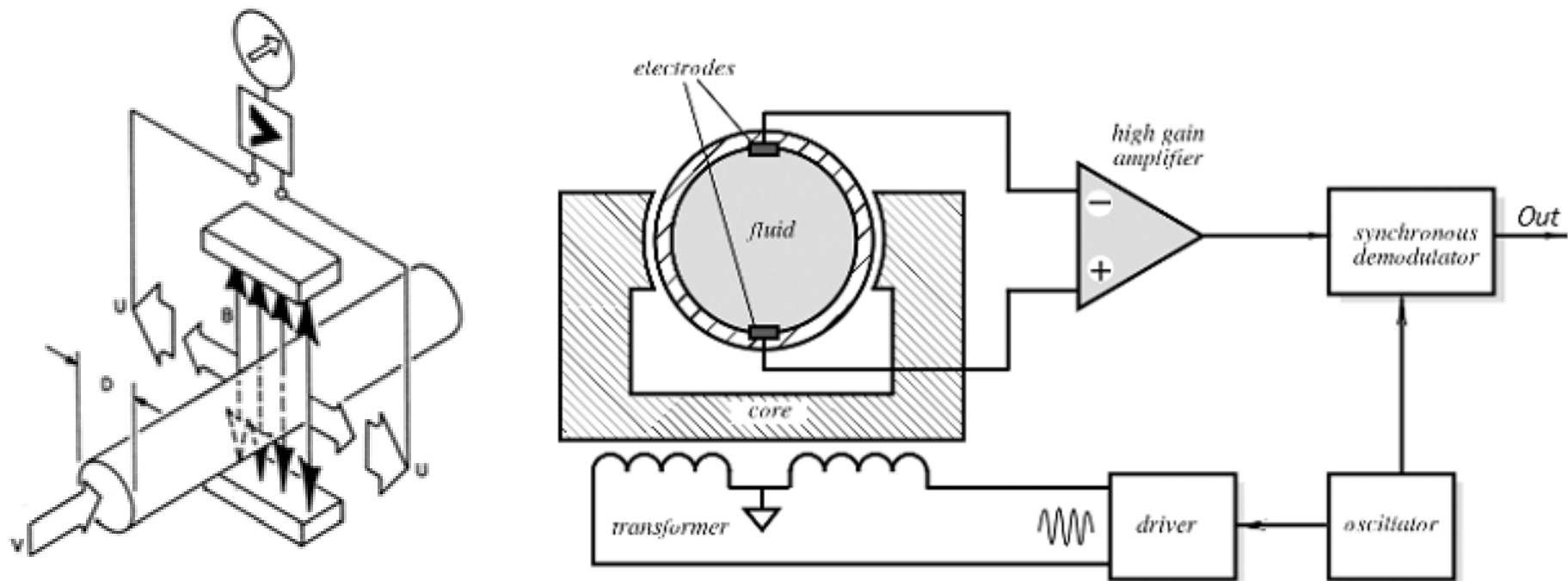


- Volumetrijski merači se koriste za obračunska merila. Potpuno zatvaraju cev, svaki obrtaj propušta tačno definisanu zapreminu fluida. U slučaju da se senzor zaglavi, fluid ne može proticati kroz merač, pa nema gubitaka, za razliku od drugih merača, gde može proteći znatna količina fluida pre detekcije kvara merača.

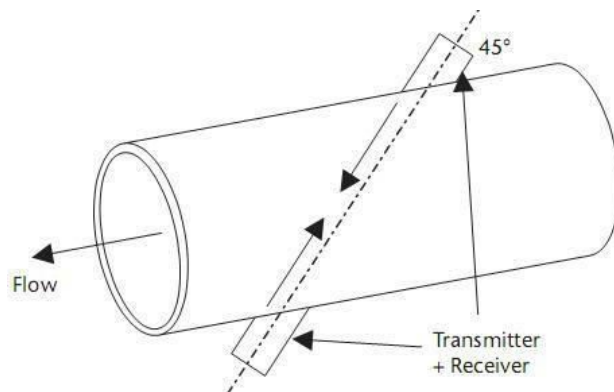


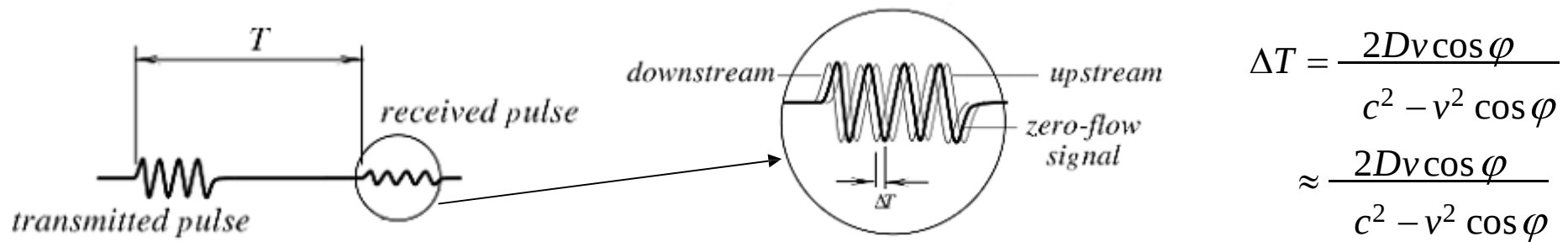
- Rotametar – za vizuelno očitavanje brzine protoka. Sastoji se od cevi koja se postepeno širi ka vrhu. Plovak se podiže naviše sa porastom brzine proticanja. U ravnoteži, sila zemljine teže i sila koju stvara razlika pritiska su jednake. Ako se koristi u zatvorenoj cevi, plovak može biti napravljen od magnetnog materijala, pa se njegov položaj može detektovati pomoću Holovih senzora.

- Za merenje protoka provodnih tečnosti.
- Princip rada je zasnovan na Lorencovoj sili – na pokretna naelektisanja, uneta u magnetno polje deluje sila koja ih razdvaja.
- Magnetno polje je obično AC, jer DC polje stvara malu struju pa se javlja napona na elektrodama. Frekvencija AC napajanja mora biti veća od najveće frekvencije promene brzine fluida, i obično se kreće između 100 i 1000 Hz.

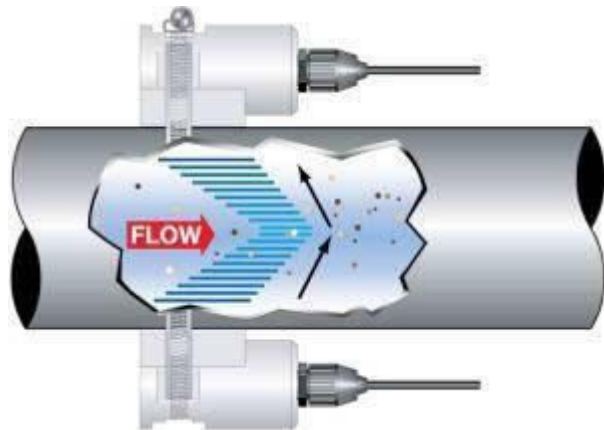


- Dve metode – merenje vremena preleta ili na bazi Doplerovog efekta.
- Merenje na bazi vremena preleta – postavljena su dva para predajnik-prijemnik. Jedan par emituje utlrazvuk u pravcu toka fluida, drugi u suprotnom pravcu. Pravac emitovanja je najčešće pod uglom od 45° u odnosu na osu cevi. Metoda je diferencijalna, i uklanja uticaj temperature koji se ogleda u promeni brzine prostiranja zvuka u fluidu. Frekvencija ultrazvuka je oko 1 MHz. Ne ometaju protok, ne korodiraju, mogu meriti i brzo promenljive protoke, jedino što može uticati na njihov rad je promena brzine protoka duže preseka cevi. Mogu se ugraditi u cev ili postaviti na nju (potrabl verzija – potrebna prilikom ispitivanja cevovoda).



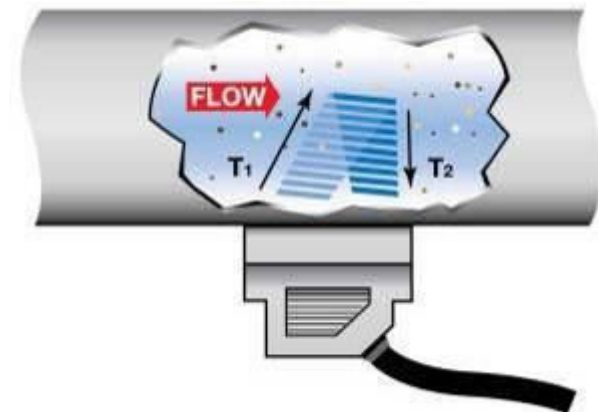


- Na bazi Doplerovog efekta – dolazi do promene frekvencije prilikom refleksije ultrazvuka od sitnih čestica koje se nalaze u fluidu (veće od 35 μm).
- Sa jednom ili dve glave – brzina fluida je direktno proporcionalna razlici frekvencija emitovanog i primljenog signala. Kontinualno se emituje ultrazvuk. Kod oba tipa merenja neophodno je da tečnost potpuno ispunjava cev.

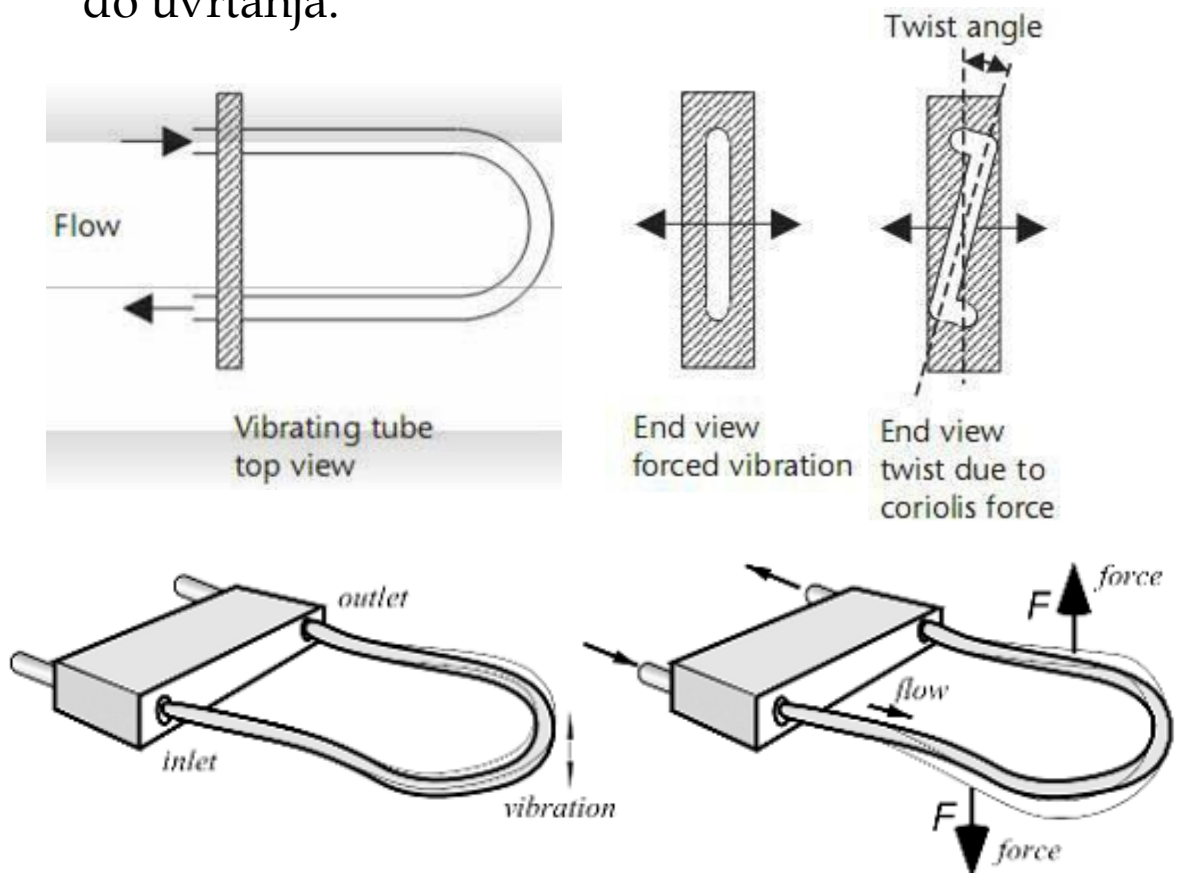


$$\Delta f = f_{send} - f_{receive}$$

$$\approx \pm \frac{2 f_{send}}{c}$$

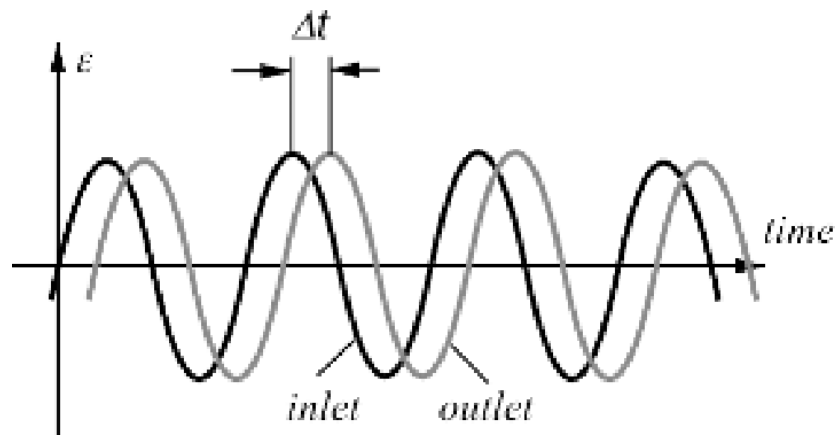


- Koriolisovi protokometri se koriste za merenje zapreminskog protoka i masenog protoka, pri čemu se može meriti gustina i temperatura tečnosti.
- Koristi se konfiguracija sa pravom cevi ili kužnom. U oba slučaja cev prinudno osciluje normalno na pravac kretanja tečnosti. Usled delovanja Koriolisove sile dolazi do uvrtnja.



- Cev je od nerđajućeg čelika. Tanje cevi se koriste za merenje protoka gasova, a deblje za tečnosti.
- Vibriranje cevi se ostvaruje spoljašnjim elektromehaničkim sistemom.
- Koristi se u naftnoj, petrohemijskoj, farmaceutskoj industriji, industriji hrane i pića, papirnoj industriji.

- Uvrtanje cevi je direktno proporcionalno masenom protoku.
- Kada je postoji protok, javlja se fazna razlika između ulaznog i izlaznog kraja cevi.



- Najčešći opseg merenje je od 0.9 kg/h pa do 18000 kg/h.
- Predstavljaju skuplje senzore i cena im se obično kreće od 7000 do 27000 \$, jer su posebno pogodni za obračunska merenja, pre svega u naftnoj industriji.

- Kalibracioni koeficijenti zavise od geometrije i materijala od kog je napravljena cev, a ne od karakteristika fluida, pa nije potrebno rekalisirati protokometar.
- Senzor je potpuno linearan u celom opsegu merenja. Odnos $Q_{\max} : Q_{\min}$ je 100 : 1.
- Senzor nema pokretnih delova, pa je održavanje jednostavno i isplativo.
- Može se meriti protok u oba smera.
- Nije potreban visok naponom napajanja.
- Može se koristiti i u korozivnim sredinama.

- Prava cev se pobuđuje spoljašnom silom F_E . Frekvencija pobude je na rezonantnoj frekvenciji cevi, kako bi se smanjila energija potrebna za vibracije.

- Koriolisova sila:

$$F_C = 2mv \times \omega$$

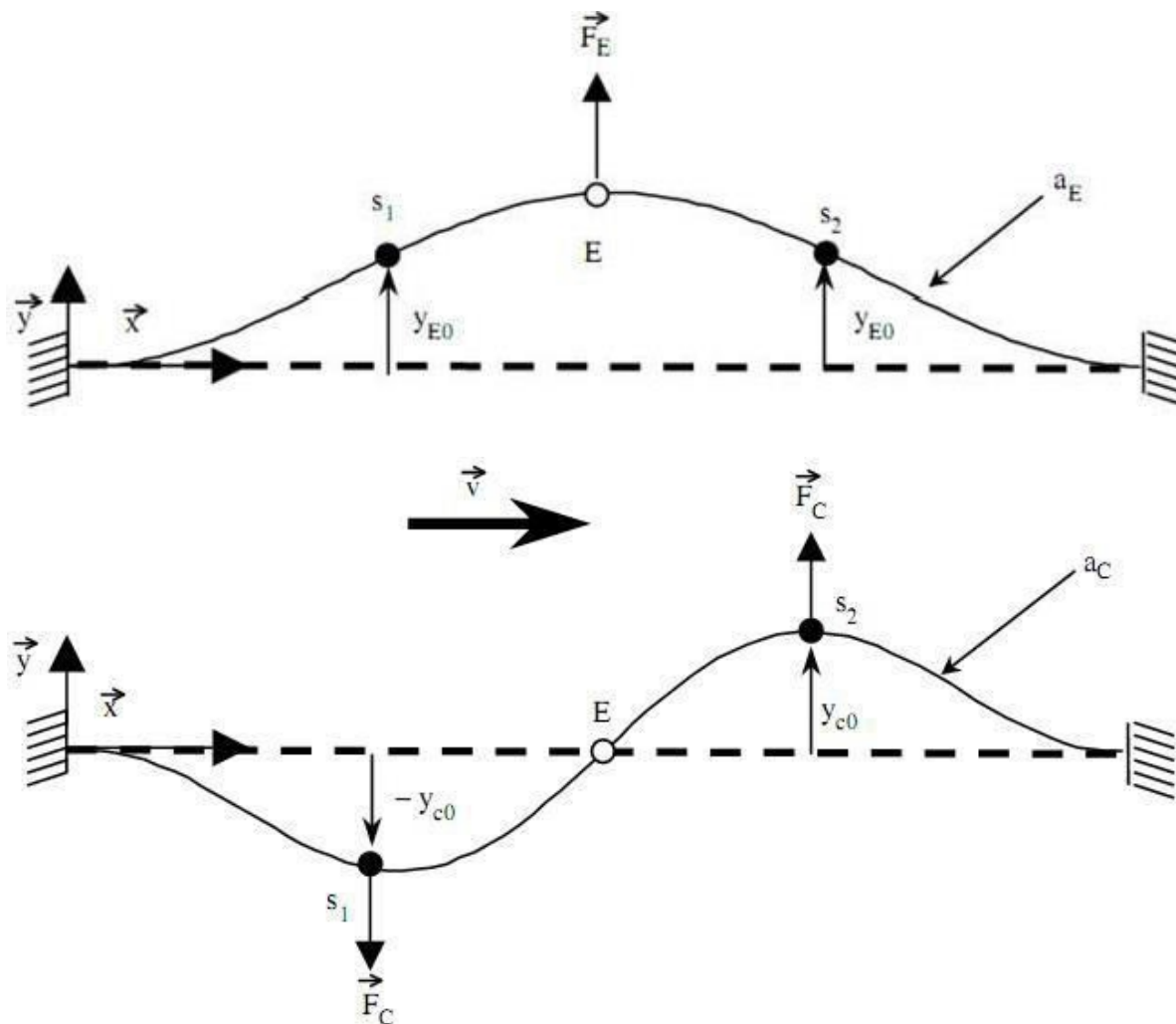
- Za centar cevi je $F_C = 0$, jer je za centralnu tačku ili $\omega = 0$ ili je u toj tački $v \parallel \omega$.

- Ukupno pomeranje tački s_1 i s_2 se može odrediti superpozicijom pomeraja koji nastaju usled delovanja pobudne i Koriolisove sile:

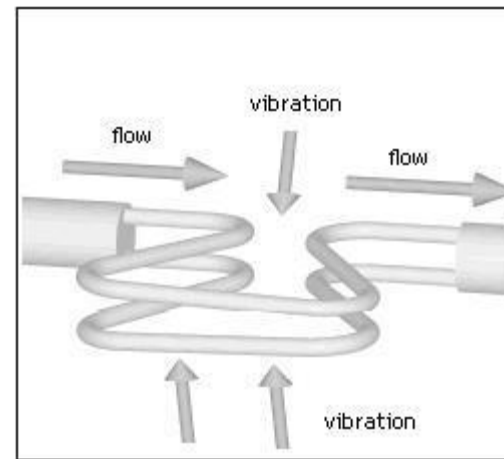
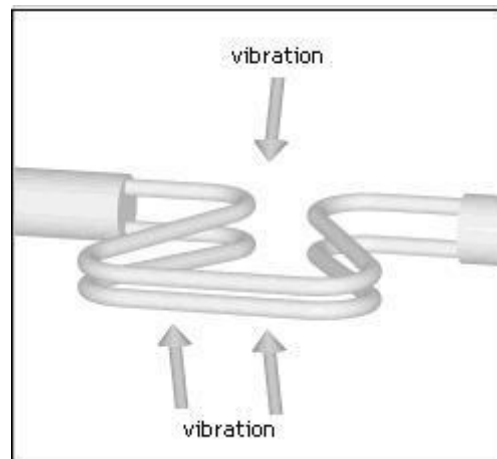
$$y_{s1} = y_{E1} + y_{C1}, y_{s2} = y_{E2} + y_{C2}$$

- vremenska razlika između vibracija tački s_1 i s_2 iznosi:

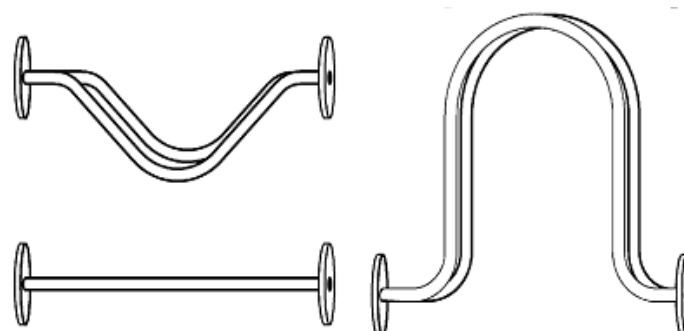
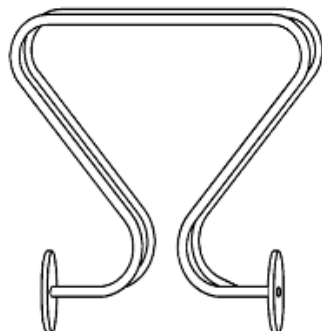
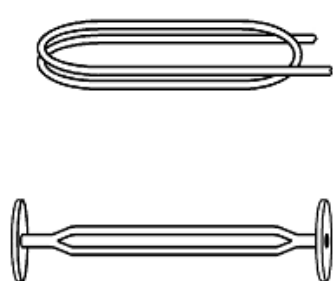
$$\Delta \tau = K \frac{y_{s2,0} - y_{s1,0}}{y_{s2,0} + y_{s1,0}}$$



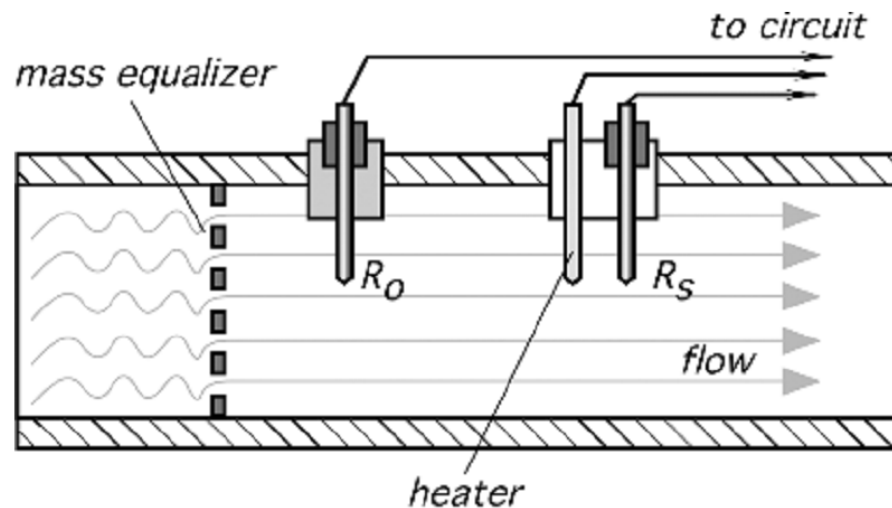
- gde je K konstanta koja zavisi i od oblika i materijala od kog je napravljena cev, ali i od gustine tečnosti čiji se protok meri.
- Za ispravan rad neophodno je meriti temperaturu fluida, jer se konstanta K menja sa temperaturom (dolazi do promene elastičnih svojstva cevi), pa se mora vršiti kompenzacija (mikroprocesorski).
- Gustina se određuje merenjem rezonantne frekvencije cevi, odnosno sistem meri protok, gustinu i temperaturu, što je nepohodno za obračunska merila. Npr, pri obračunavanju protekle količine nafte, izmerena vrednost zapremine se mora preračunati na ekvivalentnu zapreminu nafte pri standardnim uslovima
- (ovi uslovi nisu u svim zemljama isti, najčešći pritisak je atmosferski, a temperatura 15 °C – videti AGA-7 standard).



- Najčešći oblici cevi kod Koriolisovih merača protoka:



- Jedan od jednostavnih principa za merenje protoka sastoji se od ubacivanja markera u tečnost i merenje brzine tog markera. Marker može biti neka druga tečnost (boja), plovak, radioaktivna tečnost.
- Međutim, najčešće je zabranjeno menjati hemijski sastav fluida. Ipak, moguće je promeniti neku karakteristiku fluida, i to je najčešće temperatura.
- Termoanemometri – sadrži dva temperaturna detektora R_0 i R_s . Detektori su termalno izolovani od cevi kako bi se smanjili toplotni gubici. Grejač zagreva fluid. Kada nema kretanja fluida, detektor R_s je bliži i registruje veću temperaturu od R_0 , koji meri temperaturu fluida. Sa povećanjem brzine protoka, veća je disipacija sa grejača, i temperatura detektora R_s opada.



- Brzina fluida iznosi:

$$v = \frac{K}{\rho} \left(\frac{dQ}{dt} \frac{1}{T_s - T_0} \right)^{1.87}$$

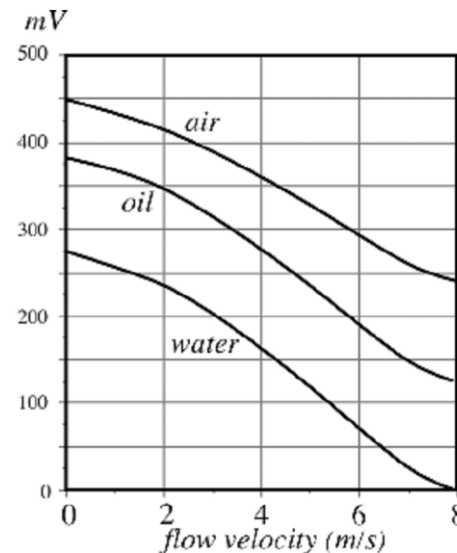
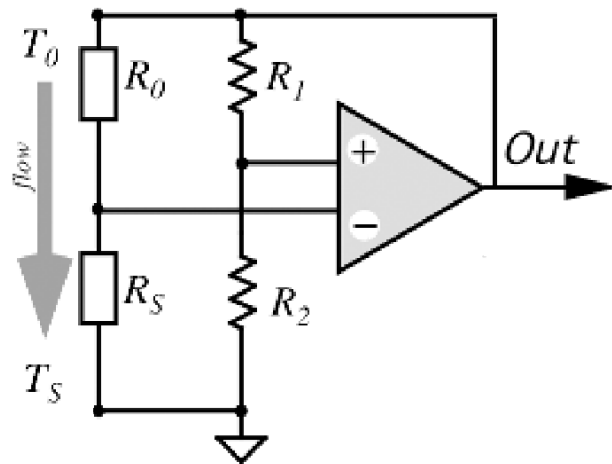
- gde je K kalibraciona konstanta, a ρ gustina fluida.
- Za određivanje brzine fluida pored razlike temperatura potrebno je meriti i toplotne gubitke.

- Da bi se detektor R_s održavao na konstantnoj temperaturi T_s , potrebno je dovesti dodatnu količinu toplote na R_s .
- Može se realizovati senzor i bez grejača, a tada ulogu grejača preuzima detektor R_s , koji radi u samozagrejnog modu, to jest disipacija toplote zbog proticanja fluida kompenzuje se Džulovim gubicima.
- Izraz za brzinu fluida tada postaje:

$$v = \frac{K}{\rho} \left(\frac{e^2}{R_s} \frac{1}{T_s - T_0} \right)^{1.87}, \text{ gde je } e \text{ napon na detektoru, a } R_s \text{ njegova otpornost.}$$

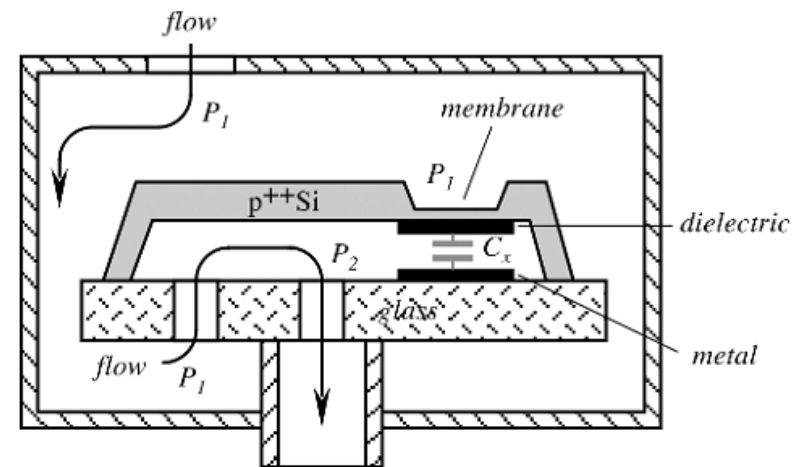
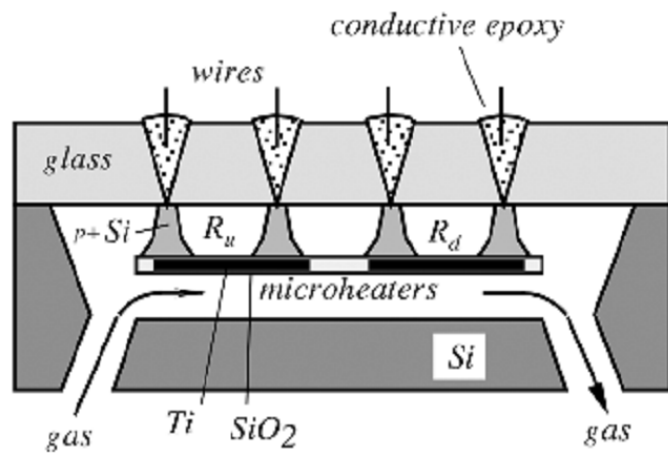
- Neophodno je obezbediti da je temperatura detektora uvek veća od temperature fluida.
- Moguće su dve metode:
 - napon na detektoru se održava konstantnim, a izlazni signal predstavlja razlika temperatura $(T_s - T_0)$,
 - otpornost detektora se održava konstantnom, a izlazni signal je napona na detektoru e .

- Izlazni napon operacionog pojačavača održava most u ravnoteži, a time održava i temperaturu T_s konstantnom.



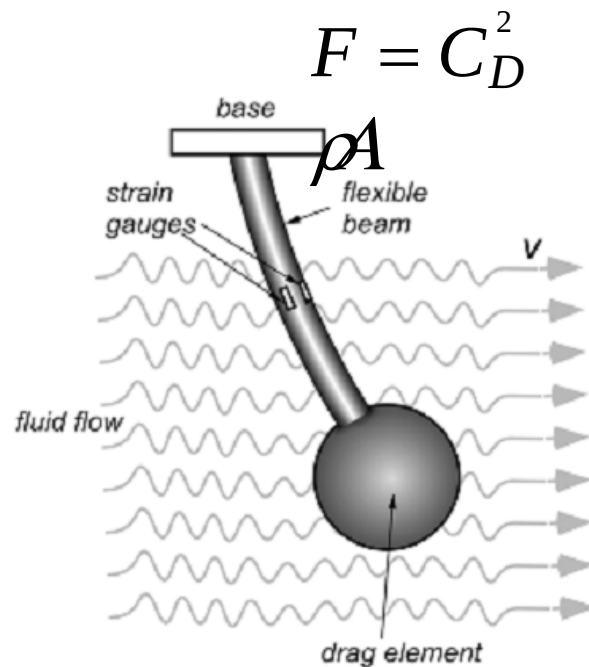
- Sa porastom brzine strujanja, osetljivost opada, za iznad granične brzine senzor postaje neosetljiv, jer čestice fluida suviše brzo prolaze pored detektora R_s , pa se ne ostvaruje dovoljan prenos toplote. Za vazduh, pri atm. pritisku, $v_{\max} = 60$ m/s.
- Kao detektor R_s obično se koristi RTD, ali u nekim primena može se koristiti i NTC, zbog veće osetljivosti, posebno u medicini.
- Mass equilazer* se koristi kako bi se spečilo turbulentno kretanje fluida.
- Najveće prednosti ovih senzora su što mogu meriti veoma male brzine protoka i što nemaju pokretnih delova.

- Minjturni senzori protoka koriste u hemijskoj i farmaceutskoj industriji, kao i u medicini.
- Princip rada mikrosenzora je najčešće zasnovan na radu termalnih senzora protoka. Kao temperaturni senzor koristi se film od titanijuma, jer ima visok temperaturni koeficijent promene otpornost i lako se spreže sa Si.



- Drugi princip je zasnovan na merenju razlike pritiska koja se javlja iznad i ispod membrane, jer se smanjuje poprečni presek kroz koji fluid protiče.
- Razlika pritiska određuje se kapacitivnim senzorom, koji meri naprezanje membrane.
- Senzor i kolo za obradu signala izrađeni su u CMOS tehnologiji, pa je cena senzora mala.

- Senzor protoka na bazi povlačenja (*Drag force flow sensor*) koristi se za merenje protoka pri turbulentnom toku fluida.
- U fluid se ubacuje objekat (meta), koji je nosačem učvršćen. Usled sile koja potiče od proticanja fluida dolazi do naprezanja nosača, i to naprezanje se meri pomoću mernih traka.
- Moguće je meriti merenje brzine fluida u sve 3 dimenzije.
- Koriste se u avio industriji, kao i u istraživačkim laboratorijama.



gde je C_D koeficijent povlačenja, a A poprečni presek mete normalno na pravac kretanja fluida.

